

目 次

(月刊)

(2003年创刊)

第23卷 第8期(总第277期)

2025年8月28日出版

中国学术期刊网络出版总库收录

中国核心期刊(遴选)数据库收录

中文科技期刊数据库收录

《黑龙江国土资源》编辑委员会

顾 问: 张凤荣 吴克宁 郝国杰 王永德

陈 阵

主 编: 吴松涛

副 主 编: 杜国明 周传芳

执行主编: 王 月

编 委 (按姓氏笔画排序):

于 新 马 辉 王 冠 王 蕾

王成全 王作为 甘 露 冯 喆

朱 逊 刘小宁 许大明 杜兵盈

李向文 李同予 李全峰 李成禄

李城润 李惠芹 李朦朦 佟智强

宋静波 张 力 张 军 张文友

张昊哲 杨 灵 周小新 郑吉林

单景才 赵海山 赵景海 宫金辉

徐立明 高凤杰 高春义 黄朝明

黄善林 崔 禹 商宇航 宿一宁

梁旭方 彭 晓 潘 玮

本期执行编辑: 吴松涛

编 辑: 李佳慧 朱超宇 田 薇

摄 影: 计世伟

主 管: 黑龙江省自然资源厅

主 办: 黑龙江省土地学会

黑龙江省地质学会

黑龙江省矿业协会

观点争鸣

- 人口收缩背景下黑龙江省行政区划设置对策研究 王 月, 吴松涛 (3)

国土空间

- 提效收缩与增效扩张: 村庄建设边界划定研究 关海娇, 崔 禹 (6)
- 多源数据与模型下兴县“三区三线”划定及影响量化研究 白俊兰 (15)
- 基于GEE平台的三江平原地区植被覆盖度时空动态及驱动因素分析 孙林楠, 翁婷婷, 常晓晴, 等 (24)
- 集中居住形式下不同地理环境区域的农村生活污水资源化利用技术的研究与实践综述 祝厚然 (37)
- 收缩城市低效工业用地识别与空间分布特征分析
——以牡丹江建成区为例 张郝萍, 衣霄翔, 荆 莹, 等 (43)
- “三链协调”理念下环境设计对太阳文化创新实现路径研究
——以日照滨海公园改造为例 王 迪, 董馨怡, 马 辉 (57)
- 协同规划视角下乡镇级片区国土空间规划的实践与创新
——以仁和片区国土空间规划为例 施仪琳 (65)

土地科学

- 面向碳中和的区域土地利用变化碳效应时空模拟与优化研究 何亚莉 (74)
- 基于地理探测器的合肥市PM2.5时空分布与土地利用关系研究 冯 艳, 瞿华蓥, 李佳龙 (83)
- 全域土地综合整治实践与优化路径研究
——以安达市任民镇为例 吴 妍 (91)

地质矿产

- 黔东南州工业园区寒武系白云岩地层水文地质特征及含水层划分研究 全宏林 (97)
- 完达山大顶子山蛇绿岩地球化学及其构造意义 孙 刚, 杨云宝, 孙 健, 等 (106)
- 激发极化法与可控源音频大地电磁法在金属矿勘查中的应用 李 丹, 张 哲, 田 超, 等 (115)
- 玄武岩材料的“源—汇”控制论 牛柏然, 姚 宇, 郝小庆, 等 (124)

技术探索

- 基于多指数融合的遥感水体提取方法研究 李 壮, 张璇璞, 张 淇, 等 (130)

CONTENT

(Monthly)

(Published Since 2003)

Vol.23 No.8 (Serial No.277)

Published on Aug.28, 2025

China Academic Journal Network Publishing
Database

China Core Journal Alternative Database

China Science and Technology Journal Database

Editorial Board of Heilongjiang Land and
Resources

Consultants: ZHANG Fengrong WU Kening

HAO Guojie WANG Yongde

CHEN Zhen

Chief Editor: WU Songtao

Associate Chief Editor: DU Guoming

ZHOU Chuanfang

Executive Chief Editor: WANG Yue

Editorial Board Members:

YU Xin MA Hui WANG Guan WANG Lei
WANG Chengquan WANG Zuowei GAN Lu
FENG Zhe ZHU Xun LIU Xiaoning XU Daming
DU Bingying LI Xiangwen LI Tongyu LI Quanfeng
LI Chenglu LI Chengrun LI Huiqin LI Mengmeng
TONG Zhiqiang SONG Jingbo ZHANG Li
ZHANG Jun ZHANG Wenyou ZHANG Haozhe
YANG Ling ZHOU Xiaoxin ZHENG Jilin
SHAN Jingcui ZHAO Haishan ZHAO Jinghai
GONG Jinhui XU Liming GAO Fengjie
GAO Chunyi HUANG Zhaoming HUANG Shanlin
CUI Yu SHANG Yuhang SU Yining
LIANG Xufang PENG Xiao PAN Wei

Executive Editor: WU Songtao

Editor: LI Jiahui ZHU Chaoyu TIAN Wei

Photographer: JI Shiwei

Superintended by: Department of Natural Resources
of Heilongjiang Province

Sponsored by: Heilongjiang Land Science Society
Heilongjiang Geological Society
Heilongjiang Mining Federation

TERRITORIAL SPACE

- Efficiency-Enhancing Contraction and Efficiency-Enhancing Expansion:Case Study of the Demarcation of Village Construction Boundaries GUAN Haijiao,CUI Yu (14)
The Quantitative Research of Delineation and Impact of The “Three Zones and Three Lines” in Xing County under A Multi-Source Data and Model BAI Junlan (23)
Analysis of Spatiotemporal Dynamics and Driving Factors of Vegetation Coverage in the Sanjiang Plain Area based on GEE Platform SUN Linnan,WENG Tingting,CHANG Xiaoqing,et al. (36)
A Review of Research and Practice on Resource Utilization Technology of Rural Domestic Sewage in Different Geographical Environment Areas under Concentrated Residence ZHU Houran (42)
Identification of Inefficient Industrial Land and Analysis of Its Spatial Distribution Characteristics in Shrinking Cities: Case Study of the Built-up Area in Mudanjiang City ZHANG Haoping,YI Xiaoxiang,XING Ying,et al (56)
Realization Path of Solar Culture Innovation in Environmental Design under the Concept of “Three-Chain Coordination”: Case Study of Rizhao Coastal Park Renovation WANG Di,DONG Xinyi,MA Hui (64)
Practice and Innovation of Collaborative Planning from Multiple Perspectives in District Units: Case Study of the Territorial Spatial Planning for the Renhe District in Renhe Area SHI Yilin (73)

LAND SCIENCE

- Spatiotemporal Simulation and Optimization of Carbon Effects of Regional Land Use Change for Carbon Neutrality HE Yali (82)
Research on the Relationship between Spatial and Temporal Distribution of PM2.5 and Land Use in Hefei City based on Geographic Detector FENG Yan,QU Huaying,LI Jialong (90)
Research on the Practice and Optimization Path of Comprehensive Land Consolidation:Case Study of Renmin Town in Anda City WU Yan (96)

GEOLOGY AND MINERALS

- Study on the Hydrogeological Characteristics of Cambrian Dolomite Strata and the Division of Aquifers for the Industrial Park in Qiandongnan Prefecture QUAN Honglin (105)
Geochemistry and Tectonic Significance of the Dadingzishan Ophiolite in the Wanda Mountains SUN Gang,YANG Yunbao,SUN Jian,et al (114)
Application of Induced Polarization Method and Controlled Source Audio Magnetotelluric Method in Metal Mineral Exploration LI Dan,ZHENG Zhe,TIAN Chao (123)
On the Controlling Theory of Source—Application of Basalt Fibers NIU Boran,YAO Yu,HAO Xiaoqing,et al (129)

TECHNOLOGICAL EXPLORATION

- Extraction Methods of Remote Sensing Water Body based on Multi-Index Fusion LI Zhuang,ZHANG Xuanpu,ZHANG Qi,et al (136)

人口收缩背景下黑龙江省行政区划设置对策研究



■ 王月
高级工程师
黑龙江省土地学会副理事长兼秘书长
主要从事收缩城市与区域发展方面的研究



■ 吴松涛
哈尔滨工业大学建筑与设计学院教授,博士生导师
国家注册城市规划师
中国城市科学研究院总师委员会委员
中国城市科学研究院美丽中国建设委员会委员
黑龙江省勘察设计大师
黑龙江省土地学会副理事长
哈尔滨新区总规划师
主要从事国土空间规划理论方法与政策法规、城市景观规划设计、景观建筑方面的研究

党的十八大以来,党中央将行政区划作为党领导人民依照宪法法律、推进国家治理体系和治理能力现代化的重要内容,习近平总书记强调,行政区划本身也是一种重要资源。党的十九届五中全会立足全面建设社会主义现代化国家,提出优化国土空间布局,推进区域协调发展和新型城镇化的部署要求,对优化行政区划设置提出了新的更高的要求。

黑龙江省作为人口收缩极为严重的省份,行政区划工作要加强战略性、系统性、前瞻性研究,确保行政区划设置和调整同国家发展战略、经济社会发展、国防建设需要相适应。因此本研究将在分级界定黑龙江省人口收缩特征的前提下,以促进经济社会协调发展为目标,按照有利于维护国家国防安全、粮食安全、生态安全、能源安全及产业安全的要求,遵循根源剖析、现实依托和问题导向,提出黑龙江省人口持续收缩地区行政区划调整的总体思路和建议。

一、黑龙江省人口收缩型地区行政区划设置主要背景及成因

东北地区的收缩型城市中,有相当一部分是资源枯竭型城市,此外,东北地区的工业化和城镇化较早,计划生育政策执行较为严格,人口出生率较低,老龄化程度较高,这些因素共同加剧了很多中小城市的收缩趋势。

(1) 支撑国家工业发展的城市。新中国成立初期,随着局势的稳定,我国进入了经济发展、战后重建、恢复生产的阶段。一系列国家的重要项目,陆续在东北各地启动。在此背景下,东北地区行政区划设置过于复杂,不利于经济建设。为支持国家工业发展的需要,黑龙江省哈尔滨市、齐齐哈尔市、大庆市、佳木斯市等城市都在新中国成立初期的重工业发展中发挥重要作用。

(2) 因资源而兴的城市。在黑龙江省,存在诸多丰富的矿产资源,为满足发展建设的需要而设立的城市,特别是为了煤炭开采的管理便利性,而先后设立了鸡西市、双鸭山市、鹤岗市和七台河市,因此形成的黑龙江省“四大煤城”的称号

与地位至今仍保留。

(3) 维护边境安全和国防安全的城市。黑龙江省与内蒙古自治区均处于我国边境重要地区,为方便行政管理,两省区之间经历了多次的行政区划调整,最终将大兴安岭地区的行政管辖权划归黑龙江省,直至形成今日稳定的行政区划局面。同时,为维护边境地区的国防安全,保障黑龙江省边境地区行政区划结构合理与稳定,在此后的行政区划调整过程中,1993 年,黑河市被提升为地级市,成为黑龙江省边境地区唯一一个地级市。

二、黑龙江省人口收缩地区行政区划设置存在的问题

黑龙江省是我国人口流失现象最为突出的省份之一,全省常住总人口在持续减少,过去十年间,黑龙江 13 个地市人口均呈持续下降趋势。城市人口流失形成了“收缩性城市”,黑龙江省的“城扩人走”的现象正在形成,对全省的各级行政管理与社会治理都带来了巨大的威胁与挑战。

1. 中心城市与所辖城市(区)空间耦合度不高,人口收缩加剧了资源配置竞争,中心城市难以带动辖区高质量发展。

省域中心城市哈尔滨市各市辖区布局分散,空间上尚未形成一体化发展态势,中心城市对其周边区域带动能力有限。例如哈尔滨市的依兰县,与邻近的佳木斯市在区域要素流动方面更为紧密,且距离哈尔滨市中心较远,受其带动作用较弱,现有行政区划难以促进地方经济发展。此外,我省安达市与大庆市毗邻,产业关联度较高、合作深入,但目前分属不同的行政区划对于该区域一体化格局的形成造成了一定的阻碍。第七次全国人口普查(以下简称七普)数据显示,我省在全域人口、市域人口大量外流的情况下,人口多向省会城市及地级市市辖区集聚,中心城市和节点城市的“虹吸”效应明显,但辐射作用不强。因此人口收缩态势将进一步加剧中心城市、节点城市和周边辖区的资源配置竞争,使得行政

资源浪费现象更加突出。

2. 资源型城市市辖区行政单元规模小、数量多,人口收缩对行政成本优化和行政效率提升提出了严峻的挑战。

我省资源型城市原有的“资源导向”的行政区划模式问题突出。根据《全国资源型城市可持续发展规划(2013—2020 年)》,我省资源型城市包括黑河市、大庆市、鸡西市及大兴安岭地区等共 9 个市(地),5 个为衰退型,七普数据显示,这些城市整体人口流失率在 15. 81%~35. 24% 之间,人口流失率较高,且叠加资源枯竭、气候等因素,未来人口难以实现大幅增长,甚至维系现状,因而进一步加剧了市辖区的城市收缩。最突出的问题是市辖区普遍数量偏多、人口规模偏小,导致行政成本过高、效率低下。例如鸡西市和鹤岗等市辖区数量 5~7 个,个别行政区辖区常住人口规模不足 5 万人。

3. 边境地区城市行政级别偏低,人口规模小,不利于我省发挥对俄优势,且人口收缩不利于保障国防安全。

我省对俄边境线长达 3000 余公里,沿边分布的 18 个市县中地级市仅 1 个—黑河市,整体行政级别较低,人口、资本、技术等要素集聚能力有限。俄远东三大城市均为俄罗斯一级行政单元首府,且均分布在中俄边境,人口占远东地区三分之一,引领远东地区区域要素集聚。我省边境城市与对应俄方城市行政等级匹配度较低,难以发挥中俄城市对等交流的作用和国防安全保障的要求。据七普数据统计,沿边唯一的地级市黑河市市域人口流失率高达 23%,18 个边境县(市、区),人口规模 10 万人以下的为 7 个,20 到 50 万的有 5 个,但最大的也仅为密山市,33. 91 万人,整体人口规模偏小,城市等级结构偏低,人口严重收缩使得未来我省边境地区行政区划的调整标准、依据和方式更为复杂。

三、黑龙江省人口持续收缩地区行政区划调整建议

根据省统计数据显示,我省常住人口城镇化

率从 2011 年的 56.5% 提高至 2020 年的 65.6%，已突破 60%，这标志着城镇化进程将逐渐进入到下半场，即二次城镇化阶段。相比一次城镇化过程中人口由乡到城的流动，二次城镇化主要表现为城市之间的流动，人口由中小城市向中心城市、大都市集聚。

1. 加强我省行政区划的“顶层设计”，坚决贯彻落实国家政策，科学审慎推进行政区划工作。

我省应围绕“维护国家国防安全、粮食安全、生态安全、能源安全、产业安全”的要求加强行政区划的“顶层设计”，坚持行政区划保持总体稳定，做到非必要的不调、拿不准的不动、时机条件不成熟的不改。完善行政区划调整标准体系，加强行政区划同相关政策、规划、标准的协调衔接，依法加强行政区划管理。按照有利于促进人口、资本、技术等要素的自由流动原则，不断优化我省行政区划设置，推进我省经济高质量发展。

2. 科学认知和预判未来我省人口收缩趋势，依据省情合理规划行政区划调整方向。

人口收缩是城市发展过程中的客观规律。在城镇化的下半场，省会城市哈尔滨市和节点城市（齐齐哈尔市、牡丹江市、大庆市）的人口虹吸作用将进一步凸显，既有成长中的城市，也有收缩乃至最后消失的城市。人口基数下降、原本的行政区划过度占用行政资源，在成本不能下降的前提下，服务人口将越来越少。但我省承担维护国家的“粮食安全”“边境安全”和“生态安全”的职能，人口不可成为行政区划调整的唯一要素，因此未来应统筹政治、经济、产业等多重要素整体考虑。

3. 加大边境地区城市行政级别，强化边境人口集聚，守好祖国北大门。

综合考量经济发展水平、对俄口岸贸易、地

理区位条件等要素，优化资源配置，提升区域竞争力，大力提升边境城市的行政级别，吸引人口、资金、产业等要素集聚，打造若干个中等规模的边境中心城市，加强稳边固边，推进兴边富民。对俄边境口岸城市对俄贸易要有利于全省集约化、规模化贸易，避免同质化竞争，形成与俄边境城市对等级别的口岸城市，提升话语权和贸易权。建议整合绥芬河、东宁、穆棱行政区划，加强对俄贸易功能和优势，打造黑龙江东部对俄乃至东北亚进出口贸易“金三角”经济区，将黑河市提升为“特别市”，在行政区划上授予更高的地位。

4. 优化调整地级城市辖区范围，促进城市能级提升和辐射带动作用，提高资源配置效率，以区域协同提升人口集聚。

按照要素流动、经济关联和区域协同等因素优化地级城市辖区设置，促进城市能级提升和辐射带动作用，提升资源配置效率，对于与地级城市关联度低的县级城市，建议划归与其关联度更高的地级城市，比如安达划归大庆、依兰划归佳木斯等，可通过要素联动、产业协同和设施互通互享等强化人口集聚能力，减缓地方人口收缩。

5. 适时优化资源枯竭型城市行政区划，正视人口收缩趋势，节约行政成本，提升行政效率。

综合考虑行政成本和行政效率，统筹优化布局，秉承实事求是、因地制宜的原则，采取“该升则升、应降必降和可合尽合”的方式以加快行政区划优化调整，资源枯竭型城市行政级别该降则降，市辖区该合并则合并，通过地市合并重点培育全省区域副中心城市，提升行政效率和资源配置效率，成为区域发展的新增长极，带动地区的产业转型与发展。建议将七台河市降为县级市，其行政区域划归佳木斯；大力缩减鹤岗市、鸡西市辖区数量；集贤县撤县设区，作为双鸭山市的市辖区。

提效收缩与增效扩张:村庄建设边界划定研究

关海娇¹, 崔 禹^{2*}

(1. 中社科(北京)城乡规划设计研究院黑龙江分院, 哈尔滨 150009;
2. 哈尔滨师范大学地理科学学院, 哈尔滨 150025)

摘要:在乡村振兴战略背景下,科学划定村庄建设边界是防止用地无限蔓延、推进村庄产业建设、优化村庄空间布局等问题的关键路径。本研究以村庄建设边界划定为研究对象,通过总结各省份对于村庄建设边界的理解,聚焦于居民点搬迁、闲置用地腾退、碎小图斑调整以及废弃采矿再利用等内容,构建“提效收缩”与“增效扩张”双维度协同的村庄建设边界划定方法。“提效收缩”层面,在满足相应地类的调整条件下,将居住用地、闲置用地、农用地、碎小村庄用地等用地类型调出村庄建设边界,实现村庄空间结构紧凑化;“增效扩张”层面,在满足相应地类的调整条件下,将废弃采矿用地、农用地等用地类型调进村庄建设边界,为村庄产业建设提供发展空间,对村庄建设边界的实用性划定具有重要的参考价值。

关键词:提效收缩;增效扩张;国土空间规划;村庄建设边界

中图分类号:TU984. 113

文献标志码:J

文章编号:1672-2736(2025)08-0006-9

0 引言

根据 2023 年自然资源部印发《乡村振兴用地政策指南(2023 年)》可知,积极盘活集体建设用地,优先保障农民居住、基础设施、公共服务设施和产业用地需求已经成为乡村振兴中的重点内容。在此背景下,村庄建设边界划定已经成为国土空间规划工作中的重要组成部分,但在现实发展过程中土地资源低效利用、生态保护与发展冲突、产业发展用地需求增加等问题成为村庄发展急需解决的问题,凸显村庄建设边界研究的紧迫性。因此,村庄建设边界的划定不仅是落实国家战略的必然要求,也是破解乡村发展现实矛盾的重要路径。

在系统梳理既有研究成果与地方政策规范对村庄发展的理论阐释基础上,村庄建设边界的演变大致可分为三个阶段,每个阶段村庄建设的规模与用地需求也各不相同。首先,是以农业为导向的村庄发展。此阶段村庄的开发建设较少,用地主要围绕着居住用地,伴随少量基础设施与

公共服务设施用地,村庄建设规模也较小^[1]。其次,是以经济为导向的村庄发展。此阶段村庄的发展受城市发展的刺激,个别村庄开始引进乡村产业,村庄的建设规模开始增长,用地也较为复杂。最后,是以利益为导向的村庄发展。此阶段村庄的建设受工业建设的刺激,用地需求不断增加,村庄建设规模不断扩大^[2]。但实际上中国村庄发展的过程中,南北方差距较大,很多村庄的发展停留在第二阶段,甚至由于人口老龄化、人口外流等原因,村庄发展呈现收缩趋势,并未走向第三个阶段。

因此,当前村庄建设边界划定的思想急需转变,才能更好地推动村庄发展。本文吸纳已有研究成果,对村庄建设边界的理解进行解释,并通过研究村庄建设边界划定的意义,掌握村庄建设边界划定过程中所面临的问题与问题产生的原因,分别从“提效收缩”与“增效扩张”两方面阐述村庄建设边界的划定办法,指出村庄建设边界划定的技术路线图,为村庄建设边界划定提供参考价值,促进村庄更好地发展。

1 对于村庄建设边界的理解

1.1 村庄建设边界

1.1.1 村庄建设边界的概念

本研究通过解读 10 个不同省份的相关规范发现,各省份对村庄建设边界的理解大致可分为三类。一是城镇开发边界参照类,以云南省为代表,主要借鉴城镇开发边界划定思路,将村庄建设边界分为村庄集中建设区、村庄弹性发展区和特别用途区;二是宽泛表述类,以江西省为代表,指出村庄建设边界范围由相互分离的多个闭合范围组成,但未指出村庄建设边界的具体用地类型;三是明确用地类,以河南省为代表,指出村庄建设边界包括村庄现状建设用地和规划期所需要的宅基地、公共服务设施用地、村内公路、道路交通用地、公用设施用地、经营性建设用地等^[3]。虽然各省份对村庄建设边界的理解各不相同,但可以确定的是村庄集中开发建设的区域为村庄建设边界的核心区域。

因此,本研究将三大类村庄建设边界的理解进行相应的融合,从而完善对村庄建设边界的理解,将其定义为国土空间规划体系下为优化村庄空间布局、统筹城乡发展而划定的重要管控线,指在一定规划期内村庄可进行集中建设、功能拓展或设施配套的用地空间范围,具有双重属性。一是约束性,通过划定刚性管控线,限制村庄建设对耕地、生态敏感区的侵占,倒逼低效用地腾退与存量用地更新;二是引导性,即结合村庄发展需求,在村庄建设边界内合理布局居住、产业以及公共服务设施,促进土地集约利用与村庄功能提升。与此同时,村庄建设边界也是生态保护红线、永久基本农田、城镇开发边界等控制线修正的相关依据。

1.1.2 村庄建设边界的提效收缩

村庄建设边界的“提效收缩”是指在村庄发展过程中,通过优化土地利用结构来实现土地利用价值的最大化。与此同时,通过主动控制或减少村庄用地的规模,实现村庄用地的“增量扩张”转向“存量优化”,不再依赖新增村庄用地实

现村庄的发展,而是盘活已有村庄用地开发来提高土地的利用效率。

1.1.3 村庄建设边界的增效扩张

村庄建设边界的“增效扩张”是指在村庄发展过程中,为促进村庄项目落实,允许村庄用地在不突破 203 村庄用地规模的前提下,预留一定规模的发展空间用于产业发展,来实现土地的经济产出与相关社会服务的提升。与此同时,在确需新增村庄用地的需求下,为避免粗放式的扩张,只允许近期实施建设的项目进行用地扩张,实现真正意义上的“增效扩张”。

1.2 村庄建设边界划定的意义

1.2.1 防止用地无限扩张

科学划定管控边界,防止用地无限蔓延。众所周知,村庄建设边界作为法定管控线,已纳入“多规合一”的国土空间规划体系中,为执法监督工作提供了依据。与此同时,通过明确村庄可开发建设的空间范围,结合 GIS、地图影像等数字化平台动态监测村庄建设边界内外的土地利用变化,可遏制违规建房、私占耕地等行为,有效约束村庄用地的盲目外延。

1.2.2 推进村庄产业建设

预留产业发展空间,提供用地基础保障。村庄建设边界通过预留产业用地、留白用地等手段,为现代农业、村庄旅游、电商物流等新业态提供空间载体。结合村庄资源禀赋,在严守生态保护红线、永久基本农田等控制线的前提下,支持小型产业发展,并在产业布局中同步完善道路、水电等基础设施,可有效推进村庄产业建设。

1.2.3 优化村庄空间布局

存量与增量调控并存,推进村庄科学开发。目前,村庄内闲置房屋、抛荒土地、用地低效等已成为村庄发展的普遍现象,“精明收缩”为正在衰退或不可避免终将衰败的城市中心区、郊区或农村等区域提供了收缩规划的发展思路,可以用于解决我国城市地区衰败及乡村“空心化”等问题^[4]。通过居民点搬迁、闲置用地腾退、采矿用地参与“增减挂钩”等措施,对村庄建设边界周边用地进行调进或调出,统筹村庄的生产、生活

以及生态空间,可优化村庄空间布局。

2 村庄建设边界划定问题与成因

指标采取总量调控,村庄用地分配失衡。在现行规划体系中,由于村庄用地指标采取自上而下的总量控制,由国家逐级传导至省、市、县,最后由乡镇传导至村庄,这种总量调配的方式无法满足村庄的实际用地需求,导致村庄建设边界划定成果中,经常出现村庄用地分布零散、水域或林地、草地等用地误划到村庄建设边界范围等问题,从而影响村庄建设边界划定的科学性,阻碍村庄发展。

2.1 核心问题

2.1.1 村庄用地分布零散

村庄用地布局零散,降低土地使用效率。受道路、河流、山体等外界因素制约,宅基地选址往往被迫远离村庄集中建设的区域,加剧了村庄用地布局分散程度。除此之外,村庄在发展过程中,考虑到工业用地对空间规模的特殊需求及其可能产生的噪声、粉尘、废水等环境影响,需要在远离人群且相对独立的区域进行选址,但随着村庄人口的不断流失,村庄内的工业用地也逐渐荒废,造成用地分布零散的同时,也带来土地闲置问题,不利于村庄高效发展。

2.1.2 农用地错划到村庄建设边界内

建设范围与实际功能不符,农用地误划进村

庄建设边界。在编制国土空间总体规划过程中,某些地区可能存在对自然环境与土地特性认识不足或土地管理信息未能及时更新等情况,这导致了规划编制人员对土地的功能或用途判断失误,将许多不应被纳入村庄建设边界内的林地、草地、陆地水域等误划入村庄建设边界内,降低村庄建设边界划定准度的同时,也不利于村庄生态的发展,应对此类用地进行适当调整。

2.1.3 土地闲置与供地困难矛盾共存

用地不满足需求,土地价值难发挥。伴随着村庄的发展,除上述产生的闲置工业用地以外,自然屯内部的教育用地大多也处于闲置状态,导致村庄内部土地闲置问题越来越突出,大大降低了土地的使用效率。虽然现阶段村庄发展呈现出收缩态势,但对于发展机遇较多、集聚提升村、特色保护村较多的行政村,规划既要关注农民建房、基础设施建设,也要重视对一二三产业融合项目和乡村旅游业发展的空间保障^[5]。但在乡镇级规划层面,考虑到村庄用地不突破上位规划对村庄用地规模的约束,大多数村庄没有多余的村庄用地指标来发展新的产业,导致某些选址于第三次全国国土调查(以下简称“三调”)203 范围之外的项目,供地较为困难无法落地实施,阻碍村庄产业建设的进程,影响村庄经济发展(图 1)。

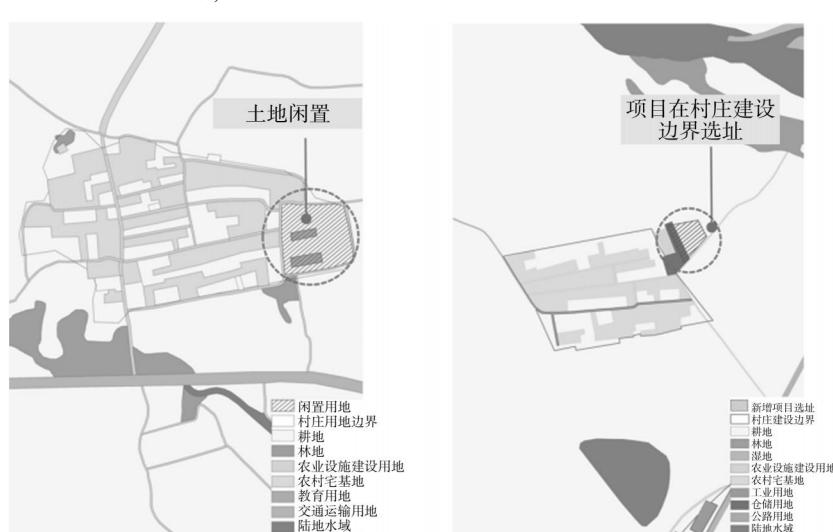


图 1 土地闲置与供地困难情况示意图

2.2 问题成因

2.2.1 历史问题暂时难解决,导致土地管理困难

村庄用地随意选址,土地管理实时更新困难。长期以来,村庄建设由于缺乏统一的规划与监管,导致部分宅基地选址较为随意,产生大量路边店、独家院等问题。除此之外,永久基本农田、生态保护红线等控制线的划定成果中存在着“开天窗”的现象,“天窗”范围通常为村庄用地,但此类建设用地由于产权纠纷、利益划分不均等原因导致部分或全部用地已停用。然而,土地数据却无法实现准确地更新与管理,造成一些错误归类或遗漏,使得此类用地在“三调”数据中仍被判定为村庄用地被纳入到村庄建设边界范围,影响村庄农业或生态发展。

2.2.2 规划空间尺度各异,导致划定精度不高

空间尺度各异,规划标准难统一。由于乡镇级规划与村庄规划的编制主体不同,各自的规划重点也各有不同,乡镇级以区域统筹、发展定位、发展目标以及发展策略等为侧重点,尺度偏向宏观。村庄规划则更侧重于设施建设、道路修缮以及项目落地建设等实用性开发,尺度偏向微观。两者空间尺度的差异与乡镇层面无法及时了解村庄的实际需求,大大降低了村庄建设边界划定过程中的上下反馈效果。与此同时,乡镇与村庄两级规划在用地分类、数据精度、实施标准等方面存在差异,加之不同部门的技术力量与平台工具不统一,导致数据难以有效衔接,联动测度结果失真^[6],村庄建设边界划定的精准度下降,甚至可能导致误把林地、水域等用地纳入村庄建设边界的问题。

2.2.3 缺乏现场实地调研,导致用地发展与现实脱节

规划编制工作量大,无法准确了解实情。在乡镇规划编制过程中,由于编制人员有限且规划工作体量巨大而无法对实地进行细致的调研,规划编制人员在乡镇级规划层面可能采用卫星遥感数据辅助村庄建设边界划定,对村庄的地形地貌、产业布局、发展需求等情况了解较为模糊,尤

其是闲置用地、新增村庄用地的具体位置、规模以及产权等问题更为不清,使得土地闲置与供地困难问题共存,不利于村庄的实用性发展。

3 村庄建设边界划定的思路

为实现“乡镇-村”两级规划内容的有效传导,村庄规划编制应具体落实上位国土空间规划的约束性指标。在指标体系中,规划采取刚性传导的方式贯彻关键控制指标,如下位规划不得随意调整城乡建设用地规模等刚性内容^[7]。因此,在严格落实永久基本农田、生态保护红线等约束性条件的基础上,村庄建设边界划定原则上不得突破“三调”203 规模,确需新增村庄用地规模的,需在上级国土空间规划中明确下达规模。本研究将在村庄用地总量不突破“三调”203 规模与尊重居民意愿的前提下,结合村庄用地的实际使用情况,从村庄用地的“提效收缩”与“增效扩张”两个角度,提出村庄建设边界划定路线,促进村庄科学发展。

3.1 村庄建设边界的提效收缩

3.1.1 村庄建设边界的收缩技术路线

如图 2 所示,从村庄用地的“提效收缩”视角出发,村庄建设边界的划定大致可以分为六个阶段。第一阶段为前期准备阶段,需对现状资料进行收集的同时整理现状基本问题以及开展现场实地调研等工作,对乡镇域各村庄的发展趋势进行预判,引导村庄未来的发展。第二阶段为明确基本前提阶段,遵循确上位规划约束性指标、符合未来人口与需求预测的同时满足公共利益等为基本前提,明确村庄发展的用地底线。第三阶段为筛选调整地类阶段,即筛选村庄用地中可进行缩减的地类,主要包括居住用地、闲置用地、农用地等,此类用地的调整是村庄用地收缩的核心地类。第四阶段为制定村庄建设边界调整原则,需在遵循布局集中原则、用地一体原则、边界整齐原则等原则下,科学划定村庄建设边界。第五阶段为提出调整条件阶段,针对不同地类的用地特点,需在满足各自的调整条件时,方可调整村庄建设边界。最后一个阶段为成果最终划定

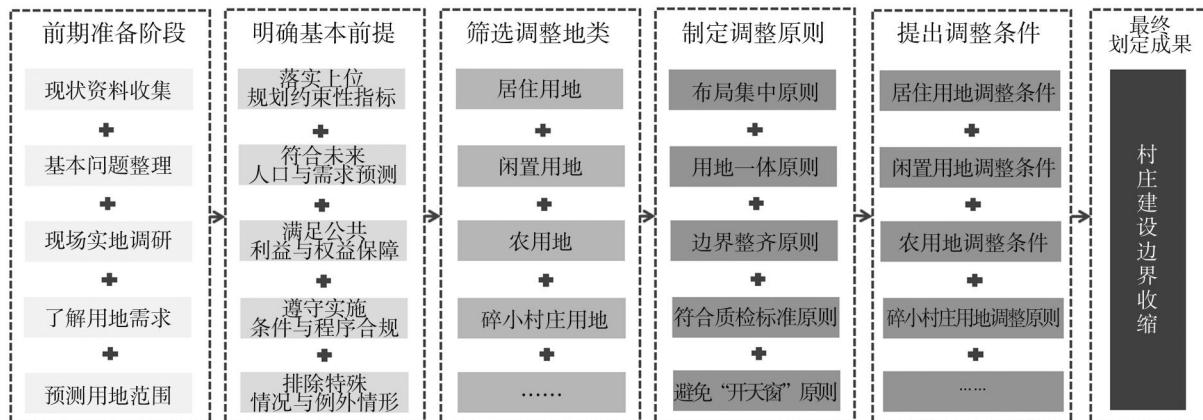


图 2 村庄建设边界“提效收缩”技术路线图

阶段,优先对闲置用地进行腾退或局部用地变更,最终实现村庄用地的“提效收缩”。以下将从村庄用地的“提效收缩”角度,针对不同地类提出需满足的调整条件。

3.1.2 居住与闲置用地腾退

整体上,对于居住用地腾退来说主要分为三种情况,分别为局部或整体搬迁、零散居民点搬迁以及闲置居民点搬迁。首先,对于局部或整屯搬迁的居民点来说,出于用地集中布局原则,应将常住人口不足 30 户的自然屯、“空心率”超过 50%且只剩下留守老人与儿童的自然屯以及受自然灾害或外界建设影响的自然屯需进行搬迁,这是较为普遍的共识。

其次,对于零散的居民点来说,应对远离村民集中建设区域且设施配套不齐全的居民点进行搬迁,便于村庄用地的内部整理与集中发展。最后,对于闲置居民点或其他类型的闲置用地来说,为避免村庄建设边界出现“开天窗”问题,位于自然屯边缘的闲置居民点可调出村庄建设边界范围,但位于自然屯内部的闲置用地不应调出村庄建设边界范围(图 3)。调整后的用地,可通过增减挂钩的方式,开展城乡挂钩、村村挂钩、村组挂钩,对村庄建设边界进行减量优化,向优势发展地区或有空间发展需求的地区进行腾挪,促进资源的集聚发展,提高土地的利用效率^[8]。

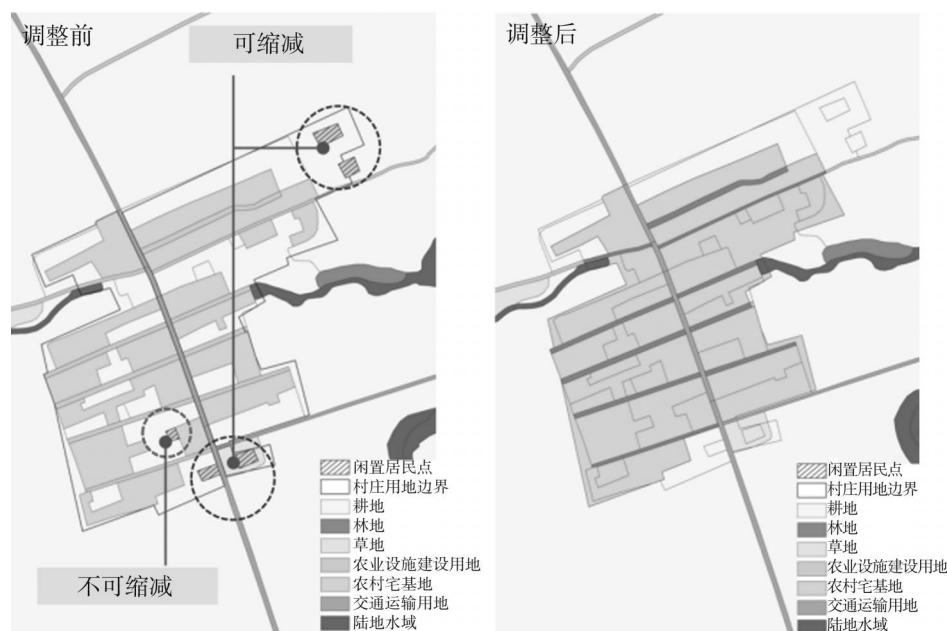


图 3 闲置用地腾退示意图

3.1.3 农用地调整

优先保障生态发展,遵守不“开天窗”原则。“三调”203范围内需要调整的农用地主要分为两种情况。其一,块状农用地。其调整方式与闲置用地的调整较为相似,为避免村庄建设边界划定成果“开天窗”,位于边缘的块状农用地可调出村庄建设边界,位于自然屯内部的则不应调出村庄建设边界。其二,连续的条带状农用地。为保证生态发展的一体性,可将“三调”203范围内条带状的耕地、林地、草地、陆地水域等农用地调整到村庄建设边界外。但值得注意的是,不论是块状农用地还是条带状农用地,为确保村庄建设边界整齐,都应把道路作为村庄建设边界调整的依据,并结合地图影像,将位于道路边缘,且未开发建设的农用地调出村庄建设边界范围。

3.1.4 整理村庄用地碎小图斑

分析碎小图斑产生原由,提高村庄建设边界划定精度。在乡镇规划层面,碎小图斑可能产生的原因有很多,例如为提取乡镇政府驻地的规划范围,对用地进行切割或落实上位规划重点项目以及建设新增项目时的图层裁剪、更新、联合等操作。为进一步提高村庄建设边界划定的精准度,应对碎小图斑进行适当调整,并满足以下调整要求。

首先,符合数据库质检标准。以乡镇级数据库质检标准为依据,将规划后200m²以下的村庄用地调出村庄建设边界范围,调出的地块需与周围用地保持一致的用地性质。其次,降低村庄行政边界影响。乡镇规划为确保数据库符合质检标准,会采取将相邻地块进行合并的方法,来减少碎图斑的产生。但这一操作通常会忽略村庄行政边界的影响,导致两个或多个村庄行政边界相邻的地块合并成一块图斑,但在向各村庄传导村庄用地规模时,需对村庄建设边界进行分割,导致分解到个别村庄的建设范围产生碎小图斑或相对独立的图斑,明显与周围的用地性质不符。为避免由于相关数据的叠加或裁剪等操作问题带来的影响,在划定村庄建设边界时,应将村庄行政边界周围的村庄用地与村庄本身及相

邻村庄内部用地统筹考虑,将位于行政边界附近,但明显不同于周围用地功能的村庄用地,调出村庄建设边界范围。

3.2 村庄建设边界的增效扩张

3.2.1 村庄建设边界的扩张技术路线

如图4所示,从村庄建设边界划定的“增效扩张”技术流程来看,大致可以分为六个阶段。前两个阶段与村庄建设边界“提效收缩”划定的研究内容一致。第三阶段则有所不同,在筛选调整地类方面,废弃采矿用地、农用地、新增商业用地等为新增地类的主体。第四阶段为制定村庄建设边界调整原则阶段,需满足布局集中原则、用地一体原则、边界整齐原则、保障产业发展原则等原则,其中保障产业发展原则是较为重要原则之一。第五阶段为提出村庄建设边界调整阶段,由于不同的土地类型,需满足的条件各不相同,应在满足相应条件时,方可进行调整。最后一个阶段为村庄建设边界的最终划定阶段,通过对废弃采矿再利用、保持用地一体发展、提供点状供地等措施,实现村庄用地的“增效扩张”。以下将从村庄用地“增效扩张”角度,针对不同地类提出需满足的调整条件。

3.2.2 鼓励废弃采矿再利用

随着村庄采矿活动的进行,由于矿产资源的枯竭或禁止采矿活动的进行等原因,导致了采矿用地的荒废,其用地的再利用对提高土地的使用效率具有促进作用。总结起来,废弃后的采矿用地通常有四种再利用方式。其一,生态治理及生态产业发展,主要形式为矿山生态修复、农业复垦;其二,用地性质转变为公园广场绿化用地;其三,用地性质转变为居住用地;其四,用作商业及服务,如上海松江深坑酒店^[9]。以下主要讨论废弃采矿用地转为村庄用地,纳入村庄建设边界时需满足的条件。

首先,遵循上位规划。参考上位规划中的规划分区,可将位于村庄发展区内的废弃采矿用地纳入村庄建设边界范围,但位于矿产能源发展区的废弃采矿用地不应纳入村庄建设边界范围。其次,符合相应工程建设条件,确保有关建设顺



图 4 村庄建设边界“增效扩张”技术路线图

利进行。再次,无采矿权属与用地权属纠纷,避免土地使用争议。最后,降低项目征地难度。在原有采矿用地范围的基础上,对村庄建设边界进行局部微调,避免产生待建项目边界不规则问题,从而降低项目征地与建设的难度,将满足以上四个条件的废弃采矿用地可纳入村庄建设边界范围。

3.2.3 城镇开发边界周边农用地调整

在“十四五”规划期间,个别乡镇的城镇开发边界划定成果中,存在城镇开发边界不连续、参差不齐等问题,影响用地的整体性。为避免用地破碎化的开发建设,应将满足以下条件的用地,纳入村庄建设边界范围内。

首先,用地一体发展。以“三调”203 为基础,围绕目标定位,将乡村建设空间落实到地块,将城镇开发边界外相对集中连片的面状用地范围纳入村庄建设边界^[10]。其次,调整范围与城镇开发边界总和不得大于城镇开发边界扩展倍数。虽然调整的用地为村庄用地,但考虑到调整后的范围通常与参差不齐的城镇开发边界范围共同组成政府驻地范围,未来调整为村庄用地的地块可能纳入城镇开发边界,为避免用地总和超出城镇开发边界扩展倍数,对未来的发展产生影响。需计算城镇开发边界可扩展范围的上限,保障城镇开发边界范围加上即将纳入村庄建设边界范围的用地总量小于扩展后的用地上限。最后,对于城镇开发边界外可建设空间,只允许安排有特殊选址要求或确需在城镇开发边界外选

址的基础设施与公共服务设施用地。只有同时满足以上三种条件时,才可将城镇开发边界周边面状用地纳入村庄建设边界范围,将其作为未来城镇开发边界修正的相关依据。

3.2.4 允许村庄提供点状供地

点状供地作为新兴的供地模式,涉及土地、产权、资金等要素在城乡之间的流动,通过其独特的供地方式,确保了土地资源的合理利用和生态环境的可持续发展,保障了村庄产业项目用地需求^[11],供地时需满足以下条件方可纳入村庄建设边界范围。

首先,建设项目类型符合村庄发展方向。允许民宿、小作坊、新能源设施、卫生所等文旅类、轻工业类、环保类、配套设施类项目进行点状供地。其次,符合当地供地政策。考虑到“三调”203 规模有限,点状供地项目的规模不宜过大,具体用地标准应符合地方对于点状供地规模的相关政策。最后,明确项目基本情况。点状供地可纳入村庄建设边界范围的前置条件是项目建设应带有项目实施方案,在明确项目的名称、位置、规模、用地性质等基本信息的前提下进行供地,作为纳入村庄建设边界的相关佐证。

4 结语

村庄用地作为乡村社会经济活动的基本载体,其用地规模、空间布局、利用方式都对促进乡村发展起到重要的支撑作用^[12]。本研究从揭示“三调”203 成果中的不合理之处与问题产生的

原因入手,研究村庄建设边界的划定方法,对村庄用地的“提效收缩”与“增效扩张”发展具有一定借鉴意义。同时填补了村庄建设边界具体划定方法的研究空白,有利于明确村庄用地的最小规模,控制村庄建设边界范围的上限,并且划定的成果可直接服务于村庄规划的编制。在村庄建设边界收缩方面,以农用地、闲置用地以及碎小图斑等为研究重点,提出相应地类调出村庄建设边界的原则,实现村庄用地的“提效收缩”;在村庄建设边界扩张方面,则以废弃采矿用地、城镇开发边界周围农用地以及新增项目用地等为研究重点,同样提出相应地类调入村庄建设边界的原则,从而实现村庄用地的“增效扩张”。

然而,本研究也存在许多缺陷,例如由于各地区地理环境的差异,在平原地区或山地地区、丘陵地区等不同地形条件下的普适性需进一步验证。与此同时,村庄建设边界的划定受限于地方政策的实施周期,易受当地政策影响,导致村庄建设边界划定办法的普适性进一步降低,有待完善。未来,随着国土空间规划体系的完善与村庄治理现代化的推进,村庄建设边界划定需逐步向“多规合一”与“智慧治理”方向转型,后续研究可关注以下问题。首先,如何通过土地政策创新村庄建设边界的弹性划定。其次,如何构建“村民-政府-规划师”三方协同的村庄建设边界划定协商机制。最后,如何在保障村民合法权益的同时,满足社会治理需求,提升规划实施效率。总而言之,只有将技术的理性分析与社会治理相结合,才能真正实现村庄建设边界从“图纸上的线”到“发展中的界”的实质转变,从而提高未来村庄建设边界划定的实用性。

参考文献(References):

- [1] 齐阳.美丽乡村背景下的乡村公共服务设施风貌提升——以《辽宁省永安镇西田村村庄规划》为例[J].黑龙江国土资源,2024,22(12):20-29.
- [2] 裴文娟,樊凯,张建生.村庄建设边界的演变及面临的问题研究[J].乡村科技,2017,8(20):16-17.
- [3] 谭勇,虞加林,陈超等.村庄建设边界划设探索与实践:以邵阳县金坛村为例[J].国土资源导刊,2024,21(04):102-108.
- [4] 娄永琪.系统与生活世界理论视点下的长三角农村居住形态[J].城市规划学刊,2005,49(05):38-43.
- [5] 程茂吉.实用性村庄规划的编制办法和技术重点研究[J].城乡规划,2024,16(06):21-32.
- [6] 李铭,国子健,胡继元.基于“三调”建设用地效率分析的国土空间规划策略[J].城市规划学刊,2021,38(08):12-17.
- [7] 谭宇文,李颖,陈昌勇.佛山市国土空间规划传导策略[J].规划师,2021,37(06):60-67.
- [8] 曹威宜,罗贤吉.村庄内存量未建设土地盘活利用的规划探索:以吉林省辉南县村庄规划为例[C]//美丽中国,共建共治共享:2024中国城市规划年会论文集(20乡村规划).中国建筑工业出版社,2024:2182-2189.
- [9] 马心成,金杨,李童琳.城市规划视角下矿业废弃地再利用:以某饰面用花岗岩矿再利用为例[J].建筑与文化,2024,21(10):168-170.
- [10] 李鸿儒,梁媛媛.国土空间规划背景下“城郊融合型”村庄规划编制实践[J].福建建材,2025,44(02):55-57.
- [11] 殷俊梅,李圣祥,付晓等.点状供地助力乡村振兴的作用机制探析:基于“人—地—产—权—钱”五位一体视角[J].国土资源科技管理,2025,42(01):29-39.
- [12] 李罗娜.国土空间规划背景下村庄建设用地规划方法[C]//美丽中国,共建共治共享:2024中国城市规划年会论文集(20乡村规划).中国城市规划学会,2024:1334-1342.

作者简介:

第一作者:关海娇,1998年生,女,哈尔滨人,中社科(北京)城乡规划设计研究院黑龙江分院,主要研究方向为国土空间规划。Email:2521179599@qq.com;

通讯作者:崔禹,1983年生,男,哈尔滨人,博士,哈尔滨师范大学,讲师,主要研究方向为国土空间规划与管理。

Email:cuiyu@hrbnu.edu.cn

Efficiency-Enhancing Contraction and Efficiency-Enhancing Expansion: Case Study of the Demarcation of Village Construction Boundaries

GUAN Haijiao¹, CUI Yu^{2*}

(1. Heilongjiang Branch of China Academy of Social Sciences (Beijing) Urban and Rural Planning and
Design Institute, Harbin 150009, China;
2. School of Geographical Sciences, Harbin Normal University, Harbin 150025, China)

Abstract: Under the background of rural revitalization strategy, scientifically delineating the boundary of village construction is the key path to prevent the infinite spread of land, promote village industrial construction and optimize the spatial layout of villages. By summarizing the understanding of village construction boundaries in various provinces, this study focuses on the relocation of residential areas, the vacating of idle land, the adjustment of small patches, and the reuse of abandoned mining, a two-dimensional collaborative demarcation method of village construction boundaries is established. For efficiency-enhancing contraction, the land types, such as residential land, idle land, agricultural land and broken village land, are transferred out of the boundary of village construction to realize the compactness of the village spatial structure; for efficiency-enhancing expansion, the abandoned mining land, agricultural land and other land types are transferred into the village construction boundary in accordance with the adjustment of corresponding land types, which provides development space for village industrial construction and has important reference for the practical demarcation of village construction boundary.

Key words: efficiency-enhancing contraction; efficiency-enhancing expansion; land spatial planning;
village construction boundary

多源数据与模型下兴县“三区三线”划定及影响量化研究

白俊兰

(兴县自然资源局,山西 吕梁 033600)

摘要:在生态文明建设背景下,科学划定“三区三线”是协调生态保护与城镇发展的关键。本研究以黄土高原生态脆弱区典型代表山西兴县为对象,通过融合遥感影像、地理信息与统计年鉴等多源数据,构建最小累积阻力模型、耕地质量评价模型与城镇开发潜力模型等量化分析体系。结果显示:划定生态保护红线 1115.57km²使生态系统服务价值提升 37.8%,永久基本农田 323.87km²推动粮食产能增长 25%,城镇开发边界 20.57km²引导城镇化率提高 8%。研究成果为生态脆弱区国土空间优化提供了量化方法与实证参考,对促进区域可持续发展具有重要实践价值。

关键词:兴县;三区三线;多源数据;量化模型;可持续发展

中图分类号:TU98

文献标志码:A

文章编号:1672-2736(2025)08-0015-9

0 引言

在生态文明建设稳步推进的背景下,国土空间规划作为优化资源配置、平衡发展与保护关系的重要工具,通过“三区三线”政策(生态保护红线、永久基本农田保护线、城镇开发边界)明确生态、农业与城镇空间边界,对保障国家生态安全、粮食安全及促进城镇有序发展具有战略意义^[1]。这一政策不仅体现了空间治理的顶层设计逻辑,更是实现可持续发展目标的核心抓手。

近年来,国内学者围绕“三区三线”划定开展了广泛研究。陈明炳等从协调生态保护与经济发展的视角^[1],探讨了政策实施的路径优化;王荣远等以粤北山区为例,分析了地形复杂区域划定中的空间冲突与协调策略^[2];冉艺系统梳理了多尺度国土空间规划中划定的技术方法^[3],提出了定量与定性结合的技术框架。然而,现有研究多聚焦于经济发达或地形单一区域,对生态脆弱区尤其是兼具复杂地形与经济欠发达特征的区域缺乏针对性。佟彤指出^[4],此类地区人地矛盾尖锐,传统定性方法难以满足精准划定的需求;王海霞指出^[5],现有模型对多源数据融合与动态调控机制的研究不足,制约了划

定成果的科学性与可操作性。

针对上述研究空白,本研究选择山西省兴县黄土高原生态脆弱区作为研究对象。该区域面临水土流失严重、生态修复与经济转型双重压力,是检验“三区三线”政策实施成效的天然实验室。研究通过融合遥感影像、地理信息与统计年鉴等多源数据,构建高精度量化模型,旨在实现以下目标:(1)揭示生态脆弱区“三区三线”划定的空间分异规律;(2)提出兼顾生态安全与经济发展的差异化划定策略;(3)评估政策对区域可持续发展的多维影响。研究成果可为同类型地区国土空间规划提供方法论借鉴与实践范式。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

兴县位于山西省西北部,吕梁市北端,地处黄河中游、吕梁山脉北部西侧的晋西北黄土高原,地理坐标介于东经 110°33'00"~111°28'55"、北纬 38°05'40"~38°43'50" 之间,总面积约 3169.31km²。兴县呈现典型的“东部土石山区与中西部黄土丘陵区”二元地貌特征。东部土石山区林草覆盖率相对较高,地势起伏大,是区域重要的生态屏障;中西部黄土丘陵区地形破碎,

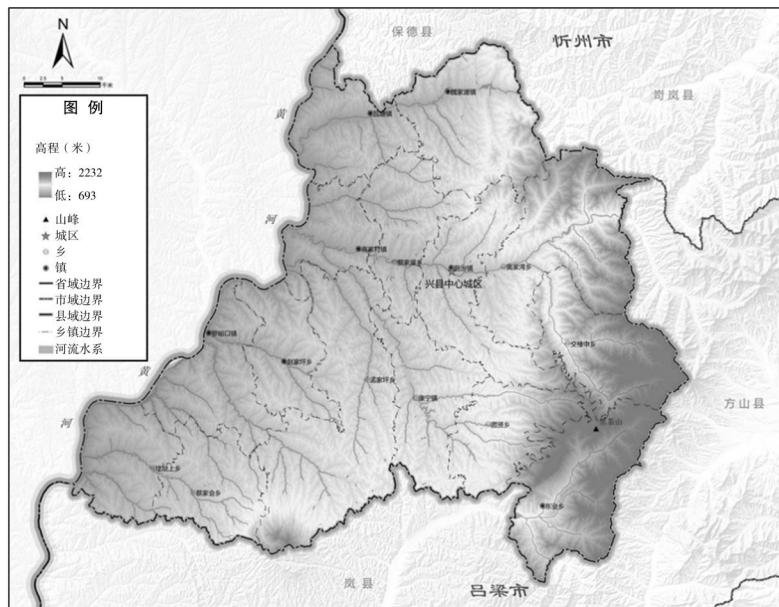


图 1 兴县地形地貌高程图

沟壑纵横,生态环境极为脆弱。兴县属暖温带大陆性季风气候,降水集中在夏季且年际变化大,进一步加剧了生态系统的不稳定性。结合兴县地形地貌高程图(图1),其地势整体东高西低,这种地形地貌深刻影响了区域生态、农业及城镇的发展格局。

1.2 多源数据收集与预处理

1.2.1 数据来源

为全面、精确地获取兴县相关信息,本研究广泛收集多源数据。遥感影像主要采用 Landsat 系列数据,其长时间序列和高分辨率的特性,使

其能有效监测土地利用变化、生态环境演变等情况;通过对近 20 年的 Landsat 影像分析,可清晰捕捉到兴县土地利用类型的动态变化过程。地理信息数据包含数字高程模型(DEM)数据,用于精准分析地形地貌特征,以及河流、道路等基础地理要素数据,为空间分析搭建基础框架;统计年鉴数据来源于兴县统计局及相关部门,涵盖人口、经济、农业生产等多方面信息,为剖析社会经济发展趋势提供有力支撑。具体数据来源如表 1 所示。

表 1 数据来源

数据类型	数据来源	时间范围	空间分辨率/范围
遥感影像	Landsat 系列(NASA/USGS)	2005-2025 年	30m
数字高程模型	ASTER GDEM、SRTM	2000-2025 年	30m(ASTER)
基础地理信息	自然资源部、山西省地理信息公共服务平台	2020-2025 年	1:10000
统计年鉴数据	兴县统计局、吕梁市统计局	2010-2024 年	县域尺度
土地利用数据	第三次国土调查成果(自然资源部)	2019 年	1:10000
地质灾害数据	《山西省吕梁市地质灾害风险调查评价报告》	2022 年	县域尺度
采矿权数据	山西省自然资源厅	2020-2025 年	矢量边界
气象水文数据	中国气象数据网、黄河流域水文监测站	2010-2024 年	站点数据插值
交通网络数据	OpenStreetMap、山西省交通厅	2023 年	矢量路网
生态保护区数据	黑茶山国家级自然保护区管理规划	2021 年	矢量边界

1.2.2 数据预处理

对收集到的数据进行严格的预处理至关重要。遥感影像需依次进行辐射校正,以消除传感器差异导致的辐射误差,再进行大气校正,减少大气散射对影像质量的影响;地理信息数据通过拓扑检查,确保数据逻辑一致性,并进行格式转换,保障数据兼容性;统计年鉴数据则通过异常值剔除,去除明显偏离正常范围的数据,再进行数据标准化处理,提升数据质量。

1.3 研究方法

本研究采用“多源数据融合—量化模型构建—空间模拟分析—综合效益评估”的技术框架(图 2),系统集成遥感影像、地理信息、社会经济统计等多源异构数据,通过 GIS 空间分析、统计建模与情景模拟方法,实现“三区三线”的科学划定与影响量化。具体方法体系如下。

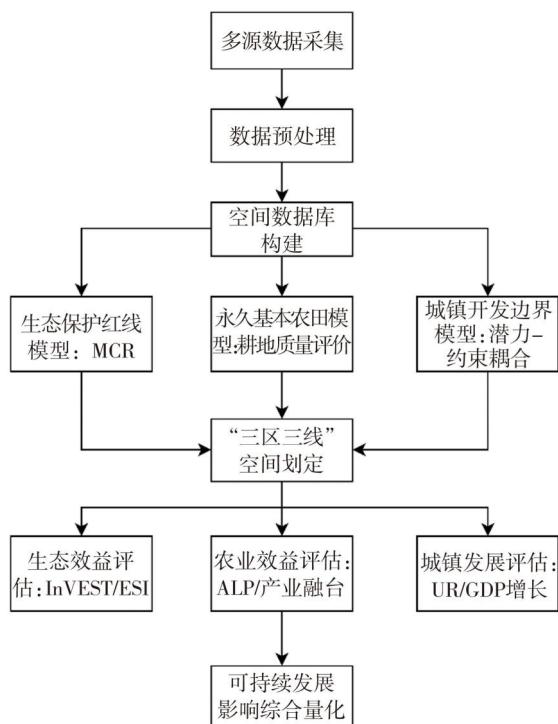


图 2 技术框架图

1.3.1 多源数据融合与空间数据库构建

在兴县国土空间数据处理中,首先通过空间配准、数据标准化及拓扑校验等预处理手段,将多源数据统一到 CGCS2000 地理坐标系下,构建起兴县国土空间数据库。在此基础上,利用 Arc-

GIS 的空间叠加分析工具,把土地利用、地形、生态敏感区等矢量数据进行整合,生成具有空间属性关联的综合底图,为后续模型运算提供基础数据支撑。

1.3.2 “三区三线”划定模型体系构建

在生态保护红线划定方面,先识别生态源地并构建阻力面,综合考虑栅格单元到生态源地的距离以及坡度、土地利用类型、人类活动强度等因子形成的阻力系数,计算空间栅格单元的最小累积阻力值,再通过自然断点法划分阻力等级,结合生态廊道识别最终确定红线范围。永久基本农田划定则构建了包含土壤肥力、地形条件、气候条件、灌溉保障、耕作便利度的指标体系,运用层次分析法确定各指标权重,借助模糊综合评价法计算耕地单元质量得分,通过克里金插值生成耕地质量等级图,从而筛选出优质连片耕地纳入永久基本农田红线。城镇开发边界划定融合了多种方法,发展潜力评估综合人口预测、经济潜力预测、产业导向、交通可达性等因子进行加权叠加分析,空间约束识别提取生态保护红线缓冲区、坡度超限区域、地质灾害高风险区等禁建要素,最后通过栅格计算器叠加潜力与约束图层,并结合人均建设用地标准确定开发边界^[6]。

1.3.3 影响量化评估方法

生态效益评估主要通过 InVEST 模型模拟水源涵养、碳汇等生态系统服务价值的变化,同时综合生态斑块面积及其基于连通性与类型赋值的稳定性系数,评估生态系统稳定性。农业效益评估从土地生产率和产业融合效益两方面展开,土地生产率通过农业总产值与耕地面积的比值衡量,产业融合效益则借助旅游收入增长率、农户增收额等指标进行量化。城镇发展评估聚焦城镇化率和经济增长贡献,城镇化率以城镇人口占总人口的比例计算,经济增长贡献通过 GDP 增量、就业岗位增加值等指标来体现。

2 “三区三线”划定的理论基础与模型构建

2.1 生态保护红线划定模型

在本次研究中,生态保护红线的划定,借助

表 2 参数设置

影响因素	分级标准	阻力值范围
坡度	0~5°	5~100
坡度	5~15°	100~200
坡度	15~25°	200~300
坡度	>25°	300~500
土地利用类型	林地	50
土地利用类型	草地	80
土地利用类型	耕地	150
距道路距离	0~1km	200
距道路距离	1~3km	150
距道路距离	3~5km	100
距道路距离	>5km	50
人类活动强度	高	300
人类活动强度	中	150

最小累积阻力模型(MCR)展开^[7]。这一模型综合考量生态源地、生态廊道、地形地貌等要素,从而确定生态保护的关键区域。

构建阻力面需综合考虑多种因素。地形方面,借助 DEM 数据,获取坡度、坡向信息,坡度越大,生态保护的难度和成本越高,赋予其较高的阻力值;土地利用类型方面,林地、草地等生态功

能较强的用地类型,赋予较低阻力值,而建设用地则赋予较高阻力值。此外,道路和人类活动强度也是重要考量因素,距离道路和人类聚居区越近,生态受干扰的可能性越大,相应增加阻力值。具体参数设置如表 2 所示。

最小累积阻力模型的计算公式为:

$$MCR = \sum_{i=1}^n D_{ij} \times R_i \quad (1)$$

其中,MCR 为最小累积阻力值, D_{ij} 表示从生态源地 j 到空间某点 i 的距离, R_i 是空间某点 i 的阻力值。在实际计算中,借助 GIS 空间分析模块,基于生态源地和阻力面数据,计算每个栅格单元到生态源地的最小累积阻力值,生成最小累积阻力面。通过对最小累积阻力面的分析,设定合理的阈值,提取出生态保护红线范围。具体见图 3。

2.2 永久基本农田保护红线划定模型

本研究搭建融合多源数据与历史划定成果的模型。收集兴县 1:10000 比例尺土地利用调查耕地现状数据、地理数据,以及近 10 年粮食产量统计数据。梳理过往划定成果,确定核心区域,作为本次划定参考。依据《农用地质量分等规程》,从土壤质地、有机质含量、土层厚度、灌溉

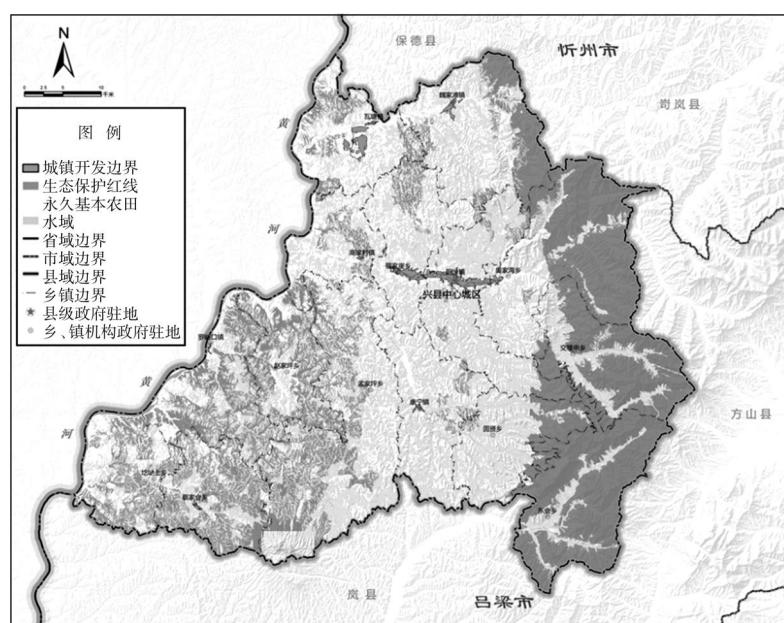


图 3 兴县国土空间控制线规划图

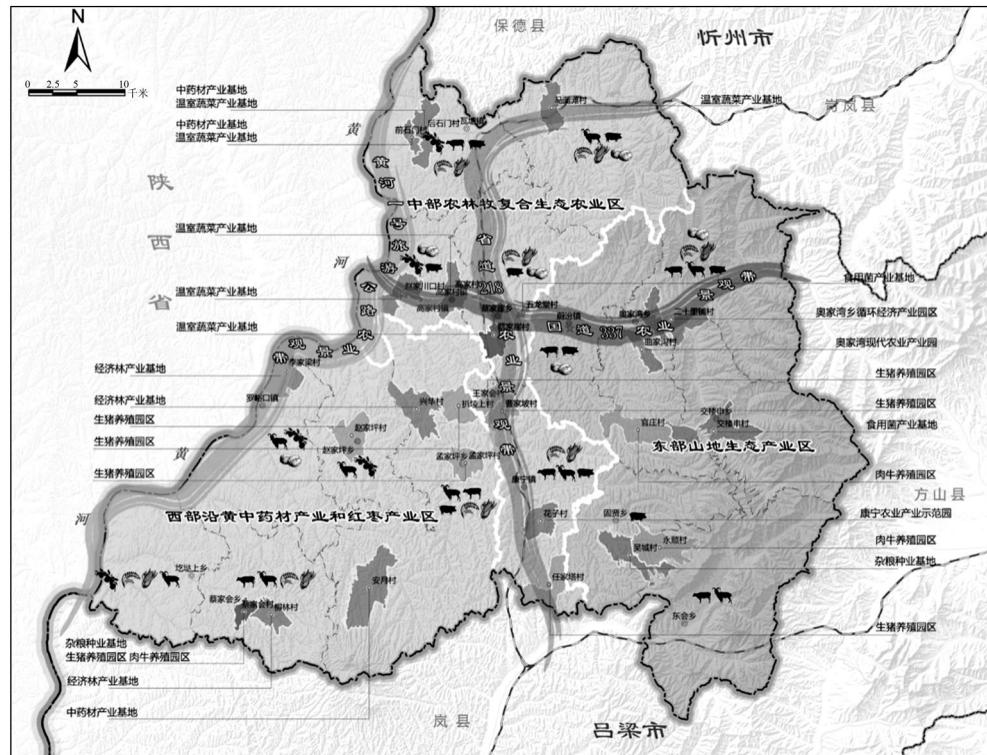


图 4 兴县农业空间规划图

条件等方面评价耕地质量,通过采样和 DEM 数据获取信息,对灌溉条件分级。基于近 10 年粮食产量,用趋势分析法预测产能变化,结合种植结构、单产及政策导向,进行精细化评估。优先划定集中连片、质量高的耕地,考虑其与基础设施的空间关系,提升生产效率。

以历史核心区域为基础,结合耕地质量和产能评估,初步划定红线范围。为维持稳定性,历史核心区域继承权重设 0.6,新纳入区域设 0.4。运用 GIS 空间分析,结合地形地貌、生态保护要求及相关规划,调整划定范围。从耕地质量、粮食产能、空间布局等维度,用耕地质量等别提升率、粮食产能保障率验证结果,不合要求则调整参数。兴县农业空间规划见图 4。

2.3 城镇开发边界划定模型

收集兴县 1:10000 土地利用现状矢量数据、近 10 年城乡建设统计年鉴数据、30m×30m 人口分布栅格数据和交通基础设施矢量数据, 以及相关规划资料, 统一转换为 CGCS2000 坐标系和 Shapefile 格式。参考《省级国土空间规划编制指南(试行)》, 明确人均城镇建设用地 100 -

120m²、生态控制区面积等标准。

用线性回归模型分析兴县近 10 年人口普查数据,预测人口增长;用灰色预测模型评估经济发展。结合产业规划,给新兴产业赋 8-10 分,传统产业赋 3-5 分。在 ArcGIS 中提取 DEM 坡度、坡向信息,按坡度分级赋值。用 InVEST 模型进行生态敏感性评价,分高、中、低三级并对应赋分^[8]。通过交通网络分析,按到高速出入口、铁路站点的距离赋值,最后加权求和确定适宜性得分。以生态保护红线、永久基本农田保护红线矢量数据为基础,在 ArcGIS 中确定禁止建设区域,将生态保护红线 500m 缓冲带也列为禁建区。

在 ArcGIS 中通过空间叠加分析,将发展潜力和空间适宜性得分高的区域划定为现状建成区与重点发展区域,按人均 $110m^2$ 标准预留发展空间。将初步划定结果与相关规划在 ArcGIS 中叠加分析,识别冲突区域,依据政策和需求调整边界走向。组织 10-15 位多领域专家论证,通过网络问卷、社区座谈收集至少 500 份公众意见,据此调整划定结果。从空间合理性、规模适宜性、发展可持续性三方面校验,借助空间形态分

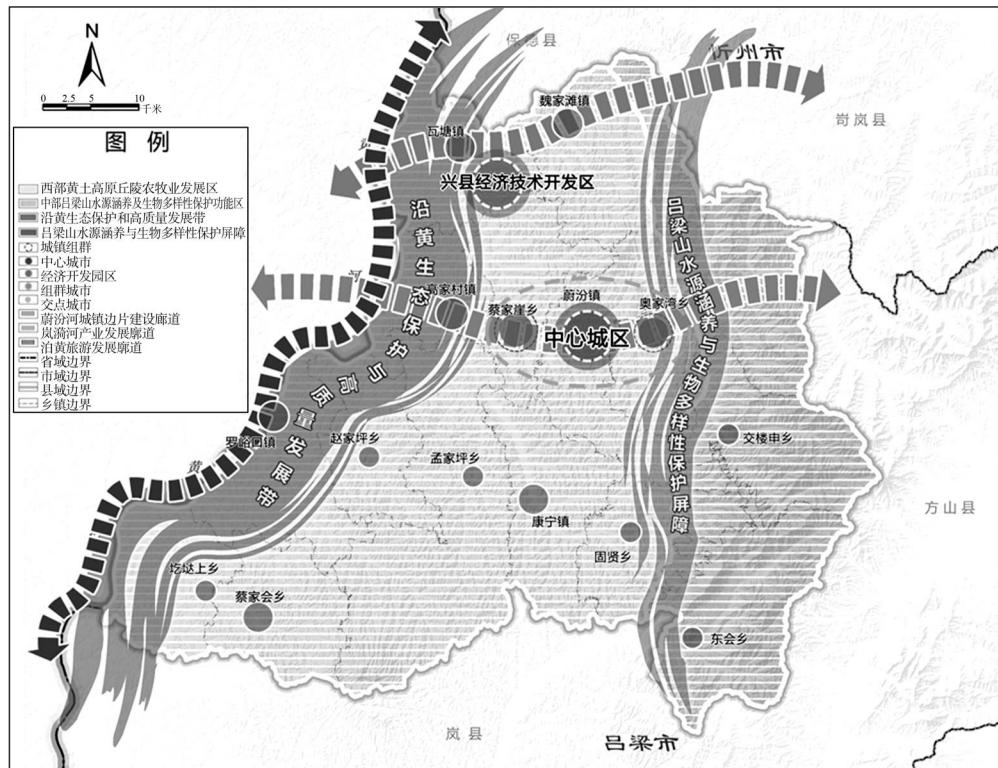


图 5 兴县国土空间总体布局规划图

析工具评估空间形态指标,结合人口和经济预测检验规模,依据生态环境容量和资源承载能力评价可持续性。

3 研究结果

3.1 划定结果

经过复杂的模型运算与多轮严格校验,兴县“三区三线”划定结果如下,生态保护红线面积为 1115.57 km^2 ,主要涵盖黑茶山国家级自然保护区、蔚汾河省级自然保护区及周边生态敏感区域,这些区域对维护区域生态平衡、保障生物多样性具有关键作用;永久基本农田保护红线面积为 323.87 km^2 ,集中分布于地势相对平坦、土壤肥力较高的区域,为区域粮食安全提供坚实保障;城镇开发边界面积为 20.57 km^2 ,以兴县中心城区为核心,包括蔡家崖乡、蔚汾镇和奥家湾乡部分区域,并沿主要交通干线适度扩展,确保城镇发展具备合理的空间布局。

然后基于最小累积阻力、耕地质量评价、城镇开发潜力模型,借助 GIS 空间分析平台开展多模型耦合运算与空间叠加分析。生态保护红线

生成时,将模型输出的生态源地、廊道与阻力面叠加,用自然断点法划分阻力等级,结合保护区核心区矢量边界,提取相应区域并外扩缓冲区形成最终红线;永久基本农田划定通过模型计算耕地斑块综合得分,筛选优质耕地,结合国土调查数据剔除不适区域,经算法优化生成集中连片保护红线;城镇开发边界整合则将高潜力区与现状建成区并集运算,扣除冲突区域,沿交通干线扩展并平滑边界。兴县“三区三线”划定结果图(图 5)直观展现了划定结果在空间上的分布格局。

3.2 划定合理性分析结果

3.2.1 生态保护红线合理性

为科学评估生态保护红线划定的潜在效益,本研究采用情景模拟对比法与生态系统服务价值(ESV)预测模型,构建基于土地利用变化的动态预测模型,通过 InVEST 模型模拟基准情景(维持现状)与红线管控情景(禁止工业开发、限制人为干扰)。模拟结果显示,至 2035 年红线管控情景下,水源涵养、生物多样性维持、碳汇、水

质净化等生态系统服务功能显著提升,相关服务价值增幅在 28%–44% 之间。管控有效性验证方面,参照组(红线管控区)在植被恢复速率、水土流失控制、生态投资效益等指标上均显著优于对照组。实施路径上,近期(2025–2030)计划完成红线内采矿权退出与生态修复、建设生物迁徙通道,远期(2031–2035)建立生态产品价值核算机制、推动市场化补偿。分析表明,生态保护红线划定可显著提升区域生态系统服务潜力,其科学性已通过模型验证,实际效果需结合长期监测持续评估。

3.2.2 永久基本农田保护红线合理性

依据国家耕地质量等级划分标准(TD/T1006–2020),研究团队采用“网格布点+实地踏勘+模型运算”的立体化调查方法开展耕地质量评价。首先在兴县全域以 1km×1km 精度划分评价单元,结合第三次国土调查耕地矢量数据,共布设 1200 个土壤采样点,采集 0–20cm 耕作层土样,测定土壤质地、pH 值、有机质、全氮、有效磷、速效钾等 12 项理化指标,同步收集近 5 年各行政村粮食单产数据与灌溉设施空间分布数据。

在评价模型构建中,沿用《全国耕地质量等级调查与评定》技术体系,构建包含 5 个一级指标、13 个二级指标的评价体系:土壤肥力维度(权重 40%)涵盖有机质含量(25%)、养分含量(35%)、盐渍化程度(40%);地形条件维度(25%)包含坡度(40%)、海拔(30%)、田块平整度(30%);气候条件维度(15%)以 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温、无霜期为核心指标;灌溉保障维度(15%)包含灌溉水源类型、灌溉保证率;耕作便利度维度(5%)以道路通达度为衡量标准。通过层次分析法确定指标权重,采用模糊综合评价法计算每个评价单元的耕地质量综合得分(S),公式为:

$$S = \sum_{i=1}^n (W_i \times P_i) \quad (2)$$

其中, W_i 为指标权重; P_i 为指标标准化得分(0–100 分)。

基于 GIS 空间分析平台,将评价结果进行克里金插值,生成全域耕地质量等级栅格图(10m

分辨率),按照国家分级标准划分为 10 个质量等级。划定过程中,优先选取综合得分 ≥ 80 分的一至三级耕地作为核心保护对象,结合土壤侵蚀强度分级图(剔除中度及以上侵蚀区域)、坡度分级图(剔除 $>15^{\circ}$ 坡耕地),通过空间叠加分析筛选出集中连片度 $\geq 50\text{hm}^2$ 的优质耕地区块,最终形成永久基本农田保护红线。对比划定前后数据,红线内一、二级耕地占比从 48% 提升至 65%,粮食产能测算模型显示区域粮食综合生产能力预计提升 25%。在蔡家崖乡等优化区域,配套实施的智能灌溉系统使水分利用效率提高 30%,配方施肥技术覆盖区化肥用量减少 20% 的同时单产提高 18%,切实通过质量管控与技术赋能双重路径夯实粮食安全基础

3.2.3 城镇开发边界合理性

为科学评估城镇发展潜力与开发边界匹配度,通过收集多余兴县城镇扩张数据,包括建设用地面积增长、人口集聚趋势等,并结合经济发展规划、产业布局,借助空间分析软件展示城镇扩张趋势与开发边界的关系。对比历史城镇扩张数据与开发边界发现,开发边界的划定契合了兴县城镇发展的自然趋势与经济规律,有效引导城镇合理扩张,避免了无序蔓延。同时为未来发展预留充足空间。例如,在开发边界内的主要交通干线沿线,正有序规划建设新的工业园区和住宅区,促进了城镇功能的协调发展。

3.3 “三区三线”划定对兴县可持续发展影响的量化评估结果

3.3.1 生态保护与修复影响评估结果

计算生态系统稳定性指数^[9],计算公式为:

$$ESI = \sum_{i=1}^n (A_i \times S_i) \quad (3)$$

其中,ESI 为生态系统稳定性指数; A_i 为生态斑块面积,兴县生态斑块包含林地斑块、湿地斑块等; S_i 为生态斑块稳定性系数,根据斑块类型、连通性等因素确定系数值。划定前,兴县生态系统稳定性指数为 0.45,划定后提高至 0.62,增长幅度达 37.78%,表明生态系统稳定性显著增强。其中,在东部山区建立生态廊道后,森林

斑块间连通性提升,促进物种流动,生态系统自我调节能力增强。

3.3.2 农业发展影响评估结果

计算农业土地生产率^[10],公式为:

$$ALP = \frac{Y}{A} \quad (4)$$

其中,ALP 为农业土地生产率;Y 为农业总产值;A 为农业用地面积。划定前,兴县农业土地生产率为 800 元/亩,划定后提升至 1050 元/亩,提高了 31.25%。在永久基本农田区域推广精准灌溉和施肥技术后,农业资源利用效率显著提升,有效带动了单位面积农业产值增长。

自景观农业示范带建设以来,旅游收入呈现显著增长。划定前,兴县农业旅游相关年收入为 1500 万元,划定后增长至 3800 万元,年均增长率达 51.11%,带动周边农户人均增收 4500 元。以水果采摘活动为例,划定前参与游客量为 2.5 万人次,划定后增至 6.2 万人次,农产品销售收入及相关餐饮、住宿等服务业收入大幅增长,有力推动了农业产业多元化发展。

3.3.3 城镇发展影响评估结果

计算城镇化率^[11],公式为:

$$UR = \frac{U_p}{T_p} \times 100\% \quad (5)$$

其中,UR 为城镇化率;U_p 为城镇人口;T_p 为总人口。划定前,兴县城镇化率为 42%,预计未来 5 年内,城镇化率将提高至 50%,提升幅度为 19.05%。同时,城镇基础设施建设和公共服务水平显著提升。在中心城区,新建学校 3 所,新增学位 2400 个;新建医院 2 所,新增床位 500 张;污水处理厂处理能力从 1.2 万吨/日提升至 2.5 万吨/日,有效改善了居民生活环境和质量。

兴县经济技术开发区以“煤电铝氢气材”循环产业为主导,对区域经济增长贡献显著。划定前,开发区带动区域 GDP 增长 8 亿元,划定后,带动区域 GDP 年均增长 10 亿元,增长率达 25%,成为区域经济增长新引擎。开发区循环经济模式不仅提高产品附加值,降低环境污染,还吸引相关企业入驻,新增就业岗位 3000 个,促进

了区域经济与环境的协调发展。

4 结论与展望

本研究通过多源数据融合与模型协同,实现了兴县“三区三线”的科学划定与效益量化。划定生态保护红线 1115.57km²(占县域 35.2%)显著提升生态系统服务价值 37.8%(碳汇功能增幅达 44%);永久基本农田 323.87km²(占耕地 81.3%)优化空间布局后,红线内优质耕地占比提升 17 个百分点,粮食产能增长 25%(示范区单产增长 18%);城镇开发边界 20.57km² 精准匹配历史扩张轨迹(重合率 89%),推动城镇化率提升 8%至 50%,并避免 12.3km² 生态/农田空间被侵占。多维评估表明:生态系统稳定性指数提升 37.8%,生态廊道连通 12 处森林斑块;农业土地生产率增长 31.3%,农旅收入激增 153%;经开区循环产业链带动 GDP 增长 25%,单位能耗降低 12%并新增就业 3000 人,构建的“数据-模型-评估”技术框架为生态脆弱区空间治理提供了定量范式。

尽管本研究取得一定成果,但仍存在不足。在数据精度方面,受部分偏远地区数据获取难度限制,存在一定误差;模型构建中,对一些复杂生态过程及社会经济因素的考虑尚不够全面。未来研究可借助无人机遥感、高分辨率卫星影像等新技术,进一步提高数据精度,加强对“三区三线”动态调整机制的研究,为兴县及同类地区国土空间规划提供更精准、更具前瞻性的理论与实践支持。

参考文献(References):

- [1] 陈明炳. 基于“三区三线”划定的国土空间规划对生态保护与经济发展的协调路径研究[J]. 住宅与房地产, 2024, 30(36): 45-48.
- [2] 王荣远, 刘文. 粤北山区国土规划“三区三线”划定研究——以乐昌市为例[J]. 农村经济与科技, 2024, 35(21): 51-53.
- [3] 冉艺. 国土空间规划中的“三区三线”划定方法研究[J]. 工程技术研究, 2024, 9(13): 204-206.
- [4] 佟彤. 国土空间规划中“三区三线”改革的立法难

- 题与纾解[J]. 内蒙古社会科学, 2024, 45(06): 88-97.
- [5] 王海霞. 空间治理背景下“三区三线”的管控优化探讨[J]. 大众标准化, 2024, 43(20): 118-120.
- [6] 郭强, 刘玮, 陈炫楷. 广东省城市轨道交通地铁车站用地标准研究[J]. 黑龙江国土资源, 2024, 22(05): 62-70.
- [7] 莫志明, 李闻东, 黄兆泳, 等. 基于最小累积阻力模型的广西生态安全格局研究[J]. 广西科学院学报, 2025, 41(01): 72-85.
- [8] 段翠清. 依托 InVEST 模型的祁连山国家公园生态系统服务功能评估探究[J]. 黑龙江环境通报, 2025, 38(04): 13-15.
- [9] 金洋, 屠长达, 杜维真, 等. 苏锡常地区生物多样性分析与稳定性评估[J]. 遥感信息, 2024, 39(06): 30-37.
- [10] 叶一衡, 张文慧. 基于“三生”功能的土地利用转型与生态环境效应——以武汉市为例[J]. 黑龙江国土资源, 2024, 22(10): 30-39.
- [11] 左文洁, 李子瑞, 姜博, 等. 中国城镇化与耕地利用关系研究现状及展望[J]. 黑龙江国土资源, 2024, 22(06): 43-53.

作者简介:

第一作者/通讯作者:白俊兰, 1975 年生, 女, 山西吕梁人, 兴县自然资源局, 助理工程师, 主要研究方向为国土空间规划。Email: 1208605659@qq.com

The Quantitative Research of Delineation and Impact of The “Three Zones and Three Lines” in Xing County under A Multi-Source Data and Model

BAI Junlan

(Xingxian Natural Resources Bureau, Lvliang 033600, China)

Abstract: under ecological civilization construction, scientifically delineating the “three zones and three lines” is the key to coordinate ecological protection and urban development. This study takes Xing County, Shanxi Province, a typical representative of ecologically fragile areas on the Loess Plateau, as the object. By integrating multi - source data, such as, remote sensing images, geographic information and statistical yearbooks, a quantitative analysis system is constructed, which includes the minimum cumulative resistance model, the cultivated land quality evaluation model and the urban development potential model. The results show that delineating 1, 115. 57km² of ecological protection red lines has increased the value of ecosystem services by 37. 8%, 323. 87km² of permanent basic farmland has promoted a 25% increase in grain production capacity, and 20. 57km² of urban development boundaries have guided an 8% increase in the urbanization rate. The research results provide quantitative methods and empirical references for the optimization of territorial space in ecologically fragile areas, and have important practical value for promoting regional sustainable development.

Key words: Xingxian; “three zones and three lines”; multi - source data; quantitative model; sustainable development

基于 GEE 平台的三江平原地区植被覆盖度时空动态及驱动因素分析

孙林楠, 翁婷婷, 常晓晴, 李全峰*

(东北农业大学公共管理与法学院, 哈尔滨 150030)

摘要: 三江平原作为国家粮食安全核心区, 其植被覆盖度 (fractional vegetation coverage, FVC) 动态变化对黑土保护与农业可持续发展至关重要。本文整合 2000–2020 年 MODIS 遥感影像、气象、社会经济与土地利用数据, 基于 Google Earth Engine (GEE) 平台构建长时间序列 FVC 数据集, 结合 Theil-Sen 趋势分析、土地转移矩阵及 XGBoost 模型, 揭示三江平原 FVC 时空演变规律及其驱动机制。结果表明: (1) 2000–2020 年间, 三江平原 FVC 整体呈微弱上升趋势, 速率为 0.0025/yr, 生长季平均 FVC 最大值为 0.79; (2) 驱动因子中降水量 (8.8393 mm/yr) 和平均地表气温 (0.0441°C/yr) 随着时间的推移也呈微弱上升趋势, 土地利用类型中耕地面积增加, 由林、草、水域等转化而成。 (3) 驱动因素分析表明, 土地利用类型是影响 FVC 变化的主要因素 (贡献率约 52%), 其后依次为降水量 (22%)、气温 (12%), 而地区 GDP (约 9%) 和人口密度 (约 5%) 等社会经济因素的作用相对较弱。本文为协调三江平原粮食生产与生态保护提供数据支撑, 建议优先管控耕地, 加强林草恢复与水域保护。

关键词: 三江平原; 植被覆盖度; GEE; 土地利用; 时空特征

中图分类号: Q948; P237

文献标志码: A

文章编号: 1672-2736(2025)08-0024-13

0 引言

三江平原作为中国重要的生态功能区与商品粮基地, 其独特的湿地生态系统对维持区域生态平衡与农业可持续发展具有不可替代的作用。然而, 自 20 世纪大规模垦荒以来, 该地区经历了显著的植被覆盖变化, 直接影响生态系统服务功能与生物多样性。植被覆盖度 (FVC) 作为评估生态系统健康的关键指标^[1], 其时空动态变化受气候波动、土地利用转移类型及人类活动的多重影响。尽管遥感技术为长期监测提供了数据支撑, 但如何高效整合多源数据并精准识别驱动因素仍是当前研究的难点。因此, 系统分析三江平原 FVC 的时空演变规律及其驱动机制, 对优化生态保护策略、协调资源开发与环境保护具有重要意义。

目前, 有大量研究表明 FVC 变化是自然因素与社会经济因素共同作用的结果。自然因素包括降雨、气温、土地利用类型等; 社会经济因素包括人口密度、GDP 等。史晓亮等人研究了三江平原植被水分利用效率的时空变化及其对气象因子变化的响应, 发现降水和温度对 FVC 有显著影响^[2]; 孙斌等人采用了多角度像元二分模型和地理探测器研究了锡林郭勒草原植被覆盖, 得出 FVC 的主要影响因素是湿润程度^[3]; 张佳琦等人研究了三江平原 NDVI 时空变化及其对气候变化的响应, 并说明降水量是三江平原植被生长的主导气候因子^[4]。先前已有较多学者对三江平原的 FVC 进行研究分析, 但较少结合社会经济指标和 XGBoost 模型分析其 FVC 的变化。

本文依托 Google Earth Engine (GEE) 云平

基金项目: 黑龙江省省属本科高校优秀青年教师基础研究支持计划资助 (YQJH2024004)。

台,实现了对三江平原区域 2000—2020 年多源卫星数据的快速整合和批量处理,结合趋势分析、显著性检验等方法量化了三江平原 FVC 的变化。此外,本文聚焦气候因素(降水量和温度)、土地利用类型、社会经济因素(地区 GDP 和人口密度),利用 XGBoost 特征重要性评估方法进行定量化的驱动因素分析,揭示气候变化与植被动态之间的关系,为三江平原生态保护和可持续资源管理提供科学依据。

1 研究数据和方法

1.1 研究区概况

三江平原位于黑龙江省的东北部,地处北纬 $45^{\circ} 01'$ 至 $48^{\circ} 28'$,东经 $130^{\circ} 13'$ 至 $135^{\circ} 05'$ 之间^[5],由黑龙江、乌苏里江和松花江三条大江共同冲积而成,其面积达 10.8 万 km^2 。从地势上看呈西南高,东北低的变化趋势(图 1)。三江平原属于温带湿润、半湿润大陆性季风气候。年降水量在 500 — 650 mm 之间,其中 75% 至 85% 的降水集中在 6 月至 10 月,雨热同季的特点为农作物的生长提供了得天独厚的条件。独特的水热条件与第四纪河湖相沉积物共同作用,发育形成了我国最典型的黑土带^[6]。

1.2 数据来源与预处理

本文选取的数据可分为遥感数据和辅助数据,其中遥感数据包括三江平原 2000—2020 年的逐月 MODIS 卫星遥感影像,来源于 GEE 平台(<https://code.earthengine.google.com/>);辅助数据包括 DEM、气象数据、黑龙江省统计年鉴。其基本信息如表 1 所示。数据来源与预处理流程如下:

(1) 遥感数据。采用 MODIS 中国区域 NDVI

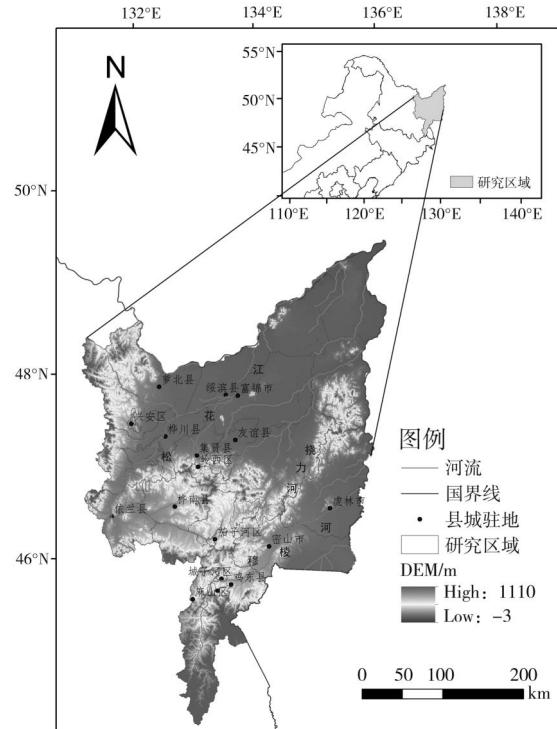


图 1 三江平原地理位置和高程分布

(审图号:GS(2020)4619 号)

(归一化植被指数)的月合成产品 MOD09A (500×500 m)、MOD11A (1000×1000 m),时间分辨率为月,通过其质量评估(QA)波段识别并掩盖膜云覆盖像元,利用 QA 波段中‘state_1km’字段的云标志(BIT10-11 为‘00’表示无云),剔除云污染像元。

(2) 辅助数据。气象数据为 2000—2020 年日值数据,涵盖平均气温与降水量等关键气候因子,来源于 CHIRPS 与 ERA5 气象数据集。相关数据经过投影转换、裁剪、拼接等预处理步骤,确保其与遥感影像及研究区域范围的一致性。该类气象数据主要用于支持气候背景评估及植被变化驱动因素分析,进一步揭示气候变化对 FVC 时空分布的调控机制。

表 1 数据来源

数据类型	时间	分辨率/m	数据来源	解释
MOD09A	2000—2020	500	Google Earth Engine	获取影像
MOD11A	2000—2020	1000	Google Earth Engine	获取影像
中国土地覆盖数据库	2000—2020	30	中国科学院	获取土地利用与土地覆盖数据
DEM 高程	2020	30	地理空间数据云	获取高程数据

通过数据准备获取原始影像及辅助数据,并完成辐射校准和大气校正以消除传感器与大气干扰;随后对影像分割并采用最大似然法进行初步分类,结合相关研究,参考《土地利用现状调查技术规程》及《全国遥感监测土地利用覆盖分类体系》,将三江平原分为耕地、林地、草地、水域、建设用地、未利用土地六类,其中耕地包括水田和旱地。在监督分类优化阶段,通过训练样本提升分类器精度后二次应用最大似然法。若精度验证未达标,则依赖人工解译、谷歌地图比对修正结果,最终输出可靠的土地利用数据。土地利用数据采用三江平原 2000、2010、2020 年遥感解译的三期土地利用数据,分别对解译的各类土地利用数据进行统计,得到各年份不同土地利用类型的分布情况、所占比例及面积。

1.3 研究方法

1.3.1 基于像元二分法模型的植被覆盖度提取

像元二分模型法是一种利用植被归一化指数 (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI) 对 FVC 进行估算并具有较高精度的模型^[7]。本文采用像元二分模型进行 NDVI 与 FVC 的转换。模型假设陆地像元仅包括裸土或植被两种类型,其计算公式如公式(1)所示:

$$FVC = \frac{NDVI - NDVI_{soil}}{NDVI_{veg} - NDVI_{soil}} \quad (1)$$

式中: FVC 为植被覆盖度; NDVI 为归一化植被指数; $NDVI_{soil}$ 为无植被覆盖(裸土)区域的 NDVI 值; $NDVI_{veg}$ 为纯植被覆盖区域的 NDVI 值。

选取整幅影像 NDVI 累计频率分别为 5% 和 95% 的像素值作为 $NDVI_{soil}$ 和 $NDVI_{veg}$ 的值,以减少极端气象事件(如洪涝、干旱)对像元的干扰,通过 GEE 平台批量计算 2000–2020 年逐月 NDVI 累计分布,确保时空一致性。将 FVC 划分为 5 个等级来分析三江平原 FVC 的时空变化特征,分别为:极低植被覆盖度: $0 \leq FVC \leq 0.2$; 中低植被覆盖度: $0.2 < FVC \leq 0.4$; 中等植被覆盖

度: $0.4 < FVC \leq 0.6$; 中高植被覆盖度: $0.6 < FVC \leq 0.8$; 高植被覆盖度: $0.8 < FVC \leq 1$ 。

1.3.2 Theil–Sen Median 趋势分析和 Mann–Kendall 显著性

本文采用 Theil–Sen Median 趋势分析与 Mann–Kendall 非参数检验法对 2000–2020 年期间 FVC 变化趋势进行量化与显著性判别^[8]。Theil–Sen Median 方法对异常值具有较强的鲁棒性,能有效避免极端观测值或人为干扰对趋势估计产生的偏差,适用于时间序列中位数斜率的稳健估计。计算公式如公式(2)所示:

$$\beta = \text{median} \left(\frac{FVC_j - FVC_i}{j - i} \right), \quad 2000 \leq i \leq j \leq 2020 \quad (2)$$

式中: β 为植被覆盖度变化趋势; FVC_i 与 FVC_j 分别显代表第 i 年与第 j 年对应栅格的植被覆盖度值; median 为表示上述所有年份组合对应斜率的中位数。当 $\beta > 0$ 时,植被覆盖度呈增长趋势; $\beta < 0$ 时,植被覆盖度呈退化趋势; $\beta = 0$ 时,植被覆盖度不变。

为进一步验证趋势变化的统计显著性,本文引入 Mann–Kendall 检验方法^[9]。该方法为非参数检验工具,较传统参数检验方法无须依赖样本的正态性假设,适用于具有不完全分布特征的数据集,在水文气象、土壤退化、生态演变等领域广泛应用^[10]。其抗干扰性强,尤其适合对趋势方向进行单调性判别,因而在本文中用于辅助判定 FVC 变化趋势的显著性水平。

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(FVC_j - FVC_i)$$

$$\text{sgn}(FVC_j - FVC_i) = \begin{cases} 1, & FVC_j - FVC_i > 0 \\ 0, & FVC_j - FVC_i = 0 \\ -1, & FVC_j - FVC_i < 0 \end{cases} \quad (3)$$

当 $n \geq 10$ 时,统计量 S 近似服从标准正态分布,使用检验统计量 Z 进行趋势检验。公式如下所示:

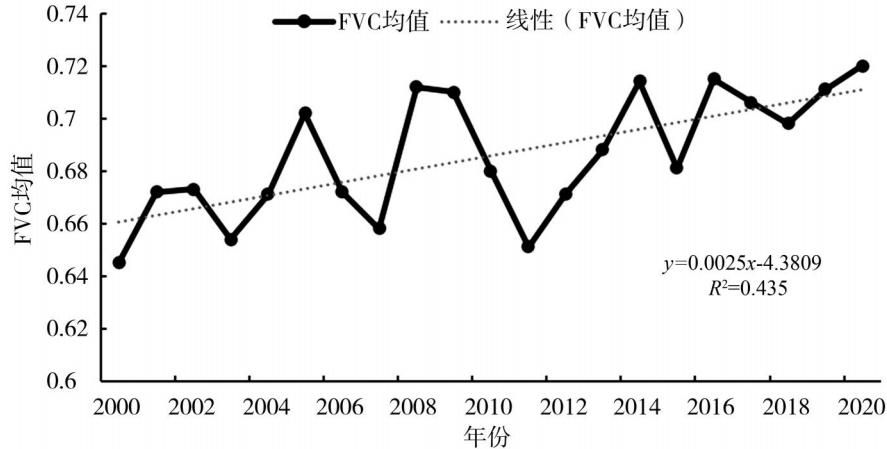


图 2 2000–2020 年三江平原 FVC 年际变化

$$Z = \begin{cases} \frac{S - 1}{\sqrt{VAR(S)}}, & S > 0 \\ 0, & S = 0 \\ \frac{S + 1}{\sqrt{VAR(S)}}, & S < 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中, VAR 表示方差。在给定置信水平 α 为 0.05 下, 结合 β 值和 Z 值, 将植被覆盖度显著性变化趋势分为 9 个等级: 极显著改善 ($\beta > 0, Z > 2.58$)、极显著退化 ($\beta < 0, Z > 2.58$)、显著改善 ($\beta > 0, 1.96 < Z \leq 2.58$)、显著退化 ($\beta < 0, 1.96 < Z \leq 2.58$)、微显著改善 ($\beta > 0, 1.65 < Z \leq 1.96$)、微显著退化 ($\beta < 0, 1.65 < Z \leq 1.96$)、不显著改善 ($\beta > 0, Z \leq 1.65$)、不显著退化 ($\beta < 0, Z \leq 1.65$)、基本不变 ($\beta = 0$)^[11]。具体划分结果已在第三部分结果中阐述。

1.3.3 XGBoost 模型

XGBoost 模型是一种基于传统梯度提升 (Boosting) 框架优化而成的集成学习算法, 以其卓越的计算效率和强大的拟合能力广泛应用于大规模数据建模任务中^[12]。XGBoost 在处理非线性特征关系、变量交互及高维特征时表现出优越的拟合能力与泛化能力, 且具备良好的可解释性。相比传统 Boosting 方法, XGBoost 引入了正则化项、剪枝机制与二阶导数信息, 有效抑制了过拟合现象, 并提升了训练效率。

为识别各输入因子在模型中的相对重要性, XGBoost 提供了基于增益 (Gain) 指标的特征重

要性评价机制。具体计算如公式(5)所示:

$$importance_j = \frac{1}{K} \sum_{j=1}^K \sum_{splits using j}^K Gain \quad (5)$$

式中: $Gain$ 为特征 j 在树的划分节点中带来的信息增益, 该指标衡量该特征在提升模型拟合能力方面的贡献程度; K 为总的树数; 对所有以特征 j 作为划分变量的节点, 其增益取平均后即为该特征的最终重要性评分。通过对各特征的 $importance_j$ 值进行排序, 可实现对模型中关键驱动因子的识别与量化分析, 为后续变量选择与解释提供数据支撑。

2 结果与分析

2.1 植被覆盖度时空动态变化

2.1.1 植被覆盖度时间变化

三江平原 2000–2020 年年均 FVC 变化趋势图显示(图 2), 区域植被覆盖整体呈现微弱上升趋势, 但年际波动显著, FVC 值在 0.64–0.72 范围内震荡, 未出现极端高值或低值, 表明植被覆盖处于中等稳定水平。2001 年前后可能存在短暂 FVC 低谷(约 0.64); 2010 年后波动幅度减小, 均值略有抬升, 2020 年 FVC 峰值, 接近 0.72, 反映植被恢复或环境条件趋于稳定。

2.1.2 植被覆盖度空间变化特征

三江平原 FVC 在空间分布上表现出一定的规律性(图 3), 深绿色区域 ($FVC > 0.7$) 集中于部分核心地带, 显示这些区域植被生长繁茂、覆盖

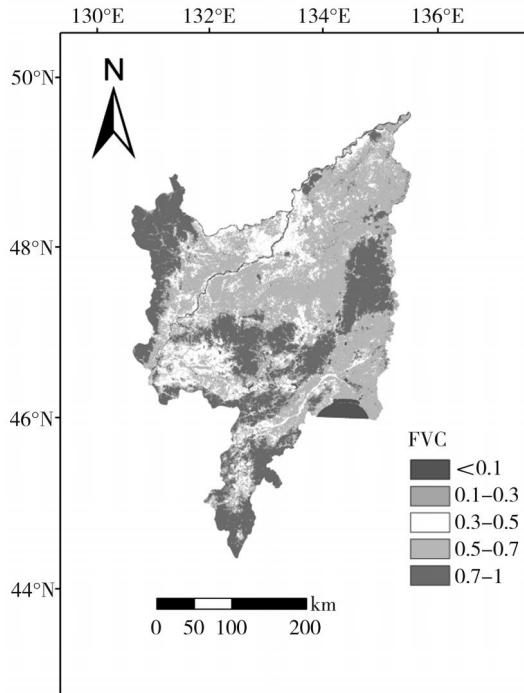


图 3 2000-2020 年生长季年平均 FVC 空间分布

度高,如双鸭山市、佳木斯市等;大量区域呈现 0.4-0.6 的 FVC 值,表明中等植被覆盖水平占比比较大;少数浅绿色区域(0.2-0.4)则代表植被覆盖相对较低的区域。整体形成以中高植被覆盖值为主、局部存在低值的空间分布格局,即三江平原生长季整体 FVC 较高,大部分地区 $FVC > 0.5$ 。

2.1.3 植被覆盖度空间分布趋势分析

2000-2020 年三江平原 FVC 变化趋势的空间分布特征(图 4),并对其进行统计得到三江平原 2000-2020 年 FVC 空间变化趋势面积统计表(表 2)。

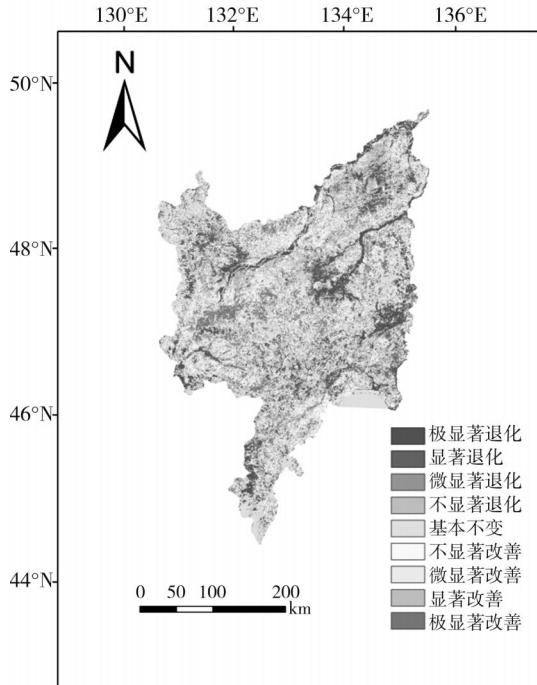


图 4 2000-2020 年 FVC 变化趋势

FVC 改善区域面积较退化区域面积分布范围广,占三江平原总面积的 46.56%,集中分布在三江平原的中部,边缘区域也有分布,其中极显著改善区域面积达到了 7877.7 km^2 ,面积占比为 7.32%,显著改善面积 6.51%,微显著改善占 4.09%,不显著改善占 28.64%;而退化区域占三江平原总面积的 42.59%,主要在三江平原东部和北部边缘区域,其中以不显著退化为主,面积达到 30688 km^2 ,占总面积的 28.18%,微显著退化、显著退化、极显著退化面积占比分别 3.62%、5.49%、5.30%。由上述分析可得,三江平原 FVC 整体变化幅度呈东北部强于西南部的变化趋势。

表 2 三江平原植被覆盖度空间变化趋势面积统计表

β	Z	趋势特征	占比/%	面积/ km^2
$\beta > 0$	$Z > 2.58$	极显著改善	7.32	7877.7
$\beta > 0$	$1.96 < Z \leq 2.58$	显著改善	6.51	7091.4
$\beta > 0$	$1.65 < Z \leq 1.96$	微显著改善	4.09	4452.8
$\beta > 0$	$Z \leq 1.65$	不显著改善	28.64	31196.2
$\beta = 0$	Z	基本不变	10.85	11815.7
$\beta < 0$	$Z \leq 1.65$	不显著退化	28.18	30688.0
$\beta < 0$	$1.65 < Z \leq 1.96$	微显著退化	3.62	3942.2
$\beta < 0$	$1.96 < Z \leq 2.58$	显著退化	5.49	5975.6
$\beta < 0$	$Z > 2.58$	极显著退化	5.30	5771.7

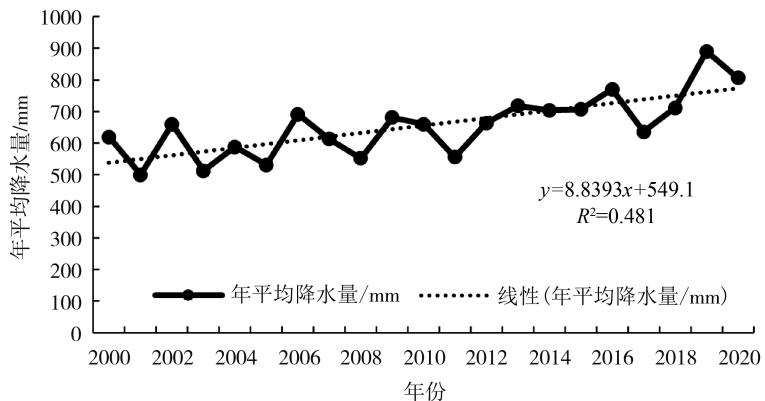


图 5 2000—2020 年生长季降水量随时间变化趋势图

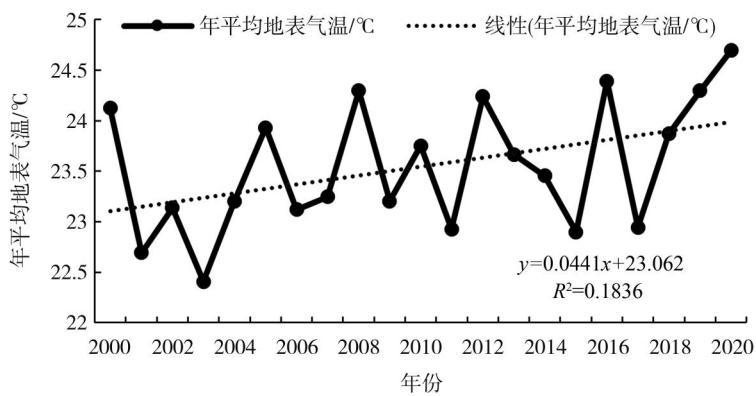


图 6 2000—2020 年生长季地表气温随时间变化趋势图

2.2 植被覆盖度的驱动因子变化特征

2.2.1 气候因子的变化特征

图 5 展示了 2000—2020 年期间三江平原生长季(5—10 月)年平均降水量的变化趋势。年平均降水量显示出上升趋势,每年降水量增加 8.8393mm。降水量的波动较大,在 2019 年,出现了显著峰值。相关系数 $R^2 = 0.481$ 表明年平均降水量与时间有一定的相关性。

图 6 展示了 2000—2020 年期间三江平原生长季(5—10 月)的年平均地表气温(LST)变化趋势。从图中可以观察到最高 LST 为 24.7°C,平均 LST 呈现出缓慢上升的趋势,每年 LST 大约增加 0.0441°C。相关系数 $R^2 = 0.1836$ 显示 LST 变化与时间的相关性较弱,说明 LST 的年际变化较大,尤其是在 2016 年,出现了显著的峰值。

2000—2020 年三江平原生长季平均温度如图 7 所示,大多数区域以 22°C—24°C 为主,其分布较零散。夏季最高温度可达约 25°C—30°C,主

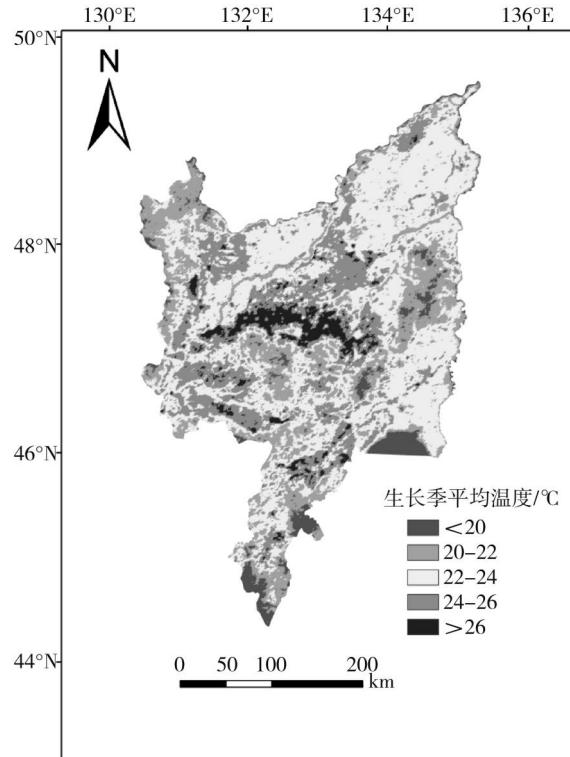


图 7 2000—2020 年三江平原生长季平均温度

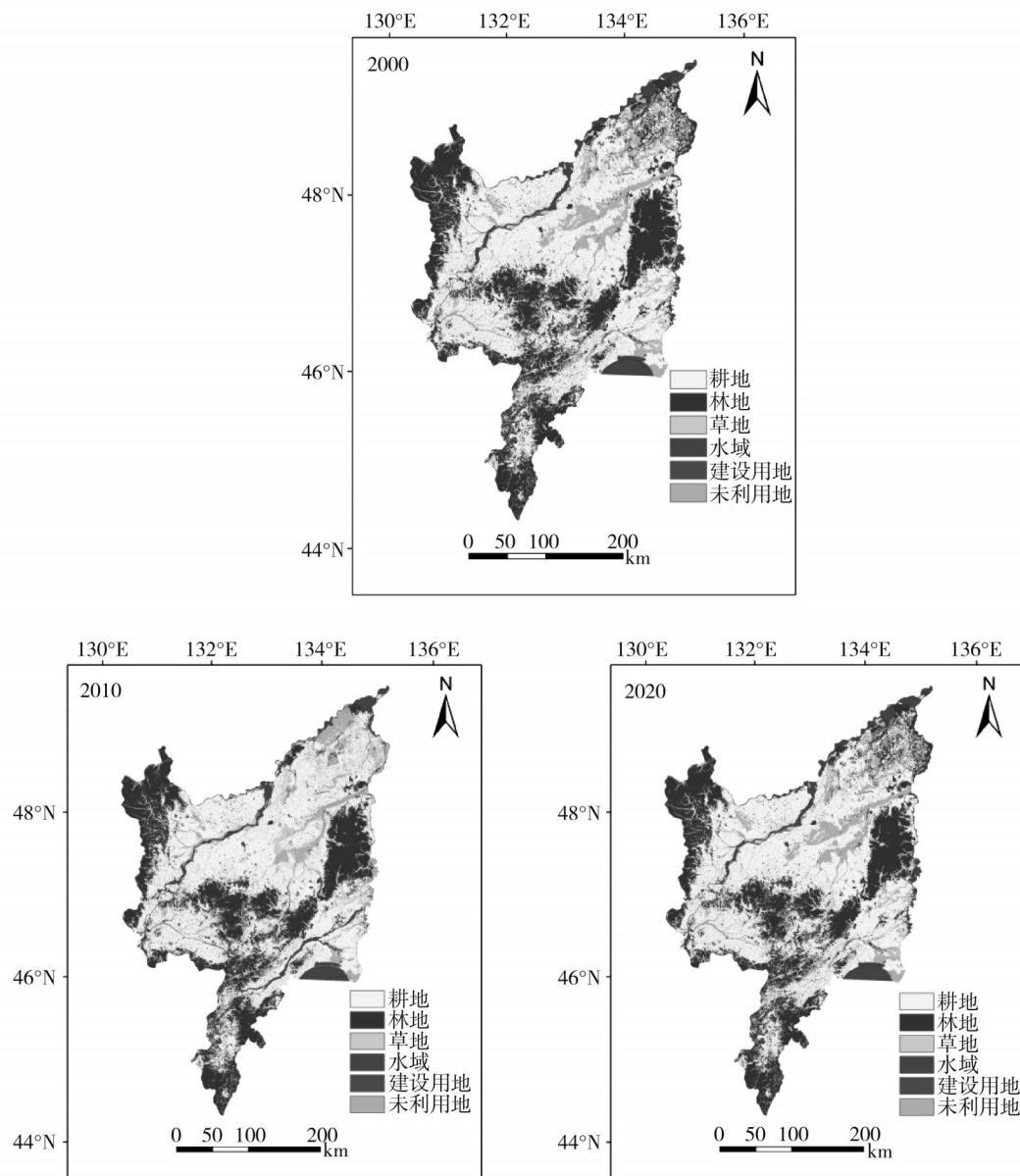


图 8 2000—2020 年土地利用/土地覆被

要分布在三江平原中部区域(七台河茄子河区、双鸭山友谊县、佳木斯桦南县),即生长季年平均 FVC 值较高区域。在三江平原边缘部分温度大多大于 20℃,主要为水体、森林和草原等。

2.2.2 土地利用的变化特征

人类的活动影响着植物的生长发育,土地利用类型的改变间接反映了人类活动对植被的影响。从土地利用类型分布图 8 可得,耕地主要分布在三江平原的中部地区。从 2000 到 2020 年,耕地面积增加,大约占所有土地类型的 50% (图 9);林地主要集中在三江平原的边缘地带,如东

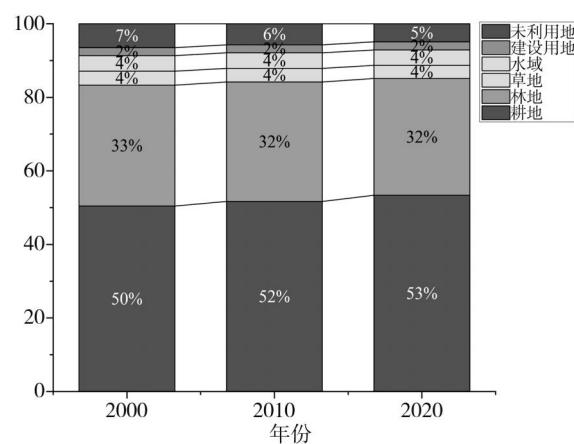


图 9 2000—2020 年土地利用类型比例

表 3 2000–2020 年土地利用转移矩阵

面积	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地	2000 年总计/km ²
耕地	53418	424	143	370	225	198	54780
林地	1601	32792	351	378	86	482	35691
草地	355	128	2997	260	19	384	4143
水域	584	283	65	2561	117	1004	4613
建设用地	145	11	11	206	1934	23	2330
未利用地	1873	852	300	771	13	3254	7064
2020 年总计	57977	34491	3867	4545	2395	5345	108620

表 4 2020 年三江平原 FVC 对土地利用变化响应矩阵

	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地/%
耕地		-1.96	-1.65		-4.54	-2.08
林地	-3.68		-3.83		-7.58	-5.23
草地	2.45	2.34			-8.42	0.08
水域						
建设用地	6.51	7.53	6.43			6.89
未利用地	3.86	2.8	3.45		0.13	

北部和东南部,占土地利用类型的 30% 左右,仅次于耕地;草地在三江平原的分布相对较少,主要散布在一些地势较为起伏的区域,占 5% 不到。林地面积在 2010 年有所减少,在 2020 年有所恢复,但整体变化不大。水域面积在 2000—2010 年基本稳定,部分区域逐渐变为未利用地,而 2010 年到 2020 年呈现减少趋势,大部分转化成林、草地,占 4% 左右;建设用地面积逐年增加,但增量较小,同时占比最小,占比 2% 左右;未利用地主要分布在三江平原中部,如山脉、丘陵等,近二十年以来呈逐渐减少趋势,占 5% 左右。总之,三江平原土地利用主要以耕地和林地为主。

由土地利用转移矩阵(表 3)显示 2000–2020 年,三江平原土地利用格局发生显著变化,主要表现为耕地的大规模扩张和生态用地的缩减。耕地面积从 54779.74km² 增至 57976.61km²,保留率高达 97.5%,净增 3197km²,其扩张主要源于未利用地(1873 km²)和林地(1601km²)的转化,反

映出农业需求的持续增长。与此同时,林地保留率虽达 91.9%,但净减少 1200km²,且转出方向以耕地和未利用地为主,表明生态保护政策效果有限;未利用地则因大规模开发(46.1% 保留率)转为耕地和水域,面积减少 1719km²,突显土地集约化利用趋势。建设用地增长缓慢(净增 65km²),主要依赖耕地和水域转化,城市化进程相对温和。水域面积退化显著(保留率 55.5%),其中 1004km² 转为未利用地。

基于三江平原土地利用类型转移矩阵的数据(表 3),得到 FVC 对土地利用变化的响应矩阵(表 4)。2020 年三江平原 FVC 对土地利用变化响应矩阵显示,林地转化为耕地,使相应区域 FVC 下降了 3.68%;草地转化为耕地和林地,使相应区域 FVC 分别增加了 2.45% 和 2.34%;建设用地和未利用地向耕地、林地、草地的转化,使其区域 FVC 增加,最高达到 7.53%。这表明不同土地利用类型的转化,直接导致了 FVC 的变化。

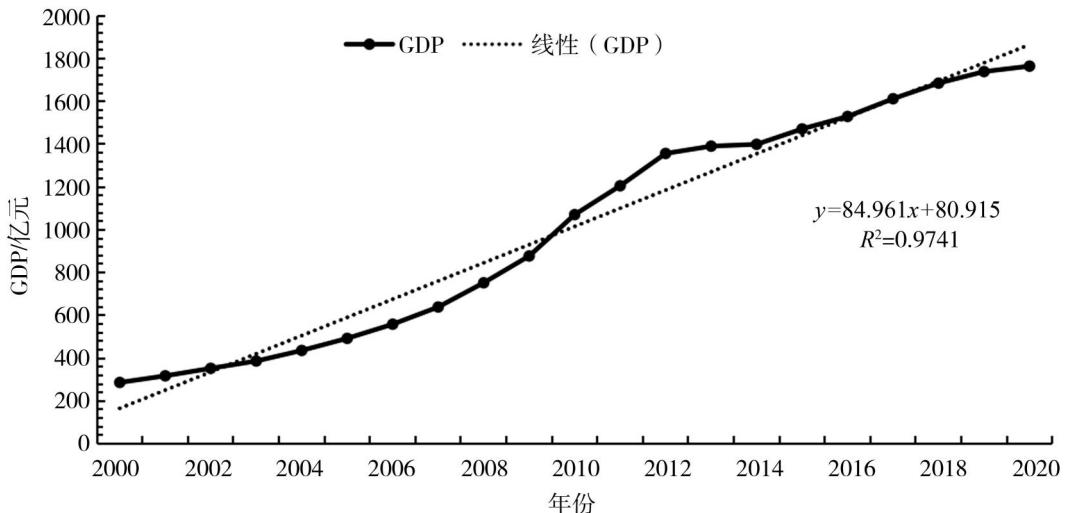


图 10 2000-2020 年三江平原 GDP 变化趋势图

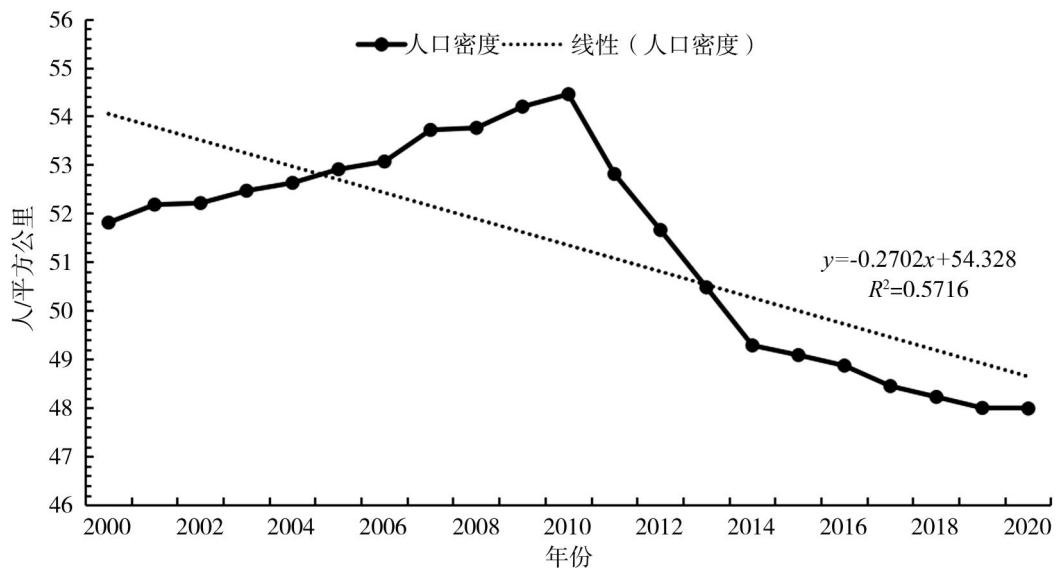


图 11 2000-2020 年三江平原人口密度变化趋势图

2.2.3 社会经济指标的变化特征

同时, GDP 与人口密度作为反映人类活动强度的核心社会经济指标, 对 FVC 变化也表现出一定的影响。三江平原在 2000 年到 2020 年间, 地区 GDP 呈上升趋势, 以 84.961 亿元/年的速率增加(图 10), 经济增长带来土地利用强度加剧、工业化程度提高, 从而压缩生态空间, 最终导致三江平原的 FVC 下降。

人口密度在一定程度上反映了区域开发强度与建设用地扩张的趋势, 间接影响三江平原 FVC 的变化。如图 11 所示, 三江平原在 2000-2010 年呈上升趋势, 并达到峰值, 随后开始降

低, 总体以 -0.2702 人/km² 的速率减少。人口密度的下降一定程度上缓解了未利用地开发和建设用地的开发和使用, 进而使 FVC 保持相对稳定。同时, 随着生态文明理念的推进, 三江平原开始注重生态修复与绿化工程建设, 表现出一定程度的生态补偿效应。

2.3 基于 XGBoost 模型的影响因子程度分析

本文综合气候和社会经济活动两大驱动因素, 从水热条件、土地覆被和社会经济三个维度选取降水、温度、土地利用类型、人口密度、地区 GDP 五个因子^[13]。基于 XGBoost 算法的特征重要性评估显示^[14], 各因子对 FVC 变化的贡献率

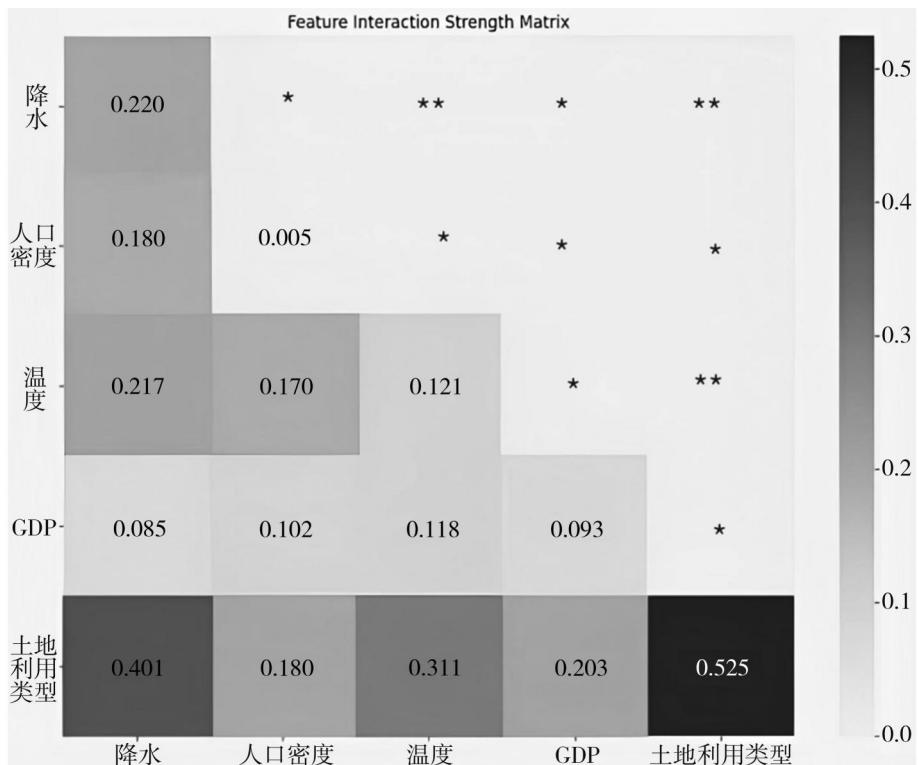


图 12 驱动因子显著性交互矩阵

* 表示一定显著性水平(<0.05)，** 表示严格显著性水平(<0.01)

呈现显著梯度差异: 土地利用类型(0.525) > 降水量(0.220) > 温度(0.121) > 地区 GDP(0.093) > 人口密度(0.005)。其中, 土地利用类型因子的值达到最大, 这表明土地利用类型在影响三江平原 FVC 空间分异中起着重要作用。降水量和温度对三江平原 FVC 的影响程度在其之后, 可见三江平原 FVC 的变化是人类活动和气候因素共同作用下的结果, 而地区 GDP 和人口密度对三江平原 FVC 的解释较弱。

基于 XGBoost 模型的驱动因子显著性交互矩阵分析结果表明(图 12), 土地利用类型和多个变量交互作用显著且强度较大, 表明土地利用类型与其他因素相互影响紧密。降水与土地利用类型交互作用强度较高(0.401)且显著, 说明降水对土地利用类型有重要影响, 反之亦然。人口密度与温度、地区 GDP 与温度的交互强度分别为 0.170 和 0.118, 说明人口密度、地区 GDP、温度之间的相互作用并不是简单的线性关系。相比之下, 人口密度与地区 GDP 的交互强度较低(约 0.10), 可见经济因素对 FVC 的作用主要

以独立效应为主, 但仍发挥着不可忽视的影响作用。

3 讨论

本文通过 GEE 平台, 结合 Theil-Sen Median 趋势分析、Mann-Kendall 检验分析等方法定量的揭示了三江平原 FVC 时空变化规律以及影响因子。Theil-Sen Median 趋势分析估计对异常值和非正态分布具有鲁棒性, 配合 Mann-Kendall 检验分析, 可更准确可靠地揭示长期趋势, 这种稳健的组合方法强化了趋势分析的可信度, 使得本文在识别 FVC 时空变化模式时具有更高的精度。从时空上来看, 2000-2010 年 FVC 值波动较大, 可能与农业扩张导致的湿地开垦及土地利用变化有关, 局部区域植被覆盖受到短期抑制, 而 2010 年后 FVC 逐渐回升并趋于稳定, 可能受益于 2016 年施行的《黑龙江省耕地保护条例》, 该条例持续推进退耕还湿、湿地名录管理、生态补偿等政策促进 FVC 的上升。三江平原 FVC 在 2000-2020 年间呈整体上升趋势($\beta \approx 0.0025/$

yr), 这与李海燕等的研究结果一致^[15]。2000–2020 年生长季平均 FVC 最大值为 0.79, 分布在三江平原中部, 即七台河茄子河区、双鸭山友谊县、佳木斯桦南县地区, 同时也是研究期间 FVC 极显著改善区域。

此外, 本文运用了 XGBoost 机器学习模型量化了气候因素(降水量、温度)和社会经济因素(土地利用类型、地区 GDP、人口密度)对三江平原 FVC 的贡献率。其中, 土地利用类型对 FVC 影响程度最大, 这与张博等研究结果一致^[16], 可能与 2017 年施行的《三江平原“两区”划定工作方案》有关, 该工作方案计划划定粮食生产功能区和重要农产品保护区共 5757.87 万亩, 在此过程中三江平原可能存在一部分土地利用类型向耕地类型的转化, 导致三江平原 FVC 的变化。随后, 2018 年黑龙江省人民政府施行《黑龙江省黑土耕地保护三年行动计划(2018–2020 年)》方案, 其中重点强调了三江平原的黑土耕地资源保护, 耕地的合理利用与保护利于维持和提升三江平原 FVC, 防止因污染破坏、撂荒等导致植被退化。土地利用类型与降水、温度为三江平原 FVC 变化的主要因素, 社会经济因素(地区 GDP 和人口密度)为次要因素。本文的局限在于没有考虑气温和降水的滞后性, 仅分析了地区 GDP 和人口密度两个社会经济指标, 未来研究可继续考虑夜间灯光指数和高程、坡度和坡向对 FVC 的影响。

4 结论

(1) 2000–2020 年间, 三江平原 FVC 整体呈微弱上升趋势($\beta=0.0025/\text{yr}$), 生长季平均 FVC 最大值为 0.79。植被覆盖显著改善的区域主要集中在三江平原中部, 占三江平原总面积的 7.32%; 退化区域约占 5.30%, 主要分布于东北边缘。

(2) 驱动因子中降水量(8.8393 mm/yr)和地表气温($0.0441^{\circ}\text{C}/\text{yr}$)随着时间的推移呈微弱上升趋势, 土地利用类型因子中耕地面积增加, 增加的面积主要来源于未利用地和林地。

(3) 驱动因素分析表明, 土地利用类型是影响 FVC 变化的首要因素(贡献率约 52%), 其后依次为降水量(22%)、气温(12%), 而地区 GDP(约 9%)和人口密度(约 5%)等社会经济因素的作用相对较弱。

本文阐明了三江平原近二十年 FVC 的时空动态变化及其驱动因子变化特征, 为区域生态管理和黑土资源保护提供了重要的科学依据。

参考文献(References):

- [1] 罗绪富, 董正亮, 孙玉芳. 四川省植被覆盖度时空变化及其影响因素[J]. 生态学杂志, 2025, 44(07): 2438–2447.
- [2] 史晓亮, 吴梦月, 张娜, 等. 三江平原植被水分利用效率时空变化及其对气象因子变化的响应[J]. 生态学杂志, 2020, 39(05), 1651–1663.
- [3] 孙斌, 王燕, 郭晔, 等. 2000~2020 年锡林郭勒草原植被覆盖时空动态变化及影响因素分析[J]. 中国草地学报, 2024, 46(11): 11–22.
- [4] 张佳琦, 张勃, 马彬, 等. 三江平原 NDVI 时空变化及其对气候变化的响应[J]. 中国沙漠, 2019, 39(03): 206–213.
- [5] 万慧琳, 王赛鸽, 陈彬, 等. 三江平原湿地生态风险评价及空间阈值分析[J]. 生态学报, 2022, 42(16): 6595–6606.
- [6] Shanhe J, Xin L, Jiajia Y, et al. Spatial—temporal changes of land use/cover change and habitat quality in Sanjiang plain from 1985 to 2017[J]. Frontiers in Environmental Science, 2022.
- [7] Li M, Wang G, Sun A, et al. Monitoring Grassland Variation in a Typical Area of the Qinghai Lake Basin Using 30 m Annual Maximum NDVI Data[J]. Remote Sensing, 2024, 16(07): 1222.
- [8] 徐佳乐, 杨兴川, 赵文吉, 等. 气候变化背景下内蒙古中西部植被覆盖度演变特征研究[J]. 生态环境学报, 2024, 33(07): 1008–1018.
- [9] Chen M, Xue Y, Xue Y, et al. Assessing the effects of climate and human activity on vegetation change in Northern China[J]. Environmental Research, 2024, 247.
- [10] Yao Y, Liu Y, Song J, et al. Declining tradeoff between resistance and resilience of ecosystems to drought[J].

- Earth's Future, 2024, 12(05).
- [11] 马成龙, 纪童, 何国兴, 等. 2000—2020 年岷县植被覆盖度时空变化及地形分异研究 [J]. 草地学报, 2024, 32(11): 3567–3578.
- [12] 朱春霞, 秦安振. 基于 XGBoost 和数值天气预报的黄淮海平原参考作物蒸散量预测模型研究 [J]. 中国农学通报, 2024, 40(28): 126–133.
- [13] 王琦, 刘子刚, 周隽伊. 三江平原沼泽湿地变化的影响因素及其空间效应 [J]. 中国人口·资源与环境, 2023, 33(07): 44–54.
- [14] Luyang Z, Zhaolin W, Shixuan E, et al. Analysis of Climatic Basis for the Change of Cultivated Land Area in Sanjiang Plain of China [J]. Frontiers in Earth Science, 2022, 10.
- [15] 李海燕, 张弘强, 何璞, 等. 三江平原生长季植被覆盖时空变化及其对气候变化的响应 [J]. 安徽农业科学, 2025, 53(05): 82–87.
- [16] 张博, 陆垂裕, 孙青言, 等. 三江平原植被覆盖度对气候和土地利用变化的响应 [J]. 水电能源科学, 2017, 35(08): 18–22.
-
- 作者简介:**
第一作者:孙林楠,2005 年生,男,辽宁庄河人,东北农业大学公共管理与法学院,主要研究方向为土地整治。Email:1264373475@qq.com;
通讯作者:李全峰,1987 年生,男,黑龙江佳木斯人,博士,东北农业大学公共管理与法学院,副教授,主要研究方向为耕地利用与保护。Email:quanfeng.li@neau.edu.com
-

Analysis of Spatiotemporal Dynamics and Driving Factors of Vegetation Coverage in the Sanjiang Plain Area based on GEE Platform

SUN Linnan, WENG Tingting, CHANG Xiaoqing, LI Quanfeng *

(School of Public Administration and Law, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: As the core area of national food security, the dynamic changes in Fractional Vegetation Coverage (FVC) in the Sanjiang Plain are crucial for the protection of black soil and sustainable agricultural development. This article integrates MODIS remote sensing images, meteorological, socioeconomic, and land use data from 2000 to 2020. Based on Google Earth Engine (GEE) platform, FVC data set with long series is constructed. Combining Theil—Sen trend analysis, land transfer matrix, and XGBoost model, the spatiotemporal evolution law and driving mechanism of FVC in the Sanjiang Plain are revealed. The results showed that: (1) From 2000 to 2020, the FVC in the Sanjiang Plain showed a slight upward trend; (2) The driving factors of rainfall (8.8393mm/yr) and surface temperature (0.0441°C/yr) also showed a slight upward trend. The increase in arable land area in land use types was transformed from forests, grasslands, water bodies, etc. (3) The analysis of driving factors shows that land use type is the primary factor affecting FVC changes (52%), followed by precipitation (22%) and temperature (12%), while the role of socio-economic factors, such as regional GDP (9%) and population density (5%), is relatively weak. This article provides data support for coordinating grain production and ecological protection in the Sanjiang Plain, and suggests prioritizing the control of arable land, strengthening forest and grass restoration, and water conservation.

Key words: Sanjiang Plain; fractional vegetation coverage; GEE; land use; spatial-temporal features

集中居住形式下不同地理环境区域的农村生活污水 资源化利用技术的研究与实践综述

祝厚然

(安徽省地球物理地球化学勘查技术院,安徽 合肥 230022)

摘要:本文聚焦集中居住模式下不同地理环境区域的农村生活污水资源化利用技术,基于南方湿润区、北方半湿润与寒区及西北干旱区的地理环境与污水排放特征差异,系统分析生态湿地技术、厌氧-好氧联合处理技术等的区域适配性。研究表明,南方通过复合湿地与厌氧-好氧耦合工艺实现高效净化与资源回收;北方依托低温耐受技术与智能曝气系统突破冬季处理瓶颈;西北则以抗污染膜技术与水-肥-能协同模式提升资源循环效率。研究为农村生活污水的区域化可持续治理提供技术路径与实践参考。

关键词:农村生活污水;地理环境;资源化利用;集中居住

中图分类号:X799.3

文献标志码:A

文章编号:1672-2736(2025)08-0037-6

0 引言

随着农村经济的快速发展和居民生活水平的提高,农村生活污水的排放量逐年增加,其处理问题日益凸显。传统的分散式污水处理模式难以满足集中居住区的高效处理需求,且资源化利用率较低。在此背景下,探索适合农村地理环境的生活污水资源化利用技术具有重要意义。本文以集中居住形式为例,结合农村地理环境的特点,分析生活污水的排放特征及处理技术的约束与机遇,重点探讨生态湿地技术、厌氧-好氧联合处理技术的应用及其资源化利用效果,旨在为农村生活污水的可持续治理提供理论依据和实践参考。

1 农村地理环境特征与生活污水处理区域差异

1.1 地理环境与生态特征的区域分异

根据全国生态区划数据^[1],我国农村地理环境呈现三级梯度分异。南方湿润区(占国土面积 38.2%):地下水位埋深 1.2~3.5m,土壤以红壤、黄壤为主,渗透系数 $1 \times 10^{-6} \sim 5 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$,

年均气温 15~25℃,具有丰富的植物群落多样性。北方半湿润与寒区(占 32.5%):地下水位 3.0~8.0m,土壤多为棕壤、褐土,渗透系数 $1 \times 10^{-4} \sim 3 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$,冬季低温持续 3~5 个月,年均气温-5~15℃。西北干旱区(占 29.3%):地下水位普遍超过 10m,沙漠化土地占比 45.7%,土壤以风沙土为主,年均降水量<200mm,蒸发量达 2500~3000mm。

1.2 生活污水排放特征的区域差异

不同地理区域的污水水质与排放规律呈现显著分化。南方地区污水 COD 浓度 200~400mg/L,氮磷含量较高(氨氮 25~50mg/L,总磷 3~8mg/L),排放受雨季影响显著,雨季污染物浓度稀释达 30%~50%^[2]。北方地区污水 COD 浓度 300~500mg/L,冬季因用水减少导致污染物浓度升高 15%~25%,且存在水质昼夜波动幅度大(早晚峰值占日均量 60%)的特点^[3]。西北地区污水具有“高 SS、低氮磷”特征 (SS200~400mg/L,氨氮 15~30mg/L),日均排放量仅 20~35L/人,且 80%以上污水来自生活洗涤^[4]。

1.3 污水处理需求与技术约束的区域分化

地理环境对技术选择形成刚性约束。南方

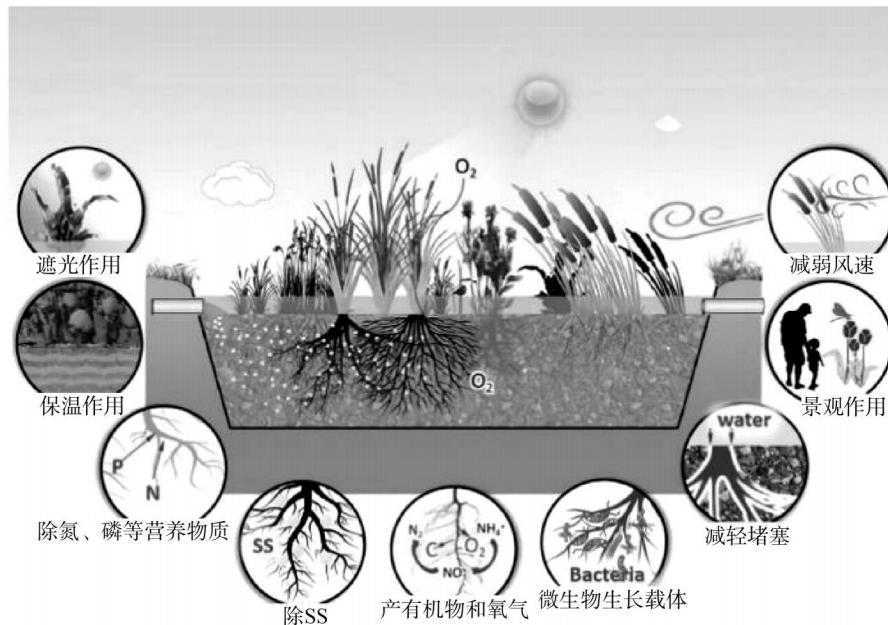


图 1 生态湿地技术原理

丰水地区面临“土地资源紧张-生态敏感区多”的双重约束,要求技术占地 $\leq 0.15\text{m}^2/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$,且生态兼容性强^[5]。北方寒区冬季低温导致传统生化工艺效率下降 10%–30%,需维持反应器温度 $\geq 15^\circ\text{C}$,能耗成本增加 20%–40%^[6]。西北干旱区水资源循环利用率需 $\geq 80%$,但膜处理面临高盐污堵($\text{TDS} \geq 1500\text{mg/L}$ 时膜寿命缩短 50%)^[7]。

2 不同地理环境下的生活污水资源化技术

2.1 南方丰水地区技术体系

2.1.1 生态湿地技术组合与优化

南方丰水地区依托年均 1600mm 以上降水量与亚热带湿润气候,构建以复合湿地为核心的生态处理体系。表面流-潜流组合湿地通过芦苇-茭白群落与沸石-火山岩复合基质的协同作用,形成“植物吸收-微生物降解-基质吸附”三级净化机制,年均 COD 去除率达 75%–85%,单位投资成本较传统工艺降低 30%–40%。改性沸石填料的引入使表面积增加 20%,总磷去除率提升至 80%以上,在珠江流域示范工程中实现出水 $\text{TP} \leq 0.5\text{mg/L}$ ^[8]。生态湿地技术原理如图 1 所示。

垂直流湿地通过“垂直流+生态塘”组合工艺进一步强化处理效能,借助太阳能曝气系统降低 30%能耗,结合潮汐流运行模式模拟自然水文节律,氮磷去除率可达 85%,土地占用面积减少 30%^[9]。长江中下游地区应用案例显示,该工艺在 COD 浓度 200–400mg/L 条件下,出水 COD 稳定在 50mg/L 以下,满足 GB/T37066–2018 一级 A 标准。

该技术体系面临雨季水力负荷冲击的显著制约,当实际负荷超过设计值 50%时,氮磷去除率下降 10%–15%。研究表明,配套调蓄池或应急曝气单元可有效缓解冲击效应,但会使建设成本增加 15%–20%^[10]。此外,冬季低温($<10^\circ\text{C}$)导致微生物活性衰减,需通过耐寒植物筛选(如西伯利亚鸢尾)与保温层设置提升系统稳定性。

2.1.2 厌氧-好氧联合工艺的气候适应性改良

针对南方高有机物浓度($\text{COD}200–400\text{mg/L}$)及高温多雨气候特征,开发 $\text{A}_2\text{O}-\text{MBR}$ 耦合系统实现高效处理与资源回收,其技术原理如图 2 所示。该工艺通过优化厌氧池水力停留时间(HRT8–12h)和好氧池溶解氧控制($\text{DO}2–4\text{mg/L}$),形成“水解酸化-硝化反硝化-膜分离”协同机制,COD 去除率可达 90%以上,出水 $\text{COD} \leq$

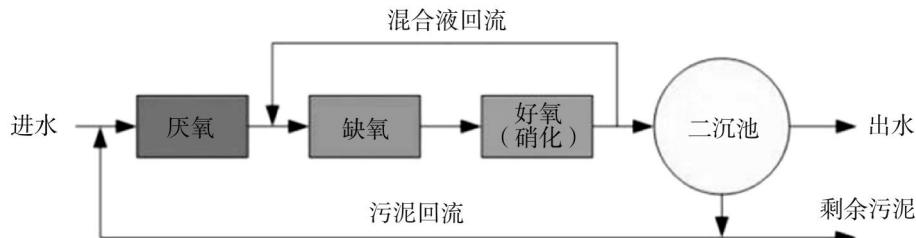


图 2 厌氧-好氧联合工艺原理

30mg/L, 同时实现 $0.25\text{m}^3/\text{kgCOD}$ 的沼气产率, 在广东珠三角地区示范工程中满足农田灌溉水质要求^[11]。

短程硝化反硝化技术依托南方 25–30℃ 的温度优势, 通过 pH 精准调控 (7.5–8.0) 和污泥龄控制 (10–15d), 将传统全程硝化反硝化路径缩短, 氮去除率提升至 90%, 曝气量减少 25%, 能耗显著降低^[12]。经济性分析表明, 该工艺单位投资成本为 1000–1500 元/ m^3 , 较传统活性污泥法降低 20%–30%; 运行成本 0.3–0.5 元/ m^3 , 其中曝气系统电耗占比达 60%, 通过变频风机调控可进一步降低能耗^[13]。但该技术对 C/N 比要求较高 (需 ≥ 8), 当污水氮磷浓度波动时需补充碳源, 吨水成本增加 0.08–0.12 元。

2.2 北方半湿润与寒区技术创新

2.2.1 低温耐受型厌氧处理技术

针对北方冬季低温 ($-5\text{~}15^\circ\text{C}$) 导致微生物活性衰减的难题, 开发温度调控与菌群强化协同技术体系。改良型厌氧反应器通过地源热泵维持反应温度 15–20℃, 并投加嗜冷产甲烷菌等耐低温菌群, 使冬季 COD 去除率稳定在 80% 以上, 沼气产率提升 20%, 较传统厌氧工艺能耗降低 15%–20%^[14]。Internal Circulation Reactor (内循环反应器) 通过优化三相分离器结构与上升流速, 将容积负荷提升至 $15\text{~}20\text{kgCOD}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$, 抗负荷波动能力增强 3 倍, 可有效应对北方农村污水昼夜浓度波动大 (早晚峰值占日均量 60%) 的特点^[15]。

2.2.2 强化脱氮除磷的生态-生化耦合工艺

针对北方寒区低温导致脱氮效率下降的问题, 构建潜流湿地 – 生物滤池复合系统。该系

统冬季覆盖 0.5m 厚保温层, 并配置耐寒植物 (如西伯利亚鸢尾), 通过延长水力停留时间 (HRT24–36h) 与填料优化 (火山岩–沸石复合填料), 将氨氮去除率从传统工艺的 50% 提升至 70%, 同时减缓填料堵塞, 使维护周期从 1 年延长至 3–5 年^[16]。

A/O-MBR 智能曝气系统通过物联网技术实现精准调控, 溶解氧传感器实时反馈数据并联动变频风机, 将曝气量动态控制在 2–4mg/L, 电耗从 $0.28\text{kWh}/\text{m}^3$ 降至 $0.23\text{kWh}/\text{m}^3$, 同时维持氮磷去除率 85% 以上^[17]。该技术突破了北方冬季硝化反应效率低的瓶颈, 在河北雄安新区应用中, 出水氨氮稳定在 5mg/L 以下, 满足 GB/T37066–2018 一级 A 标准。

然而, 北方冬季保温措施导致建设成本增加 15%–20%, 且保温材料需每 5–8 年更换一次, 运维成本较南方地区高 30%–40%^[18]。此外, 低温环境下生物膜生长缓慢, 需定期投加高效脱氮菌剂, 进一步推高运行成本。

2.3 西北干旱区节水与资源回收技术

2.3.1 膜生物反应器的抗污染技术

针对西北干旱区高盐 ($\text{TDS} \geq 1500\text{mg/L}$) 低氮磷污水特性, 开发 AnMBR–臭氧催化氧化耦合工艺。该技术首先利用臭氧预处理 (投加量 10–15mg/L) 有效降解水中有机胶体, 将膜污染指数 (SDI) 控制在 3 以下, 保障后续膜处理单元稳定运行; 采用耐污染性优异的惰性氧化锆陶瓷膜生物反应器, 其耐污染性能较传统 PVDF 膜提升 50%, 在 $\text{TDS} \leq 2000\text{mg/L}$ 条件下可连续运行 6–8 个月无需化学清洗, 使膜通量维持在 $15\text{~}20\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$; 最终实现出水 $\text{COD} \leq 50\text{mg/L}$ 且

回用率 $\geq 80\%$ ^[19]。

2.3.2 水-肥-能协同回收模式

针对西北干旱区水资源与肥料资源双重匮乏的特点,构建的鸟粪石结晶-沼气联合回收系统通过 pH 精准调控(9.0-9.5)和镁离子投加($n(\text{Mg}) : n(\text{P}) = 1.2 : 1$),可将污水中 80% 以上的磷转化为鸟粪石晶体,同步通过厌氧消化实现 $0.2\text{--}0.3\text{m}^3/\text{m}^3$ 的沼气产率,形成“磷肥回收-能源生产”协同效益;同时,依托西北丰富光照资源(年均日照 2800-3200h)的太阳能驱动膜蒸馏技术,通过光伏-膜耦合系统将吨水电耗降至 1.5kWh,水回收率达 90%,适用于无电网偏远村庄,形成“水资源循环-肥料替代-能源自给”的可持续模式^[20]。

3 技术挑战与未来研究方向

3.1 多技术协同机制的区域适配性瓶颈

当前农村污水资源化技术体系存在显著的区域适配性矛盾:南方丰水地区生态湿地技术虽具备生态兼容性,但千吨级处理规模需占地 15-20 亩,与耕地保护政策形成刚性矛盾,尤其在珠三角、长三角等土地集约化区域,传统湿地的平面布局模式难以满足用地需求。北方寒区厌氧-好氧工艺面临低温能耗与低碳目标的双重制约,曝气系统电耗占比达 60%,若采用地源热泵保温,能耗成本较南方高 20%-40%,与“双碳”目标存在技术路径冲突。西北干旱区膜处理技术单位投资成本超 2000 元/ m^3 ,超出农村经济承载力,尽管再生水收益可抵消部分成本,但高盐污堵导致膜组件更换频繁,全生命周期成本仍居高不下^[21]。

突破上述瓶颈需构建“环境-技术-经济”协同优化模型:开发立体式复合湿地,通过多层填料垂直结构减少占地面积,同时提升氮磷去除负荷;研发光伏驱动厌氧系统,利用西北地区丰富光照资源,提升可再生能源占比,降低传统工艺电耗;探索低成本膜材料创新,如聚偏氟乙烯(PVDF)改性技术,将膜组件成本降低。这些创新路径需结合地形梯度利用与气候响应型菌群

培育,形成跨区域技术协同体系。

3.2 智能化运维与全生命周期管理体系构建

现有农村污水资源化技术缺乏环境响应型调控能力,成为制约区域适配性的关键瓶颈。北方寒区厌氧反应器温度人工调节滞后性达 2-4 小时,导致冬季处理效能波动;西北干旱区膜系统污染预警准确率不足 70%,常因高盐污堵引发突发故障。这种运维滞后性使北方工艺能耗增加 15%-20%,西北膜组件更换频率提高 30%,显著推高全生命周期成本^[22]。

未来需构建“传感器网络-边缘计算-云端优化”的智能运维体系:①在湿地系统部署水位传感器与植物生长监测模块,通过 AI 算法实现水位-植物蒸腾的联动调控,提升南方雨季抗冲击能力;②在厌氧反应器集成温度传感器与菌群活性监测芯片,利用边缘计算实时匹配温度-菌群代谢速率,将北方低温区工艺响应时间缩短;③在膜系统植入污染预警传感器,结合云端大数据分析建立膜污染预测模型,提升西北膜系统清洗周期预测准确率。

3.3 低碳化与资源化的协同优化路径

当前农村污水资源化技术面临“单项高效-综合低效”的突出矛盾,如厌氧消化仅能回收 30%-40% 的有机物能量转化为沼气,鸟粪石结晶技术未能同步实现氮素回收,导致资源浪费与碳排放叠加。对此,需构建低碳化与资源化协同优化路径:发展“水-能-肥”联产技术体系,通过厌氧消化-电化学氧化联合工艺,利用电化学氧化强化有机物分解效率,同步提升沼气产率 20% 以上,结合 pH 调控与镁离子投加实现氮磷回收率 $\geq 85\%$,形成“能源生产-磷肥回收”协同效益;研发湿地-人工光合系统耦合技术,借助藻类生物质规模化培养,在湿地系统中构建“植物-藻类”共生体系,通过藻类光合作用实现碳固定(年固碳量达 1.2-1.5t/亩),同步去除污水中 90% 以上的氮磷营养物,收获的藻类生物质可用于生物燃料生产,构建“水质净化-碳汇提升-能源转化”的闭环链条。该路径通过技术耦合

突破单项技术局限,实现污水治理从“达标排放”向“低碳资源循环”的范式转变^[23]。

4 结论

本文系统研究了集中居住模式下不同地理环境区域的农村生活污水资源化利用技术,得出以下结论:地理环境特征显著影响技术适配性,南方丰水地区生态湿地与厌氧-好氧工艺通过基质-植物协同及气候响应型菌群培育,实现 COD 去除率 75%~90%,但冬季低温致效能下降;北方寒区改良型厌氧-好氧工艺结合保温与智能曝气,低温下氮磷去除率超 85%,沼气产率提升 20%;西北干旱区膜生物反应器与水-肥-能协同技术实现 80% 以上水资源循环利用与磷回收。研究表明,通过地形梯度利用、低碳技术耦合及智能化运维,可提升再生水灌溉、生物质能回收等效益。未来需构建多技术协同体系,完善全生命周期管理,推动农村污水治理向低碳资源循环转型。

参考文献(References):

- [1] 张鸿涛,李东玲,张金辉,等.组合人工湿地在河流考核断面水质达标保障工程中的应用[J].给水排水,2021,57(01): 49~53.
- [2] 陈铁柱,周日修,田航飞,等.北方大型湿地氮和磷去除的季节性规律[J].生态学杂志,2025,44(07): 2157~2163.
- [3] 黄天寅,王烽圣,许晓毅,等.城镇污水处理厂改良厌氧/缺氧/好氧工艺的两种碳源补充途径脱氮效能比较[J].环境污染与防治,2022,44(06): 777~781.
- [4] de Oliveira Souza A, Bernardelli J K B, de Carvalho Silva L, et al. Plasterboard sheet applied in vertical-flow constructed wetlands: Nutrients removal, microbial diversity, and mechanisms [J]. Journal of Water Process Engineering, 2023, 53: 103811.
- [5] Kumbier K, Hughes M G, Carvalho R C, et al. Intertidal wetland geomorphology influences main channel hydrodynamics in a mature barrier estuary[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2022, 267: 107783.
- [6] Aslam A, Khan S J, Shahzad H M A. Anaerobic membrane bioreactors (AnMBRs) for municipal wastewater treatment—potential benefits, constraints, and future perspectives: An updated review [J]. Science of the total Environment, 2022, 802: 149612.
- [7] Uhlířová L. Analysis of a Tank Used for the Purposes of Ecological Purification of Water [J]. International Multidisciplinary Scientific GeoConference: SGEM, 2018, 18(6. 4): 613~619.
- [8] 周超群,吴磊,李先宁,等.不同填料短程好氧生物滤池用于农村污水的资源化研究[J].水处理技术,2017,43(12): 118~122.
- [9] 贾洪柏,许超,杨云成,等.填料-厌氧-好氧消化+复合酶工艺对城市污水处理及污泥减量的效能[J].净水技术,2024,43(10): 99~105+133.
- [10] 张铁坚,周彪,马岚,等.农村生活污水处理全过程低耗管理探讨[J].水处理技术,2025,51(02): 1~7+21.
- [11] 党博文.农村生活污水治理现状及对策分析[J].皮革制作与环保科技,2024, 5 (23): 103~104+107.
- [12] 张文强,张婷,刘璐,等.长江中游四省农村生活污水排放特征及处理设施现状分析[J/OL].环境工程,1~11[2025-03-07].
- [13] 杨龙斌.新型生物膜-微絮凝滤池协同脱氮除磷生产性试验及相关机理研究[D].福州:福建工程学院,2021.
- [14] 廖振奇,韦科陆.两级垂直流人工湿地处理农村生活污水的应用[J].轻工科技,2024,40(02): 133~136.
- [15] 谭映临,钟晓亮,王涛,等.沸石分子筛吸附去除 VOCs 的研究进展[J].环境科学与技术,2023,46(02): 178~189.
- [16] 黄凌军,严小芳,李小伟,等.不同组合方式对厌氧—好氧消化联合处理市政污泥性能的影响[J].给水排水,2018,54(01): 31~35.
- [17] 林俊敏,明玲玲,徐骥.某食品废水厌氧处理技术节能效果与经济效益评估[J].当代化工研究,2023,23(01): 94~97.
- [18] 李克勋,张振家,张扬,等.厌氧-好氧处理变性淀粉生产废水工程实例[J].工业水处理,2003,23(06): 53~55.

- [19] 周璇, 张均龙, 马彦涛. 浅谈农村污水处理现状及展望[J]. 农业与技术, 2020, 40(18): 56-58.
- [20] 孟剑鸣, 任秀峰. 农村生活污水治理问题及对策研究[J]. 江西农业, 2021, 15(12): 50-51.
- [21] 胡汉琴. 城市生活污水资源化利用与环保技术研究[J]. 新农民, 2024, 35(22): 78-80.
- [22] 王国田, 郭芳, 温禾, 等. 基于源分离的农村污水资源化技术现状与展望[J]. 资源节约与环保, 2024, 42(02): 41-46.
- [33] 李瑜. 农村生活污水资源化利用技术模式及工程示范[J]. 净水技术, 2024, 43(02): 83-89+96.

作者简介:

第一作者/通讯作者: 祝厚然, 1986 年生, 男, 安徽砀山人, 安徽省地球物理地球化学勘查技术院, 工程师, 主要研究方向为土木工程。Email: 285124806@qq.com

A Review of Research and Practice on Resource Utilization Technology of Rural Domestic Sewage in Different Geographical Environment Areas under Concentrated Residence

ZHU Houran

(Anhui Institute of Geophysical and Geochemical Exploration Technology, Anhui 230022, China)

Abstract: This paper focuses on the resource utilization technologies of rural domestic sewage in different geographical environment areas under the concentrated residential model. Based on the differences among geographical environment and sewage discharge characteristics in the southern humid region, the northern semi-humid cold region and the northwest arid region, it systematically analyzes the regional adaptability of ecological wetland technology, anaerobic-aerobic combined treatment technology, etc. Studies show that in the south, efficient purification and resource recovery are achieved through complex wetlands and anaerobic-aerobic coupling processes. The north has broken through the bottleneck of winter treatment by relying on low-temperature tolerance technology and intelligent aeration systems. In the northwest, anti-pollution membrane technology and the water-fertilix-energy synergy model are adopted to enhance the efficiency of resource recycling. The research provides technical paths and practical references for the regional and sustainable governance of rural domestic sewage.

Key words: rural domestic sewage; geographical environment; resource utilization; centralized residence

收缩城市低效工业用地识别与空间分布特征分析

——以牡丹江建成区为例

张郝萍¹,衣霄翔¹,荆莹²,付朝华^{3*}

(1. 哈尔滨工业大学建筑与设计学院,自然资源部寒地国土空间规划与生态保护修复
重点实验室,哈尔滨 150001;
2. 中国城市规划设计研究院住房与住区研究所,北京 100037;
3. 华蓝设计(集团)有限公司,南宁 530011)

摘要:随着城市高质量发展对存量土地再开发需求的增长,低效工业用地治理成为落实节约集约用地战略的关键议题之一。我国收缩城市在人口持续减少的过程中,存量空间调整滞后,导致大规模低效工业用地累积,对空间发展产生一定消极影响。东北地区作为典型收缩区域,工业用地低效化问题突出,亟需精准识别与治理。本文以收缩城市牡丹江市建成区为研究对象,构建“产业经济—环境可持续性—空间形态—土地利用”四维识别体系,运用 CRITIC-TOPSIS 法识别并揭示空间集聚规律。结果表明,基于多维度识别体系精准识别出潜在低效利用型和低效粗放利用型用地分别有 596.80hm² 和 199.55hm²,这两种类型在空间上具有一定集聚规律,呈现“核心区遗留型、边缘区无序型、产业走廊衰退型、园区周期波动型”四种类型;基于此,提出“测算诊断一分区施策”的治理机制,依据空间集聚特征实施差异化策略和分类指引,为低效工业用地再开发提供精准化路径,为我国收缩城市低效工业用地识别与治理提供理论支撑与方法创新。

关键词:城市收缩;低效用地;再开发;城市更新;工业空间

中图分类号:TU984 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2736(2025)08-0043-14

0 引言

随着我国进入存量更新的新阶段,产业结构调整和技术进步推动工业企业持续创新发展,部分传统工业厂房及园区因产业转型受阻、产业结构滞后等因素影响,导致大规模工业用地陷入低效状态^[1-3]。这一问题主要表现为土地利用强度低或产出效益大幅度下降,甚至部分用地长期闲置,进而造成城市土地资源浪费。随着城市高质量发展对存量土地再开发的需求不断提升,低效工业用地问题受到广泛关注^[4]。为应对这一挑战,自 2013 年起我国陆续出台相关政策文件,2016 年进一步提出推进低效用地再开发的相关

要求。2023 年 9 月,自然资源部也发布了《自然资源部关于开展低效用地再开发试点工作的通知》,明确提出“以国土空间规划为统领,以城中村和低效工业用地改造为重点,以政策创新为支撑,推动各类低效用地再开发,推动城乡发展从增量依赖向存量挖潜转变”,进一步凸显了低效用地再开发在优化国土空间格局和推动城乡高质量发展中的重要作用。浙江省、福建省莆田市、四川省广元市等地政府相继出台相应的再开发措施和实施细则,探索符合本地实际情况的再开发路径。低效工业用地再开发已成为我国全面实现土地节约集约高效利用等决策部署的核心战略之一。

基金项目:黑龙江省重点研发计划项目(JD2023SJ17)。

与此同时,我国城市发展出现了新型城镇化与城市收缩并行的异质性特征^[5]。统计数据显示出,2010—2020 年间全国共有 266 个城市人口持续性流失^[6]。国际经验表明,收缩城市人口减少过程中,存量空间调整相对滞后,易导致大规模低效工业用地累积,并且因更新难度较大而进一步加剧土地低效利用问题^[7]。我国东北地区的收缩城市也面临这一挑战,如齐齐哈尔市在人口减少的同时,城市产业逐渐衰败,截至 2016 年,城市建成区中 56.7% 的工业用地处于低效状态,严重制约了产业发展和空间优化^[9]。大规模低效工业用地的存在不仅阻碍了收缩城市的可持续发展,甚至会导致城市经济发展停滞、生态环境污染加剧、就业岗位锐减等一系列问题^[10]。因此,系统性识别与评估低效工业用地空间分布与利用状况,成为当前收缩城市规划与治理领域亟待解决的核心议题。

当前国内关于低效工业用地的研究主要集中在土地开发强度、土地利用效益、经济产出、生态环境影响等方面,围绕低效工业用地现状、识别方法^[10,11]、指标体系^[12]、再开发方向^[1-3,13]展开深入探讨。现有研究多聚焦于非收缩城市,而对于收缩城市工业空间冗余问题的探究尚未形成系统。随着我国收缩城市数量持续增多,传统老工业基地低效用地问题日益凸显,应结合收缩城市的特殊发展情境,因地制宜地选取低效工业用地识别指标,构建识别指标体系并进行系统性识别,以全面掌握低效工业用地利用现状,防止低效工业用地产生连带效应,这对于推动收缩城市空间高质量发展至关重要。

本研究创新地构建了“体系搭建—低效识别—特征分析”的研究框架,采用多种定量分析方法,围绕“产业经济—环境可持续性—空间形态—土地利用”四个核心维度,提出适用于我国收缩城市低效工业用地识别体系。本研究采用 CRITIC 法 (Criteria Importance Through Intercriteria Correlation)、TOPSIS 法 (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) 和空间分析模型,形成了“定量分析+数理统计+空间可

视化”研究路径,涵盖指标体系赋权和综合评价的全流程量化分析,并结合空间分析模型全面探究低效工业用地的空间分布特征。从而全面掌握收缩城市低效工业用地的现实状况,揭示其空间集聚特征及演化逻辑,为精准识别收缩城市低效工业用地提供科学方法论支撑,为我国收缩城市低效工业用地识别与治理提供新思路和有益参考。

1 研究框架与方法

1.1 研究区域概况

牡丹江市位于黑龙江省,曾是我国重要的工业基地,其工业发展大致经历了三个主要阶段。第一阶段为建国初期至改革开放前,国家在牡丹江布局和建设了机械制造、化工、建材、纺织等多个行业,初步形成了较为完整的工业体系;第二阶段在改革开放后至 21 世纪初,伴随市场化改革的推进,牡丹江市等东北地区的大量国有企业面临转型困境,工业结构调整压力加剧;第三阶段自 2010 年起,牡丹江市工业发展仍面临严峻挑战,传统重工业转型缓慢与产业结构不合理,同时地区也不可能避免地出现了人口收缩现象,据人口普查数据显示,2010—2020 年间牡丹江市总人口减少了 50.85 万人,市区人口在 2014 年到达顶峰(88.94 万人)后进入持续负增长阶段,截止到 2023 年,牡丹江市区已减少了 5.99 万人。

作为我国典型收缩城市,牡丹江市的工业发展停滞,大规模工业企业生产效率低下,部分厂区长期处于闲置或低效利用状态,工业用地低效问题突出。本研究以牡丹江市主要建成区为实证研究对象(图 1)。该区域内共分布 350 宗工业用地,共 1549.10hm²,主要分布在裕民工业区、江南新城工业区、大庆路工业片区、城西工业片区,此外,部分工业用地零散分布于城市核心区或近郊区域。研究区域工业用地规模大、历史悠久、类型丰富,具较强的典型性和代表性。鉴于此,以牡丹江市建成区为研究对象开展研究,具有重要的实践意义。

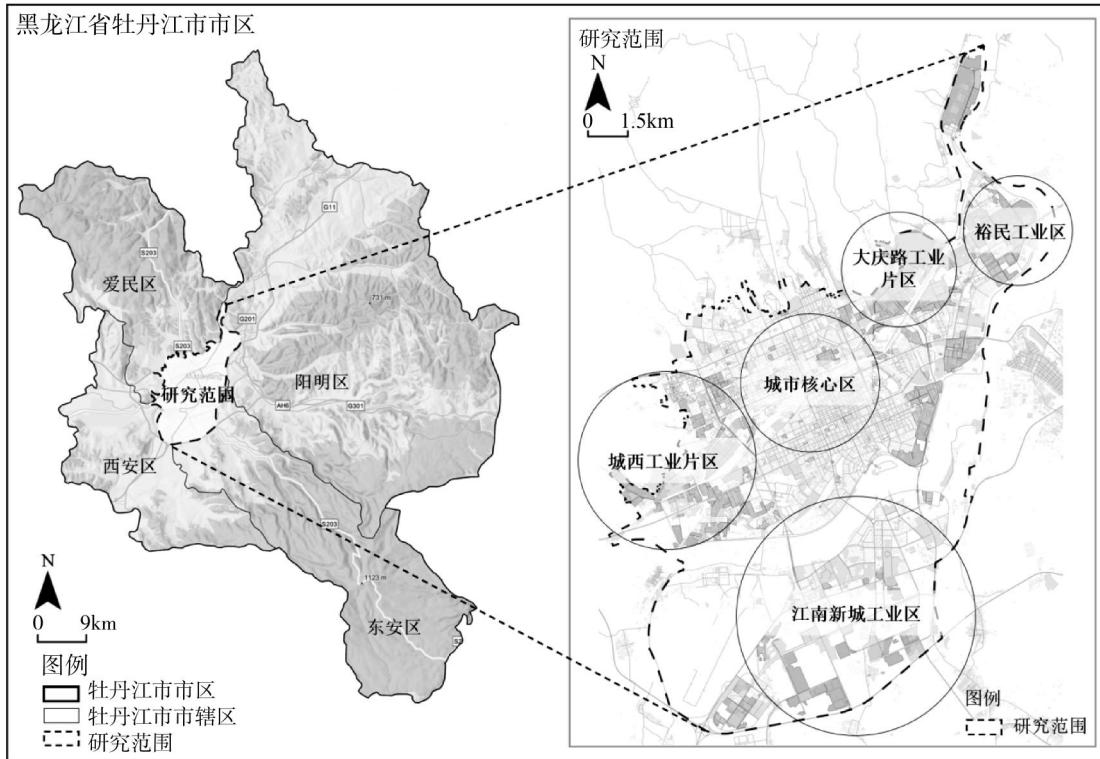


图 1 研究范围

1.2 研究方法

1.2.1 收缩城市低效工业用地识别体系构建

(1) 低效工业用地识别指标体系

结合收缩城市空间发展特征与我国低效工业用地现实状况,低效工业用地是指在空间布局、生产效益、环境影响和就业承载能力等诸多方面存在问题,未能充分发挥其应有效能的工业用地^[14]。这类用地处于闲置、遗弃状态,或已利用但效率低下,且与区域发展定位不相适宜,同时环保和能源消耗方面不达标,但这类土地仍具有较大潜在价值和利用的可能性^[2]。在收缩城市背景下,低效工业用地呈现出更为复杂多样的特征,既涉及产业衰退、空间冗余等宏观问题,也包含用地利用效率低下、环境污染等微观层面的问题。对其综合识别是一个涉及多层次、多目标的复杂过程,需借助多指标综合识别,实现对低效工业用地的系统性、精细化识别。

在考虑识别指标科学性、整体性和数据可获取性的基础上,借鉴国内外相关研究成果,结合相关政策文件和收缩城市低效工业用地的现实

问题,建立了“产业经济—环境可持续性—空间形态—土地利用”四维识别体系,选取了15个核心指标(表1),全面揭示低效工业用地的内在特征。产业经济侧面反映工业用地的经济效益、产业结构和运营情况,主要选取了工业基准地价、产业集聚度、土地利用主体、工业门类四项指标,其中,工业基准地价体现地块的经济潜力与市场价值,产业集聚度衡量企业间的空间协同与集群效应,土地利用主体反映企业使用状态与活跃程度,工业门类揭示产业类型对土地利用效率的影响。环境可持续性强调工业用地与周边环境的相互作用与约束情况,选取了交通连接度、土地冲突指数、区位情况、环境污染程度四项指标,分别从可达性、用地兼容性、区位条件与生态负荷等方面综合评估土地的环境适宜性。空间形态聚焦工业空间布局与形态特征,选取了分形维数、绿化覆盖率、用地形状三项指标,反映地块形态的规则性与空间整合潜力。土地利用衡量了土地利用集约程度和开发强度,选取了容积率、建筑密度、工业厂房形象、工业厂房质量四项指标,综合评价用地空间利用效率及再开发可

能性。

在指标数据处理方面,体系中涵盖定量指标与定性指标两种类型。对于定量指标,主要通过政府公开统计数据、遥感监测数据、开放数据平台等多源渠道获取,确保数据的权威性与可比性。对于定性指标,在参考相关文献分类标准的基础上^[9,10,14],结合实地调研结果,将各类型指标划分为多个等级,并制定明确的分类判别依据。随后采用分级赋值法将定性信息转化为量化数据,以增强其在模型分析与比较研究中的适用性。具体赋值过程中,各等级分别对应 0、2、4、6 四个数值,反映等级间的相对差异性与排序关系,从而实现定性评价结果的标准化、结构化处理。

(2) 基于 CRITIC 法的指标权重确定

CRITIC 法由 Diakoulaki^[15] 等(1995)提出,是一种基于指标间相关性与冲突性的客观赋权方法,能够衡量不同指标间的对立性与依赖性,结合对比强度与相关系数来计算指标的重要程度,适用于多指标综合评价体系。在收缩城市低效工业用地识别体系中,部分指标之间存在较强的相关性,可能导致信息冗余。因此,在赋权时,需要综合考虑各指标的信息独立性及其对整体评价体系的贡献度。本研究选取 CRITIC 法来确定各指标的重要程度,反映“产业经济—环境可持续性—空间形态—土地利用”四个维度指标的冲突性与统一性。

首先,对指标数据进行无量纲化处理,采用 min-max 线性标准化模型,使不同量纲的指标可比,对于正向和负向指标采用线性标准化,分别为:

$$x'_{ij} = \frac{x_{ij} - \min(x_j)}{\max(x_j) - \min(x_j)} \quad (1)$$

$$x'_{ij} = \frac{\max(x_j) - x_{ij}}{\max(x_j) - \min(x_j)} \quad (2)$$

式中, x_{ij} 为第 i 个样本第 j 个指标的原始值; x'_{ij} 为标准化值。

其次,计算指标对比强度(C)和指标冲突性(D)。对比强度(C)衡量指标在样本间的变异

程度,对比强度越高的指标,在样本间差异显著,对低效用地的识别具有强区分能力;指标冲突性(D)用于判断指标之间的信息重叠程度,筛选信息独立性较高的指标。若指标冲突性越小,表明与其他指标含有的相同信息越多,可能存在冗余,可以降低其权重以避免对评价结果造成过度影响。具体公式为:

$$C_i = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x'_{ij} - \bar{x}'_j)^2} \quad (3)$$

式中, C_i 为指标对比强度; x'_{ij} 标准化后数据; \bar{x}'_j 为均值;

$$D_j = \sum_{k=1}^m (1 - r_{jk}) \quad (4)$$

式中, D_j 为指标冲突性; r_{jk} 为指标 j 与 k 的 Pearson 相关系数。

最后,综合计算指标对比强度与冲突性,得到指标信息量并对其归一化处理,最终得到指标权重(表 1)。具体公式为:

$$L_j = C_i * D_j \quad (5)$$

$$\omega_i = \frac{I_j}{\sum_{j=1}^m I_j} \quad (6)$$

式中, L_j 为指标信息量; ω_i 为第 j 个指标的权重。

1.2.2 低效工业用地识别模型

TOPSIS 法是一种经常用于多目标决策分析,可基于多个指标衡量研究对象的优劣程度。若研究对象最接近于正理想解,同时又最远离负理想解,则该研究对象为最优方案,反之,则为最差方案。本研究采用 TOPSIS 法评估低效工业用地,并基于前述 CRITIC 赋权结果确定指标权重。

首先,构建加权标准化矩阵,并计算各评价对象与正、负理想解之间的距离。具体公式为:

$$Z_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{k=1}^n (x_{ij})^2}} \quad (7)$$

式中, Z_{ij} 为指标加权后的加权值。

其次,通过计算各指标的最优和最劣值,确定正理想解和负理想解。

表 1 收缩城市低效工业用地识别指标体系

目标层	准则层	权重	指标层	类型	性质	含义	权重	
产业 经济	低效工 业用地 识别	0.318	工业基准地价	定性	+	据基准地价官方政策文件,将牡丹江工业用地基准地价共分为 III 级地 295 元/m ² 、II 级地 325 元/m ² 、I 级地 354 元/m ²	0.088	
			产业集聚度	定量	+	工业用地点状数据核密度,反集聚程度	0.025	
			土地利用主体	定性	+	结合实地调研和数据平台,搜集企业信息;结合既有研究 ^[9] ,将工业的生产经营情况分为停产空置、部分空置、转换为其他功能、部分用地转换为其他功能、存续	0.104	
			工业门类	定性	+	结合《国民经济行业分类》和牡丹江的《产业结构调整指导目录(2019 年本)》《牡丹江市构建现代产业体系发展规划(2021—2025 年)》等相关文件,将工业行业划分为落后淘汰型、限制发展型、其他型、鼓励发展型	0.101	
			交通连接度	定量	+	工业用地周边一定范围内(如 500m)的道路条数	0.038	
			土地冲突指数	定量	-	工业用地与居住、商业用地之间因距离因素产生的冲突程度	0.033	
环境可 持续性		0.286	区位情况	定性	+	结合圈层结构理论来看,将牡丹江市建成区工业与空间布局和社会经济发展状况叠加分析,将区位适宜发展程度划分为三级,即城市核心区域、城市边缘区域、产业园区	0.127	
			环境污染程度	定性	-	结合相关对各类工业行业污染物的单位产值排放的研究、《上市公司环保核查行业分类管理名录(2008)》以及其他相似城市经验值,划分各工业的环境污染程度,从低污染到高污染分为 4 级	0.088	
			分形维数	定量	-	反映工业用地相对“破碎”的程度、与周边环境的协调性和开发的复杂程度	0.042	
空间 形态	0.151	绿化覆盖 率	用地形状	定量	-	工业用地面积中绿化覆盖的占比	0.062	
			容积率	定量	+	衡量工业用地图斑形状的复杂程度或偏离标准形状(如圆形)的程度	0.047	
			建筑密度	定量	+	工业用地利用强度	0.046	
			工业厂房形象	定性	+	工业建筑厂房基底面积与用地总面积的比值	0.056	
土地 利用	0.245	0.068	工业厂房形象	定性	+	实地调研了工业企业建筑厂房外观设计、空间利用的特色、文化艺术内涵以及厂房维护,分为建筑形象较差、建筑形象一般、建筑形象较好、建筑形象好	0.068	
				定性	+	工业用地内部物质空间环境的好坏程度,结合结构、外观的完整、坚固性、完整性等的综合评价,将其分为质量较差、质量一般、质量较好、质量很好	0.075	

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^m \omega_j (Z_j^+ - z_{ij})^2}, \quad (8)$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m \omega_j (Z_j^- - z_{ij})^2}$$

式中, D^+ 为正理想解距离; D^- 为负理想解距离; ω_j 为第 j 个属性的权重。

最后, 测度评价对象与最优方案的接近程度, S_i 值用于衡量工业用地的综合效率, $0 \leq S_i \leq 1$, S_i 越大表示评价对象越优。本研究参考相关识别标准, 对采用自然断点法对 S_i 值进行划分, 将低效工业用地识别结果中不连续的数据点作为分级依据。

$$S_i = \frac{D^-}{D_i^+ + D_i^-} \quad (9)$$

式中, S_i 为第 i 个评价对象与理想解的贴近度。

1.2.3 空间分布特征分析模型

(1) 全局空间自相关分析 (Global Moran's I)

全局空间自相关分析可以用来判断研究区域内地理单元之间的相互依赖关系, 可以揭示研究区域低效工业用地在整体空间上的集聚或离散特征, 本研究采用莫兰指数 (Moran's I) 作为测度指标, 得到结果为正说明低效用地呈集聚分布, 若为负, 则离散分布。具体公式为:

$$I = \frac{n}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij}} * \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (10)$$

式中, n 为研究区域内的工业用地单元数量; x_i 为第 i 个单元的属性值; \bar{x} 为均值; w_{ij} 为空间权重矩阵元素。

(2) 局部自相关性分析 (Local Indicators of Spatial Association, LISA)

基于上述分析, 本研究通过局部自相关性分析 (LISA) 来揭示低效工业用地在局部区域的空间异质性。局部空间自相关用于识别局部区域的高值集聚 (HH) 或低值集聚 (LL), 以揭示研究区域的空间异质性。本研究采用热点分析 (Get-

is-Ord G_i^*) 的方法, 测度不同地块的空间集聚特征, 集聚值为正表示热点 (高值集聚), 为负则表示冷点 (低值集聚)。具体公式为:

$$G_i^*(d) = \frac{\sum_{j=1}^n w_{ji}(d) x_i - \bar{X} \sum_{j=1}^n w_{ji}(d)}{S \sqrt{\frac{n \sum_{j=1}^n w_{ji}^2(d) - (\sum_{j=1}^n w_{ji}(d))^2}{n(n-1)}}} \quad (11)$$

式中, \bar{X} 为全局均值; S 为标准差; d 为搜索半径。

1.3 数据来源与处理

本研究围绕产业经济、环境可持续性、空间形态和土地利用四个维度展开数据收集工作, 通过政府官方统计、实地调查和开放大数据平台等多个渠道获取数据。具体来说, 一是借助政府官方统计数据获取了 2021 年研究区域土地利用现状数据、《牡丹江市区城镇国有土地基准地价及有偿使用费标准》和《牡丹江市构建现代产业体系发展规划 (2021—2025 年)》, 掌握区域内工业现状的基础上, 查明工业地价、产业结构与政策导向等信息, 为产业经济维度指标提供支撑。二是于 2021 年通过实地勘察和拍摄照片等方式获取了工业用地的工业厂房形象、质量、层数等一手数据, 作为土地利用、空间形态等维度的基础信息来源。三是从 OSM 地图 (OpenStreetMap) 获取了 2021 年研究区域的路网数据、建筑矢量数据、居住与商业的 POI 数据, 主要用以评估环境可持续性; 从天眼查 (<https://www.tianyancha.com>) 收集了 2021 年研究区域工业的经营情况、工业门类等数据, 支撑产业经济维度的企业聚集度、门类等指标判定; 通过 2021 年高分辨率遥感影像解译获取工业用地的绿化覆盖数据, 服务环境可持续性与空间形态维度分析。

2 多因子低效工业用地综合识别

2.1 分项指识别结果

(1) 产业经济。研究区域工业用地产业经

济整体发展水平较低,超过40%的工业用地产业经济处于相对较低或低水平(图2a)。从空间分布上来看,工业用地主要集中在裕民工业区、江南新城工业区、大庆路工业片区及城西工业片区,且大量工业用地处于III类地价区域。在产业经营方面,研究区域超过一半的工业用地存在一定问题,其中42.31%的工业用地处于全部停产空置或部分停产空置状态,15.41%的工业用地全部或部分已经转换为其他功能用地。从工业门类来看,研究区域内有727.23hm²的工业用地属于落后淘汰型,主要涉及电力、钢铁、水泥、有色金属等行业产能落后的企业。这些企业内部物质空间环境衰败,业态相对低效,严重影响并制约了区域产业经济的健康发展,亟须优化升级与改造。

(2)环境可持续。研究区域工业用地的环境可持续性的整体水平不高,共有932.57hm²工业用地处于可持续性低或可持续性较低水平(图2b)。结合具体指标来看,工业用地与城市环境之间存在显著的相互作用与影响。一方面,建成区环境尤其是交通网络建设情况,对工业用地的影响显著。研究区域228.93hm²的工业用地与交通网络连接线路较少、连接质量较差或连接类型单一,导致工业运输效率低下,产业协同效果不佳。同时,在城市发展导向影响下,工业用地的区位因素也至关重要。当前,41.24%的工业用地位于城市核心区域内,随着城市功能布局的变动,部分工业用地已不再适宜继续使用。另一方面,工业用地对周边环境也产生消极影响,具体来看,178宗工业用地位于与周边居住或者商业用地存在较大冲突的距离区间内,彼此之间产生一定的功能冲突,导致功能难发挥,同时292.34hm²的工业用地在生产中产生的废气、噪声、废水等对周边环境产生较大影响。

(3)空间形态。部分工业用地建设时期相对较早,建设方式相对粗放,这些遗留问题导致工业用地的空间形态利用层面面临诸多挑战。研究发现,32.79%的工业用地的空间形态复杂,已不适宜继续作为工业用地;39.67%的工业用

地空间形态相对复杂,利用价值较低,难以充分开发和利用(图2c)。从具体的指标来看,研究区域内18宗工业用地分形维数超过1.5,表明这些地块空间形态较为“破碎”,地块分割较为严重,呈现较强的零碎性。同时,56宗工业用地形状指数大于1.5,呈现明显的不规则的长条状或有较多凹凸部分,这种不规则的形状对建设规划和生产布局产生了显著的负面影响,增加了土地开发和利用的难度,难以实现高效的土地利用和合理的产业布局。此外,93宗工业用地绿化覆盖率高于25%,从既有研究^[9]及工业项目建设相关控制指标来看,过高的绿化覆盖率往往意味着工业用地的生产空间存在形态冗余、布局不紧凑等问题,从而可能导致土地利用效率下降,难以有效支撑高效生产活动与合理空间利用需求。

(4)土地利用。在研究区域中,土地利用效率较低和土地利用效率低的工业用地分别为464.15hm²和377.22hm²(图2d)。这些土地利用程度欠佳的工业用地中,95.85%的容积率低于0.8,主要集中分布在大庆路工业片区和城西工业片区。这些区域的工业用地利用效率低,主要原因在于其工业建设年代较为久远。一方面,厂房建筑在设计水平和风貌上差异明显,且质量相对不高;另一方面,该区域多由村镇企业以及一些低端产业构成,由于缺乏统一的设计规范,建筑风格繁杂多样。相比之下,江南新城工业区与裕民工业区的厂房质量普遍较高,园区内建筑主要包括生产性工业厂房和服务性公用房。工业厂房规模较大,多为一层框架结构,造型简约。而办公建筑一般为4~6层,能满足企业办公、会议、员工休憩等运营需求。

2.2 综合指标识别结果

本研究基于“产业经济—环境可持续性—空间形态—土地利用”四个维度,综合识别了研究区域工业用地。通过构建评价指标体系,对各项定量、定性指标进行标准化处理并加权计算综合得分。结合既有研究经验^[9-14]与数据分布特征,借助自然断点法对结果划分,并划分为四个

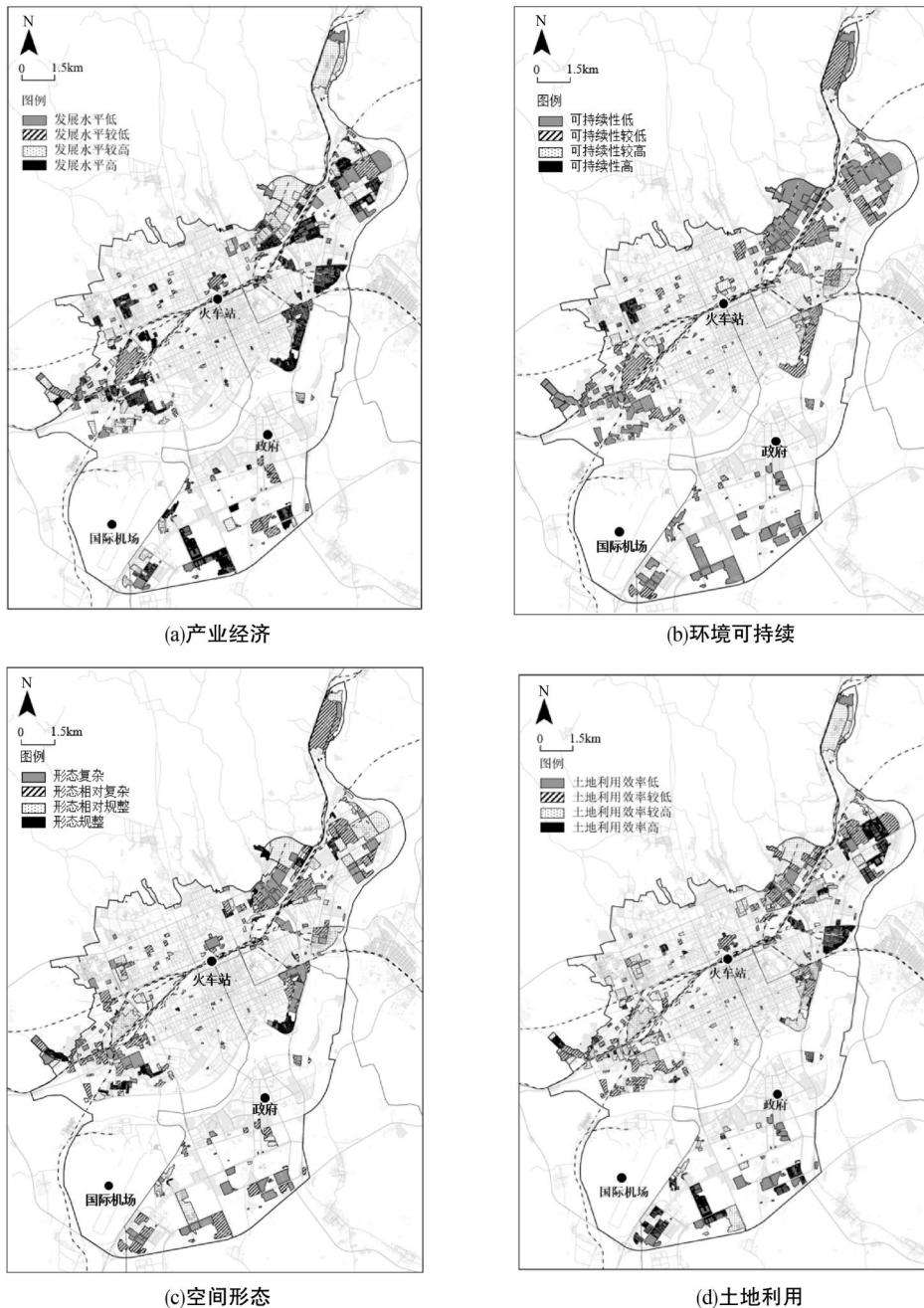


图 2 分项指标识别结果

类型:高效集约利用型、一般适度利用型、潜在低效利用型和低效粗放利用型(表2、图3)。其中,高效集约利用型工业用地在产业经济、环境协调性、空间形态及土地利用强度等方面表现优异,体现出较高的整体效益;一般适度利用型各项指标处于中等水平,用地效率尚可,但仍有提升空间;潜在低效利用型在部分维度存在明显短板,具有转型或再开发潜力;低效粗放利用型则在多数指标上表现不佳,存在结构老化、功能弱化、空

间利用率低等问题,土地利用效率显著偏低。

从用地规模上看,潜在低效利用型的工业用地面积最大,为 596.80hm^2 ,占总规模的38.53%。这表明,研究区域内存在较大面积的工业用地具有转向低效利用的潜在风险。低效粗放利用型 199.55hm^2 ,占总规模的12.88%,这类用地存在严重的资源浪费,亟需进行改造升级,如引入新产业或优化空间布局,以提高土地利用效率。此外,高效集约利用型与一般适度利用型工业用地

表 2 低效工业用地综合识别结果

类型	数量/宗	面积/ hm^2	占比/%	识别分值区间跨度
高效集约利用型	70	235.50	15.20%	0.5506~0.6789
一般适度利用型	110	517.25	33.39%	0.4660~0.5505
潜在低效利用型	100	596.80	38.53%	0.3822~0.4659
低效粗放利用型	70	199.55	12.88%	0.2780~0.3821
总计	350	1549.10	100.00%	0.2780~0.6789

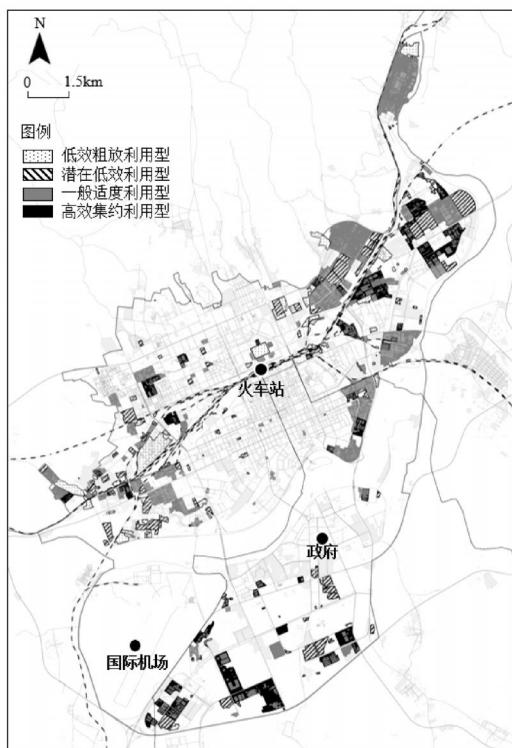


图 3 低效工业用地综合识别结果

分别为 $235.50 hm^2$ 和 $517.25 hm^2$, 这些用地承载了区域主导产业。从用地数量上看, 一般适度利用型工业用地数量最多, 达 110 宗, 其次是潜在低效利用型, 共 100 宗, 高效集约利用型与低效

粗放利用型数量相当, 也就是说, 接近一半数量的工业用地处于低效或存在低效的可能 (研究区域工业用地共计 350 宗)。总体来看, 研究区域内的工业用地利用效率参差不齐, 潜在低效利用型和低效粗放利用型用地占比较大。

3 低效工业用地空间分布特征分析

3.1 工业用地空间集聚特征

基于空间自相关分析模型 (Global Moran's I) 的测算结果 (表 3, 图 4), 研究区工业用地的综合效率指数呈现显著的空间依赖特征。Moran's I 指数计算结果为 $0.175106 (p < 0.001)$, Z 得分为 10.673787 , 均通过 1% 显著性水平检验, 表明研究区域内工业用地的综合效率呈现显著的正向空间自相关 ($Moran's I > 0$), 即具有相似综合效率水平的工业用地在空间上呈现一定的集聚性, 而非随机分布。同时, 预期指数 (Expected Index = -0.002865) 与实际观测值的显著偏离 ($p = 0.000000$) 进一步验证了空间集聚现象具有统计学意义的非随机性, 是受到了特定因素的影响造成的。

基于此, 采用 Getis-Ord G_i^* 指数探究工业

表 3 Global Moran's 分析结果

指标	值	解释
Moran's I	$0.175106 * * *$	低效用地呈现空间集聚(正自相关)
预期指数	-0.002865	随机分布的理论期望值
Z 得分	10.673787	统计极显著 ($p < 0.001$)
方差	0.000278	数据离散程度低
p 值	0.000000	具有极高的统计学显著性

注: * * * 表示通过 1% 显著性水平检验

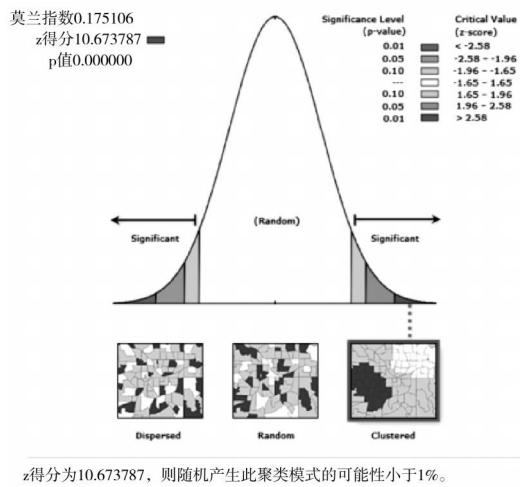


图 4 Global Moran's I 分析结果

用地综合效率分布的空间异质性(图 5a)。结果显示:一是热点区(High-High 聚类)主要集中分布在江南新城工业区和裕民工业区(图 5b),这些地区工业用地综合效率呈现高值显著集聚特征,表现出较强的产业集聚效应和较高的土地利用效率,表明这些地区处于高效、快速发展的态势;二是冷点区(Low-Low 聚类)主要位于城西

工业片区(图 5b),这些区域工业用地综合效率呈低值显著集聚,且用地形态相对破碎,所承载的产业大多属于落后淘汰型产业,发展潜力较低;三是其余地区为过渡区,在这些区域高值点和低值点的空间聚类测度结果并不显著,集聚尚未形成一定规模。综合来看,研究区域热点区和冷点区在空间上相对集中分布,并非均匀分散。

3.2 低效工业用地空间分布类型

从整体层面上来看,研究区域内工业用地的效率呈现出一定的空间差异。工业园区的工业用地效率较高,城市边缘区其次,城市核心区域内工业用地效率整体较低且工业存量较大。潜在低效利用型和低效粗放型利用工业用地在牡丹江市建成区中呈现“多点分散式集聚”的空间分布特征,在小空间范围内工业用地零散分布,且各相对集聚的区域具有一定的空间分布规律,部分潜在低效利用型和低效粗放利用型工业用地沿城市核心区的铁路线分布。

结合上述研究结果,研究区域工业用地的综

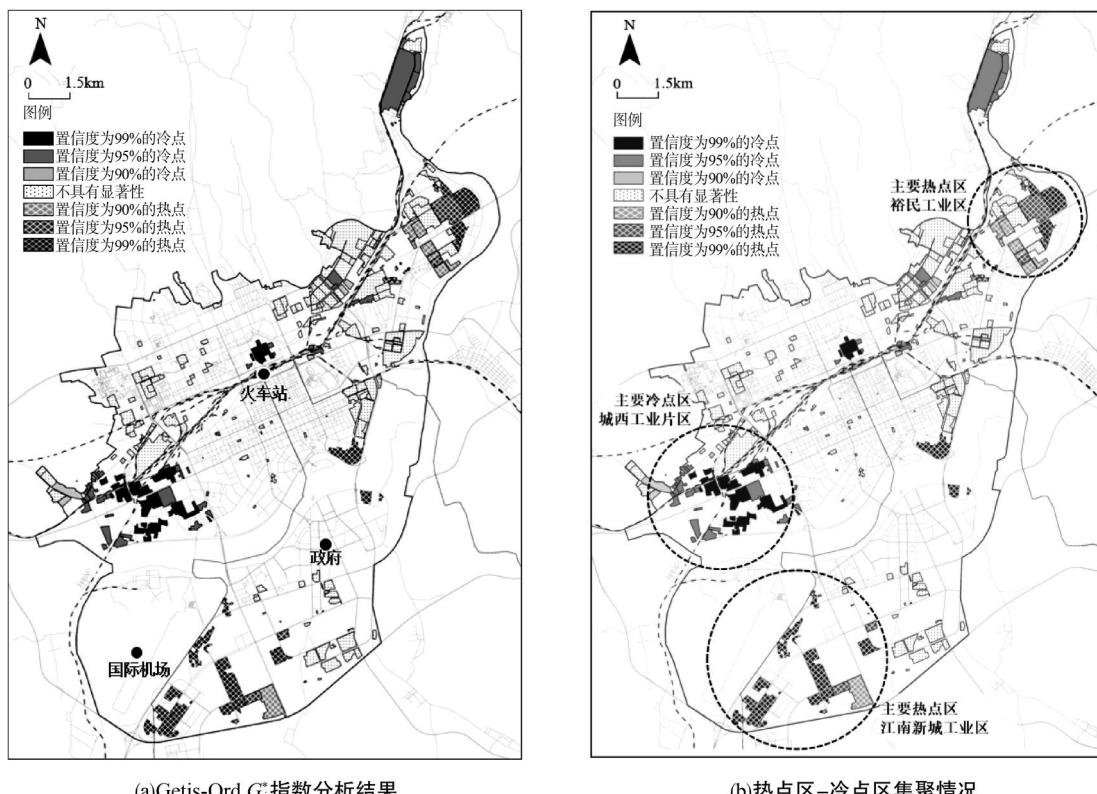


图 5 工业用地综合效率分布情况

合效率在空间上的集聚并非随机现象,而是受到了特定因素的影响。从城市区域层面分析,结合工业用地空间布局及其演变历程来看,潜在低效利用型和低效粗放利用型工业用地主要有四种类型(图6)。一是城市核心区遗留型,研究区域核心区存在大量零星分布的潜在低效利用型和低效粗放利用型用地,这些用地大多建于建国初期,随城市扩张逐步被居住、商业功能包围。尽管这些用地占据了城市核心地段,但因其土地利用效率低下,未能释放土地经济价值,造成优质城市空间资源被浪费。二是边缘区无序建设型,主要是城西工业片区和城市边缘、近郊地带的边缘型相对低效工业企业,这些用地大多由老旧厂房改造或分布的中小村镇企业聚集形成,空间组织呈现“三失”特征,即规划失序、产业失配、设施失能,不仅难以形成产业集群,还与周边环境产生明显的冲突。三是产业走廊衰退型,以大庆路工业片区为代表,在国家大力发展战略性新兴产业时期建设,沿街建设并形成以石油化、煤化工为

主的工业企业群,由于转型困难,加之城市产业园模式兴起,该区域工业逐渐进入低效状态。四是园区周期波动型,在裕民工业区和江南新城工业区内,出现或即将出现暂时性的低效用地,这种低效主要是由于产业生命周期波动、土地供给超前于需求或产业自身设施配套滞后造成。

4 结论与讨论

4.1 结论

本研究构建“体系搭建—低效识别—特征分析”的研究思路,采用多种定量分析方法,以收缩城市牡丹江市建成区为研究对象,从“产业经济—环境可持续性—空间形态—土地利用”四个维度构建适用于我国收缩城市低效工业用地识别体系。通过 CRITIC 法对 15 个识别指标客观赋权,利用 TOPSIS 法从多个方面综合识别低效工业用地,并借助 Global Moran's I 、Getis-Ord G_i^* 等空间分析模型,解析低效工业用地空间集聚情况,进而掌握收缩城市低效工业用地现实状况和发展问题,为我国收缩城市低效工业用地识别与治理提供新思路和有益参考。主要结论如下:

(1) 从“产业经济—环境可持续性—空间形态—土地利用”四维度分项结果来看,研究区域超过一半以上的工业用地在环境可持续性和空间形态的综合效率相对较低。这些低效工业用地建设时期较早,缺乏合理规划,随着城市功能的调整和产业升级,这些用地逐渐与城市发展路径相悖,从而影响周边居住、商业或生态环境。加之,部分地块形态相对复杂,利用难度较大,不适宜继续作为工业用地。

(2) 从综合识别结果来看,研究区域工业用地整体综合效率水平偏低。其中,潜在低效利用型和低效粗放利用型工业用地分别为 596.80hm^2 (占总规模的 38.53%) 和 199.55hm^2 (占总规模的 12.88%)。大规模低效工业用地在一定程度上给城市环境可持续发展和空间集约紧凑发展带来了消极影响。

(3) 从空间集聚特征来看,研究区域工业用

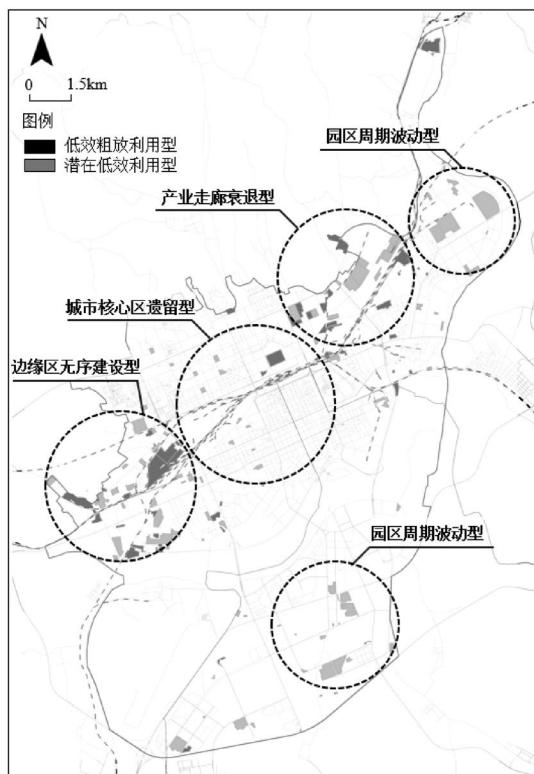


图 6 低效粗放利用型和潜在低效利用型工业用地空间分布

地的综合效率呈现显著的正向空间自相关。江南新城工业区和裕民工业区工业用地综合效率水平较高,形成高效产业集聚区;而城西工业片区则为综合效率较低的集聚区域。总体来看,研究区域潜在低效利用型和低效粗放利用型工业用地呈现“小范围集聚”“大范围分散”的空间分布特征,即其在某些区域形成集聚现象,同时在更大尺度上则呈零散分布。

(4)从潜在低效利用型和低效粗放利用型工业用地的空间集聚类型来看,研究区域工业用地的综合效率在空间上的分布受到特定因素的影响。综合分析工业用地的空间布局和演变历程,潜在低效利用型和低效粗放利用型工业用地主要有四种类型:城市核心区遗留型、边缘区无序建设型、产业走廊衰退型和园区周期波动型。

4.2 讨论

在收缩城市社会经济低迷、人口流失和资源枯竭等多重挑战交织的背景下,工业用地极易由于空间发展不匹配、用地供需不平衡、劳动力下降、地方政府因财政压力无力补贴企业技术改造等因素而陷入持续低效状态^[16],并且难以实现再开发,进而导致低效工业用地规模累积。因此,需构建适应收缩城市特征的低效工业用地科学治理体系。

(1)多维度低效工业用地识别体系须结合收缩城市的特殊性进行适用性革新。传统低效工业用地识别体系通常侧重经济效益的测度。然而,在收缩城市人口外流、经济衰退等问题的影响下,工业企业即使保持原有生产效率,也可能因市场萎缩而造成经济产出下降。因此,需要结合实际情况从多个维度筛选识别指标。加之,在收缩城市发展范式从“增长导向”转向“小而美”的过程中,城市用地发展需要综合考虑经济、社会和环境等因素^[17],对于低效工业用地测度也需要从“量”与“质”等多个维度评判,纳入空间协调、环境可持续性等非经济维度,选取分形维数、绿化覆盖率等指标。不仅回应了收缩城市空间破碎化和生态修复需求,也有效支持城市渐进式转型而非盲目扩张。

(2)收缩城市土地再开发的投资市场下行和政府面临巨大的财政压力等因素影响下,城市用地更新和大规模空间规划与重构能力受到制约。基于本研究揭示的工业用地的综合效率在空间集聚规律,可以建立“测算诊断—分区施策”的精准治理机制。对于冷点区(城西工业片区),可以在“精明收缩”理念的引导下,采用用地置换、弹性留白、污染治理等空间更新策略,促进低效工业用地更新,以缓解收缩城市的人地矛盾;对于热点区(如江南新城工业区),可以采取提质增效措施,通过“正向激励”替代行政干预,吸引社会资本参与更新,如“腾笼换鸟”引导产业链向高端制造延伸,优化产业结构等;针对过渡区,应建立动态监测机制,采用防范措施,或功能调换和实施弹性留白等策略,为远期转型预留足够的空间。

(3)针对收缩城市低效工业用地的差异化特征,应对其再开发制定差异化响应机制,采取分类指引的方式进行精准治理。具体来说,城市核心区遗留型低效工业用地因其区位稀缺性,可以采取“功能转换+拆除新建”等策略重新捕获用地价值;对于边缘区无序建设型和产业走廊衰退型低效工业用地,可以采取“撤厂并园”计划,将零散的工业用地整合进入产业园区,或是采用永久性功能转换、临时使用、绿色基础设施等策略,确保低效工业用地在城市收缩过程中预留功能转换弹性;对于园区周期波动型低效工业用地,可建立“综合效率预警机制”,对其及时清退或升级。

参考文献(References):

- [1] 甄溪,李津莉,于红,等.存量规划背景下低效工业用地识别与优化策略研究——以聊城市嘉明经济开发区为例[J].天津城建大学学报,2023,29(05):311-318+327.
- [2] 甄延临,瞿嗣澄,陈玉洁.节约集约背景下城市低效工业用地的更新路径与机制研究——以嘉兴市城北片区为例[J].城市发展研究,2023,30(11):9-15.
- [3] Jin R, Huang C, Wang P, et al. Identification of Ineffi-

- cient Urban Land for Urban Regeneration Considering Land Use Differentiation[J]. Land, 2023, 12(10): 1957.
- [4] 周挺.城市发展与遗存工业空间转型[D].重庆:重庆大学,2015.
- [5] 桑春,潘鑫,张尚武,等.空间治理视角下中国城市收缩现象研究述评与议题展望[J].城市规划学刊,2024,68(02): 58–63.
- [6] MENG Xiangfeng, LONG Ying. Shrinking cities in China: Evidence from the latest two population censuses 2010–2020[J]. Environment and Planning A: Economy and Space, 2022, 54(3).
- [7] 王新宇,孟祥凤,王春龙,等.资源枯竭型城市的低效空间识别方法——以鹤岗市为例[J].资源科学,2024,46(06): 1119–1130.
- [8] 衣霄翔,赵天宇,吴彦锋,等.“危机”抑或“契机”?——应对收缩城市空置问题的国际经验研究[J].城市规划学刊,2020, (02): 95–101.
- [9] 荆莹.收缩城市建成区低效工业用地识别与优化策略研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2019.
- [10] 刘羿伯,张郝萍,吴梓溶,等.基于绿色基础设施绩效提升的收缩城市低效工业用地优化利用:以牡丹江为例[J].资源科学,2024, 46 (02): 386–406.
- [11] 蔡立珠,何继红,梁雄飞,等.存量低效工业园区改造全周期监管策略——以佛山市顺德区村级工业园升级改造实践为例[J].规划师,2021, 37 (06): 45–49+55.
- [12] 陈卓,毕如田,陈利根,等.基于多层次指标体系的城镇低效工业用地认定与查询——以山西省榆社县为例[J].中国农业资源与区划,2019, 40 (12): 31–38.
- [13] 景鹏,何业成,乔学扬,等.低效工业用地识别与高质量再开发路径研究——以南京市江宁区为例[J].规划师,2024, 40(12): 146–151.
- [14] 黄慧明,周敏,吴妮娜.佛山市顺德区低效工业用地空间绩效评估研究[J].规划师,2017, 33(09): 92–97.
- [15] Diakoulaki D, Mavrotas G, Papayannakis L. Determining objective weights in multiple criteria problems: The critic method[J]. Computers & Operations Research, 1995, 22(07): 763–770.
- [16] 石骋,衣霄翔,张远景.人口收缩地区城镇建设用地规模与结构配置研究——以东北三省为例[J].黑龙江国土资源,2024, 22(03): 10–23.
- [17] 衣霄翔,王淑钰,张郝萍,等.人口收缩背景下城镇建设用地的挑战与出路——以我国东北三省为例[J].城市规划学刊,2023, 67(06): 68–78.
-

作者简介:

第一作者:张郝萍,1997年生,女,河南信阳人,硕士,哈尔滨工业大学建筑与设计学院,主要研究方向为城乡规划。Email:20s034114@stu.hit.edu.cn;

通讯作者:付朝华,1984年生,男,湖南汨罗人,硕士,华蓝设计(集团)有限公司,高级城市规划师,主要研究方向为城乡规划和国土空间用途管制。Email:21064564@qq.com

Identification of Inefficient Industrial Land and Analysis of Its Spatial Distribution Characteristics in Shrinking Cities: Case Study of the Built-up Area in Mudanjiang City

ZHANG Haoping¹, YI Xiaoxiang¹, XING Ying², FU Zhaohua^{3 *}

(1. School of Architecture and Design, Harbin Institute of Technology; Key Laboratory of National Territory Spatial Planning and Ecological Restoration in Cold Regions, Ministry of Natural Resources, Harbin 150001, China;
2. China Academy of Urban Planning and Design Housing and Residential District Research Institute, Beijing 100037, China;
3. Hualan Design & Consulting Group, Nanning 530011, China)

Abstract: As urban areas develop in high-quality, the demand for the redevelopment of existing land increasingly continues, making the governance of inefficient industrial land a critical issue in implementing the economical and intensive land use. For China's shrinking cities, the adjustment of existing urban space has lagged behind the population decline, resulting in the accumulation of large areas of inefficient industrial land, which negatively impacts the high-quality development of urban space. As a typical shrinking region, Northeast China faces particularly severe issues related to the inefficient use of industrial land, highlighting the urgent need for precise identification and targeted governance in shrinking cities. Taking the built-up area in Mudanjiang City, a typical shrinking city, as the research object, this study constructs a four-dimensional identification system integrating industrial economy, environmental sustainability, spatial form, and land use efficiency, and applies the CRITIC-TOPSIS method to identify inefficient industrial land and reveal its spatial agglomeration patterns. The results show that the multi-dimensional identification system, tailored to the specific characteristics of shrinking cities, accurately identifies 596.80 hectares of potentially inefficiently utilized industrial land and 199.55 hectares of inefficient and extensively utilized industrial land within the study area. These two categories of land exhibit distinct spatial agglomeration patterns, manifesting in four typical forms: legacy-type in core areas, disordered-type in peripheral areas, decline-type in industrial corridors, and cyclical-fluctuation-type in industrial parks. Based on these findings, the study proposes a governance mechanism of "measurement-diagnosis and zonal policy-making", advocating differentiated renewal strategies and classified guidelines according to the spatial agglomeration characteristics of inefficient industrial land. This approach offers spatial and precise pathways for the redevelopment of such land, providing both theoretical support and methodological innovation for the identification and governance of inefficient industrial land in China's shrinking cities.

Key words: urban shrinkage; inefficient land; redevelopment; urban renewal; industrial space

“三链协调”理念下环境设计对太阳文化创新实现路径研究

——以日照滨海公园改造为例

王 迪,董馨怡,马 辉*

(吉林建筑大学艺术设计学院,长春 130118)

摘要:全球城市化加速推进的背景下,地域文化传承面临两大突出困境,一是文化趋同趋势加剧导致地方特色和传统价值逐渐消散,二是功能分区界限愈发分明让文化脱离现实生活范畴,难以在现代社会彰显原有意义。跨学科融合视域为观察以上问题提供了契机,本研究以日照太阳文化为切入点,审视其在环境设计中的创新实践场景,借助文化人类学的理论框架及生态工程学与材料科学的方法体系,同时以数字技术助力重塑了一套“基因解码—方式整合—生态协同”三位一体的文化创新实践方案,有效激活太阳文化遗产价值,探索了人地和谐共生的可行路径。本研究表明“三链协调”视角有效揭示了文化、技术与生态间的互动机制,为城市空间文化再造与可持续发展提供了理论支撑与实践范式,推动了跨学科协作下的文化功能融合与城市韧性提升,具有广泛的推广价值。

关键词:多学科交叉融合;环境设计创新;太阳文化;数字孪生;生态协同

中图分类号:TU984

文献标志码:A

文章编号:1672-2736(2025)08-0057-8

0 引言

在城市更新进程中,环境设计面临着文化传承、空间效能与生态可持续性三者协同的复杂挑战。联合国《2030 再可持续发展议程》中指出,文化遗产保护需经跨学科协作达成“保护—利用—再生”的动态调适^[1]。然而,在城市更新实践中暴露出符号生硬拼贴、技术兼容困顿以及生态压力攀升等问题。传统设计方法囿于学科壁垒,难以实现对文化基因的深层转译与系统整合^[2]。为破解这一难题,本研究提出并实践“三链协调”(文化链-技术链-生态链协同)的环境设计文化创新理念,并构建“STEP”文化创新方法论框架。该框架旨在通过跨学科协同(环境设计、文化研究、数字技术、生态工程),系统解码地域文化基因,并驱动其在现代空间中的创新性表达与可持续活化。

本研究以山中国太阳文化重要发源地——山东省日照市滨海公园改造为实证载体。其核心在于:

(1)基于“三链协调”理念与“STEP”方法,深度解析与提取“太阳文化”的空间基因图谱(如“日月山”图腾、天台山祭坛遗址所蕴含的场所精神与空间原型);

(2)探索并实践将这一文化基因通过数字技术赋能、生态工程渗透、参与式共创等多维路径,融入滨海公园空间更新的具体策略;

(3)关键性地对上述实现路径进行系统性效能分析,定量与定性评估其在提升文化认同感、优化空间功能效率、改善生态环境质量以及促进社区参与等方面的综合效果。

通过日照滨海公园案例,验证“三链协调”理念与“STEP”方法在破解文化-空间-生态协同难题上的有效性,为同类型环境设计中的文化创新

基金项目:吉林省教育科学“十四五”2023 年度重点课题《“双创”背景下多学科交叉融合的环境设计专业创新实践教学体系构建研究》(ZD23009);吉林省教育科学“十四五”规划 2021 年度重点课题《新文科发展理念指导下“环境设计”一流专业建设的路径与实践研究》(ZD21035)。

实践提供可复制、可评估的理论模型与实践路径。

1 多学科交叉融合的理论模型构建

1.1 理论局限与模型创新

在全球化叠加城市化的快速进程中,环境设计被推到不得不直面挑战与机遇的节点,多地传统文化趋于同质化,功能性又逐渐走向孤立,导致文化、技术与生态割裂^[3]。

为了深化环境设计的创新研究,“文化链—技术链—生态链”螺旋协同模型顺势而出。文化链提供价值导向支撑,技术链驱动创意转换落地,生态链保障延续性发展条件^[4]。三者之间相互咬合呼应,实现整体效能与格局的双重提升(表 1)。

(1)文化链锁定价值核心,为环境设计创新提供不可或缺的动力。从陵阳河遗址那些古老的史前符号到如今活力四溢的太阳节庆等活动资源里,“光、时间、仪式”蕴含的文化含义及象征性指向,为环境设计提供了设计参照^[5](图 1)。将文化基因解码,借助文化人类学与符号学的相关方法和工具,可以细化分解太阳文化的原型符号“日月山”图腾。“日月山”图腾是太阳文化核心价值的直接表达。当这些元素在适当解构后被重新整合时,在一定程度上搭建起具备设计指导意义的参考体系,构建可操作的符

号库^[6,7]。

(2)技术链在环境设计中扮演核心支撑角色,推动创新转化,参数化设计、数字孪生和智能材料开发等新方式,构成了文化符号向空间语言转译的关键纽带。运用 Grasshopper 参数化工具展开技术创新,有助于模拟日照变化等与环境相关的因素,还能促进光影装置配置方案的生成。数字孪生成为空间与现实深度互动和反馈的催化剂,智能材料能依据环境变化与人工干预自我调整性能与形态的特性,如温敏混凝土这类智能材料的研发为“温度到纹理”的动态映射提供了可行办法,同时也为沙滩步道的创新打开了可能性^[8,9]。

(3)生态链在环境设计创新中扮演着支柱角色,暴雨洪水管理模型(storm wenter manngement model, SWMM)模型等评估工具的应用为场地径流和生态环境要素带来了平衡性^[10],如透水铺装、雨水花园这类具有环境亲和力的设计得以推广,同时整合光伏玻璃、陶艺构件这类清洁能源技术的模块体系 r 出现,不仅承担了发电与遮阳的功能,还将文化在其中表达,模糊了技术应用与艺术表达之间的界限,释放出二者结合的可能性^[11](图 2)。

1.2 构建 STEP 工具箱

“STEP”工具箱由四大模块构成,通过跨学

表 1 环境设计理论与“三链协调”理论对比

理论维度	生态优先理论	参数化设计理论	文化符号学应用	“三链协同”模型
核心导向	自然适应性	算法生成空间	符号表意	文化-技术-生态协同
文化深度	忽略文化基因	形式化生成	表层拼贴	基因解码+动态转译
生态整合	静态保护	无量化控制	脱离生态指标	全生命周期效能评估



图 1 日照城市与太阳相关的事物

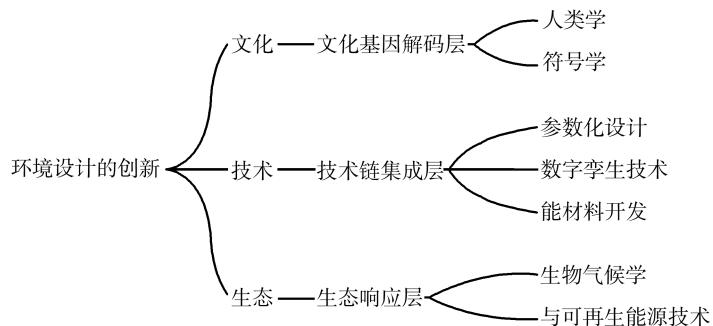


图2 环境设计创新点

科协同的理论协同实现文化、技术与生态三者深度融合:Symbol 库基于文化符号学原理,借助大数据与图像识别技术,按地域、历史时期等维度分类存储文化元素,形成结构化数据库。Technology 工具包整合参数化设计、BIM 等技术,打通软件间数据接口,实现设计与性能评估的闭环,驱动文化符号向空间语言转译^[12,13]。Ecology 指标体系参考生态城市等理论及绿色建筑标准,运用德尔菲法,制定差异化生态指标。Participation 平台基于参与式设计理论,融合线上线下渠道,提供方案展示、意见反馈等功能,强化社会参与度。“三链协同”模型为工具箱提供理论框架,二者形成“理论-工具”的闭环模型,指导工具箱开发,明确模块分工,而工具箱通过实践实现模型的优化,最终实现文化传承、技术创新与生态可持续的系统化协同^[14]。

2 多学科协同下的太阳文化转译策略

2.1 文化基因的拓扑学转译

(1) 符号解构与空间塑造,以拓扑学视角解析“日月山”图腾,提取“圆环(太阳)一三角(山峰)一射线(光芒)”的几何单元元素,借助 Rhino 与 Grasshopper 的集成平台,实现了参数化建模,并将其设计应用于滨海步道的铺装规划中。为确保在夏至正午时分精确再现图腾的光影效果,在模块间的缝隙设计中融入了依据日照入射方向规律进行调整的策略,以此增强设计与自然光线的互动,提升空间体验的独特性与文化共鸣。

(2) 数字化复原仪式场景时,将考古资料与口述内容交织起来,借助 Unity 引擎的灵活性搭

建起东夷部落祭日仪式的虚拟架构。游客戴上 AR 眼镜,对着遗址中的石柱一扫,三维全息影像出现,仿佛置身于古老的祭祀情境之中^[15]。这种让古今时空相互碰撞的沉浸式交互手法,在增强人们对太阳文化认知的同时,也拓展了公园自身文化内涵的深度。

2.2 数字孪生驱动的场景激活

在文化与空间的跨学科研究中,大数据与公共空间共建创新举措成效显著。饶明涛的《大数据支持下的城市公共空间量化研究综述》^[16],大数据背景下城市公共空间量化研究的数据类型丰富多样,包括社交媒体数据、手机信号数据、视频监控数据、GIS 数据和遥感数据等。此外,大数据技术的应用也极大地丰富了传统的公共空间研究方法,使得研究结果更加全面精确,为相关实践提供理论支撑。

大数据在增强空间效率方面表现出显著的优势。例如,太阳文化主题景区通过布置 WiFi 探针与热力传感器,收集游客行为数据,发现光影装置区吸引大量游客停留。基于此,景区依据数据进行分析,再对雾森系统重新布局。这种基于数据的精准优化,既提升了游客游览舒适度,又实现了空间资源的高效利用。

2.3 生态—文化复合技术系统

(1) 光伏与陶艺协同模块可以构建装置,将流线型光伏板和黑陶拼贴融为一体,晴日里,光伏板以 22°倾角接纳日照,用以捕获太阳能并转化为电能进行储存,运用到场景里,感受节气的变化。

(2) 温敏材料响应系统采用海沙混凝土与热致变色涂层组合而成的透水铺装, 低温条件下呈现出蓝调“潮汐纹”, 当环境温度攀升至 28℃ 以上, 则转为金黄色“放射纹”, 犹如正午烈日般热烈地铺展而开, 提供了更具参与感和互动趣味的游园体验(表 2)。

3 STEP 工具箱在日照滨海公园的应用分析

3.1 项目背景与跨学科协作机制

山东省日照市东港区滨海公园曾是城市核心休闲区, 随着时间推移, 文化符号零散分布问题凸显, 缺乏符号系统性, 生态效能衰减, 公共参与度不足, 游客难以享受全面的城市游览体验。

为解决这一困境, 构建跨学科协作机制, 汇聚建筑学、社会学、历史学、环境科学等协同合作。在滨海公园设计太阳文化中心, 通过建筑空间、艺术展陈、沉浸式体验融汇太阳文化的过去、现在、未来, 打造属于日照的太阳文化。

3.2 日照滨海太阳文化中心设计方案

太阳文化中心室外设计提取太极阴阳图元素, 太极图反映了地球绕太阳公转及绕地轴自转造成明暗交叠的阴阳面, 也表示了太阳回归年的阴阳节律周期。顺建筑核心向四周延展开, 八个方向的景观为宇宙的八种现象, 东面日出东方, 代表太阳与火, 可将太阳女神羲和及日出扶桑等《山海经》元素作为景观布局于此向。其它向依次将文化元素融入景观中(图 3、图 4)。

表 2 太阳文化转译设计图像呈现

太阳文化转译策略	设计形态	转译图像
文化基因的拓扑学转译	滨海步道铺装设计 图腾光影的投射形态	
生态—文化复合技术系统	公园透水铺装 海沙混凝土与热致变色涂层组合	

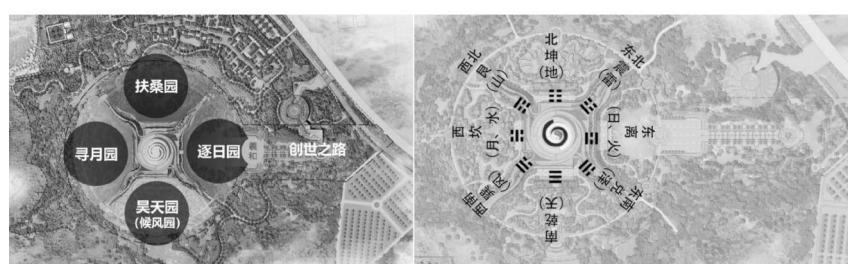


图 3 太阳文化中心室外布局图



图 4 太阳文化建筑效果图

3.2 STEP 工具箱在滨海公园太阳文化中心的协同应用分析

在日照滨海公园太阳文化中心设计中,“STEP”工具箱通过四大模块的协同,构建了“文化-技术-生态”完整的协同链条。Symbol 库系统整合零散的太阳文化符号,将甲骨文、黑陶、玉琮等元素转化为符号,为公共空间植入文化叙事内核(图 5);Technology 工具包依托参数化设计与智能算法,将符号与生态转化为具体可操作的技术指标,将沿途的墙面、地面、艺术构件,全方位展示太阳文化的元素;Ecology 指标体系调控生态界限,实施材料耐久性提升等策略,确保项目全

生命周期的可持续性;Participation 平台则借助 AR 交互与区块链技术,将公众从“旁观者”转化为“共建者”,沉浸式参与空间体验,形成文化归属感(图 6)。融入四季观,设计出四个殿堂,分别代表春、夏、秋、冬,穿梭其中感受四季的变化,将生态保护意识的和谐共生与设计融合(图 7)。四大模块协同合作——文化符号驱动技术参数生成,生态指标约束空间设计参数,公众反馈反向优化符号优先级,由此构建“文化-技术-生态-价值”的循环机制,既破解了传统设计更新中学科割裂的难题,也为滨海公共空间的复合型改造提供了可行性方案。



图 5 文化符号在太阳文化中心的应用



图 6 AR 与区块链技术在太阳文化中心的应用



图 7 太阳文化中心四大殿春夏秋冬效果图

3.3 日照滨海公园太阳文化中心全生命周期效能评估

为评估“STEP”工具箱的协同效能,本研究采用了“全生命周期评价”(LCA)与“使用后评估”(POE)双轨方法,量化文化转译、技术应用于生态效能(表3)。

(1) LCA 原理:覆盖“材料生产—建造—运营—维护”全周期,聚焦于碳排放、资源消耗与生态影响。

(2) POE 原理:通过用户行为与感知数据,评估文化认同度、空间舒适度以及社区参与度。

(3) 统计方法:

① LCA 结果:标准化为“人均年碳排放量($\text{kg CO}^2/\text{人}/\text{年}$)”;

② POE 数据:采用 SPSS26 进行卡方检验与多元回归分析,验证变量的相关性。

通过表4的预测结果表明,“STEP”工具箱在日照滨海公园太阳文化中心的应用,是一次理论与实践深度结合的探索,也是对地域文化传承与现代环境设计融合路径的一次成功验证。使得日照太阳文化的核心符号与故事得以生动呈现,并与公众产生较为深刻的互动。在技术链的驱动下,数字孪生、智能材料等前沿技术的应用,在一定程度上提升了空间设计的精准度和创新性,将这些技术与生态链的紧密协同,不仅有助

于项目效能的提升,也促进了生态可持续性的实现,有助于应对破解文化割裂、技术孤立、生态滞后的困境,推动了项目的设计应用,通过 LCA 与 POE 双轨评估项目在环境与文化的平衡能力上得到了量化体现。“STEP”工具箱作为连接理论与实践的桥梁,其模块化、标准化的设计思路,共同构成了“理论—工具—实践”的路径,为其他地域文化在环境设计中的应用提供了可参考、具有可复制性的模板。此工具箱的成功应用,不仅表明了多学科交叉融合方法的可行性,也为未来类似项目提供了有价值的经验和启示。

4 结论与展望

日照太阳文化属于中华文明的一处珍贵宝藏,带有浓厚的文化沉淀及独有的地理标签属性,本研究基于多学科交叉融合视角,通过构建“文化—技术—生态”协同模型与“STEP”标准化工具箱,探索了地域文化在环境设计中的创新实践路径。研究以日照太阳文化为切入点,提出文化基因的拓扑转译方法,结合数字技术与生态工程,有效解决了文化符号生硬拼贴、技术生态割裂等传统设计难题,将滨海公园与太阳文化融合打造成属于日照活名片。跨学科协作机制能够显著提升文化认同与空间效能,而工具的模块化设计则为不同地域场景提供了可复制的解决

表 3 全周期效能评估要点

评估维度	方法	数据采集	工具箱关联模块
文化链	POE 问卷	符号识别认知度、叙事连贯性	Symbol 库+Participation 平台
技术链	LCA 材料循环率、能耗	发电量、水耗率	Technology 工具包
生态链	碳排核算、气候生态	碳排放量、资源节约	Ecology 指标体系

表 4 全生命周期评估预测结果

指标	改造前	改造后	提升率	工具箱协同作用
文化认知度	41%	89%	+117%	Symbol 库编码、AR 交互强化、Participation 平台反馈
年碳排放量	86t CO^2	63t CO^2	-26.7%	光伏技术、BIM 材料优化、Ecology 指标体系
市民参与率	14%	67%	+379%	Participation 平台参与式共建设设计、Symbol 库对符号的可视化
设施维护成本	18 万元/年	9.5 万元/年	-47.2%	Technology 工具包整合、Ecology 体系对耐久性的模拟

方案。未来研究需进一步降低技术应用门槛,实现文化遗产的可持续活化,为城市文化空间的动态演进提供理论与实践支持。

参考文献(References):

- [1] 何佳栖,贾玲利.景观视角下历史文化街区保护与更新研究[J].城市建筑,2021,18(09):169-171.
- [2] 郭雁南.日照太阳文化遗址保护与利用研究[J].文化遗产,2020,13(03):112-118.
- [3] 肖璐.传统建筑装饰艺术在现代环境设计教育中的发展策略[J].天工,2025,11(10):106-108.
- [4] McHarg, I. Design with Nature(50th Anniversary Edition [M]. New York: Wiley, 2020: 56-73.
- [5] 日照市生态环境局.2023年日照市低碳城市发展报告[R].日照:日照市人民政府,2023.
- [6] 阳佳敏,王锦.文化符号在景观设计中表达的研究进展[J].现代园艺,2025,48(13):160-163.
- [7] 陈恩.从日照出土刻画符号与器物看日照太阳文化[J].文物鉴定与鉴赏,2023,13(09):154-157.
- [8] 刘亚平.海南丝路文化在滨海城市公共空间设计中的实践应用[J].湖南包装,2024,39(05):80-83.
- [9] 徐姗姗,罗文博.城市公共空间地域文化的阐扬与建构——以江西为例[J].江西社会学,2018,38(02):243-248.
- [10] 张惟宁,殷明凯,孟梓帆.低碳城市背景下低碳建筑的要求与发展研究——以南京市为例[J].安徽建筑,2024,31(11):96-97+133.
- [11] 李新,王志扬.新时代语境下中国艺术理论的变革与求新[J].民族艺术研究,2025,38(02):40-45.
- [12] 方世南.数字生态文明建设中科技理性与人文理性的辩证关系[J].鄱阳湖学刊,2025,16(01):5-12+156.
- [13] 陈庆玲.习近平文化思想推动新时代生态文明建设[J].江苏海洋大学学报(人文社会科学版),2025,23(01):19-30.
- [14] 胡小敏.城市更新单元规划技术分析[C]//《中国招标》期刊有限公司.新质生产力驱动第二产业发展与招标采购创新论坛论文集(一).新疆天北勘测设计研究有限公司双河市分公司;2025:135-136.
- [15] 曲越,李绍良,张磊,等.基于数据驱动的工作面采煤设备数字孪生系统研究与应用[J].自动化应用,2025,66(07):121-124+128.
- [16] 饶明涛.大数据支持下的城市公共空间量化研究综述[C]//中国城市规划学会,合肥市人民政府.美丽中国,共建共治共享——2024中国城市规划年会论文集(08城市设计).华中科技大学;2024:572-579.

作者简介:

第一作者:王迪,1978年生,女,吉林人,硕士,吉林建筑大学,副教授,主要研究方向为环境设计。Email:29418076@qq.com;

通讯作者:马辉,1974年生,女,吉林农安人,博士,吉林建筑大学,教授,主要研究方向为环境设计。Email:807889316@qq.com

Realization Path of Solar Culture Innovation in Environmental Design under the Concept of “Three-Chain Coordination”: Case Study of Rizhao Coastal Park Renovation

WANG Di, DONG Xinyi, MA Hui *

(School of Art and Design, Jilin Jianzhu University, Changchun 130118, China)

Abstract: Amid the global wave of urbanization, the preservation of regional cultural heritage faces two prominent dilemmas: the intensification of cultural homogenization erodes local distinctiveness and traditional values, while increasingly rigid functional zoning severs cultural practices from daily life, rendering them marginal in modern society. An interdisciplinary lens offers a critical opportunity to examine this issue with Rizhao's solar culture serving as a case to explore innovative applications in environmental design. By integrating cultural anthropology with methodologies from ecological engineering and materials science, and leveraging digital technologies, a tripartite cultural innovation framework—"genetic decoding, modality integration, and ecological synergy"—has been developed. This approach revitalizes the value of solar cultural heritage and charts a viable path for human–environment harmony. The study demonstrates that the "triple-chain coordination" perspective effectively elucidates the interactive mechanisms among culture, technology and ecology, providing theoretical and practical paradigms for urban cultural regeneration and sustainable development. It advances cross–disciplinary collaboration to fuse cultural functions with urban resilience enhancement, offering broad applicability.

Key words: multidisciplinary integration; environmental design innovation; solar culture; digital twin; ecological collaboration

协同规划视角下乡镇级片区国土空间规划的实践与创新

——以仁和片区国土空间规划为例

施仪琳^{*}

(攀枝花市不动产登记中心,四川 攀枝花 510400)

摘要:本文以四川省仁和区产城融合示范片区为例,探讨乡镇级国土空间规划的实践路径。研究基于仁和片区“六林三田、半水半建”的资源禀赋和区位优势,结合其突出的三线文化、矿产资源、特色农业及钒钛产业基础,系统分析了片区面临的人口老龄化、用地分散、产业融合不足、服务效率低下等核心问题。提出“4353”总体编制思路,即以四大现状认识为基础,围绕“产城融合示范区、近郊都市农业引领区、阳光康养休闲区”三大定位,实施筑基、赋能、强核、便民、塑形五大策略,并强化组织、政策、技术三大保障。规划构建“一轴三廊一核一心四区”的空间格局,划分三级镇村体系,推动产业提质、设施优化、风貌提升和土地整治,旨在为类似地区国土空间规划提供可借鉴的城乡融合发展模式。

关键词:国土空间规划;片区单元;规划实践

中图分类号: TU98

文献标志码: A

文章编号: 1672-2736(2025)08-0065-9

0 引言

为深化生态文明体制改革,以习近平为总书记的党中央自十八大以来,多次明确构建完善的国土空间规划体系,整体优化利用自然、经济、社会、文化等国土空间要素配置^[1]。深化空间规划改革,建立国土空间规划体系,是生态文明建设的基本保障^[2-6]。2019 年 5 月 10 日,中共中央国务院印发《关于建立国土空间规划体系并监督实施的若干意见》,明确了建立“五级三类”的国土空间规划体系,对乡村地区国土空间规划和详细规划编制提出了指导性意见,明确了各地可因地制宜,将市县与乡镇国土空间规划合并编制,或以几个乡镇为单元编制乡镇级国土空间规划,以单村独立编制或相邻几个行政村为单元统筹编制对目标区域内全部国土空间进行规划的方法路径^[7]。镇乡级国土空间总体规划是落实中央指示、国家战略的重要部署,是我国“五级三类”国土空间规划体系的重要组成部分,是对市县级国土空间总体规划的细化落实,是对县域各经济片区或镇乡行政区国土空间保

护、开发、利用、修复等工作做出的具体安排,是编制详细规划和相关专项规划的依据,是实施国土空间用途管制的法定依据^[8-15]。

以片区为单元编制乡村国土空间规划是四川省委两项改革“后半篇”工作的重要内容和基础性工作;是实现片区资源整合、产业协同、交通互连、设施共享、生态共治、农田共保的重要手段;是推进乡村全面振兴和新型城镇化建设、促进县域经济高质量发展的长远之计。落实省委以片区为单元编制乡村国土空间规划决策部署,围绕四大任务“优化资源配置、提升发展质量、增强服务能力、提高治理效能”落实专项工作方案,高效推进规划编制工作。本文以仁和区仁和片区国土空间规划(即:仁和区产城融合示范片区)为例,综合考量该片区自然条件、区位条件以及基础设施建设情况、三大产业发展基础以及共同发展可能性等相关因素,通过对环境保护、资源开发以及片区经济发展和居民收入增加等需求进行综合考量,明确协同发展需求并制定国土资源开发规划。本次规划着重解决了片区内各乡镇发展分散、现有资源利用不充分以及居

民生活水平提升缓慢等方面的问题,能够使得该片区的资源得到充分利用。从协同规划的角度出发,本次重新规划对片区内资源分布以及开发利用进行了充分调研,了解本市以及本省的发展规划及其对该片区发展的影响,在此基础上提出相应的策略和保障,即形成“4353”的总体编制思路,即以现状 4 大认识为基础,围绕 3 大定位,通过筑基、赋能、强核、便民、塑形 5 大策略,形成 3 大保障。

1 仁和片区国土资源总体特征及发展潜力评估

1.1 基本特征

仁和区产城融合发展示范片区大河中路街道、仁和镇、金江镇、中坝乡、大龙潭彝族乡扣除城市开发边界以外的区域,包含 37 个村(社区),21 村,17 个城市社区。片区总用地面积:575.66km²,城市开发区 55.25km²,乡村片区内总用地面积:520.41km²。该片区的基本特征为“六林三田、半水半建”,片区林地 31301.91hm²(占比 60.15%)、耕地和园地 15875hm²(占比 33.95%)、建设用地 1300.87hm²(占比 2.5%)、

水域及水利设施用地 1237.7hm²(占比 2.38%)。

仁和片区的主要优势包括:(1)区位优势显著,片区交通便利、有京昆高速、攀大高速作为对外主要通道,在片区的仁和镇总发村、中坝乡中坝村、金江镇鱼塘村、金江镇都有高速路下线口,同时成昆铁路、成昆铁路复线、国道 227 等道路从区域内穿过。(2)片区生态环境良好,该片区森林覆盖率达 60.28%,年日照 2800 小时以上,历年平均气温 20.6℃,历年平均降水量 818.9mm,无霜期 300 天以上,良好的生态环境为片区农业以及旅游产业发展创造了良好条件。(3)片区拥有丰富的地区优势资源,如本片区拥有三线文化、民俗文化、苴却砚文化、农耕文化等类型多样的区域文化,现有 2 个省级文物保护单位、4 个区级文物保护单位、1 项省级非物质文化遗产;本片区石墨矿和苴却砚石储量较大,分布集中,中坝乡石墨矿探明储量已达到 1555.21 万吨,片区拥有丰富的特色农业资源,其中“仁和芒果”“中坝草莓”等品种优势均较为显著(图 1),片区是国家级钒钛高新技术产业园区的重要载体,清洁能源产业发展较好(图 2)。

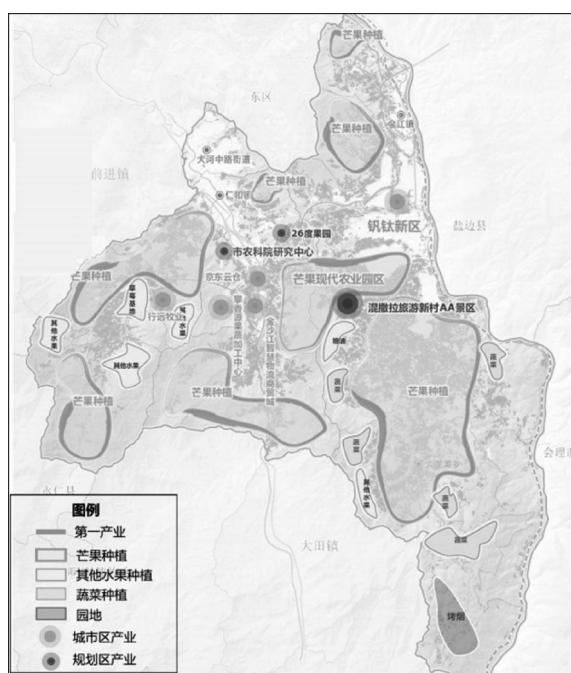


图 1 仁和片区工农产业分布

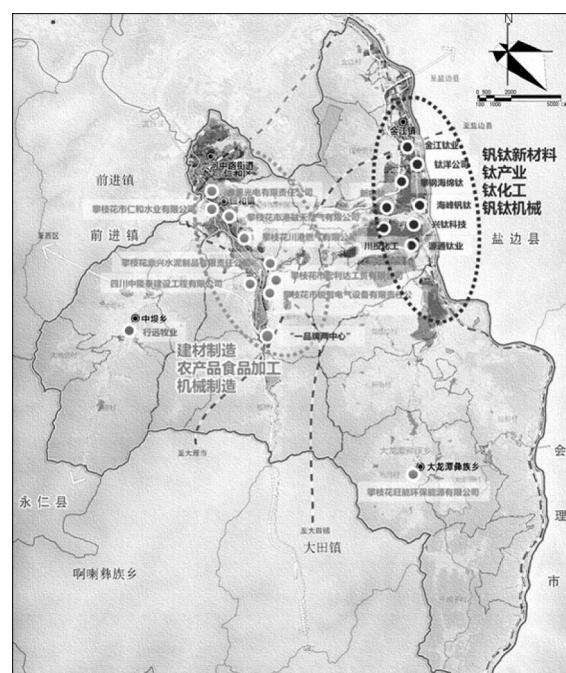


图 2 仁和片区钒钛高新技术产业分布

1.2 突出问题

1.2.1 农业用地与建筑用地分布不均匀

仁和片区人均农业用地较少,而人均建筑用地指标则相对较高。片区现状耕地 2589.82hm²,与原土规确定的 3460hm² 耕地保有量存在约 870hm² 的差距,与质量较高的平原耕地相比,片区坡度 6°以上的耕地占比较高(占比 81.69%),且大量耕地为不适宜开垦的林区耕地或河道耕地。比较来看,片区现状人均建设用地面积为 486.12m²,人均城乡建设用地面积为 357.67m²,人均城镇建设用地面积为 173.34m²。综合人均农业用地以及建筑用地面积分析,该片区农业用地占比不足的情况显著,主要原因是土地条件不适合大范围种植农作物,导致农业发展受到显著制约。

1.2.2 产业融合不足

平地片区整体属高山峡谷地形,现主要集中在大河、永富河和大竹河河谷发展,地形对本片区基础设施建设造成了较大影响,使得片区三个乡镇之间的道路交通长期并不便利,乡镇之间同样难以共享灌溉系统等农业生产的基础设施。由于基础设施总体发展水平较低,因此难以利用完善的基础设施支持促进该片区产业的协同发展。虽然图 1 显示出种植初具规模,但是产业链延伸不足,附加值偏低。农业产业以传统种植业为主,农产品加工以粗加工为主,在电商冷链物流、品牌营销等环节还有较大提升空间。种植优势未能向高附加值的加工流通环节延伸,附加值较低。

攀枝花市域内钒钛、康养产业竞争激烈,仁和区“一品牌两中心”的差异化定位需强化。此外,过度依赖钒钛、石墨等资源型产业,抗市场波动能力弱(如钒钛价格下跌影响产业链延伸)。

1.2.3 中心辐射力不足,人口集聚存在阻力

2020 年底,平地镇镇区建设用地面积为 51.47hm²,大田镇镇区为 40.99hm²,啊喇彝族乡集镇为 17.14hm²。平地和大田镇区分别沿国道 G108、国道 G227 夹道建设,并形成带状城镇空间形态。地形条件对片区人口聚居区的发展存

在较大影响,目前片区的乡镇依然主要依托河谷等环境发展。地形条件的限制下,片区主要乡镇辐射发展较为困难,并不适合进一步扩大。此外,由于片区内乡镇的经济发展水平同样相对较差,因此片区的主要乡镇同样难以借助经济辐射影响达到吸引人口集聚的目的。

1.2.4 设施配置失衡,人口外流严重

2020 年片区常住人口 2.55 万人,相较于 2010 年的 2.97 万人,减少了 0.42 万人,年均减少 420 人;城镇人口 0.44 万人,城镇化率仅为 17.26%,远低于仁和区的 58.60%。从人口变化情况来看,该片区当前存在较为严重的人口流失情况,且片区城镇化发展总体水平依然相对较低。对该地区居住区域的调查显示,片区商业、文化、养老、医疗、消防等服务设施的建设水平较低,难以为该片区的居民提供高质量的生活服务。对生活环境要求较高的居民,离乡情况较为显著。此外,由于该片区提供的工作质量同样相对较差,因此片区难以形成人口集中的发展区域,片区无法通过城镇化发展推动包括新能源产业在内的工业以及旅游业等第三产业的发展。

1.2.5 风貌同质化严重

该片区虽然文化资源丰富,然而村镇尤其农村并未充分体现本地区的文化特征,当前该片区尚未形成具备较高吸引力的“地区级、目的地型”核心旅游产品,地区文化资源浪费情况较为显著。

1.3 总体评估

对仁和片区土地利用问题以及本地区的优劣势进行归纳总结的结果如图 3 所示,根据仁和片区的区位优势以及资源优势,为解决仁和片区现存的土地资源分布不均匀、基础设施建设水平较低以及城镇化发展水平较低等方面的问题,仁和片区需要根据国家对国土资源利用的总体规定,坚持经济建设、政治建设、文化建设、社会建设、生态文明建设五位一体,协同推进新型工业化、信息化、城镇化、农业现代化和绿色化,以健全生态文明制度体系为重点,优化国土空间开发格局。按照攀枝花市“一三三三”总体发展战略,

四个基础特征			
近郊优势区位 城市产业辐射、交通枢纽、南进桥头堡	生态本底优越 良好的气候环境与生态本底	文化资源丰富 文化资源丰富、文旅潜力大	产业特色明显 种植特色鲜明、逐步形成片区特色产业品牌
土地利用 资源利用效率不高、耕地保护压力大	产业发展 区域片区产业联动不足,农业生产用水存在短板,农旅融合发展程度不高、文旅资源分散挖掘不够	城乡融合 城乡配套设施、基础设施未统筹融合发展,城乡一体化发展融合不足	乡村建设 城乡风貌品质混乱,乡村风貌特色不突出
四个突出问题			
土地利用 资源利用效率不高、耕地保护压力大	产业发展 区域片区产业联动不足,农业生产用水存在短板,农旅融合发展程度不高、文旅资源分散挖掘不够	城乡融合 城乡配套设施、基础设施未统筹融合发展,城乡一体化发展融合不足	乡村建设 城乡风貌品质混乱,乡村风貌特色不突出

图 3 仁和片区发展现状综合评估

仁和区要加快推动“水资源配置+抽水蓄能+新能源开发”三结合项目,大力发展阳光康养旅游度假产业,推动文旅体康深度融合发展。具体来看,仁和片区计划在加强基础设施建设的同时,全面建设“绿色转型示范区、新兴产业示范区、乡村振兴示范区、阳光康养示范区、南向开放示范区”。

2 仁和片区国土资源规划以及国土资源利用问题处理措施

2.1 仁和片区国土资源开发利用需求

根据仁和片区国土资源开发现状以及土地利用问题的调查结果,仁和片区拥有良好的区位条件,交通主干道的基础设施建设水平同样较好,但片区城镇化水平较低,同时乡镇的基础建设水平同样较差。仁和片区的发展必须突破地形地势对片区的限制,通过完善基础设施连通片区主要乡镇,将当前分散的居住区连为一体。根据仁和片区特色农业、旅游产业以及新能源产业的发展规划,该片区计划“以产促城,以城兴产,产城融合”,打造“一品牌两中心”,大力发展战略服务业,壮大中心城区发展极核。优化整合两园区钒钛资源综合利用,发展电子信息,延伸钒钛、石墨、制造和材料产业链,打造工业发展主导区。

2.2 仁和片区国土资源总体规划

依据前节研究区规划方案,共划分四个仁和片区,包括仁和产城融合示范区、宝鼎

工矿转型发展片区、金沙江农文旅融合发展片区、三阳湾阳光生态绿色经济发展片区(图 4)。其中,仁和产城融合示范区包含仁和镇和金江镇(副中心)两个中心镇,规划范围包含大河中路街道、仁和镇、金江镇、中坝乡、大龙潭彝族乡。仁和镇作为仁和区政府的驻地镇,较片区内其他乡镇从人口、产值方面均为第一,是未来城市发展核心区。片区副中心金江镇位于该片区东北侧,通过推进攀枝花钒钛高新技术产业园发展,现已形成以钒钛高新技术为主导的工业片区,吸引了多地企业的投资。片区总用地面积为 575.66km²,其中城市开发区 55.25km²,乡村片区 520.41km²。仁和区仁和产城融合片区是攀枝花市区向南重要拓展区、钒钛产业重要承载地,其发展导向突出城镇建设和工业发展,统筹特色农产品加工、物流商贸等产业。

2.3 仁和片区国土资源协同规划以及现有问题处理措施

针对仁和片区国土资源规划现有问题,该片区计划通过下述措施解决当前问题,有针对性地促进片区的经济社会发展。

2.3.1 筑基——聚焦生态本底安全,构建全域底线管控新框架

仁和片区的发展需要建立在生态环境稳定与保护的基础上。为守住生态底线,落实三区三线控制,划定三区空间实施分区管控。将农业空间耕地、园地、草地、坑塘沟渠、农业设施建设用地、连片度较低的林地以及其他以农业生产和生

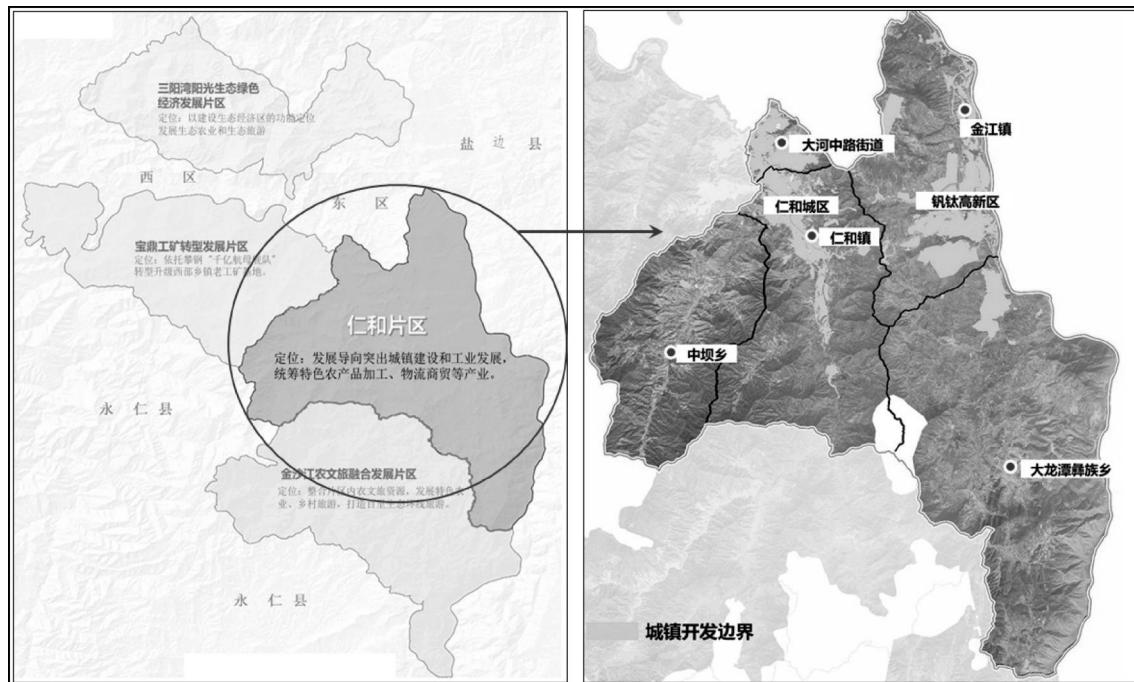


图 4 仁和区乡镇级片区划分

活为主要功能的区域划为农业空间, 面积 20875.28hm^2 , 占比 40.11%。生态空间主要包括公益林、生态红线、水源保护区、湿地、河流、水库等区域划入生态空间。片区内有金沙江、迤资河、大河、小河、老炭山、丁龙山、火山、大尖包山等面积 31105.44hm^2 , 占比 59.77%。将以城镇居民生产生活为主要功能的区域规划为城镇空间, 主要包括现状城镇建成区及城镇拓展区, 面积 60.46hm^2 , 占比 0.12% (图 5)。

针对片区存在土地利用规划不合理问题, 仁和片区在土地综合整治中计划通过农用地整治提升农耕质效; 通过生态修复强化水源涵养、护山育林; 通过建设用地整治提高利用效率、优化配置的目标与思路, 挖掘复耕潜力、增加耕地数量, 推动整治、高标项目建设, 全面提质农用地, 推动农村建设用地集约利用、减量增效。

特色产业发展方面, 仁和片区则计划落实衔接攀枝花市国土空间规划镇村体系, 发挥仁和城区、钒钛高新区区域引领、辐射作用, 突出片区近郊资源特色, 彰显片区特色乡村表达, 形成“一轴三廊一核一心四区”的国土空间保护开发格局(图 6)。“一轴”指沿大河、G227 形成的城乡

融合发展轴线; “三廊”指金沙江生态休闲廊道、大河生态休闲廊道和小河生态休闲廊道; “一核”指在仁和镇构建仁和城区发展级核; “一心”指在金江镇构建钒钛高新区服务核心; “四区”指仁和高品质城区、近郊康养度假发展区、钒钛产业配套休闲区和现代农旅发展示范区。

2.3.2 赋能——聚焦产业提质提能, 构建产业融合发展新路径

仁和片区拥有较大的区位优势, 文化等基础资源同样较为丰富。依托片区特色农业基础、文化资源优势、城市产业圈层辐射和生态资源禀赋的四大优势基础, 融入攀枝花市产业发展战略, 做好钒钛、阳光、清洁能源三篇产业文章, 加快建成先进钒钛钢铁材料、清洁能源、阳光康养文旅产业, 融合包括现代农业、绿色食品、新型建材、文化旅游和电商物流的乡村振兴战略。根据上述规划, 仁和片区国土资源规划及对应的发展计划如下:

夯实农业发展基础是产业融合发展的首要任务, 引导初加工向园区、优势产区布局, 结合“一品牌两中心项目”构建区域农业服务核心, 与第二产业协同延长“研产加销旅”农业产业

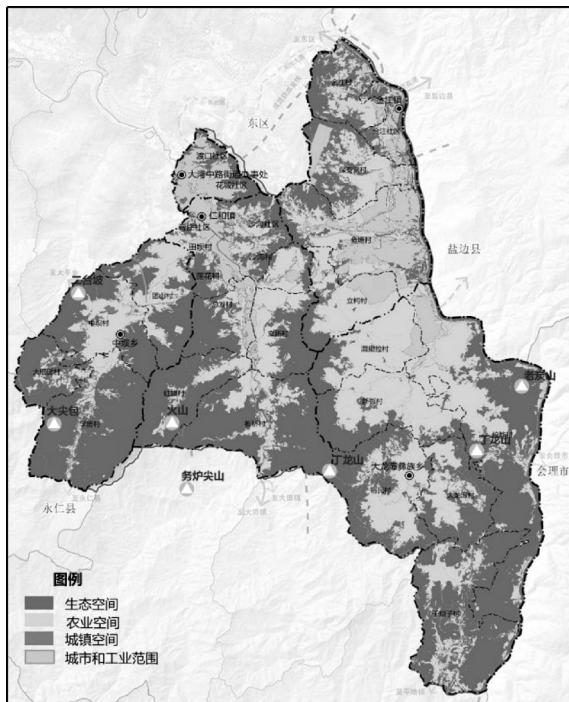


图 5 仁和片区三区划分图

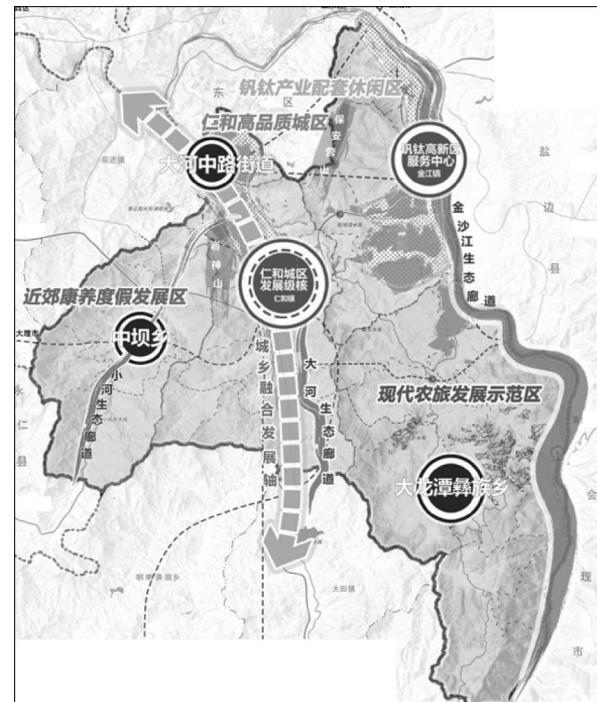


图 6 “一轴三廊、一核一心四区”国土保护开发格局

链。第二产业依托片区优势自然资源,衍生石墨加工产业链,发展碳基新材料产业,培育发展风电与光伏等清洁能源产业。

2.3.3 强核——聚焦中心引领带动,明确村镇未来建设新方向

当前仁和片区面临着缺少明确的发展核心、区域发展动力不足、片区现有资源难以得到集中利用等问题。明确发展核心后,片区可以按照“中心带动片区、增强服务能力、引导人口集聚、便于乡村治理”的原则,充分考虑服务半径、当地耕作习惯和产业布局等因素,以镇区、中心村带动周边一般村形成发展单元(表1)。

2.3.4 便民——聚焦人居品质提升,探索村镇设施配置新模式

针对片区各乡镇服务体系不完善,教育医疗

等基础设施建设水平较低的问题,仁和片区计划规划系统性的基础设施以及服务设施建设规划,构建“中心镇-副中心镇-一般镇-中心村-一般村”五级生活服务圈,“城市级——街道(乡镇)级——社区(村)级”三级城乡文化设施体系。按照公共服务设施配置标准,形成中心镇和一般镇错位配置、相互补充的设施配套模式,精准投放各类公共资源,构建不同类型的城乡生活区。

2.3.5 塑形——聚焦花城乡韵再现,构建魅力阳光峡谷新空间

为充分开发利用该片区的地区历史文化,为旅游产业发展创造良好条件,仁和片区计划根据区域特色打造近郊田园康养风貌区、特色城镇风貌区、钒钛产业风貌区、现代农业风貌区、魅力都市风貌区五大风貌特色(图7)。

表 1 仁和片区村镇体系规划表

等级体系	名称
中心镇	仁和镇
副中心镇	金江镇
一般镇(乡、街道)	大河中路街道、中坝乡、大龙潭乡
中心村	立新村、红旗村、金江村社区、鱼塘村、混撒拉村、裕民村、中坝村、学房村花城社区、莲花村
一般村	田坝村、沙沟社区、沙沟村、渡口社区、湾庄社区、总发村、板桥村、保安营村、立柯村、新街村、大龙潭村、拉鲊村、干坝子村、团山村、大纸房村

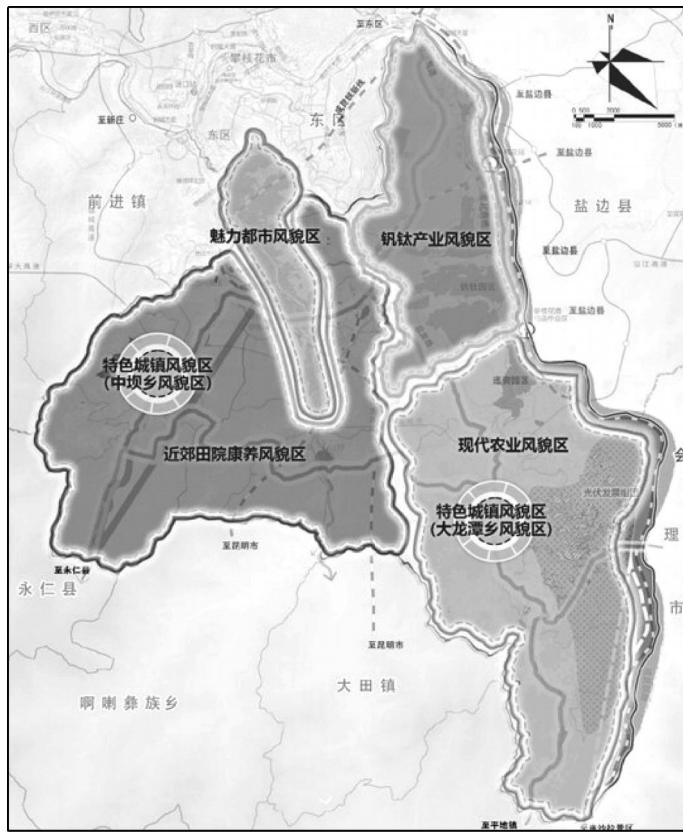


图 7 仁和片区五大风貌特色区域划分

2.4 总体评估

仁和片区借助片区的区位优势,对片区的资源开发利用规划进行了集中调整,促使片区由原本沿道路以及谷地的分布模式向更科学的方向转化。本次国土资源规划勘测阶段,仁和片区明确了本片区在特色农业以及旅游产业等方面的优势,鉴于该片区的农业产业与旅游为代表的第三产业具备共同发展的可行性,且片区的生态环境保护同样具备促进旅游产业以及生态农业发展的作用,因此在国土资源重新规划过程中,片区对原有的土地规划进行了调整,在生态保护的同时允许根据生态农业发展等需求适度开发,以此达到片区产业协同发展以及生态保护和区域发展协同的目标。

3 结语

仁和产城融合发展示范片区的规划实践,体现了国土空间规划体系改革在乡村地区的具体应用。通过生态底线管控、产业路径优化、村镇

体系重构和土地综合整治,片区规划有效回应了资源分散、城乡割裂等现实挑战,探索了“以产促城、以城兴产”的协同发展机制。研究证实,以片区为单元的规划编制能够整合资源、强化区域联动,对推动乡村振兴和县域经济高质量发展具有重要实践价值。未来需进一步动态监测规划实施效果,完善配套政策,确保国土空间治理目标的可持续实现。

参考文献(References) :

- [1] 王伟. 国土空间整体性治理与智慧规划建构路径 [J]. 城乡规划, 2019(06): 11–17.
- [2] 王希倩, 姜生力, 程骏, 等. 以片区为单元统筹乡村规划编制——白银市水川镇村庄规划实践探索 [J]. 甘肃农业, 2023, 37(02): 95–99.
- [3] 涂少华, 付敏, 徐昶, 等. 以片区为单元编制乡村国土空间规划的认识与探索——以成都简阳市为例 [J]. 四川建筑, 2024, 44(05): 25–28.
- [4] 郑洲. 以片区为单元编制乡村国土空间规划做实

- 两项改革“后半篇”文章的思考——以巴中市为例 [J]. 资源与人居环境, 2022, 38(10): 36-39.
- [5] 白亚萍, 陈田野. 以片区为单元编制乡村国土空间规划路径研究——以雅安市村级单元为例 [J]. 四川建筑, 2025, 45(01): 22-23+27.
- [6] 付冰, 安慈雯. 加强传导管控塑造城市更新新动能——洛阳市城市更新片区及单元详细规划编制探索 [J]. 资源导刊, 2024, 54(17): 22.
- [7] 中华人民共和国中央人民政府. 中共中央 国务院关于建立国土空间规划体系并监督实施的若干意见 [EB/OL]. (2019-05-23)[2025-04-12]. http://www.gov.cn/zhengce/2019-05/23/content_5394187.html.
- [8] 郭祖源, 葛春晖, 蔡言, 等. 虹桥主城片区单元规划实施路径思考 [J]. 城市规划学刊, 2022, 66(S2): 123-128.
- [9] 车乐, 沈溢, 陈保禄, 等. 国土空间整体性治理视域下复杂多元地区乡村片区化规划路径探索——以云南丽江拉市海田园单元为例 [J]. 北京规划建设, 2024, 38(02): 54-61.
- [10] 何冠钦, 黄桂霞. 国土空间规划背景下城市更新单元详细规划编制探索——以广州市增城区群星片区为例 [J]. 城市建筑, 2024, 21(17): 137-142.
- [11] 周学红.《四川省乡镇级国土空间总体规划编制指南》解读两项改革背景下以片区为单元的乡镇级规划编制中的实践逻辑 [J]. 资源与人居环境, 2022, 38(01): 24-26.
- [12] 魏昌斌. 滨水区域多功能空间融合——以长汀宝珠片区规划为例 [J]. 福建建设科技, 2025, 40(03): 1-4.
- [13] 吴斐. 山地河谷城市国土空间总体规划编制与传导思路浅析——以广元市中心城区为例 [J]. 四川建筑, 2025, 45(02): 6-8.
- [14] 黄正. 城市国土空间规划探讨——以万州高铁片区规划设计为例 [J]. 低碳世界, 2025, 15(04): 70-72.
- [15] 周南, 张建, 周晨华. 乡村振兴背景下村庄连片发展研究——以北京市为例 [J]. 小城镇建设, 2025, 43(04): 111-118.

作者简介:

第一作者/通讯作者:施仪琳,女,1991年生,云南大姚人,攀枝花市不动产登记中心,工程师,主要研究方向为国土空间规划、片区乡村规划。Email: 1211280769@qq.com

Practice and Innovation of Collaborative Planning from Multiple Perspectives in District Units: Case Study of the Territorial Spatial Planning for the Renhe District in Renhe Area

SHI Yilin

(Panzhuhua City Real Estate Registration Center, Sichuan Province, Panzhuhua 510400, China)

Abstract: This article takes the demonstration area of industry-city integration development in Renhe District, Sichuan Province as an example to explore the practical path of township-level territorial spatial planning. Based on the resource endowment and locational advantages of the Renhe area, which feature “six forests and three fields, half water and half construction,” and combined with its prominent third-tier culture, mineral resources, characteristic agriculture, and vanadium-titanium industry foundation, the study systematically analyzes the core issues facing the area, such as population aging, scattered land use, insufficient industrial integration, and low service efficiency. Through multi-angle evaluation, it proposes an overall planning approach of “4353” which is based on four major current conditions, focusing on three major positions: “industry-city integration demonstration area, suburban urban agriculture leading area, and sunshine health and leisure area.” Six strategies are implemented, namely, laying the foundation, empowering, strengthening the core, facilitating the people, shaping, and enhancing efficiency, and three major guarantees are strengthened: organization, policy, and technology. The plan constructs a spatial pattern of “one axis, three corridors, one core, one center, and four districts,” divides the three-tier town and village system, promotes industrial quality improvement, facility optimization, style enhancement, and land consolidation, aiming to provide a reference model for territorial spatial planning in similar areas for urban-rural integrated development.

Key words: territorial spatial planning; planning zone unit; planning practice

面向碳中和的区域土地利用变化碳效应 时空模拟与优化研究

何亚莉

(安徽省第一测绘院,安徽 合肥 230001)

摘要:针对生态功能区差异显著区域的碳效应时空异质性解析不足问题,本研究以巢湖流域为典型案例,集成多源遥感数据与 GIS 技术,构建“时空模拟-效应评估-优化策略”研究框架。基于 2001-2021 年土地利用时空模拟($Kappa>0.85$),量化建设用地扩张导致碳储量减少 12.7%与林地恢复使其增加 8.3%的动力平衡机制。空间异质性分析表明:城镇发展区碳排放强度(58.7Mg C/ha)占流域总量 67.5%,净碳效应-53.5Mg C/ha;森林保育区碳汇强度达 148.5Mg C/ha,面积占比 18.4%却贡献流域碳汇总量的 82.3%。据此提出多尺度优化策略:城镇区通过立体绿化和低碳准入标准将碳吸收强度提升至 8.0Mg C/ha;农业区采用保护性耕作使净碳效应由-1.2Mg C/ha 转为正值;生态区通过高固碳树种补植提升碳密度至 165Mg C/ha。研究成果为流域尺度“三生空间”碳平衡优化提供科学范式,支撑碳中和目标的精准落地。

关键词:碳中和;土地利用变化;碳效应;时空模拟;优化策略

中图分类号:F301.2

文献标志码:A

文章编号:1672-2736(2025)08-0074-9

0 引言

随着全球气候变化加剧,土地利用变化作为陆地生态系统碳循环的重要驱动因素,已成为《IPCC 国家温室气体清单指南》界定的关键碳排放源之一^[1]。国外学者较早关注到土地利用变化的碳效应,如美国通过 Landsat 遥感数据长期监测东北部森林砍伐的碳损失^[2],欧盟基于生态系统模型提出碳中性土地利用规划框架^[3],证实城市化扩张与碳储量下降的显著负相关关系。国内研究则聚焦于双碳目标下的区域实践,京津冀城市群通过碳排放因子法量化建设用地扩张的碳代价,发现 2000-2020 年快速城市化导致区域碳储量平均下降 15%-20%^[4],但盘州市生态修复区通过退耕还林实现碳汇能力提升 10% 以上^[5]。然而,现有研究多集中于单一行政单元或均质区域,对生态功能区差异显著、地形气候复杂区域的碳效应时空异质性解析不足,且优化策略缺乏对城市-农村-生态区功能耦合的系统性考量。

巢湖流域作为长江中下游典型的三生空间交错区,兼具城市化快速推进(2001-2021 年建设用地增长 37%)与生态修复活跃(林地面积先减后增)的双重特征,其土地利用变化的碳效应过程具有较强的区域代表性。本研究基于 2001-2021 年遥感影像与 GIS 数据,构建“时空模拟-效应评估-优化策略”研究框架,突破传统单一尺度分析局限,重点解析不同生态功能区(森林保育区、农业集约区、城镇发展区)的碳效应差异,揭示建设用地扩张与林地恢复的碳储量动态平衡机制。研究旨在通过量化区域土地利用变化的碳源/碳汇时空演变规律,提出面向碳中和的差异化优化路径,为同类流域协调生态保护与高质量发展提供科学依据。

1 土地利用变化碳效应的理论基础与研究框架

1.1 土地利用变化与碳循环的关系

土地利用变化以多样且复杂的机制影响着碳排放。森林砍伐与植被破坏致使陆地生态系

统碳库受损,树木储存的碳快速释放。城市化扩张改变土地覆盖,扰动土壤有机碳加速其氧化分解。农业生产方式转变,像过度开垦、不合理灌溉施肥影响土壤微生物活性,改变土壤碳释放量^[6]。

不同土地利用类型的碳效应特征差异显著。森林依靠树木的光合作用成为强大碳汇,将碳储存于生物量、土壤及枯落物。耕地因频繁农事活动,土壤结构遭破坏,有机碳易被分解,碳汇能力较弱甚至成为碳源。城市建设用地因能源消耗大,成为主要碳排放源。草地在合理利用时能吸收碳,不合理利用则碳汇功能被削弱^[7]。

土地利用变化兼具碳源与碳汇效应。森林砍伐、城市化以及湿地排水开发等行为会增加碳排放。而植树造林、生态修复等举措可增加植被覆盖,提升生态系统碳汇能力,比如将退化土地恢复为森林或湿地,重新构建碳储存机制,助力区域碳平衡^[8]。

1.2 碳效应评估方法

碳效应评估是量化土地利用变化对区域碳储量影响的核心环节,本研究综合采用碳储量计算模型与空间分析技术,构建多维度评估框架。首先基于《IPCC 国家温室气体清单指南》,结合区域实测数据,建立碳储量计算模型,方法通过土地利用类型面积变化与碳密度参数耦合,量化不同地类的碳源/碳汇效应,与朱梅涛等在京津冀地区的碳储量评估方法类似^[9],确保区域数据的可比性。

尺度分析中,研究借助 ArcGIS 平台开展空间叠加与栅格计算,将土地利用分类数据与碳密度参数进行空间匹配,生成 30m×30m 分辨率的碳储量空间分布图。通过栅格计算器逐像元计算碳储量,参考吴然在巢湖流域碳效应研究中的技术路径^[10],通过精细化空间运算揭示“西北高、东南低”的碳储量分布格局,精准识别建设用地扩张(如合肥市区)与林地恢复(如大别山余脉)的碳储量动态变化特征。

针对区域生态功能差异,研究引入净碳效应评估指标(净碳效应=碳吸收强度-碳排放强

度),结合森林保育区、农业集约区、城镇发展区的功能定位,构建差异化评估体系。该方法参考了莫金宵在滇中城市群的固碳效应评价逻辑,通过对比不同功能区的碳排放强度与碳吸收能力,揭示“城市高碳源-农村弱碳汇-生态区强碳汇”的时空异质性规律^[11]。多维度评估框架既保留了传统碳排放因子法的简洁性,又通过空间信息技术提升了区域碳效应解析的精准度,为后续优化策略制定提供了科学依据。

2 区域土地利用变化碳效应的时空分布特征

2.1 研究区域概况

巢湖流域位于安徽省中部,地处长江流域下游左岸,是本文的研究区域。该流域自然条件优越,属于暖温带与亚热带过渡性湿润季风气候,光热水条件良好,河流密布,地形多样,土壤类型丰富,植被种类繁多。在社会经济方面,它是安徽省经济社会发展水平最高、最具潜力的地区,2021 年常住人口达 1247 万人,生产总值占全省 30%,产业结构以第二、三产业为主,交通十分便利。

在土地利用方面,2001-2021 年,耕地中水田是主要类型,但整体耕地面积逐年减少;建设用地持续增长,其中城镇用地扩张明显;林地先减后增,生态环境有所改善;草地和水域面积有波动,整体变化不大。

2.2 土地利用变化的时空模拟

在对巢湖流域土地利用变化进行时空模拟时,研究选用了合适的模型,并对相关数据进行处理与参数设置,最终得到模拟结果并展开验证与分析,具体内容如下:

2.2.1 数据处理与模型参数设置

研究选取 2001-2021 年五期 Landsat 遥感影像数据作为主要数据源,同时借助天地图、谷歌历史影像、国土调查数据以及 ArcGIS、ENVI 等软件,对数据进行预处理。利用 ENVI5.3 对 Landsat 数据进行辐射定标、大气校正、镶嵌和裁

剪等操作,以提高影像使用的准确性和精度的可靠性。在模型参数设置方面,采用支持向量机(SVM)和目视判读相结合的方法进行影像分类。SVM 以结构最小原理和 VC 维理论为基础,在处理非线性、高维数问题时具有较好的推广性和较高的分类准确性。划分土地利用类型时,参考《土地利用现状分类》(GB/T21010-2017),结合研究需求,将地类分为 6 个一级类和 10 个二级类^[12]。

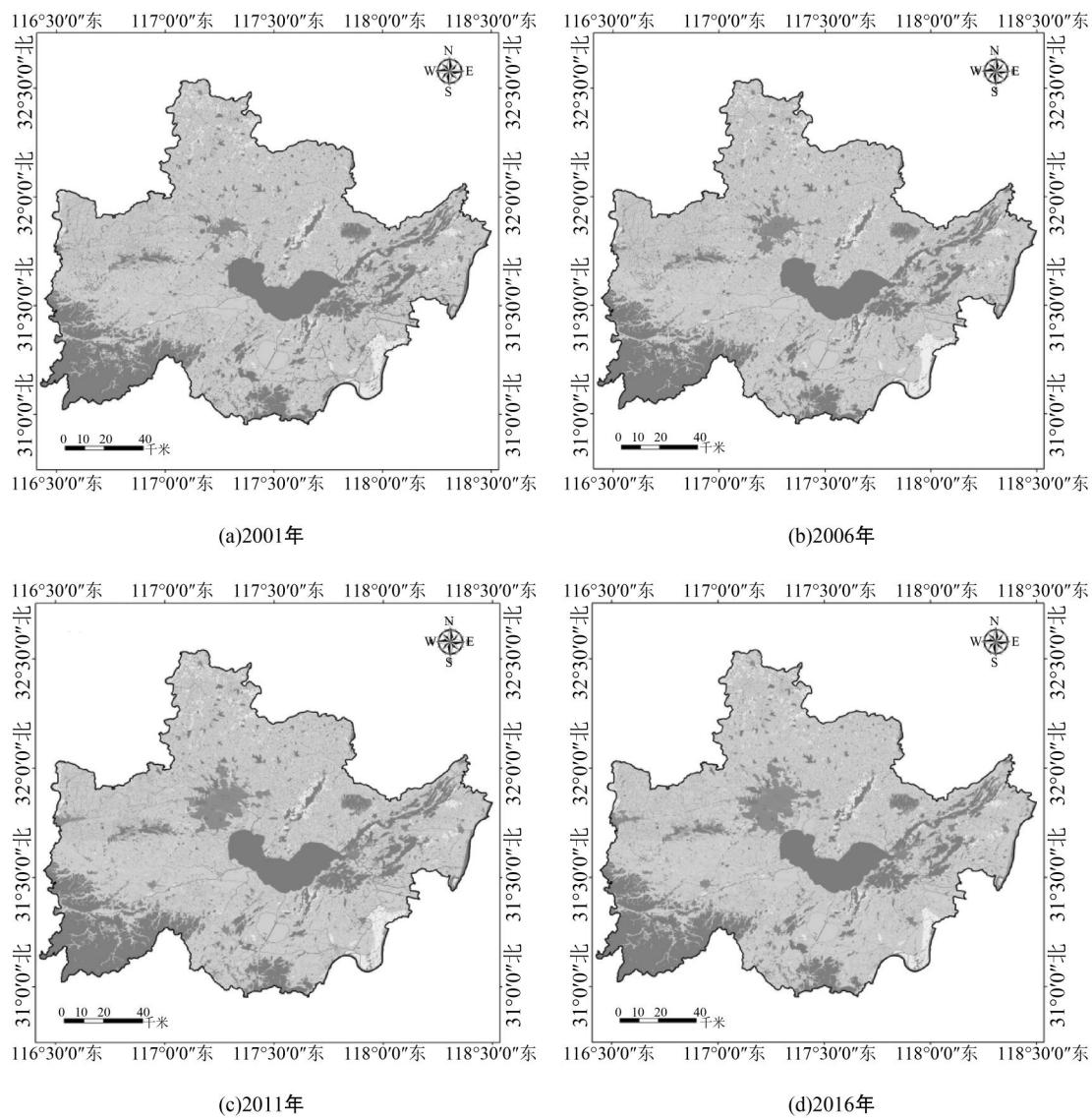
2.2.2 土地利用变化的时空模拟结果

通过上述方法,获取了巢湖流域 2001-2021 年五个时期的土地利用分类数据。从土地利用结构变化来看,耕地中的水田是巢湖流域最主要的土地利用类型,但 2001-2021 年耕地逐年减

少,建设用地逐年增长。林地在 2001-2011 年小幅减少之后逐渐增加,草地和水域面积有波动,整体变化不大。在空间变化上,水田转移剧烈,遍布整个研究区,始终是转入转出面积最大的地类,转入的最大来源是村庄用地,转出为城镇、交通等建设用地主要出现在城镇周围;林地大幅度增加,主要出现在原有林地附近,以及合肥市、六安市金安区等城镇内部。2001-2021 年土地利用变化的时空模拟结果如图 1 所示。

2.2.3 模拟结果的验证与分析

研究采用 Kappa 系数来检验分类精度,借助天地图影像、天地图安徽省历史影像、ArcGIS 以及 Google Earth Pro 等工具,对 2006 年、2011 年、2016 年和 2021 年的分类数据展开分析验证,验



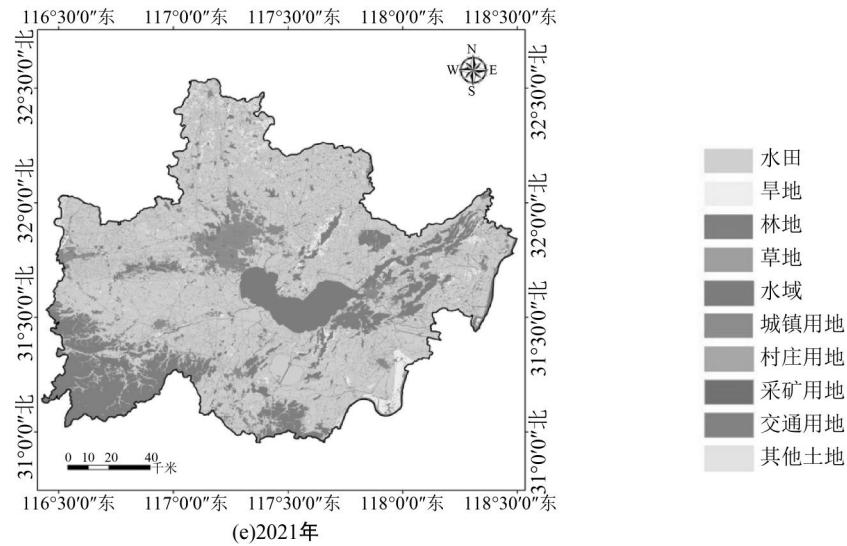


图 1 2001—2021 年土地利用变化的时空模拟结果

证结果如图 2 所示。验证结果表明,这四年遥感影像的分类成果总体精度良好,分别达到 89.81%、91.82%、90.79% 和 90.31%,都接近 90%;Kappa 系数依次为 0.8544、0.8851、0.8572 和 0.8611,均超过 0.8。这充分说明分类精度能

够满足本研究的需求,确保了研究数据的可靠性和研究结果的科学性,为后续关于巢湖流域土地利用变化及碳效应等相关研究提供了坚实的数据基础。

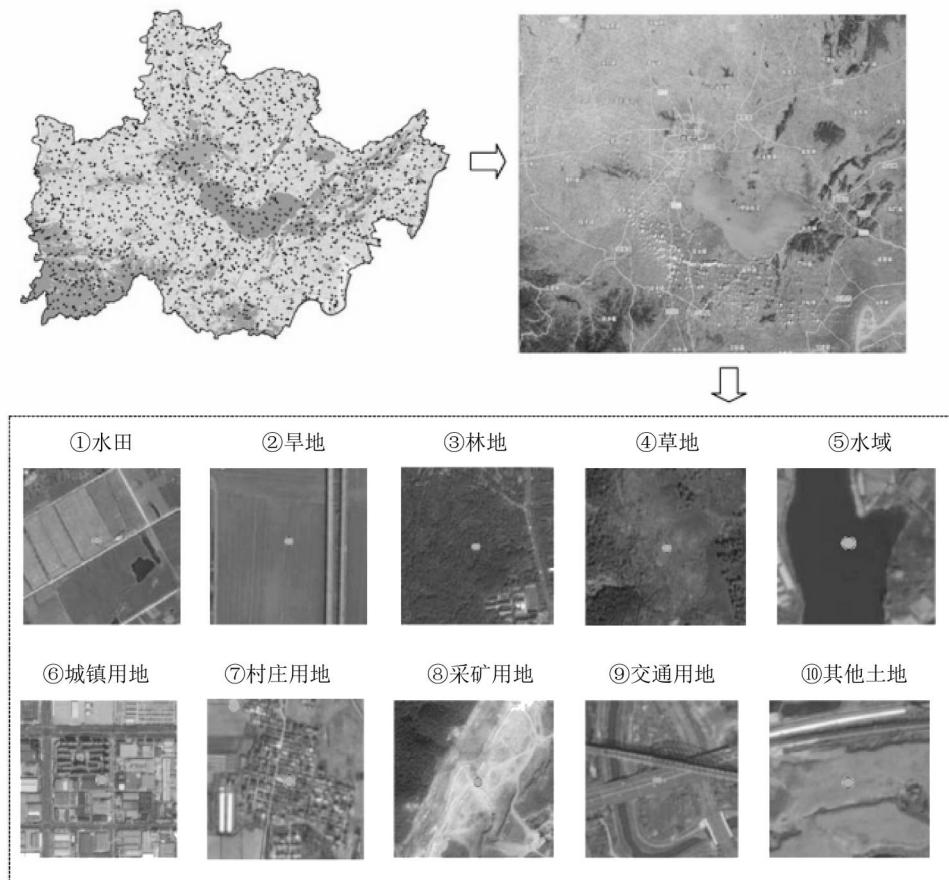


图 2 验证点结果

2.3 土地利用变化的碳效应评估

土地利用变化的碳效应评估旨在量化不同土地利用类型对区域碳储量的影响。本研究基于巢湖流域 2001–2021 年土地利用分类数据,结合生态系统碳密度参数,计算了各时期土地利用碳储量的时空变化,并通过空间叠加分析揭示其分布特征。

2.3.1 碳储量计算方法

碳储量的计算采用以下公式:

$$C_t = \sum_{i=1}^n (A_{i,t} \times D_i) \quad (1)$$

其中, C_t 为第 t 年的总碳储量, $A_{i,t}$ 为第 t 年第 i 类土地利用类型的面积, D_i 为第 i 类土地利用类型的碳密度(单位:Mg C/ha)。碳密度参数参考《IPCC 国家温室气体清单指南》及区域实测数据(表 1)。

2.3.2 土地利用碳储量空间变化

基于 ArcGIS 平台,将各时期土地利用分类图与碳密度参数进行空间叠加,生成 2001–2021 年碳储量空间分布图(图 3)。

通过栅格计算器逐像元计算碳储量,公式

表 1 区域实测碳密度参数

土地利用类型	碳密度(Mg C/ha)
林地	150.2
水田	80.5
建设用地	10.3
草地	45.6
水域	20.1

为:

$$C_{\text{pixel}} = D_i \times \text{Resolution}^2 \quad (2)$$

其中,空间分辨率为 30m×30m。

结果显示,巢湖流域碳储量呈现“西北高、东南低”的分布格局,林地集中区(如大别山余脉)碳储量显著高于城镇密集区。2001–2021 年,建设用地扩张导致碳储量减少约 12.7%,而林地恢复使碳储量增加 8.3%。

2.4 碳效应的空间异质性分析

土地利用变化的碳效应在时空分布上表现出显著的异质性,具体表现为城市与农村地区的差异、不同生态功能区的特征以及时空尺度的影响。2021 年巢湖流域碳效应时空异质性特征数

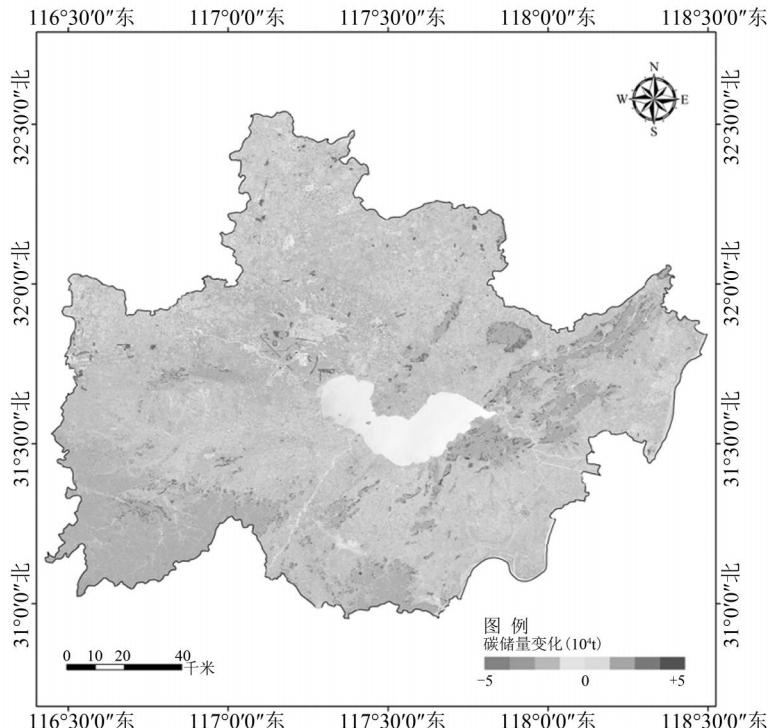


图 3 2001–2021 年碳储量空间分布图

表 2 2021 年巢湖流域碳效应时空异质性特征

分类指标	森林保育区	农业集约区	城镇发展区	水域湿地保护区
碳排放强度 (Mg C/ha)	2.1	22.1	58.7	8.3
碳吸收强度 (Mg C/ha)	148.5	20.9	5.2	18.6
净碳效应 (Mg C/ha)	+146.4	-1.2	-53.5	+10.3
面积占比 (%)	18.4	41.2	28.5	11.9

注:净碳效应=碳吸收-碳排放;正值表示碳汇,负值表示碳源。

据如表 2 所示,以下从这三个方面展开分析。

2.4.1 城市与农村地区的碳效应差异显著

城市区域以建设用地为主,碳排放强度远高于农村,如巢湖流域合肥市区 2021 年碳排放强度达 58.7 Mg C/ha ,主要源于工业、交通能耗及土壤有机碳氧化;而城市植被覆盖低,年均碳汇仅 5.2 Mg C/ha ,净碳效应为 -53.5 Mg C/ha 。相比之下,农村区域以耕地和林地为主,碳吸收能力较强,如六安市金安区林地碳汇强度达 132.4 Mg C/ha ,但因水田耕作导致部分区域呈碳源特征(净效应 -15.3 Mg C/ha)。整体上,农村净碳效应为 $+24.6 \text{ Mg C/ha}$,与城市形成鲜明对比,凸显城市化对碳排放的加剧作用。

2.4.2 不同生态功能区的碳效应特征差异显著

森林保育区(如大别山余脉)碳汇能力最强,年均碳储量增量达 8.3% ,得益于退耕还林政策;农业集约区因化肥施用和土壤扰动,碳排放强度较高(22.1 Mg C/ha),但水稻田季节性碳吸收使其净效应接近平衡(-1.2 Mg C/ha);城镇发展区碳排放占流域总量的 67.5% ,碳汇能力仅占 3.8% ,是主要碳源区域;水域湿地保护区碳汇强度为 18.6 Mg C/ha ,但受富营养化影响,局部碳储存能力下降。

2.4.3 碳效应评估结果呈现时空动态特征

时间尺度上,2001–2011 年因快速城市化,流域碳储量年均减少 1.2% ;2011–2021 年通过生态修复工程,年均增加 0.7% 。空间尺度上,区域分析显示碳储量呈现出“西北高、东南低”的显著格局,而局地尺度(如合肥市区)建设用地扩张导致碳储量骤减 35% ^[15]。多尺度分析可精准识别碳效应热点,为优化策略提供科学支撑。

上述分析表明,碳效应的时空异质性与土地利用类型、功能区定位及管理政策密切相关。未来优化需针对不同区域的特征制定差异化策略,以实现碳中和目标的精准落地。

3 面向碳中和的土地利用优化策略

3.1 碳中和目标下的土地利用优化原则

3.1.1 碳源-碳汇空间匹配原则

以碳储量“西北高、东南低”的空间格局为基础,强化西北部森林保育区(面积占比 18.4%)的碳汇核心功能,严格限制矿产开采与建设用地侵占;控制东南部城镇发展区(面积占比 28.5%)的碳源强度,通过空间模拟识别空间碳密度,设定碳排放总量红线。建立碳源-碳汇空间补偿机制,要求新增建设用地项目按 $1:1.2$ 比例配套生态修复区,确保碳收支动态平衡。

3.1.2 生态功能区协同增效原则

依据上文中四类功能区的碳效应特征,制定以下差异化管控标准:森林保育区以维持 148.5 Mg C/ha 碳吸收强度为核心,严格禁止非生态型开发活动,筑牢区域自然碳汇基底;农业集约区聚焦耕作模式优化,通过推广低碳耕作技术、休耕轮作及有机肥替代等措施,逐步将净碳效应由当前 -1.2 Mg C/ha 提升至正值,平衡农业生产与碳汇能力;城镇发展区依托绿色基础设施建设,推进城市绿地系统、立体绿化及蓝绿网络布局,将碳吸收强度从 5.2 Mg C/ha 提高至 8.0 Mg C/ha ,缓解高强度城市化带来的碳源压力;水域湿地保护区针对富营养化导致的碳汇衰减问题,加强水质治理与湿地生态修复,维系湿地碳储存

功能稳定,通过分类施策实现不同功能区碳效应的精准调控^[13-16]。

3.1.3 多尺度动态平衡原则

统筹区域与局地尺度的碳效应时空动态特征,构建差异化空间管控阈值:在区域层面,基于建设用地扩张导致 12.7% 碳损失与林地恢复带来 8.3% 碳增益的历史数据比值,设定林地恢复面积须≥建设用地扩张面积的 30%,通过生态用地占补平衡机制确保流域碳汇能力稳步提升;在局地层面,依据碳密度空间分异特征,划定碳汇保护核心区实施严格生态保护红线管控,禁止任何形式的开发建设活动,同时将碳密度<20Mg C/ha 的城镇密集区划定为碳源重点管控区,实行建设用地规模刚性约束与低碳开发强度管控,通过跨尺度协同治理实现区域碳储量“全局增汇”与“局部控源”的双向平衡^[17]。

3.2 优化策略的实施路径

3.2.1 城镇发展区低碳转型路径

针对城镇发展区占流域碳排放总量 67.5% 的高碳特征,构建“水平-垂直-强度”三维管控体系:在水平维度,依托上文验证的高精度模拟模型($Kappa>0.85$)预测 2030 年建设用地扩张趋势,结合林地恢复区空间分布划定生态安全屏障,遏制城镇无序蔓延对碳汇空间的挤占;垂直维度推行立体绿化技术,通过屋顶花园、墙面植被等立体植被系统将城镇植被碳汇强度从 5.2Mg C/ha 提升至 8.0Mg C/ha,以生态补偿机制缓解 58.7Mg C/ha 的高强度碳排放压力;强度维度建立建设用地碳效率准入标准,将单位 GDP 碳排放强度严格控制在区域均值 1.27Mg C/万元以下,通过低碳产业准入与绿色建筑标准推动城镇发展从“高碳扩张”向“低碳集约”转型^[18]。

3.2.2 农业集约区碳汇提升路径

聚焦占流域面积 41.2% 的农业集约区,以“种植链优化-技术链升级-价值链延伸”实现碳汇能力系统性提升:在种植链层面,针对水田耕作导致的碳源特征(净效应-15.3Mg C/ha),推广稻-油轮作与休耕轮作模式,参照上文中碳密

度参数设计土壤有机碳提升路径,目标实现年均 1.2% 的土壤有机碳密度增长;技术链层面应用保护性耕作技术(如免耕、秸秆还田),直接降低 22.1Mg C/ha 的农业碳排放强度,推动净碳效应从-1.2Mg C/ha 转为正值;价值链层面探索“生态农田-碳汇交易”机制,将 20.9Mg C/ha 的碳吸收强度转化为可交易的碳汇产品,通过市场手段激励低碳耕作行为,构建“生产固碳-技术减排-经济增益”的闭环体系。

3.2.3 生态功能区系统修复路径

基于森林保育区 148.5Mg C/ha 的强碳汇能力及 2001-2021 年 8.3% 的碳增益基础,实施精准修复工程:在森林质量提升方面,针对现有林地 150.2Mg C/ha 的碳密度,通过补植麻栎、枫香等高固碳树种,将碳密度提升至 165Mg C/ha,预计每年新增碳汇 4.2×10^4 Mg C;湿地碳汇恢复聚焦水域湿地保护区,通过重建芦苇群落等原生植被,将碳吸收强度从 18.6Mg C/ha 提升至 25.0Mg C/ha,有效抵消 8.3Mg C/ha 的湿地碳排放;生态廊道连通工程整合 18.4% 的森林保育区与 11.9% 的水域保护区,构建跨区域碳汇网络,使生态空间碳通量增加 15%,形成“点上增汇、线上连通、面上协同”的立体修复格局,强化流域碳汇系统的整体性与连通性。

4 结语

本研究构建“时空模拟-效应评估-优化策略”框架,揭示巢湖流域土地利用变化碳效应的时空异质性,发现 2001-2021 年建设用地扩张导致碳储量减少 12.7%,林地恢复使其增加 8.3%,且不同生态功能区碳效应差异显著。据此提出城镇发展区三维管控、农业集约区三链整合与生态功能区系统修复等策略,为区域碳中和目标实现提供科学路径。研究兼具理论创新性与实践指导性,对同类区域有借鉴意义。但研究未考虑气候变化对土地利用的反馈及政策实施动态影响,未来可结合气候模型与政策模拟,深化多目标协同优化机制,为土地利用管理提供更精准决策支持。

参考文献(References) :

- [1] 李雨晨,秦宇,杨柳,等.长江上游大中型水库碳排放量估算与分析:以IPCC国家温室气体清单指南为基础[J].湖泊科学,2023,35(01):131-145.
- [2] Wulder M A, Roy D P, Radeloff V C, et al. Fifty years of Landsat science and impacts[J]. Remote Sensing of Environment, 2022, 280: 113195.
- [3] Jones S M, Smith A C, Leach N, et al. Pathways to achieving nature-positive and carbon-neutral land use and food systems in Wales[J]. Regional Environmental Change, 2023, 23(01): 37.
- [4] 陈靖松,张建军,李金龙,等.京津冀地区碳排放时空格局变化及其驱动因子[J].生态学报,2024,44(06):2270-2283.
- [5] 张杰荣.盘州市退耕还林工程效益评价[J].现代农业科技,2025,54(05):101-104.
- [6] 佟佳骏.土地利用变化对陆地生态系统水、碳循环过程的影响评价[D].咸阳:西北农林科技大学,2024.
- [7] 马军,索米娅.草原碳汇价值与畜牧业生产水平耦合协同发展——以内蒙古自治区为例[J/OL].中国农业资源与区划,1-14[2025-05-08].
- [8] 林彦君,木合塔尔·艾买提,阿迪莱·伊斯马伊力.基于系统动力学的农用地碳汇碳源效应分析——以喀什地区为例[J].江苏农业科学,2024,52(16):263-270.
- [9] 朱梅涛,李翩,邢莉圆,等.基于时空异质性分析的京津冀地区碳减排策略研究[J/OL].中国地质,1-22[2025-05-08].
- [10] 吴然.巢湖流域土地利用碳效应时空分异分析与低碳优化模拟[D].徐州:中国矿业大学,2023.
- [11] 蔡佳雪,代智彬,赵良仕,等.东北三省碳排放时空异质性分析及其影响因素[J/OL].首都师范大学学报(自然科学版),1-13[2025-05-08].
- [12] 吕利娜,方强,叶欣,等.双鸭山市城市热岛效应时空格局变化及模拟预测[J].现代城市研究,2022,37(07):7-13.
- [13] 刘雅雅,李欣欣,任茜,等.国土空间规划情景下市域土地利用变化预测及碳效应研究——以达州市为例[J].四川环境,2024,43(06):73-80.
- [14] 张翔,段政,董颖,等.中国东部中生代火山岩区地质文化村建设实践与思考——以福建杞溪为例[J].华东地质,2022,43(04):474-489.
- [15] 倪斌,黄照强,郭健,等.基于机载和星载高光谱遥感的武夷山成矿带蚀变矿物信息识别研究[J].华东地质,2023,44(01):67-81.
- [16] 黄学勇,高茂生,侯国华,等.莱州湾海洋沉积物粒度特征及其环境响应分析[J].华东地质,2023,44(04):402-414.
- [17] 彭卓越,李梦婷,梁煜彬,等.长江流域江苏段碳储量的多情景模拟和空间格局优化[J/OL].环境科学,1-17[2025-05-08].
- [18] 曹津铭.双碳背景下东台市低碳产业发展对策研究[D].徐州:中国矿业大学,2023.

作者简介:

第一作者/通讯作者:何亚莉,1990年生,女,安徽安庆人,硕士,安徽省第一测绘院,助理工程师,主要研究方向为计算机科学与技术。Email:964406751@qq.com

Spatiotemporal Simulation and Optimization of Carbon Effects of Regional Land Use Change for Carbon Neutrality

HE Yali

(Anhui Provincial Institute of Surveying and Mapping, Anhui 230001, China)

Abstract: In sight of the insufficient analysis of the spatiotemporal heterogeneity of carbon effects in areas with significant differences in ecological function zones, this study takes the Chaohu Lake Basin as a typical case, which integrates multi-source remote sensing data and GIS technology, and constructs a research framework of “spatiotemporal simulation–effect evaluation–optimization strategy”. Based on the spatiotemporal simulation of land use from 2001 to 2021 ($Kappa > 0.85$), the dynamic balance mechanism of 12.7% reduction in carbon storage caused by the expansion of construction land and 8.3% increase in it due to the restoration of forest land was quantified. Spatial heterogeneity analysis indicates that the carbon emission intensity in the urban development area (58.7Mg C/ha) accounts for 67.5% of the total amount of the basin, and the net carbon effect is -53.5Mg C/ha . The carbon sink intensity of the forest conservation area reached 148.5Mg C/ha, accounting for 18.4% of the area but contributing 82.3% of the total carbon sink of the basin. Based on this, a multi-scale optimization strategy is proposed: for urban areas, the carbon absorption intensity is increased to 8.0Mg C/ha through three-dimensional greening and low-carbon access standards; the adoption of conservation tillage in agricultural areas has transformed the net carbon effect from -1.2Mg C/ha to a positive value. The ecological area has increased the carbon density to 165Mg C/ha by replanting high-carbon-sequestration tree species. The research results provide a scientific paradigm for optimizing the carbon balance in the “three-life space” at the basin scale and support the precise implementation of the carbon neutrality goal.

Key words: carbon neutrality; land use change; carbon effect; spatiotemporal simulation; optimization strategy

基于地理探测器的合肥市 PM2.5 时空分布与土地利用关系研究

冯 艳¹, 瞿华蓥^{1*}, 李佳龙²

(1. 云南国土资源职业学院, 国土空间信息学院, 昆明 652501;
2. 昆明长水国际机场有限责任公司, 昆明 650000)

摘要:针对合肥市大气污染问题,本研究搜集了合肥市 2000—2022 年 PM2.5 浓度遥感数据,运用时间序列分析法、LISA 聚类图分析了 22 年来合肥市 PM2.5 浓度时空变化特征,然后基于地理探测器探究了 PM2.5 与土地利用类型之间的关系,其结果为:(1)2000—2022 年合肥市 PM2.5 浓度时间序列呈现典型倒“U”型特征,在 2013 年达到峰值,从 2013 年到 2022 年变现为逐年下降;(2)合肥市 PM2.5 浓度以高-高、低-低聚类为主,不同时间其聚类模式和空间分布存在差异;(3)通过地理探测器发现林地占比对 PM2.5 浓度变化单因子作用最强,二者负相关,裸地占比解释力最弱,林地占比和水体占比对 PM2.5 浓度的交互作用最强。

关键词:PM2.5; 土地利用; 地理探测器; 时间序列分析法; LISA 聚类图

中图分类号:X513 文献标志码:A 文章编号:1672-2736(2025)08-0083-8

0 引言

从 20 世纪 80 年代开始,我国城市化进程不断提高,工业生产规模迅速扩张,引起了一系列的环境问题,空气污染尤为典型^[1,2]。大气中的细颗粒污染物 PM2.5 是引起空气污染的首要原因^[3],PM2.5 是指空气中直径小于等于 2.5 微米的细颗粒物^[4],它能够长时间停留在空气中,空气中的 PM2.5 浓度越大表明大气污染越严重^[5]。高浓度的 PM2.5 会影响人类的身体健康,增加呼吸系统和心血管疾病的患病风险,较严重者可能会导致癌症或过早死亡^[6]。因此分析 PM2.5 的时空分布规律,探寻导致 PM2.5 浓度增加的原因已刻不容缓。

目前,国内外很多学者通过对 PM2.5 的监测、研究、分析发现,PM2.5 浓度与土地利用、人类活动、气候、海拔、地形地貌等因素密切相

关^[7]。由于气候、海拔、地形地貌因素不能被人为改变,并且有研究表明土地利用在局部尺度对 PM2.5 的浓度有一定的缓解^[8],因此本研究选择探析土地利用与 PM2.5 浓度的关系。近年来,已有很多学者使用不同方法研究了 PM2.5 浓度与土地利用之间的关系。杨伟^[9]等运用地理加权回归分析法发现华北地区 PM2.5 与土地利用/覆被变化有明显响应,其中建设用地对 PM2.5 浓度影响最大。李巍^[10]等运用相关性分析了太原市 PM2.5 与土地利用的关系,发现林地面积的增加会导致 PM2.5 浓度的下降。本研究在前人研究的基础之上,选用地理探测器探测 PM2.5 浓度与土地利用类型之间的关系。

合肥市作为安徽省的省会城市,是我国城市扩张的核心区域,具有人口集聚、经济发达、人为活动剧烈等特征,城市扩张对其 PM2.5 暴露风险影响效果显著,是研究城市扩张与大气污染暴

基金项目:云南国土资源职业学院科技创新团队“国土乡村振兴服务”(2022KJTD01);云南省教育厅科学研究基金项目“滇金丝猴生境因子评价与潜在栖息地预测研究”(2022J1368);云南省教育厅科学研究基金项目“绿春山区乡村居民点空间布局优化研究”(2023J1605)。

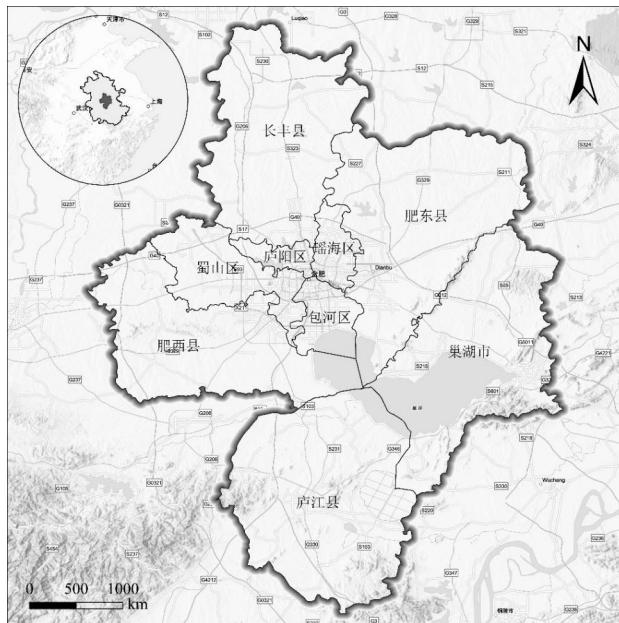


图 1 研究区概况图

(审图号:GS(2024)0650号)

露风险耦合关系的重点区域,因此本研究选择合肥市作为研究对象,基于地理信息空间技术,研究了合肥市 2000–2022 年 22 年的 PM2.5 浓度的时空变化特征,运用地理探测器探测了合肥市土地利用类型和 PM2.5 浓度之间的关系。

1 研究区概况

合肥市简称“庐”或“合”^[11],是安徽省的省会城市,是我国华东地区的特大城市,下辖瑶海区、庐阳区、蜀山区、包河区、长丰县、肥东县、肥西县、庐江县、巢湖市^[12],总土地面积为 11445km²。截止 2024 年末,总人口 812.7 万人^[13]。合肥市位于安徽省中部,东经 E117°13' 18.25",北纬 N31°49'21.30",如图 1 所示,合肥市属亚热带湿润季风气候,四季分明,气候温和,年平均气温 15.7℃,年平均降雨量为 1000mm。

2 材料与方法

2.1 数据来源与处理

PM2.5 浓度数据来源于国家地球系统科学数据中心 (<https://www.geodata.cn>) 中国 1km 高分辨率高质量逐年 PM2.5 数据集 (CHAP),时间跨度为 2000–2022 年,数据格式为 NC。首

先基于 ArcPy,将 2000–2022 年 PM2.5 浓度数据由 NC 转为 TIFF 格式,然后对其进行栅格投影、掩膜提取等处理,最后运用 ArcGIS 模型构建器,迭代栅格提取合肥市 2000–2022 年 PM2.5 浓度数值。

土地利用数据来源于 Esri Land Cover (<http://www.esrichina.hk/en-hk/home>),分辨率为 10m,时间为 2022 年,该数据集将土地覆盖类型分为水体、林地、草地、淹没植被、耕地、灌木、建设用地、裸地、雪/冰、云十类。本研究运用 ArcGIS Pro 和 Fragstats4.2 批量计算合肥市 2022 年 1000 米渔网内 10 米土地利用数据。

2.2 研究方法

2.2.1 时间序列分析法

时间序列分析法是以数理统计学和随机过程理论为基础,将某地区 PM2.5 的浓度数值按照时间序列进行排列,分析该地区 PM2.5 浓度数值的时间变化特征^[14,15]。本研究基于 Excel 对合肥市 2000–2022 年 PM2.5 浓度值按照时间序列排序,分析了 22 年来合肥市 PM2.5 浓度变化特征。

2.2.2 LISA 聚类图

LISA 聚类图是 ArcGIS 提供的一种局部空

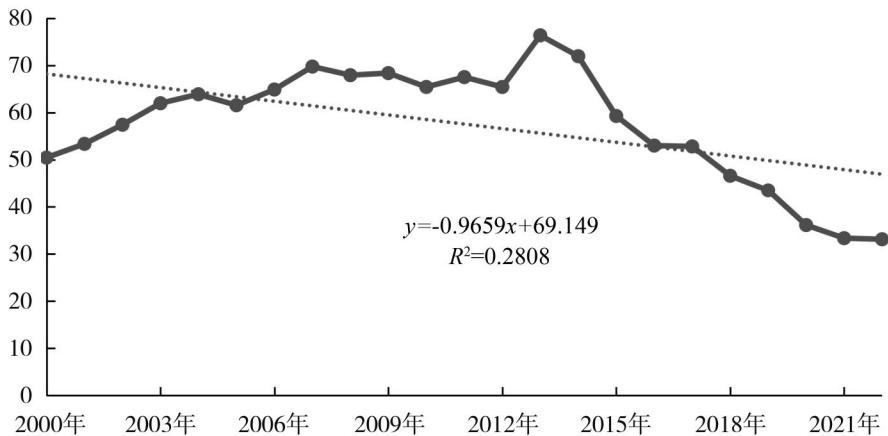


图 2 2000—2022 年合肥市 PM2.5 浓度年均变化趋势

间自相关分析功能,通过分析研究区域内各空间对象与其领域对象间的相关性和差异程度,发现局部区域的空间异质性^[16]。本研究通过 LISA 聚类图反映 2000—2022 年合肥市 PM2.5 浓度值在不同时期的聚类模式和分布特征,输出结果包括:不显著、高-高聚集、高-低聚集、低-高聚集、低-低聚集 5 种模式。

2.2.3 地理探测器

地理探测器是探测某事物的空间分异性,发现该事物背后驱动力的一种统计学方法。包括分异及因子探测、交互作用探测、风险区探测、生态探测四个探测器^[17]。其中,分异及因子探测器探测某因子对某事物空间分异性的影响程度;交互作用探测器揭示各影响因子间的交互作用是增强或减弱;风险区探测器探测出最有利于某事物发展的各因子状态值;生态探测器探测出各因子对某事物的影响是否显著^[18]。本研究基于地理探测器探测不同土地利用类型对 PM2.5 浓度的影响,揭示 PM2.5 浓度值与土地利用的关系。

3 结果与分析

3.1 PM2.5 时空分布特征

3.1.1 PM2.5 时间序列特征

2000—2022 年合肥市 PM2.5 浓度时间序列呈现典型倒“U”型特征,如图 2 所示,2000—2013 年合肥市 PM2.5 浓度值呈波动上升的状态,从

2000 年的 $50.4479 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 上升到 2013 年的 $76.3543 \mu\text{g}/\text{m}^3$,在 2013 年达到峰值,13 年间合肥市 PM2.5 浓度值共上涨了 51.35%。从 2013 年开始合肥市 PM2.5 浓度值开始逐年下降,到 2022 年下降到最低值 $33.0923 \mu\text{g}/\text{m}^3$,相较 2000 年合肥市 PM2.5 浓度值下降了 34.04%,从总体来看,2000—2022 年 22 年间,合肥市 PM2.5 浓度值呈下降趋势,其下降速率为 $-0.9653/\text{a}$ 。

3.1.2 PM2.5 空间分布特征

在 ArcGIS 软件中对合肥市 2000—2022 年 PM2.5 浓度值进行空间自相关分析,具体操作为通过空间统计工具-聚类分析制图-聚类和异常值分析对合肥市 2000—2022 年 PM2.5 浓度值绘制 LISA 聚类图,如图 3 所示,通过 LISA 聚类图反映合肥市 PM2.5 浓度空间分布特征。LISA 聚类图显示,研究区 PM2.5 浓度以高-高、低-低聚类为主,但在不同时期的聚类模式和分布并不相同。在研究初期(2000—2009 年),高-高聚集主要集中在城区及北部地区;低-低聚集主要集中在东部和南部。到了研究中期(2010—2016 年),高-高聚集主要集中在城区,北部地区高值聚集区暂时消失;低-低聚集位置保持不变,主要集中在东部和南部。到了研究后期(2017—2022 年),高-高聚集主要由城区转移至北部;低-低聚集在除北部的东、南、西部区域均有存在。研究表明,PM2.5 浓度空间变异性较大,这可能是受到人为污染以及跨区域污染传输的影响。

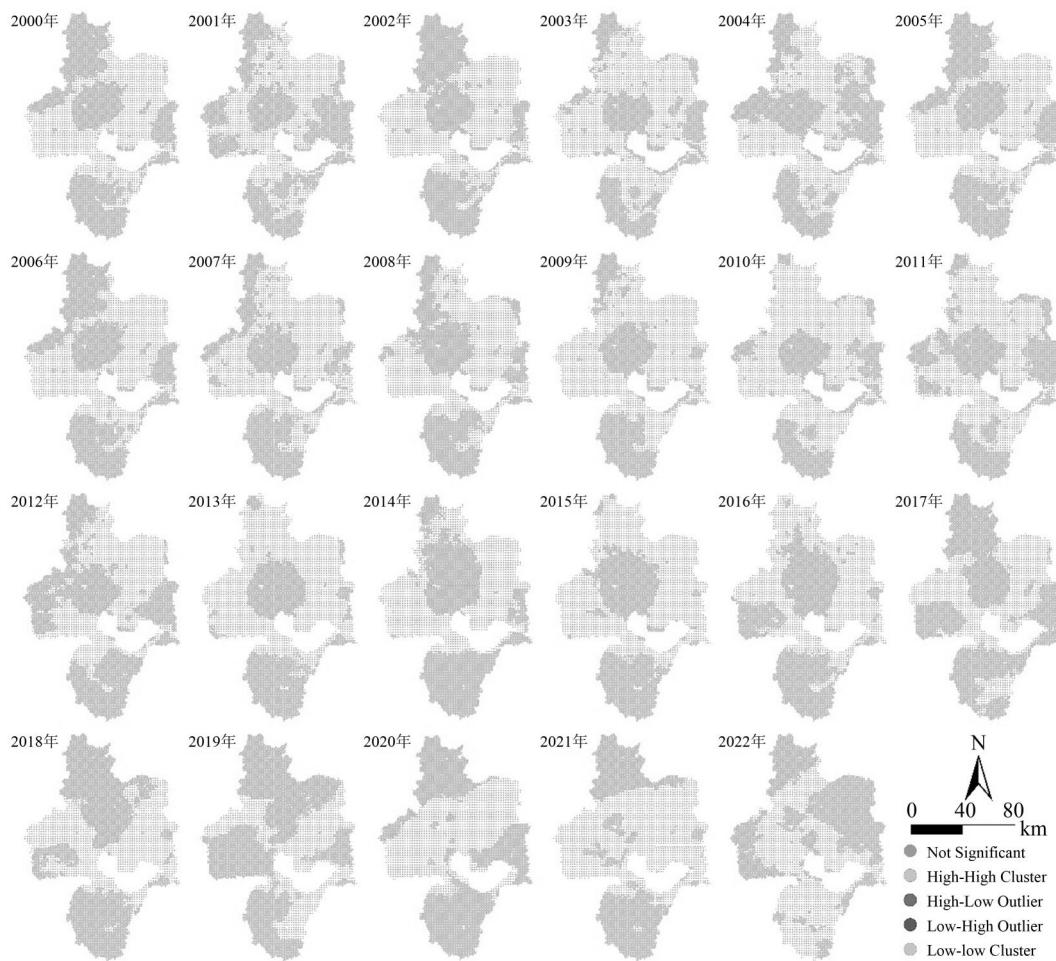


图 3 2000—2022 年合肥市 PM 2.5 浓度 LISA 聚类图

3.2 PM2.5 与土地利用类型关系分析

3.2.1 土地利用现状

运用 ArcGIS 对合肥市 2022 年土地利用类型分布情况和数量进行统计,其结果如图 4 所示,通过分析合肥市土地利用类型有耕地、林地、草地、水体、建设用地、裸地六种类型,耕地面积为 6654.4082 km^2 ,占研究区总面积的 62.29%,耕地广泛分布在研究区外围;林地面积为 684.6694 km^2 ,占研究区总面积的 6.41%,林地分布在研究区的东、南、西部部分区域;草地面积为 137.758 km^2 ,占研究区总面积的 1.29%,草地分布在研究区的中部;水域面积为 737.9057 km^2 ,占研究区总面积的 6.91%,水域分布在巢湖;建设用地面积为 2445.6257 km^2 ,占研究区总面积的 22.89%,建设用地分布在研究区的中部;裸地面积为 22.6151 km^2 ,占研究区总面积的 0.21%,

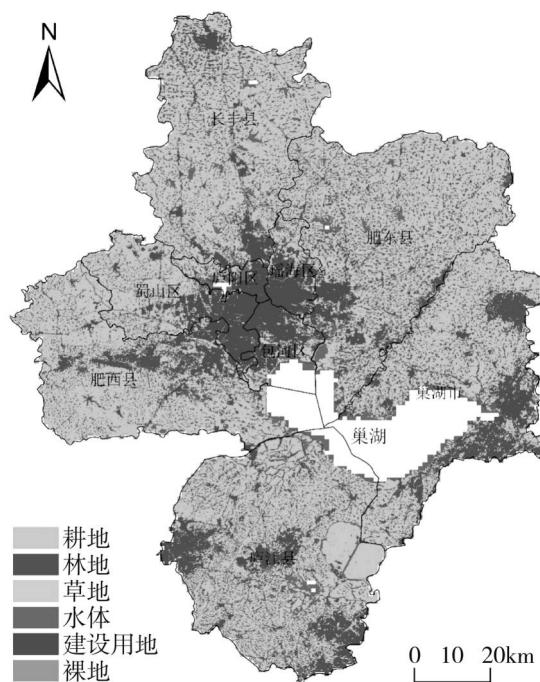


图 4 2022 年合肥市土地利用类型分布情况

表 1 2022 年土地利用类型与 PM2.5 浓度值的解释程度

项目	水体占比 (X ₁)	林地占比 (X ₂)	耕地占比 (X ₃)	建设用地占比 (X ₄)	裸地占比 (X ₅)	草地占比 (X ₆)
q 值	0.009038	0.086802	0.018254	0.011728	0.000831	0.017562

裸地分布在研究区的西部和建设用地外围。

3.2.2 PM2.5 与土地利用类型关系地理探测

为探究不同土地利用类型对 PM2.5 浓度值的影响,本研究将 PM2.5 浓度值作为因变量,将水体占比(X₁)、林地占比(X₂)、耕地占比(X₃)、建设用地占比(X₄)、裸地占比(X₅)、草地占比(X₆)作为自变量,运用地理探测器探测 PM2.5 浓度值与不同土地利用类型之间的关系。

(1) 分异及因子探测。如表 1 所示,林地占比、耕地占比、草地占比三个因子对 PM2.5 浓度的解释力最强,说明林地占比、耕地占比和建设用地占比是影响 PM2.5 浓度值的主导因子,林地、耕地、草地面积的变化对 PM2.5 浓度影响至关重要,其中林地占比对 PM2.5 浓度变化单因子作用最强。裸地占比对 PM2.5 浓度值解释力最弱,说明裸地占比对 PM2.5 浓度值变化的单

因子作用最小。

(2) 交互作用探测。利用地理探测器中的交互作用探测器,探测六个因子对 PM2.5 浓度交互作用的影响程度,交互作用的解释力越大表明两个因子对 PM2.5 交互作用影响力越强,其中双因子增强表示两个因子的交互作用结果大于两个因子中单因子解释力的最大值,非线性增强表示两个因子的交互作用结果大于两个因子单因子解释力之和^[17]。如图 5 所示,交互探测的结果显示,除林地占比和耕地占比、建设用地占比、草地占比,耕地占比和草地占比,建设用地占比和裸地占比交互作用为非线性增强以外,其余因子交互作用均为双因子增强,其中林地占比和水体占比对 PM2.5 浓度的交互作用最强, q 值为 0.1101。

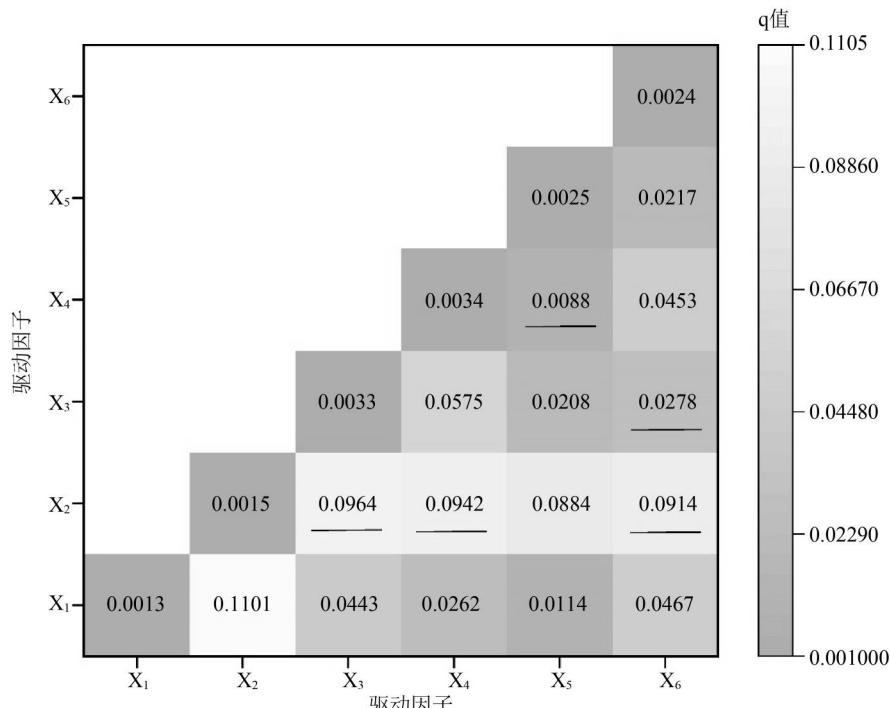


图 5 2022 年合肥市土地利用类型与 PM2.5 浓度关系交互探测器结果

注:带下划线表示双因子间呈非线性增强,否则为双因子增强。

表 2 风险区探测结果

因子	相关性	最佳比例	PM2.5 浓度最低值(μg/m ³)
水体占比(X ₁)		3.66%~9.05%	32.9626
林地占比(X ₂)	-	81.3%~100%	31.8104
耕地占比(X ₃)	+	≤2.49%	32.7415
建设用地占比(X ₄)	+	≤3.66%	33.0142
裸地占比(X ₅)		5.97%~12.3%	33.0583
草地占比(X ₆)	-	9.08%~76.6%	32.7119

(3) 风险区探测。为确定 PM2.5 浓度最低时水体占比、林地占比、耕地占比、建设用地占比、裸地占比、草地占比的最佳值,运用地理探测器的风险区探测器进行探测,其结果如表 2 所示,其中林地和草地与 PM2.5 浓度值负相关,林地占比和草地占比越大 PM2.5 浓度越低,耕地和建设用地与 PM2.5 浓度值正相关,耕地和建设用地占比越小,PM2.5 浓度值越低,其他用地类型对 PM2.5 浓度值影响不大。

(4) 生态探测。生态探测器能够探测双因子对 PM2.5 的作用是否存在显著性,其结果表明各因子对 PM2.5 的双因子作用均存在显著性。

4 结语

本研究运用合肥市 2000~2022 年 PM2.5 浓度遥感影像数据,基于 GIS 技术分析了合肥市 PM2.5 时空变化特征,然后结合合肥市土地利用数据,基于地理探测器,探寻合肥市土地利用类型与 PM2.5 浓度的关系,其结论如下:

(1) 2000~2022 年 20 年间,合肥市 PM2.5 浓度时间序列呈现典型的倒“U”型特征,在 2013 年达到峰值,从 2013 年到 2022 年 PM2.5 呈现下降趋势。这是由于 2013 年国务院出台了《大气污染防治行动计划》,全国各城市积极落实国家政策,合肥市开始加大空气污染防治,加上生产技术的进步,生产要素对环境变得更友好,因此使 PM2.5 浓度在 2013 年开始逐渐下降。这与周靖承^[19]等的研究结果一致,说明从 2013 年国务院出台相关政策后,全国各地区的 PM2.5

在逐渐下降。

(2) 通过 LISA 聚类图显示,合肥市 PM2.5 浓度以高-高、低-低聚类为主,合肥市 PM2.5 浓度空间变异性较大,不同时期空间分布特征不同。

(3) 通过地理探测器发现不同土地利用类型对 PM2.5 浓度变化有不同的影响,其中林地对降低 PM2.5 浓度有显著效果,这与张学林^[20]等、李巍^[10]等的研究结果一致,而耕地和建设用地的增加则会使 PM2.5 浓度加大,其他土地利用类型对 PM2.5 浓度影响不显著。两个因子对 PM2.5 浓度影响具有交互增强性,且其中林地占比和水体占比对 PM2.5 浓度的交互作用最强,同时本研究还探测了合肥市对于 PM2.5 浓度的最合理土地利用类型组合方式。为了降低合肥市 PM2.5 浓度值,建议未来合肥市的土地利用规划应增加林地的占比,注意控制建设用地的数量,不随意砍伐林业,从政策上加强对森林的保护。

参考文献(References):

- [1] Luo Y, Teng M F, Yang K, et al. Research on PM2.5 estimation and prediction method and changing characteristics analysis under long temporal and large spatial scale—A case study in China typical regions[J]. Science of the Total Environment, 2019, 696: 133983.
- [2] Huang R J, Zhang Y L, Bozzetti C, et al. High secondary aerosol contribution to particulate pollution during haze events in China [J]. Nature, 2014, 514 (7521): 218~222.

- [3] 张理博, 孙鹏, 罗淑年. 大气细颗粒物 PM 2.5 的危害及其治理政策的研究 [J]. 科环境管理, 2020, 45 (04): 102–105.
- [4] Yang D, Meng F, Liu Y, et al. Scale effects and regional disparities of land use in influencing PM2.5 concentrations: A case study in the Zhengzhou Metropolitan Area, China [J]. Land, 2022, 11: 1538.
- [5] Pope C A 3rd, Burnett R T, Thun M J, et al. Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution [J]. JAMA, 2002, 287(09): 1132–1141.
- [6] 万好, 王琴. 武汉市典型道旁绿地消减空气细微颗粒物的作用研究 [J]. 西北林学院学报, 2020, 35 (03): 237–242.
- [7] 邱沛昕, 裴婷婷, 王雯等. 黄土高原土地利用变化对 PM2.5 浓度的影响 [J]. 资源开发与市场, 2025, 41(03): 344–352.
- [8] Liu C, Henderson B H, Wang D F, et al. A land use regression application into assessing spatial variation of intra-urban fine particulate matter (PM2.5) and nitrogen dioxide (NO₂) concentrations in City of Shanghai, China [J]. Science of the Total Environment, 2016, 565: 607–615.
- [9] 杨伟, 姜晓丽. 华北地区大气细颗粒物 (PM2.5) 年际变化及其对土地利用/覆盖变化的响应 [J]. 环境科学, 2020, 41(07): 2995–3003.
- [10] 李巍, 卢文宇. 太原市 PM2.5 浓度与土地利用及植被覆盖的关系 [J]. 黑龙江科技大学学报, 2024, 34(02): 249–254.
- [11] 5 名专家考证发现合肥发源于蜀山 [N]. 市场星报, 2018-08-10.
- [12] 国家统计局. 2023 年统计用区划代码 [EB/OL]. (2023-06-30) [2025-05-17]. <http://www.stats.gov.cn/sj/tjbz/tjyqhdmhcxhfdm/2023/index.html>.
- [13] 合肥市统计局. 合肥市 2024 年国民经济和社会发展统计公报 [EB/OL]. (2025-03-28) [2025-05-17]. <https://tjj.hefei.gov.cn/tjyw/tjgb/15299317.html>
- [14] 刘圆圆. 时间序列分析及其应用 [J]. 科技创新导报, 2011, 7(27): 255.
- [15] 明安远, 胡晓, 李新举, 等. 济南市 PM2.5 时空分布特征及其与土地利用的相关性研究 [J]. 矿山测量, 2020, 48(01): 6–11.
- [16] 冯彬, 周建伟, 于涛. 冻融影响下生态系统服务价值和生态风险的时空演变特征及关联性—以南羌塘盆地东区为例 [J]. 华南师范大学学报 (自然科学版), 2024, 56(05): 77–90.
- [17] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望 [J]. 地理学报, 2017, 72(01): 116–134.
- [18] 田苗, 郑浩浩, 易文利, 等. 山西省 PM2.5 时空特征及其影响因素的地理探测 [J]. 华南师范大学学报 (自然科学版), 2022, 40(09): 1495–1501.
- [19] 周靖承, 姚衡, 曹艳晓, 等. 2001–2020 年湖北省 PM2.5 时空分布特征及气象驱动因子分析 [J]. 生态与农村环境学报, 2023, 39(12): 1559–1567.
- [20] 张学林, 冯祥, 王建雄. 滇东南地区 PM2.5 的时空分布与土地利用研究 [J]. 江西农业学报, 2022, 34 (09): 156–161.

作者简介:

第一作者: 冯艳, 1985 年生, 女, 云南临沧人, 硕士, 云南国土资源职业学院, 讲师, 主要研究方向为土地资源管理、地理信息系统。Email: 125211496@qq.com;

通讯作者: 瞿华蓥, 1982 年生, 男, 重庆人, 硕士, 云南国土资源职业学院, 副教授, 主要研究方向为国土资源信息化管理。Email: 94298984@qq.com

Research on the Relationship between Spatial and Temporal Distribution of PM2.5 and Land Use in Hefei City based on Geographic Detector

FENG Yan¹, QU Huaying^{1 *}, LI Jialong²

(1. Yunnan Land and Resources Vocational College, Department of Land and Spatial Information, Kunming 652501, China

2. Kunming Changshui International Airport Co., Ltd, Kunming 650000, China)

Abstract: In response to the air pollution problem in Hefei City, this study collected remote sensing data on PM2.5 concentration from 2000 to 2022. Time series analysis and LISA clustering were used to analyze the spatiotemporal variation characteristics of PM2.5 concentration in Hefei City over the past 22 years. Then, based on geographic detectors, the relationship between PM2.5 and land use types was explored. The results showed that: (1) the time series of PM2.5 concentration in Hefei City from 2000 to 2022 exhibited a typical inverted "U" shape, reaching its peak in 2013 and gradually decreasing from 2013 to 2022; (2) the PM2.5 concentration in Hefei City is mainly composed of high-high and low-low clusters, and there are differences in their clustering patterns and spatial distribution at different times; (3) Through a geographic detector, it was found that the proportion of forest land had the strongest single factor effect on changes in PM2.5 concentration, with a negative correlation between the two. The proportion of bare land had the weakest explanatory power, while the proportion of forest land and water had the strongest interactive effect on PM2.5 concentration.

Key words: PM2.5; land use; geographic detector; time series analysis method; LISA clustering diagram

全域土地综合整治实践与优化路径研究

——以安达市任民镇为例

吴 妍

(安达市国土空间规划服务中心, 黑龙江 绥化 151400)

摘要:安达市任民镇全域土地综合整治虽成效显著,但面临诸多挑战。部门协同不足,职责不清且缺乏沟通机制;整治规划因政策动态调整,科学性与适应性欠缺;技术标准频繁更新,如用地数据标准变更,导致项目审批与实施困难。为此,提出优化路径:引入前沿技术,提升基层技术人员管理水平;加强对上沟通,制定有针对性的整治政策;强化部门联动,提高整治效率;进行动态评价,提升整治的专业性和时效性。研究表明,任民镇土地整治工作需从优化技术管理、完善政策保障、强化部门协同和构建动态评价机制等方面改进。研究成果能够丰富技术管理与政策协同领域的理论体系,为类似研究提供方法论参考,同时助力国家或区域在技术创新、治理现代化等战略目标上的推进,增强系统性发展能力。

关键词:全域土地综合整治;任民镇;实践;优化路径

中图分类号:F301.2

文献标志码:A

文章编号:1672-2736(2025)08-0091-6

0 引言

在我国工业化和城市化快速推进的进程中,东北地区面临着独特的发展挑战。劳动力短缺、经济衰退等负面影响逐渐显现。人口流失导致农村空心化,造成土地资源浪费,阻碍农业规模化、机械化发展,不利于农村生产生活条件的改善。

全域土地综合整治以乡镇为基本实施单元,整体推进农用地整理、建设用整理和乡村生态保护修复,旨在优化空间格局,促进耕地保护和土地集约节约利用,为乡村振兴提供有力支撑^[1]。

安达市任民镇作为安达市政府的前身安达厅所在地,曾是安达地区经济最发达的镇,主要经济来源为农牧业。随着工业化的发展,农牧业在全市所占比重逐渐下降,任民镇经济发展逐步衰落,尤其近十年,人口流失严重,年均人口增长率为-4.88%,村屯常住居民大幅减少,土地闲置情况尤为突出,在安达地区极具代表性。研究任民镇的全域土地综合整治实践与优化路径,不仅

有助于解决土地利用困境,提高土地利用效率,改善农村居民的生活条件,而且对于安达市以及东北地区其他乡镇在乡村振兴战略下开展全域土地综合整治工作,具有重要的借鉴意义和实践参考价值,能为推动东北地区乡村可持续发展提供有益思路。

目前我国全域土地综合整治涉及多学科领域,多部门协同推进,但相关研究对不同部门之间的协调机制、政策冲突解决等问题探讨较少,难以有效指导项目落地实施。目前尚未形成系统、完善的理论框架。鉴于现有研究对全域土地综合整治效果评估的不全面性,本文将从技术、政策、管理和动态评价方面进行探讨,提出优化建议和措施,为实践提供理论支持。

1 任民镇全域土地综合整治现状分析

1.1 区域概况

任民镇是位于安达市东部的中心集镇,处于5个乡镇的核心交汇区,是产业项目核心区,可带动周边乡镇产业发展,3条国省干道交汇于镇

域内。任民镇下辖 11 个村,总人口 1.28 万人,全镇年财政总收入约 0.5 亿元,工农业总产值约 9.5 亿元,农村人均收入约 1.69 万元。全镇土地面积 21072.9hm²,其中耕地 8554hm²,林地 1271hm²,草地 9030hm²,建设用地 907hm²,水域 671hm²,未利用地 212hm²^[2]。

任民镇有耕地 8861.38hm²,分布在镇域中间部分,建设用地 166hm²,分布在镇政府所在地,生态用地 996hm²,分布在镇域南侧和西北侧边缘。用地结构较为单一,产业结构较为单一,竞争力有待加强。旅游业发展还较为粗放,旅游服务体系尚未形成,且与周边区域产业发展同质化严重,未形成龙头产业和品牌化产业^[2]。

任民镇存在耕地碎片化、质量退化问题,以及农村宅基地、学校、工厂等房屋闲置情况,土地集约利用率有待提高。任民镇有大量的天然牧草地,草原资源和湿地资源丰富,且有东湖省级自然保护区位于生态保护红线内,旅游资源丰富但其开发同时也受到了生态保护的制约。

1.2 土地综合整治现实做法

1.2.1 整治目标

通过撤并村屯、腾退建设用地指标,加强基础设施建设,改善人居环境。利用优质草原资源发展畜牧养殖,并通过土地整理和引入企业在腾退建设用地上建厂,发展农产品加工业,提升土地利用效率、促进产业融合^[3]。

1.2.2 整治原则

任民镇结合自身实际,编制系统、全面的发展规划,坚持规划引领原则;采用生态化工程措施,注重生物多样性保护,修复生态系统,优先保护生态用地,加强生态监测与评估,实现土地利用与生态保护协调发展的生态优先原则;广泛征求群众意见的农民主体原则。

1.2.3 整治措施

任民镇已开展了农村宅基地改革和集体经营性建设用地入市等改革试点,同时建立了农村土地一体化、系统化、协同化改革模式,形成了一系列保护耕地、促进土地节约集约利用、有助于乡村振兴的土地改革制度成果,为开展此项工作

提供了良好的制度支撑,土地综合整治经验较为丰富^[4]。

搭建了集体经营性建设用地入市交易平台,拓宽了宅基地腾退创收的路径。将拟撤并的自然屯腾退宅基地信息进行公布,面向社会招商引资。针对“一户多宅”和超面积现象,制定了宅基地有偿使用和内部流转办法,在保障户有所居的前提下,鼓励宅基地使用权人自愿有偿退出,腾退出的集体建设用地指标多途径利用;根据宅基地“三权分置”政策^[5],为符合条件的农户核发宅基地使用权证,对于户在人不在的本村居民,发放宅基地资格权证书,保留其申请宅基地的资格。这不但解决了农民最关心、关注的问题,也可为顺利开展全域土地综合整治提供支撑。组建了专门的国有公司,确立了全域土地综合整治融资和实施主体。将全市国有未利用地、国有草原评估后作为资产注入国有公司,由公司集中开展综合整治以及作为主体进行银行贷款融资。与重点院校建立了合作关系,为开展全域土地综合整治提供技术支撑。与哈工大、八一农大等多所高校在城乡规划、农业生产、土地治理等方面开展了广泛的合作。

耕地后备资源丰富,耕地增量空间较大。整理村屯周边废弃地和零星荒草地,纳入耕地后备资源库,新增耕地开垦之后将与周边耕地接壤连片,加之逐步完备的农田水利配套设施,可以大幅提升粮食产能。

1.2.4 整治成效

整治以任民镇政府为中心,沿安林路向北,依托草原、湿地资源和产业发展要素,大力发展生态观光、民宿、农事体验等旅游产业,依托试点区优越的自然风光和乳业文化资源,构建重点区域景观农业整体框架,打造草原休闲农业品牌,培育优势产业集群。拓展产业功能;延伸产业链条,大力发展农产品初加工、精深加工和副产物综合利用,推进冷链物流设施建设;培育了一批集原料基地、加工转化、现代物流、社会服务、便捷营销为一体的特色农业集聚区和产业园,一二三产融合发展的格局初具雏形。

通过自筹、对上争取项目和融资的方式,投资 2.37 亿元,整理荒草地和对腾退宅基地进行复垦。村屯撤并腾退建设用地指标一部分用于建设农产品加工园区,一部分调整到中心村和镇政府所在地用于新建房屋。其中任民镇一心村一屯,通过引进鲜食玉米加工项目,村集体实现土地收入 265 万元,带动农民种植鲜食玉米 467hm²、增收 210 万元,解决 300 人就业。

整合各类项目资金,对整治区域实施生态环境修复,重点实施东湖湿地保护区修复、生态红线内湿地修复、黑土地保护、沿路绿化、矿山环境治理、草原植被修复、渠系及水域环境治理等项目。湿地生态功能逐步恢复,湿地碳汇功能逐步增强。土壤结构得到改善,地力大幅提高,粮食产量明显增加。提高了草原植被覆盖率、土壤肥力和生态系统的自我维持能力,修复水域周边草原和耕地得到保护。

1.3 土地综合整治存在的问题

1.3.1 技术问题

不同部门在耕地质量评估、生态修复工艺等土地整治技术应用上缺乏统一标准,导致整治效果难以横向对比。土地利用、生态环境、社会经济等多源数据分散在不同部门,存在格式不兼容、更新滞后问题,难以形成全域整治的精准数据支撑。高标准农田建设中土壤改良、盐碱地治理适用性有限,目前仍依赖传统手段。遥感监测、无人机巡检等技术在该地区覆盖率低,智慧化管理平台普及度不足。基层技术人员对 GIS 空间分析新技术掌握不足,第三方技术服务机构水平参差不齐,影响整治技术实施精度。缺乏实时监测土地整治效果的技术手段,难以及时调整技术方案。

1.3.2 政策问题

在全域土地综合整治实施初期,以“二调”成果作为规划编制与项目实施的基础依据。随着项目推进,政策不断更新,“三调”正式启用,根据文件规定,规划编制及项目审批应以“三调”成果作为基准^[6]。这一变更致使项目审批过程中,对现有建设用地的认定标准出现显著差

异。存在“三调”为建设用地,而“二调”为非建设用地的情况。按照现行规定,此类地块若需开发利用则需办理农用地转用手续。但在国家国土空间规划编制工作加速推进的背景下,黑龙江省尚未出台针对性政策来协调化解这一矛盾冲突,进而导致土地整治项目陷入推进困境,难以有效开展。

在项目推进过程中,国家关于国土空间规划编制相关政策体系尚处动态完善阶段,致使规划实施面临诸多挑战。一方面,受制于政策窗口期的紧迫性,整治规划往往需在短期内完成编制审批,但该阶段大量国土空间规划配套政策、技术标准尚未明确,诸如耕地“进出平衡”实施办法等关键制度仍在探索阶段,导致规划编制只能基于既有政策框架“摸着石头过河”,难以充分融入国家最新政策导向。另一方面,随着国土空间规划改革的深入推进,后续陆续出台的政策文件不断细化管控要求,如“三区三线”划定规则优化、集体经营性建设用地入市制度创新等^[7],这些制度迭代频繁突破规划编制时的政策边界,使得既成规划难以有效衔接新要求。例如,部分区域按原有规划开展的建设用地整治项目,因后续生态保护政策收紧,面临合规性争议;或是规划预留的产业用地空间,因土地用途管制新规出台而难以落地实施,最终导致规划实施陷入“编制—调整—再编制”的循环困境,严重削弱全域土地综合整治的系统性与实施效能。

1.3.3 管理问题

自然资源、农业农村、乡镇政府等部门在土地整治中都有相关职责,但存在部分职责界限模糊的情况,如耕地保护中对农田生态保护的职责划分。不同部门在土地整治项目规划、实施等环节缺乏常态化的沟通协调平台和机制。例如在涉及土地用途调整时,自然资源部门与农业农村部门之间可能因信息不畅,导致规划调整不及时或不合理。

1.3.4 动态评价问题

基于安达地区信息化发展滞后的现状,目前难以通过信息化手段进行远程监管,仍需依赖人

工现场检查,增加了监管成本和难度。没有建立起完善的实时动态监管平台,无法对土地整治项目的全过程进行实时监控,如对土地开发、农田建设、生态修复等环节的进度、质量和资金使用情况不能及时掌握。

2 任民镇全域土地综合整治优化路径

2.1 优化技术与管理

由自然资源部门牵头,联合农业、生态等领域专家,编制涵盖耕地保护、生态修复、数字化应用的技术标准。打通自然资源、农业农村等部门的数据壁垒,统一数据格式整合土地利用现状、土壤质量、生态监测等数据,形成实时更新的数据库。开发移动端 APP 供基层人员采集现场数据,通过 AI 算法自动预警技术应用偏差。

逐步引入 GIS 遥感影像和大数据等技术,为规划编制提供基础信息,提升规划精准度;对土地利用现状进行评估,精准识别问题区域,确定整治区域;对问题的严重程度进行量化分析,制定有针对性的生态修复规划;模拟不同规划方案实施后的效果,选择最优的规划方案。结合遥感影像等数据,对实施过程进行实时监测,及时掌握项目进展情况,确保项目按规划实施,提高规划的精准度和适应性。对基层技术人员进行定期培训 GIS、无人机操作等实操培训,同时引入专业第三方团队提供技术服务,提高技术管理水平,带动本地人才成长。

2.2 完善政策保障

强化与上级部门的沟通协调机制。在全域土地综合整治实施过程中,对发现的政策堵点、难点问题进行系统梳理,形成专题报告及时向上级部门反馈。针对因政策体系不完善导致的项目审批流程不畅、政策依据不足等问题,要主动与上级部门沟通协调,结合本地实际情况提出具体诉求与建议,积极申请试点政策支持。同时,争取上级部门能够结合基层实践经验,加快制定并出台全域土地综合整治试点期间的专项实施政策,有效打通政策落地的“最后一公里”,为项

目顺利推进提供坚实的政策保障,确保全域土地综合整治工作高效有序开展。

2.3 强化部门联动

明确自然资源、农业农村、生态环境和乡镇政府等相关部门在全域土地综合整治工作中的职责。制定详细的部门职责清单,明确各部门在项目规划、实施、监管等各个环节的具体工作内容和目标,避免职责交叉与推诿。

建立定期的联席会议制度,由主管市领导牵头,各相关部门参加,共同商讨全域土地综合整治中的重大问题、政策措施及项目推进情况,形成会议纪要,明确责任部门和时间节点,跟踪落实情况。对涉及多个部门的土地整治项目,实行联合审批,提高审批效率,加快项目落地实施。

完善土地权益分配与补偿机制。全面开展土地确权登记颁证工作,为权益分配与补偿提供准确依据。对于存在权属争议的土地,建立专门的调处机制,通过协商、调解、仲裁或诉讼等方式,及时解决争议,确保土地权益清晰。科学合理地制定土地征收、流转等补偿标准,确保补偿金额能够反映土地的真实价值^[8]。探索开展土地经营权入股、土地置换等补偿方式,让农民能够以多种形式分享土地增值收益。

2.4 构建动态评价体系

利用卫星遥感、无人机航拍等技术,对土地利用变化、项目实施进度等进行数据采集,实现整治区域动态信息的实时获取。整合国土调查数据、规划数据、项目施工数据等,搭建统一的数字化平台,通过大数据分析和人工智能算法,自动生成动态评价报告,缩短人工评估周期。制定标准化评价流程,明确各环节时间节点,实现评价工作的流程化、规范化。打通自然资源、农业、生态环境等部门的数据壁垒,确保信息及时互通,避免因数据传递延迟导致的评价滞后。培养兼具土地管理、信息技术、数据分析能力的复合型人才,同时与科研院所合作,引入前沿技术方法,提升动态评价的专业性和时效性。

3 结语

本文通过对任民镇全域土地综合整治现状、实施过程和存在问题进行分析研究发现,通过技术管理优化,可以解决技术应用效率低的问题;通过政策完善,可以弥补政策滞后性、执行标准不统一等漏洞,确保政策对技术发展的引导和支持更精准;通过部门协作机制的建立,可以打破部门壁垒,解决跨部门沟通不畅、权责模糊导致的决策低效问题,提升整体协同效率;通过动态评价机制的构建,可以改变静态评价的局限性,动态跟踪技术应用效果和政策实施成效,及时调整策略,避免实施偏差。

本研究可以为行业或政府部门提供可落地的解决方案,推动技术与管理、政策的深度融合,提升实际问题的解决效能。能够丰富技术管理与政策协同领域的理论体系,为类似研究提供方法论参考。同时助力国家或区域在技术创新、治理现代化等战略目标上的推进,增强系统性发展能力。

参考文献(References):

- [1] 自然资源部. 关于开展全域土地综合整治试点工作的通知[EB/OL]. (2019-12-27) [2025-06-23]. <https://www.waizi.org.cn/doc/74828.html>.
- [2] 黑龙江省城市规划勘测设计研究院. 绥政函 73 号—2025 安达市任民镇国土空间总体规划(2021—2035 年)[S]. 安达: 安达市任民镇人民政府, 2025.
- [3] 黑龙江省城市规划勘测设计研究院. 绥政函 186

号—2021 安达市任民镇全域土地综合整治实施方案[S]. 安达: 安达市任民镇人民政府, 2021.

- [4] 中共中央办公厅, 国务院办公厅. 关于农村土地征收、集体经营性建设用地入市、宅基地制度改革试点工作的意见[EB/OL]. (2015-01-01) [2025-06-23]. <https://baike.so.com/doc/24555415-25421566.html>.
- [5] 中共中央, 国务院. 关于实施乡村振兴战略的意见[EB/OL]. (2018-02-04) [2025-06-23]. <https://www.cre.org.cn/zl/xlwjlz/13605.html>.
- [6] 自然资源部办公厅. 关于以“三调”成果为基础做好建设用地审查报批地类认定的通知[EB/OL]. (2022-03-09) [2025-06-23]. <https://m.163.com/dy/article/H2FGHOBF0532GL5H.html>.
- [7] 自然资源部办公厅. 关于辽宁等省启用“三区三线”划定成果作为报批建设项目用地用海依据的函[EB/OL]. (2022-11-01) [2025-06-23]. <https://m.163.com/dy/article/HLEJRE770514DRR7.html>.
- [8] 李沛权, 刘玉子. 古镇焕新再赋能——珠海市唐家湾镇全域土地综合整治实践[J]. 黑龙江国土资源, 2024, 22(11): 43-53.

作者简介:

第一作者/通讯作者:吴妍,1984 年生,女,黑龙江肇东人,硕士,安达市国土空间规划服务中心,高级城市规划师,主要研究方向为国土空间规划。Email:411236736@qq.com

Research on the Practice and Optimization Path of Comprehensive Land Consolidation: Case Study of Renmin Town in Anda City

WU Yan

(Anda City Land and Space Planning Service Center, Suihua 151400, China)

Abstract: Although the comprehensive land consolidation in Renmin Town, Anda City has achieved remarkable results, it is faced with numerous challenges: insufficient inter-departmental coordination, unclear responsibilities, and a lack of communication mechanisms; the consolidation planning is short of science and adaptability due to dynamic policy adjustments; frequent updates of technical standards, such as, changes in land use data standards, lead to difficulties in project approval and implementation. In response, optimization paths are proposed: introducing cutting-edge technologies to enhance the management capabilities of grassroots technical personnel; strengthening communication with higher-level authorities to formulate targeted consolidation policies; reinforcing inter-departmental collaboration to improve consolidation efficiency; and conducting dynamic evaluation to enhance the professionalism and timeliness of consolidation. The study shows that the land consolidation work in Renmin Town needs improvement in optimizing technical management, perfecting policy support, strengthening inter-departmental coordination, and constructing a dynamic evaluation mechanism. The research results can enrich the theoretical system in technical management and policy coordination, provide methodological references for similar studies and meanwhile help promote national or regional strategic goals, such as technological innovation and governance modernization, so as to enhance the capacity for systematic development.

Key words: comprehensive land consolidation; Renmin Town; practice; optimization path

黔东南州工业园区寒武系白云岩地层水文 地质特征及含水层划分研究

全宏林

(贵州省有色金属和核工业地质勘查局六总队,贵州 凯里 556000)

摘要:黔东南州工业园区位于复杂的地质构造带,寒武系白云岩地层是区域地下水赋存的关键层位。本研究通过水文地质勘察、物探找水及凿井工程实践,系统分析了寒武系石冷水组与娄山关群白云岩的水文地质特征。研究结果表明,区内含水层与隔水层的划分受岩体完整性、节理裂隙发育程度及断层控制显著,地下水以岩溶裂隙水为主,补给来源为大气降水,日均入渗量达 29565.70m^3 。ZK2#深井涌水量 $1210.46\text{m}^3/\text{d}$,验证了含水层划分的合理性。研究为类似岩溶区地下水资源开发提供了理论依据与工程参考。

关键词:寒武系白云岩;水文地质特征;含水层划分;岩溶裂隙水

中图分类号:P641.461

文献标志码:A

文章编号:1672-2736(2025)08-0097-9

0 引言

黔东南州工业园区作为区域经济发展的重要载体,其水资源保障能力直接影响工业园区可持续发展。研究区地处扬子地块与江南造山带结合部,受多期构造活动叠加影响,形成了以寒武系白云岩为主体的复杂岩溶水文地质系统^[1]。区内龙井街大断层及次级断裂带构成的网络状构造格局,对地下水赋存与运移具有显著控制效应。近年来,随着工业园区企业增多,用水需求激增,现有地表水资源已难以满足供水需求,亟需通过系统水文地质研究厘清深部岩溶含水层结构,实现地下水资源精准开发。

龙本力的研究表明^[2],寒武系石冷水组与娄山关群白云岩虽同属碳酸盐岩地层,但因沉积环境差异导致岩溶发育分异显著。石冷水组以薄层泥质白云岩夹硅质条带为特征,渗透性受层理面控制;娄山关群中厚层白云岩则发育大规模溶蚀孔洞系统。然而,既有研究多聚焦于区域岩溶发育规律^[3],对构造-岩性耦合控制下的含水层空间分异机制缺乏定量解析,且前震旦系板溪群浅变质岩隔水边界的阻水效应尚未明确,制约

着地下水资源评价精度。

本文以水文地质单元系统理论为指导,综合运用地质填图、高密度电法勘探及钻探验证等技术手段,重点研究断层破碎带与岩溶裂隙网络的空间耦合关系,定量表征大气降水入渗-径流-排泄全过程。通过 ZK2#示范井的工程实践,验证“构造控水、岩性定界”的含水层划分原则,建立岩体完整性指数与渗透系数(富水性)的量化关系模型,为岩溶区地下水资源靶区优选提供新的方法论支撑。研究结果对破解类似复杂构造区“找水难”问题具有重要理论与实践价值。

1 研究区地质与水文地质背景

1.1 区域地质构造特征

研究区受区域性龙井街大断层(F6)控制,该断层从区内南东角通过,呈逆冲性质,倾向南东,倾角约 60° ,如图 1 所示。断层上盘(南东盘)与前震旦系板溪群(Pt f)浅变质岩接触,下盘(北西盘)与寒武系石冷水组白云岩相接。断层带内出露的黄土屯大泉(流量 $>50\text{L/s}$)表明,浅变质岩作为隔水屏障,阻隔了岩溶地下水的侧

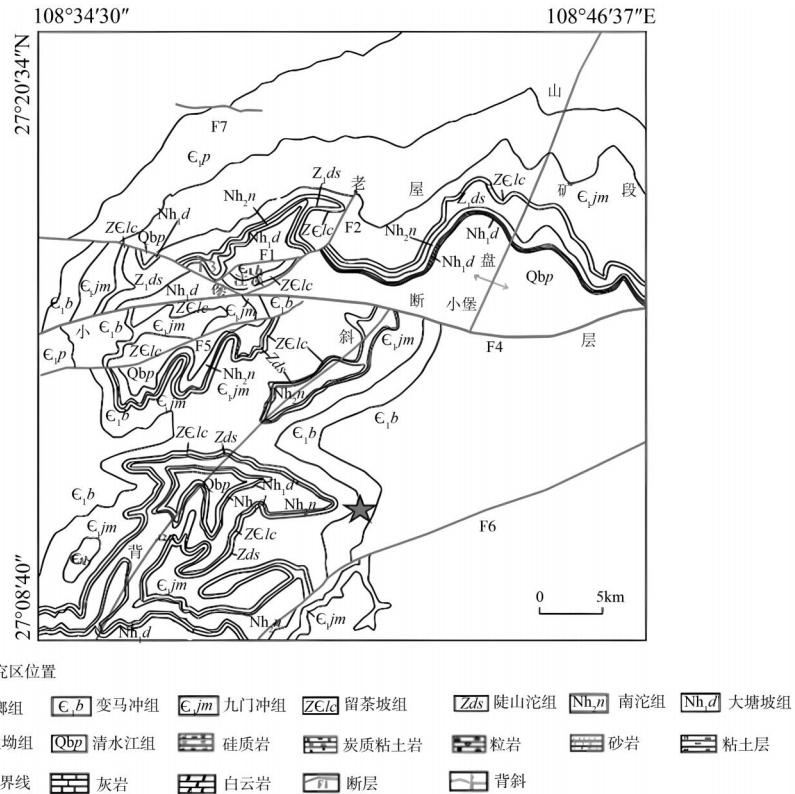


图 1 研究区地质构造

表 1 研究区内断层特征表

特征	介绍
断层名称	龙井街大断层(F6)
性质	逆冲
倾向	南西
倾角	约 55°
上盘地层	寒武系上统娄山关组
下盘地层	奥陶系下统桐梓组
控水作用	寒武系娄山关组白云岩作为相对隔水层,阻隔岩溶地下水垂向运移,迫使地下水沿断层带垂向径流,形成局部控水构造,影响区域地下水排泄格局
对岩层影响	受断层挤压剪切作用,次级断裂及节理裂隙网络发育,上盘白云岩层间破碎程度加剧,下盘奥陶系碎屑岩节理裂隙密集,为岩溶裂隙水与碎屑岩孔隙水的赋存、运移提供优势通道和储集空间,增强岩层渗透性与水力联系
渗透性	断层破碎带内岩体结构破碎,渗透性显著高于围岩,成为地下水富集与运移的关键通道,对区域水文地质条件及资源分布具有控制作用

向运移,迫使地下水沿断层带集中排泄,形成显著的控水边界。此外,受龙井街断层挤压作用影响,区内次级断裂构造发育,导致白云岩层间破碎加剧,节理裂隙密集,为岩溶裂隙水的赋存与

运移提供了优势通道和储集空间。断层破碎带内岩体渗透性显著增强,成为地下水富集的关键区域^[4]。研究区内断层特征如表1所示。

郎向斜南西挠起端之间,构造格局对地形分异具有决定性影响。北西侧以寒武系白云岩为主体,形成低缓的“馒头状”山丘与开阔的U型沟谷地貌,地势相对平缓(坡降1%~2%),地表水贫乏但利于大气降水入渗;南东侧受前震旦系板溪群浅变质岩控制,表现为山高坡陡、沟谷深切的中低山岳地貌,沟谷呈V型,切割深度大且向巴拉河河谷陡倾。两向斜的构造叠加导致岩性分布差异显著:北西侧白云岩区岩溶裂隙网络发育,地下水赋存条件优越;南东侧浅变质岩区因岩石致密,形成天然隔水边界,阻碍地下水横向交换。这种地形-岩性耦合特征进一步强化了区内水文地质单元的独立性,为地下水补-径-排系统空间分异奠定了基础^[5]。

1.2 地层岩性分布

1.2.1 寒武系石冷水组与娄山关群白云岩的岩性差异

研究区寒武系地层出露岩性以石冷水组与娄山关群白云岩为主,二者因沉积环境差异呈现显著岩性分异。石冷水组分布于研究区中部及北东部,可划分为两段:第一段为深灰色薄至中厚层细晶含鲕粒白云岩,夹黄色中厚层泥质白云岩,水平层理发育,厚度约70m;第二段以灰色、浅灰色中厚层细晶白云岩为主,夹灰黄色薄层粉砂岩及白云质砂岩,顶部为鲕状白云岩,局部见硅质鲕粒叠层构造,水平层理极发育,总厚400~480m。其岩性特征表现为泥质夹层与硅质条带频繁交替,层理面密集,渗透性受层理面控制,溶蚀孔洞发育程度较低,导致地下水赋存空间相对局限^[6]。

娄山关群分布于西至北西侧,与石冷水组整合接触,岩性以灰色、浅灰色中厚层白云岩为主,下部多见晶洞状及鲕状白云岩,上部为灰白色厚层块状中晶白云岩。该群白云岩厚度大、结构均质,中厚层构造利于溶蚀作用持续发育,形成大规模溶孔、溶隙网络,溶孔连通性强,透水性显著优于石冷水组。此外,娄山关群缺乏泥质夹层,岩体整体破碎度高,节理裂隙密集,为岩溶裂隙水的富集与运移提供了优越条件。

1.2.2 前震旦系板溪群浅变质岩的隔水屏障效应

研究区南东角广泛出露前震旦系板溪群番召组(Pt_f)浅变质岩,岩性分为两段:一段为灰、灰绿色中厚层板岩及粉砂质绢云母板岩,夹变余长石石英砂岩;二段为黄绿色含砂质绢云母板岩,总厚约500m。该套岩层因经历区域变质作用,结构致密,孔隙度极低,透水性近乎为零,与北西侧寒武系白云岩呈断层接触。板溪群浅变质岩在区内形成天然隔水屏障,阻隔了岩溶地下水向南东方向的侧向运移,迫使地下水流向沿断层带或北西侧白云岩区集中排泄。其阻水效应在龙井街大断层南东盘尤为显著,断层线上出露的黄土屯大泉(流量>50L/s)即为地下水受阻后沿断层破碎带集中排泄的典型例证。板溪群的隔水作用不仅强化了水文地质单元的独立性,也为区内含水层边界划分提供了明确的地质依据^[7]。

1.3 水文地质单元划分

1.3.1 独立水文单元的补给区与排泄路径

研究区受龙井街大断层及前震旦系板溪群浅变质岩隔水层控制,形成独立的水文地质单元,如图2所示。该单元北西侧以寒武系白云岩为主体,南东侧被板溪群浅变质岩阻隔,边界清晰,地下水系统相对封闭。补给区主要位于华联厂、赖坡及薅支坪一带的冲沟区域,汇水面积约4km²。该区域地势开阔平坦,地表覆盖层渗透性较好,加之寒武系白云岩节理裂隙发育,大气降水可通过裂隙网络快速入渗补给地下水。排泄路径受构造与地形双重控制。地下水自补给区沿北西侧白云岩裂隙网络向东南方向迳流,最终在龙井街断层带附近受阻,沿断层破碎带集中排泄。典型排泄点如黄土屯大泉(流量>50L/s),其排泄量占区域总排泄量的60%以上;其余部分通过溪沟低洼地段的浸流或侧向迳流排泄至巴拉河河谷。水文单元内补-径-排系统具有显著的空间分异性,断层阻隔与岩性差异共同决定了地下水运移的定向性与集中性。

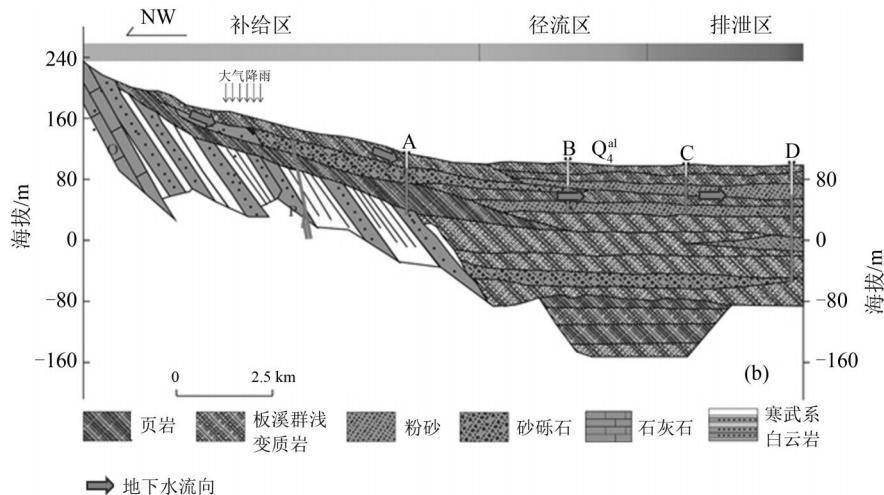


图 2 水文地质分区示意剖面图

1.3.2 大气降水入渗机制与渗补给量

研究区地下水补给以大气降水为主导,年均降水量 1234.5mm,雨季(6~9 月)集中降水占全年 70%以上。由于沟谷下切不深,沟谷地势相对开阔平坦,约 6km²,有着广泛接受大气降水入渗补给的优越条件。据凯里岩溶地下水调查资料得知,大气降水对地下水的补给方式,是通过细小裂隙、溶隙的缓慢下渗补给为主,补给期主要在雨季的中后期。本文根据水资源均衡原理,河流排泄量之和与年降水总量均衡。日均大气降水渗入补给量计算如下所示:

$$Q = \alpha \cdot F \cdot X / 365$$

式中: Q 为日均大气降水渗入补给量, 渗入系数 $\alpha = 0.29$, F 为有效汇水面积 (6km²), X 为年均降水量 (1234.5mm)。计算结果表明: 大气降水渗入补给量 29565.70m³/d, 即研究区地下水系统每天能从大气降水中获得约 2.96 万 m³ 的水量补给, 这是维持区域地下水可持续性的核心来源。

2 水文地质特征与含水层划分

2.1 地下水赋存与运移特征

2.1.1 岩溶裂隙水的均质性及富集规律

研究区地下水以岩溶裂隙水为主, 其赋存与运移特征受岩性及构造控制显著。娄山关群白云岩因中厚层构造、晶洞发育及节理裂隙密集,

溶孔连通性强, 形成均质性较好的含水层。钻探成果及抽水试验数据显示, 该群白云岩渗透系数 (K) 普遍 > 0.3m/d, 单井出水量达 700~1800m³/d, 地下水富集规律表现为“构造控水、岩性定界”。例如, ZK2#深井在 141.40~173.60m 段揭露的破碎白云岩层, 涌水量达 1210.46t/d, 反映溶蚀网络发育带内地下水的均质富集特征^[8]。

相比之下, 石冷水组白云岩因泥质夹层与硅质条带频繁交替, 层理面密集, 溶孔连通性较差, 地下水赋存呈现局部不均质性。ZK1#深井中, 52.65~78.90m 段岩体破碎, 透水性较好, 而相邻层段(如 78.90~83.50m)因岩体完整, 测井成果表明其赋水性与透水性骤降, 形成富水段与隔水段交替分布的格局。此类不均质性表明, 石冷水组地下水富集受层理面与裂隙网络耦合控制, 富水区多集中于构造破碎带或厚层白云岩段。

2.1.2 断层带对地下水运移的通道作用

龙井街大断层 (F6) 及次级断裂带是研究区地下水运移的核心通道。断层破碎带内岩体挤压破碎, 节理裂隙密集发育, 渗透系数 (K) 可达 2.5m/d, 显著高于围岩。地下水沿断层带自北西侧白云岩区向南东侧运移时, 受前震旦系板溪群浅变质岩阻隔, 被迫沿断层破碎带集中排泄, 形成黄土屯大泉(枯季流量 > 50 L/s, 丰水期达 300L/s)。该泉群排泄量占区域总排泄量的 60% 以上, 成为地下水系统的关键排泄节点。

断层带的通道作用还体现在其对地下水运移路径的控制上。物探数据表明,断层带内电阻率异常区与 ZK2#深井高涌水段(如 77.90~113.20m)空间位置高度吻合,证实断层破碎带为地下水优势运移通道。此外,断层带内溶蚀孔洞的垂向连通性增强,使得地下水可沿断层面向深部循环,形成多层含水结构。这种“断层导水、岩性控界”的运移模式,不仅提高了地下水资源的可采性,也为靶区优选提供了地质依据。

2.2 地下水动态特征

2.2.1 季节性动态变化规律

研究区地下水动态受亚热带湿润气候影响显著,降水季节分配不均(6—9月降水量占全年70%)直接驱动含水层水位与水量的周期性波动。雨季(6—9月)大气降水通过岩溶裂隙快速入渗,地下水补给量显著增加,导致含水层水位抬升(平均抬升幅度5~8m),泉流量及深井涌水量同步增大。如黄土屯大泉在丰水期流量可达300L/s以上,较枯季(150L/s)翻倍;ZK2#深井在雨季抽水试验中,同等降深条件下涌水量较枯季提升约12%。枯水期(10月—次年5月)降水减少,地下水补给量降低,水位逐步回落(平均回落幅度3~5m),泉流量及深井涌水量趋于稳定。

地下水迳流速度受季节影响呈现差异:雨季水力坡度增大,渗透系数K值由枯季的0.5~1.0m/d提升至1.5~2.0m/d,地下水运动速度加快至每日12~15m;枯季水力坡度减小,迳流速度回落至每日8~10m,符合层流运动特征。这种季节性动态变化与大气降水入渗系数(雨季 $\alpha=0.35$,枯季 $\alpha=0.15$)的波动规律一致,反映了岩溶裂隙水系统对气候条件的敏感响应^[9]。

2.2.2 水位与降深的动态响应关系

ZK2#深井抽水试验数据表明,地下水水位对人工开采的动态响应具有明显阶段性特征。静止水位埋深39.50m,当降深12.70m(动水位52.20m)时,涌水量达14.01L/s(1210.46t/d),单位涌水量1.10L/(s·m),显示含水层具有较强的释水能力。水位降深与涌水量呈非线性关系:降深小于10m时,涌水量随降深增加呈线性

增长;降深超过10m后,受岩溶裂隙连通性差异影响,涌水量增速放缓,表明深部含水层渗透性存在非均质性。涌水量-降深关系曲线如图3所示。

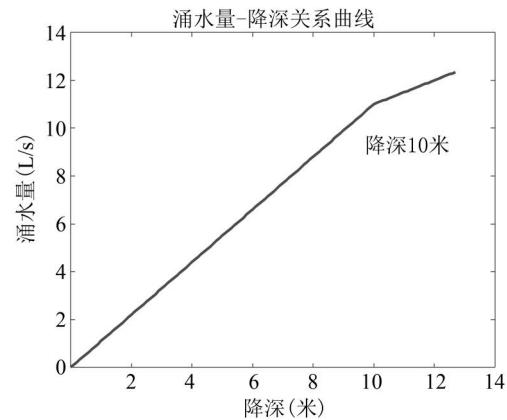


图3 ZK2#涌水量-降深关系曲线

抽水过程中动水位波动反映了含水层的动态调节机制:初期(0~4小时)水位快速下降,降深速率0.8~1.2m/小时;4小时后下降速率减缓至0.2~0.4m/小时,6~8小时后趋于稳定,显示含水层通过裂隙网络的侧向补给实现动态平衡。停抽后水位恢复迅速,12小时内恢复至静止水位的85%,24小时后基本恢复,表明含水层具有良好的径流补给条件。ZK2#深井水位降深动态响应如图4所示。

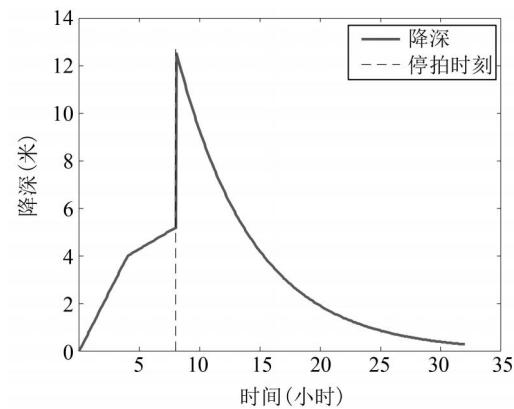


图4 ZK2#深井水位降深动态响应

2.2.3 水质动态特征与影响因素

地下水水质动态受补给源、径流路径及人类活动共同影响。天然状态下,地下水为 $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$ 型水, pH值7.1~7.8,矿化度0.24~

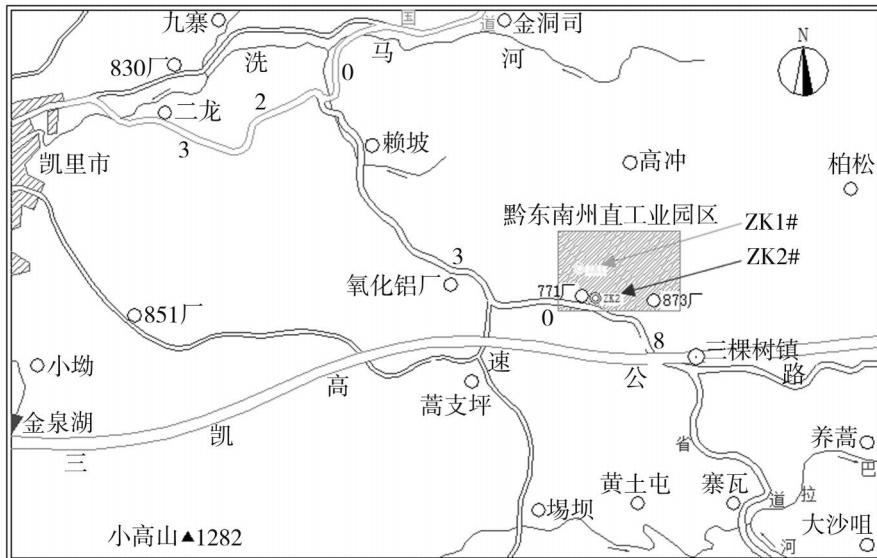


图 5 深井位置示意图

0.45g/L,水质优良且动态稳定。雨季降水入渗携带地表碎屑及少量有机质,初期洗井水质呈浅褐红色、含砂量高,经7天持续抽水洗井后水质转清,反映地表污染对浅层含水层的短期影响。

长期动态监测显示,地下水水质随径流深度呈现分异:浅部含水层(0~50m)受地表影响显著,雨季硝酸根离子(NO_3^-)浓度可升高至12mg/L(枯季8mg/L),硫酸盐(SO_4^{2-})浓度波动幅度10%~15%;深部含水层(>100m)水质更稳定,离子浓度波动幅度<5%,表明深部岩溶系统具有更强的自净能力。此外,ZK2#深井周边工业活动可能导致微量重金属元素(如Mn、Fe)浓度在开采初期略有升高(Mn浓度0.12mg/L,超出国标0.1mg/L),但经持续抽水后浓度逐步回落,反映含水层对污染的稀释作用。

2.2.4 人类活动对地下水动态的影响

工业开采是影响地下水动态的主要人类活动因素。ZK2#深井实际取水量 1200t/d, 占区域日均入渗补给量 (29565.70t/d) 的 4.06%, 短期开采对区域地下水系统影响有限。但长期持续抽水可能导致局部水位下降, 形成以井为中心的降落漏斗。模拟预测显示, 若保持 1200t/d 开采量, 10 年后井周 500m 范围内水位降深约 2~3m, 漏斗影响半径扩展至 1.2 公里, 需警惕漏斗扩展至断层带后可能引发的排泄条件改变。

地表工程建设(如泵房施工、道路开挖)可能破坏天然隔水层,导致地表水入渗加剧。ZK2#深井所处冲沟交汇处易受山洪侵袭,若井口密封不严,雨季地表水可能携带污染物渗入井内,引发水质恶化。

2.3 含水层与隔水层划分依据

2.3.1 岩体破碎度、节理裂隙发育程度及溶孔连通性

研究区含水层与隔水层的划分主要基于岩体完整性、节理裂隙发育程度及溶孔连通性等地质参数。寒武系白云岩地层中,相对含水层分布于岩体破碎、节理裂隙密集且溶孔连通性良好的地段,其透水性强,地下水赋存空间广泛^[10-13]。

溶蚀孔洞的连通性对含水层划分尤为关键。娄山关群白云岩因中厚层构造及晶洞发育,溶孔连通性强,形成区域性主含水层;而石冷水组因泥质夹层及硅质条带频繁交替,层理面密集,溶孔发育受限,透水性显著低于娄山关群。通过高密度电法勘探与钻探验证,区内渗透系数(K)与岩体破碎度呈正相关, K 值 $>0.3\text{m/d}$ 的时段均被划为含水层。

2.3.2 深井的岩性组合对比分析

深井位置如图 5 所示, ZK1#与 ZK2#深井的岩性组合对比为含水层划分提供了直接工程证据。ZK1#深井揭露的石冷水组白云岩中, 隔水

层与含水层呈相间分布:0.00~52.65m段为泥质白云岩夹硅质条带,岩芯采取率>85%,透水性差;而52.65~123.06m段以破碎白云岩为主,岩芯破碎率>40%,透水性显著增强。ZK2#深井(井深173.60m)进一步验证了这一规律:在11.80~48.80m、77.90~113.20m及141.40~173.60m段,岩体破碎且溶孔连通,涌水量达1210.46t/d;而48.90~77.80m及113.30~141.30m段岩体完整,透水性较差,为次要出水段。

两井对比表明,岩性组合的空间分异与构造破碎带密切相关。龙井街大断层及其次级断裂带内,白云岩层间挤压破碎加剧,形成高渗透性含水层;而远离断层的完整岩体则构成隔水边界。这些现象均说明岩体完整性指数与渗透系数(富水性)具有一定的量化关系,这种构造-岩性耦合特征为含水层划分提供了双重依据:构造控水决定了富水区空间展布,岩性定界明确了隔水层的地质屏障作用。通过物探异常区与钻探数据的匹配分析,最终实现了含水层三维边界的精准圈定。

3 工程应用与建议

3.1 ZK2#深井工程实践

ZK2#深井井位依据ZK1#水文勘察成果,借助物探捕捉地下电性差异,圈定岩溶裂隙富水区,确定在七七一厂前区308省道北侧稻田中。此处属龙井街断层北西盘,寒武系石冷水组白云岩受次级断裂影响岩石破碎,节理密集。设计井深180m,实际钻至173.6m,穿透11.8m第四系覆土层及石冷水组,揭露三段主要含水层与两段次要出水段。

成井采用8mm厚无缝钢管,按井壁完整性分段配置:井口段-1.00~17.00m用Φ325mm实管止水;上部0.20~83.80m以Φ273mm管材组合实管与穿孔筛管护壁滤水;深部83.80~173.60m用Φ219mm实管支撑。管材通过环形钢板焊接确保同心,底部水泥浆止水。

破碎段(37.80~71.80m、77.80~83.80m)

采用Φ273mm穿孔筛管,孔眼10~15mm梅花形排列,孔隙率15%~20%,焊连时设止水环。覆土层段以Φ325mm实管配水泥浆护壁。“实管护壁+筛管滤水”模式解决岩溶破碎岩体成井难题,成井后涌水量1210.46m³/d,验证了技术合理性。

3.2 抽水试验与涌水量验证

ZK2#深井抽水试验采用24小时连续观测,当降深12.70m(动水位52.20m)时,实测涌水量为14.01L/s(合1210.46m³/d),单位涌水量达1.10L/s·m,显示含水层具有较强的释水能力。试验数据表明,水位降深与涌水量呈非线性关系:降深小于10m时,涌水量随降深增加呈线性增长;降深超过10m后,受岩溶裂隙连通性差异影响,涌水量增速放缓,反映深部含水层渗透性存在非均质性。动水位观测采用CS-3型抗干扰水位测量仪,确保了水位数据的可靠性。

本次抽水试验采用空压机抽水方法,但存在显著局限性:扬水管与风管的浸没比仅为44%,未达到60%~70%的理想值,导致试验过程中出现短时间断流现象,同时三角堰水位在15~21cm范围内波动剧烈,影响了涌水量测量的精度。由于设备参数未达理想状态,试验流量观测值取下限值作为最终数据。

尽管存在设备局限性,但试验结果仍具备工程参考价值:一方面,涌水量数据与区域水文地质计算的大气降水入渗补给量(29565.70m³/d)吻合,验证了含水层富水性;另一方面,抽水过程中动水位恢复迅速,12小时内恢复至静止水位的85%,24小时后基本恢复,表明含水层径流补给条件良好。后续若采用深井泵进行抽水试验,可进一步提高数据精度。

3.3 水资源开发建议

泵房防洪设计与水质保护措施方面,因ZK2#井位于冲沟交汇处,易受山洪侵袭,需将泵房±0.00高程抬升至历史洪水位以上,井口周边设截水沟与防渗墙,防止地表径流倒灌,同时井口泵座与地表接触处用环氧树脂密封,阻断地表

水入渗通道。水质保护需每季度采集井水样品化验,监测 pH 值、矿化度、重金属及微生物含量,井口区域禁止堆放工业废料,泵房周边设置防渗池,避免油污渗漏污染地下水。

长期动态监测与含水层可持续利用策略上,布设精度 $\pm 10\text{cm}$ 的水位自动监测仪,实时记录静水位与动水位变化,建立电参数监测台账,通过水泵运行数据反演含水层渗透性,每年开展 2 次抽水试验对比涌水量衰减趋势。可持续利用需控制抽水量 $\leq 1200\text{t/d}$,不超过日均入渗量的 4.06%,采用“轮采-休采”模式,每 5 年进行 1 次含水层恢复评估,若井周 500m 内水位降深超 3m,及时调整开采方案。

4 结论

本文系统揭示了黔东南州寒武系白云岩地层水文地质特征及含水层划分规律。研究表明,区内含水层与隔水层划分受岩体完整性、节理裂隙发育程度及断层控制显著,地下水以岩溶裂隙水为主,补给来源为大气降水,日均入渗量达 29565.70m^3 。ZK2#深井涌水量 $1210.46\text{m}^3/\text{d}$,验证了“构造控水、岩性定界”的含水层划分原则及富水性评价模型的合理性。研究成果为复杂构造岩溶区地下水资源精准开发提供了量化依据,其“物探圈定-钻探验证-工程优化”的技术路径对类似区域水文地质研究具有重要参考价值。

参考文献(References):

- [1] 李源洪,杜红毅,陈军,等.贵州余庆地区层间破碎带热液型重晶石矿床地球化学特征与成因分析[J].地质科技通报,2025,44(03): 122-133.
- [2] 龙本力,张业果.黔东岩溶地区找水打井分析研究——以松桃长坪一带为例[J].有色冶金设计与研究,2018,39(06): 144-146.
- [3] 魏啟杨,李少飞,李锡均.岩溶水动力类型的勘察和分析方法的探索与实践[J].水利水电技术(中英文),2024,55(S1): 166-169.
- [4] 金中国,郑明泓,黃智龙,等.黔西北与黔东铅锌成矿区地质地球化学特征对比及其地质意义[J].矿床地质,2023,42(03): 531-547.
- [5] 尹巍.黔东铜仁地区牛蹄塘组页岩沉积特征及有机质富集机理[D].北京:中国石油大学(北京),2023.
- [6] 卢正浩.黔东埃迪卡拉系-寒武系斜坡相黑色岩系沉积环境演化研究[D].贵阳:贵州大学,2022.
- [7] 喻显涛.黔东盘石地区寒武系第二统清虚洞组小型化遗迹化石的成因及意义[D].成都:成都理工大学,2022.
- [8] Jacob(鲁邦) L. 裂隙水和岩溶水地球物理建模及其综合地球物理勘探[D].长沙:中南大学,2023.
- [9] 熊飞,刘新荣,冉乔,等.采动-裂隙水耦合下含深大裂隙岩溶山体失稳破坏机理[J].煤炭学报,2021,46(11): 3445-3458.
- [10] 黄学勇,高茂生,侯国华,等.莱州湾海洋沉积物粒度特征及其环境响应分析[J].华东地质,2023,44(04): 402-414.
- [11] 邢润华,吴正,杜国强.安徽省宣州区土壤重金属污染风险评估及来源分析[J].华东地质,2022,43(03): 336-344.
- [12] 张靖怡,张舒,张赞赞,等.北淮阳东端牛王寨岩体年代学及地球化学研究:对大别造山带早白垩世深部地质过程的制约[J].华东地质,2022,43(02): 141-153.
- [13] 朱茂炎,孙智新,杨爱华,等.中国寒武纪岩石地层划分和对比[J].地层学杂志,2021,45(03): 223-249.

作者简介:

第一作者/通讯作者:全宏林,1990 年生,男,贵州天柱人,贵州省有色金属和核工业地质勘查局六总队,工程师,主要研究方向为勘查技术与工程。Email: 1175782528@qq.com

Study on the Hydrogeological Characteristics of Cambrian Dolomite Strata and the Division of Aquifers for the Industrial Park in Qiandongnan Prefecture

QUAN Honglin

(Geological Party, Non-Ferrous Metals and Nuclear Industry Geological Exploration Bureau of Guizhou, Kaili 556000, China)

Abstract: The industrial park in Qiandongnan Prefecture is located in a complex geological structure zone, and the Cambrian dolomite strata are the key layers where groundwater occurs in the region. In this study, through hydrogeological investigation, geophysical water exploration and well-drilling engineering practice, the hydrogeological characteristics of the Cambrian Shilongshui Formation and the dolomite of the Longshanguan Group were systematically analyzed. The research results show that the division of aquifers and impermeable layers in the area is significantly controlled by rock mass integrity, the development degree of joints and fractures, and faults. The groundwater is mainly karst fissure water, and the recharge source is atmospheric precipitation with an average daily infiltration volume of 29565.70m^3 . The water inflow of deep well ZK2 # was $1210.46\text{m}^3/\text{d}$, verifying the rationality of the aquifer division. The research provides a theoretical basis and engineering reference for the development of groundwater resources in similar karst areas.

Key words: Cambrian dolomite; hydrogeological characteristics; division of aquifers; Karst fissure water

完达山大顶子山蛇绿岩地球化学及其构造意义

孙 刚, 杨云宝, 孙 健*, 林大治, 赵世猛, 郭凤磊

(黑龙江省第一地质勘查院, 黑龙江 牡丹江 157011)

摘要:本文对完达山大顶子山蛇绿混杂岩开展了岩相学、锆石 U-Pb 年代学和岩石地球化学研究,厘定了蛇绿混杂岩的岩石组成及其形成时代,探讨了岩石形成构造环境和就位机制。大顶子山蛇绿岩位于完达山地体东部大顶子山至坨瑶山的南北向蛇绿混杂岩条带内,呈构造透镜体分布于晚三叠-早侏罗世大岭桥组(泥质碎屑岩)中,呈北北东向带状展布,由东侧超镁铁质堆积杂岩(以橄榄岩为主)和西侧为镁铁质堆积杂岩(以辉长岩为主)组成,其锆石 U-Pb 年龄显示为 159.61 ± 0.44 Ma 和 138.4 ± 0.72 Ma, 属中侏罗世晚期-早白垩世早期。岩石地球化学研究显示其主量元素特征为低铝、低钙、富碱;稀土元素显示为稀土元素总量较高,介于 $17.65-105.16 \times 10^{-6}$, LREE 与 HREE 含量稳定, LREE 富集型, HREE 相对亏损, $(La/Yb)_N$ 介于 2.32-5.55, 轻重稀土分异明显, 分馏程度较大;高场强元素 Th、Nb、Ta 和大离子亲石头元素 Pb、Ba 明显富集, Sr 较亏损。蛇绿岩形成于洋岛环境, 属地幔柱型蛇绿岩, 随着太平洋板块向大陆的俯冲, 在佳木斯陆块东缘形成规模较大的增生楔。

关键词:蛇绿岩; 岩石地球化学; 锆石 U-Pb 定年; 构造环境; 完达山地体

中图分类号:P53

文献标志码:A

文章编号:1672-2736(2025)08-0106-9

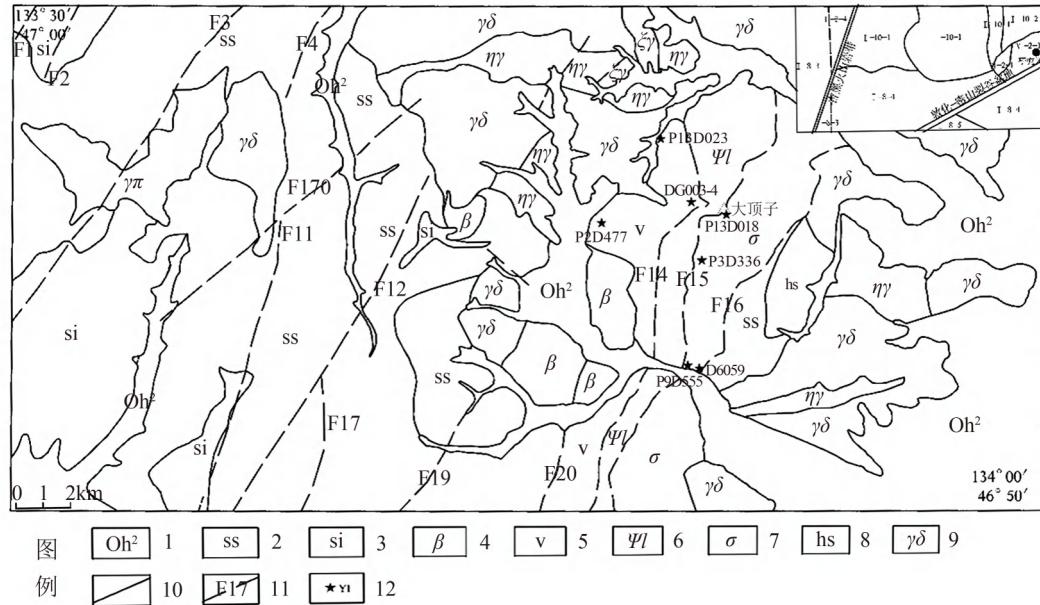
0 引言

1972 年 Penrose^[1] 会议将蛇绿岩套定义为一套特殊的超镁铁质-镁铁质岩石组合, 在地质填图中不能将其作为一个岩性单位, 也不能将其作为一个岩石的名称。蛇绿岩套可以不完整, 或经历构造肢解或变质作用改造。蛇绿岩定义为在特定构造环境中形成的非原地的上地幔和大洋地壳岩石碎片, 它们是与不同熔融事件和岩浆分异过程有关的具备时空联系的超镁铁质至长英质岩石的岩套^[2-3]。本文将以此定义为基本依据对完达山大顶子山蛇绿岩套进行系统阐述和研究。

完达山地体是东亚环太平洋构造带的重要组成部分, 同时也是中国东部中生代唯一出露的深海沉积岩地层区, 三叠纪-侏罗纪硅质岩-碎屑岩系构成了该造山带的主体, 与之伴生的为一套基性-超级基性岩组合, 构成一套俯冲增生杂岩。但前人所划分的这套中三叠-早侏罗世成

层有序的地层并不能反映增生杂岩性质, 更无法表现出太平洋板块俯冲增生的一系列过程。邵济安等曾建议, 在研究类似那丹哈达混杂地体这样复杂地区的地层时, 明确划分外来系统与原地系统, 对外来混杂岩块讨论时, 建议取消地层组名, 以免引起地层对比中的混乱与繁琐。鉴于此, 目前较为统一的观点为硅质岩-碎屑岩系作为原生系统, 而与之伴生的基性-超级基性岩为外来系统^[4]。前人对黑龙江东部完达山增生杂岩的研究包括古生物学、地层学、岩石地球化学、同位素年代学等, 在一定程度上提高了完达山增生杂岩的研究程度, 并引起了国际范围的广泛关注。但同时在以往研究中还存在诸多疑点, 比如大顶子山蛇绿混杂岩中存在的两期基性-超基性岩, 其岩性特征及分布规律, 形成时代及其与围岩接触关系都有待进一步研究厘定, 形成于何种构造环境及就位机制等诸多疑点。

本文将以大顶子山蛇绿混杂岩块为研究对象, 利用岩石学、岩石地球化学、构造地质学手



1—现代河床及低漫滩堆积;2—砂岩;3—硅质岩;4—玄武岩;5—辉长岩;6—辉石岩;7—橄榄岩;
8—角岩;9—花岗闪长岩;10—地质界线;11—推断断层;12—取样位置及编号

图 1 研究区大顶子山地质简图

段来判断其形成构造环境,结合接触关系、同位素年代学研究结果,判断其形成时代。根据上述分析结果,重建古太平洋板块中生代期间的俯冲作用过程,为揭示完达山地块中生代构造-岩浆作用过程提供重要依据。

1 地质背景

完达山地体位于太平洋板块(VI),完达山中生代造山带(VI-2),饶河造山带(VI-2-1),饶河复背斜;研究区位于大顶子山蛇绿构造混杂岩带(VI-2-1-2-2)构造单元内^[5]。完达山地区经历了十分复杂的构造演化历史,特别是在完达山蛇绿混杂岩带附近构造活动更加强烈,是洋壳物质与陆壳物质高度混杂的物质场,由遭受强烈构造变动的中三叠-早侏罗世深海硅泥质沉积及蛇绿岩残片构成,其组成物质的时、相、位、序态与原始生成时已大相径庭。

本次将完达山增生杂岩划分为两个系统,即外来系统(岩块)和原地系统(基质)^[4]。由于完达山构造带走向整体为NNE向展布,不同岩石单元也基本上呈NNE向,条带状分布^[6]。从基质和岩块的关系和分布情况来看,岩块呈漂浮

状、呈较小块体位于基质之中,与周围围岩呈断层接触,显示构造侵位的特征,被后期白垩纪花岗岩所侵入^[7]。

区内混杂岩基质以沉积岩为主,主要为砂岩(包括细砂岩、岩屑砂岩及长石岩屑砂岩)、粉砂岩、硅质岩、泥岩及少量剪切变质基质(角岩、片岩)。区内混杂岩岩块成分较复杂,沉积岩类岩块主要为硅质岩、灰岩;侵入岩类岩块主要为辉长岩、辉石岩、橄榄岩;火山岩岩块主要为玄武岩^[8-9]。

本次研究的镁铁质-超镁铁质岩石主要出露于由大顶子山至坨瑶山的南北向条带内,东西宽约6km,南北长约17km,侵位于晚三叠-早侏罗世大岭桥组中,并被早侏罗世花岗闪长岩所侵入^[10]。受到多期构造的影响,形成了复杂的构造形态。在大顶子山出露较完整,东侧为超镁铁质堆积杂岩,西侧为镁铁质堆积杂岩,二者呈相变关系,在镁铁质杂岩西侧为下部枕状熔岩,构成了蛇绿岩的完整层序(图1)。超镁铁质堆积杂岩岩性主要为单斜辉石橄榄岩、辉石橄榄岩、蛇纹石化橄榄岩、橄榄岩,其上逐渐相变为镁铁质堆积杂岩,岩性主要为辉长岩、角闪单辉岩、辉

绿岩,存在着普遍的蛇纹石化和碎裂现象^[4,6]。

2 岩石学特征

2.1 超镁铁质堆积杂岩

主要分布在蛇绿混杂岩带的东侧,岩性包括单斜辉石橄榄岩、辉石橄榄岩、蛇纹石化橄榄岩、橄榄岩。

单斜辉石橄榄岩:半自形粒状结构,块状构造。橄榄石 90%±,单斜辉石 10%±。橄榄石呈半自形-它形粒状,杂乱分布,粒间镶嵌状接触,粒度 0.2-3.5mm 不等,以 0.5-3mm 为主,粒内网状裂隙发育,常见蛇纹石沿裂隙分布并不均匀交代,局部见析出尘点状铁质。辉石为单斜辉石,半自形-它形柱粒状,杂乱分布,粒度一般 0.2-2mm,少数 2-2.6mm,具不均匀碳酸盐化、蛇纹石化,局部析出席勒状铁质。

蛇纹石化橄榄岩:半自形粒状结构,块状构造。含橄榄石 95%±,辉石假像 5%±。橄榄石多被蛇纹石及少量碳酸盐交代呈假像,极少数残留,杂乱分布,由于蚀变强多数颗粒边界模糊不清,隐约呈半自形粒状-它形粒状,粒内网状裂隙发育,微粒状铁质沿裂隙分布。辉石假像:半

自形柱粒状,零星分布,粒度一般 0.3-1.8mm,均被次闪石及蛇纹石交代呈假象并析出席勒状分布的铁质(图 2)。

2.2 镁铁质堆积杂岩

主要分布在蛇绿混杂岩带的中部,岩性包括辉石岩、橄榄辉石岩、堆晶辉长岩等。

辉石岩呈半自形粒状结构,块状构造。岩石由辉石(90-95%)、角闪石(5-10%)组成。辉石呈半自形柱状,为单斜辉石,杂乱分布,粒度一般 0.2-2mm,少量 2-2.7mm,部分被阳起石交代呈假像。角闪石呈它形粒状,黄褐色,填隙状分布于上述颗粒间,少被阳起石交代,粒度 0.1-1.3mm。另见少量被铁质充填的裂纹。

辉长岩:表面多风化呈土黄色,轻微绢云母化、少透闪石化,由斜长石(55%±)、辉石(45%±)组成,呈半自形粒状结构,块状构造。斜长石呈半自形板条状,杂乱分布,粒度一般 1-6mm,少数 0.2-1mm,轻高岭土化、绢云母化;辉石呈半自形柱状,为单斜辉石,杂乱分布,粒度一般 1-2.7mm,少部分 0.3-1mm,沿边部被次闪石交代。岩内局部可见裂隙,沿裂隙斜长石、辉石破碎呈碎粒、碎粉状,并见绿帘石充填(图 3)。

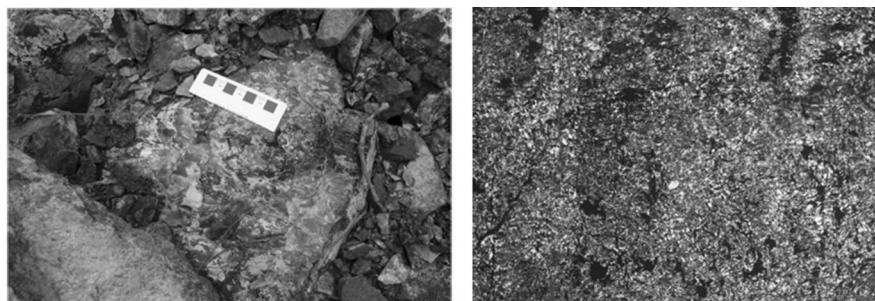


图 2 大顶子山蛇纹石化橄榄岩标本及显微照片



图 3 大顶子山辉长岩标本及显微照片

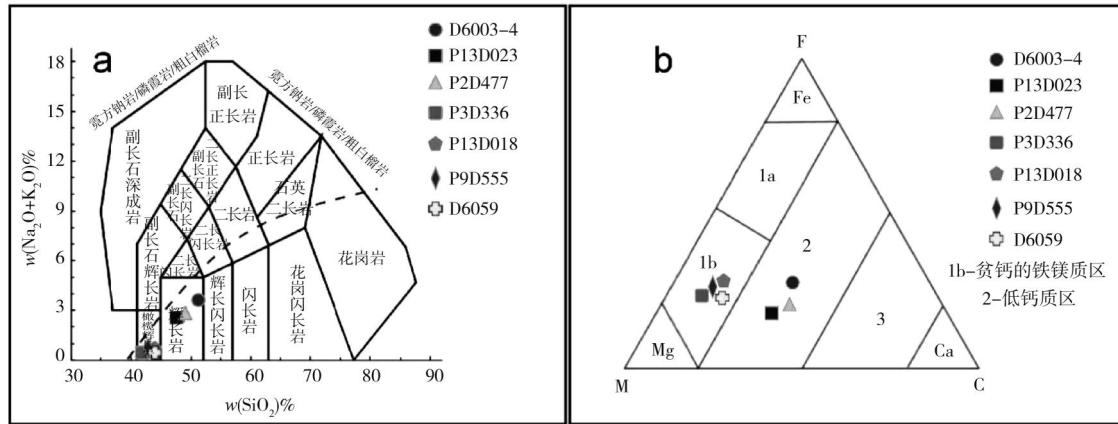


图 4 大顶子山蛇绿岩系统分类图解

3 测试结果

在蛇绿岩研究过程中,地球化学元素往往具有十分重要的示踪作用。主量、微量元素能反演岩浆形成、运移、就位等演化过程,微量元素还能反映岩浆起源区域的地质特征,并有助于恢复地壳-地幔相互作用过程以及蛇绿岩形成时的大地构造环境。

3.1 主量元素

大顶子山蛇绿岩共采集 3 件辉长岩,4 件橄榄岩(取样位置见图 1),与全碱-硅(TAS)分类图解解译成果与定名相符(图 4a),且均位于 Ir-

Irvine 分界线之下,为亚碱性系列中的拉斑玄武岩系列;其 SiO_2 含量介于 41.76~52.86%,变化范围较大, Al_2O_3 介于 1.62~14.83%,变化范围较大, MgO 含量介于 8.22~32.83%,含量较高且变化范围较大。说明其属岩浆不同时期分异形成,而 $\text{Na}_2\text{O} > \text{K}_2\text{O}$, $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO} > \text{MgO}$, CaO 含量普遍偏高(表 1)。在 FMC 图解中(图 4b),岩石投点落入低钙质区和贫钙的镁铁质区。

综上所述,蛇绿岩主要以低铝、低钙、富碱为特征。其 CIPW 标准矿物成分主要为橄榄石(镁橄榄石为主、铁橄榄石次之)、透辉石(以顽火辉石为主、铁辉石次之)^[4,8,11]。

表 1 大顶子山蛇绿岩主量元素、稀土元素和微量元素含量及相关参数表

岩性 样品号	辉长岩				辉石橄榄岩			
	D6003-4	P13D023	P2D477	P3D336	P13D018	P9D555	D6059	
SiO_2	52.86	47.68	49.68	41.76	44.02	42.72	42.22	
TiO_2	0.66	1.34	2.18	0.52	0.75	0.84	0.5	
Al_2O_3	14.83	11.4	8.92	1.62	4.55	3.11	2.47	
Fe_2O_3	3.49	0.28	1.28	6.39	3.2	6.81	4.79	
FeO	3.95	5.76	8.62	8.08	8.18	8.41	8.55	
MnO	0.15	0.1	0.16	0.2	0.15	0.23	0.21	
MgO	8.22	16.82	10.93	32.83	24.16	27.08	31.45	
CaO	8.62	12.44	12.91	5.61	11.23	7.57	7.29	
Na_2O	2.39	2.22	2.4	0.26	0.33	0.37	0.2	
K_2O	1.27	0.3	0.37	0.052	0.065	0.2	0.13	
P_2O_5	0.15	0.02	0.23	0.05	0.02	0.04	0.03	
H_2O^+	4.22	0.44	0.38	1.3	2	1.65	2.05	
H_2O^-	0.016	0.001	0.0013	0.002	0.0014	0.05	0.13	
烧失量	2.62	0.72	0.84	1.62	2.58	2.3	2.13	

续表

岩性 样品号	辉长岩			辉石橄榄岩			
	D6003-4	P13D023	P2D477	P3D336	P13D018	P9D555	D6059
A/MF	0.48	0.22	0.21	0.02	0.06	0.03	0.03
C/MF	0.51	0.44	0.57	0.1	0.27	0.15	0.14
A/CNK	0.707	0.429	0.321	0.152	0.216	0.213	0.18
La	12.7	2.58	15.7	2.82	2.47	7	2
Ce	26.6	6.39	35.9	6.75	6.54	14.1	5.1
Pr	3.5	1.02	5.05	1.03	1.16	1.69	0.76
Nd	15.4	5.47	23.2	5.21	6.05	7	3.84
Sm	3.52	1.66	5.78	1.41	1.85	1.6	1.14
Eu	1.08	0.83	1.93	0.48	0.66	0.43	0.34
Gd	3.08	1.84	5.41	1.43	1.91	1.41	1.09
Tb	0.53	0.32	0.91	0.24	0.34	0.275	0.224
Dy	3.27	1.94	5.32	1.44	2.03	1.73	1.43
Ho	0.62	0.35	0.93	0.25	0.36	0.326	0.276
Er	1.83	0.89	2.39	0.62	0.9	0.85	0.68
Tm	0.31	0.13	0.33	0.088	0.13	0.139	0.1
Yb	1.9	0.69	2.01	0.52	0.67	0.85	0.58
Lu	0.34	0.11	0.3	0.083	0.11	0.128	0.089
Y	17.2	8.49	23	6.08	8.91	8.4	7
Nb	6.6	5.2	6.1	4.9	6.6	3.4	1.3
Ta	0.36	0.36	1.32	0.24	0.16	0.23	0.11
Th	2.55	0.49	1.44	0.45	0.37	0.7	0.6
Pb	5.5	8.5	4	5.3	4	2.4	3.2
Zr	96	72	10	69	11	34.5	22
Sr	359	2054	20	760	107	48.8	68
Ba	244	238	26	207	50	47	29
Σ REE	74.68	24.22	105.16	22.371	25.18	37.53	17.65
LREE	62.8	17.95	87.56	17.7	18.73	31.82	13.18
HREE	11.88	6.27	17.6	4.67	6.45	5.7	4.47
LREE/HREE	5.29	2.86	4.98	3.79	2.9	5.54	2.95
$(La/Sm)_N$	2.2	0.95	1.66	1.22	0.81	2.67	1.07
$(La/Yb)_N$	4.51	2.52	5.27	3.66	2.49	5.55	2.32

注: 主量元素单位(%) , 稀土微量元素单位(10^{-6})。

3.2 稀土微量元素

大顶子山蛇绿岩 Σ REE = 17.65 ~ 105.16 $\times 10^{-6}$, LREE/HREE = 2.90 ~ 5.54 , 均大于 1 , 稀土元素分配特征曲线均略具右倾式分布(图 5a) , 主体与洋岛玄武岩稀土配分模式相似, 属 LREE 富集型, 同时曲线在 Gd 处呈低谷状, 说明 Gd 相对亏损, 为 Gd 负异常, 曲线在 Eu 处呈现不明显的峰状, 说明 Eu 相对富集, 为 Eu 正异常。除 Y3 和 Y6 $(La/Sm)_N < 1$, 其他样本 $(La/Sm)_N = 1.07 \sim 2.67$ 均大于 1 , 为 P 型, 即富集型, 说明 LREE 分

馏程度较大, 属地幔热柱型。这种稀土分布模式整体与典型洋岛玄武岩(OIB)REE 球粒陨石标准化图解相似(Sun and McDonogh, 1989)。

从表 1 及图 5b 中可看出, 高场强元素 Th、Nb、Ta 和大离子亲石元素 Pb、Ba 明显富集, Sr 较亏损。其中各岩石曲线有较高的相似性, 表明其岩浆有同源性, 差异性则可能与其成岩的条件有关。随着元素不相容性从左至右逐渐降低, 配分曲线渐于平缓, 说明源区发生过一定程度的部分熔融^[4,8,11]。

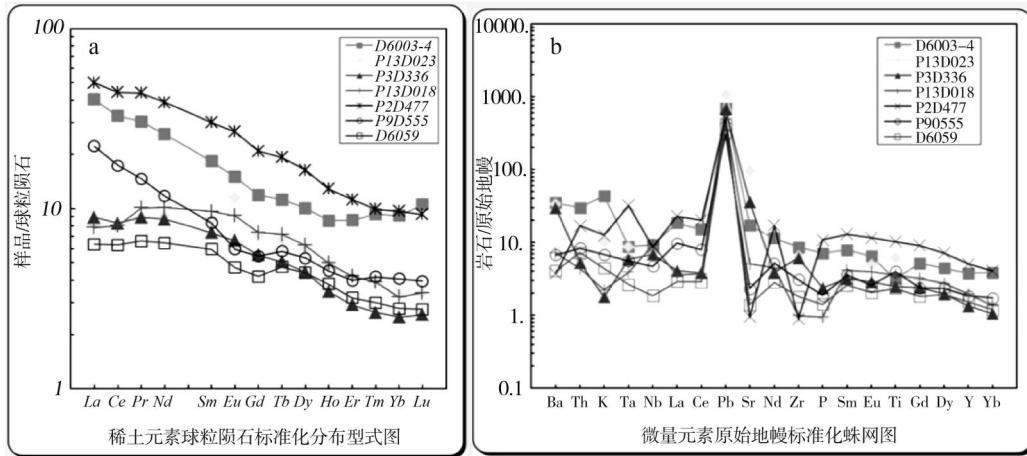


图 5 大顶子山蛇绿岩球粒陨石标准化稀土元素配分曲线(a)和微量元素原始地幔标准化蛛网图(b)

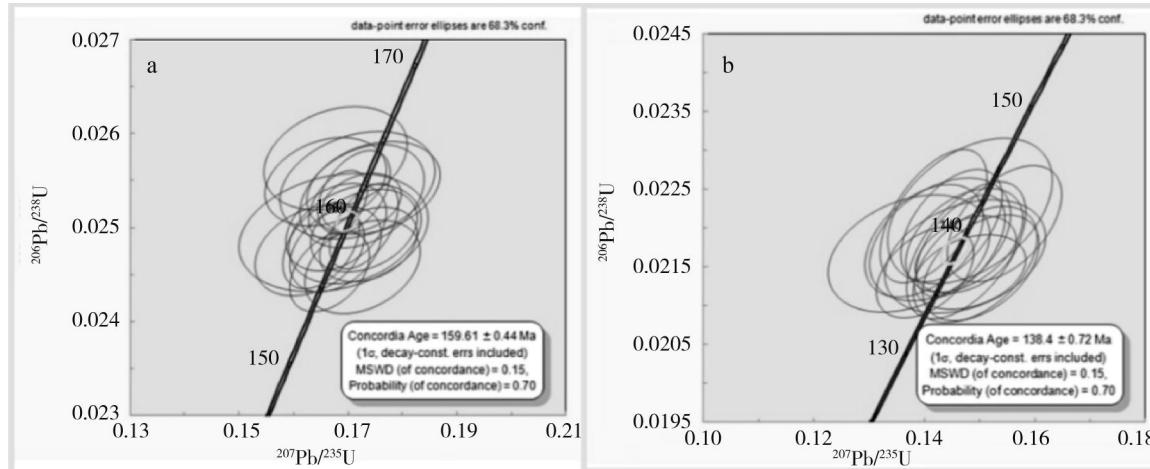


图 6 Y5 辉长岩和 Y4 苏长辉长岩锆石谐和年龄图

3.3 年代学特征

本次工作针对蛇绿岩采取 2 件样品, 岩性分别为辉长岩、辉石橄榄岩, 分别为 P3D336 辉石橄榄岩, 年龄值为 $159.61 \pm 0.44 \text{ Ma}$ (图 6a), D6003-4 辉长岩, 年龄值为 $138.4 \pm 0.72 \text{ Ma}$ (图 6b)。该年龄代表岩浆的结晶年龄, 属中侏罗世晚期-早白垩世早期。

大顶子山二长花岗岩年龄值为 129.36 Ma , 花岗闪长岩年龄值为 $118.03 \text{ Ma} - 128.48 \text{ Ma}$ 之间, 属早白垩世晚期。而在石场林场附近复理石砂岩中碎屑锆石最年轻的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 加权平均年龄为 $165 \pm 4.6 \text{ Ma}$, 最老的为 $297.5 \pm 1.4 \text{ Ma}$, 属上三叠统-下侏罗统^[4,12-15]。这与前文提到的蛇绿岩岩块覆盖于砂岩基质之上, 被后期早白垩世花岗岩所侵入的接触关系一致。

4 形成探讨

4.1 源区性质探讨

大顶子山蛇绿岩具明显堆晶结构, 该岩石样品富 Mg、富 Ti, LREE 轻微富集, 指示来自富 Fe、Ti 和 LREE 的岩浆。高场强元素 Th、Nb、Ta 和大离子亲石元素 Pb、Ba 明显富集, 岩石样品中 Ba、Pb、Th 等较活泼元素基本未遭受蚀变的影响, 这些特征在很大程度上类似于未经地壳混染的洋岛玄武岩。岩石地化数据显示, 大顶子山蛇绿岩中 Na_2O 含量较高, P、Ti 含量也相对较高, $\text{P}_2\text{O}_5/\text{Al}_2\text{O}_3$ 比值低(平均值约为 0.014), 表明辉长岩产于较低程度的熔融, REE 的强烈分馏也表明源区为含石榴子石相的橄榄岩。同时该类岩石稀土分布模式与典型洋岛玄武岩 (OIB)

REE 球粒陨石标准化图解相似,形成于洋岛环境,属地幔柱型蛇绿岩^[4,7,15]。

综上,大顶子山蛇绿岩岩石样品基本未受地壳混染作用影响,因此可以排除该岩浆起源于岩石圈地幔的可能性,结合岩石的微量、主量分析,本文认为该岩石样品为地幔柱尾部较低程度熔融的产物。

4.2 构造环境

研究区位于完达山中生代造山带(VI-2),饶河造山带(VI-2-1),饶河复背斜^[5]。饶河造山带总体上呈近南北,略向西突出的弧形,显示向西邻宝清过渡带逆掩推覆^[15-16]。饶河造山带是由三叠系中、上统硅质岩建造地层组成核部和上三叠世-下侏罗世具典型浊流沉积特征的大岭桥组地层组成翼部的复式背斜,即饶河复背斜,造山同期,在背斜边缘发育花岗岩,背斜两翼逆冲断层发育,具明显的对冲形式,并发育北北东和北西向斜交断裂^[4,17,18]。

饶河地区整体表现为侏罗-三叠纪深海相硅质岩、镁铁质-超镁铁质杂岩以及晚古生代浅海相碳酸盐岩呈构造透镜体分布于白垩系泥质碎屑岩中。大顶子山蛇绿岩为饶河造山带的最重要组成部分,是黑龙江省最大的超基性岩带,分布于完达山东侧,即饶河复背斜东翼。蛇绿岩主要出露于研究区内东南部及区外南部(大顶子山及其周边),岩体多呈似层状、层状、扁豆状产出,呈近南北向略向西突出的弧形带状分布,其展布方向与区域构造线方向基本一致。1:20万区调对其进行了较详细的研究,认为这些岩石组合可以与现代大洋进行对比,应为古洋壳的残片,即蛇绿岩,可作为古板块俯冲带的重要标志之一。由于洋壳的俯冲作用,导致完达山-锡霍特-阿林超地体与佳木斯地体发生碰撞,并拼贴于佳木斯地体东缘;晚中生代早期,由于洋壳的俯冲作用,地幔岩浆底辟上涌到完达山地块东部,形成大顶子山-房托山镁铁-超镁铁岩体(蛇绿岩体),该期岩浆活动成矿作用较弱,基本不成矿。蛇绿岩侵位于晚三叠-早侏罗世大岭桥组中,并被早侏罗世花岗闪长岩所侵入。本区蛇

绿岩由于受到多期构造的影响,形成了复杂的构造形态。

综合前人研究成果认为晚石炭世-晚侏罗世完达山俯冲增生杂岩带归属于古太平洋构造域。完达山俯冲增生杂岩-砂岩碎屑锆石存在新太古代-元古代-古生代-中生代测年数据,暗示其物源主体来源于佳木斯-兴凯地块,以此推测佳木斯-兴凯地块东侧晚古生代-中生代弧盆系的基底为陆壳。

4.3 就位机制探讨

饶河地区整体表现为侏罗-三叠纪深海相硅质岩、镁铁质-超镁铁质杂岩以及晚古生代浅海相碳酸盐岩呈构造透镜体分布于白垩系泥质碎屑岩中。饶河地区大顶子辉长岩、橄榄岩地球化学特征显示,岩石地化具有典型的 OIB 性质,说明饶河蛇绿岩产于大洋洋岛环境,整体特征类似于 Dilek (2011) 划分方案中的地幔柱型蛇绿岩,随着太平洋板块向大陆的俯冲,由于这部分岩石密度小、地形突出,容易在俯冲过程中被刮削下来,并构成板块俯冲增生楔的主体,形成现今的饶河蛇绿岩。该岩块整体呈近北北东向的条带状分布,与围岩均呈断层接触,显示构造侵位的特征,围岩为一套上三叠-下侏罗统硅质岩,形成阶段为中侏罗世晚期-早白垩世期间。该期间,洋壳的俯冲消减,在靠近海沟处,形成厚的砂岩和复理石沉积。洋壳上部沉积物及驮载的海山等增生于佳木斯陆块东缘,形成规模较大的增生楔。130Ma 以后,中酸性岩的侵入,代表着增生作用结束,进入活动大陆边缘演化阶段。

5 结论

(1) 大顶子山蛇绿混杂岩岩块主要由东侧超镁铁质堆积杂岩(以橄榄岩为主)和西侧为镁铁质堆积杂岩(以辉长岩为主)组成。锆石 U-Pb 年龄显示为 159.61 ± 0.44 Ma 和 138.4 ± 0.72 Ma, 形成时代属中侏罗世晚期-早白垩世早期。

(2) 蛇绿岩主要以低铝、低钙、富碱为特征。大顶子山蛇绿岩 LREE/HREE 均大于 1, (La/

Sm_{N} 多大于 1, 属 LREE 富集型, 分馏程度较大; 高场强元素 Th、Nb、Ta 和大离子亲石元素 Pb、Ba 明显富集, Sr 较亏损。

(3) 蛇绿岩岩块产于大洋洋岛环境, 属地幔热柱型; 随着太平洋板块向大陆的俯冲, 由于这部分岩石密度小、地形突出, 在佳木斯陆块东缘形成规模较大的增生楔。

参考文献(References):

- [1] Barbarin B A. A review of the relationships between granitoid types, their origins and their geodynamic environments[J]. *Lithos*, 1999, 46(03): 605–626.
- [2] 田东江, 周建波, 郑常青, 等. 完达山造山带蛇绿混杂岩中变质基性岩的地球化学特征及其地质意义[J]. *矿物岩石*, 2006, 26(03): 64–70.
- [3] 康宝祥, 张海驷, 刘春山, 等. 那丹哈达岭饶河蛇绿岩及其地质意义[J]. *黑龙江地质*: 1990, 1(01): 3–18.
- [4] 杨云宝, 刘兆龙, 等. 黑龙江省 1: 5 万石厂幅(L53E007007)、关门咀子幅(L53E007008)区域地质调查报告[R]. 牡丹江: 黑龙江省第一地质勘查院, 2018.
- [5] 张铁安, 韩松山, 张昱. 中国区域地质志·黑龙江志[M]. 北京: 地质出版社, 2022: 1–1700.
- [6] 张国宾. 黑龙江省东部完达山地块区域成矿系统研究[D]. 长春: 吉林大学, 2014.
- [7] 杨言辰, 黄永卫, 等. 完达山成矿区金多金属矿成矿规律研究与成矿预测报告[R]. 牡丹江: 黑龙江省第一地质勘查院, 2018.
- [8] 田东江. 完达山造山带的地质-地球化学组成及其演化[D]. 长春: 吉林大学地球科学学院, 2007.
- [9] 李继亮. 增生型造山带的基本特征[J]. *地质通报*, 2004, 23(09): 947–951.
- [10] 程瑞玉. 黑龙江省东部饶河地区花岗岩时代及其成因[D]. 长春: 吉林大学, 2006.
- [11] 李光辉. 黑龙江完达山-太平岭成矿带成矿系列与找矿预测[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2011.
- [12] 程瑞玉, 吴福元, 葛文春, 等. 黑龙江省东部饶河杂岩的就位时代与东北东部中生代构造演化[J]. *岩石学报*, 2006, 22(02): 353–376.
- [13] 范蔚茗, 郭峰, 高晓峰, 等. 东北地区中生代火成岩 Sr-Nd 同位素区划及其大地构造意义[J]. *地球化学*, 2008, 37(04): 361–372.
- [14] 许文良, 王枫, 孟恩, 等. 黑龙江省东部古生代-早中生代的构造演化: 火成岩组合与碎屑锆石 U-Pb 年代学证据[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2012, 42(05): 1378–1389.
- [15] 王继尧, 杨言辰, 黄永伟, 等. 黑龙江东部完达山地体蛇绿岩形成时代及其构造意义[J]. *地球科学与环境学报*, 2016, 26(02): 182–195.
- [16] 邵济安, 唐克东. 中国东北地体与东北亚大陆边缘演化[M]. 北京: 地震出版社, 1995: 185.
- [17] 邱殿明. 黑龙江省东部岩石圈演化特征[D]. 长春: 吉林大学, 2005.
- [18] 杨继权, 王秀琴, 刘殿生, 等. 黑龙江省大地构造单元划分及特征[J]. *世界地质*, 2007, 26(04): 426–434.

作者简介:

第一作者: 孙刚, 1984 年生, 男, 湖北潜江人, 硕士, 黑龙江省第一地质勘查院, 高级工程师, 主要研究方向为矿产勘查与矿床成因方向。Email: sg9102123@126.com;

通讯作者: 孙健, 1983 年生, 男, 吉林蛟河人, 硕士, 黑龙江省第一地质勘查院, 高级工程师, 主要研究方向为矿产勘查与地球物理方向。Email: 13694635895@163.com。

Geochemistry and Tectonic Significance of the Dadingzishan Ophiolite in the Wanda Mountains

SUN Gang, YANG Yunbao, SUN Jian*, LIN Dazhi, ZHAO Shimeng, GUO Fenglei

(Heilongjiang First Geological Exploration Institute, Mudanjiang 157011, China)

Abstract: This study presents a comprehensive investigation of the Dadingzishan ophiolitic mélange in the Wanda Mountains, focusing on its petrology, zircon U-Pb geochronology, and whole-rock geochemistry. The aim is to constrain its lithological assemblage, formation age, tectonic setting, and emplacement mechanism. The Dadingzishan ophiolitic mélange is situated within a north-south-trending belt extending from Dadingzishan to Tuoyaoshan in the eastern Wanda terrane. It occurs as tectonic lenses hosted within the Late Triassic-Early Jurassic Dalingqiao Formation (mudstone-dominated clastic rocks) and is distributed in a NNE-trending zone. The ophiolite consists of ultramafic accumulates dominated by peridotite in the east and mafic accumulates dominated by gabbro in the west. Zircon U-Pb dating yields crystallization ages of 159.61 ± 0.44 Ma and 138.40 ± 0.72 Ma, corresponding to the Late Middle Jurassic to Early Cretaceous. Geochemical data show low Al and Ca contents and high alkali concentrations in major elements. The rocks exhibit moderately high total rare earth element (REE) contents (Σ REE = 17.65–105.16 ppm), with relatively consistent concentrations of both LREEs and HREEs. Chondrite-normalized REE patterns exhibit LREE enrichment and HREE depletion, with $(La/Yb)_n$ ratios ranging from 2.32 to 5.55, indicating significant LREE-HREE fractionation. Trace elements show enrichment in high field strength elements (Th, Nb, Ta) and large ion lithophile elements (Pb, Ba), along with relative depletion in Sr. These geochemical signatures suggest formation in an ocean island setting, characteristic of plume-type ophiolites. It is proposed that with the subduction of the Pacific Plate beneath the continent, a large-scale accretionary wedge developed along the eastern margin of the Jiamusi Block.

Key words: Ophiolite; rock geochemistry; Zircon U-Pb geochronology; Plume-Type Ophiolite; tectonic Setting; Wandashan Terrane

激发极化法与可控源音频大地电磁法在 金属矿勘查中的应用

李 丹, 张 哲*, 田 超, 山显磊, 康泉全, 胡建华

(中国地质调查局廊坊自然资源综合调查中心, 河北 廊坊 065201)

摘要: 激发极化法与可控源音频大地电磁法是矿产资源勘查的有效技术手段, 本文从提高金属矿勘查精准度和效率的角度, 联合应用激发极化法与可控源音频大地电磁法进行金属矿勘探的技术研究。分析了激发极化法与可控源音频大地电磁法各自的原理和优势, 以某地铅锌金属矿的勘查为例, 探讨了激发极化法与可控源音频大地电磁法的综合应用策略, 结果显示, 两种方法在实际应用中可以实现优势互补, 能够有效勘查深部隐藏的矿体, 而且效率更高, 成本更低。

关键词: 激发极化法; 可控源音频大地电磁法; 矿产勘查

中图分类号: P618. 2

文献标志码: A

文章编号: 1672-2736(2025)08-0115-9

0 引言

经济高质量发展新常态下, 社会生产对各种矿产资源的需求持续增长, 地表矿、浅部矿的矿产资源不断减少, 矿产开采进入深部开采阶段, 增大了找矿难度, 运用科学高效的勘查技术, 准确勘查金属矿产, 成为技术人员需要解决的一个核心问题^[1]。单一勘查方法在实际应用中, 存在多解性的问题, 无法保障勘查结果的精准性, 对此, 可以尝试使用综合电法, 推动激发极化法与可控源音频大地电磁法的深度结合, 通过优势互补来提升勘查效果。实践证明, 综合电法在金属矿勘查中, 有着良好的找矿效果^[2]。

1 激发极化法与可控源音频大地电磁法 概述

1.1 激发极化法

激发极化法 IP(Induced Polarization Method, IP 法)的基本原理, 是依照岩体和矿体的激发极化效应, 寻找金属矿藏, 解决水文地质问题, 属于电法勘探方法的范畴。岩体和矿体的激电效应存在明显差异, 通过向地下介质施加人工电场的

方式, 金属矿和围岩的交界位置会出现电化学反应, 形成相应的极化电荷积累。切断供电后, 极化电荷会随着时间的延长逐渐衰减, 继而产生附加二次电场, 围绕二次电场的极化率、电阻率等参数信息, 可以准确判断地下介质的电化学差异, 明确矿体、含水层等的分布情况^[3]。

激发极化法的优势体现在几个方面, 一是抗干扰能力强, 二次电场的信号受地表电性不均匀状况的影响较小, 与地下介质固有属性相关, 这也使得激发极化法在实际应用中不容易受外部环境因素的影响, 有着较强的抗干扰能力^[4]。二是工作效率高, 激发极化法能够同时采集多维度数据, 如极化率、半衰期等, 分析地下介质电化学性质。三是金属矿识别, 正负极化法能够实现对金属硫化物矿和石墨化地层的有效区分, 例如, 当电流密度为 $0.1\text{A}/\text{m}^2$ 时, 黄铜矿的极化率为 20%, 碳质板岩的极化率仅为 5%^[5,6]。

1.2 可控源音频大地电磁法

可控源音频大地电磁法 CSAMT (Controlled Source Audio-Frequency Magnetotellurics, CSAMT) 主要是使用人工控制的场源进行频率测深, 能够克服天然场源信号微弱的缺陷^[7,8], 不过电磁波

本身的非平面特性使得其资料的处理相对复杂。CSAMT 装置包含了发射部分和接收部分,人工场源则分为磁性源和电性源,后者比较常见,实际应用中,需要采用 1~3km 长的接地导线沿固定走向敷设,通过注入特定频率的交变电流在地下建立人工交变电磁场。在接地导线单侧或双侧 60 度张角的扇形探测区域内,按平行排列方式布设测量线缆。这种布置方式可形成以供电导线为基准的对称扇形探测区,通过测量电磁场响应实现地下电性结构探测。测点观测环节,应逐次改变供电频率,对测线方向相应频率的电场分量和磁场分量进行观测,计算随频率变化的阻抗相位及视电阻率,从而达到频率测深的目的^[9]。

CSAMT 同样有着独特的优势,一是勘探范围广,CSAMT 有着很强的穿透力,能够穿透到相对较深的区域,精准识别可能存在的矿体,并对矿体的具体位置、埋深以及贮藏规模等进行明确。二是信息全面,CSAMT 能够提供地下结构的测深信息和剖面信息,在面对金属矿产探测任务时,能够发挥理想效果。三是抗干扰能力强,CSAMT 具备优秀的抗干扰能力,在复杂地质环境中可以实现稳定工作,从而减少外部环境因素对探测结果的影响^[10]。

2 激发极化法与可控源音频大地电磁法在金属矿勘查中的综合应用

以某地铅锌金属矿的勘查为例,使用激发极化法与可控源音频大地电磁法进行勘查,两种方法相互验证和补充,借助激电中梯剖面,测量和识别激电异常,配合可控源音频大地电磁法,测量矿区内地质条件,为矿产的开采奠定坚实基础^[11]。

2.1 矿区地质特征

该矿区内地质构造十分复杂,可见多处构造异常,包括皱褶、断裂等。区域性断裂对于矿区内的成矿有着明显控制作用^[12,13],能够控制区域基本地层和岩浆岩分布。出露地层岩性复杂,有细砂岩、含泥质灰岩、玄武岩、粉砂岩等,铅锌

矿主要赋存区域为石炭纪地层和泥盆纪地层,最为典型的赋存结构为破碎带,不过后期地壳构造运动可能破坏矿体的完整性和连续性^[14]。依照铅锌矿矿物组合的基本特性,该矿区内地层主要分为两大类,第一类是重晶石化氧化型,矿石的品质相对较低,矿物组合为褐铁矿、闪锌矿、重晶石等,第二类是方解石硫化物型,矿石品质相对较高,矿物组合为方解石、黄铁矿、闪锌矿等^[11]。矿区地质简图见图 1。

为了能够更好地开展金属矿勘查,从矿区不同地层采集样本,测定其电阻率、极化率等电性参数,具体如表 1 所示。

根据区内岩石的出露以及钻探取得的标本情况,我们分别选取了含砂质泥岩、铅锌矿化、褐铁矿化和弱黄铁矿化灰岩、辉绿岩、构造角砾岩等进行了电阻率和极化率的测量。从测量的结果来看,泥岩的电阻率和极化率普遍偏小。

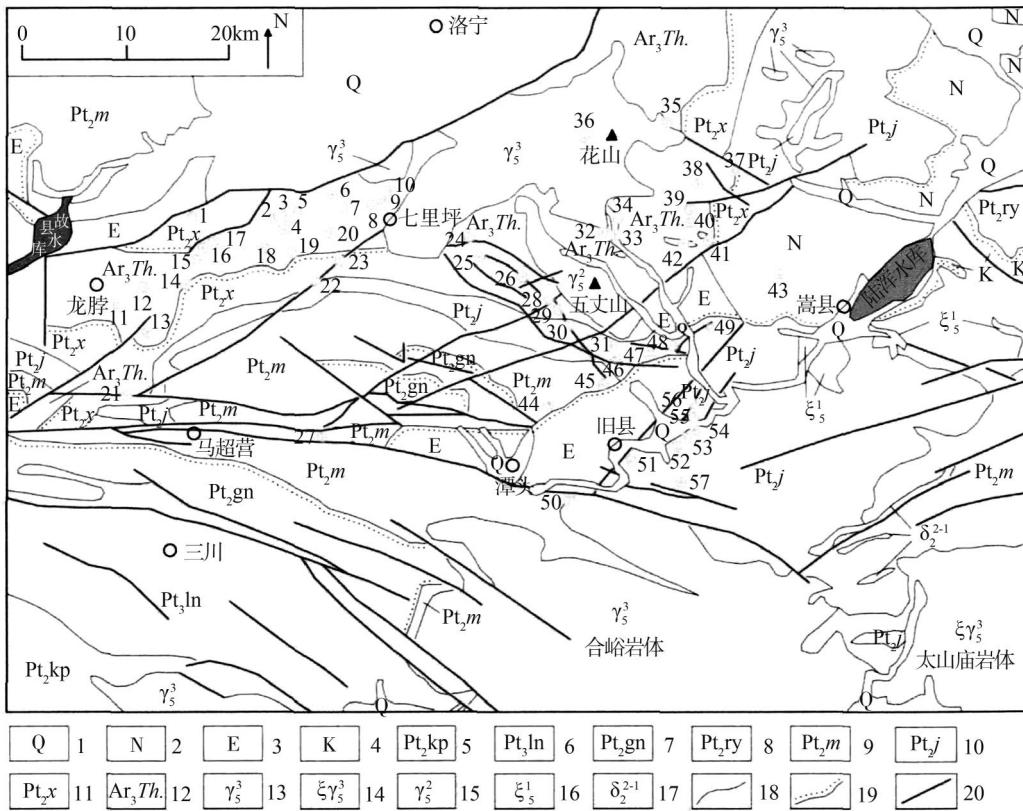
在灰岩标本中,含铅锌矿化灰岩呈现中阻高极化特征,而褐铁矿化灰岩则呈现高阻中高极化特征。弱黄铁矿化灰岩呈现中阻中极化特征,根据区域物性资料,区内岩石的电性特征变化较大,低阻体岩石与高阻体岩石交互出现,其中,泥岩随着泥质的增加,电阻率也不断降低。

测定中,本次测量采用多频相位采集方案,测定频率分别为 0.25Hz、1.0Hz 和 4.0Hz,配合 16s 周期的极化率测定,设置 100ms 信号延时和 200ms 总采样时长。对照表 1 数据分析表明,矿区内的砂质泥岩和辉绿岩地层呈显著低电阻率特征,各种矿化灰岩的电阻率普遍较高,矿体和围岩电性差异明显,能够为电法勘查工作提供良好的物性基础^[15]。

2.2 数据采集处理

2.2.1 数据采集

矿区长期致力于地质勘查活动,成功发现众多矿藏资源,并积累了丰富的勘探经验。然而,矿区地质条件总体复杂,存在诸多干扰因素,加之矿体埋藏深度较大,导致以往地质勘查中所采用的物探技术相对有限且单一。特别是传统电法勘探,由于其固有的局限性,如发射电流强度



1—第四系;2—新近系;3—古近系;4—白垩系;5—宽坪群;6—栾川群;7—官道口群;8—汝阳群;9—熊耳群马家河组;10—熊耳群鸡蛋坪组;11—熊耳群许山组;12—太华群未分层;13—白垩纪花岗岩;14—白垩纪正长花岗岩;15—侏罗纪花岗岩;16—三叠纪正长岩;17—元古代闪长岩;18—地质界线;19—不整合界线;20—断层

图 1 矿区地质简图

表 1 矿区主要岩石标本电性参数

标本名称	相位/mrad			电阻率/Ω·m	极化率/%
	0.25Hz	1.0Hz	4.0Hz		
含砂质泥岩	-3.29	-4.68	-7.17	415.72	0.52
铅锌矿化灰岩	-36.11	-28.02	-29.72	1402.65	10.46
辉绿岩	-11.99	-15.32	-17.11	263.56	2.18
褐铁矿化灰岩	-0.82	-0.95	-1.53	12113.48	1.32
构造角砾岩	-0.71	-0.82	-1.26	18501.33	0.59
弱黄铁矿化灰岩	-2.23	-2.72	-3.53	2624.22	1.61

不足和环境抗干扰能力较弱,未能实现理想的勘查效果。

因此,在综合考虑矿区整体地形地貌和地质水文条件的情况下,采用激发极化法与可控源音频大地电磁法进行找矿作业,为了保障找矿的精准度,先在已知矿段区域实施对比试验,检验方法的可行性,整理地球物理电性标志,总结最佳

技术组合,然后在未知区域勘查金属矿^[16]。数据采集环节,激发极化法供电极距 AB 为 2000m,测线长度 900—1000m,供电周期 32s,延时时间 220ms,叠加次数为 8 次。CSAMT 法 AB 为 1600m,发射极距和接收极距分别为 1600m 和 50m,收发距不低于 8000m,频率范围为 8192Hz—0.3125Hz^[17]。

2.2.2 数据处理

采集到的原始数据中存在不少冗余数据和无效数据,需要通过数据处理的方式做好筛选,提取出有价值的数据信息。不同勘查方法使用的数据处理技术也会有所差异。

(1) 时间域 IP。时间域 IP 中采集到的原始数据主要是时间域序列,在数据处理中,一是通过专业浏览软件调取接收装置采集的时序数据,系统核查电流、电压、周期及延时等核心参数的完整性与数值合理性等^[18]。二是采用周期同步叠加技术(Periodic Stacking),对多次采集的基本时间序列进行相位对齐、波形叠加和算术平均处理,实现信噪比的理论提升。三是实施电流归一处理,通过衰减曲线数据与发射电流波形的反褶积运算,推导标准 2A 电流激励下的电位衰减响应曲线。四是针对同一个测点进行不少于 3 次的观测,对比同一个参数的重现性,自动删除其中的畸变点或者不符合衰减规律的参数信息,选择均方误差在 5% 以内的数据,计算平均值,获取测点电阻率和极化率^[19]。

(2) CSAMT。矿区存在比较严重的人文干扰问题,因此在 CSAMT 数据处理中,需要采取有效措施压制电磁干扰问题。具体来讲,一是原始数据解编,使用时间序列分析软件对采集的原始电磁场信号进行饱和度检测,筛选动态范围符合要求的有效数据段进行后续解编处理。二是采用信号增强技术对干扰数据进行处理,通过借助整周期叠加、高低通滤波等措施,压制谐波工频,显著提高数据质量。三是参数的求解,求解不同观测点不同频率在发射电流归一处理后的电场,借助专业的观测装置,通过迭代求解的方

式,获取电阻率以及相应的阻抗相位参数。四是静态位移校正,对于工作区内可能存在的近地表电性不均匀体,可以利用电磁阵列剖面处理的方法,做好电阻率静态位移的校正处理^[20]。

2.3 方法试验研究

IP 与 CSAMT 综合应用方法在实践中是否能够达到预期效果尚未可知,为了验证方法的可行性和实际效果,避免出现后续使用中勘查结果不准确等问题,在矿区选择一片经过勘查已经发现矿藏的区域开展测试试验。该区域已知矿体包含了浅部矿(埋深在 400m 以内)和深部矿(埋深超过 400m,最大埋深 800m)。结合上文提到的数据处理流程,系统解译各测点观测数据,成功获得激发极化法(IP)的相位、电阻率和极化率参数,以及 CSAMT 的电阻率、阻抗相位参数,绘制相应的曲线图,通过 CSAMT 参数反演获得二维电阻率断面,经过多次迭代优化后,最终反演结果的拟合误差为 4.6%,表明反演结果可靠^[16]。满足地质解译精度要求。

在已知矿体区间内,时间域 IP 的极化率表现出了明显的高极化率特征,电阻率则整体处于稳定状态,数值变化较小,时间域 IP 激电曲线如图 2 所示。CSAMT 反演电阻率断面图能够将矿体所在位置和走向清晰展示出来,矿体电阻率表现为从高到低分布。CSAMT 反演电阻率断面(见图 4)有着较强的对应性,可以直观显示地质体的分布特点,矿体所处区域的相位处于高值和低值交界处,向着高值区域倾斜^[19]。

结合图 2 和图 3 分析,空间层面上,电性异常与铅锌矿体有着清晰的对应关系,时间域 IP 剖

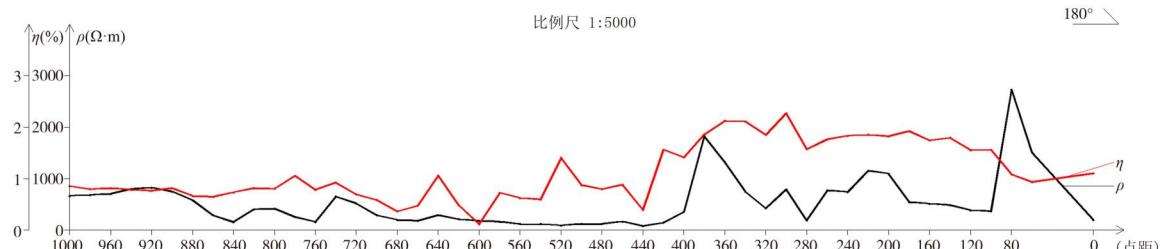


图 2 时间域 IP 激电曲线杨家岭激电中梯 L034 剖面图

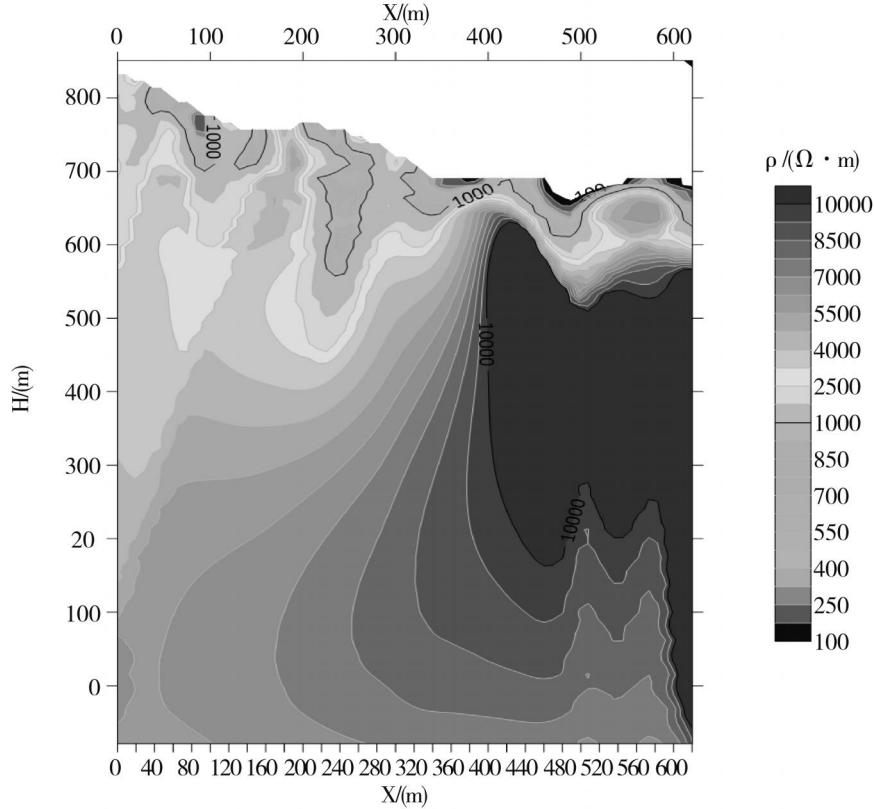


图 3 CSAMT 反演电阻率断面

面以及 CSAMT 剖面测量得到的各种参数异常特征都能够用于间接找矿,很好地体现了综合方法在断裂构造识别、矿体追踪等方面的积极作用。三种方法在实际应用中的特点如下:

时间域 IP。已知矿体的激电特征表现为中低电阻、中高极化,时间域 IP 本身有着较高的工作效率,能够实现对地下特殊岩层极化率和电阻率异常的高效捕获,并且精准确定异常范围。

CSAMT。CSAMT 可以将地下矿体的埋深、位置和走向等准确反映出来,矿体通常赋存于低电阻率到高电阻率过渡段,更趋向于低电阻区域,这种方法在实际应用中有着较高的工作效率,能够帮助工作人员精准定位矿体的埋深和分布情况^[20]。

2.4 方法应用示范

结合上述试验确定了综合方法的可行性和可靠性,然后在矿区内选择新区域,运用 IP 与 CSAMT 综合应用方法实施找矿预测。将电性异常特征分为平面特征和空间特征,具体为:

(1) 平面特征。借助 IP 测量的方式,获得区域内所有测点的电阻率和极化率,确认其分布特征。两类异常形态均呈带状分布,基本走向一致,区域内整体的极化率偏低且相对平稳,背景场值不超过 1%,最大值不超过 3%,且东部总体的电阻率数值明显较低。对照表 1 中的岩体电性测定结果分析,使用时间域 IP 测量得到的电阻率分布情况和区域内地层分布特征基本一致,误差在 2.2% 左右。依照区域岩层极化率特征和电性异常标志,将“存在异常、达到一定规模、连续性好,相邻测线全部显示异常”作为确定激电异常的基本原则,划分 1 号、2 号和 3 号高极化区,其均为东北-西南走向,与地层走向一致,其中,1 号区域(IP1,见图 4,2 号和 3 号区域同理)处于测区中间位置,多条测线显示数值异常,整体表现为中高极化特征,电阻率特征为相对中阻,对照一致矿体特征,初步认定该异常是因为地层中铅锌矿赋存引发。2 号区域表现为低电阻率高极化的激电特征,极化率明显较 1 号区域更高,电阻率略低,与 1 号区域差别明显,认定存

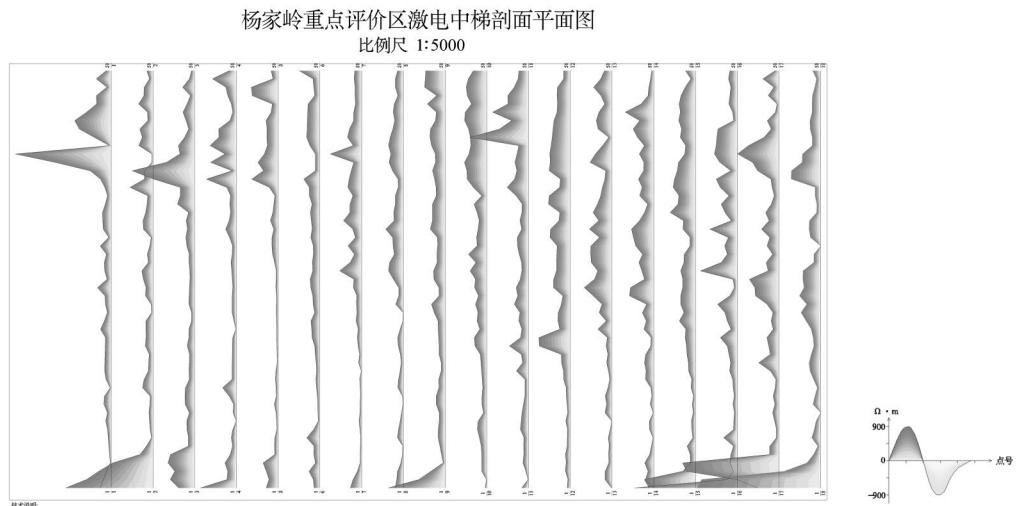


图4(a) 大功率IP的电阻率剖面平面图

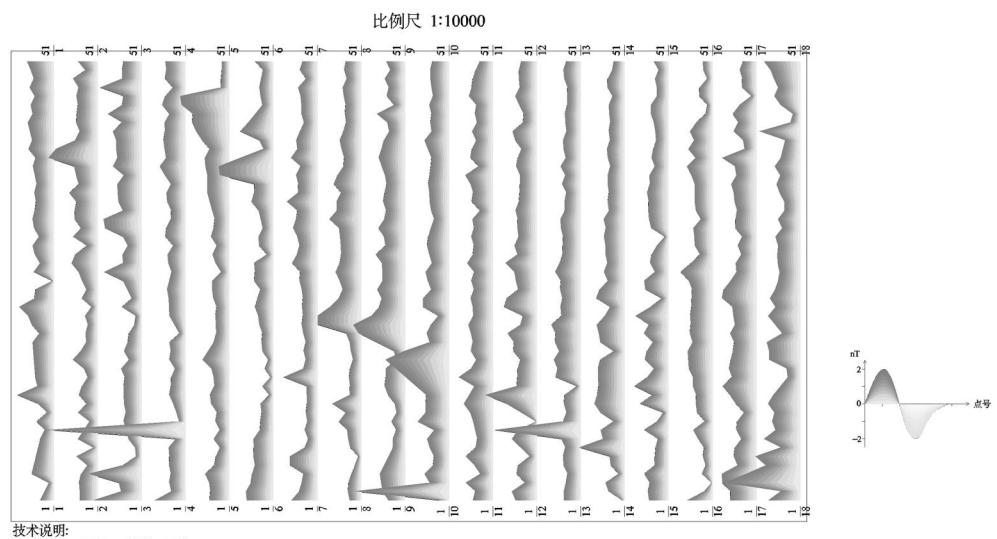


图4(b) 大功率IP的极化率剖面平面图

在新的矿体。3号区域位于已知区域的西侧,异常数值高,异常范围大,两侧梯度变化较陡,主要地质体为泥质灰岩。

(2) 空间特征。为了更好地把握矿体的构造和埋深变化,采用CSAMT进行精细测深探测,通过获取地下不同深度的电性参数分布,精确解析矿体的空间展布形态和埋藏深度特征。具体如图5所示。

从图5中可以明显看到区域内地下电阻率在纵向与横向的分布情况,多条测线的剖面电阻率反演断面影像都表现出了良好的可比性,地电结构相似。结合上文提到的三个高极化区,1号区域处于点号90-110之间,CSAMT反演电阻率

的横向分布特征很好地体现了区域地层分布情况。电阻率特征与IP电阻率特征保持了高度的一致性。2号区域处于点号245-300之间,反演电阻率显示,L005和L007线在该段表现为中高阻向低阻过渡的趋势,并且朝着深部延伸。L004线和L006线的地层分布特征相似,推测两条线的异常是由同一个源头引发。3号区域处于点号450-500之间,CSAMT反演电阻率显示的电性特征和南侧测线均发生了变化,电阻率从中高阻过渡到低阻,推测该区域可能存在构造破碎带或者岩性界面^[12]。

对比三个异常区域,认定2号区域存在深部矿体的可能性最大,可以将其作为找矿靶区。区

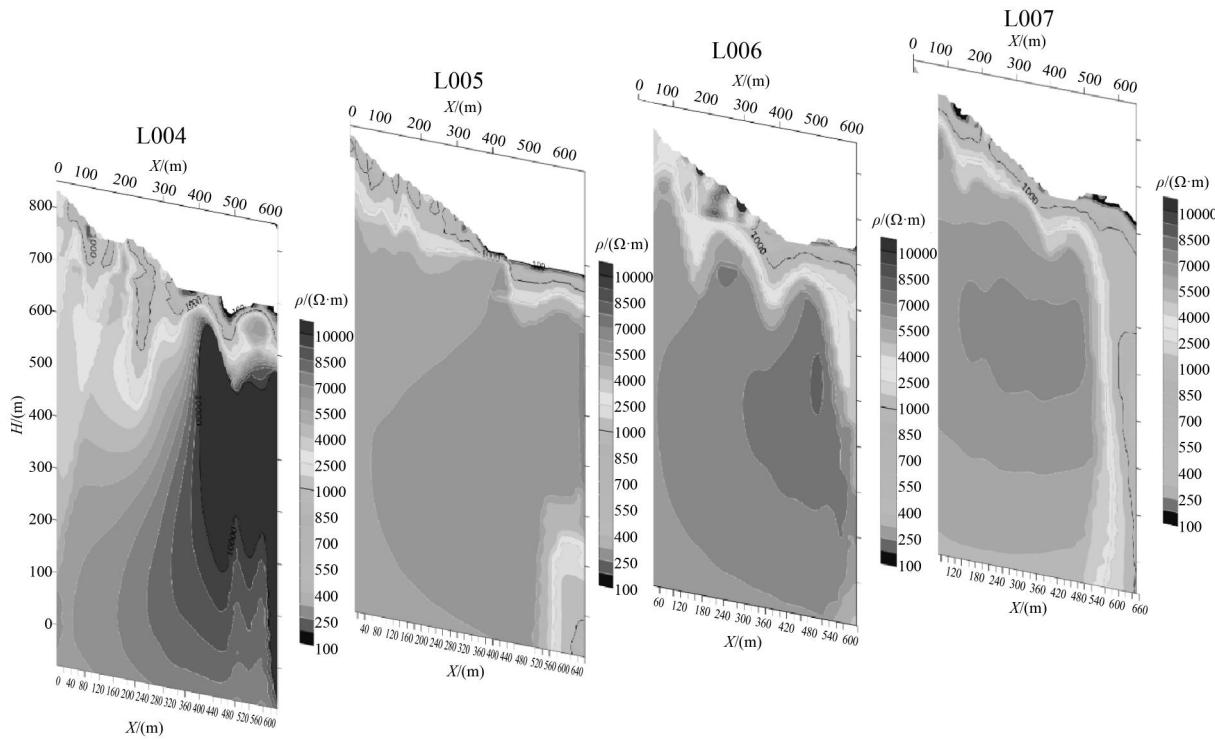


图 5 CSAMT 反演电阻率剖面

域平面展布面积达 0.22km^2 , 该异常区呈现典型的中阻-高极化电性组合特征, 极化率存在明显异常, 且异常边界表现为明显的梯度变化带, 综合区域地层分布情况, 认定其深部可能隐伏含金属矿的破碎带。

3 结论

以某地铅锌金属矿的勘查为例, 使用激发极化法与可控源音频大地电磁法进行了金属矿勘查, 得到如下结论:

(1) 使用综合电法组合的方式, 融合激发极化法与可控源音频大地电磁法各自的优势, 实现了优势互补, 能够有效勘查深部隐藏的矿体, 而且效率高, 成本低。

(2) 在一些地形条件复杂的区域进行金属矿勘查时, 应使用便携式设备, 借助大电流供电、增加叠加次数等方式, 提升数据信噪比, 消除干扰因素, 确保采集到的地质体电特征客观准确。

(3) 本文提到的激发极化法与可控源音频大地电磁法组合方法在实际应用中取得了良好的成果, 有着较强的代表性, 对于类似区域的金

属矿勘查可以起到一定参考作用。

参考文献(References):

- [1] 李建华, 林品荣, 杜炳锐, 等. 综合电法在隐伏矿产勘查中的应用研究[J]. 物探化探计算技术, 2022, 44(04): 468–476.
- [2] 朱红军. 激发极化法在滇西某铅锌多金属矿勘查中的应用[J]. 金属矿山, 2009, 44(12): 89–92.
- [3] 雷清, 程胜红, 潘登, 等. 激发极化法在西刚果造山带尼阿里裂谷盆地铜多金属矿勘查中的应用[J]. 地震地磁观测与研究, 2023, 44(03): 55–63.
- [4] 朱剑, 范永宏, 徐伟, 等. 大功率激发极化法与可控源音频大地电磁测深法在大丘山地区铀-多金属矿勘查中的应用[J]. 世界核地质科学, 2022, 39(03): 538–545.
- [5] 张燕, 高振强, 张延奔. 激发极化法在深部找矿中的应用——以江苏省句容市大华山铜多金属矿勘查为例[J]. 世界有色金属, 2021, 36(04): 56–57.
- [6] 程长厚, 张振, 李勇明, 等. 井中激发极化法在多金属矿勘查中的应用研究[J]. 资源信息与工程, 2023, 38(05): 13–17, 21.
- [7] 韩国胜. 井中激发极化法在金属矿产勘查中的应

- 用[J]. 世界有色金属, 2023, 38(12): 169–172.
- [8] 黄凯, 邓耀辉, 农观海, 等. 激发极化法在黔西北丫都铅锌矿床勘查中的应用[J]. 矿产勘查, 2024, 15(07): 1195–1203.
- [9] 刘建权, 赵振华, 尹国庆, 等. 大功率激电测量在冀北温家营—马家沟银多金属矿勘查中的应用 [J]. 矿产勘查, 2020, 11(11): 2495–2504.
- [10] 张影业, 杨秋玲, 符坚, 等. 大比例尺综合物探技术在栾川整装勘查区的应用[J]. 物探化探计算技术, 2020, 42(03): 376–381.
- [11] 史冬岩, 张坤, 张玉鹏, 等. 黑龙江省浅覆盖区地物化特征与找矿标志: 以黑河市 340 高地金矿化区为例[J]. 吉林大学学报(地球科学报), 2021, 51(04): 1042–1053.
- [12] 徐伟, 蒋宏, 朱剑, 等. 黔西南大际山铀多金属矿远景区土壤地球化学特征[J]. 铀矿地质, 2020, 36(06): 563–576.
- [13] 顾观文, 王顺吉, 武晔, 等. 类中梯装置的大功率三维激电法在甘肃花牛山金矿勘查中的应用 [J]. 地质与勘探, 2023, 59(04): 872–882.
- [14] 张哲, 廖广志, 肖立志, 等. 基于机器学习算法预测核磁共振 T2 谱[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(17): 7282–7292.
- [15] 罗志亮, 汤井田, 周聰, 等. 频率域电磁法电场梯度视电阻率研究[J]. 石油地球物理勘探, 2025, 60(01): 243–252.
- [16] 张继伟, 谭慧. 可控源音频大地电磁和微动资料的拟二维联合反演[J]. 物探与化探, 2024, 48(04): 1094–1102.
- [17] 张一, 刘鹏磊, 王玉敏, 等. 综合物探技术在济南北部地热勘查中的应用[J]. 物探与化探, 2024, 48(01): 58–66.
- [18] 王强, 田野, 刘欢, 等. 综合物探方法在煤矿采空区探测中的应用[J]. 物探与化探, 2022, 46(02): 531–536.
- [19] 汤井田, 任政勇, 化希瑞. 地球物理学中的电磁场正演与反演[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(04): 1181–1194.
- [20] 吕庆田, 张晓培, 汤井田, 等. 金属矿地球物理勘探技术与设备: 回顾与进展[J]. 地球物理学报, 2019, 62(10): 3629–3664.

作者简介:

第一作者:李丹,1989 年生,男,山西大同人,中国地质调查局廊坊自然资源综合调查中心,助理工程师,主要研究方向为地球物理勘探、地质工程。Email:2548655927@qq.com;

通讯作者:张哲,1994 年生,男,河北承德人,硕士,中国地质调查局廊坊自然资源综合调查中心,助理工程师,主要研究方向为地球物理勘探、地质资源与地质工程。Email:839404589@qq.com

Application of Induced Polarization Method and Controlled Source Audio Magnetotelluric Method in Metal Mineral Exploration

LI Dan, ZHANG Zhe*, TIAN Chao, SHAN Xianlei, KANG Quanquan, HU Jianhua

(Langfang natural resources comprehensive survey center, China Geological Survey, Langfang 065000, China)

Abstract: Induced polarization method and controlled source audio magnetotelluric method are effective technical means of mineral resources exploration. This paper studies the comprehensive application of induced polarization method and controlled source audio magnetotelluric method in metal mineral exploration from the perspective of improving the accuracy and efficiency of metal mineral exploration. The principles and advantages of induced polarization method and controlled source audio magnetotelluric method are analyzed. Taking the exploration of a lead-zinc mine as an example, the comprehensive application strategy of induced polarization method and controlled source audio magnetotelluric method is discussed. The results show that the two methods can achieve complementary advantages in practical application, and can effectively explore deep hidden ore bodies, with higher efficiency and lower cost.

Key words: induced polarization method; controlled source audio magnetotelluric method; mineral exploration

玄武岩材料的“源—汇”控制论

牛柏然¹, 姚 宇^{2,3}, 郝小庆^{2,3}, 李宇航^{2,3}, 胡伟强^{2,3}, 辛义国^{2,3*}

(1. 黑龙江省火山岩科技有限公司, 哈尔滨 50001;
2. 中国地质调查局哈尔滨自然资源综合调查中心, 哈尔滨 150086;
3. 自然资源部哈尔滨黑土地地球关键带野外科学观测研究站, 哈尔滨 150086)

摘要: 玄武岩纤维作为新兴高性能材料, 在建筑、航空航天等领域应用广泛, 但当前产业实践普遍将玄武岩视为均质工业品, 忽视了不同构造环境形成的地质多样性, 导致原料选择缺乏科学依据。本文构建了连接地质成因与工程应用的“源—汇”分析框架, 核心论点为: 玄武岩的成岩构造环境(源)通过其地球化学“指纹”, 主要控制了纤维材料的性能特征与应用场景(汇)。文章建立了基于构造环境的玄武岩地球化学分类体系(MORB、OIB、CFB、IAB), 并论证了在不同应用场景下, 如何依据“需求—性能—地球化学—选址”的逻辑链实现原料精准匹配。研究表明, 土木工程领域需要低碱的 MORB 型玄武岩以保障耐久性, 航空航天领域需要高硅铝、低碱的 CFB 型玄武岩以获得极致性能, 而农业修复领域则需要高镁钙的 OIB 型玄武岩以提高风化速率。该理论框架为玄武岩资源的精准勘探、科学评价与高附加值利用提供了新的科学路径。

关键词: 玄武岩纤维; 地球化学; 源—汇控制论; 应用领域

中图分类号: TQ343. 4

文献标志码: A

文章编号: 1672-2736(2025)08-0124-6

0 引言

玄武岩是一种由地幔部分熔融形成的岩浆经地表喷发或溢出后冷凝而成的基性火成岩^[1]。我国玄武岩资源分布广泛, 从东北的火山群到西南的峨眉山大火成岩省, 其地质与地球化学特征多样, 是具有重要经济价值和战略意义的自然资源^[2]。传统的玄武岩应用主要集中在建筑骨料、道路铺设等领域, 利用的是其坚硬、耐磨的物理特性^[3]。

近年来, 以玄武岩为唯一原料制成的连续玄武岩纤维(CBF)^[4], 因其在某些性能指标上可与甚至超越 S-玻璃纤维相当的力学性能、优异的耐温性和化学稳定性, 以及天然环保、成本可控的优势, 成为与碳纤维、芳纶并列的我国重点发展的四大高性能纤维之一^[5]。然而, 高端应用

需求与粗放式原料选择之间的矛盾日益突出。产业实践中, 并非所有玄武岩都适合拉制高性能纤维, 但对原料的评价往往停留在简单的化学成分列表, 缺乏对其地质成因的深入分析^[6]。这种“源头”(地质成因)与“终端”(材料应用)的研究脱节, 是当前玄武岩材料领域的关键知识缺口, 明显限制了这一战略资源的潜力挖掘与高附加值利用^[7]。

为解决此问题, 本文旨在从地球系统科学的视角, 构建并论证一个“源—汇”控制模型, 打通从地幔动力学到市场应用的完整逻辑链, 为玄武岩资源的适材适用和精准开发提供科学指导。

1 玄武岩的地质成因与地球化学“指纹”

玄武岩并非成分均一的工业原料, 而是一类岩石的总称, 其化学与矿物组成的显著差异, 根

基金项目: 中国地质调查局项目(DD20230477)。

表 1 不同构造环境玄武岩的地球化学指纹与材料性能潜力

玄武岩类型	构造环境与成因	主要化学特征	详细化学成分	材料性能优势	性能限制与注意事项
洋中脊玄武岩(MORB)	大洋扩张中心下方亏损地幔减压熔融	低钾 K_2O 、低钛 TiO_2 、成分均一稳定	SiO_2 48–52%、 Al_2O_3 14–16%、总碱量<5%	天然低碱特性,高耐久性纤维首选,耐碱纤维优质原料	成分相对单一,特殊性能改进空间有限
洋岛玄武岩(OIB)	地幔深部富集,地幔柱(热点)上涌	化学成分变化大,富集不相容元素,钾、钠、铁含量高	Na_2O+K_2O 可达 8%,高铁镁含量,成分波动较大	高铁镁有利耐热,特殊功能性潜力	高碱严重损害稳定性,不宜直接用作高性能纤维,需要改性处理
大陆溢流玄武岩(CFB)	地幔柱与大陆岩石圈相互作用产物,成因机制复杂	成分变化剧烈,地壳污染影响,高钛/低钛分化	SiO_2 含量偏高,高钛和低钛亚类,成分跨度最大	最大高性能纤维原料库,高 $SiO_2+Al_2O_3$ 组合,高 $FeO+MgO$ 理想组分	需要精细甄别,品质差异较大,选择性开发重要
岛弧活动大陆边缘玄武岩(IAB)	俯冲带环境,俯冲板片脱水,最大离子亲石元素富集	$Nb-Ta$ 负异常,高铝特征显著,富集大离子元素	Al_2O_3 16–20%, K 含量较高, $Nb-Ta$ 亏损	高铝提升力学性能,优异耐热特性,结构稳定性好	普遍富集碱金属,化学稳定性受损,需要脱碱处理

植于其形成的大地构造环境,构造环境决定了玄武岩的基本地球化学特征,这是预测其材料性能的重要基础。依据构造背景,可将纤维用玄武岩原料划分为四个主要类型^[8](表1)。

2 玄武岩纤维国内外发展现状

玄武岩纤维的研发始于 20 世纪,前苏联在 60 年代率先实现了规模化研究和应用,并成功用于“联盟-19”号宇宙飞船,苏联解体后,俄罗斯和乌克兰继承并发展了相关技术,成为目前国际市场的主要生产国。目前全球玄武岩纤维年产量约 3–4 万吨,其中国外产量不足 1 万吨^[9]。

我国玄武岩纤维产业起步于 20 世纪 70 年代,自 21 世纪初以来发展迅速。其标志性事件包括:2002 年,玄武岩纤维被列入国家“863 计划”;2019 年,《玄武岩纤维分类分级及代号》(GB/T38111-2019)国家标准发布,为行业提供了指导;2020 年,世界首条 2400 孔漏板拉丝智能化池窑生产线在四川广安投产,标志着我国在连续玄武岩纤维制造技术上达到世界领先水平;2023 年,我国玄武岩纤维产量已达 3.11 万吨,

市场规模约 3.5 亿元^[10]。

作为我国重点发展的四大高性能纤维之一,玄武岩纤维在性能谱系中占据了独特的生态位。与碳纤维相比,玄武岩纤维虽然在极致的弹性模量(碳纤维为 230–600GPa)上有所不及,但其抗拉强度(3000–4800MPa)与普通碳纤维处于同一量级,且密度更高,生产成本则显著降低^[11]。与芳纶纤维相比,玄武岩纤维的模量更高,且完全无机,具有优异的绝缘性和环保特性。相较于 E-玻璃纤维,其抗拉强度和弹性模量均高出一个等级;而相较于更高端的 S-玻璃纤维,玄武岩纤维在抗拉强度上与之相当,在弹性模量上甚至更优,同时还具备更宽的使用温度范围和更强的化学稳定性,而生产成本却更低。

3 “源—汇”框架下的综合应用

基于上述理论框架,将“源—汇”理论应用于实践,核心是依据特定应用场景(汇)的性能需求,反向追溯并选择具有特定地球化学特征(源)的玄武岩原料(图 1)。

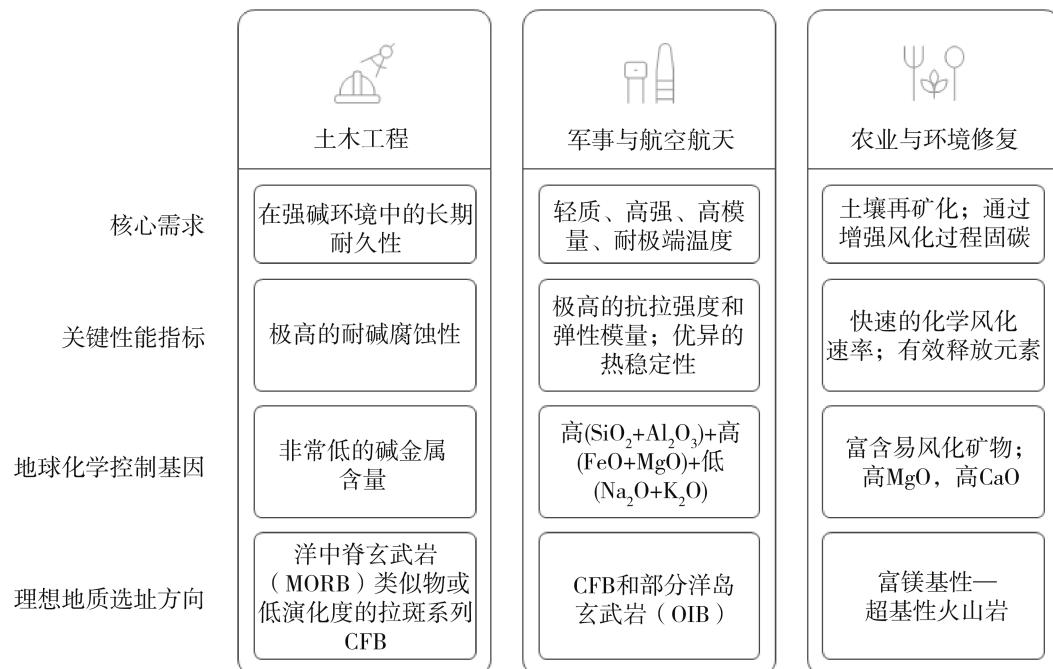


图 1 从应用需求到地质选址的“源—汇”匹配示意图

3.1 建筑及土木工程领域: 对耐久性的极致追求

在建筑及土木工程领域,玄武岩纤维作为增强材料,其应用已相当广泛,占据了超过 70% 的市场份额。研究表明,掺入玄武岩纤维可使混凝土抗压强度提高 10~30%,抗拉强度提高 27%,其加固效果远超传统聚合物纤维^[12]。然而,该领域最核心的需求并非极限强度,而是在混凝土等强碱环境($\text{pH}>12$)中的长期耐久性。

这一核心需求在“源—汇”理论框架下,直接指向了原料的化学稳定性。纤维的耐碱性由其抵抗化学侵蚀的能力决定,而其耐碱性的关键控制因素是碱金属含量。碱金属离子作为网络变性剂,破坏了玻璃结构中稳固的 $\text{Si}-\text{O}-\text{Si}$ 桥键,形成化学性质不稳定的非桥氧键,这些位点极易受到 OH^- 离子的攻击,导致玻璃网络迅速解体。这一地球化学要求直接指向了特定的地质源头:源于亏损地幔、天然贫碱的洋中脊玄武岩(MORB)及其类似物,例如蛇绿岩套中保存的古洋壳或某些演化程度低的拉斑系列大陆溢流玄武岩(CFB),是该应用领域最理想的原料产地^[13]。

3.2 国防军工与航空航天领域: 对综合性能的极限挑战

在国防军工与航空航天领域,材料面临的是最严苛的考验,其核心需求是轻质、高强、高模量与耐极端温度的完美结合。从防弹装甲到火箭发动机喷管,再到嫦娥六号在月背展开的玄武岩纤维国旗,都要求材料在承受极端机械应力与温度骤变的同时保持结构完整^[1]。

要满足如此极致的综合性能需求,必须从“源—汇”论的地球化学层面进行解析。该理论指出,这需要多种地球化学组分的优化组合:(1)高含量的网络形成剂($\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3$),用以构建强韧的玻璃网络骨架,这是高强度和高模量的基础;(2)适当含量的热稳定性贡献者($\text{FeO}+\text{MgO}$),它们能在高温下诱导纤维表面析出纳米晶保护壳,从而提高使用温度上限;(3)极低含量的网络变性剂($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$),以保障在极端温差或辐射环境下内部结构的完整性。能够同时满足这些复杂地球化学要求的地质体并不常见,它们最可能出现在成因复杂的大陆溢流玄武岩(CFB)和部分洋岛玄武岩(OIB)中。这些岩浆系统经历了复杂的演化过程(如地壳混染、分离

结晶),可能孕育出兼具高硅铝和高铁镁的理想组分,是寻找顶级性能纤维原料的重要目标^[14]。

3.3 农业与环境修复领域:对化学风化速率的精准调控

近年来,利用岩石粉末进行土壤再矿化和增强风化固碳(ERW)成为环境地球科学的前沿。在此应用中,玄武岩的核心价值在于其化学风化速率以及释放矿质营养元素的能力。理想的材料应能快速风化,为土壤补充Ca、Mg、K等元素,同时消耗大气CO₂形成稳定的碳酸盐^[15]。

对于这一新兴应用,“源—汇”理论提供了独特的解析视角:其核心价值—化学风化速率,主要由岩石的矿物组成决定。富含橄榄石、辉石等在表生环境下化学性质不稳定的矿物,其风化速率远高于富含长石和石英的岩石,这些矿物在化学成分上表现为高MgO和高CaO^[16]。因此,该应用领域需要寻找的并非传统意义上的“稳定”材料,而是具有适当“不稳定性”的材料。理想的地质源头是那些富镁的基性—超基性火山岩,例如部分源于地幔柱热点的洋岛玄武岩(OIB)或大陆溢流玄武岩(CFB)中的苦橄岩质单元。通过选择这类玄武岩,可以高效地实现元素释放和CO₂封存,将亿万年前的火山产物转化为应对当代气候与粮食安全挑战的有效工具^[17]。

4 挑战与未来发展方向

4.1 产业发展挑战

当前玄武岩纤维产业仍面临现实挑战。首先是技术瓶颈,在拉丝漏板、浸润剂、均化技术、复配技术和熔制技术等关键环节仍有待突破^[18]。其次是生产成本较高,复杂的工艺和高能耗限制了其与玻璃纤维等材料的市场竞争,市场认知度不足和现有成熟材料的市场壁垒也阻碍了其大规模推广^[19]。

4.2 前沿科学与发展方向

为应对上述挑战,必须将产业问题转化为科学问题,从源头寻求突破。建立勘探评价新标

准:当前最大的科学挑战是,缺乏一套基于地球化学成因的、标准化的纤维用玄武岩勘探与评价体系。未来应发展地球物理—地球化学耦合勘探技术,快速圈定具有特定地球化学品位(如低碱区、高铁镁区)的优质靶区。

构建全流程预测模型:理论上,应致力于构建一个从“地幔部分熔融→岩浆演化→工业熔融→拉丝成纤”的全流程数值模型。该模型一旦建立,将能通过输入岩石化学成分,预测其纤维性能,实现材料的“定制化设计”。

拓展地外资源新领域:将“源—汇”模型拓展至月球、火星等富含玄武岩的地外天体。通过分析月壤、火星岩石的地球化学数据,可评估其作为未来地外建筑材料的原位资源潜力,为人类深空探索提供材料学判据。

5 结语

玄武岩及其纤维的综合利用,正处在从经验摸索走向科学引领的关键转折点。本文构建的“源—汇”控制论,系统揭示了玄武岩材料性能的内在控制因素:其形成的地质源头通过地球化学“指纹”,主要决定了其最终的工程性能。这一从“就岩论岩”到“因源识材”的范式转变,不仅深刻回答了“哪种玄武岩是好原料”的产业难题,更为这一战略资源的精准勘探、科学评价和高附加值利用提供了清晰的路线图。将每一根玄武岩纤维的性能追溯到其诞生时所在的板块构造环境,是实现其最高价值利用的重要途径,对推动我国新材料产业和资源科学的高质量发展具有重要理论与实践意义。

参考文献(References):

- [1] DHAND V, MITTAL G, RHEE K Y, et al. A short review on basalt fiber reinforced polymer composites [J]. Composites Part B: Engineering, 2015, 73: 166–180.
- [2] 崔晓歌. 琼北晚新生代火山岩岩石地球化学特征、岩浆源区组成及其地球动力学意义[D]. 中国地震局地质研究所, 2023.
- [3] 刘嘉麒. 发展玄武岩新材料 提升新质生产力[J].

- 中国科技产业, 2024, 38(08): 4-7.
- [4] ORDUNA L, RAZQUIN I, OTAEGI I, et al. Ionic Liquid-Cured Epoxy/PCL Blends with Improved Toughness and Adhesive Properties [J]. *Polymers*, 2022, 14(13): 2679.
- [5] 徐小明, 何曼如, 张旭平, 等. 纤维用玄武岩矿特性对其可纺性及纤维性能的影响研究 [J]. 合成纤维工业, 2021, 44(04): 24-31.
- [6] LIU H, YU Y, LIU Y, et al. A Review on Basalt Fiber Composites and Their Applications in Clean Energy Sector and Power Grids [J]. *Polymers*, 2022, 14(12): 2376.
- [7] WEI B, CAO H, SONG S. Surface modification and characterization of basalt fibers with hybrid sizings [J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2011, 42(01): 22-29.
- [8] JOHANNESSON B, SIGFUSSON T I, FRANZSON H. Suitability of Icelandic basalt for production of continuous fibres [J]. *Applied Earth Science*, 2019, 128(03): 73-78.
- [9] FIORE V, SCALICI T, DI BELLA G, et al. A review on basalt fibre and its composites [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2015, 74: 74-94.
- [10] 郭欢, 麻岩, 陈姝娜. 连续玄武岩纤维的发展及应用前景 [J]. 中国纤检, 2010, 30(05): 76-79.
- [11] LIU H, YU Y, LIU Y, et al. A Review on Basalt Fiber Composites and Their Applications in Clean Energy Sector and Power Grids [J]. *Polymers*, 2022, 14(12): 2376.
- [12] SCALICI T, PITARRESI G, BADAGLIACCO D, et al. Mechanical properties of basalt fiber reinforced composites manufactured with different vacuum assisted impregnation techniques [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2016, 104: 35-43.
- [13] 李琢, 徐冠立, 刘荣, 等. 玄武岩纤维原料特征的统计及分析研究 [J]. *地质论评*, 2024, 70(01): 262-276.
- [14] 王恩清, 赵书林. 玄武岩连续纤维及其复合材料 [J]. *天津纺织科技*, 2007, 28(03): 21-25.
- [15] BEERLING D J, KANTZAS E P, LOMAS M R, et al. Potential for large-scale CO₂ removal via enhanced rock weathering with croplands [J]. *Nature*, 2020, 583(7815): 242-248.
- [16] HARTMANN J, KEMPE S. What is the maximum potential for CO₂ sequestration by "stimulated" weathering on the global scale? [J]. *Die Naturwissenschaften*, 2008, 95(12): 1159-1164.
- [17] HARTMANN J, WEST A J, RENFORTH P, et al. Enhanced chemical weathering as a geoengineering strategy to reduce atmospheric carbon dioxide, supply nutrients, and mitigate ocean acidification [J]. *Reviews of Geophysics*, 2013, 51(02): 113-149.
- [18] 王子焱, 钟昊天, 贾钰, 等. 连续玄武岩纤维生产与制品开发现状分析 [J]. *矿产保护与利用*, 2020, 40(03): 161-178.
- [19] LIU H, YU Y, LIU Y, et al. A Review on Basalt Fiber Composites and Their Applications in Clean Energy Sector and Power Grids [J]. *Polymers*, 2022, 14(12): 2376.

作者简介:

第一作者:牛柏然,1991年生,女,哈尔滨人,黑龙江省火山岩科技有限公司,主要研究方向为陶瓷艺术设计。Email:740555667@qq.com;

通讯作者:辛义国,1991年生,男,哈尔滨人,中国地质调查局哈尔滨自然资源综合调查中心,助理工程师,主要研究方向为矿产资源勘查。Email:123982315@qq.com

On the Controlling Theory of Source–Application of Basalt Fibers

NIU Boran¹, YAO Yu^{2,3}, HAO Xiaoqing^{2,3}, LI Yuhang^{2,3}, HU Weiqiang^{2,3}, XIN Yiguo^{2,3*}

(1. Heilongjiang Volcanic Rock Technology Co., Ltd, Harbin 150001, China;

2. Harbin Center for Integrated Natural Resources Survey, China Geological Survey, Harbin 150086, China;

3. Observation and Research Station of Earth Critical Zone in Black Soil, Harbin,

Ministry of Natural Resources Harbin 150086, China)

Abstract: Basalt fibers, as emerging high – performance materials, have been widely applied in construction, aerospace, and other fields. However, treat basalt is generally considered as homogeneous industrial raw materials for the current industrial practices, ignoring the geological diversity formed by different tectonic environments, which results in unscientific material selection. This paper establishes a “source–application” analytical framework connecting geological genesis with engineering applications. The core thesis is that the petrogenetic tectonic environment (source) primarily controls the performance characteristics and application scenarios (application) of fiber materials through geochemical fingerprints. A geochemical classification system, including iMORB, OIB, CFB, IAB, is established based on tectonic environments, which demonstrates how to achieve precise material matching through the “demand – performance–geochemistry–site selection” logic chain in different application scenarios. The study shows that the civil engineering requires low–alkali MORB–type basalt for durability, aerospace applications need high–silica–aluminum, low–alkali CFB–type basalt for extreme performance, while agricultural restoration requires high–magnesium – calcium OIB – type basalt for enhanced weathering rates. This theoretical framework provides a new scientific pathway for precise exploration, scientific evaluation, and high–value utilization of basalt resources.

Key words: basalt fiber; geochemistry; source–applicant theory; application fields

基于多指数融合的遥感水体提取方法研究

李 壮^{1,2}, 张璇璞^{1,2*}, 张 淇^{1,2}, 姜 楠^{1,2}, 高若珩^{1,2}, 岳 涣^{1,2}

(1. 中国地质调查局哈尔滨自然资源综合调查中心, 哈尔滨 150000;
2. 自然资源部哈尔滨黑土地地球关键带野外科学观测研究站, 哈尔滨 150000)

摘要:水体提取作为遥感技术在水资源管理、环境监测和灾害预警领域的重要应用方向,其方法选择直接影响实际应用效果。本研究选取归一化差异水体指数(NDWI)、改进型归一化差异水体指数(MNDWI)、陆地表面水体指数(LSWI)及自动水体提取指数(AWEI)四种典型方法进行对比分析。基于Landsat8卫星影像数据,在完成辐射校正与大气校正预处理基础上,选择典型地貌特征区域作为实验区,采用定量精度评估与目视判读相结合的方法,系统考察不同指数在各类地表环境中的适用性。通过构建混淆矩阵结果显示:NDWI方法在开阔水域提取中总体精度达94.52%,Kappa系数为0.87,综合性能最优,适合大范围水体快速识别;MNDWI在混合光谱干扰场景下表现出更强抗干扰能力;LSWI在植被覆盖区域可有效区分植被与水体,漏提率较低;AWEI在建筑密集区和山体阴影区域提取完整度提升显著。最后通过对比四种水体提取方法,认为NDWI水体提取方法适用于该研究区。

关键词:水体提取;归一化差异水体指数;改进型归一化差异水体指数;陆地表面水体指数;自动水体提取指数;光谱指数

中图分类号:P237

文献标志码:B

文章编号:1672-2736(2025)08-0130-7

0 引言

随着全球气候变化和人类活动加剧,水资源的监测和管理变得愈发重要^[1]。准确、高效的水体提取方法对于水资源评估、洪水监测、湿地保护等应用至关重要^[2]。遥感技术因其覆盖范围广、更新周期短等优势,已成为水体提取的主要手段之一^[3]。在众多水体提取方法中,基于多光谱指数的技术因其简单、高效而得到广泛应用^[4]。国外在数据源上以Landsat、Sentinel系列为主,国内相比国外更侧重国产卫星(如高分系列、资源系列)与Landsat/Sentinel结合,方法上,近年来,学者们提出了多种水体指数方法,其中归一化差异水体指数(NDWI)、改进型归一化差异水体指数(MNDWI)、陆地表面水体指数(LSWI)和自动水体提取指数(AWEI)是最具代表性的四种方法。NDWI利用绿光和近红外波

段的反射率差异来识别水体,能够很好的抑制植被,但容易受到土壤及建筑的影响。MNDWI是NDWI的改进版本^[5],用中红外波段替代近红外波段,减少建筑物阴影的干扰^[6],能够很好的将水体从建筑阴影中区分开来。LSWI利用短波红外和近红外波段,对植被覆盖区域的水体提取具有优势^[7],但在开阔水域提取不如NDWI。AWEI通过结合多个波段信息,提高复杂地形和城市区域的水体提取精度,能够很好过滤非水体低反射率地表物体信息。为选择最优提取方法。通过选取典型研究区域,利用Landsat8卫星影像数据^[8],分析NDWI、MNDWI、LSWI、AWEI四种不同波段组合的性能^[9]。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

研究区为大庆市连环湖及附近湖泊(46°25'5"-

基金项目:中国地质调查局项目《小兴安岭黑河地区自然资源综合调查》(DD20230504)。

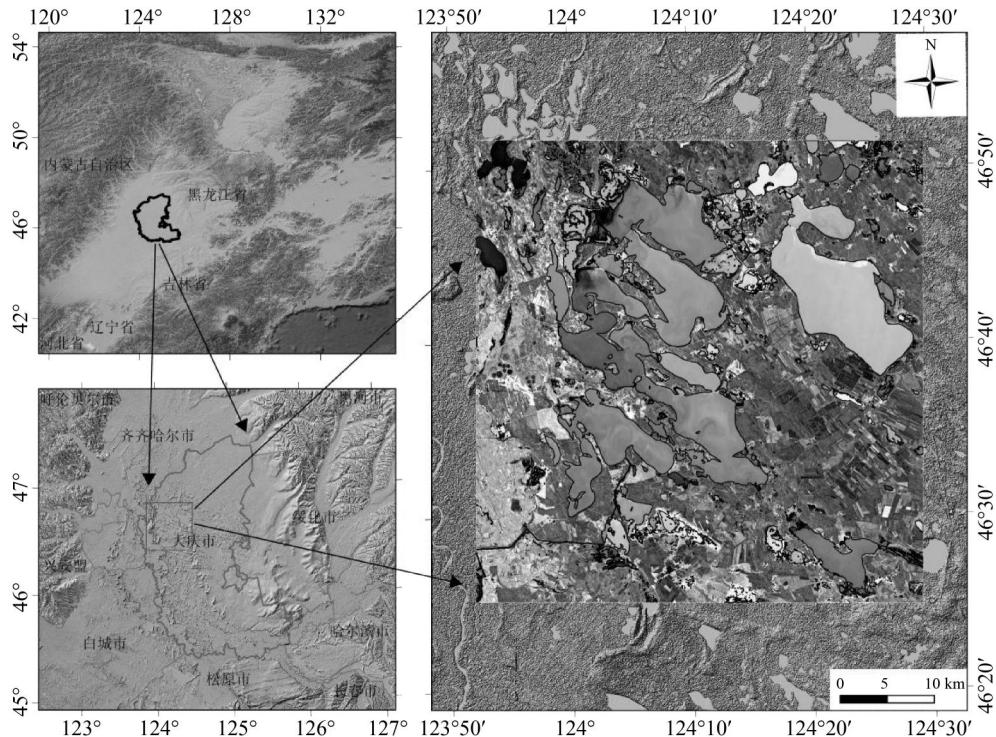


图 1 研究区地理位置图

表 1 Landsat 8 卫星参数表

卫星名称	时间	传感器类型	轨道号	空间分辨率(m^2)	重访周期(天)
Landsat8	2023-09-25	OLI	119/28	30×30	16

46°51'33"N, 123°52'10"-124°29'25"E), 地处松嫩平原腹地^[10], 地势北高南低, 其中连环湖由 18 个星罗棋布的浅水湖泡串联而成, 状如散落的翡翠项链, 总面积逾 580km²。研究区海拔介于 135m 至 144m 之间, 地势平缓如毯, 百里坡降仅 1m, 形成了独特的湖沼湿地景观。受北温带大陆性季风气候影响, 研究区四季分明: 冬季寒冷漫长, 湖面冰封达数月, 最低温常至-20℃以下; 夏季温和短暂, 平均气温约 20℃, 偶有雷暴带来清凉。年平均气温约 3.6-4.4℃, 无霜期约 148 天, 年降水量约 400mm, 集中于 6-8 月, 夏季多短时强降雨, 偶现暴雨如注, 冬季则以零星降雪为主。年均水位变幅达 9.79m, 形成独特的“洪水一片、枯水一线”景观特征(图 1)。

1.2 数据来源

研究使用的数据为 Landsat8 卫星的 OLI 传感器获取的多光谱影像(表 1)。Landsat8 提供

11 个光谱波段, 空间分辨率为 30m(热红外波段为 100m)。本研究主要使用了可见光、近红外和短波红外波段。影像获取时间为 2023 年 9 月 25 日, 云量低于 10%, 确保了数据质量。为了验证水体提取结果, 通过目视解译和实地验证, 建立 30 个湖泊参考数据集。

2 研究方法

2.1 数据预处理流程

获取 Landsat8 数据, 首先进行辐射定标, 借助卫星自带定标参数与辅助定标数据, 精准换算原始 DN 值, 将其转化为具有实际物理意义的辐射亮度值, 以此还原传感器接收到的真实辐射能量。第二步进行大气校正, 综合考量观测时的大气成分、气溶胶特性以及地形因素, 有效去除大气散射、吸收对光谱信息的干扰, 使数据最大程度反映地表真实反射特性^[11]。随后依据研究区

表 2 常用水体指数及其优缺点

名称	计算公式	优点	缺点
NDWI	$NDWI = \frac{G-NIR}{G+NIR}$	能够有效增强水体光谱特征	容易混淆水体与城镇建筑信息
MNDWI	$MNDWI = \frac{G-MIR}{G+MIR}$	加强了水体与建筑物等噪声的反差	容易混淆水体和阴影
LSWI	$LSWI = \frac{NIR-SWIR}{NIR+SWIR}$	可有效地区分植被区水体	不适用于大面积开阔水域
AWEI	$AWEI = B + 2.5G - 1.5(NIR + SWIR1) - 0.25SWIR2$	能够有效区分低反射率地物	不适用于如冰雪、白色建筑物等高反射率的地物

域边界矢量文件,利用空间分析工具执行裁剪操作,将研究无关区域的数据剔除,只保留目标区域影像,既大幅缩减数据存储空间,又能让后续分析聚焦在关键区域,提升分析效率与准确性,最终获得满足研究需求的高质量 Landsat8 数据。

2.2 提取方法

根据研究区地形复杂,选取四种指数进行比较,其中每种指数各有优劣,详见(表 2),下面分别介绍四种指数:

2.2.1 归一化差异水体指数(NDWI)

NDWI(式 1)是最早提出的水体指数之一,其中, P_{green} 代表绿光波段(高反射)的反射率, P_{nir} 代表近红外波段(低反射)的反射率。该公式通过计算绿光波段与近红外波段反射率的差值与和值的比值,能够突出水体与其他地物之间的差异,从而实现水体信息的提取。NDWI 通过利用水体在绿光波段的高反射率和在近红外波段的强吸收特性来识别水体,能够很好的抑制植被干扰^[12]。该方法简单易行,在开阔水域且水体静止和浅层水域提取中表现良好,但容易受到建筑物阴影、山区阴影和植被的影响。

$$NDWI = \frac{P_{green} - P_{nir}}{P_{green} + P_{nir}} \quad (1)$$

2.2.2 改进型归一化水体指数(MNDWI)

MNDWI(式 2)是对 NDWI 的改进,该指数提出以来已在世界范围内得到广泛应用,在我国更是被应用于几乎所有的大江湖海。其中, P_{green} 是绿光波段的反射率, P_{swir} 是短波红外波段的反

射率。该公式通过计算绿光波段与短波红外波段反射率的差值与和值的比值,能够突出水体与其他地物的差异^[13],从而有效地将水体从背景地物中分离出来。这种改进有效减少了建筑物阴影的干扰,提高了城市区域的水体提取精度^[14]。

$$MNDWI = \frac{P_{green} - P_{swir}}{P_{green} + P_{swir}} \quad (2)$$

2.2.3 陆地表面水体指数(LSWI)

LSWI(式 3)是水体提取和湿度检测的重要工具,主要利用短波红外和近红外波段,其中, P_{nir} 表示近红外波段处的地表反射率, P_{swir} 表示短波红外波段处的地表反射率。水体在近红外波段的反射率较低,而在短波红外波段的反射率相对较高。该公式通过计算近红外与短波红外波段反射率的差值与和值的比值,来突出水体与其他地物的差异^[15]。该方法对植被覆盖区域的水体提取具有独特优势,因为植被在短波红外波段有较强的吸收特性。LSWI 在湿地监测和植被覆盖区域的水体提取中表现出色,但在开阔水域的提取精度相对较低。

$$LSWI = \frac{P_{nir} - P_{swir}}{P_{nir} + P_{swir}} \quad (3)$$

2.2.4 自动水体提取指数(AWEI)

AWEI(式 4)是一种较为复杂的水体指数方法,其中, P_{blue} 为蓝光波段反射率, P_{green} 为绿光波段反射率, P_{nir} 为近红外波段反射率, P_{swir1} 为短波红外 1 波段反射率, P_{swir2} 为短波红外 2 波段反射率。该公式中,蓝光和绿光波段对水体有

较好的穿透性,且水体在这两个波段的反射率相对较高,所以用蓝光波段反射率加上2.5倍的绿光波段反射率来增强水体信号^[16-18]。水体的反射率很低,而植被、土壤等在这些波段有较高的反射率,所以减去1.5倍的近红外与短波红外1波段反射率之和,以及0.25倍的短波红外2波段反射率,以抑制非水体地物的信号,突出水体信息。通过这样的组合运算,可以有效地将水体从其他地物中分离出来,以便于水体的自动提取和监测。AWEI 旨在解决阴影(低反射率)和建筑物对水体提取的干扰问题,在复杂地形(如山区)和城市区域的水体提取中表现出明显优势。

$$AWEI = \rho_{blue} + 2.5 \times \rho_{green} - 1.5 \times (\rho_{nir} + \rho_{swir1}) - 0.25 \times \rho_{swir2} \quad (4)$$

2.3 精度评价

利用30个参考数据集对自动提取的结果进行混淆矩阵,以Kappa系数作为评价精度的指标,他是衡量分类数据一致性的指标,评价分类结果与真实情况的吻合程度。同时会分别计算出总体精度(它是指结果中正确分类的样本数量占总样本数量的比例)、用户精度(指预测为某一类别的样本中实际属于这一类别的占比)、生产者精度(指的是实际属于这一类的样本中,能被正确的分类到该类样本的比例)以供参考。

3 结果与分析

3.1 提取结果

本研究聚焦于大庆市连环湖及附近湖泊,该区域地类复杂,耕地、草地、水体,建设用地交错分布^[19],为实现精准的水体提取,研究运用了NDWI、MNDWI、LSWI 和 AWEI 四种指数,并通过不同阈值组合选取最优阈值。过程中,针对每种指数分别设置了多个阈值梯度,从理论阈值出发,结合研究区域的地物光谱特征^[20,21],逐步调整并形成阈值集合。利用专业遥感处理软件,经过严谨的数据处理和分析,最终确定了适用于本研究区域的最佳阈值。使用NDWI、MNDWI、LSWI 和 AWEI 提取水体时的最佳阈值分别为-

0.25、-0.15、0.5 和 0.35。在这些阈值下,能够较好地满足本研究对水体信息准确提取的需求(图2)。

3.2 数据分析

研究结果显示,NDWI水体指数法的Kappa系数为0.87,总体精度94.52%,在四项指标中均领先。可准确快速识别出大部分水体。用户精度90.74%和生产者精度90.92%也都保持在较高水平,既保证了对真实水体有较高的识别能力,又能维持较低的误判情况,在各类场景中都能有较稳定表现。MNDWI水体指数法的Kappa系数为0.86,总体精度94.26%,与NDWI极为接近。在整体表现上也比较出色。生产者精度为92.35%,略高于NDWI,在识别真实水体能力上稍强;用户精度88.85%,略低于NDWI,存在一定误判。LSWI水体指数法的Kappa系数为0.83,总体精度93.18%,在抑制植被覆盖干扰方面优势明显,在植被茂密区域能有较好的水体识别效果,用户精度为91.88%,在四种方法里最高,识别结果可靠性最强;生产者精度仅84.64%,意味着在识别过程中,可能遗漏部分真实水体,尤其在水体分布较为破碎的区域,容易出现漏判。AWEI水体指数法的Kappa系数为0.81,总体精度91.59%,多波段组合有效抑制非水体低反射率背景干扰,在识别水体方面能力突出;生产者精度最高,达到96.04%,表明对真实水体的漏检率最低,但用户精度仅79.68%,因过度强调水体识别,导致误将一些非水体区域识别为水体,虚警率较高。

4 结论

研究结果表明,NDWI方法在总体精度、Kappa系数方面均表现最佳,尤其在在开阔水域和浅层水域提取中具有明显优势,MNDWI方法在水域提取中表现稍逊于NDWI,但对建筑物阴影的干扰具有较强的抵抗能力。LSWI方法在植被覆盖区域的水体提取中具有独特优势,但在其他场景下的表现相对较差。AWEI方法能够有效抑制非水体低反射率背景干扰,结合四种提取

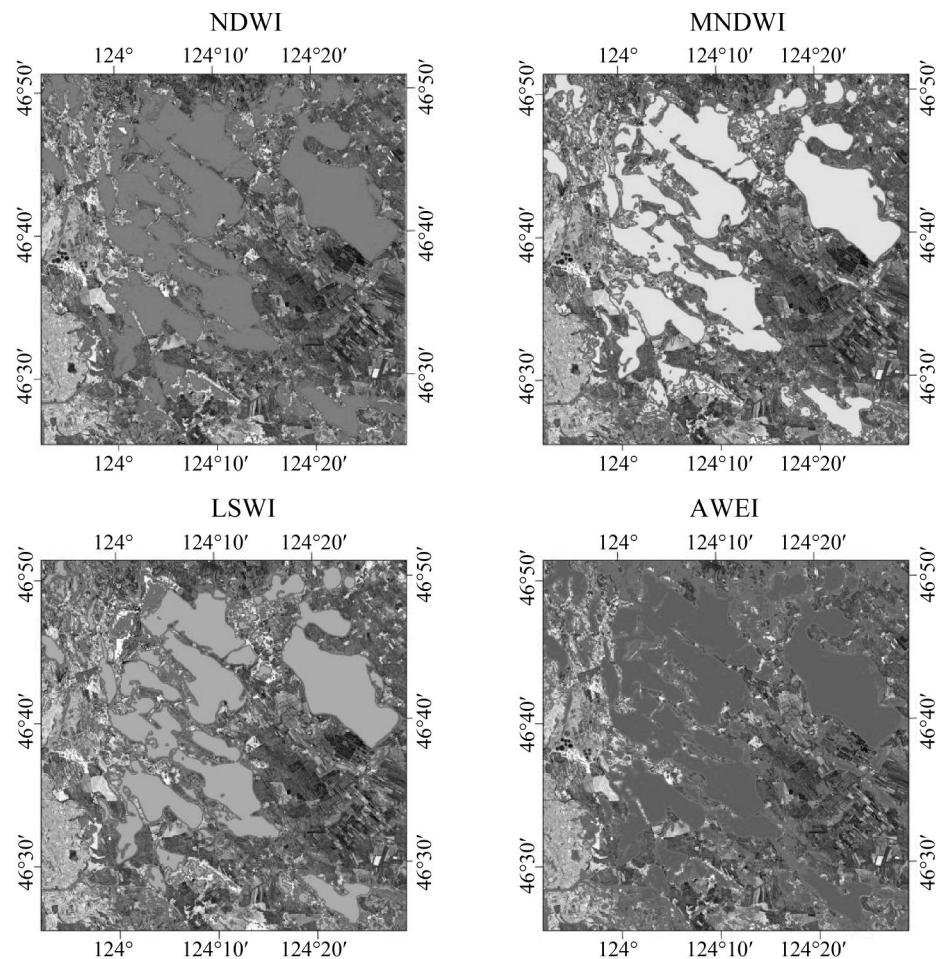


图 2 研究区水体提取结果

表 3 混淆矩阵验证结果

水体指数	Kappa 系数	总体精度	生产者精度	用户精度
NDWI	0.87	94.52%	90.92%	90.74%
MNDWI	0.86	94.26%	92.35%	88.85%
LSWI	0.83	93.18%	84.64%	91.88%
AWEI	0.81	91.59%	96.04%	79.86%

水体方法对比,本研究区地域开阔,NDWI 相对于其他三种方法更为适合,如在城市建筑区 MNDWI 应表现最佳,植被密集区则 LSWI 应最佳,如果背景信息混乱则用 AWEI,所以最后确定 NDWI 方法适用于该研究区的水体提取,目前此方法虽然为最优方法,但仍有错提、漏提现象出现,今后应研究如何让精度继续提高,以更好服务事业。

参考文献(References):

- [1] 严登华,王坤,李相南,等.全球陆地地表水资源演变特征[J].水科学进展,2020,31(05):703-712.
- [2] 马青山,邓志辉,葛伟亚,等.无锡市区水资源与水环境承载力动态特征研究[J].华东地质,2024,45(02):240-253.
- [3] 何智勇,章孝灿,黄智才,等.一种高分辨率遥感影像水体提取技术[J].浙江大学学报(理学版),2004,31(06):701-707.
- [4] 吴志杰,黄绍霖,傅娇凤.多源遥感影像水体指数

- 的交互对比[J]. 测绘科学, 2016, 41(11): 194–199.
- [5] McFeeters S K. The use of Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features[J]. International Journal of Remote Sensing, 1996, 17(07): 1425–1432.
- [6] 肖艳芳, 赵文吉, 朱琳. 利用 TM 影像 BAND1 与 BAND7 提取水体信息[J]. 测绘科学, 2010, 35(05): 226–227.
- [7] 王尚晓, 牛晓楠, 张洁, 等. 新安江流域 2000—2021 年 NDVI 时空变化特征及其影响因素分析[J]. 华东地质, 2023, 44(03): 273–281.
- [8] 刘浩, 周万蓬, 张宇佳, 等. 基于 LANDSAT 影像的 1999–2019 年鄱阳湖面积动态监测[J]. 东华理工大学学报(自然科学版), 2023, 46(01): 68–76.
- [9] 张超, 彭道黎. 基于遥感的水体信息提取技术研究进展[J]. 河南农业科学, 2013, 42(06): 16–20.
- [10] 崔景轩, 李秀芬, 郑海峰, 等. 典型气候条件下东北地区生态系统水源涵养功能特征[J]. 生态学报, 2019, 39(09): 3026–3038.
- [11] Bumairiyemu M, Ding J L, Zibibula S, et al. Characterizing urban expansion of Korla City and its spatial-temporal patterns using remote sensing and GIS methods[J]. Journal of Arid Land, 2017 (03): 458–470.
- [12] 熊珂, 常云鹏, 关键. 基于归一化差异水体指数的水体面积变化监测[J]. 中南林业调查规划, 2024, 43(02): 54–57.
- [13] 徐涵秋. 利用改进的归一化差异水体指数 (MNDWI) 提取水体信息的研究[J]. 遥感学报, 2005, 20(05): 589–595.
- [14] 邓启睿, 张英, 刘佳, 等. 基于 SENTINEL-1/2 数据的洪水淹没范围提取模型[J]. 人民长江, 2024, 55(09): 71–77.
- [15] 黄玉芳, 娄广艳, 葛雷, 等. 基于时间序列遥感的 2020 年黄河三角洲湿地补水效果监测[J]. 人民黄河, 2021, 43(07): 89–93.
- [16] 吴庆双, 汪明秀, 申茜, 等. Sentinel-2 遥感图像的细小水体提取[J]. 遥感学报, 2022, 26(04): 781–794.
- [17] 张翔, 段政, 董颖, 等. 中国东部中生代火山岩区地质文化村建设实践与思考——以福建杞溪为例[J]. 华东地质, 2022, 43(04): 474–489.
- [18] 倪斌, 黄照强, 郭健, 等. 基于机载和星载高光谱遥感的武夷山成矿带蚀变矿物信息识别研究[J]. 华东地质, 2023, 44(01): 67–81.
- [19] 代建军. 基于 Landsat 卫星的沈阳市土地覆盖变化研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2019(05): 176–182.
- [20] 唐志敏, 白晓, 湛龙, 等. 福建省长汀县重点水土流失区土壤元素地球化学特征及其指示意义[J]. 华东地质, 2022, 43(03): 324–335.
- [21] 李沛权. GF-1B、C、D 卫星数据在国土资源调查监测领域应用研究[J]. 黑龙江国土资源, 2024, 22(10): 55–63.

作者简介:

第一作者:李壮,1997 年生,男,黑龙江绥化人,中国地质调查局哈尔滨自然资源综合调查中心,助理工程师,主要研究方向为遥感技术。Email:1031985612@qq.com;

通讯作者:张璇璞,1997 年生,男,辽宁营口人,中国地质调查局哈尔滨自然资源综合调查中心,助理工程师,主要研究方向为生态地质、水文地质。Email:1987784979@qq.com

Extraction Methods of Remote Sensing Water Body based on Multi-Index Fusion

LI Zhuang^{1,2*}, ZHANG Xuanpu^{1,2}, ZHANG Qi^{1,2}, JIANG Nan^{1,2}, GAO Ruoheng^{1,2}, YUE Pai^{1,2}

(1. Harbin Natural Resources Comprehensive Survey Center, China Geological Survey, Harbin 150000, China;

2. Harbin Black Soil Earth Critical Zone Field Scientific Observation and Research Station,

Ministry of Natural Resources, Harbin 150000, China)

Abstract: Water body extraction, as a key application of remote sensing technology in water resource management, environmental monitoring, and disaster early warning, significantly relies on method selection to determine its practical effectiveness. This study conducted a comparative analysis of four typical methods: the Normalized Difference Water Index (NDWI), Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI), Land Surface Water Index (LSWI), and Automated Water Extraction Index (AWEI). Based on Landsat 8 satellite imagery data, the typical geomorphic regions were selected as experimental areas after pre-processing involving radiometric and atmospheric corrections. A combination of quantitative accuracy assessment and visual interpretation was employed to systematically examine the applicability of these indices across diverse surface environments. Results indicated from confusion matrix analysis revealed that the NDWI method achieved an overall accuracy of 94.52% and a Kappa coefficient of 0.87 in open water extraction, demonstrating superior comprehensive performance and suitability for large-scale rapid water identification. MNDWI exhibited stronger anti-interference capabilities in scenarios with mixed spectral noise. LSWI effectively distinguished vegetation from water in densely vegetated areas with lower omission rates. AWEI significantly improved extraction completeness in urban built-up areas and mountainous shadow regions. Through comparative analysis of the four methods, NDWI was identified as the most suitable water extraction approach for the study area.

Key words: water body extraction; NDWI; MNDWI; LSWI; AWEI; spectral index