

## 卷首语

# 解锁地质密码 守护黑土粮仓

被誉为“耕地中的大熊猫”的黑土地，以其肥沃的有机质孕育着年年丰稔，也承载着人与自然和谐共生的期许，是国家粮食安全的“压舱石”。然而，随着生态环境变化与人类活动加剧，黑土地的保护与可持续利用亟待科学支撑——以地表基质调查为主体的地质勘查，正是解锁黑土保护密码的关键钥匙。

本期《黑龙江国土资源》以“黑土地保护与地质勘查”为主题，汇聚了来自中国地质调查局哈尔滨自然资源综合调查中心等单位的最新研究成果，从地表基质调查和绿色勘查技术创新到精准管理支撑，为黑土地保护与可持续发展注入了扎实的地质科学力量。

地表基质是黑土地的“根”，绿色勘查摸清家底是科学保护的前提。《黑土地地表基质调查工作思路——以五常市为例》将地表基质层作为核心，上承地表覆盖、下接地下资源，通过分区、分类、分层的三维调查，清晰刻画了五常市黑土区的地表基质构型，为“宜耕则耕、宜林则林”的精准管理提供了依据。而《黑龙江省巴彦县地表基质类型及特征分析》和《松嫩平原北部五大连池—嫩江地区地表基质层空间分布特征及理化性质研究》则进一步细化，从分类到有机质的理化特征，让黑土地的“健康档案”愈发清晰，为针对性培肥、防侵蚀提供了科学标尺。

黑土地的保护是一场持久战，创新地质勘查技术是这场战役的“制胜法宝”。在生态敏感的黑土区，传统勘探方式的生态扰动始终是难题。地质勘查不仅要“摸清家底”，更要“温柔触碰”。《中国东北浅覆盖区地质矿产绿色勘查实践与应用研究》给出了答案——“一基多孔”减少机台建设，应用模块化钻机降低植被破坏，“以钻代槽”替代传统开挖式槽探，这些技术创新让勘探作业从“破土即扰”变为“零痕勘探”，实现了勘探与护土的双赢。而《音频大地电磁法在五台地区地热资源勘查中的应用研究》《综合电法在大同盆地第四系覆盖区地质调查中的应用》，则展示了地球物理技术的精准赋能：从第四系覆盖区的电性结构，到探测地下含水层、识别隐伏断层，这些“透视地球”的技术，为黑土区水资源保护、地质灾害防治提供了无创解决方案。

本期论文是地质工作者踏遍黑土地足迹的见证，更是守护沃土的誓言，它们构建起“勘查—评价—保护—管理”的完整链条，让黑土地的保护不再停留在经验层面，而是扎根于地质科学的坚实基础之上。期待更多地质工作者以初心为笔、以匠心为墨，续写勘查与保护的新篇章，让黑土地永远肥沃，让“中国饭碗”端得更稳、成色更足！

孙伟

中国地质调查局哈尔滨自然资源综合调查中心 副总工程师

# 组稿专家



## 周传芳

硕士,正高级工程师,中国地质调查局哈尔滨自然资源综合调查中心生态地质调查室副主任。长期从事基础地质和生态地质研究。担任《黑龙江国土资源》副主编、《华东地质》编委。入选黑龙江省高层次人才,自然资源部青年科技人才。在《Scientific Reports》《中国地质》《吉林大学学报(地球科学版)》等期刊发表论文40余篇,出版专著2部,发布地方标准2部。荣获黑龙江省土地学会一等奖2项、二等奖1项,黑龙江省优秀科普视频二等奖1项。



## 郑吉林

理学硕士,高级工程师,中国地质调查局哈尔滨自然资源综合调查中心国土空间生态修复室副主任。长期从事生态地质、区域地质调查和研究工作。担任黑龙江省土地学会常务理事、《黑龙江国土资源》编委。主持省部级项目4项,编写成果报告20余份。以第一作者和通讯作者身份在《Journal of Hydrology: Regional Studies》《Scientific Reports》《地质通报》等期刊发表论文10余篇,申请专利2项。获中国地质调查局地质调查十大进展1项,黑龙江省土地学会优秀成果一等奖1项、二等奖2项。

# 目 次

(月刊)

(2003年创刊)

第23卷 第9期(总第278期)

2025年9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

编委会主任单位:

中国地质调查局哈尔滨自然资源综合调查中心

《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 珂

本期执行编辑: 周传芳

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

顾问单位:

中国地质调查局哈尔滨自然资源综合调查中心

## 地表基质

黑土地地表基质调查工作思路——以五常市为例

..... 徐立明, 高晓琦, 姜 平, 等 (3)

晋北地区土地利用 / 覆盖时空格局演变分析

..... 魏小勇, 周传芳, 郑吉林, 等 (12)

松嫩平原北部五大连池—嫩江地区地表基质层空间分布特征及理

化性质研究 ..... 赵国强, 梁中恺, 韩守德, 等 (23)

黑龙江省巴彦县地表基质类型及特征分析

..... 张海成, 赵洪强, 段明新, 等 (35)

## 地质矿产

中国东北浅覆盖区地质矿产绿色勘查实践与应用研究

..... 陈 宇, 杨华本, 籍哲羽, 等 (46)

大兴安岭阿里河地区晚二叠世花岗质糜棱岩的发现及地质意义

..... 郑吉林, 刘军帅, 姚 宇, 等 (55)

大兴安岭北段十五里桥地区早白垩世火山岩 U-Pb 年代学、地球

化学及其地质意义 ..... 王久懿, 顾 萌, 周传芳 (65)

漠河古莲河林场侵入岩年代学、岩石地球化学特征研究

..... 朱显男, 陆 胜, 李一成, 等 (79)

黑龙江省北安市地表水资源现状与评价

..... 张海成, 段明新, 宋昊南, 等 (91)

## 勘查技术

音频大地电磁法在五台地区地热资源勘查中的应用研究

..... 刘 庆, 王 康, 孙彦海, 等 (100)

综合电法在大同盆地第四系覆盖区地质调查中的应用

..... 石致君, 孙彦海, 刘 庆, 等 (108)

基于音频大地电磁测深法的地下水勘探研究——以山西省五台县

斗咀村与两涧村为例 ..... 王 康, 孙彦海, 陈海江, 等 (116)

(Monthly)  
(Published Since 2003)

Vol.23 No.9 (Serial No.278)  
Published on Sep.28, 2025

China Academic Journal Network Publishing

Database

China Core Journal Alternative Database

China Science and Technology Journal Database

Affiliation of the Chair: Harbin Center for Integrated  
Natural Resources Survey,  
China Geological Survey

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 Jingcai ZHAO Haishan ZHAO Jinghai  
GONG Jinhuai XU Liming GAO Fengjie  
GAO Chunyi HUANG Zhaoming HUANG Shanlin  
CUI Yu SHANG Yuhang SU Yining  
LIANG Xufang PENG Xiao PAN Wei

Executive Editor: ZHON Changfang

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

Retained Advisor by: Harbin Center for Integrated  
Natural Resources Survey,  
China Geological Survey

# CONTENT

## SURFACE SUBSTRATE

Working Approach for Surface Substrate Survey of Black Soil: A Case Study of Wuchang City

..... XU Liming, GAO Xiaoqi, JIANG Ping, et al (11)

Analysis of Spatiotemporal Evolution Characteristics of Land Use and Land Cover in North Shanxi Province

..... WEI Xiaoyong, ZHOU Chuanfang, ZHENG Jilin, et al (22)

Study on the Spatial Distribution Characteristics and Physicochemical Properties of the Surface Substrate Layer in the Wudalianchi - Nenjiang Area of the Northern Songnen Plain

..... ZHAO Guoqiang, LIANG Zhongkai, HAN Shoude, et al (34)

Analysis of the Types and Characteristics of the Surface Substrate in Bayan County, Heilongjiang Province

..... ZHANG Haicheng, ZHAO Hongqiang, DUAN Mingxin, et al (45)

## GEOLOGICAL AND MINERAL RESOURCES

Study on Green Exploration Practice and Application of Geology and Ineral Resources in Shallow Covered Area of Northeast China

..... CHEN Yu, YANG Huaben, JI Zheyu, et al (54)

Discovery and Geological Significance of Late Permian Granitic Mylonites in the Alihe Region, Greater Xing'an Mountains

..... ZHENG Jilin, LIU Junshuai, YAO Yu, et al (64)

U-Pb Chronology, Geochemistry and Geological Significance of Early Cretaceous Volcanic Rocks in Shiwuliqiao Area, Northern Greater Khingan Mountains

..... WANG Jiuyi, GU Meng, ZHOU Chuanfang (78)

Geochronology and Geochemistry of Intrusive Rocks in Gulianhe Forest Farm of Mohe Area

..... ZHU Xiannan, LU Sheng, LI Yicheng, et al (90)

Current Situation and Evaluation of Surface Water Resources in Bei'an City, Heilongjiang Province, China

..... ZHANG Haicheng, DUAN Mingxin, SONG Haonan, et al (99)

## EXPLORATION TECHNOLOGY

Application Research of Audio - Magnetotelluric Method in Geothermal Resources Exploration in Wutai Area

..... LIU Qing, WANG Kang, SUN Yanhai, et al (107)

Application of Integrated Electrical Methods in Geological Survey of Quaternary-Covered Areas in Datong Basin

..... SHI Zhijun, SUN Yanhai, LIU Qing, et al (115)

Research on Groundwater Exploration Using Audio Magnetotelluric Sounding Method: A Case Study of Douzui Village and Liangjian Village in Wutai County, Shanxi Province

..... WANG Kang, SUN Yanhai, CHEN Haijiang, et al (122)

# 黑土地地表基质调查工作思路

——以五常市为例

徐立明<sup>1,2,3</sup>,高晓琦<sup>1,3</sup>,姜平<sup>1,3\*</sup>,贾立明<sup>1,3</sup>,王久懿<sup>1,3</sup>,孙彦峰<sup>1,3</sup>

- (1. 中国地质调查局哈尔滨自然资源综合调查中心, 哈尔滨 150086;
2. 自然资源要素耦合过程与效应重点实验室, 北京 100055;
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:**地表基质层作为自然资源分层分类模型的第一层,是地球表层孕育和支撑森林、草原、水、湿地等各类自然资源的基础物质,而黑土地作为重要的耕地资源,系统查清黑土地地表基质现状,探索黑土地地表基质调查如何支撑自然资源管理,为黑土地合理利用与科学保护提供基础参考。通过系统梳理五常市地质背景、地形地貌、土壤类型、土地利用状况等资料,按照侧重基质、兼顾地表,分区(城镇空间、农业空间、生态空间)、分类(地表基质类型)、分层次(浅层 0~2m、中层 2~5m、深层 5~50m)部署原则,实施基础地质、地球物理和地球化学等多种调查手段,编制五常市地表基质平面图、剖面图和评价图等,提出地表基质调查支撑自然资源管理的表达新模式,总结形成五常地区“一层居中,两点支撑”的地表基质支撑服务自然资源管理的思路框架。

**关键词:**地表基质;元素;结构;五常地区

中图分类号:P962

文献标志码:A

文章编号:1672-2736(2025)09-0003-9

## 0 引言

2020 年 1 月 18 日,自然资源部发布《自然资源调查监测体系构建总体方案》,提出系统性、整体性、协同性重构自然资源调查监测体系,构建自然资源分层分类模型,提出地表基质层的概念。认为地表基质是地球表层孕育和支撑森林、草原、水、湿地等各类自然资源的基础物质,范围覆盖陆海空间<sup>[1]</sup>。黑土地地表基质调查作为自然资源调查监测的新领域,其调查内容广(类型分布、结构属性、理化性质等)、技术方法新(工程地质钻探)、成果表达难(从学理出发如何支撑管理)。迫切需要通过调查实践探索总结技术方法和成果表达形式,为全面开展这一基础性调查工作提供支撑。

从地表基质分类上看,《地表基质分类方案

(试行)》将地表基质分为岩石、砾质、土质、泥质 4 个一级类,并将这 4 个一级类再细分为 14 个二级类<sup>[2]</sup>。殷志强等<sup>[3]</sup>根据承德市地表基质调查研究实际案例,提出了地表基质的三级分类方案,建议在物质组成、成因类型、地貌形态、粒级、厚度、有机质等基础上,岩石以成因类型+地貌形态+粒级等进行命名,第四系松散沉积物以成因类型(地貌形态)+粒级(质地)等进行命名。侯红星等<sup>[4]</sup>利用“土壤质地+土壤发生学分类”相结合的方式,进行黑土地地表基质三级分类。贾磊等<sup>[5]</sup>针对山地-丘陵区建议基于地表基质的地质建造、发生、发育过程和理化性质等进行进一步细分。从调查尺度上看,侯红星等<sup>[6]</sup>建议根据调查区范围、调查应用服务对象、不同比例尺调查精度要求等,划分为全国尺度范围或小比例尺(小于 1:100 万),流域尺度、省级行政区

基金项目:中国地质调查局地质调查项目(DD20220853;DD20230514)。

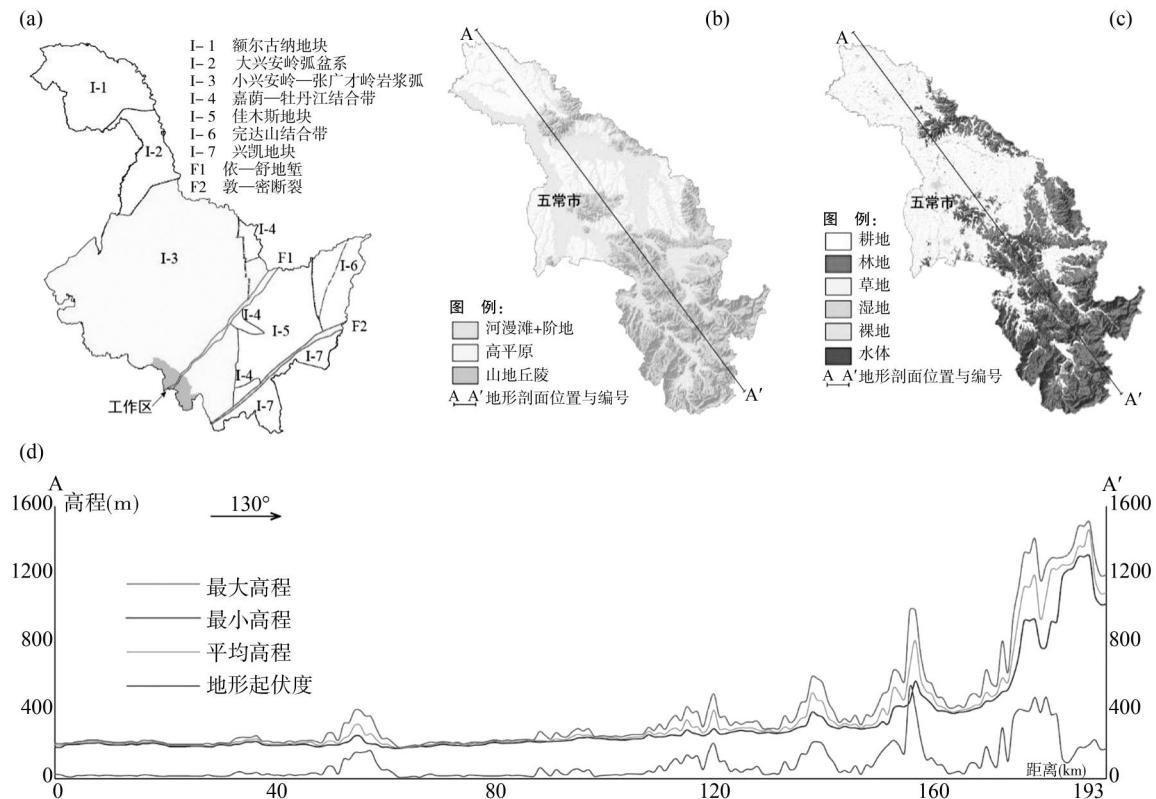


图 1 黑龙江省大地构造略图(a,据文献[13]修改)、五常市地貌类型图(b)、土地利用类型图(c)和地形起伏曲线(d)

划或中等比例尺(1:100万~1:50万),市(县)、乡镇或大比例尺(大于1:5万)。目前已开展的工作主要集中于1:25万尺度,在南方红壤区、西北黄土区等典型区开展了1:5万试点工作。从调查深度上看,殷志强等<sup>[7]</sup>建议考虑风化为主的表生地质作用下限、植被根系能够达到的深度、地下水位波动下限等几个深度,分区确定地表基质调查深度。已有学者通过实践划分了表层基质(地表土壤层,也叫生产层,0~1m)、中层基质(中间生态层,1~10m)和深层基质(深部基底层,10~50m)<sup>[3,4]</sup>。

虽然,多位专家学者在河北(保定、承德、易县)、内蒙古扎兰屯、珠三角、海南岛等地<sup>[5,8-12]</sup>进行了很好的探索研究工作,这些研究涵盖了地表基质分类方案、工作方法流程和成果服务等方面,但针对于某一区域的黑土地地表基质调查实践还有待进一步梳理总结,尤其是地表基质如何支撑自然资源管理。笔者通过开展五常市黑土地地表基质调查工作,从地表基质的平面展布、垂向结构、评估评价到典型实例如何支撑服务自

然资源管理入手,探索成果表达形式,梳理总结经验,旨在通过实践与思考抛砖引玉,共同促进高质量地表基质调查工作。

## 1 研究区概况

研究区位于黑龙江省五常市,是松嫩平原水稻主产区。大地构造位置属小兴安岭-张广才岭岩浆弧(Ⅱ级)(图1a),区内出露地质体主要包括古生代火山岩及火山碎屑岩、中生代火山岩及火山碎屑岩,以及第四系冲洪积、湖积砂土、亚砂土、黏土等,侵入岩为晚三叠世—早侏罗世花岗闪长岩、花岗岩等。地势东南部较高,为中低山地貌;中部丘陵起伏,为低山丘陵地貌;西北部属平原地带,为剥蚀冲积、湖积高平原地貌,是典型的山区平原过渡带(图1(b,d))。按照土壤发生学分类区内发育暗棕壤、白浆土、黑钙土、草甸土和水稻土。土壤随地形地貌呈带状分布,东部山区主要为暗棕壤,中部丘陵和高平原区发育白浆土和草甸土,逐步向西北过渡到河谷平原的黑钙土。土地利用类型主要为林地、耕地、草地、

水体和湿地等(图1c),林地主要分布于山地丘陵区,草地分布于阶地靠山侧,耕地分布于高平原地貌区。区内水系发达,河网密布,平均年径流总量为34亿m<sup>3</sup>,主要河流为拉林河和牤牛河,区内有磨盘山水库和龙凤山水库,主要用于农业灌溉。

## 2 技术方法

以基础地质学和自然资源科学为理论基础,结合土壤学、林草学、农业学等相关领域内容,按照侧重基质、兼顾地表,分区(城镇空间、农业空间、生态空间)、分类(岩石、砾质、土质、泥质)、分层次(浅层0~2m、中层2~5m、深层5~50m)部署原则,确立多学科、多手段、多方法、多尺度、多维度联合调查研究的技术路线。地表基质层作为自然资源三维立体模型的第一层,涉及到岩石、土质、砾质、泥质等基质类型,工作方法包括野外调查与资料改化相结合,点(调查点、钻探点)、线(地球物理测线、综合剖面)、面(卫星遥感)相结合,地质、地球物理、地球化学等多种调查手段相结合。

### 2.1 路线调查

在系统分析已有资料基础上,开展地貌、地质、地表基质调查,圈定地貌单元、地表基质单位及地下一定深度范围的地表基质层结构,调查各种构造要素的几何与运动学特征。

### 2.2 地球物理调查

地球物理调查是识别地表基质垂向结构的重要手段之一,在充分收集已有地球物理调查资料基础上,针对空白区补充相应地球物理调查工作,其重点是探测地表基质层结构及其边界、反演基岩面形态、辅助构建三维地质模型等。配合遥感解译、路线调查为钻探工作布置提供依据。

### 2.3 钻探

钻探的工作手段按照揭露深度的不同可将工程地质钻探细分为洛阳铲调查、背包钻调查和汽车钻调查。根据研究区地层结构,通常情况下洛阳铲调查控制深度为2m,背包钻调查控制深

度为5m,汽车钻调查控制深度为50m。其目的在于调查地表基质层及基岩地质构造特征、建立地表基质层序列。在工作部署中遵循由已知到未知、由疏到密的原则施工,根据不同的比例尺要求,明确研究区地形地貌、地质条件、土壤类型、用地类型等背景条件,按照分区、分类、分层的原则部署钻探点位,采样点布置在地表基质平面展布代表性位置,将所取地表基质样心进行分层取样测试其物理性质和化学性质。

## 3 地表基质成果表达形式

地表基质调查作为一项基础性调查,最主要成果表达形式即为图件。基于前期实践经验,系统编制了五常市地表基质平面图、剖面图和评价图等,全面掌握五常市地表基质平面分布和垂向结构特征,有效支撑自然资源管理。

### 3.1 地表基质平面图

通过调查发现,地表基质在平面分布上存在空间异质性,尤其是和地貌类型关系密切。基于此特点,探索形成以地貌类型为底,叠加地表基质构型的平面图表达形式(图2)。研究表明,土质基质分布于冲洪积平原和阶地区,多受河流沉积作用影响,用地类型多为耕地。其中壤土+壤土/砂土构型多分布于旱地区,土壤类型多为黑土;壤土+黏土构型多分布于水田区,土壤类型多为白浆土、草甸土。砾质基质分布于河床水系区,以中砾为主。岩石基质主要分布于山地丘陵区,主要受岩浆活动影响,用地类型多为林地、灌丛等,土壤类型为暗棕壤。

### 3.2 地表基质剖面图

在地表基质垂向结构调查中采用物探与钻探相结合的方式。平原区主要通过综合剖面,利用洛阳铲调查识别黑土层厚度和土质基质类型,结合微动勘探和钻孔资料分析对比,形成平原区地表基质分布剖面图,图面重点表达地表基质类型、垂向分层和景观属性(图3)。山地区进行上覆土“揭盖”表示,选取典型山地垂直等高线设置剖面,通过洛阳铲施工揭露上覆土质基质厚度

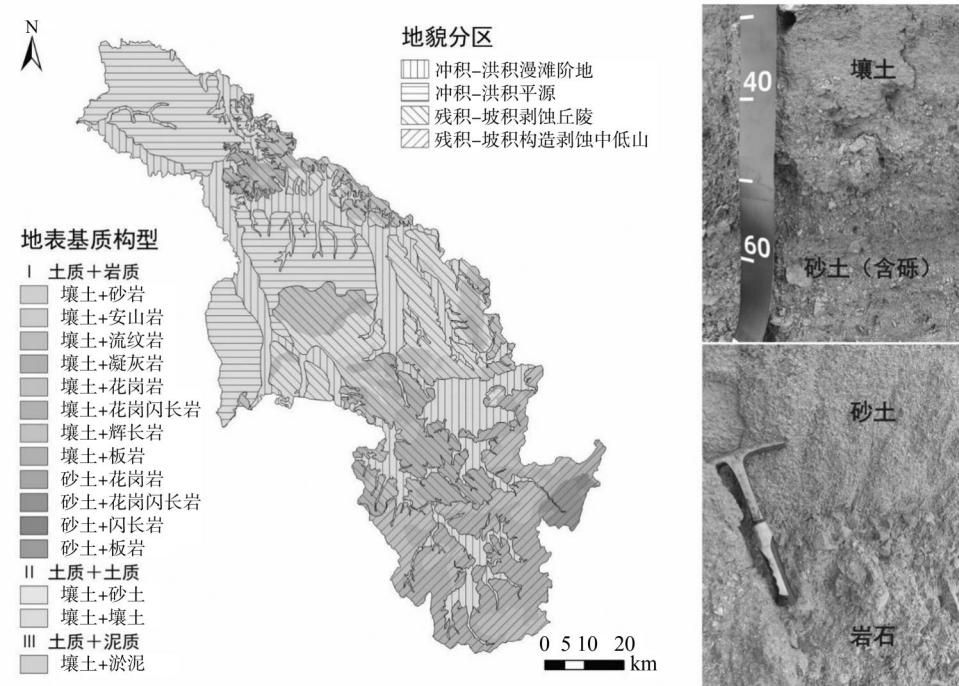


图 2 五常市地表基质分类图

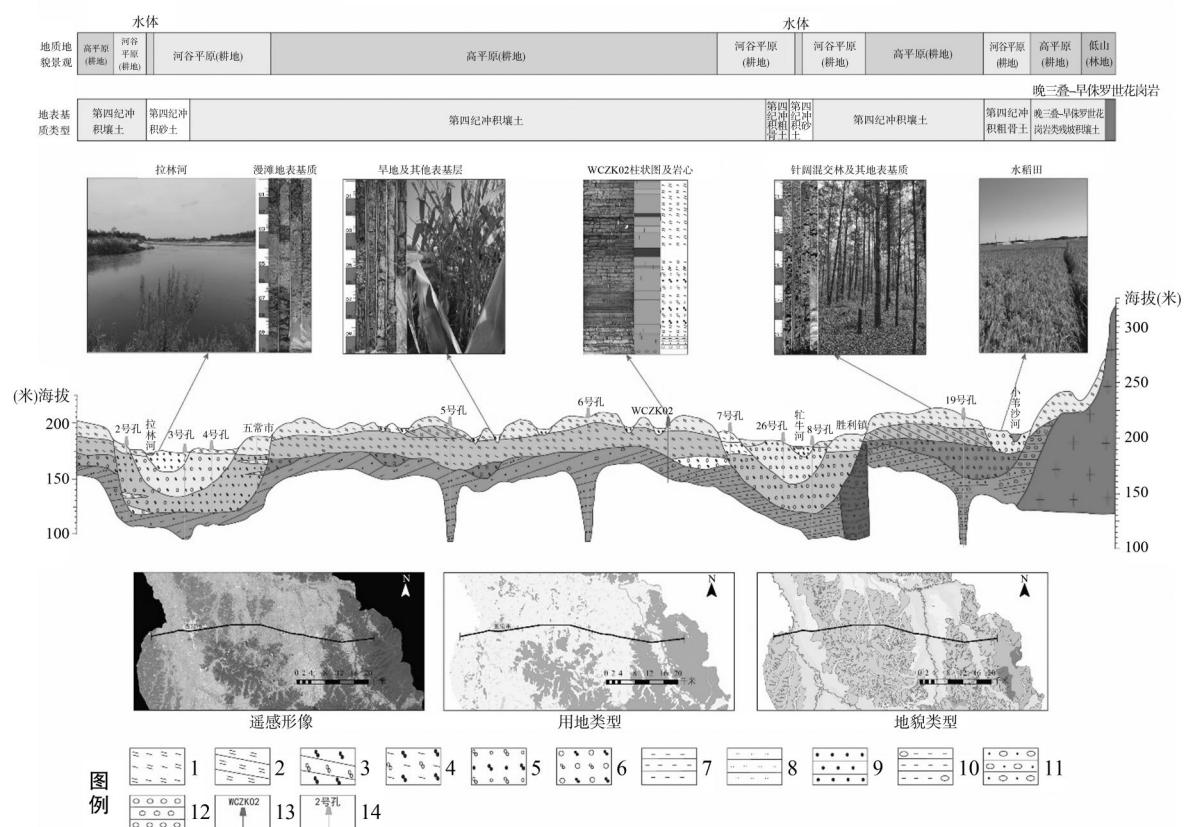


图 3 平原区地表基质综合剖面图

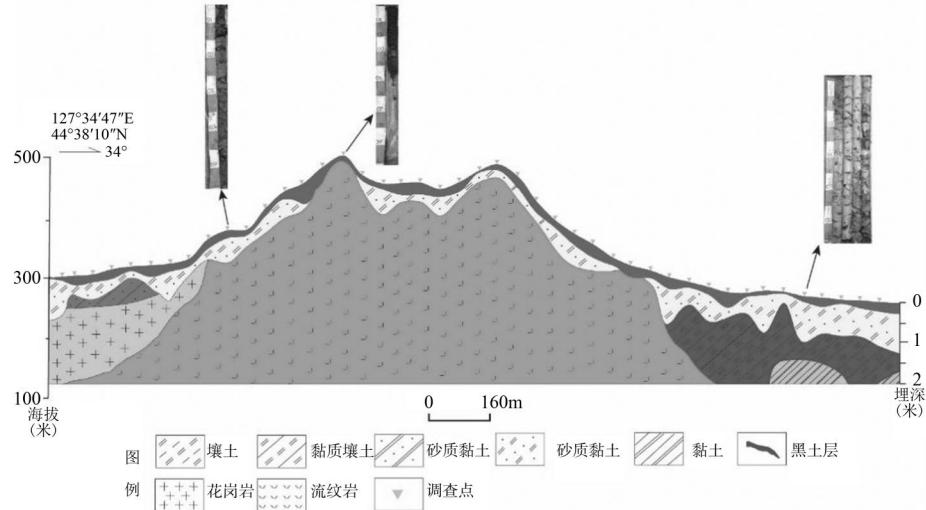


图 4 山地区地表基质综合剖面图

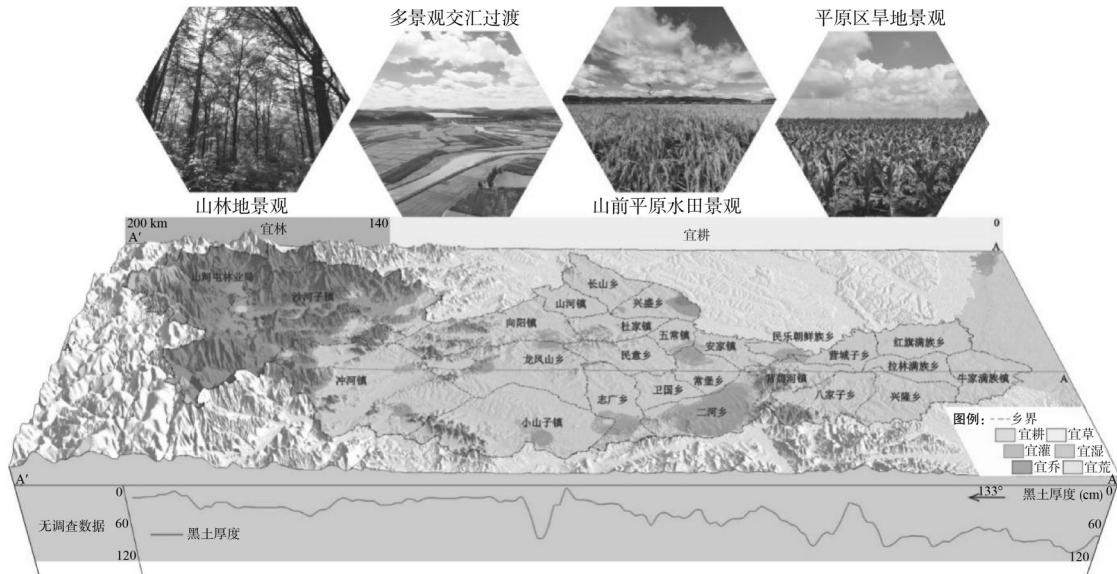


图 5 五常市地表基质综合评价图

及分层情况。调查发现,山顶上覆土较薄,多发育乔木,山脚坡度较缓,土质较厚,发育乔木+灌丛(图 4)。

### 3.3 地表基质评价图

在野外实地调查的基础上,结合用地类型、地表基质、地形地貌和水源补给四个方面对研究区内的土地适宜性进行评价(图 5)。应用物元分析法<sup>[14]</sup>,以耕地、林地、灌木、草地、湿地和荒地这六种用地类型的环境适宜性为评价目标,依次设置六个特征集;采取适宜、较适宜和不适宜三级分类,确定评价等级标准和评价等级的经典

国和节阈,从而得到特征元。选取坡度、高程、黑土厚度、土壤质地和供水成本五项指标作为特征值,根据获取的各类数据确定特征值的实际值。采取变异系数法,依据分布的离散程度确定某一特征集下每个特征值的权系数。根据各等级的关联度大小评定土地利用适宜性评价等级。依托 GIS 平台进行栅格数据处理,得出研究区全域宜林、宜灌、宜草、宜湿、宜耕和宜荒土地空间分布情况,并进行可视化表达。研究表明,五常市东南部宜乔、宜灌,中部和西北部宜耕。

## 4 黑土地地表基质调查如何支撑自然资源管理

自然资源管理涉及到社会、经济、生态、文明等多个领域,从管理对象、管理主体到管理保障等方面内容<sup>[15]</sup>。自然资源管理分散在多部委,自然资源开发利用与保护的监管存在缺位现象<sup>[16]</sup>。因此,2018年,我国组建自然资源部,旨在统一行使全民所有自然资源资产所有者职责,统一行使所有国土空间用途管制和生态保护修复职责,标志着我国已经把自然资源作为一个整体考虑<sup>[16]</sup>。自然资源是指天然存在、有使用价值、可提高人类当前和未来福利的自然环境因素的总和,包括土地、矿产、森林、草原、水、湿地、海域海岛等自然资源<sup>[1]</sup>。自然资源管理需要摸清资源底数,这就需要开展自然资源调查监测。其中,掌握地表基质这一“资源的资源”<sup>[17]</sup>,厘清其如何支撑孕育各类自然资源,是完善自然资源调查监测体系的关键。已有学者就地表基质调查支撑自然资源管理进行了大量研究,殷志强等<sup>[3,7,18,19]</sup>探索地表基质层与农林业种植适宜关系,为地表基质支撑自然资源管理提供思路。通过试点项目调查实践,细化了地表基质分类,构建了地表基质调查方法体系,初步探索地表基质成果表达形式与服务方向。葛良胜等<sup>[20]</sup>围绕高标准农田建设重点工作面临的重大需求和关键问题,提出基于地表基质调查支撑服务高标准农田建设的解决方案。张凤荣<sup>[21]</sup>建议突出地表基质在“土石山区”服务土地综合整治生态修复的

重要地位。以上研究成果从不同角度进行了地表基质调查支撑自然资源管理的实践探索,为地表基质调查成果服务方向开拓了思路。

自然资源管理的基础是统一自然资源分类。当前,众多学者对自然资源分类进行了探索研究,郝爱兵等<sup>[22]</sup>充分考虑我国自然资源的法律法规和政府管理职责,提出了基于地球圈层与自然资源分层分类关系的基本框架方案,初步划分了10个自然资源一级类和相应的34个自然资源二级类。葛良胜等<sup>[23]</sup>提出了基于服务自然资源综合调查业务的自然资源分类方案,确定地下空间、矿产、浅表地质层、土地、水、森林、草地和湿地等作为自然资源综合调查的8个基本类。张凤荣<sup>[24]</sup>提出应按照不重不漏原则,初步以原生资源和次生资源构建分类框架。虽然自然资源分类尚未统一,但《自然资源调查监测体系构建总体方案》明确要围绕土地、矿产、森林、草原、水、湿地和海域海岛七类资源的调查监测进行规划设计。近年来,随着第三次全国国土调查的结束,多数学者建议以国土“三调”成果为底图开展森林、草原、水、湿地等自然资源专项调查<sup>[25-27]</sup>。国土“三调”成果作为体现国土空间唯一性的一张底图,建设了成果数据库、基础信息平台和国土空间规划“一张图”,虽然可以直观反映用地类型与自然资源的对应关系,但相应图斑孕育支撑自然资源的地表基质类型并未表达清楚,而且表层之下的地表基质是否仍支撑孕育自然资源的潜力不得而知。因此,基于地表基质以垂向构型的表达方式,建议在制作自然资源统

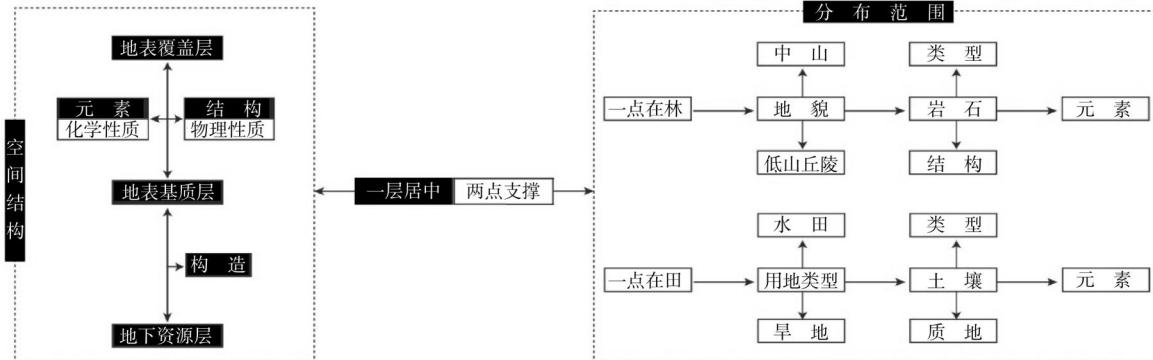


图 6 五常市地表基质支撑服务自然资源管理思路框架图

一调查底图时融入地表基质要素,可在地表基质支撑宜林则林、宜耕则耕的评价上发挥作用,使之能够在横向与垂向上支撑自然资源管理<sup>[28]</sup>。

在研究五常市地表基质的工作中发现,地表基质调查内容重点是结构(物理性质)和元素(化学性质),《地表基质分类方案(试行)》将地表基质分为岩石、砾质、土质、泥质可以简单的理解为粒度的大小,粒度细的为泥,粗些为土,再粗些为砾,成块的为岩,以此获得地表基质平面上类型的分布情况。通过研究,总结形成“一层居中,两点支撑”的思路框架(图6),地表基质层居中,其上为地表覆盖层,关键因素在元素和结构,向下为地下资源层,关键因素在构造。对自然资源管理的两点支撑,结合五常市自然资源类型可以归纳为一点在林,一点在田。森林重点考虑地貌,在地表基质调查上以基岩为底,对上覆土进行揭露,结合地形、地貌、气候等因素查清地表基质对森林资源的支撑情况。如五常市东南部主要为土质+岩石地表基质构型,且土质层较薄处多为乔木,较厚处多为灌木。田地重点考虑用地类型,系统查明地表基质类型、结构和元素对水田与旱田的支撑情况。因此,建议地表基质平面分布调查工作方法应以资料收集改化为主,补充调查为辅,确定岩、砾、土、泥的结构和元素分布范围;地表基质垂向结构调查应以实地调查为主,收集改化资料为辅,查清垂向空间结构特征和元素迁移转化规律。

当然,由于地表基质涉及的专业知识和学科门类众多,工作内容、技术路线、成果表达等方面仍在探索中,本文提出的结构与元素仅是地表基质调查过程中需要重点考虑的两个方面。“一层居中,两点支撑”的思路框架也仅是笔者在五常市开展工作的一些思考,后续随着地表基质工作的逐步深化还需进一步修改完善思路框架。

## 5 结论

(1) 地表基质调查工作方法应以野外调查与资料改化相结合,点(调查点、钻探点)线(地球物理测线、综合剖面)面(卫星遥感)相结合,

地质、地球物理、地球化学等多种调查手段相结合。

(2) 在地表基质成果表达方面,编制地表基质平面图、剖面图和评价图等,平面图应以地貌类型为底,叠加地表基质构型;剖面图重点表达地表基质垂向分层、地表基质类型和景观属性;评价图以“宜耕则耕,宜林则林”为目标。

(3) 在地表基质支撑自然资源管理方面,总结形成“一层居中,两点支撑”的思路框架,对自然资源管理的两点支撑,结合五常的主要自然资源类型可以归纳为一点在林,一点在田。

致谢:

中国地质调查局自然资源综合调查指挥中心刘晓煌正高级工程师在成文过程中提出了宝贵意见,松嫩平原哈尔滨地区黑土地地表基质调查项目组同仁在数据采集和图件制作方面给予了支持与协助,在此一并致谢。

## 参考文献(References):

- [1] 自然资源部. 自然资源部关于印发《自然资源调查监测体系构建总体方案》的通知(自然资发[2020]15号)[J]. 自然资源通讯, 2020, 000(002): 13–22.
- [2] 自然资源部. 自然资源部办公厅关于印发《地表基质分类方案(试行)》的通知(自然资办发[2020]59号)[J]. 自然资源通讯, 2021, 000(002): 34–37.
- [3] 殷志强, 陈自然, 李霞, 等. 地表基质综合调查: 内涵、分层、填图与支撑目标[J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(01): 144–151.
- [4] 侯红星, 葛良胜, 孙肖, 等. 地表基质在中国黑土地资源调查评价中的应用探讨—基于黑龙江宝清地区地表基质调查[J]. 自然资源学报, 2022, 37(09): 2264–2276.
- [5] 贾磊, 刘洪, 欧阳渊, 等. 基于地质建造的南方山地-丘陵区地表基质填图单元划分方案—以珠三角新会-台山地区为例[J]. 西北地质, 2022, 55(04): 140–157.
- [6] 侯红星, 葛良胜, 孙肖, 等. 地表基质调查内容及要素-属性指标体系探讨[J]. 自然科学, 2021, 9(04): 433–442.
- [7] 殷志强, 秦小光, 张蜀冀, 等. 地表基质分类及调查

- 初步研究[J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(06): 14–20.
- [8] 侯红星, 张蜀冀, 鲁敏, 等. 自然资源地表基质层调查技术方法新经验: 以保定地区地表基质层调查为例[J]. 西北地质, 2021, 54(03): 277–288.
- [9] 殷志强, 卫晓锋, 刘文波, 等. 承德自然资源综合地质调查工程进展与主要成果[J]. 中国地质调查, 2020, 7(03): 1–12.
- [10] 王献, 鲁敏, 侯红星, 等. 山区平原过渡区土质地表基质空间异质性特征分析—以河北省易县东部地区为例[J]. 中国地质调查, 2023, 10(03): 60–66.
- [11] 陈彭, 侯红星, 马骏驰, 等. 低山丘陵区黑土地地表基质调查研究思路—以扎兰屯地区为例[J]. 中国国土资源经济, 2023, 36(02): 81–89.
- [12] 李响, 周效华, 相振群, 等. 地表基质调查的工作思路刍议: 以海南岛为例[J]. 地质通报, 2023, 42(01): 68–75.
- [13] 付俊彧, 刘英才, 赵春荆, 等. 东北地区大地构造相图(1:150万)说明书[M]. 北京: 地质出版社, 2018: 21–63.
- [14] Wu Y X, Jiang L L, Ouyang X T, et al. Sustainable evaluation of the water footprint in Heilongjiang Province, China, based on correlation – matter element analysis [J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 408: 137231.
- [15] 宋马林, 崔连标, 周远翔. 中国自然资源管理体制与制度: 现状、问题及展望[J]. 自然资源学报, 2022, 37(01): 1–16.
- [16] 中国矿业报. 组建“自然资源部”的来龙去脉[J]. 国土资源, 2018, 34(03): 16–21.
- [17] 葛良胜, 杨贵才. 自然资源调查监测工作新领域: 地表基质调查[J]. 中国国土资源经济, 2020, 33(09): 4–11.
- [18] 邵海, 王英男, 殷志强, 等. 承德坝上高原如意河流域地表基质调查与编图探索[J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(02): 150–159.
- [19] 苏佳鑫, 王建民, 韩艺, 等. 地表基质调查助力黑土地保护利用——以黑龙江省富裕县为例[J]. 黑龙江国土资源, 2024, 22(12): 55–64.
- [20] 葛良胜, 夏锐. 高标准农田建设: 基于地表基质调查的解决方案[J]. 中国国土资源经济, 2023, 36(05): 4–13.
- [21] 张凤荣. 加快山区地表基质调查服务土地综合整治生态修复[N]. 中国自然资源报, 2021年3月26日.
- [22] 葛良胜, 夏锐. 自然资源综合调查业务体系框架[J]. 自然资源学报, 2020, 35(09): 2254–2269.
- [23] 郝爱兵, 殷志强, 彭令, 等. 学理与法理和管理相结合的自然资源分类刍议[J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(06): 1–7.
- [24] 张凤荣. 建立统一的自然资源系统分类体系[J]. 中国土地, 2019, 37(04): 9–10.
- [25] 晏磊, 吴海平. 国土“三调”后如何开展自然资源统一调查[J]. 中国国土资源经济, 2021, 34(03): 21–24.
- [26] 张力仁, 冯然, 齐中华, 等. 基于第三次国土调查的自然资源调查研究[J]. 测绘通报, 2020, 65(04): 130–133.
- [27] 吕广进, 于连莉, 崔元浩. “三调”成果在自然资源和规划管理中的应用探讨[J]. 规划师, 2021, 37(102): 31–36.
- [28] 徐立明, 王久懿, 高晓琦, 等. 五常市黑土地地表基质调查支撑自然资源管理的思考与实践[J]. 地质论评, 2024, 70(S01): 329–330.

#### 作者简介:

第一作者:徐立明,男,1989年生,吉林农安人,硕士,中国地质调查局哈尔滨自然资源综合调查中心,工程师,主要研究方向为地表基质调查。Email:xuliming@mail.cgs.gov.cn;

通讯作者:姜平,男,1991年生,中国地质调查局哈尔滨自然资源综合调查中心,工程师,主要研究方向为地表基质调查。Email:jiangping@mail.cgs.gov.cn

## Working Approach for Surface Substrate Survey of Black Soil: A Case Study of Wuchang City

XU Liming<sup>1,2,3</sup>, GAO Xiaoqi<sup>1,3</sup>, JIANG Ping<sup>1,3\*</sup>, JIA Liming<sup>1,3</sup>, WANG Jiuyi<sup>1,3</sup>, SUN Yanfeng<sup>1,3</sup>

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

2. Key Laboratory of Natural Resource Coupling Process and Effects, Beijing 100055, China;

3. Observation and Research Station of Earth Critical Zone in Black Soil, Harbin, Ministry of Natural Resources,  
Harbin 150086, China)

**Abstract:** As the first layer of the classification model of natural resources, the surface substrate layer is the basic material that supports various natural resources such as forests, grasslands, water and wetlands on the earth's surface. As an important cultivated soil resource, it is necessary to systematically identify the present situation of the surface substrate of black soil, so as to provide basic references for the rational utilization and scientific management of black land. Based on the theory of earth systems science and natural resources science, combined with pedology, forestry and grass science, agriculture and other related fields, and in accordance with the deployment principles of focusing on surface substrate, considering the surface, zoning (urban space, agricultural space, ecological space), classification (surface substrate type), and hierarchy (shallow layer 0~2m, middle layer 2~5m, deep layer 5~50m), establish multidisciplinary, multi means, multi methods of multi-dimensional joint investigation and research. As the first layer of the three-dimensional model of natural resources, the surface substrate layer involves rock, soil, gravel, mud and other substrate types. The working methods include combining field survey with data modification, and combining geological, geophysical, geochemical and other survey methods to prepare the surface substrate plan of Wuchang City, exploring the expression forms of surface substrate results, such as profile maps and evaluation maps. Summarize the formation of a conceptual framework for surface substrate support services for natural resource management in the Wuchang region with “one layer centered and two points supported”.

**Key words:** surface substrate; element; structure; Wuchang Region

# 晋北地区土地利用/覆盖时空格局演变分析

魏小勇<sup>1,2</sup>, 周传芳<sup>1,2\*</sup>, 郑吉林<sup>1,2</sup>, 郭晓宇<sup>1,2</sup>, 孙彦峰<sup>1,2</sup>, 贾立明<sup>1,2</sup>

(1. 中国地质调查局哈尔滨自然资源综合调查中心, 哈尔滨 150086;  
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 150086)

**摘要:**本研究以晋北地区 1990 年、2000 年、2013 年和 2019 年的遥感影像为数据源,采用监督分类方法提取土地利用信息。通过应用转移矩阵分析土地利用类型间的转换关系,计算变化率衡量变化程度,并结合信息熵模型评估系统不确定性及复杂性,阐明了晋北地区土地利用类型的时空变化规律。研究表明:1990—2019 年间,耕地和草地呈减少趋势,年均变化率分别为 -0.49% 和 -0.26%;园地、林地、水域用地和人工用地则持续扩张,年均增长率分别为 6.13%、0.19%、0.55% 和 3.06%。同时,土地利用结构信息熵与均衡度持续上升。研究期内,晋北地区土地利用格局发生了显著转化,该成果为区域国土空间规划与生态环境保护提供了重要数据支撑。

**关键词:**土地利用/覆盖变化;转移矩阵;变化指数;信息熵;晋北地区

中图分类号:P962

文献标志码:A

文章编号:1672-2736(2025)09-0012-11

## 0 引言

土地作为一种珍稀且不可再生的自然资源,是人类生存与发展的基础要素之一<sup>[1]</sup>。土地利用/覆盖(LUCC)格局揭示了地表覆被的空间分布规律及其类型间的结构关联,其动态演化深刻影响着生态系统的生产力与服务功能<sup>[2,3]</sup>。因此,深入分析土地利用变化趋势,对于科学实施土地资源管理、优化国土空间布局、促进土地资源可持续利用以及提升区域环境质量,具有重要的理论价值与实践意义。遥感(RS)与地理信息系统(GIS)技术具备高效性、准确性及数据更新时效性高等优势,为有效监测与分析 LUCC 动态变化提供了强有力的技术支撑<sup>[4-10]</sup>。

晋北地区地处风蚀交错带,水土流失严重,地表生态环境具有显著的时空异质性。作为京津冀地区的重要生态屏障,该区域不仅是京津三大风沙源的核心区,也是我国北方沙尘暴天气的重要诱因<sup>[11]</sup>。近几十年来,在人口增加和经

济快速发展的驱动下,该区域土地利用变化剧烈。众多学者对此开展了研究:李彩霞等分析了大同市 1987 年和 2000 年的景观格局动态<sup>[12]</sup>;徐小明等探讨了晋北地区 1986—2010 年土地利用的时空格局及其驱动机制<sup>[13]</sup>;王冬辰等利用 1993、2002、2009 及 2013 年数据研究了大同市近 20 年的 LUCC 变化<sup>[14]</sup>;郝晓敬等则基于 2010 和 2015 年数据预测了 2020 年晋北地区的土地利用情景<sup>[15]</sup>。然而,现有研究多集中于东部区域,对生态环境敏感且矿产富集的西部山区(矿集区)关注不足,对 2015 年之后特别是近期国土空间规划和生态修复政策实施后的土地利用变化研究更为缺乏。值得关注的是,近年来,晋北地区通过多重产业结构调整和持续的生态修复政策,其土地覆盖格局可能已呈现积极变化趋势。为系统评估这些生态修复措施与政策调整带来的长期成效,填补对西部矿集区及近期变化研究的空白,本研究基于晋北地区近 30 年的四期 Landsat 遥感影像,综合运用多种土地利用变化

基金项目:中国地质调查局地质调查项目(DD20208069, DD20230504)。



图1 研究区地理位置图

分析模型,深入解析区域土地利用/覆盖格局的演变特征,旨在为该地区的国土空间优化布局与自然资源可持续管理提供切实可靠的科学决策依据。

## 1 研究区和数据源

### 1.1 研究区概况

研究区位于山西省东北部(图1),行政范围涵盖大同市、朔州市及忻州市(宁武县、繁峙县、原平县、五台县、代县)。其大地构造位于黄土高原东北边缘与太行山脉交汇区,属温带灌丛草原地带,海拔介于893~2426m之间。该区气候为典型的温带季风大陆性气候,多年平均气温约6.4℃,降水量集中于夏季(6~8月),年平均降水量389mm。地理坐标为北纬38°30'~40°21',东经111°51'~114°31'。受独特的黄土高原气候条件及长期矿产资源开发的叠加影响,晋北地区生态环境呈现显著的脆弱性特征。桑干河作为永

定河上游的核心水源地,发源于本区域,对维系华北地区生态安全具有不可替代的战略意义,享有“华北水塔”的重要生态区位地位。

### 1.2 数据源与处理

遥感影像主要选用四期Landsat卫星数据作为监测基础:包括1990年(Landsat 5 TM)、2000年(Landsat 7 ETM+)、2013年和2019年(Landsat 8 OLI)。各传感器详细信息见表1。所有入选影像均满足云量遮蔽率低于10%的标准且具有良好的地物可分性(可解译性强)。图像采集时间均控制在植被生长旺盛的雨季(6~8月),以最大程度保障土地覆盖/利用类型判读的准确性。

对原始遥感影像开展预处理(包括辐射定标、几何校正、影像镶嵌与配准、彩色合成及图像融合),获取晋北地区地表反射率产品。结合DEM数据纹理特征共同构建研究区分类特征空

表 1 遥感影像数据传感器信息表

TM			ETM			OLI		
波段 名称	波段范围 (m)	空间分 辨率(m)	波段 名称	波段范围 (m)	空间分 辨率(m)	波段 名称	波段范围 (m)	空间分 辨率(m)
						Band1	0.433–0.453	30
Band1	0.45–0.52	30	Band1	0.450–0.515	30	Band2	0.450–0.515	30
Band2	0.52–0.60	30	Band2	0.525–0.605	30	Band3	0.525–0.600	30
Band3	0.63–0.69	30	Band3	0.630–0.690	30	Band4	0.630–0.680	30
Band4	0.76–0.90	30	Band4	0.775–0.900	30	Band5	0.845–0.885	30
Band5	1.55–1.75	30	Band5	1.550–1.750	30	Band6	1.560–1.660	30
Band6	2.08–2.35	30	Band7	2.090–2.350	30	Band7	2.100–2.300	30
			Band8	0.420–0.990	15	Band8	0.500–0.680	15
						Band9	1.360–1.390	30
Band6	10.40–12.50	120	Band6	10.40–12.50	60	Band10	10.6–11.2	100
						Band11	11.5–12.5	100

间<sup>[16,17]</sup>。基于《第三次全国土地调查工作分类》的土地利用分类体系,并针对晋北地表覆盖特征,本研究将土地覆盖类型整合为 12 类:耕地、林地、草地、园地、商服用地、特殊用地、工业仓储用地、住宅用地、水域及水利设施用地、公共管理与公共服务用地、交通运输用地、其他土地。

## 2 研究方法

为了定量分析土地利用变化特征,综合采用土地利用/覆盖变化率指数、转移矩阵及信息熵模型,从数量变化、转移过程与系统复杂性三个维度进行研究<sup>[18–20]</sup>。

### 2.1 土地利用分类

选取四期经预处理的影像样本,在 ENVI 软件中计算各类别间的统计距离,以评估其差异程度与样本可分离性。利用主成分变换法(即 K—L 变换)分析所有波段用于分类的必要性。随后采用最大似然法进行监督分类,并应用多数决策法剔除四期分类结果中的孤立像元,显著提升了分类后影像的平滑度与精度<sup>[21]</sup>。最终,经目视判读和人工修正后,生成研究区土地利用/覆盖分布图(图 2)。

### 2.2 土地利用/覆盖变化率指数

本次选用土地利用动态模型进行定量计算分析<sup>[22]</sup>。其计算公式如下:

$$K = (U_b - U_a) / U_a \times 1/T \times 100\% \quad (1)$$

式中,K 为研究时段内某一土地利用类型动态度;  $U_a$ 、 $U_b$  分别为研究初期、研究末期某一土地利用类型的数量;  $T$  为研究时段长,单位为年。

### 2.3 土地利用结构信息熵模型

利用信息熵模型来确定土地利用系统动态发展的有序度,其值越小,土地利用系统内部结构越有序<sup>[23]</sup>,计算公式为:

$$H = - \sum_{i=1}^n P_i \ln P_i \quad (2)$$

$$P_i = \frac{A_i}{A} = \frac{A_i}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (3)$$

式中, $H$  为土地利用结构信息熵; $P_i$  为  $i$  类土地利用类型在总面积中的占比; $A$  为土地类型总面积; $A_i$  为  $i$  类土地类型的面积<sup>[24,25]</sup>。

通过信息熵的公式,可以推导出区域土地利用结构的均衡度和集中度,均衡度反映其平衡性,集中度突显主导类型,从而更深入地理解土地资源的配置和利用情况,为土地规划与管理提

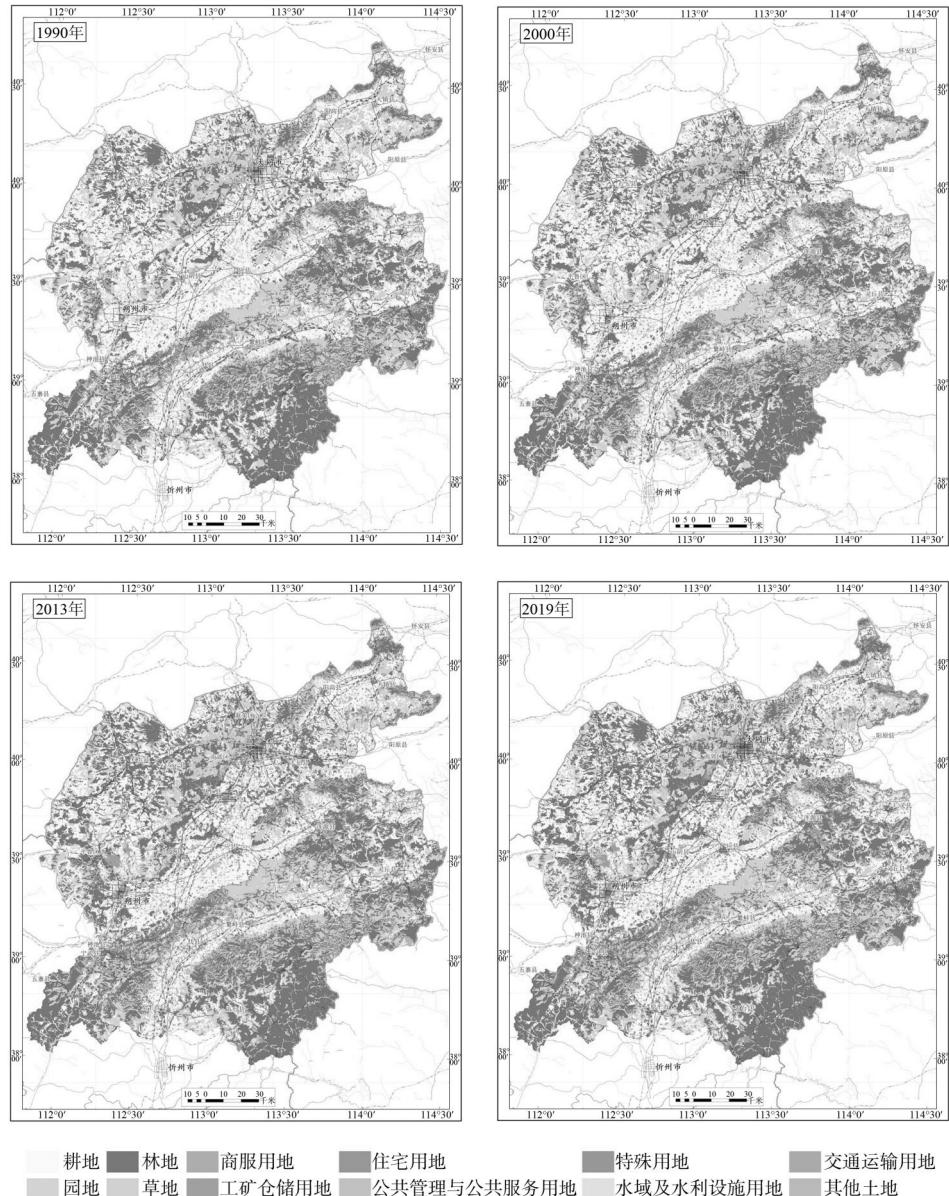


图 2 晋北地区 1990 年、2000 年、2013 年、2019 年土地利用/覆盖类型图

供决策依据。

$$J = - \frac{\sum_{i=1}^n P_i \ln P_i}{\ln N} \quad (4)$$

$$I = 1 - J \quad (5)$$

式中,J 为均衡度,取值为 0~1,J 值越大,表明该区域内不同职能的土地利用类型较多,且各类土地的面积分布相对均匀,没有明显的面积差异;I 为集中度,反映区域土地利用的集中程度,当 I 值较低时,则表明土地利用类型相对分散,各类土地面积分布较为均匀。

## 2.4 土地覆盖转移矩阵

转移矩阵通过矩阵形式直观地展现了土地覆盖类型在研究期间的面积变化,揭示了从研究初期到末期各类土地覆盖类型的转化情况,定量分析了期初土地类型的流转方向和期末土地覆盖类型的来源,进而揭示其时空变化的动态过程:

$$S_{ij} = \begin{bmatrix} S_{11} & \cdots & S_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{n1} & \cdots & S_{nn} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中:S 为面积;n 为土地利用种类数;i,j 分

表 2 1990—2019 年晋北地区土地利用/覆盖面积统计

土地覆盖类型	数据统计/面积(km <sup>2</sup> )			
	1990 年	2000 年	2013 年	2019 年
耕地	12715.07	12825.22	11021.33	10908.23
园地	160.85	173.11	446.32	446.60
林地	11421.19	11442.05	12125.08	12053.98
草地	9950.40	9717.32	9348.39	9206.03
商服用地	0.03	0.21	0.69	1.31
工矿仓储用地	341.50	377.29	1133.03	1321.81
住宅用地	1310.01	1361.61	1675.79	1718.24
公共管理与公共服务用地	1.58	1.58	9.18	81.74
特殊用地	2.97	2.97	6.83	7.96
交通运输用地	38.89	46.90	138.58	140.36
水域及水利设施用地	110.34	104.01	119.97	128.07
其他土地	123.69	124.26	151.34	162.19

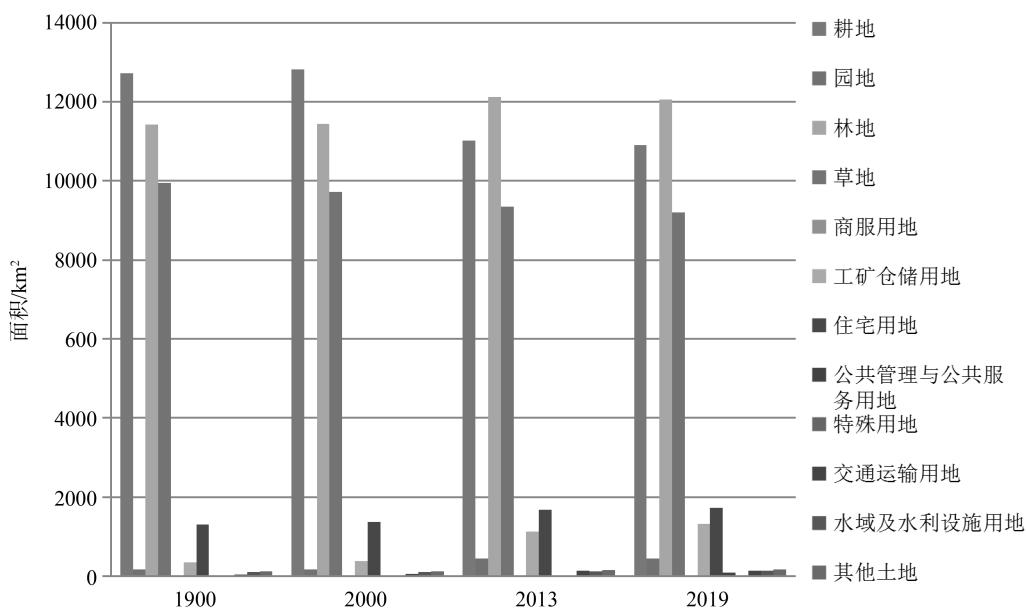


图 3 1990—2019 年晋北地区土地利用/覆盖面积统计图

别为研究期初/末的土地利用类型。

### 3 结果与分析

#### 3.1 土地利用状况及变化率指数分析

对四期土地利用类型图进行统计分析(表 2、图 3),结果显示:1990—2019 年,晋北地区土地利用以耕地、林地、草地为主导。其中,2000 年三者

比例(草地 26.86%、林地 31.63%、耕地 35.15%)合计达 93.64%,其余地类仅占 6.36%。期间,耕地、林地、草地、工矿仓储用地与住宅用地的变化最为显著。近三十年间,耕地面积锐减 1806.84km<sup>2</sup>,占比自 35.15%降至 30.15%;林地面积增加 632.79km<sup>2</sup>,占比从 31.57%升至 33.32%;草地面积减少 744.37km<sup>2</sup>,占比由 27.51%降至 25.45%;工矿仓储用地猛增 980.31km<sup>2</sup>,占比从

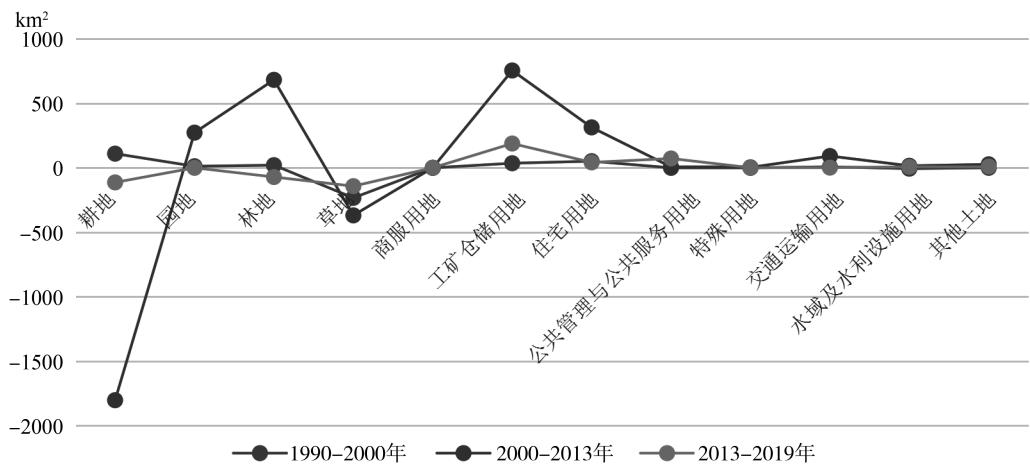


图4 不同时段土地利用变化曲线图

表3 1990-2019年晋北地区土地利用/覆盖面积变化率指数

时段	变化量	变化指数/%											
		耕地	园地	林地	草地	商服用地	工矿用地	住宅用地	公共用地	特殊用地	交通用地	水域用地	其他土地
1990-	P	0.87	7.62	0.18	-2.34	600.00	10.48	3.94	0.00	0.00	20.60	-5.74	0.46
2000	R <sub>s</sub>	0.09	0.76	0.02	-0.23	60.00	1.05	0.39	0.00	0.00	2.06	-0.57	0.05
2000-	P	-14.07	157.82	5.97	-3.80	228.57	200.31	23.07	481.01	129.97	195.48	15.34	21.79
2013	R <sub>s</sub>	-1.08	12.14	0.46	-0.29	17.58	15.41	1.77	37.00	10.00	15.04	1.18	1.68
2013-	P	-1.03	0.06	-0.59	-1.52	89.86	16.66	2.53	790.41	16.54	1.28	6.75	7.17
2019	R <sub>s</sub>	-0.17	0.01	-0.10	-0.25	14.98	2.78	0.42	131.74	2.76	0.21	1.13	1.19

注:表中工矿用地为工矿仓储用地、公共用地为公共管理与公共服务用地、交通用地为交通运输用地、水域用地为水域及水利设施用地。

0.94% 跃升至 3.65%；住宅用地增长 408.23km<sup>2</sup>,占比自 3.62% 提升至 4.75%。研究表明,上述变化主要源于政府推行退耕还林等生态保护政策,以及工矿开发与城镇化的持续推进。

基于四期土地利用面积数据,计算了各地类的时段及年均变化率(表3,图4)。通过分时段对比发现:耕地在1990-2019年整体呈现下降趋势,年均减少0.49%;然而,1990-2000年却有所增加,主要归因于当时的垦荒热潮(将林地和草地转化为耕地以增产粮食)。2000-2019年其减速率加快,主要受工矿开发和城镇化进程(大量占用耕地)驱动。园地在1990-2019年增长有

限,但2000-2013年间以年均12.14%的速度快速扩张,2013年后趋于稳定。其增加源于农业产业结构调整,将部分低产耕地转用为园地。林地在1990-2013年年均增长0.2%,受益于退耕还林政策;但2013-2019年转为微弱下行趋势(年均减少0.098%),主要受城镇化进程影响。草地在1990-2019年持续减少,年均下降0.258%,主要原因是农田开垦、城镇化建设以及向林地的转化。水域及水利设施用地在1990-2019年整体变化较小。人工建筑用地及其他土地在1990-2019年持续快速扩张,年均增长3.06%,尤以2000-2013年增速显著(年均4.82%);这一趋势主要源于伴随城镇化、经济高

表 4 1990–2019 年晋北地区土地利用结构及信息熵

指 标	年 份			
	1990 年	2000 年	2013 年	2019 年
信息熵(H)	1.320	1.328	1.450	1.478
均衡度(J)	0.531	0.534	0.584	0.595
集中度(I)	0.469	0.466	0.416	0.405

注:信息熵是基于自然对数计算,单位为奈特(nat)。

速发展而来的自然资源(特别是土地)大量占用;2013–2019 年,随着生态文明与和谐社会理念的深入贯彻,侵占速度有所放缓。

### 3.2 时间序列的熵变分析

晋北地区 1990–2019 年土地利用结构信息熵、均衡度和集中度显示(表 4):①1990–2019 年晋北地区土地利用结构信息熵呈上升的趋势,年平均上升率为 0.41%,在上升过程中,可划分出三个阶段(1990–2000 年、2000–2013 年、2013–2019 年),其中 2000–2013 年上升幅度较大,其余时间段的上升幅度相近。②均衡度同样划分三个阶段,上升幅度同信息熵相近,但是集中度有所下降。以上结果说明,在研究期间内土地利用结构逐渐趋于多元化和均衡化,各类土地利用类型的均衡性有所增强,而单一类型的集中度则呈现下降趋势。

进一步分析土地利用结构的动态变化,形成以上趋势主要原因是政府越来越重视生态环境保护与经济社会发展的相互作用,国土空间规划更加趋于合理。在晋北地区,土地利用内部结构调整导致土地利用结构信息熵发生变化,具体表现为园地、人工建筑用地及其他土地不断增加,而耕地、林地和草地则不断减少。同时,均衡度的不断增加也反映了区域土地利用均衡程度的提高。

### 3.3 土地利用/覆盖类型转移矩阵分析

根据土地利用/覆盖分类图,做出土地利用类型转移图,并得出 1990–2019 年晋北地区土地利用/覆盖变化转移矩阵,为减少数据冗杂,将商服用地、工矿仓储用地、住宅用地、公共管理与公

共服务用地、特殊用地、交通运输用地、其他土地合并在为人工建筑用地及其他土地(表 5,图 5),分析晋北地区土地利用/覆被的时空变化规律。

1990–2000 年间:耕地增加 110.14km<sup>2</sup>,新增区域集中于阳高县、天镇县、怀仁市、山阴县、应县、朔城区等地。这主要源于当时旨在增加粮食产量的垦荒活动,导致林地和草地向耕地转化。园地增加 12.26km<sup>2</sup>,新增区域主要分布在大同市下辖的浑源县、广灵县、灵丘县等地。其主要来源为农业产业结构调整中的耕地转用。林地增加 20.86km<sup>2</sup>,新增区域集中于怀仁市、山阴县、应县、朔城区。增加的林地主要来源于耕地和草地的转化,是区域内对抗风沙、植树造林以防风固沙的结果(部分沙化耕地和草地被转化为林地)。草地减少 233.08km<sup>2</sup>,主要流失方向为耕地,原因在于农田开垦。水域及水利设施用地减少 6.32km<sup>2</sup>,部分干涸的河床被转化为草地或耕地。人工建筑用地及其他土地增加 13.73km<sup>2</sup>,新增区域主要围绕大同盆地核心城镇。其所占新增土地主要来源于耕地与草地的占用。

2000–2013 年间,研究区土地利用格局发生显著变化:耕地大幅减少 1803.89km<sup>2</sup>(占 2013 年耕地面积的 16.37%),减少区域集中于西北部山区,主要转化为林地,驱动因素是农业产业结构调整(鼓励多种经营)以及对生态脆弱和低产区域的退耕还林/还草政策;基于同一政策背景及结构调整需求,园地显著增加 273.20km<sup>2</sup>(+61.21%),新增区域同样多在西北部山区,主要来源于低产耕地的转化;同期,林地增加 683.03km<sup>2</sup>(+5.63%),增长区域位于西北部山

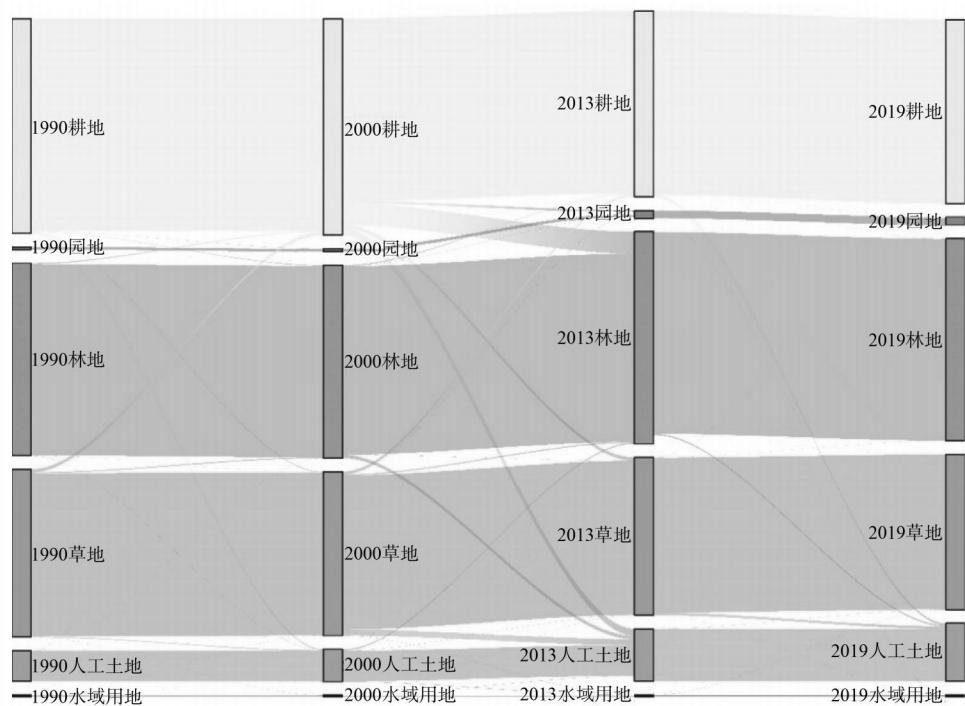


图 5 土地利用类型变化叠基图

表 5 不同时段土地利用转移矩阵

时段	项目	项 目						
		耕地	园地	林地	草地	水域用地	人工土地	转入
1990— 2000	耕地	12569.75	0.00	59.24	182.13	5.73	8.37	255.47
	园地	10.81	160.85	0.71	0.74	0.00	0.00	12.26
	林地	41.35	0.00	11343.88	50.67	0.00	6.16	98.18
	草地	40.40	0.00	3.36	9664.71	6.20	2.65	52.61
	水域用地	0.86	0.00	0.00	5.17	97.99	0.00	6.03
	人工土地	51.90	0.00	14.00	46.98	0.42	1801.49	113.30
2000— 2013	转出	145.32	0.00	77.31	285.69	12.35	17.18	216.87
	耕地	10804.46	0.03	60.01	148.32	1.33	7.18	274.29
	园地	126.46	172.04	10.61	12.63	0.00	0.00	69.49
	林地	1281.61	0.30	11167.15	57.07	1.24	69.49	1409.71
	草地	187.40	0.00	4.57	9136.93	6.18	13.31	211.46
	水域用地	6.13	0.00	0.23	11.22	83.24	19.15	36.73
2013— 2019	人工土地	419.16	0.74	199.48	351.15	12.02	1805.69	982.55
	转出	2020.76	1.07	274.90	580.39	20.77	109.13	8.58
	耕地	10899.65	0.3	1.72	5.46	0	1.10	6.07
	园地	4.71	460.53	0.00	0.00	0.00	1.36	11.51
	林地	7.33	0.00	11972.37	3.67	0.09	0.42	22.66
	草地	4.60	0.00	1.56	9183.37	5.81	10.69	14.16
	水域用地	8.62	0.00	0.16	4.20	113.91	1.18	331.93
	人工土地	96.42	5.49	78.17	151.69	0.16	3100.69	14.75
	转出	121.68	5.79	81.61	165.02	6.06	14.75	

区和东部恒山沿线,主要源于退耕还林政策下原先毁林开垦的耕地重新恢复了林地;草地则减少  $368.93\text{km}^2(-3.95\%)$ ,损失集中在西北部山区和东部恒山沿线,主要被工矿仓储用地(如住宅和工业用地)占用,反映城镇周边开发的需求;水域及水利设施用地增加  $15.96\text{km}^2(+13.3\%)$ ,新增区域主要在中部大同盆地平原区,可能由于草本湿地演变为地表水面及部分废弃土地积水形成坑塘;而人工建筑及其他土地(主要包括建设用地)剧增  $1200.15\text{km}^2(+38.52\%)$ ,其扩张核心在中部大同盆地平原区(大同市、朔州市周边及各城镇),造成耕地、林地和草地资源被大规模侵占,这成为该时期经济高速发展的直接体现。

2013–2019 年间,区域土地利用持续演变:耕地缩减  $113.10\text{km}^2$ (减少区域小而分散),主要受农业结构调整与城镇化建设占用双重压力;园地微增  $0.29\text{km}^2$ (集中于右玉县),主要为农业结构调整下耕地转化所致;林地减少  $71.10\text{km}^2$ (集中于城市周边),原因包括为补充城镇建设占用的耕地而开垦林地(“占补平衡”机制)及部分林地转化为城市绿地景观;草地缩减  $142.38\text{km}^2$ (减少分散),主要转化为工矿仓储、公共服务等建设用地,驱动因素是城镇扩张带来的工业、住宅、公共设施及交通水利建设;水域用地增加  $8.11\text{km}^2$ (云州区、应县、怀仁市较显著),源于水库修建与湿地保护政策促进了耕地、草地向水域用地的转化;人工建筑及其他土地扩张  $317.55\text{km}^2$ (集中于两市城郊及各区县城周边),草地是其最主要的转入来源,但在生态文明建设理念推动下,资源占用速度已呈现明显放缓趋势。

#### 4 结论

1990–2019 年,晋北地区土地利用/覆盖变化表现为耕地、林地和草地先增加后减少,园地小幅增长,水域总体变化不大,人工用地特别是工矿仓储用地和住宅用地增加较快,到 2013 年各类用地变化趋于平稳。耕地和草地分别以每

年  $0.49\%、0.26\%$  的速率减少,园地、林地、水域用地和人工用地分别以每年  $6.13\%、0.19\%、0.55\%$  和  $3.06\%$  的速率增加。引起变化的主要原因是政策导向的指引和城镇化的发展。

土地利用覆盖变化受政策影响因素较大,耕地的转出量远高于转入量,这是由于农业产业结构的调整以及城镇化的发展。林地在 2013 年左右达到峰值,是因为退耕还林还草,防风固沙,三北防护林的建设。草地的持续减少主要是城镇周边农田开垦及防风固沙林建设使得草地向耕地和林地转化。人工用地增长较快,是由于城镇化建设的不断推进,大量的耕地、林地、草地、湿地等资源被用于人工建筑,各类自然资源随着社会经济的发展不断萎缩。2013–2019 年随着生态文明建设、和谐社会等发展理念的提出,自然资源被占用的速度明显放缓。

1990–2019 年间,晋北地区土地利用结构信息熵与均衡度持续升高,表明区域土地利用结构正朝向多元均衡方向演进。“宜山则山、宜林则林”的布局理念得以深化落实,国土空间格局持续优化,土地综合利用率稳步提升。随着生态文明建设的深入推进,该区域土地利用模式正逐步转向更具可持续性的发展轨道。

#### 参考文献(References):

- [1] 喻恺阳,张瑞,魏文革,等.基于高分影像的神木县大柳塔镇土地利用动态监测[J].水土保持通报,2018,38(01):135–139.
- [2] 肖笃宁,解伏菊,魏建兵.景观价值与景观保护评价[J].地理科学,2006,26(04):4506–4512.
- [3] 傅伯杰,张立伟.土地利用变化与生态系统服务:概念、方法与进展[J].地理科学进展,2014,33(04):441–446.
- [4] 李秀彬.全球环境变化研究的核心领域:土地利用/土地覆被变化的国际研究动向[J].地理学报,1996,51(06):553–558.
- [5] 马中华,张勃,张建香,等.疏勒河中游土地利用动态变化分析[J].干旱区资源与环境,2012,26(08):97–101.
- [6] 刘纪远,刘明亮,庄大方,等.中国近期土地利用变

- 化的空间格局分析[J]. 中国科学(D辑): 地球科学, 2002, 6(12): 1031–1050.
- [7] 宋明明, 都金康, 郑文龙, 等. 秦淮河流域近30年不透水面景观格局时空演变研究[J]. 地球信息科学学报, 2017, 19(02): 238–247.
- [8] 匡文慧, 张树文, 杜国明, 等. 2015—2020年中国土地利用变化遥感制图及时空特征分析[J]. 地理学报, 2022, 77(05): 1056–1071.
- [9] 夏双, 阮仁宗, 颜梅春, 等. 洪泽湖区土地利用/覆盖变化分析[J]. 遥感信息, 2013, 28(01): 54–59.
- [10] 范树平, 刘友兆, 程从坤, 等. 快速城镇化地区土地利用演变及驱动机制: 以巢湖流域为例[J]. 水土保持通报, 2017, 37(02): 253–260.
- [11] 唐克丽. 黄土高原水蚀风蚀交错区治理的重要性与紧迫性[J]. 中国水土保持, 2000, 20(11): 11–12.
- [12] 李彩霞, 孙虎. 大同市土地利用/覆盖动态变化研究[J]. 土壤通报, 2010, 41(02): 282–286.
- [13] 徐小明, 杜自强, 张红, 等. 晋北地区1986—2010年土地利用/覆盖变化的驱动力[J]. 中国环境科学, 2016, 36(07): 2154–2161.
- [14] 王冬辰, 杜培军, 苏红军, 等. 近20年大同市土地利用/覆盖遥感变化分析[J]. 干旱区资源与环境, 2015, 7(29): 68–75.
- [15] 郝晓敬, 张红, 徐小明, 等. 晋北地区土地利用/覆盖格局的演变与模拟[J]. 生态学报, 2020, 40(01): 257–265.
- [16] 杜培军, 柳思聪. 融合多特征的遥感影像变化检测[J]. 遥感学报, 2012, 16(04): 670–677.
- [17] 张景, 陈国光, 张定源, 等. 福建省区位优势度与区域经济相关性分析[J]. 华东地质, 2020, 41(03): 288–294.
- [18] 祖立辉, 杨静, 苗世源. 基于遥感影像的临湘市土地利用/覆盖时空变化研究[J]. 测绘地理信息, 2021, 46(02): 30–35.
- [19] 刘云, 康卉君. 2002—2019年江西省省级地质灾害气象预警分析[J]. 华东地质, 2020, 41(04): 416–424.
- [20] 刘伟, 黄运翠瑶, 范超. 江西省宁都县陂下地热地质特征及资源评价[J]. 华东地质, 2020, 41(04): 375–380.
- [21] 邓书斌, 陈秋锦, 杜会建, 等. ENVI遥感图像处理方法(第2版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2014.
- [22] 陈述彭, 童庆禧, 郭华东. 遥感信息机理研究[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [23] 匡兵, 周敏, 陈丹玲. 岳阳市土地利用结构变化与土地利用绩效的关联度分析[J]. 地域研究与开发, 2017, 36(01): 137–142.
- [24] 程宪波, 杨子生. 云南省昭通市土地利用时空变化特征及其驱动力[J]. 水土保持通报, 2018, 38(02): 166–170.
- [25] 林珍铭, 夏斌, 董武娟. 基于信息熵的广东省土地利用结构时空变化分析[J]. 热带地理, 2011, 31(03): 266–271.

---

作者简介:

第一作者:魏小勇,1988年生,男,陕西旬邑人,硕士,中国地质调查局哈尔滨自然资源综合调查中心,高级工程师,主要研究方向为生态地质及国土空间生态修复。Email:353975849@qq.com;

通讯作者:周传芳,1985年生,男,黑龙江兰西人,硕士,中国地质调查局哈尔滨自然资源综合调查中心,正高级工程师,主要研究方向为生态地质调查。Email:546011015@qq.com

---

## Analysis of Spatiotemporal Evolution Characteristics of Land Use and Land Cover in North Shanxi Province

WEI Xiaoyong<sup>1,2</sup>, ZHOU Chuanfang<sup>1,2\*</sup>, ZHENG Jilin<sup>1,2</sup>, GUO Xiaoyu<sup>1,2</sup>, SUN Yanfeng<sup>1,2</sup>, JIA Liming<sup>1,2</sup>

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

2. Observation and Research Station of Earth Critical Zone in Black Soil, Harbin, Ministry of Natural Resources,  
Harbin 150086, China)

**Abstract:** Using remote sensing images in 1990, 2000, 2013 and 2019, the land use information in northern Shanxi was extracted by supervised classification. By applying a transition matrix to analyze the conversion relationships of land use types, calculating change indices to measure the degree of change, and utilizing an information entropy model to assess the uncertainty and complexity of the system, we are able to comprehensively reveal the spatio-temporal patterns of land use change in northern Shanxi. The results show that the average annual reduction rate of cultivated land and grassland are 0.49% and 0.26%, and the average annual increase rate of garden land, woodland, water area and artificial land are 6.13%, 0.19%, 0.55% and 3.06%, respectively. The information entropy and equilibrium of land use structure have been continuously improved. During the study period, obvious changes have taken place in the structure of land use types in northern Shanxi, which provides substantial data support for territorial spatial planning and ecological environment protection in northern Shanxi.

**Key words:** LUCC; transfer matrix; change index; information entropy; North Shanxi Province

# 松嫩平原北部五大连池-嫩江地区地表基质层 空间分布特征及理化性质研究

赵国强<sup>1,2</sup>, 梁中恺<sup>1,2\*</sup>, 韩守德<sup>1,2</sup>, 张 明<sup>1,2</sup>, 任广智<sup>1,2</sup>, 李 壮<sup>1,2</sup>, 王 旭<sup>1,2</sup>

(1. 中国地质调查局哈尔滨自然资源综合调查中心, 哈尔滨 150086;  
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 150086)

**摘要:**为更好地服务于自然资源管理和国土空间规划,2020 年自然资源部首次提出地表基质这一概念。通过对地表基质层空间分布特征的研究,能够有效建立地下基岩与地上植被的关联关系,对自然资源的科学管理具有重要意义。本文选取松嫩平原北部五大连池—嫩江地区为研究区,通过洛阳铲、背包钻和汽车钻工作手段分别对 2m、5m 和 20m 以浅地表基质层垂向结构进行现场调查和采样,共完成调查点位 1236 个,采集样品 1174 件,分别采用环刀法、重铬酸钾氧化-外加热法、凯式定氮法、X-荧光光谱法(XRF)和玻璃电极法测定土壤样品容重、有机碳、粒度和 pH 指标。结果显示:研究区划分为 2 个地表基质一级分区、6 个地表基质二级分区、7 个地表基质三级分区和 18 种地表基质构型。获取容重平均值为  $1.16\text{g}/\text{cm}^3$ ;有机质含量平均值为  $49.27\text{g}/\text{kg}$ ;表层土质 pH 平均值为  $5.88$ ,  $0.5\text{m}$  pH 平均值为  $5.89$ ,  $1\text{m}$  pH 平均值为  $5.88$ ,  $1.5\text{m}$  pH 平均值为  $5.87$ ,  $2\text{m}$  pH 平均值为  $5.86$ ,  $5\text{m}$  pH 平均值为  $6.06$ , 均属于微酸级别;表层土质有机碳密度平均值为  $6.32\text{kg}/\text{m}^2$ , 有机碳总储量为  $145.02\text{Tg}$ 。研究成果可为该地区自然资源管理、土地保护与开发利用提供参考。

**关键词:**松嫩平原; 地表基质层; 地表基质构型; 理化性质; 有机碳储量

中图分类号:S15

文献标志码:A

文章编号:1672-2736(2025)09-0023-12

## 0 引言

2020 年 1 月,自然资源部在《自然资源调查监测体系构建总体方案》<sup>[1]</sup> 中首次提出“地表基质层”一词,是指“地球表层孕育和支撑森林、草原、水、湿地等各类自然资源的基础物质”。方案中明确要求将“地表基质调查”作为一项重要的自然资源专项调查工作,而查清地表基质类型、理化性质及地质景观属性成为此项工作的首要任务。作为一项新兴的调查工作,一些专家学者也做了大量的探索研究:郝爱兵等人对地表基质的概念和内涵进行了初步界定<sup>[2-5]</sup>;侯红星等人按照“构造—流程—作用—服务”的研究思路,构建了调查技术方法体系<sup>[6-8]</sup>;李响等人提出了地表基质“五位一体”的研究内容<sup>[9-11]</sup>;贾磊等人对地表基质的评价和编图进行了探

索<sup>[12-14]</sup>。自然资源部办公厅印发的《地表基质分类方案(试行)》将地表基质划分为 4 个一级类和 14 个二级类<sup>[15]</sup>,为了更好的服务于自然资源统一管理和国土空间规划,一些专家学者对地表基质的科学内涵进行了深入剖析,提出了三级分类方案<sup>[16,17]</sup>。韩晓增等<sup>[18]</sup>建议分类体系应考虑地表基质理化性质和地质景观属性等,提出了四级分类方案。本文在《地表基质分类方案(试行)》分类标准基础上,选择松嫩平原北部五大连池-嫩江地区开展地表基质层平面分布与垂向构型研究,以期为不同地表基质分区条件下的地表基质构型和理化性质研究提供参考资料。

研究区是黑龙江省主要粮食生产基地,是我国粮食安全的保障和“压舱石”<sup>[19-21]</sup>。因此,查明研究区各类自然资源地表基质层空间分布特征,掌握地表基质类型、构型、理化性质和对自然

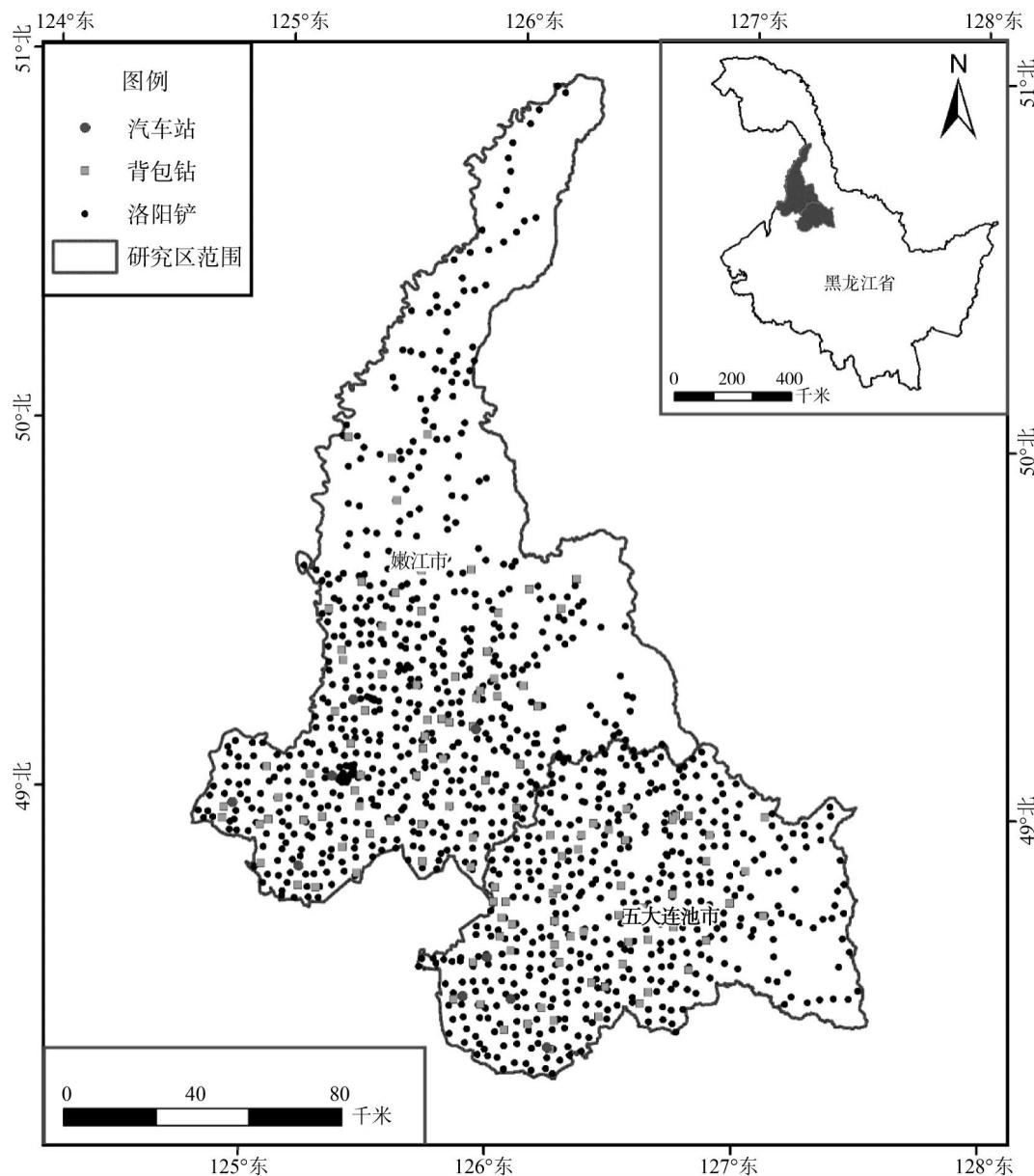


图 1 研究区调查采样点位图

(审图号:GS(2019)1822 号)

资源分布规律的影响和控制作用,有助于自然资源职能部门掌握各类自然资源赋存条件,对服务国家粮食安全和自然资源管理具有重要意义。

## 1 研究区概况

研究区位于松嫩平原北部,地理坐标:东经 $124^{\circ}44'-127^{\circ}53'$ ,北纬 $47^{\circ}35'-51^{\circ}00'$ ,包含五大连池市和嫩江市,总面积约 $23956\text{km}^2$ ,地形地貌表现为由东北的中低山、丘陵区过渡至西南的台地和阶地漫滩区,中部则是玄武岩台地断续分

布。研究区属寒温带大陆性季风气候,春季干燥、多风、少雨、易旱;夏季雨热同季,多洪涝;秋季干燥,昼夜温差大;冬季严寒漫长,常有暴雪、寒潮天气出现;年平均气温在 $0.8-1.4^{\circ}\text{C}$ ,年平均降水量为 $365-782\text{mm}$ ;全年积温在 $2230^{\circ}\text{C}$ 左右。该地区的土地利用结构以耕地为主,以玉米、小麦、大豆等作物为主。

研究区新元古界地层小面积出露于中部和东北部;古生界地层主要分布于北部及中部,东部有小面积出露,中生界地层出露广泛,集中分

布在研究区中部。新生界地层主要出露于南部、西南部,东部零星出露。

## 2 样品采集及研究方法

点位布设和样品采集按照分区、分类、分层次、网格化的原则,利用洛阳铲、背包钻和汽车钻手段分别揭示2m、5m和20m以浅地表基质层垂向结构(图1),查明地表基质类型、构型、理化性质。共完成调查点位1236个,采集样品1174件。

网格样品的采集利用钢刀进行分层取样,样品经去除表皮后装入样袋中。容重样品的采集均在点位1m范围内采取,先用铁锹铲去表层覆土,将环刀垂直压入土层至土壤充满环刀,用钢刀从环刀侧面切入土中取出,将外壁泥土擦净装入盒内封装,返回实验室后进行称重、烘干。分别采用环刀法、重铬酸钾氧化-外加热法、凯式定氮法、X-荧光光谱法(XRF)和玻璃电极法<sup>[22]</sup>测定表层土壤样品容重、有机碳、粒度和pH指标,为保证样品监测质量,在样品测试过程中实行质量监控测试,以减少系统分析误差。

## 3 地表基质层特征

### 3.1 单元分区

根据研究区地理位置、地形地貌、地质成因等条件,对地表基质分区进行划分。一级分区按照地理位置进行划分,选取小兴安岭隆起带和松嫩平原沉降带2个指标;二级分区按照地貌类型划分,选取中低山、丘陵、山间谷地、台地和阶地漫滩等5个指标;三级分区根据地质成因划分,

选取残积、残坡积和冲洪积等3个指标。

一级分区为小兴安岭隆起带地表基质区和松嫩平原沉降带地表基质区;二级分区为小兴安岭隆起带中低山地表基质区、小兴安岭隆起带丘陵地表基质区、小兴安岭隆起带山间谷地地表基质区、小兴安岭隆起带台地地表基质区、松嫩平原沉降带台地地表基质区和松嫩平原沉降带阶地漫滩地表基质区;三级分区为小兴安岭隆起带中低山残坡积地表基质区、小兴安岭隆起带丘陵残坡积地表基质区、小兴安岭隆起带山间谷地冲洪积地表基质区、小兴安岭隆起带台地残积地表基质区、小兴安岭隆起带台地残坡积地表基质区、松嫩平原沉降带台地冲洪积地表基质区和松嫩平原沉降带阶地漫滩冲洪积地表基质区(图2,表1)。

### 3.2 地表基质构型

本次工作在自然资源部发布的《地表基质分类方案(试行)》分类标准基础上,参考中国土壤系统分类土族和土系划分标准<sup>[23]</sup>,按照《岩石分类和命名方案 火成岩岩石分类和命名方案》(GB/T 17412.1-1998)<sup>[24]</sup>、《岩石分类和命名方案 沉积岩岩石分类和命名方案》(GB/T 17412.2-1998)<sup>[25]</sup>、《岩石分类和命名方案 变质岩岩石分类和命名方案》(GB/T 17412.3-1998)<sup>[26]</sup>、《岩土工程勘查规范》(GB 50021-2001)<sup>[27]</sup>、《土壤质量野外土壤描述》(GB/T 32726-2016/ISO 25177:2008)<sup>[28]</sup>为依据。一级分类为岩石、砾质和土质3种类型。将岩石分为岩浆岩、沉积岩和变质岩3个二级类;将砾质分为中砾和细砾2个二级类;将土质分为砂土和壤土2个二级类。三

表1 研究区地表基质单元分区表

一级分区	二级分区	三级分区
小兴安岭隆起带地表基质区	中低山地表基质区	残坡积地表基质区
	丘陵地表基质区	残坡积地表基质区
	山间谷地地表基质区	冲洪积地表基质区
松嫩平原沉降带地表基质区	台地地表基质区	残积地表基质区 残坡积地表基质区
	阶地漫滩地表基质区	冲洪积地表基质区 冲洪积地表基质区

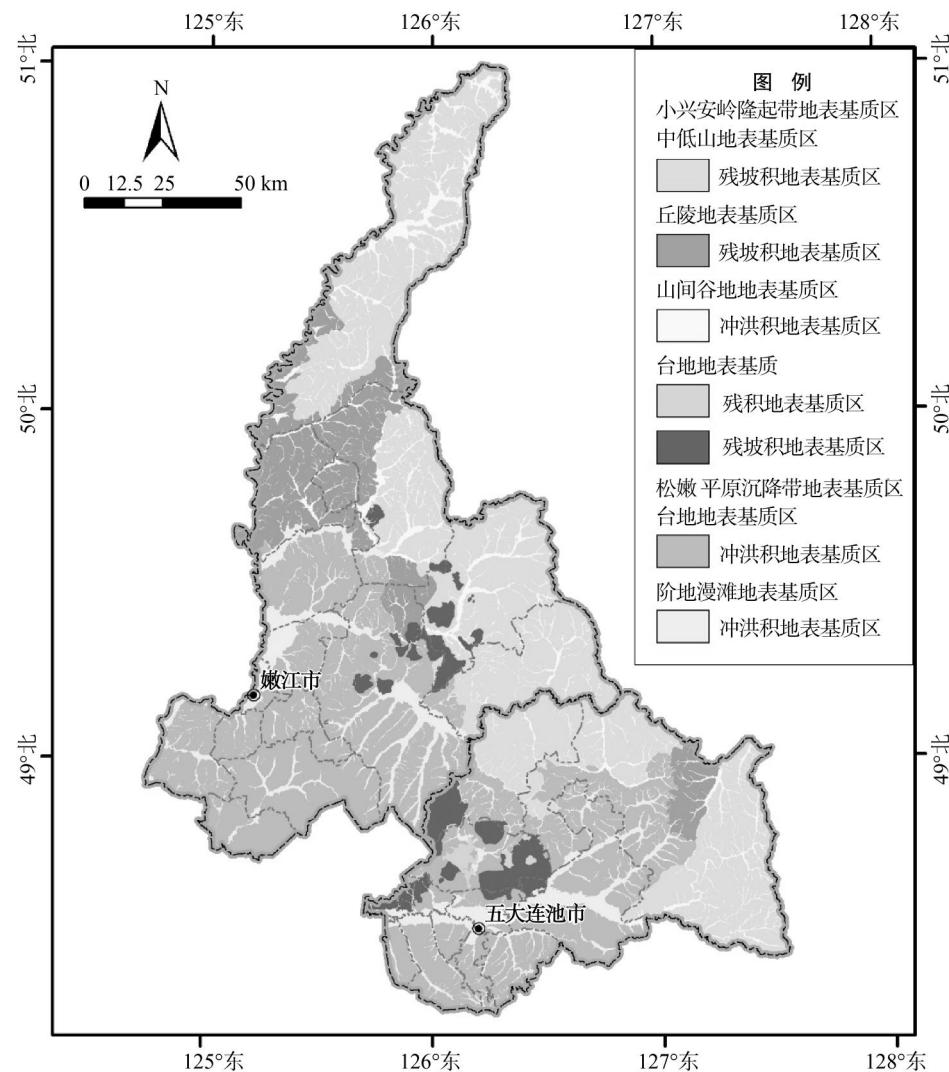


图 2 研究区地表基质区划图

级分类包括：岩浆岩基质分为花岗岩、闪长岩、安山岩、玄武岩和流纹岩；沉积岩分为砂岩、泥岩和灰岩；变质岩分为板岩、片岩、片麻岩和变粒岩。中砾分为圆砾-卵石状中砾和角砾-碎石状中砾，细砾分为圆砾状细砾和角砾状细砾。砂土分为净砂土、壤质砂土和黏质砂土。壤土分为砂质壤土、净壤土和黏质壤土（表 2）。按照地表基质类型、平面分布和垂向结构等特征，将研究区划分出 18 种地表基质构型（图 3, 表 3）。

### 3.3 空间分布特征

小兴安岭隆起带地表基质区面积为  $13310.88 \text{ km}^2$ ，占全区面积 55.56%。地貌以中低山、丘陵和山间谷地为主，在嫩江市科洛镇和

五大连池市西发育大面积第四系玄武岩组成的熔岩台地。小兴安岭隆起带中低山残坡积地表基质区分布在嫩江市北部和东部、五大连池市北部和东部，面积为  $8165.15 \text{ km}^2$ ，占全区面积 34.08%。地表基质构型主要为“土质+岩石”。土质为灰黑色-暗棕色壤土，受地形坡度和岩石抗风化能力的影响，厚度变化较大。中部为含砾砂土，砾石含量由上至下逐渐增多，成分与底部岩石一致。岩石可划分为岩浆岩、沉积岩、变质岩，岩浆岩包括玄武岩、安山岩、流纹岩、闪长岩和花岗岩，沉积岩包括砂岩、泥岩和灰岩，变质岩包括板岩、片岩、片麻岩、变粒岩和变火山岩。“壤土+花岗岩”构型分布面积最大，“壤土+砂

表 2 研究区地表基质类型划分表

一级类	二级类	三级类	分类方法
砾质	岩浆岩	花岗岩、闪长岩、安山岩、玄武岩、流纹岩	参照《岩石分类和命名方案 火成岩岩石分类和命名方案》(GB/T 17412. 1-1998)
		砂岩、泥岩、灰岩、	参照《岩石分类和命名方案 沉积岩岩石分类和命名方案》(GB/T 17412. 2-1998)
	变质岩	板岩、片岩、片麻岩、变粒岩	参照《岩石分类和命名方案 变质岩岩石分类和命名方案》(GB/T 17412. 3-1998)
		圆砾-卵石状中砾 角砾-碎石状中砾	圆状、次圆状为主,粒度 4-64 mm 的颗粒体积含量 $\geq 75\%$ 棱角状、次棱角状为主,粒度 4-64 mm 的颗粒体积含量 $\geq 75\%$
	中砾	圆砾状细砾 角砾状细砾	圆状、次圆状为主,粒度 2-4 mm 的颗粒体积含量 $\geq 75\%$ 棱角状、次棱角状为主,粒度 2-4 mm 的颗粒体积含量 $\geq 75\%$
		净砂土	不同级别砾含量<25%,筛除砾质后细土部分砂粒含量 $\geq 75\%$
	细砾	壤质砂土	不同级别砾含量<25%,筛除砾质后细土部分砂粒含量 $\geq 55\%$ 且<75%,黏粒含量<25%
		黏质砂土	不同级别砾含量<25%,筛除砾质后细土部分砂粒含量 $\geq 55\%$ 且<75%,黏粒含量 $\geq 25\%$
	砂土	砂质壤土	不同级别砾含量<25%,筛除砾质后细土部分砂粒含量 $\geq 35\%$ 且<55%,黏粒含量<35%
		净壤土	不同级别砾含量<25%,筛除砾质后细土部分砂粒含量<35%,黏粒含量<25%
	土质	黏质壤土	不同级别砾含量<25%,筛除砾质后细土部分砂粒含量<35%,黏粒含量 $\geq 25\%$ 且<35%

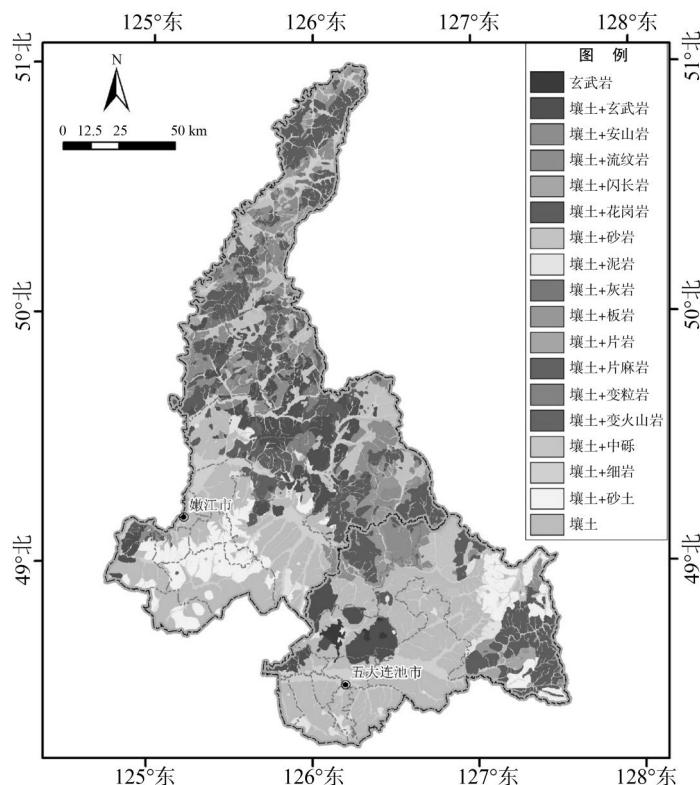


图 3 研究区地表基质构型图

表 3 研究区地表基质构型划分表

一级分区	面积(km <sup>2</sup> )	二级分区	面积(km <sup>2</sup> )	三级分区	构型	面积(km <sup>2</sup> )
小兴安岭隆起带中低山地表基质区	8165.15	小兴安岭隆起带中低山残坡积地表基质区			壤土+玄武岩 壤土+安山岩 壤土+流纹岩 壤土+闪长岩 壤土+花岗岩 壤土+砂岩 壤土+泥岩 壤土+灰岩 壤土+板岩 壤土+片岩 壤土+片麻岩 壤土+变粒岩 壤土+变火山岩 壤土+砂土 壤土 壤土+玄武岩 壤土+安山岩 壤土+流纹岩 壤土+闪长岩 壤土+花岗岩 壤土+砂岩 壤土+泥岩 壤土+灰岩 壤土+板岩 壤土+片麻岩 壤土+变粒岩 壤土+变火山岩 壤土+中砾 壤土+砂土 壤土	469.59 437.85 994.79 130.81 3289.31 1147.29 15.68 149.32 712.05 93.62 17.33 54.92 38.61 365.44 248.55 269.98 75.96 383.19 31.98 521.25 347.41 11.24 134.29 1.02 40.91 112.47 52.28 2.55 287.04 39.70
小兴安岭隆起带丘陵地表基质区	2311.29	小兴安岭隆起带丘陵残坡积地表基质区			壤土+细砾 壤土 玄武岩 壤土+玄武岩 壤土+玄武岩 壤土+安山岩 壤土+流纹岩 壤土+闪长岩 壤土+花岗岩 壤土+砂岩 壤土+泥岩 壤土+灰岩 壤土+板岩 壤土+片麻岩 壤土+变粒岩 壤土+变火山岩 壤土+中砾 壤土+砂土 壤土	1720.26 13.06 97.47 1003.65 352.72 94.47 100.65 107.66 33.11 457.99 1.01 276.61 17.81 41.66 29.28 1220.50 5686.57
松嫩平原沉降带地表基质区	10645.12	松嫩平原沉降带台地地表基质区	8420.03	松嫩平原沉降带冲洪积地表基质区	壤土+细砾 壤土 玄武岩 壤土+玄武岩 壤土+玄武岩 壤土+安山岩 壤土+流纹岩 壤土+花岗岩 壤土+砂岩 壤土+泥岩 壤土+板岩 壤土+片麻岩 壤土+变粒岩 壤土+变火山岩 壤土+中砾 壤土+砂土 壤土	2172.94 52.15
	2225.09	松嫩平原沉降带阶地漫滩地表基质区		松嫩平原沉降带冲洪积地表基质区		

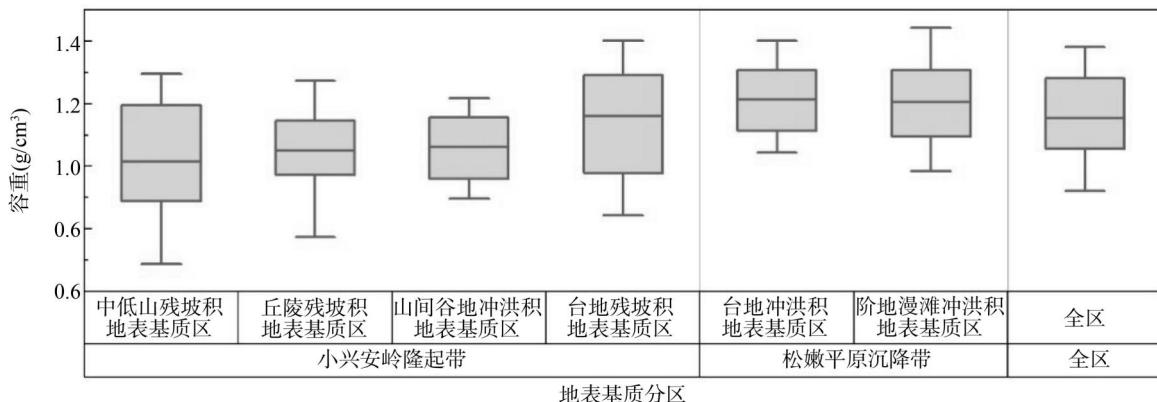


图 4 不同地表基质分区容重值箱线图

表 4 容重值统计表

单位:g/cm³

分区 (Soil Profile Zone)	小兴安岭隆起带 (Xing'an Mountain Uplift Zone)			松嫩平原沉降带 (Songnen Plain Subsidence Zone)			全区 (Overall)
	中低山残坡积 地表基质区	丘陵残坡积 地表基质区	山间谷地冲洪 积地表基质区	台地残坡积 地表基质区	台地冲洪积地 表基质区	阶地漫滩冲洪 积地表基质区	
	平均值	1.01	1.05	1.06	1.16	1.21	1.21

岩”构型次之，“壤土+片麻岩”构型分布面积最小。母质成因以残坡积为主。小兴安岭隆起带丘陵残坡积地表基质区分布在五大连池市东北部、嫩江市中部，面积为 2311.29km<sup>2</sup>，占全区面积 9.65%，地表基质构型主要为“土质+岩石”。土质为灰黑色-暗棕色壤土，中部为含砾壤土，砾石含量由上至下逐渐增多，成分与底部岩石一致。岩石可划分为岩浆岩、沉积岩、变质岩，岩浆岩包括玄武岩、安山岩、流纹岩、闪长岩和花岗岩，沉积岩包括砂岩、泥岩、灰岩，变质岩包括板岩、片麻岩、变粒岩和变火山岩。“壤土+花岗岩”“壤土+流纹岩”“壤土+砂岩”3 种构型分布面积相对较大，“壤土+板岩”构型分布面积最小。母质成因以残坡积为主。小兴安岭隆起带山间谷地冲洪积地表基质区分布在五大连池市东部和北部、嫩江市东部及中北部，面积 1733.32km<sup>2</sup>，占全区面积 7.24%。地表基质构型主要为“壤土+砾质”。土质为灰黑色壤土。砾质主要为细砾，砾石成分为花岗质、长英质、泥质，呈次棱角-椭圆状，磨圆较好，分选一般。母质成因以冲洪积为主；小兴安岭隆起带台地残坡积地表基质区分布在嫩江市科洛镇、五大连池市五大连池镇，面积为

1101.12km<sup>2</sup>，占全区面积 4.60%。地表基质构型主要为“壤土+玄武岩/玄武质浮岩”。土质为灰黑色-棕色壤土。岩石成分为玄武岩/玄武质浮岩。母质成因以残坡积为主。

松嫩平原沉降带地表基质区面积为 10645.12km<sup>2</sup>，占全区面积 44.44%。地貌以台地、阶地漫滩为主，地形起伏明显，但高差较小。松嫩平原沉降带台地冲洪积地表基质区分布在五大连池中部和西南部、嫩江中部和西部，面积为 8420.03km<sup>2</sup>，占全区面积 35.15%。地表基质构型相对复杂，为“土质”和“土质+岩石”构型。“土质”构型分布面积较广，划分为“壤土+砂土”“壤土”。“壤土”构型表层土质为灰黑色壤土，随深度增加颜色变浅，下部土质为棕黄色壤土，少量褐色、青色壤土，常呈团块状，较表层紧实；“壤土+砂土”构型表层土质与“壤土”构型相似，下部土质为浅黄色砂土，呈砂粒状，相对松散，常夹杂大小不等砾石。母质成因以冲洪积为主。“土质+岩石”构型表层土质与“土质”构型近似，岩石可划分为岩浆岩、沉积岩、变质岩，岩浆岩包括玄武岩、安山岩、流纹岩、花岗岩，沉积岩包括砂岩、泥岩，变质岩包括板岩、片麻岩、变粒岩、

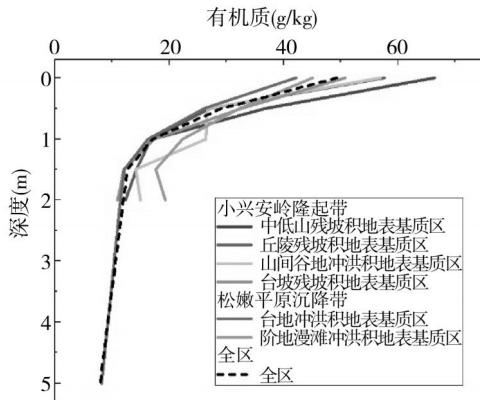


图 5 有机质含量平均值折线图

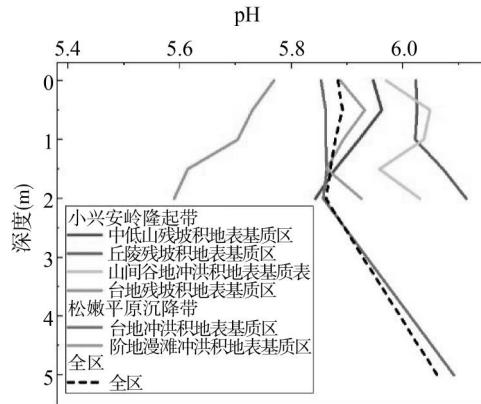


图 6 pH 平均值折线图

变火山岩。母质成因以残坡积为主。松嫩平原沉降带阶地漫滩冲洪积地表基质区分布在讷漠尔河、科洛河、门鲁河等主要河流及其支流地带，面积为  $2225.09\text{ km}^2$ ，占全区面积 9.29%，地表基质构型主要为“壤土+砾质”。土质为灰黑色壤土。砾质主要为细砾，砾石成分为花岗质、长英质、泥质，呈次棱角-椭圆状，磨圆较好，分选差，含大量砂土。母质成因以冲洪积为主。

### 3 地表基质层理化性质

#### 3.1 容重

松嫩平原沉降带台地冲洪积地表基质区和阶地漫滩冲洪积地表基质区容重平均值最大，两个区平均值均为  $1.21\text{ g/cm}^3$ ，小兴安岭隆起带中低山残坡积地表基质区容重平均值最小，为  $1.01\text{ g/cm}^3$ 。各分区容重平均值从大到小表现为：松嫩平原沉降带台地冲洪积地表基质区、松嫩平原沉降带阶地漫滩冲洪积地表基质区>小兴安岭隆起带台地残坡积地表基质区>小兴安岭隆起带山间谷地冲洪积地表基质区>小兴安岭隆起带丘陵残坡积地表基质区>小兴安岭隆起带中低山残坡积地表基质区(图 4, 表 4)。

松嫩平原沉降带地表基质区容重值高于小兴安岭隆起带地表基质区，与该分区耕地分布面积大、开垦时间长有关；小兴安岭隆起带地表基质区内台地残坡积地表基质区相对其他分区容重平均值高，但低于松嫩平原沉降带地表基质

区，可能与该分区开垦时间较晚有关。

#### 3.2 粒度

研究区土壤粒度在垂向上变化有所差异，小兴安岭隆起带中低山残坡积地表基质区、丘陵残坡积地表基质区、山间谷地冲洪积地表基质区和松嫩平原沉降带阶地漫滩冲洪积地表基质区下部多为岩石、砂砾石，土质样品数据含量随深度增加逐渐变少，局部显示从壤土过渡至砂土，粒度变粗的趋势。小兴安岭隆起带台地冲洪积地表基质区由于构型相对复杂，在“土质+岩石”和“壤土+砂土”构型中显示出垂向上从壤土过渡至砂土的趋势，砂粒含量增多，粒度变粗；而在“壤土”构型分布区，粒度在垂向上无明显变化，显示均为壤土。

#### 3.3 有机质

研究区表层土质有机质含量平均值差异较大，小兴安岭隆起带地表基质区整体高于松嫩平原沉降带地表基质区。小兴安岭隆起带中低山残坡积地表基质区最高，为  $66.34\text{ g/kg}$ ；松嫩平原沉降带台地冲洪积地表基质区最低，为  $42.20\text{ g/kg}$ 。在 2m 处，松嫩平原沉降带阶地漫滩冲洪积地表基质区有机质含量平均值高于其他分区，与该分区沼泽湿地分布面积较大，泥炭埋深较深有关，其他分区有机质含量平均值接近一致(图 5, 表 5)。

#### 3.4 pH 值

研究区表层土质 pH 平均值为  $5.88, 0.5\text{ m}$

表 5 有机质含量统计表

单位:g/kg

深度	小兴安岭隆起带			松嫩平原沉降带			全区
	中低山残坡积 地表基质区	丘陵残坡积 地表基质区	山间谷地冲洪积 地表基质区	台地残坡积 地表基质区	台地冲洪积 地表基质区	阶地漫滩冲洪 积地表基质区	
表层	66.34	57.65	56.89	50.77	42.20	45.12	49.27
0.5m	36.72	27.07	26.71	32.51	26.07	32.28	29.06
1.0m	17.18	16.83	26.38	17.30	16.20	22.30	17.13
1.5m	12.10	14.29	14.14	12.13	12.12	17.61	12.73
2.0m	11.06	12.37	14.91	10.96	11.48	19.29	11.97
5.0m					8.19		7.93

表 6 地表基质分区 pH 值统计表

深度	小兴安岭隆起带			松嫩平原沉降带			全区
	中低山残坡积 地表基质区	丘陵残坡积 地表基质区	山间谷地冲洪积 地表基质区	台地残坡积 地表基质区	台地冲洪积 地表基质区	阶地漫滩冲洪 积地表基质区	
表层	5.95	6.02	5.97	5.77	5.85	5.89	5.88
0.5m	5.96	6.03	6.05	5.73	5.86	5.93	5.89
1.0m	5.92	6.02	6.04	5.70	5.86	5.89	5.88
1.5m	5.88	6.07	5.96	5.61	5.86	5.86	5.87
2.0m	5.84	6.11	6.03	5.59	5.86	5.93	5.86
5.0m					6.09		6.06

pH 平均值为 5.89, 1m pH 平均值为 5.88, 1.5m pH 平均值为 5.87, 2m pH 平均值为 5.86, 5m pH 平均值为 6.06, 均属于微酸级别。pH 平均值随深度增加变化幅度较小且无明显规律(图 6, 表 6)。

### 3.5 有机碳储量

研究区小兴安岭隆起带地表基质区土质有机碳密度整体高于松嫩平原沉降带地表基质区。小兴安岭隆起带中低山残坡积地表基质区表层土质有机碳密度平均值最大, 为 7.31kg/m<sup>2</sup>, 松

嫩平原沉降带台地冲洪积地表基质区表层土质有机碳密度平均值最小, 为 5.84kg/m<sup>2</sup>。各分区有机碳密度平均值从大到小表现为: 小兴安岭隆起带中低山残坡积地表基质区 > 小兴安岭隆起带山间谷地冲洪积地表基质区 > 小兴安岭隆起带丘陵残坡积地表基质区 > 小兴安岭隆起带台地残坡积地表基质区 > 松嫩平原沉降带阶地漫滩冲洪积地表基质区 > 松嫩平原沉降带台地冲洪积地表基质区(图 7, 表 7)。

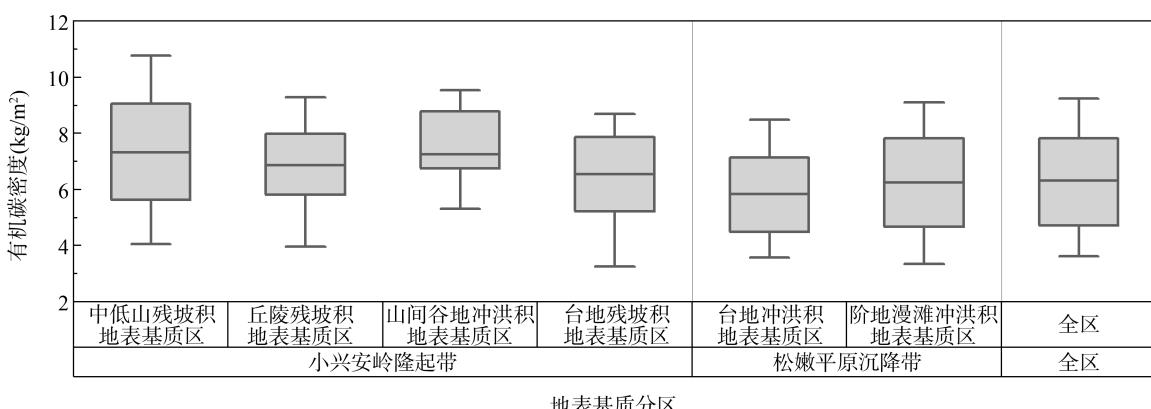


图 7 不同地表基质分区有机碳密度箱线图

表 7 有机碳密度统计表

单位: kg/m<sup>2</sup>

分区	小兴安岭隆起带			松嫩平原沉降带				全区
	中低山残坡积	丘陵残坡积	山间谷地冲洪积地表基质区	台地残坡积	台地冲洪积	阶地漫滩冲洪积地表基质区		
	地表基质区	地表基质区	地表基质区	地表基质区	地表基质区	地表基质区		
平均值	7.31	6.86	7.05	6.62	5.84	6.61	6.32	

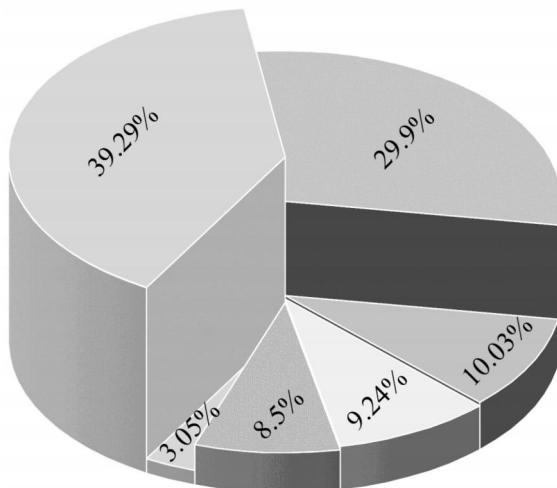
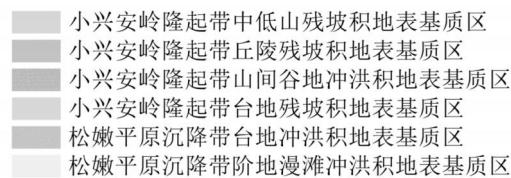


图 8 不同地表基质分区有机碳储量占比图

研究区小兴安岭隆起带中低山残坡积地表基质区表层土质有机碳储量最大,为 56.98Tg,占总储量的 39.29%;小兴安岭隆起带台地残坡积地表基质区表层土质有机碳储量最小,为 4.42Tg,占总储量的 3.05%(图 8)。

#### 4 结论

(1) 研究区地表基质分区可划分为 2 个地表基质一级分区、6 个地表基质二级分区和 7 个地表基质三级分区,识别出 18 种地表基质构型。小兴安岭隆起带中低山、丘陵残坡积地表基质区地表基质构型主要表现为“土质+岩石”;小兴安岭隆起带山间谷地冲洪积地表基质区和松嫩平原沉降带阶地漫滩冲洪积地表基质区地表基质构型主要表现为“土质+砾质”;松嫩平原沉降带台地冲洪积地表基质区地表基质构型主要表现

为“土质”和“土质+岩石”;小兴安岭隆起带台地残积、残坡积地表基质区地表基质构型主要表现为“土质+玄武岩/玄武质浮岩”。

(2) 研究区容重整体呈现东部、北部过松,中部适宜,西南部紧实的特点,平均值为 1.16g/cm<sup>3</sup>;表层土质粒度以壤土为主,部分地区为砂质壤土;表层土质有机质含量平均值为 49.27g/kg,呈现北高南低、东高西低的特点;pH 值酸性土质主要分布在五大连池市中部、西南部,嫩江市土质属微酸性,中性土质零星分布;有机碳密度整体呈现西低东高的空间分布格局,低值区主要在西部呈片状分布,高值区主要在东南部呈团块状分布,全区表层土质有机碳密度平均值为 6.32kg/m<sup>2</sup>;有机碳总储量为 145.02Tg。

(3) 本次研究为松嫩平原北部五大连池—嫩江地区地表基质层空间分布及理化性质特征研究提供了科学数据,对指导该地区的自然资源管理和土地保护与合理开发利用具有重要价值。

#### 参考文献(References):

- [1] 自然资源部. 自然资源部关于印发《自然资源调查监测体系构建总体方案》的通知(自然资发[2020]15号)[J]. 自然资源通讯, 2020, 000(002): 13–22.
- [2] 郝爱兵, 殷志强, 李洪宇, 等. 地表基质的科学内涵与理论框架[J]. 地质学报, 2024, 98(11): 3225–3237.
- [3] 殷志强, 陈自然, 李霞, 等. 地表基质综合调查: 内涵、分层、填图与支撑目标[J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(01): 144–151.
- [4] 姚晓峰, 杨建锋, 左力艳, 等. 地表基质的内涵辨析与调查思路[J]. 地质通报, 2022, 41(12): 2097–2105.
- [5] 王献, 鲁敏, 侯红星, 等. 山区平原过渡区土质地表基质空间异质性特征分析: 以河北省易县东部地

- 区为例[J]. 中国地质调查, 2023, 10(03): 60–66.
- [6] 侯红星, 张蜀冀, 鲁敏, 等. 自然资源地表基质层调查技术方法新经验: 以保定地区地表基质层调查为例[J]. 西北地质, 2021, 54(03): 277–288.
- [7] 陈彭, 侯红星, 马骏驰, 等. 低山丘陵区黑土地地表基质调查研究思路: 以扎兰屯地区为例[J]. 中国国土资源经济, 2023, 36(02): 81–89.
- [8] 殷志强, 卫晓锋, 刘文波, 等. 承德自然资源综合地质调查工程进展与主要成果[J]. 中国地质调查, 2020, 7(03): 1–12.
- [9] 李响, 周效华, 相振群, 等. 地表基质调查的工作思路刍议: 以海南岛为例[J]. 地质通报, 2023, 42(01): 68–75.
- [10] 侯红星, 葛良胜, 孙肖, 等. 地表基质在中国黑土地资源调查评价中的应用探讨: 基于黑龙江宝清地区地表基质调查[J]. 自然资源学报, 2022, 37(09): 2264–2276.
- [11] 葛良胜, 杨贵才. 自然资源调查监测工作新领域: 地表基质调查[J]. 中国国土资源经济, 2020, 33(09): 4–11+67.
- [12] 贾磊, 刘洪, 欧阳渊, 等. 基于地质建造的南方山地-丘陵区地表基质填图单元划分方案: 以珠三角新会-台山地区为例[J]. 西北地质, 2022, 55(04): 140–157.
- [13] 邵海, 王英男, 殷志强, 等. 承德坝上高原如意河流域地表基质调查与编图探索[J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(02): 150–159.
- [14] 刘洪, 李文昌, 欧阳渊, 等. 基于地质建造的西南山区生态地质编图探索与实践: 以邛海-泸山地区为例[J]. 地质学报, 2023, 97(02): 623–638.
- [15] 自然资源部办公厅. 自然资源部办公厅关于印发《地表基质分类方案(试行)》的通知[J]. 自然资源通讯, 2021, 000(002): 34–37.
- [16] 裴小龙, 祝晓松, 冯欣, 等. 基于自然资源统一管理的地表基质模型、分类及调查研究[J]. 地质通报, 2024, 43(09): 1530–1543.
- [17] 刘清俊, 刘雨鑫, 王颖, 等. 地表基质三级分类方案探讨[J]. 城市地质, 2023, 18(01): 1–8.
- [18] 殷志强, 秦小光, 张蜀冀, 等. 地表基质分类及调查初步研究[J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(06): 8–14.
- [19] 韩晓增, 邹文秀, 杨帆. 东北黑土地保护利用取得的主要成绩、面临挑战与对策建议[J]. 中国科学院院刊, 2021, 36(10): 1194–1202.
- [20] 梁爱珍, 李禄军, 祝惠. 科技创新推进黑土地保护与利用, 齐力维护国家粮食安全: 用好养好黑土地的对策建议[J]. 中国科学院院刊, 2021, 36(05): 557–564.
- [21] 白烨. 东北黑土地的危机与拯救. 生态经济, 2021, 37(01): 9–12.
- [22] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版)[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [23] 张甘霖, 王秋兵, 张凤荣, 等. 中国土壤系统分类土族和土系划分标准[J]. 土壤学报, 2013, 50(04): 826–834.
- [24] 中华人民共和国地质矿产部. 岩石分类和命名方案 火成岩岩石分类和命名方案: GB/T 17412. 1–1998[S]. 北京: 中国标准出版社, 1998.
- [25] 中华人民共和国地质矿产部. 岩石分类和命名方案 火成岩岩石分类和命名方案: GB/T 17412. 2–1998[S]. 北京: 中国标准出版社, 1998.
- [26] 中华人民共和国地质矿产部. 岩石分类和命名方案 火成岩岩石分类和命名方案: GB/T 17412. 3–1998[S]. 北京: 中国标准出版社, 1998.
- [27] 高大钊. «岩土工程勘察规范»(GB50021—2001)的修订[J]. 建筑结构, 2002, 31(12): 62–65.
- [28] 全国土壤质量标准化技术委员会(SAC/TC 404). 土壤质量 野外土壤描述: GB/T 32726–2016[S]. 中国标准出版社, 2016.

#### 作者简介:

第一作者:赵国强,男,1991年生,山东临沂人,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。主要研究方向为地质工程。Email:1369255947@qq.com;  
通讯作者:梁中恺,男,1988年生,黑龙江拜泉人,硕士,中国地质调查局哈尔滨自然资源综合调查中心,高级工程师。主要研究方向为地质工程。Email:lzk\_cindy@126.com

# Study on the Spatial Distribution Characteristics and Physicochemical Properties of the Surface Substrate Layer in the Wudalianchi–Nenjiang Area of the Northern Songnen Plain

ZHAO Guoqiang<sup>1,2</sup>, LIANG Zhongkai<sup>1,2\*</sup>, HAN Shoude<sup>1,2</sup>, ZHANG Ming<sup>1,2</sup>,  
REN Guangzhi<sup>1,2</sup>, LI Zhuang<sup>1,2</sup>, WANG Xu<sup>1,2</sup>

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

2. Observation and Research Station of Earth Critical Zone in Black Soil, Harbin, Ministry of Natural Resources,  
Harbin 150086, China)

**Abstract:** To better serve natural resource management and territorial spatial planning, the concept of surface substrate was first proposed by the Ministry of Natural Resources in 2020. By studying the spatial distribution characteristics of the surface substrate layer, it is possible to effectively establish the correlation between underground bedrock and above-ground vegetation, which is of great significance for the scientific management of natural resources. This paper selects the Wudalianchi–Nenjiang area in the northern part of the Songnen Plain as the research area. Using tools such as Luoyang shovels, backpack drills, and car drills, field investigations and sampling were conducted on the vertical structure of the surface substrate layer at depths of 2m, 5m, and 20m. A total of 1236 survey points were completed, and 1174 samples were collected. The soil sample bulk density, organic carbon, particle size, and pH indicators were determined using ring knife method, potassium dichromate oxidation – external heating method, Kjeldahl nitrogen determination method, X-ray fluorescence spectrometry (XRF), and glass electrode method respectively. The results show that the study area is divided into 2 primary surface substrate zones, 6 secondary surface substrate zones, 7 tertiary surface substrate zones, and 18 types of surface substrate configurations. The average bulk density obtained is 1.16g/cm<sup>3</sup>; the average organic matter content is 49.27g/kg; the average pH value of the topsoil is 5.88, with an average pH value of 5.89 at 0.5m, 5.88 at 1m, 5.87 at 1.5m, 5.86 at 2m, and 6.06 at 5m, all belonging to a slightly acidic level; the average organic carbon density of the topsoil is 6.32kg/m<sup>2</sup>, and the total organic carbon storage is 145.02Tg. The research results can provide a reference for natural resource management, land protection, and development and utilization in this region to a certain extent.

**Key words:** Songnen Plain; surface substrate layer; surface substrate configuration; physicochemical properties; organic carbon storage

# 黑龙江省巴彦县地表基质类型及特征分析

张海成<sup>1,2</sup>,赵洪强<sup>1,2\*</sup>,段明新<sup>1,2</sup>,赵喜东<sup>1,2</sup>,张佳俊<sup>1,2</sup>,韩守德<sup>1,2</sup>,刘学<sup>1,2</sup>

(1. 中国地质调查局哈尔滨自然资源综合调查中心, 哈尔滨 150086;  
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 150086)

**摘要:** 地表基质层作为地球表层系统的重要组成部分, 涵盖了岩石、砾质、土质和泥质等多种类型, 是维持生态系统平衡和保障生态服务功能的基石。巴彦县作为我国重要的黑土地分布区, 查明黑土地地表基质分布特征, 对该地区黑土地保护利用、国土空间规划和农业发展具有重大的指导意义。本文通过实地调查与总结分析, 将巴彦县地表基质分区划分为 2 个一级分区、4 个二级分区和 5 个三级分区, 识别出壤土+壤土、壤土+黏土、壤土+砂土、壤土+安山岩、壤土+闪长岩、壤土+花岗岩等 6 种地表基质构型。结合物探高密度与微动勘探测量, 对钻孔数据进行分析, 总结出不同分区内的地表基质空间分布特征。

**关键词:** 地表基质; 巴彦县; 分布特征

中图分类号:S15,F301.24 文献标志码:A

文章编号:1672-2736(2025)09-0035-11

## 0 引言

土地作为人类赖以生存与发展的根基, 其基质层宛如隐藏在地表之下的“密码”, 深刻影响着水土资源的形成、分布及质量。基质层作为土壤剖面的关键层次, 不仅为植物扎根提供物理支撑, 更是水分涵养、养分循环的核心场所, 从根本上决定了区域水土资源的丰度与可持续性<sup>[1]</sup>。黑土区, 作为全球瞩目的重要农业产区, 在人们的认知中代表着肥沃与高产, 然而这实则是一个宽泛的地理区域概念。其并非单一的土壤类型, 而是涵盖了典型黑土、暗棕壤、草甸土、白浆土、黑钙土等多种复杂且特性各异的土壤类型, 相应的基质层结构、组成同样千差万别。这些多样化的基质层宛如精细交织的“生态拼图”, 各自左右着黑土资源在空间上的分布格局。准确探明黑土区基质层状况, 为精准掌握黑土资源的空间分布规律提供最坚实的基础, 无论是对于保障区域粮食安全、优化土地利用规划, 还是推动生态环境的良性发展, 都具有不可估量的深远

意义<sup>[2]</sup>。

在国内, 黑土区基质层的研究近年来取得了显著进展。随着国家对黑土地保护的高度重视, 一系列相关科研项目相继开展。我国学者利用“空天地网钻”一体化调查技术, 对东北黑土区地表基质层进行了全面系统的调查, 基本摸清了基质层的类型、分布范围以及空间结构特征。在研究基质层与黑土形成演化关系方面, 通过对不同区域黑土剖面的详细分析, 结合地质历史资料, 揭示了第四纪以来基质层在黑土形成过程中的物质贡献和环境演变指示作用。在应用研究方面, 基于基质层调查成果, 开展了黑土地适宜性评价, 为优化土地利用布局、精准农业发展以及生态保护修复提供了有力支撑。

在国外, 黑土区基质层研究方面起步较早, 积累了丰富的研究成果。在北美和欧洲的黑土分布区, 学者们运用先进的地球物理探测技术、高分辨率遥感监测以及长期定位观测等方法, 对基质层的空间分布特征、地质演化过程以及与土壤生态系统的相互作用机制进行了深入探究。

基金项目:中国地质调查局地质调查项目(DD20242940)。

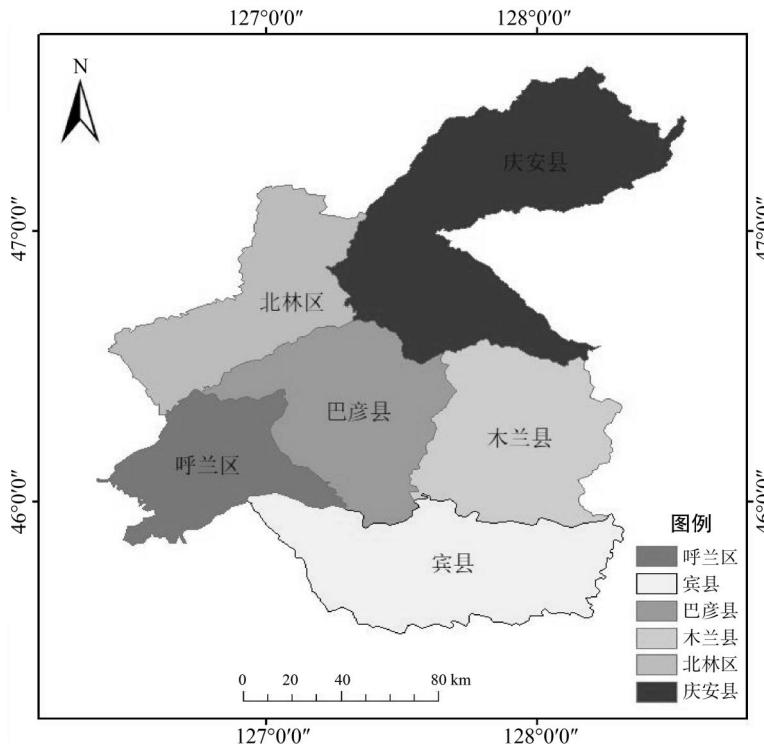


图 1 研究区位置图

部分研究通过对不同深度基质层的采样分析,揭示了其物质组成和元素迁移规律,发现基质层中某些关键元素的含量和形态变化对土壤肥力和微生物活性具有显著影响。

黑土作为地球上最珍贵的土壤资源之一,有“耕地中的大熊猫”之称<sup>[3,4]</sup>。巴彦县地处典型黑土农业产区,是全国知名的农业大县、商品粮基地县,黑龙江省的主要粮食生产基地,是我国粮食安全的保障和“压舱石”<sup>[5-7]</sup>。县区内土壤类型丰富多样,涵盖了黑土、草甸土等多种类型,其中黑土广泛分布于平原区和半丘陵区,面积占比达 70.8%。因此,本文聚焦巴彦县展开深入探究,通过对该县地表基质分布特征进行系统分析,旨在为黑土地资源的科学利用与保护提供理论支撑。

## 1 研究区概况

研究区位于黑龙江省中部偏南,松嫩平原腹地,松花江中游北岸(图 1)。地处东经 126°45'53"~127°42'16"、北纬 45°54'28"~46°40'18"之间,总面积 3137.7km<sup>2</sup>。全境呈现松嫩平原典型

的漫川漫岗地形地貌,地势从东北向西南呈缓坡式倾斜。研究区属于中温带大陆性季风气候,年均气温 3.1℃,年均日照时数 2640h,累计年平均降水量 582.2mm,全年无霜期一般在 115~135 天之间。巴彦县农业资源丰富,拥有耕地 359.8 万亩,主要作物为玉米、大豆、水稻等,常年粮食生产能力 38 亿斤,是全国知名优质商品粮产区,黑龙江省重要的农业大县<sup>[8,9]</sup>。

研究区古生界地层主要分布于东部和东南部,中生界地层广泛分布于中部和西部,新生界地层主要覆盖西部和北部的平原地区。

## 2 地表基质分布特征

### 2.1 地表基质分区

根据研究区地理位置、地形地貌、地质成因等条件,对地表基质分区进行划分。一级分区按照地理位置进行划分,选取张广才岭隆起带和松嫩平原沉降带 2 个指标;二级分区按照地貌类型划分,选取丘陵、台地、高平原和阶地漫滩等 4 个指标;三级分区根据地质成因划分,选取残坡积、风积和冲洪积等 3 个指标,将巴彦县地表基质划

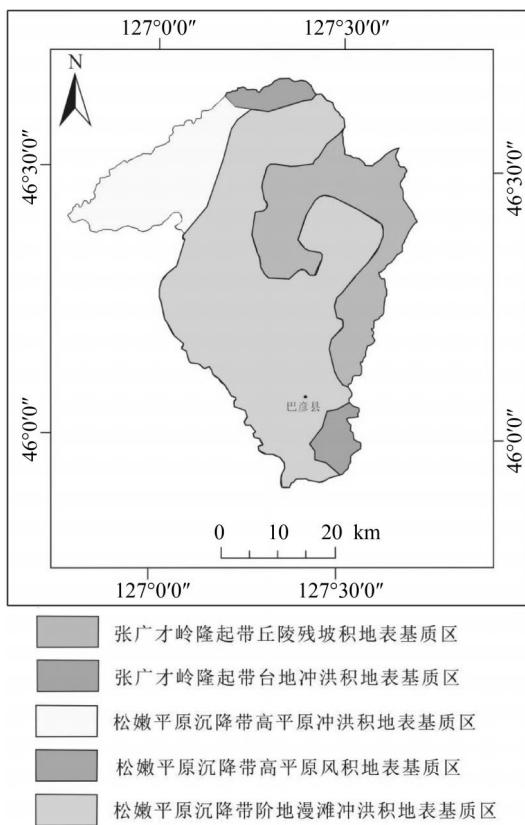


图2 研究区地表基质分区图

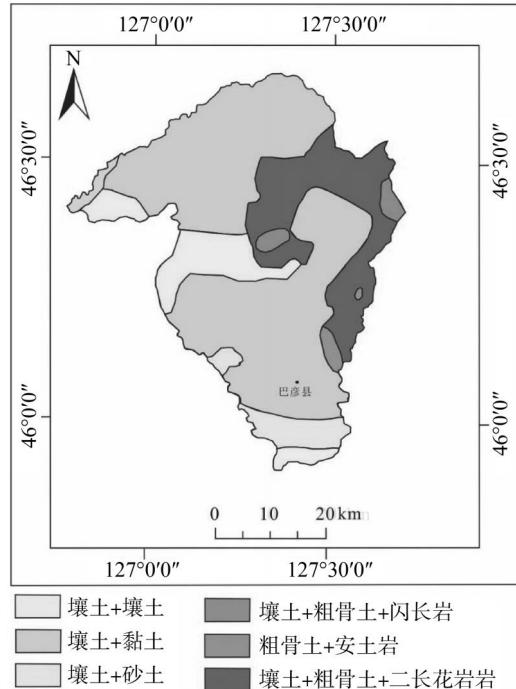


图3 研究区地表基质构型图

表1 地表基质分区分级表

一级分区	二级分区	三级分区
张广才岭隆起带 地表基质区	丘陵地表基质区 台地地表基质区	残坡积地表基质区 冲洪积地表基质区
松嫩平原沉降 带地表基质区	高平原地表基质区 阶地漫滩地表基质区	冲洪积地表基质区
		风积地表基质区

分为2个一级分区、4个二级分区、5个三级分区(图2,表1)。

## 2.2 地表基质构型

本次工作地表基质分类标准采用自然资源部发布的《地表基质分类方案(试行)》<sup>[10,11]</sup>,按照地表基质发育过程将其划分为岩石和土质2个一级类;将岩石分为岩浆岩1个二级类,将土质分为砂土和壤土2个二级类;三级分类中将岩浆岩基质分为花岗岩、闪长岩和安山岩;砂土分为净砂土、壤质砂土和黏质砂土,壤土分为净壤

土、砂质壤土和黏质壤土。按照地表基质类型和垂向结构等特征,将研究区划分出6种地表基质构型(图3,表2)。

## 2.3 地表基质分区特征

### 2.3.1 张广才岭隆起带地表基质区

(1)张广才岭隆起带丘陵地表基质区  
张广才岭隆起带丘陵地表基质区主要分布于巴彦县东部地区。包含1个三级分区,张广才岭隆起带丘陵残坡积地表基质区。

该区表层多为壤土、砂土和粗骨土(图4)。

表 2 研究区地表基质构型划分表

一级分区	二级分区	三级分区	构型
张广才岭隆起带地表基质区	张广才岭隆起带丘陵 地表基质区	张广才岭隆起带丘陵残 坡积地表基质区	壤土+安山岩 壤土+闪长岩 壤土+花岗岩
	张广才岭隆起带台地 地表基质区	张广才岭隆起带台地冲 洪积地表基质区	壤土+壤土 壤土+黏土
松嫩平原沉降带地表基质区	松嫩平原沉降带高 平原地表基质区	松嫩平原沉降带高平原 风积地表基质区	壤土+壤土 壤土+黏土 壤土+黏土
	松嫩平原沉降带阶地漫 滩地表基质区	松嫩平原沉降带阶地漫滩冲 洪积地表基质区	壤土+砂土

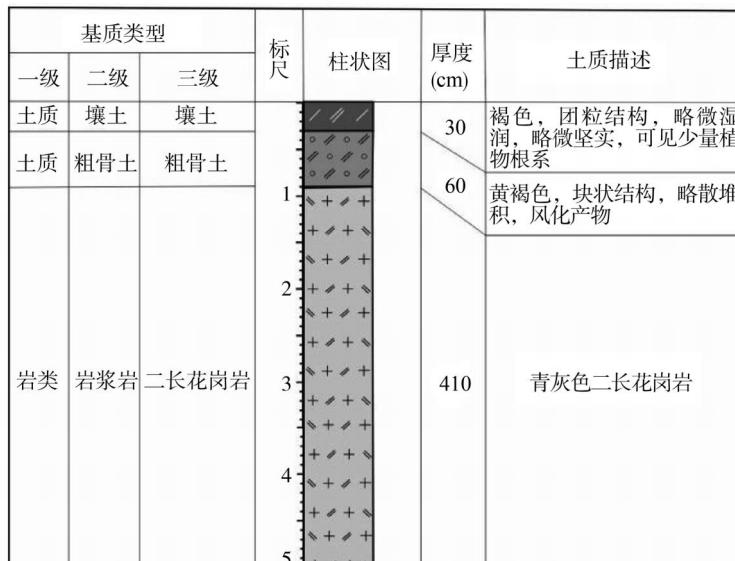


图 4 张广才岭隆起带丘陵地表基质区典型构型图

壤土大部分为黑色壤土,但厚度不超过 30cm,为原地残坡积风化成壤作用形成;在沟谷两侧多发育砂质壤土和砂土,该地区砂土多为近源运积成因,与两侧山坡母岩具有一定的继承性;粗骨土具有原地风化残积成因的特点,坡积地带的粗骨土为近源运积成因,粗骨土中砾石的成分多与母岩相一致,具有一定的继承性。残坡积母质多为花岗岩、火山岩及砂砾岩等,为岩石的原地风化产物经短距离搬运堆积,上部覆盖土壤较薄,见石英砂及矿物颗粒,少盐基,易侵蚀,易酸化。

## (2) 张广才岭隆起带台地地表基质区

张广才岭隆起带台地地表基质区为研究区主要的地表基质分区,分布于巴彦县大部(除东部低山丘陵区)。包含 1 个三级分区,张广才岭隆起带台地冲洪积地表基质区。

该区表层分布黑色壤土,黑土层厚度不一,随地形地貌变化而改变,多数以黄土为母质,自上而下具有黑色壤土-黄褐色黏质壤土-黄色黏土过渡的特点;坡度较大的漫川漫岗地区发育黑色壤土-黄色砂土垂向结构,区内侵蚀沟较为发

育(图5)。该区土壤继承性较好,上土下土是本研究区乃至整个松嫩平原分布较为广泛的一种基质构型。

### 2.3.2 松嫩平原沉降带地表基质区

#### (1) 松嫩平原沉降带高平原地表基质区

松嫩平原沉降带高平原地表基质区分布于巴彦县北部,是研究区面积最大的二级分区,可进一步划分出2个三级分区,松嫩平原沉降带高平原冲洪积地表基质区和松嫩平原沉降带高平原风积地表基质区。

该区表层多分布黑色壤土(图6),以黑土层厚度中等偏厚为特征,除沿水系两岸有不同程度的砂质壤土外(属远源运积母质),多数以厚层

的黄土为母质,自上而下多具有黑色壤土-黄褐色黏质壤土-黄色黏土过渡的特点。靠近丘陵及山前过渡带区域表现为黑土层变薄的特点,侵蚀强度轻度到中等,具有黑色壤土-黄褐色壤土-黄色黏质壤土(粗骨土)的结构,多具有团粒结构或块状结构,略微湿润,可见植物根系,向下黄褐色壤土和黏质壤土含有不同程度白色硅质粉末。

#### (2) 松嫩平原沉降带阶地漫滩地表基质区

该区主要分布在松花江、呼兰河等河流两岸。包含1个三级分区,松嫩平原沉降带阶地漫滩冲洪积地表基质区。地貌为河流一级阶地或河漫滩,构型主要为黑色壤土-黄色砂土和黄褐

壤土-黏土型						
基质类型			标尺	柱状图	厚度(cm)	土质描述
一级	二级	三级				
土质	壤土	壤土			70	黑色, 团粒结构, 略微湿润, 稍坚实, 可见植物根系
					210	黄褐色, 团粒结构, 湿润, 稍坚实, 含少量铁锰结核, 240-260可见较多铁染
					120	黄色, 团粒结构, 湿润, 坚实, 黏性较大, 可见漫滩相震荡纹理, 青色与灰黄色交错纹理

图5 张广才岭隆起带台地地表基质区典型构型图

壤土-壤土型						
基质类型			标尺	柱状图	厚度(cm)	土质描述
一级	二级	三级				
土质	壤土	壤土			30	黑色, 团粒结构, 略微湿润, 质地较松, 可见少量锈斑, 可见植物根系, 随深度递增而减少
					120	棕色-青色黏质壤土, 块状结构, 湿润, 质地较坚实, 随深度增加愈加致密, 见锈斑和硅质粉末
					200	红棕色-黄棕色, 块状结构, 湿润, 质地较坚实, 可见大量锈斑, 随深度增加愈加致密

图6 松嫩平原沉降带高平原地表基质区典型构型图

壤土-砂土型						
基质类型			标尺	柱状图	厚度(cm)	土质描述
一级	二级	三级				
土质	壤土	壤土	1		25	棕色壤土, 团粒结构, 略微湿润, 质地松, 根系少
土质	壤土	砂质壤土			75	黄色砂质壤土, 块状结构, 略微湿润, 质地略微坚实, 无根系
土质	砂土	砂土			100	黄色砂土, 砂状结构, 略微湿润, 质地略微坚实, 无根系

图 7 松嫩平原沉降带阶地漫滩地表基质区典型构型图

色砂土-细砾型(图 7),具有表层砂质壤土或壤土向下过渡为砂土的特点,成因类型以远源运积为主,成分复杂,来源较广。

## 2.4 地表基质空间分布特征

通过前人钻探资料和汽车钻调查取得的数据,总结研究区不同分区内地表基质空间分布特征。

### 2.4.1 张广才岭隆起带丘陵地表基质区

张广才岭隆起带丘陵地表基质区主要分布于巴彦县东部地区。包括 1 个三级分区,张广才岭隆起带丘陵残坡积地表基质区。表层多为壤土、砂土和粗骨土。壤土大部分为黑土,厚度不超过 30cm,为原地残坡积风化成壤作用形成。垂向结构简单,为土+岩的垂向构型。下部基岩多为花岗岩、闪长岩、火山碎屑岩、安山岩和大理岩等。

### 2.4.2 张广才岭隆起带台地地表基质区

张广才岭隆起带台地地表基质区分布于巴彦县大部分地区(除东部低山丘陵和阶地漫滩)。包括 1 个三级分区,张广才岭隆起带台地冲洪积地表基质区。

巴彦县富江乡杨方烧锅村西 500m 处钻孔 SHZK01 显示:

SHZK01 为第四系松散堆积物钻孔,岩性主要为黏土、细砂和含砾粗砂(图 8)。0-6.7m 为壤土或黏土,向下逐渐过渡至黏土,土黄色逐渐过渡至灰色,成因主要为河流成因,可能为顾乡屯组。6.7-17.55m 为细砂,由青灰色-灰色-白灰色,颜色逐渐变浅,砂质结构,松散,砂为细砂,砂感十分明显,可能为河漫滩沉积。17.55-41.70m 为黑灰色含砾粗砂,砂质结构,松散,切

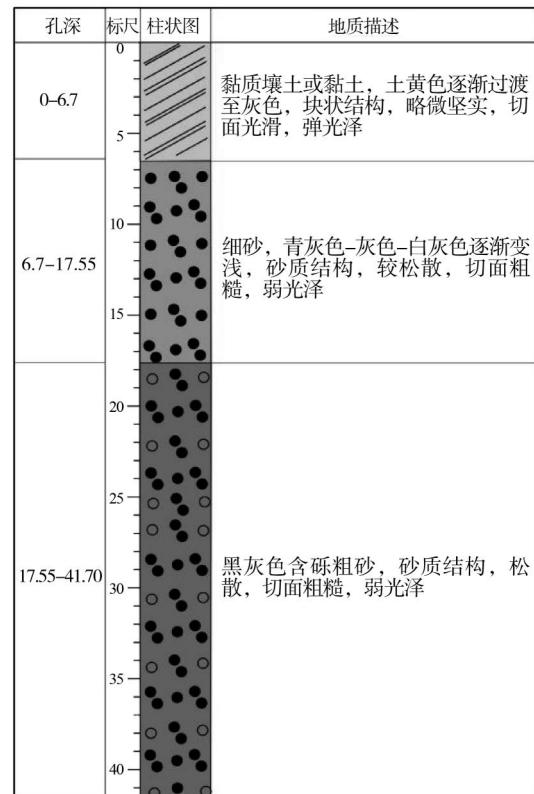


图 8 钻孔 SHZK01 柱状图

面粗糙,弱光泽,粗砂含量大于 60%,为河流沉积。

通过高密度电法测量,从地层情况看,从上往下为本区典型的 4 层结构:上部为低阻黏土层,总体厚度 15m 左右,厚度变化不大。中上部为细砂层,总体厚度约 5m 左右,厚度变化不大。中部为高阻的含砾粗砂层,厚度可达 40m,两边薄,中间略厚。下部根据地质条件推测为砂质黏土层,未见底。通过微动勘探测量,从地层情况看,70m 以浅由浅往深波速逐渐增大,其中黏土类地层分布在 14m 以浅,浅部反演速度最低,约 120~200m/s,厚度约 14m 左右;细砂,粉细砂层

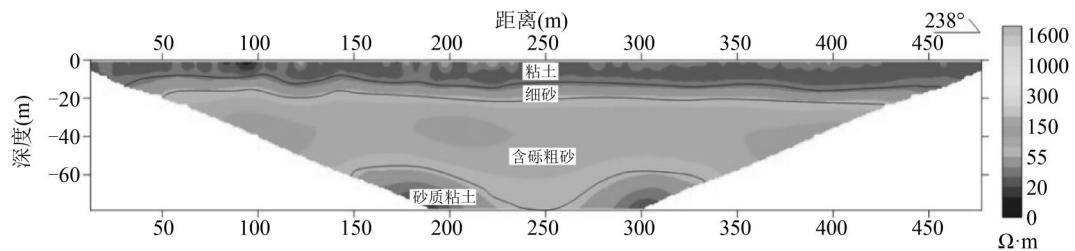


图 9 高密度电法剖面反演与解释图(BYGMD-05)

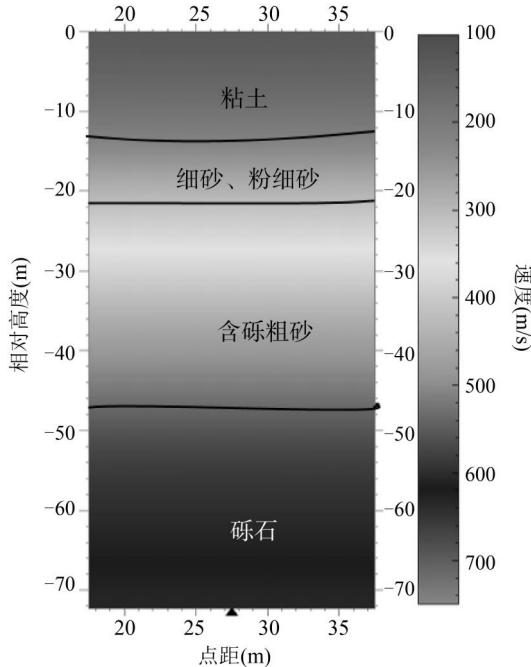


图 10 WD-33 人工源测点反演与解释图

的反演速度约 200~280m/s, 厚度约 8m 左右, 底深 14~22m 左右; 含砾粗砂层反演速度约 280~530m/s, 厚度 25m 左右, 底深 22~47m。砾石层的反演速度在 630~650m/s, 未见底。

结合高密度电法(图 9)与微动勘探(图 10)结果, 地表基质结构类型表现为: 表层壤土(0~1.2m), 上部砂质黏土(1.2~6.7m), 中部砂土(6.7~17.55m), 下部含砾粗砂(17.55~41.7m)。

#### 2.4.3 松嫩平原沉降带高平原地表基质区

松嫩平原沉降带高平原地表基质区分布于巴彦县北部。包括 2 个三级分区, 松嫩平原沉降带高平原冲洪积地表基质区和松嫩平原沉降带高平原风积地表基质区。

巴彦县红光乡先锋村南 500m 处钻孔 SH-ZK03 显示:

孔深	标尺	柱状图	地质描述
0~8.25	0~100	斜线	黑色淤泥状黏土, 略微紧实, 很湿润, 质软, 滑腻感较强
8.25~10.45	10~300	点状	灰色砂质黏土, 块状结构, 较紧实, 切面略粗糙, 手搓有砂感
10.45~13.50	30~400	点状	灰色细砂, 砂状结构, 略为松散, 切面粗糙, 弱光泽, 与下部渐变接触
13.50~29.60	15~600	△、▽、□	灰白色砂砾石, 砂质结构, 松散, 切面粗糙, 弱光泽
29.60~45.00	30~350	S	灰黑色泥岩, 中等风化, 泥质结构, 参差状断口, 土状光泽, 部分见油脂状光泽
45.00~48.00	40~45	●	青灰色粉砂岩, 砂质结构, 较坚硬, 半固结状态

图 11 钻孔 SHZK03 柱状图

SHZK03 钻孔 0~8.25m 为黑色淤泥状黏土, 略微紧实, 很湿润, 质软, 滑腻感较强, 未见新生体(图 11); 8.25~10.45m 为灰色砂质黏土, 块状结构, 较紧实, 切面略粗糙, 手搓有砂感, 砂为粉细砂, 与下层渐变接触; 10.45~13.50m 为灰色细砂, 砂状结构, 略为松散, 切面粗糙, 弱光泽, 与下部渐变接触, 可能为河漫滩沉积。13.50~29.60m 为灰白色砂砾石, 砂质结构, 松散, 切面粗糙, 弱光泽, 砂径大小 2~4mm, 含量在 70% 左右。

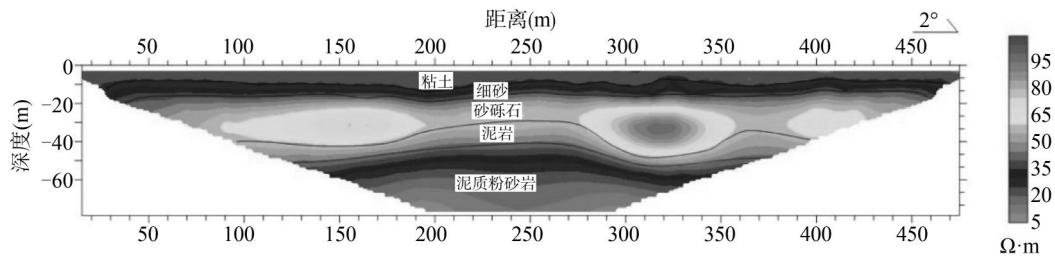


图 12 高密度电法剖面反演与解释图(BYGMD-01)

右,可能为边滩或牛轭湖沉积或岩石风化壳残积所致。29.60~45.00m 为灰黑色泥岩,中等风化,泥质结构,参差状断口,土状光泽,部分见油脂状光泽,为嫩江组泥岩,为浅湖-湖湘沉积。45.00~48.00m 为青灰色粉砂岩,砂质结构,较坚硬,半固结状态,未见底,可能为嫩江组上部,河流相沉积。

通过高密度电法测量,从地层情况看,从上往下为本区典型的 5 层结构:上部为低阻黏土层,总体厚度 10m 左右,厚度变化不大。中上层细砂层,总体厚度约 10m 左右,厚度变化不大。中层为高阻的砂砾石,两边厚中间薄,总体厚度约 20m。中下层为相对较薄的泥岩层,厚度约 10m。下部为低阻的泥质粉砂岩层,未见底。通过微动勘探测量,从地层情况看,70m 以浅由浅往深波速逐渐增大,其中地表-15m 左右速度 100~200m/s,推测为砂质黏土;15m~19m 反演速度约 200~260m/s,速度变化略缓,推测为粉细砂;19m~28m 反演速度约 260~400m/s,速度变化略高,推测为砂泥过渡层,为砂砾石;28m~45m 反演速度约 400~550m/s,推测为半固结泥岩;45m 以深反演速度 550~650m/s,推测为半固结粉砂岩,未见底。

结合高密度电法测量(图 12)与微动勘探测量(图 13)结果,较好地反应出巴彦县北部垂向空间分布特征,地表基质结构类型整体表现为:上部黏土(0~10.45m),砂土-粉细砂(10.45~12.55m),中部砂砾石(13.50~29.60m),下部嫩江组半固结泥岩和粉砂岩(29.60~48.00m)。

#### 2.4.4 松嫩平原沉降带阶地漫滩地表基质区

松嫩平原沉降带阶地漫滩地表基质区主要分布在松花江、呼兰河等河流两岸。包括 1 个三

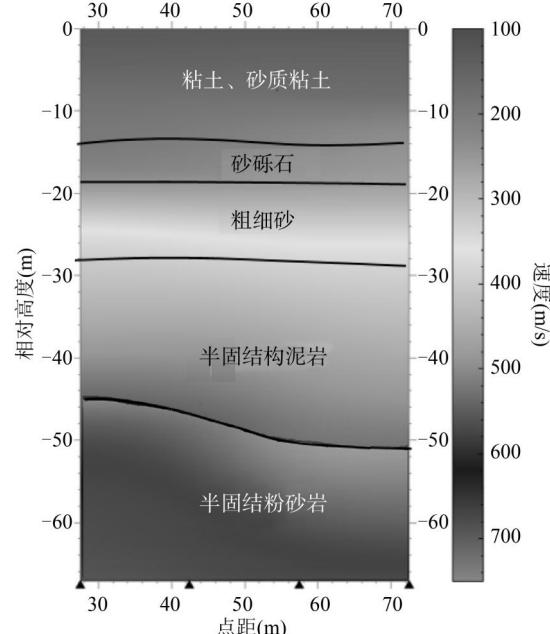


图 13 WD-81 人工源剖面反演与解释图

级分区,松嫩平原沉降带阶地漫滩冲洪积地表基质区。

巴彦县镇东乡刘家店南 1000m 处钻孔 SH-ZK02 显示:

SHZK02 钻孔 0~26.55m 为第四系松散堆积物,岩性主要为壤土、黏土和砂砾石(图 14)。其中:0~5.8m 为壤土或黏土,向下逐渐过渡至黏土,土黄色逐渐过渡至青色,成因主要为河流成因,可能为顾乡屯组。5.8~9.55m 为深色淤泥,泥质结构,略为松散,切面光滑,弱光泽,与下部突变接触。9.55~26.55m 为黄灰色-灰白色砂砾石,砂质结构,松散,切面粗糙,弱光泽,与下层渐变接触,粗砂与细砾混杂,砾径大小 2~5mm,可能为边滩或牛轭湖沉积或岩石风化壳残积所致。

通过高密度电法测量,从地层情况看,本区

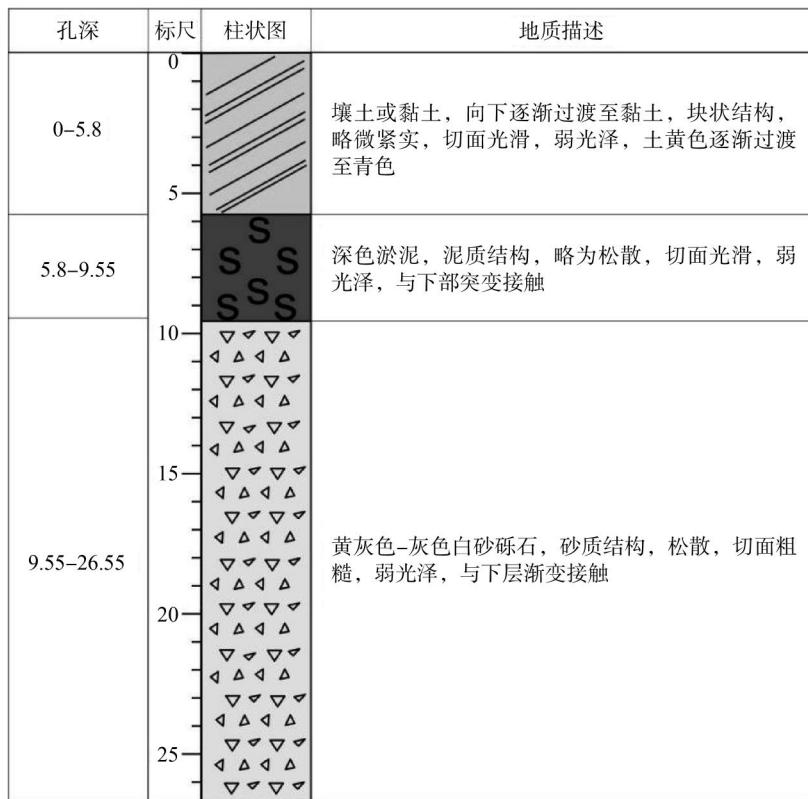


图 14 钻孔 SHZK02 柱状图

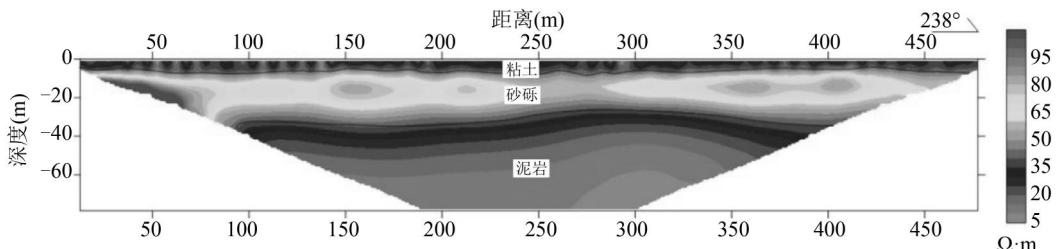


图 15 高密度电法剖面反演与解释图(BYGMD-17)

从上往下分为 3 层：上部为黏土层，总体厚度 6m 左右，厚度变化不大。中部为高阻砂砾层，总体厚度约 32m，厚度变化不大。下部为泥岩层，未见底。通过微动勘探测量，从地层情况看，70m 以浅由浅往深波速逐渐增大，其中地表-16m 左右速度 200~350m/s，相对巴彦其它地区速度略高，推测为粘土、细砂；16~27m 反演速度约 350~450m/s，推测为砂砾石；27~45m 反演速度约 450~520m/s，速度变化略缓，推测为半固结泥岩；45~54m 反演速度约 520~700m/s，推测为粉砂岩；54m 以深反演速度 700~900m/s，推测为半风化基岩，未见底。

结合高密度电法(图 15)与微动勘探(图 16)结果，地表基质结构类型整体表现为：表层壤土(0~0.5m)，上部黏土(0.5~5.8m)，中部淤泥，含水量高(5.8~9.55m)，下部砂砾石(9.55~26.55m)，深度为半固结泥岩(26.55~45.00m)，粉砂岩-半风化基岩(45.00~70.00m)。

### 3 结论

(1) 巴彦县地表基质分区明显，依据地理位置、地形地貌及地质成因，划分出 2 个一级分区、4 个二级分区和 5 个三级分区。张广才岭隆起带地表基质区的丘陵地表基质区，表层多为壤

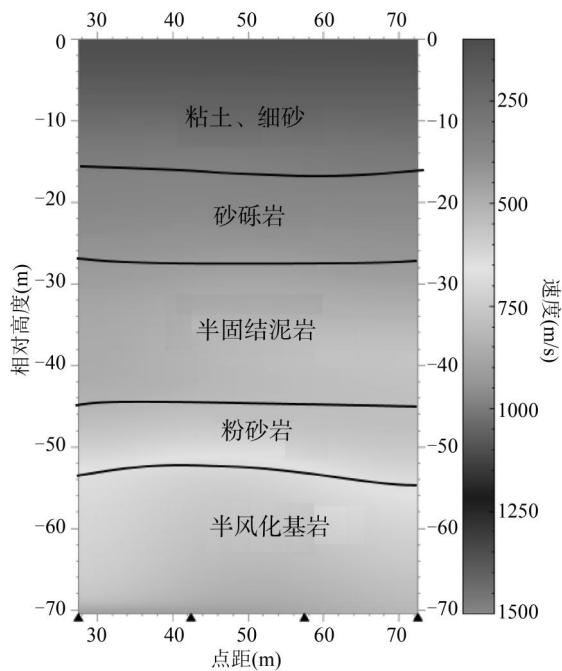


图 16 WD-79 人工源剖面反演与解释图

土、砂土和粗骨土，土壤厚度薄且易侵蚀、酸化；台地地表基质区表层以黑色壤土为主，黑土层厚度不一，侵蚀沟发育。松嫩平原沉降带地表基质区的高平原地表基质区，黑土层中等偏厚，靠近丘陵处变薄；阶地漫滩地表基质区多为黑色壤土-黄色砂土构型，成分复杂。

(2) 从地表基质构型看，研究区共划分出 6 种构型，主要为壤土与岩浆岩、砂土、黏土的组合。不同分区的地表基质空间分布特征各异，垂向结构和地层波速变化也有所不同。张广才岭隆起带丘陵地表基质区垂向为土+岩构型；张广才岭隆起带台地地表基质区地层结构呈现多层次特征，各层厚度和波速有相应变化。这些差异影响着土壤的物理性质、水分涵养和养分循环能力，进而对农业生产潜力和生态环境产生不同程度的作用。

(3) 本次研究以巴彦县为例，系统揭示了地表基质类型特征的研究方法和成果，对松嫩平原乃至全国同类区域的地表基质调查研究具有示范意义，填补了研究区地表基质研究在方法和成果上的空白，为区域生态修复、国土空间合理开发利用提供了理论依据，对推动自然资源精细化管理与区域可持续发展具有重要的价值。

#### 参考文献(References)：

- [1] 侯红星, 李瑞红, 李俊华, 等. 地表基质调查: 现状、进展与展望 [J]. 自然资源情报, 2024, 24 (11): 1-8.
- [2] 王建伟, 宋立东, 佟智强, 等. 基于地貌单元分区的地表基质结构调查方法与实践——以长春地区为例 [J]. 地质与资源, 2024, 32(03): 355-364.
- [3] 韩晓增, 邹文秀. 东北黑土地保护利用研究足迹与科技研发展望 [J]. 土壤学报, 2021, 58 (06): 1341-1358.
- [4] 霍东, 陈占生, 艾晓军, 等. 地表基质调查对黑土地保护技术支撑的思考——以台安县为例 [J]. 农业与技术, 2024, 44(15): 56-61.
- [5] 韩晓增, 邹文秀, 杨帆. 东北黑土地保护利用取得的主要成绩、面临挑战与对策建议 [J]. 中国科学院院刊, 2021, 36(10): 1194-1202.
- [6] 梁爱珍, 李禄军, 祝惠. 科技创新推进黑土地保护与利用, 齐力维护国家粮食安全: 用好养好黑土地的对策建议 [J]. 中国科学院院刊, 2021, 36 (05): 557-564.
- [7] 白烨. 东北黑土地的危机与拯救 [J]. 生态经济, 2021, 37(01): 9-12.
- [8] 王洋, 雷国平, 张惠, 等. 东北典型黑土区的耕地和基本农田的利用和保护——以巴彦县为例 [J]. 国土资源情报, 2010, 10(07): 14-17.
- [9] 梁海鸥. 巴彦县耕地资源利用变化时空特征研究 [D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2012.
- [10] 自然资源部. 自然资源部关于印发《自然资源调查监测体系构建总体方案》的通知(自然资发[2020] 15 号) [J]. 自然资源通讯, 2020, 000 (002): 13-22.
- [11] 自然资源部. 自然资源部办公厅关于印发《地表基质分类方案(试行)》的通知(自然资办发[2020] 59 号) [J]. 自然资源通讯, 2021, 000 (002): 34-37.

#### 作者简介:

第一作者: 张海成, 1997 年生, 男, 黑龙江五常人, 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, 主要研究方向为自然资源调查。Email: 2323516861@

qq.com;

通讯作者:赵洪强,1991年生,男,吉林松原人,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调查。Email: 603128611 @  
qq.com

## Analysis of the Types and Characteristics of the Surface Substrate in Bayan County, Heilongjiang Province

ZHANG Haicheng<sup>1,2</sup>, ZHAO Hongqiang<sup>1,2\*</sup>, DUAN Mingxin<sup>1,2</sup>, ZHAO Xidong<sup>1,2</sup>,  
ZHANG Jiajun<sup>1,2</sup>, HAN Shoude<sup>1,2</sup>, LIU Xue<sup>1,2</sup>

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

2. Observation and Research Station of Earth Critical Zone in Black Soil, Harbin, Ministry of Natural Resources,  
Harbin 150086, China)

**Abstract:** The surface substrate layer, as an important part of the earth's surface system, covers various types such as rock, gravel, soil, and mud, and serves as the cornerstone for maintaining the balance of the ecosystem and ensuring the functions of ecological services. Bayan County is an important distribution area of black soil in China. Identifying the distribution characteristics of the surface substrate of black soil in this area is of great guiding significance for the protection and utilization of black soil, the planning of territorial space, and agricultural development in this region. Through field surveys and summary analysis, this paper divides the surface substrate of Bayan County into 2 first-level zones, 4 second-level zones, and 5 third-level zones, and identifies 6 surface substrate configurations, including loam+loam, loam+clay, loam+sand, loam+andesite, loam+diorite, and loam+granite. By combining high-density geophysical prospecting and microtremor exploration measurements, analyzing the borehole data, and summarizing the spatial distribution characteristics of the surface substrate within different zones.

**Key words:** surface substrate; Bayan County; distribution characteristics

# 中国东北浅覆盖区地质矿产绿色勘查实践与应用研究

陈宇<sup>1,2</sup>, 杨华本<sup>1,2,3\*</sup>, 籍哲羽<sup>1,2</sup>, 鹿传磊<sup>1,2</sup>, 宰俊文<sup>1,2</sup>, 刘占辉<sup>1,2</sup>, 闫永生<sup>1,2</sup>

(1. 中国地质调查局哈尔滨自然资源综合调查中心, 哈尔滨 150086;  
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 150086;  
3. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100091)

**摘要:**随着国家和社会对环境保护的日益重视,在新一轮找矿突破战略行动中,绿色勘查已然成为其中关键的构成部分。随着技术的不断进步,越来越多的绿色勘查与找矿技术相继涌现,并得到了极为广泛的应用。东北森林沼泽浅覆盖区独具特色,其覆盖层相对较薄,分布面积广袤,主要以物理风化作用为主,其土壤运移幅度较小。为较好地解决地质工作对生态环境的破坏,落实好绿色勘查的技术要求,本文在收集和总结国内外绿色勘查工作的基础上,在中国东北地区,积极推进绿色勘查示范项目的建设工作。从设备选型、场地建设到回填复耕等多个环节,均采取了一系列具有针对性的措施。在施工进程中,创新性地运用了“一基多孔”“以钻代槽”等新型技术,取得了显著的成效。本文着重阐述中国东北在绿色勘查方面的研究探索历程以及实践的最新进展,深入剖析绿色勘查技术的发展趋势,致力于构建和谐的地质勘查环境,从而达成地质找矿与环境保护的双重目标,实现双赢局面。

**关键词:**绿色勘查;浅覆盖区;中国东北;环境保护

中图分类号:P624

文献标志码:A

文章编号:1672-2736(2025)09-0046-9

## 0 引言

当下,环境保护与可持续发展已然成为备受瞩目的重要议题,在资源开发领域表现的尤为突出,地质矿产勘查便是其中之一。随着东北地区资源开发活动的日益频繁,以往所采用的矿产勘查方法,大多对环境造成了破坏,引发了生态扰动。在此情形下,为了妥善协调经济发展与生态环境保护二者间的关系,切实落实绿色勘查找矿工作无疑是当务之急。采用绿色勘查技术,能够有效抑制矿产勘查过程中对生态环境造成的污染与破坏,进而构建起可持续发展的高质量模式,这对于完善东北地区的绿色勘查管理制度而言,具有重要的指导意义。

## 1 绿色勘查

绿色勘查,一种秉承绿色发展理念的勘查方法。核心要义在于构建可持续发展的科学理念与技术体系,通过科学管理和高技术手段,优化勘查过程中的环境影响,最大限度地降低对环境的干扰,并在受损区域实现修复或补偿。绿色勘查不仅要求在找矿过程中减少对环境的负面影响,更注重优先保护环境资源,合理利用空间和设备,避免过度占用和不必要的资源投入<sup>[1]</sup>。通过这种系统化的规划与管理,绿色勘查既保障了资源的可持续性,又维护了生态环境的和谐稳定。

### 1.1 国外绿色勘查现状

在众多国外矿业大国中,绿色勘查的实施起步较早。澳大利亚通过《环境和生物多样性保

基金项目:中国地质调查局地质调查项目(DD20230395)。

护法》(EPBC),要求所有可能造成重大环境污染的项目必须进行环境评估并审批;加拿大发布《勘探工程卓越手册》(EES 手册),后续版本提供了环境管理的标准和指导;美国要求在开发过程中需提交涵盖“三废”处理、土地表层破坏等多方面的环境影响评估报告,并严格要求进入生态保护区。绿色勘查技术发展的早期阶段注重减低工程损毁,且采用简单的技术和经验方法进行资源调查。20世纪90年代以来,引入三维地球物理反演、高精度遥感等先进技术;现代技术还包括多因素评估和可持续管理方法。这一系列的努力旨在实现生态保护、矿山勘查开发、地方经济协同发展的共赢局面<sup>[2-4]</sup>。

## 1.2 中国东北地区绿色勘查现状

2017年,自然资源部颁布了《关于加快建设绿色矿山的实施意见》(国土资规〔2017〕4号)。随后,2018年9月,该机构又发布了《绿色勘查指南》(T/CMAS001—2018)。2005年,黑龙江省国土资源厅下发了关于印发《黑龙江省矿山地质环境勘查评价技术要求(试行)》的通知<sup>[5]</sup>。国家政策大力支持绿色勘查的发展,并通过制定相关标准和指南,推动其制度化、规范化,随后中国东北各地地质勘查单位积极响应国家政策,编制绿色勘查规划,推动绿色勘查的实施。

东北森林沼泽浅覆盖区其覆盖层相对较薄,分布面积广袤,主要以物理风化作用为主,其土壤运移幅度较小。中国东北浅覆盖区的绿色勘查技术在近年来取得了显著进展,特别是在环境保护和资源高效利用方面。比如中国地质科学院国家地质实验测试中心研发的野外流动实验室结合,形成了“浅钻-测试”快速勘查技术<sup>[6]</sup>。黑龙江省地质矿产局所研发的技术,即“钢索取心钻机”以及能够替代槽探的“绿色新工法”<sup>[7]</sup>。此项技术不仅可在林区地质找矿工作中有效保护生态环境,同时也确保了勘查质量并提升了找矿成果,标志着绿色勘查技术的重大突破。协同使用物、化探信息,分层次有针对性地选用参数,实现采样单元逐级分类,并应用于浅覆盖区地质体识别中,能提高识别精确度,为这类地区的地

质填图提供丰富的信息<sup>[8]</sup>。通过运用人工智能与机器学习技术,成功研发出智能勘探技术,该技术能够对地质信息进行精确剖析,精准预判矿产分布情况,进而有效减少开发活动对生态环境造成的外部干扰。

## 1.3 地质勘查对中国东北地区生态环境的影响

地质勘查在中国东北地区的生态环境上,主要以两种形式产生影响:

(1) 地质勘探作业中,地表植被常因槽探、钻探等施工活动而受损。特别是在生态脆弱地带,此类破坏可能导致水土侵蚀问题,并且损害第四系内部的水循环系统。此外,物资搬运以及林区、草地等地道路的修筑,同样会对地表植被产生影响。

(2) 在钻探作业过程中,所产生的废水和废浆未经处理排放,直接威胁地表及地下生态系统。例如,丙烯酸及其派生物、油田作业用的冲洗液等化工产品,若未能充分落实的监管措施,便有可能对周边的植被、土壤、地下水等带来严重的负面影响。

## 2 绿色勘查示范工作区基本情况

阿陵河勘查区归黑龙江省黑河市爱辉区与嫩江县管辖。主要工作区在阿陵河矿区,隶属黑河市锦河农场十六队。海拔高度最高390.6m,最低332.7m,相对高差最大58m。区内发育水系阿陵河及其支流,阿陵河为黑龙江一级支流,全长62km,河谷蜿蜒曲折,多呈不对称箱形谷,谷底平坦,沼泽化程度较高。工作区属寒温带大陆性季风气候,春季气温不稳定,干旱多风,夏季温热多雨,秋季凉爽舒适,冬季严寒、漫长而干燥,冬长夏短,四季分明。区内有自然次生林和人工林,树种包括落叶松、樟子松、桦树、柞树等等。地处爱辉阿尔山褶皱东北端、新开岭背斜南翼、公别拉河中生代断陷盆地北缘,出露中生界白垩系和新生界第四系,下白垩统龙江组和光华组大面积出露,岩石局部蚀变明显,有硅化、绿泥石化等。

蛟河勘查区位于吉林省中部,隶属吉林省蛟

河市管辖。工作区位于长白山西麓,中部松花湖两岸为盆地,两侧为低山丘陵区,山地地形起伏较大,平均海拔 600m 以上,少数山峰高达 1km 以上;中部盆地地势较为平缓,平均海拔约 300m。本区属亚温带大陆性季风气候,年平均气温 3.4℃,降水量 708.8mm,无霜期 120~130 天。冬季漫长寒冷,夏季短暂炎热,春季多风,秋季多雨。区内蛟河、拉法河、松花湖两岸农田面积较大,周边山岭绵延,森林密布,灌木丛生,植被发育。主要树种有红松、赤松(樟子松或油松)、云杉、冷杉(沙松)、落叶松、黄菠萝、水曲柳、椴树、榆树、桦树及杨柳等 47 种。区域内与成矿关系比较密切的地层自元古代至新生代均有出露,主要有中元古界色洛河群,新元古界西保安岩组、青龙村岩群。区内金属矿主要有镍、铜、铁、钨、铅等,非金属矿主要有蓝晶石、煤、油页岩等。

得耳布尔勘查区地处内蒙古自治区东北部,在行政区划上隶属于呼伦贝尔市。工作区位于大兴安岭北段西坡,海拔高度一般为 600~800m,属中低山区,总体地势西高东低。河流有额尔古纳河、哈乌尔河。工作区为中纬度内陆地区,属中寒带内陆季风性气候,寒暑变化大,昼夜温差大,冬季严寒多雪,多西北风,无霜期短,最低温度 -44℃。该区具有特殊的地质地貌、气候、植被特征,森林覆盖率 91.3%。地区岩性主要包括流纹岩和酸性火山岩,动植物资源十分丰富,铅、锌、铜、铁、金、大理石等矿产资源较为富集。

大杨树勘查区位于内蒙古鄂伦春自治旗宜里镇,西接大兴安岭山脉,东依松嫩平原,为大小兴安岭与松嫩平原结合部,宜里镇境内河道属嫩江流域,主要河流有诺敏河、奎勒河、卧罗河 3 条,最大河流为诺敏河。该区域森林覆盖率达 50.24%,林木种类中柞树占主导地位,桦树和松树的数量相对较少。工作区域位于兴蒙造山系大兴安岭弧盆系的扎兰屯-多宝山岛弧范围之内,是在大陆边缘岛弧增生时期所形成的地质产物。主要发育岛弧型火山-沉积建造,花岗闪长

岩等岩浆建造,是大兴安岭中段北东向华力西期、燕山期铁、钨、银、金、钼、铜成矿带的一部分,北东向区域深大断裂带控制了包括工作区在内的地质体及矿产的展布,矿产资源十分丰富。

丹东勘查区坐落于辽宁海城市以及辽宁宽甸满族自治县。宽甸县处于辽东山地丘陵区域,属暖温带湿润区大陆性季风气候,地势呈西北高、东南低的阶梯状态势分布。海城市位于辽河下游左岸、辽东半岛北端,其境内地貌类型丰富多样,涵盖山地、丘陵、平原以及洼地,地势呈现东南高、西北低的特征,从东往南再向西北方向倾斜。在工作区的土地资源分布中,林地与耕地占据了主要地位。该区域处于东北(含长白山)与华北两大植物区系的交汇带,植物物种呈现出独特的过渡性分布特征:共发现维管束植物 1000 余种,其中木本植物 200 余种,另有 13 种被列为国家重点保护植物。目前,工作区共探明各类矿产 66 种,其中,菱镁矿品质优良、埋藏较浅,在全世界范围内具有显著竞争优势。除菱镁矿外,硼、滑石等矿产资源在全国范围内亦具有竞争优势。

## 2.1 山地工程实施规划及控制措施

在阿陵河、蛟河、得耳布尔及丹东勘查区项目中,核心任务是进行机械岩心钻探作业。这一过程涉及重型山地工程,在作业期间,地表植被的破坏难以避免。此外,施工过程中产生的“三废”物质也容易对周围环境造成污染。这些污染问题在一定程度上加剧了生态破坏,给资源环境保护工作带来了巨大的挑战。为了有效缓解施工对生态环境造成的影响,研究实施过程中严格按照绿色勘查的技术准则,在设备选型、场地建设、回填复耕等各个环节都采取了一系列有效措施,并取得了显著成效。

(1)运用“一基多孔”“以钻代槽”这类探矿方式,最大程度对生态环境的影响降到最低。在得尔布尔勘查区推行“一基多孔”施工技术,于同一机台上按照不同倾向设置两个钻孔,以此勘测矿体深部状况,不仅大幅减少了机台建设数量和搬迁频次,降低了道路修筑的工作量与成本,

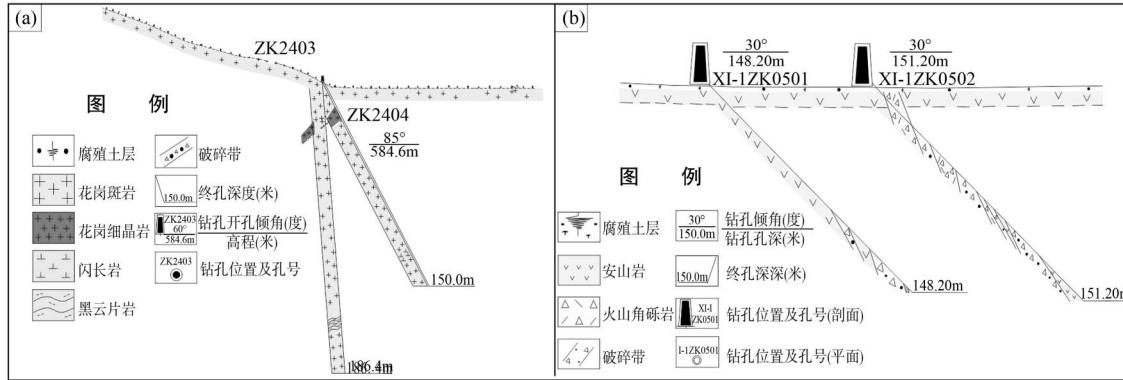


图 1 一基多孔(a)和以钻代槽(b)

还显著提升了作业效率。这种技术的采用使得钻探施工对周边环境的干扰降至最低;“以钻代槽”技术的运用,即用类似“微创手术”的钻探来代替传统“开膛破肚”似的槽探,该方法能够极大程度减少对地表的开挖破坏,因其占地面积较小,所以对环境的影响也极小,并且几乎不会引发地质灾害,也不存在安全隐患。它有效降低了槽探施工对植被和土壤的破坏,切实实现了绿色勘查,在安全性与环境影响方面的对比十分显著(图 1)。2024 年,阿陵河勘查区采取探索孔→追索孔→验证孔逐步推进的部署方式,在 1-1 号矿体施工中,共完成了 3 个钻孔,累计进尺 424.7m。这种循序渐进行程设计不仅提高了作业效率,还精确控制了矿体浅表的品位厚度情况和矿化蚀变特征,最大限度减少了对林地的破坏。这一系列措施不仅降低了成本,还取得了显著的社会效益,充分展示了绿色勘查在提高作业效率方面的独特优势与重要意义。通过以上技术手段的应用,成功实现了高效、安全、环保的绿色勘查目标,在资源勘探领域树立了良好的行业标杆。

(2) 在地质勘查施工领域,技术与设备的革新对工程推进及环境保护意义重大。过去,传统钻机如立轴式钻机和全液压钻机虽在一定时期发挥了重要作用,但其对环境破坏较大、场地恢复难度高的问题仍然存在。特别是在施工区位于果树林及板栗树林的情况下,进场难度高且破坏面积大,给地质勘查施工带来了诸多不便。为了应对这一挑战,研究过程中引入了模块化钻机

EP1000 和 TGQ-1000 作为新的解决方案。通过对便携式钻机与传统钻机的综合性能分析对比,模块化钻机在绿色勘查方面展现出明显优势:环境友好型设计显著减少了对植被的破坏,设备占用面积小,部署灵活,特别适合位于林区的施工场景;同时,模块化结构降低了设备的运输和存储成本,提高了工作效率。这不仅解决了传统钻机在环境问题上的局限性,也为地质勘查提供了更高效、更环保的选择。

模块化钻机的优势具体体现在以下几个方面:

①占地面积极相对较小:模块化钻机的占地面积明显缩小,在设备迁移时,仅需 4×4m 的小区域即可完成操作,无需为搬运设备修建专门的道路,仅需 1m 宽的小路即可满足迁移需求(图 2a-b)。这大大降低了对施工场地周边环境的影响。

②设备迁移操作灵活:模块化钻机在设备迁移操作的复杂度上展现了显著优势。相较于传统钻机,在进行设备搬迁作业时,模块化钻机能够大幅度降低操作人员所承受的劳动强度,从而有效提升施工效率。

③钻进效率高:在辽宁丹东勘查区开展的施工任务中,模块化钻机在不同工作区均展现出高效的钻进能力。例如,在海城工作区的 5 孔施工中,其中第一个钻孔因孔内破碎需反复扩孔,影响了钻进效率,但其余工作区的钻孔均达到每台钻机月均钻进效率突破 1000m 的要求(图 2c-d)。这一优势使其在绿色勘查施工中具有广阔



图 2 便携式模块化钻机(a-b)和机台建设(c-d)

的应用前景。

此次引入的模块化钻机 EP1000 和 TGQ-1000 型钻机,凭借其卓越的技术优势,为地质勘查施工带来了新的解决方案。通过优化设计和创新工艺,在减少环境影响的同时提升了工程推进效率,标志着绿色地质勘查技术的重要进步。未来,随着这种新型装备的推广使用,地质勘查施工将更加注重环境保护与技术创新,推动可持续发展。

(3) 绿色地质勘查工作需要搭配环保型的冲洗液,以深孔取心钻探冲洗液为主,避免地下水受到污染<sup>[9]</sup>。配方泥浆根据不同地层特性,研制出定量分装的高浓缩配方型泥浆制品,具有优良润滑降阻及流变性,针对复杂地层有防塌护壁、抑制缩径、减少下套管、快速穿越等方面优势,特别适合对泥浆有更高要求的薄壁绳索取心工艺。并且配方泥浆专为绿色勘探,节能减排的钻探工程需求而设计,从原料选购、生产加工、产

品包装到与循环和固化装备的配套应用,尽可能地减少泥浆排放,杜绝包装物的遗留,是真正意义上的绿色环保产品,配方泥浆在施工过程中也取得了较好的效果。

## 2.2 地球物理勘查技术的应用

如今,地球物理勘查技术在绿色勘查中的应用是当前矿业行业关注的重点领域之一,也在矿产绿色勘查中较为常见,技术类型丰富,如电磁、重力、磁力和地震波等参数的变化,这种技术的应用不仅能够有效识别矿体的位置和规模,还能通过参数变化揭示地质体的分布特征,从而为资源开发提供科学依据,极大地减少对环境的破坏<sup>[10,11]</sup>。

在阿陵河勘查区,地球物理勘查技术发挥着重要作用。通过多种地球物理方法(如激电中梯测量、大地电磁测深等),当地的地质构造和含矿异常能够被无损地探测到。这种技术能够

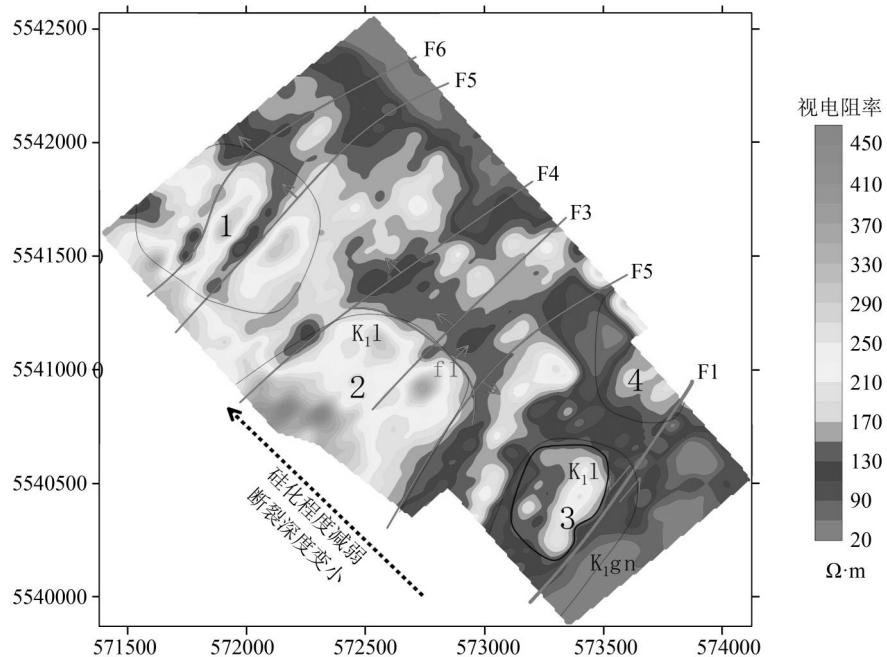


图3 勘查区激电中梯视幅频率等值线及解译图

有效避免对周边土地环境的破坏,同时为矿体的长期稳定开发提供了科学依据。通过这些勘查手段,对区域、控矿构造以及含矿异常的平面特征进行了深入探究,并获取了视幅频率平面图(图3)。

在该地区,地球物理勘查技术的应用体现在以下几个方面:

(1) 矿体研究:通过测量异常,可以初步识别矿体的位置和地质构造特征。阿陵河勘查区的大地电磁测深结果表明可能存在火山岩盆地内部的主要平移断层系统,为后续矿体探析提供科学依据。

(2) 地质构造理解:高密度电法等方法能够揭示地壳中的条带状异常区域,例如光华组流纹岩沿F1南东侧侵入所反映的平面条带状含矿带。这些信息有助于形成复杂的地壳结构图,为后续研究提供支持。

(3) 环境保护:地球物理勘查技术能够识别潜在的地质风险,例如光华组流纹岩的侵入和高密度电法异常区域。在阿陵河区,这种技术的应用不仅有助于保护生态环境,还能减少对周边土地环境的影响。

**实际案例与验证:**通过大地电磁测深结果,可以将该技术应用于实际矿体开发过程中。例如,在阿陵河支流东侧发现的多条金矿体表明高密度电法异常的有效性。这些结果不仅证实了地球物理测深技术的应用,也为绿色勘查的发展提供了科学依据。

综上所述,地球物理技术在绿色勘查中的应用体现了其高效、精准和科学的价值。通过有效识别矿体特征和地质构造,这种技术能够为资源开发提供科学依据,并为环境保护提供重要的支持。随着地球物理技术的不断发展,绿色勘查领域的创新也将不断显现,为矿业行业的可持续发展带来新的机遇。

### 2.3 开展大数据智能找矿实践

随着科技的不断进步,数字化与信息化技术在地质矿产勘查中的应用已成为地质矿产勘查未来的发展方向<sup>[12]</sup>。大数据找矿作为一种新兴手段,在勘探领域正发挥着愈发关键的作用。在东北地区,由于植被覆盖较为茂密,岩石出露程度较低,使得新一轮找矿工作遭遇地质条件复杂、数据量庞大以及勘探风险高等诸多难题。因此,怎样合理借助人工智能与大数据分析技术,

来提升勘探效率、完善资源管理并降低勘探风险,已然成为当下研究的重点议题。

在多宝山-黑河成矿带积极开展大数据智能找矿示范工作。在数据库建立过程中,系统规范了数据的组织形式、属性结构,有效提升了大数据智能找矿预测项目数据本底的可用性,应用相关技术再现多宝山-黑河的三维场景,叠加地物化遥数据,立体展示地质体形态、分布以及与找矿信息的相互关系,并且开发出用于智能找矿预测的辅助软件系统(GEOAI)。该系统具有常见矢量数据读取、属性数据处理、算法模型、模型训练、分析评测和图像处理等五大功能,既能有效对数据的补充、异常值查证、数据量纲变换等进行预处理,又能快速制作直方图、散点图等插图,还能支持机器学习模型的训练、评价、预测、再学习,实现评价结果图形化显示的清晰化、精准化。

通过多宝山-黑河成矿带大数据智能找矿示范,已建立了地质数据实施智能预测的流程。实验结果表明,测试数据准确率高达 98.9%,在多宝山-黑河铜-钼-金-铁-锌成矿亚带先后圈定铜成矿预测区 8 处、金成矿预测区 11 处。大数据智能找矿不仅带来了新的机遇和发展,还能进一步提高找矿精度和效率,优化资源管理,降低勘探风险。大数据找矿带来了新的机遇和发展,尽管存在一些挑战,但通过不断改进技术和培养人才,大数据在找矿领域的应用前景十分广阔,为下步矿产资源的勘探和开发发挥重要作用。

### 3 结论

本文在中国东北浅覆盖区的绿色勘查创新以及环境保护这两方面都收获了颇为显著的效果。其中包括一基多孔技术、以钻代槽技术以及泥浆不落地循环技术。该类技术显著降低了环境扰动与破坏的程度。这些进展,一方面有效提升了勘查的效率与精度,让勘查工作能够达到更好的效果;另一方面,也为生态环境的保护筑牢了坚实的防线,提供了强有力的保障。

(1) 绿色勘查工程中,创新性技术如“一基多孔”与“以钻代槽”作为优先推广对象,通过小角度钻探技术替代传统槽探作业,有效应对复杂性采样需求及地层构造等挑战。传统方法如井探、槽探对生态环境影响较大,而严格环境恢复措施和设备优化能降低生态影响,在进一步完善水平钻探工艺技术和经济标准后,可以在更大范围推广实施,必将极大的推动林区实现地质找矿新突破<sup>[13]</sup>。

(2) 本文通过地球物理勘查技术解决矿产资源定位及环境影响问题,强调其对绿色地质事业的重要推动作用。

(3) 引入先进技术对提高地质勘查效率十分重要。无人机遥感、三维地质建模等技术在复杂地形、恶劣环境和交通不便地区显现出显著优势,提升了勘查工作的高效性、稳定性和安全性。全面推动高新技术与智能探测系统,完成勘探自动化过程与高效运作将成为未来关键发展方向。

### 参考文献(References):

- [1] 杜蔺,曾道国,李阳,等.论固体矿产绿色勘查的重要意义——以新民绿色勘查示范为例[J].西北地质,2021,54(01): 256-268.
- [2] Mahmood M, Orazalin N. Green governance and sustainability reporting in Kazakhstan's oil, gas, and mining sector: Evidence from a former USSR emerging economy[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 164 (10): 389-397.
- [3] Oltremari J. Some Criteria for Evaluation of Resources in a System of Protected Areas in Chile[J]. Environmental Conservation, 1985, 12(02): 173-175.
- [4] 钟晓勇,汪姜超,陈俊彬,等.矿山生态修复植物碳汇效益研究及种植优化策略——以东明绿色矿山综合体为例[J].黑龙江国土资源,2024,22(05): 23-30.
- [5] 于吉增.黑龙江省矿山地质环境勘查评价技术工作要点[J].黑龙江国土资源,2008,5(03): 52.
- [6] 卢猛,樊兴涛,苏兴涛,等.“浅钻-测试”快速勘查技术及野外试验[J].地质装备,2016,17(01): 34-36.

- 
- [7] 秦怀军.“钢索取心钻机和能代替槽探的绿色新工法”问世——我省绿色勘查实现技术新突破[J]. 黑龙江国土资源, 2017, 14(09): 35–35.
  - [8] 赵玉岩, 李兵, 陆继龙, 等. 中国东北浅覆盖区地质填图物化探信息协同辅助技术[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2018, 48(01): 318–333.
  - [9] 张辉. 矿山绿色地质勘查综合技术应用分析[J]. 世界有色金属, 2024, 38(07): 184–186.
  - [10] 刘平, 但家军. 绿色勘查在深部找矿勘查中的应用策略[J]. 世界有色金属, 2023, 37 (23): 136–138.
  - [11] 刘世安, 刘雪颖, 冀华. 地质矿产勘查中绿色勘查技术应用分析[J]. 冶金与材料, 2024, 44(07): 52–54.
  - [12] 李欣. 地质矿产勘查中的数字化与信息化技术应用研究[J]. 中国金属通报, 2024, 31(13): 97–99.
  - [13] 秦怀军.“钢索取心钻机和能代替槽探的绿色新工法”问世——我省绿色勘查实现技术新突破[J]. 黑龙江国土资源, 2017, 14(09): 35.
- 

**作者简介:**

第一作者:陈宇,男,1998年生,内蒙古呼伦贝尔人,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,主要研究方向为区域地质调查与矿产资源调查评价。Email:919592753@qq.com;

通讯作者:杨华本,男,1986年生,广西靖西人,硕士,中国地质调查局哈尔滨自然资源综合调查中心,高级工程师,主要研究方向为区域地质调查与矿产资源调查评价。Email:86863158@qq.com

---

## Study on Green Exploration Practice and Application of Geology and Mineral Resources in Shallow Covered Area of Northeast China

CHEN Yu<sup>1,2</sup>, YANG Huaben<sup>1,2,3\*</sup>, JI Zheyu<sup>1,2</sup>, LU Chuanlei<sup>1,2</sup>, ZAI Junwen<sup>1,2</sup>,  
LIU Zhanhui<sup>1,2</sup>, YAN Yongsheng<sup>1,2</sup>

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

2. Observation and Research Station of Earth Critical Zone in Black Soil, Harbin, Ministry of Natural Resources,  
Harbin 150086, China;

3. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100091, China)

**Abstract:** With the increasing attention of the country and society to environmental protection, green exploration has become a key component in the new round of prospecting breakthrough strategic action. With the continuous progress of technology, more and more green exploration and prospecting technologies have emerged one after another, and have been widely used. The shallow cover area of forest and swamp in Northeast China has its own characteristics. Its cover layer is relatively thin, its distribution area is vast, and its soil displacement is small. In order to better solve the damage of geological work to ecological environment and implement the technical requirements of green exploration, this paper, on the basis of collecting and summarizing the green exploration work at home and abroad, actively promotes the construction of green exploration demonstration projects in Northeast China. From equipment selection, site construction to backfill and rehabilitation, a series of targeted measures have been taken. In the construction process, the innovative use of “one base porous”, “to drill instead of slot” and other new technologies, has achieved remarkable results. This paper focuses on the research and exploration process of green exploration in Northeast China and the latest progress of practice, in-depth analysis of the development trend of green exploration technology, and is committed to building a harmonious geological exploration environment, so as to achieve the dual goals of geological prospecting and environmental protection, and achieve a win-win situation.

**Key words:** green exploration; shallowly covered area; Northeast China; environmental protection.

# 大兴安岭阿里河地区晚二叠世花岗质糜棱岩的发现及地质意义

郑吉林<sup>1,2,3</sup>, 刘军帅<sup>1,2\*</sup>, 姚宇<sup>1,2</sup>, 辛义国<sup>1,2</sup>, 李宇航<sup>1,2</sup>, 胡伟强<sup>1,2</sup>

- (1. 中国地质调查局哈尔滨自然资源综合调查中心, 哈尔滨 150086;  
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 150086;  
3. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083)

**摘要:** 大兴安岭阿里河地区位于兴蒙造山带东段, 前人研究显示该区发育大量中生代花岗岩, 晚古生代花岗岩出露较少。笔者等在阿里河地区进行区域地质调查过程中新发现一套晚二叠世花岗质糜棱岩。通过该花岗岩岩石地球化学和锆石 U-Pb 年代学研究表明: 花岗质糜棱岩属于中钾钙碱性准铝质 I 型花岗岩, 具有 O 型埃达克岩地球化学特征; 具有轻重稀土分馏明显, 重稀土亏损的右倾型配分模式, 富集大离子亲石元素 Rb、Sr 和 Ba, 亏损高场强元素 Nb、Ta、Ti, 指示其源岩具有壳源特征; 锆石 U-Pb 年龄为 253.6±1.1Ma, 侵入时代为晚二叠世, 形成于兴安地块与松嫩地块碰撞造山过程的后碰撞阶段构造背景。

**关键词:** 晚二叠世花岗质糜棱岩; 岩石地球化学; 阿里河地区; 大兴安岭

中图分类号:P535

文献标志码:A

文章编号:1672-2736(2025)09-0055-10

## 0 引言

兴蒙造山带记录了古亚洲洋构造演化过程, 为华北板块和西伯利亚板块碰撞拼合过程提出了重要证据<sup>[1,2]</sup>, 特别是中生代花岗岩分布面积巨大, 这些花岗岩与松辽盆地东部的张广才岭-小兴安岭花岗岩构成中国东部极为壮阔的地质景观—中生代“花岗岩海”<sup>[3,4]</sup>。大兴安岭阿里河地区位于兴蒙造山带东段, 大兴安岭火山喷发带北段, 是额尔古纳地块和兴安地块的结合部(图 1-b), 其构造演化过程与古亚洲洋、蒙古-鄂霍茨克洋闭合密切相关<sup>[5-7]</sup>。前人对大兴安岭地区中生代花岗岩进行了大量的岩石学、年代学、地球化学研究工作<sup>[8-12]</sup>, 得出了一系列有意义的成果。但由于大兴安岭火山岩带面积广阔, 不同期次花岗岩成因也较为复杂, 目前还不能较为系统的对整个大兴安岭地区的花岗岩进行综合对比研究, 需要不断的开展花岗岩成因方面的

调查研究。2019 年, 笔者在大兴安岭北段阿里河地区开展 1:5 万区域地质调查工作时新发现一套晚二叠世花岗质糜棱岩, 前人将其形成时代划归为晚侏罗世, 而已有的研究资料表明区域上主要分布晚侏罗世—早白垩世花岗岩, 二叠纪花岗岩却极为少见。因此, 开展大兴安岭阿里河地区分布的花岗质糜棱岩的年代学、岩石地球化学特征研究, 对大兴安岭北部花岗岩时空格架和区域构造演化具有一定的科学意义。

## 1 区域地质概况

研究区位于大兴安岭火山喷发岩带中北段, 区内地层出露相对较少, 主要为新元古界吉祥沟组( $Pt_3j$ )和上侏罗统玛尼吐组( $J_3mn$ ); 区内岩浆活动强烈, 岩石类型以中深成的中酸性花岗质岩体为主, 呈岩基、岩珠状产出, 岩体主要受北东、北西和东西向构造控制, 出露面积约 394km<sup>2</sup>(图 1-a); 断裂构造以北西和北东向为主, 近东

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(DD2016007807)。

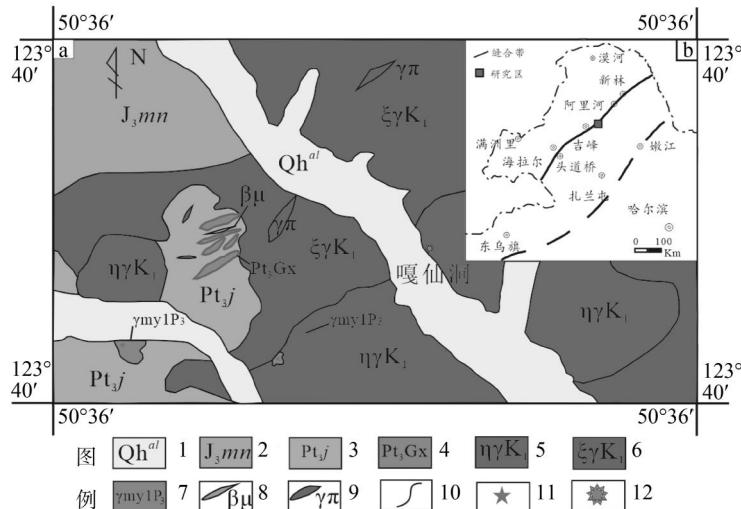


图 1 阿里河地区地质简图(据文献[13]修改)

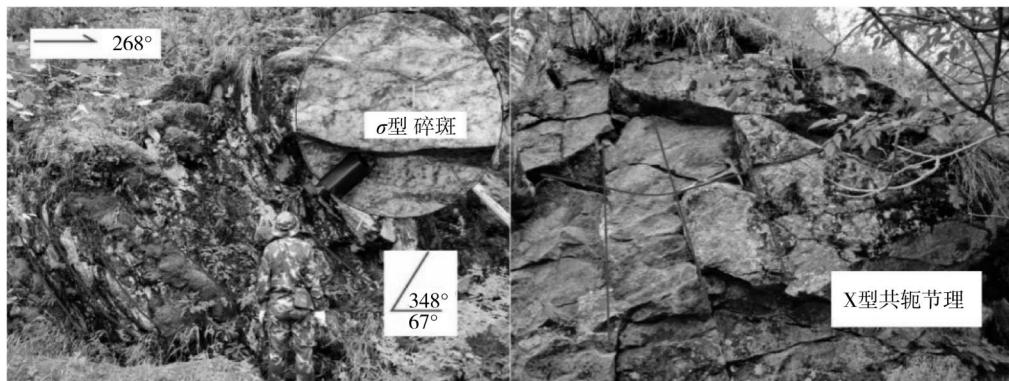


图 2 晚二叠世花岗质糜棱岩野外照片

西向和近南北向次之，区内发育三条韧性剪切带，均呈北东向展布。

## 2 样品采集及分析测试方法

### 2.1 样品采集

本文样品采自于阿里河镇西部嘎仙洞一带，野外露头呈岩珠状产出，共划分两个侵入体，分别位于嘎仙沟西南侧、微波路西侧，出露面积为 $0.41\text{ km}^2$ ，岩体侵入吉祥沟组变质砂岩或被早白垩世二长花岗岩包裹，叠加后期北东向韧性剪切构造。糜棱面理的产状为 $348^\circ \angle 67^\circ$ ，露头尺度可见花岗岩碎块和韧性剪切作用有关的“ $\sigma$ ”型碎斑，碎块呈透镜状、眼球状构造（图 2）。显微

尺度上可见“ $\delta$ ”型碎斑，指示其具有右行韧性剪切变形特征。

### 2.2 分析测试方法

本文测试样品主量、微量元素测试在河北省区域地质矿产调查研究所实验室完成。主量元素采用熔片法 X-射线荧光光谱法测定，误差优于 $2\% \sim 3\%$ 。稀土和微量元素首先用 Teflon 熔样罐进行熔样，采用 Finnigan MAT 公司生产的双聚焦高分辨等离子体质谱仪 ICP-MS 进行测定，测定误差优于 $10\%$ 。锆石测年样品在河北区域地质调查所采用常规方法进行锆石分选，并完成制靶、透射光、反射光及阴极发光图像采集。锆石 U-Pb 同位素测试分析在中国地质调查局天

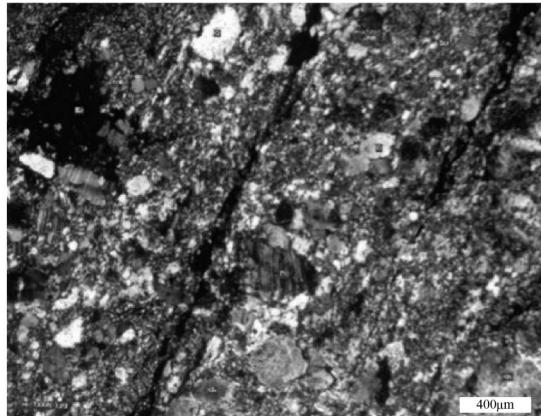


图 3 花岗质糜棱岩显微镜下眼球状构造(+)

津地质调查中心实验室完成。主要采用激光剥蚀法进行操作,激光斑束直径为 35μm,频率为 8~10Hz,能量密度为 13~14/cm<sup>2</sup>,采用 TEMORA 为外部锆石年龄标准。利用 NIST610 玻璃标样作为外标计算锆石样品的 Pb、U、Th 含量。样品信号采集时间 60s,采用 ICP-MS DataCal 和 Isoplot 程序进行数据处理,详细数据处理方法参考文献<sup>[14]</sup>。

### 3 岩石学及地球化学特征

#### 3.1 岩石学特征

花岗质糜棱岩:风化面灰褐色,新鲜面浅绿灰色,糜棱结构,碎斑结构,条带状构造。碎块:为花岗岩,其成分由斜长石、钾长石和石英等矿物组成,呈透镜状,眼球状(图 3),裂纹较为发育,均被微晶石英集合体充填,大小为 1.0~3.0mm,含量为 3%±。碎斑:为斜长石、钾长石、石英和少量暗色矿物等,沿长轴略显定向分布。其中,斜长石可见书斜式构造,粒径为 0.2~2.5mm,含量为 20%±;钾长石粒径为 0.2~1.5mm,含量为 12%±;石英呈无色透明,粒径为 0.1~0.6mm,含量为 5%±;暗色矿物均被绿帘石集合体替代,粒径为 0.3~0.5mm。基质:具显微粒状变晶结构,矿物成分由微晶长英质,少部分显微粒状绿帘石和少量鳞片状绢云母等组成,粒径均<0.1mm。其中,绿帘石粒状集合体呈条带状分布或充填后期岩石裂隙;多晶石英集合体呈

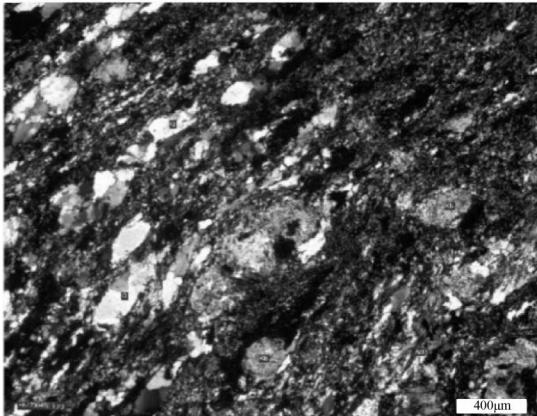


图 4 花岗质糜棱岩显微镜下多晶石英集合体(+)

丝带状围绕上述碎块、碎斑而定向分布,形成条带状构造(图 4),含量为 60%±。副矿物:为微量磷灰石、磁铁矿、锆石等。

#### 3.2 地球化学特征

样品主量、稀土及微量元素分析结果见表 1。岩石样品普遍遭受不同程度糜棱岩化,经去挥发分重新换算后对样品进行 TAS 图解投图,样品均投入碱性花岗岩区域(图 5)。 $\text{SiO}_2$  含量 68.24~68.54%,里特曼指数  $\sigma = 2.89 \sim 3.24$ ,属于钙碱性系列, $\text{K}_2\text{O}$  含量 2.52~2.84%, $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} = 2.18 \sim 2.41$ ,具有低  $\text{MgO}$  (0.62~0.66%) 和低  $\text{TiO}_2$  (0.41~0.44%) 的特点,  $\text{Mg}^+$  较低 (40.89~43.70)。在  $\text{SiO}_2-\text{K}_2\text{O}$  图中投入中钾钙碱性系列岩石区域(图 6),铝饱和指数  $A/\text{CNK} = 0.92 \sim 1.01$ ,属准铝质岩石(图 7)。

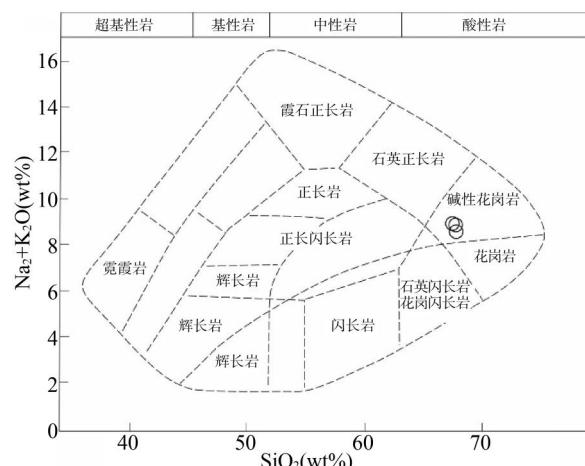
图 5 花岗质糜棱岩  $\text{SiO}_2-(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$  图

表 1 晚二叠世花岗质糜棱岩( $\gamma$ mylP<sub>3</sub>)岩石化学特征表(主量元素%,微量元素 $10^{-6}$ )

样品号	WJE068	WJE072	WJE073	样品号	WJE068	WJE072	WJE073
镜下定名	花岗质 糜棱岩	花岗质 糜棱岩	花岗质 糜棱岩	镜下定名	花岗质 糜棱岩	花岗质 糜棱岩	花岗质 糜棱岩
主量元素(wt%)							
SiO <sub>2</sub>	68.54	68.24	68.48	Sr	1196	903	1219
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16.15	16.74	16.46	Zr	152	135	140
TiO <sub>2</sub>	0.41	0.44	0.41	Nb	9.99	8.48	8.73
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.31	0.99	1.15	Mo	0.22	0.35	0.77
FeO	0.45	0.64	0.46	Cs	1.02	1.51	1.24
CaO	2.68	1.82	2.35	Ba	1294	1224	1415
MgO	0.62	0.66	0.62	Hf	4.44	3.21	3.67
K <sub>2</sub> O	2.52	2.84	2.69	Ta	0.54	0.51	0.56
Na <sub>2</sub> O	6.07	6.20	6.20	W	4.53	5.63	5.20
MnO	0.039	0.040	0.035	Pb	7.41	10.8	7.94
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.16	0.16	0.16	Bi	0.09	0.11	0.12
H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>	0.42	0.65	0.44	Th	5.27	3.27	4.60
H <sub>2</sub> O <sup>-</sup>	0.21	0.26	0.18	U	1.18	1.00	1.24
灼失量	0.76	0.94	0.68	Ag	0.023	0.023	0.023
总和	99.71	99.72	99.69	Sn	1.26	1.71	1.61
Mg <sup>#</sup>	40.89	43.70	42.70	B	3.30	5.26	5.31
A/CNK	0.92	1.01	0.95	F	354	272	365
A/NK	1.27	1.26	1.25	Y	5.66	4.69	6.12
FeO <sup>T</sup>	1.63	1.53	1.50	La	26.7	27.7	32.2
K <sub>2</sub> O+Na <sub>2</sub> O	8.59	9.05	8.89	Ce	44.3	53.1	54.2
$\sigma$ -Rittmann	2.89	3.24	3.10	Pr	5.05	6.18	5.96
Na <sub>2</sub> O/K <sub>2</sub> O	2.41	2.18	2.30	Nd	17.6	22.5	21.7
微量元素( $10^{-6}$ )							
Sm	2.68	3.21	3.06	Eu	0.99	0.95	1.11
Li	7.54	7.68	7.86	Gd	2.12	2.59	2.64
Be	1.57	1.70	1.77	Tb	0.26	0.27	0.31
Sc	2.67	2.54	2.01	Dy	1.29	1.09	1.34
V	32.1	26.0	30.6	Ho	0.23	0.17	0.22
Cr	29.3	24.5	11.1	Er	0.72	0.49	0.63
Co	2.70	2.52	2.48	Tm	0.12	0.07	0.10
Ni	15.1	15.4	5.33	Yb	0.83	0.49	0.64
Cu	7.02	13.8	9.05	Lu	0.11	0.07	0.10
Zn	25.4	30.9	61.2	$\delta$ Eu	1.23	0.98	1.17
Ga	19.6	16.7	17.8	La <sub>N</sub> /Yb <sub>N</sub>	21.76	37.99	34.04
Rb	50.2	61.6	59.6				

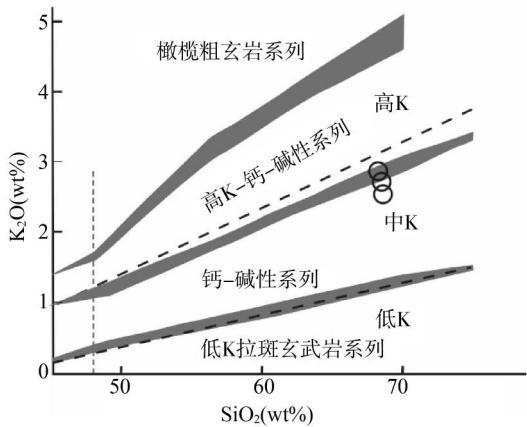
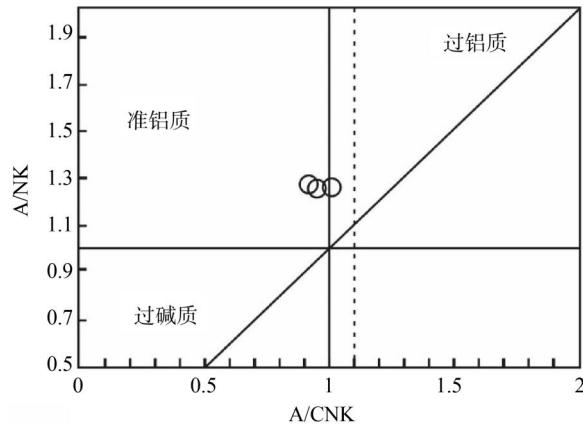
图 6 花岗质麻棱岩  $\text{SiO}_2\text{-K}_2\text{O}$  图

图 7 花岗质麻棱岩 A/CNK-A/NK 图

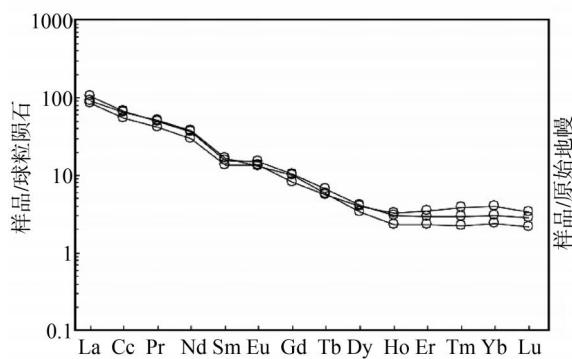


图 8 花岗质麻棱岩稀土元素球粒陨石标准化配分图

**稀土元素特征:** 花岗质麻棱岩稀土总量  $\Sigma \text{REE} = 108.57 \times 10^{-6} \sim 130.36 \times 10^{-6}$ ,  $\text{La}_N/\text{Yb}_N$  比值介于 21.76~37.99 之间, 轻重稀土分馏明显。在球粒陨石标准化的稀土元素配分曲线图中元素呈轻稀土富集, 重稀土亏损的右倾型配分模式(图 8)。铕元素具有轻微正异常特征 ( $\delta \text{Eu} = 0.98 \sim 1.23$ ), 表明岩浆源区可能有微量的斜长石残留。微量元素特征: 花岗质麻棱岩 Sr 和 Ba 含量较高, 分别为  $903 \times 10^{-6} \sim 1219 \times 10^{-6}$  和  $1224 \times 10^{-6} \sim 1415 \times 10^{-6}$ , 重稀土含量低, 低 Y、Yb 含量 ( $4.69 \times 10^{-6} \sim 6.12 \times 10^{-6}$ 、 $0.49 \times 10^{-6} \sim 0.83 \times 10^{-6}$ ), 可能暗示石榴石为残留相。样品具有极高的 Sr/Y 比值 (192.28~211.37), 较高 Zr/Hf (34.31~42.09) 值, 在原始地幔标准化的微量元素蛛网图上, 岩石富集大离子亲石元素 Rb、Sr 和 Ba, 亏损高场强元素 Nb、Ta、Ti(图 9), 指示其源岩具有壳源特征。

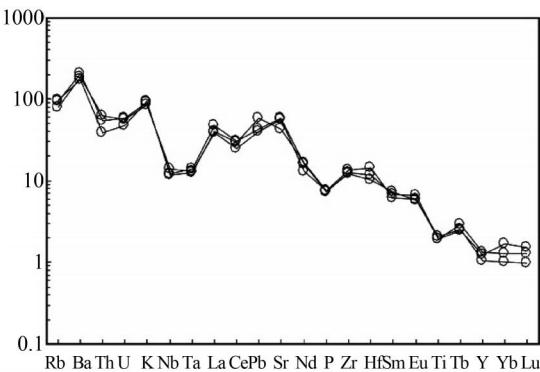


图 9 花岗质麻棱岩微量元素蜘蛛图

## 4 形成时代及构造环境

### 4.1 形成时代

测试样品锆石 U-Pb 同位素年龄测定结果见表 2。样品坐标:  $50^{\circ}36'48''\text{N}, 123^{\circ}31'15''\text{E}$ , 岩性为花岗质麻棱岩。样品显微镜下锆石为无色透明, 多呈短柱状、浑圆状, 少数呈长柱状, 长宽比约为 2:1~1:1, 在阴极发光图像上普遍发育震荡环带(图 10), Th/U 比值为 0.43~1.13, 表明岩浆成因。该样品共分析了 24 个测点, 除 7 号测点 U、Pb 含量过低, 为无效数据外, 其余 23 个测点都落在谐和线上及其附近区域, 加权平均年龄值为  $253.6 \pm 1.1 \text{ Ma}$  ( $\text{MSWD} = 0.6$ ) (图 11), 代表岩石形成年龄, 时代为晚二叠世。

### 4.2 构造环境

花岗质麻棱岩地球化学特征具有准铝质岩

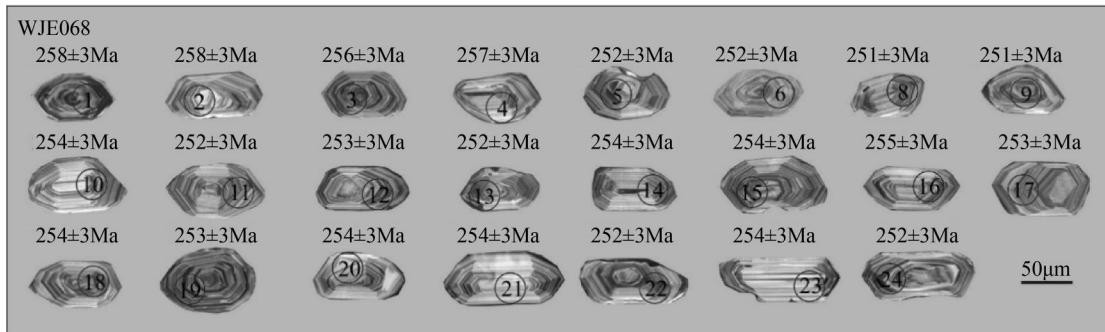


图 10 花岗质糜棱岩锆石 CL 图

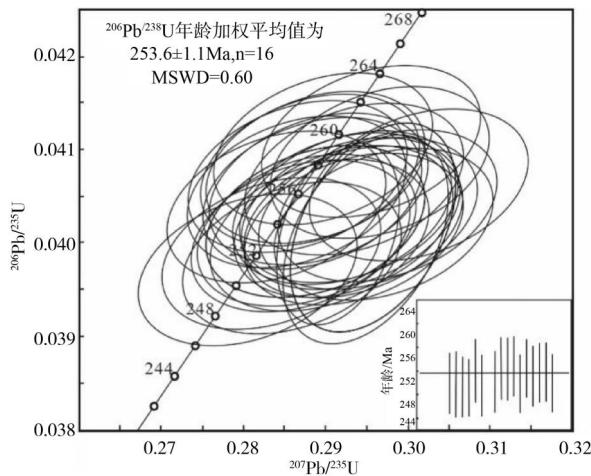


图 11 花岗质糜棱岩锆石 U-Pb 测年谐和图

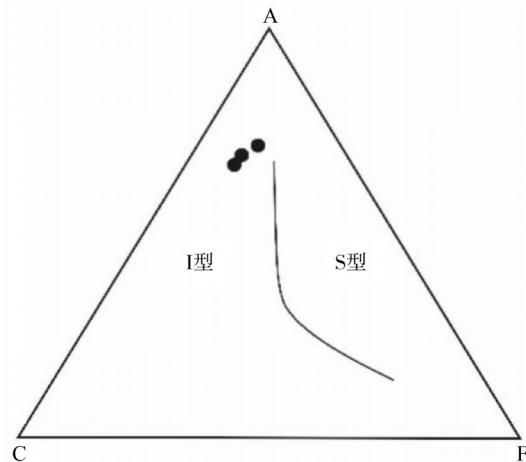


图 12 花岗质糜棱岩 A-C-F 判别图解

石特征，在  $\text{SiO}_2\text{-K}_2\text{O}$  图上显示中钾钙碱性系列（图 6），轻稀土富集，无明显铕异常现象，指示其为 I 型花岗岩，在花岗岩 A-C-F 判别图解中样品落入 I 型花岗岩区（图 12）。另外，样品岩相学上也未见 S 型花岗岩特征矿物堇青石、白云母等富铝矿物以及指示 A 型花岗岩的碱性暗色矿物。

花岗质糜棱样品具高 Sr 低 Y、Yb 的特征， $\text{Sr}/\text{Y} > 40$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3 > 15\%$ , 无负 Eu 异常的地球化学特征指示其可能为埃达克质岩石（图 13C）。张旗等最早提出的 C 型和 O 型埃达克岩的分类方案，主要是依据钾质和钠质进行分类，其中， $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} > 2$  为钠质 O 型埃达克岩<sup>[15-18]</sup>（图 13A）。在  $\text{SiO}_2\text{-Mg}^\#$  图上样品也与阿留申型埃达克岩相吻合（图 13B）。Eu 显示轻微正异常，指示源区可能无斜长石，且极低的 Yb 含量 ( $0.49 \times 10^{-6} \sim 0.83 \times 10^{-6}$ ) 指示源区可能有石榴石残留，

在  $\text{SiO}_2\text{-MgO}$  图上，具有下地壳熔融的埃达克岩特征（图 13D）。

花岗质糜棱岩样品在  $\text{R}_1\text{-R}_2$  构造关系图解中全部投入到造山晚期（图 14），而在微量元素  $\text{Rb}\text{-}(\text{Yb}+\text{Nb})$  构造判别图解上，则全部落在火山弧花岗岩区（图 15），微量元素  $\text{A/CNK} \approx 1.1\text{-}1$  之间，也指示其构造环境一般为火山弧花岗岩。综合表明，阿里河地区花岗质糜棱岩可能形成于板块主碰撞之后的陆内碰撞环境。综合研究表明，额尔古纳地块与兴安地块于 480Ma 前已完成拼合<sup>[19]</sup>，而在松嫩地块与兴安地块的接合部有大量的 291.5 ~ 351Ma 之间的花岗岩分布，这也充分说明两个地块的拼合时间应发生在晚古生代末期<sup>[20,21]</sup>。前人对研究区西南部诺敏地区二叠纪花岗岩研究认为，该区花岗岩形成于 252 ~ 292Ma 之间，其构造背景与兴安地块、松嫩地块碰撞有关<sup>[22]</sup>。空间上阿里河地区位于兴安

表2 晚二叠世花岗质糜棱岩( $\gamma$ mylP<sub>3</sub>)LA-ICP-MS锆石U-Pb同位素地质年龄测定结果表

样品号	含量 ( $\times 10^{-6}$ )										同位素比值						年龄(Ma)			
	Pb	U	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 $\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 $\sigma$	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	1 $\sigma$	$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$	1 $\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 $\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 $\sigma$						
WJE068																				
1	25	496	0.0408	0.0004	0.2921	0.0045	0.0140	0.0002	1.0427	0.010	258	3	260	4						
2	9	194	0.0409	0.0004	0.2894	0.0056	0.0117	0.0001	1.1309	0.024	258	3	258	5						
3	17	371	0.0406	0.0004	0.2895	0.0042	0.0118	0.0001	0.9567	0.005	256	3	258	4						
4	8	174	0.0406	0.0004	0.2941	0.0060	0.0114	0.0001	0.7698	0.005	257	3	262	5						
5	12	280	0.0398	0.0004	0.2879	0.0049	0.0108	0.0001	0.7820	0.006	252	3	257	4						
6	8	182	0.0398	0.0004	0.2890	0.0062	0.0120	0.0001	0.8000	0.012	252	3	258	6						
7	15	323	0.0398	0.0004	0.2938	0.0049	0.0112	0.0001	0.9845	0.013	251	3	262	4						
8	15	334	0.0397	0.0004	0.2919	0.0045	0.0110	0.0001	0.8854	0.011	251	3	260	4						
9	7	159	0.0402	0.0004	0.2947	0.0068	0.0119	0.0001	0.6214	0.006	254	3	262	6						
10	11	248	0.0398	0.0004	0.2905	0.0052	0.0122	0.0001	0.8277	0.009	252	3	259	5						
11	11	263	0.0401	0.0004	0.2897	0.0054	0.0115	0.0001	0.6388	0.008	253	3	258	5						
12	11	257	0.0399	0.0004	0.2918	0.0048	0.0125	0.0001	0.6948	0.009	252	3	260	4						
13	10	217	0.0403	0.0004	0.2895	0.0051	0.0115	0.0001	0.7369	0.010	254	3	258	5						
14	9	202	0.0402	0.0004	0.2892	0.0055	0.0128	0.0001	0.4829	0.003	254	3	258	5						
15	6	136	0.0403	0.0004	0.2904	0.0070	0.0117	0.0001	0.4324	0.007	255	3	259	6						
16	12	258	0.0398	0.0004	0.2892	0.0044	0.0119	0.0001	0.8531	0.007	252	3	258	4						
17	10	226	0.0403	0.0004	0.2891	0.0063	0.0103	0.0001	0.7051	0.003	254	3	258	6						
18	18	391	0.0400	0.0004	0.2907	0.0044	0.0121	0.0001	0.7827	0.011	253	3	259	4						
19	8	189	0.0401	0.0004	0.2918	0.0053	0.0115	0.0001	0.5467	0.010	254	3	260	5						
20	5	126	0.0402	0.0004	0.2896	0.0083	0.0104	0.0001	0.6424	0.006	254	3	258	7						
21	12	274	0.0399	0.0004	0.2891	0.0056	0.0097	0.0000	0.8105	0.011	252	2	258	5						
22	7	165	0.0402	0.0004	0.2928	0.0057	0.0109	0.0001	0.6137	0.003	254	3	261	5						
23	11	267	0.0399	0.0004	0.2894	0.0093	0.0087	0.0001	0.8199	0.002	252	2	258	8						

地块北部边缘,笔者等新发现的该地区花岗质糜棱岩形成时代为253.6 Ma,综合分析兴安与松嫩地块的拼合时间以及研究区的位置距离,说明阿里河地区的花岗岩可能是由兴安地块与松嫩地块碰撞造山过程的后碰撞阶段经加厚的下地壳物质部分熔融而形成。

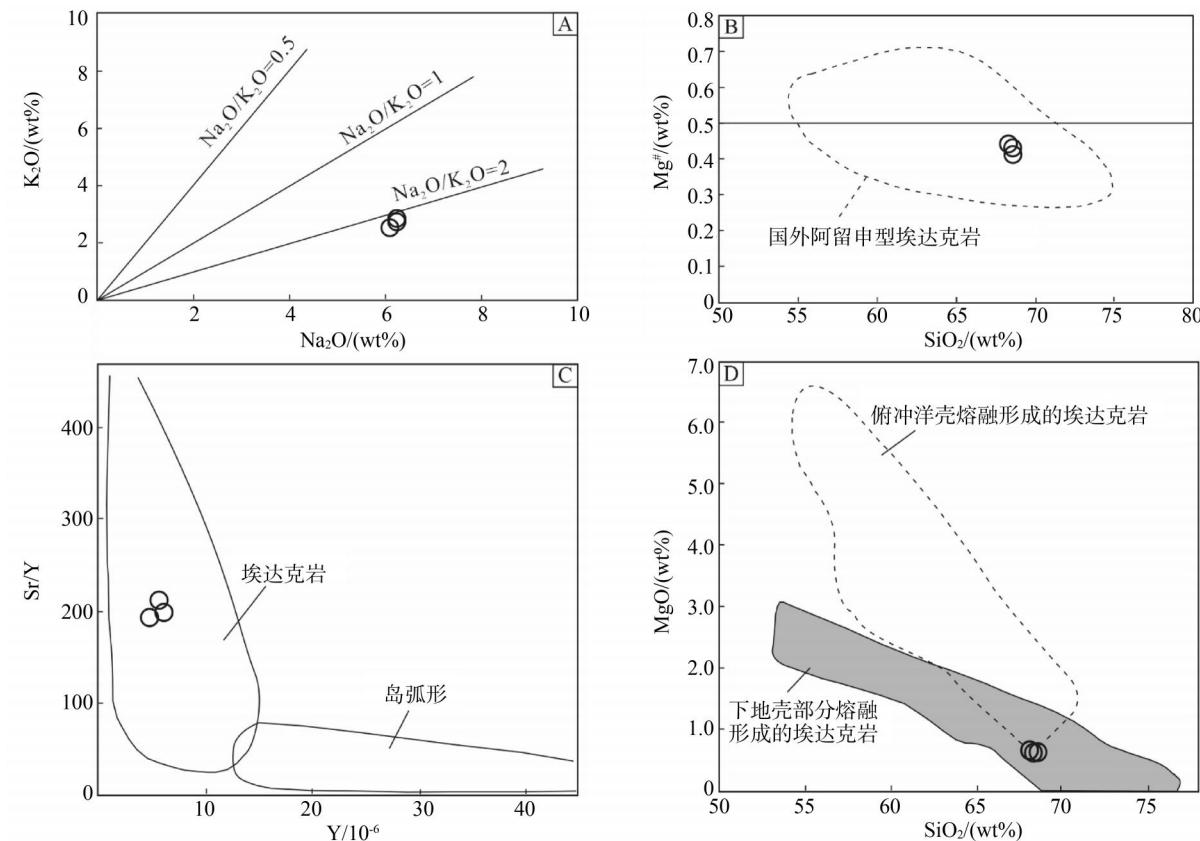
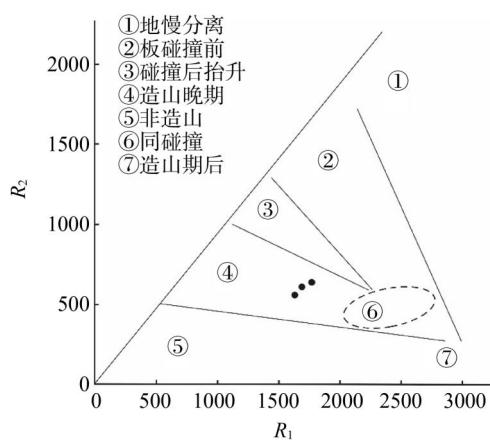
## 5 结论

(1) 阿里河地区出露的花岗质糜棱岩,属于中钾钙碱性准铝质I型花岗岩,具有O型埃达克

岩特征,其原始岩浆来源于下地壳熔融。

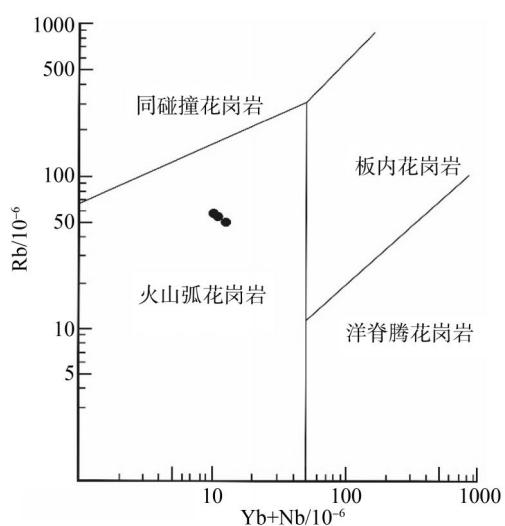
(2) 阿里河地区花岗质糜棱岩具有轻重稀土分馏明显,重稀土亏损的右倾型配分模式,岩石富集大离子亲石元素Rb、Sr和Ba,亏损高场强元素Nb、Ta、Ti,指示其源岩具有壳源特征。

(3) 阿里河地区花岗质糜棱岩锆石U-Pb同位素加权平均年龄值为253.6±1.1 Ma,形成时代为晚二叠世,兴安地块与松嫩地块碰撞造山过程的后碰撞阶段是该区花岗岩形成的主要构造背景。

图 13  $\text{Na}_2\text{O}-\text{K}_2\text{O}$  图解、 $\text{SiO}_2-\text{Mg}^{\#}$  图解、 $\text{Y}-\text{Sr}/\text{Y}$  图解和  $\text{SiO}_2-\text{MgO}$  图解图 14 花岗质糜棱岩构造环境  $R_1-R_2$  判别图解

## 参考文献(References):

- [1] Xu B, Zhao P, Wang Y Y, et al. The pre-Devonian Tectonic Framework of Xing'an-Mongolia Orogenic Belt (XMOB) in North China [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2015, 97(Part B): 183-196.
- [2] 杨泽黎, 胡晓佳, 王树庆, 等. 兴蒙造山带南缘早古

图 15 花岗质糜棱岩  $\text{Rb}-(\text{Yb}+\text{Nb})$  图解

生代增生造山带内前寒武纪地层的识别及其地质意义[J]. 地球科学, 2021, 46(08): 2786-2803.

- [3] 李向文, 牛柏然, 刘意仁, 等. 十五里桥地区水系地球化学特征及成矿元素演化规律[J]. 黑龙江国土资源, 2024, 22(02): 54-60.
- [4] 曾涛, 王涛, 童英, 等. 俄罗斯远东地区晚中生代花

- 岗岩类的时空分布及地质意义 [J]. 地质通报, 2012, 31(05): 732–744.
- [5] 郑吉林, 王文东, 杨华本, 等. 大兴安岭北部侏罗统战备村组的建立及其地质意义 [J]. 地质通报, 2016, 35(07): 1106–1114.
- [6] 周传芳, 孟玲禹, 贾立明, 等. 大兴安岭洛古河地区兴华渡口群地球化学特征及地质意义 [J]. 黑龙江国土资源, 2024, 22(06): 61–69.
- [7] 孙德有, 吴福元, 张艳斌, 等. 西拉木伦河–长春–延吉板块缝合带的最后闭合时间: 来自吉林大玉山岩体的证据 [J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2004, 34(02): 174–181.
- [8] 葛文春, 吴福元, 周长勇, 等. 大兴安岭北部塔河花岗岩体的时代及对额尔古纳地块构造归属的制约 [J]. 科学通报, 2005, 50(12): 1239–1247.
- [9] 余宏全, 李进文, 向安平, 等. 大兴安岭中北段原岩锆石 U-Pb 测年及其与区域构造演化关系 [J]. 岩石学报, 2012, 28(02): 571–594.
- [10] 葛文春, 隋振民, 吴福元, 等. 大兴安岭东北部早古生代花岗岩锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素特征及地质意义 [J]. 岩石学报, 2007, 23(02): 423–440.
- [11] 隋振民, 葛文春, 吴福元, 等. 大兴安岭东北部侏罗纪花岗质岩石的锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及成因 [J]. 岩石学报, 2007, 23(02): 461–480.
- [12] 徐立明, 刘涛, 郑吉林. 大兴安岭北段阿里河镇早白垩世高分异花岗岩的确定及其地质意义 [J]. 现代地质, 2023, 37(03): 613–626.
- [13] 郑吉林, 刘涛, 徐立明, 等. 大兴安岭嘎仙蛇绿混杂岩中超镁铁质岩地球化学、年代学特征及其地质意义 [J]. 地质通报, 2020, 39(04): 480–490.
- [14] Liang Q, Jing H, Gregoire D C. Determination of trace elements in granites by inductively coupled plasma mass spectrometry [J]. Talanta, 2000, 51 (03): 507–513.
- [15] 张旗, 周国庆. 中国蛇绿岩 [M]. 北京: 北京科学出版社, 2001. 1–180.
- [16] 孙建东, 徐敏成, 谭桂丽, 等. 赣东北黄山铌钽矿床成矿岩体地球化学特征及成矿意义 [J]. 华东地质, 2023, 44(01): 28–38.
- [17] 李斌, 黄寄洲, 李仁和, 等. 安徽蒙城西贾庄金铅锌多金属矿床成矿期次及成矿岩体年代学研究 [J]. 华东地质, 2024, 45(03): 318–331.
- [18] 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.
- [19] 葛文春, 吴福元, 周长勇, 等. 大兴安岭北部塔河花岗岩体的时代及对额尔古纳地块构造归属的制约 [J]. 科学通报, 2005, 50(12): 1239–1246.
- [20] 孙德有, 吴福元, 李惠民, 等. 小兴安岭西北部造山后 A 型花岗岩的时代及与索伦山–贺根山–扎赉特碰撞拼合带东延的关系 [J]. 科学通报, 2000, 45(20): 2217–2222.
- [21] Wu F Y, Sun D Y, Li H M, et al. A-type granites in northeastern China: Age and geochemical constraints on their petrogenesis [J]. Chemical Geology, 2002, 187: 143–173.
- [22] 梁科伟, 李成禄, 张立东, 等. 大兴安岭诺敏地区二叠纪花岗岩的地球化学特征及地质意义 [J]. 地质与资源, 2012, 21(02): 181–187.

#### 作者简介:

第一作者: 郑吉林, 1985 年生, 男, 吉林农安人, 硕士, 中国地质调查局哈尔滨自然资源综合调查中心, 高级工程师, 主要研究方向为地质调查。Email: 123982315@qq.com;

通讯作者: 刘军帅, 1985 年生, 男, 吉林农安人, 中国地质调查局哈尔滨自然资源综合调查中心, 工程师, 主要研究方向为地质调查。Email: 785396992@qq.com

## Discovery and Geological Significance of Late Permian Granitic Mylonites in the Alihe Region, Greater Xing'an Mountains

ZHENG Jilin<sup>1,2,3</sup>, LIU Junshuai<sup>1,2\*</sup>, YAO Yu<sup>1,2</sup>, XIN Yiguo<sup>1,2</sup>, LI Yuhang<sup>1,2</sup>, HU Weiqiang<sup>1,2</sup>

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

2. Observation and Research Station of Earth Critical Zone in Black Soil, Harbin, Ministry of Natural Resources,  
Harbin 150086, China;

3. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

**Abstract:** The Alihe region in the Greater Xing'an Mountains is located in the eastern section of the Xing-Meng Orogenic Belt. Previous studies have documented that this area is dominated by Mesozoic granites, with limited exposures of Late Paleozoic granitic rocks. During regional geological investigations in the Alihe area, we identified a previously undocumented suite of Late Permian granitic mylonites. Integrated petrological, geochemical, and zircon U-Pb geochronological investigations indicate that these granitic mylonites are characterized as medium-potassium, calc-alkaline, quasi-aluminous I-type granites with O-type adakitic geochemical signatures. The rocks display pronounced light and heavy rare earth element fractionation characterized by heavy rare earth element depletion and a right-sloping distribution pattern, with enrichment in large ion lithophile elements (Rb, Sr, and Ba) and depletion in high field strength elements (Nb, Ta, and Ti), indicating significant crustal source contributions. Zircon U-Pb geochronological analysis yields an age of  $253.6 \pm 1.1$  Ma, constraining the emplacement to the Late Permian period. These granitic mylonites were emplaced during the post-collisional stage of the orogenic event between the Xing'an and Songnen blocks.

**Key words:** late permian granitic mylonites; petrogenetic geochemistry; Alihe Region; Greater Xing'an Mountains

# 大兴安岭北段十五里桥地区早白垩世火山岩 U-Pb 年代学、地球化学及其地质意义

王久懿<sup>1,2,3</sup>, 顾萌<sup>4</sup>, 周传芳<sup>1,2,3\*</sup>

- (1. 中国地质调查局哈尔滨自然资源综合调查中心, 哈尔滨 150086;  
2. 中国地质调查局东北地质科技创新中心, 沈阳 110034;  
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;  
4. 黑龙江省农垦科学院, 哈尔滨 150038)

**摘要:** 大兴安岭北段广泛发育早白垩世火山岩, 其构造环境一直以来备受争议。文章对大兴安岭北段十五里桥一带光华组流纹岩锆石 U-Pb 年代学、岩石地球化学开展研究, 约束其岩石成因和构造背景。该地区光华组流纹岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 加权平均年龄为  $129.3 \pm 1.4$  Ma(早白垩世晚期), 属过铝质、亚碱性系列火山岩。岩石轻重稀土分馏显著, 具有轻稀土元素富集、重稀土元素亏损的特征, 并具有明显铕的负异常; Rb/Sr、Nb/Ta、Th/U 和 Nb/Th 比值指示岩石具有壳源特征; 碱度率(*AR*)、锆石饱和温度、高 Zr、10000Ga/Al 和亏损 Ba、Sr、Ti 显示具有 A 型花岗岩特征; 光华组火山岩富集大离子亲石元素(LILE)Rb、K, 亏损高场强元素(HFSE)Ta、Nb、Ti、P, 以及在 Rb-(Nb+Y) 和 Rb-(Ta+Yb) 判别图分布特征, 均显示岩石具有岛弧火山岩地球化学特征。综合分析认为, 该地区火山岩是地壳部分熔融产物, 形成于伊泽奈岐板块向东亚大陆后退式俯冲后的伸展环境。

**关键词:** 锆石 U-Pb 年龄; 地球化学; 构造背景; 光华组; 大兴安岭

中图分类号:P597

文献标志码:A

文章编号:1672-2736(2025)09-0065-14

## 0 引言

大兴安岭是中国东部滨太平洋构造-岩浆-成矿带的重要组成部分, 特殊的构造背景和成矿条件导致中生代火山活动形成了大量矿产资源, 使得大兴安岭成为环太平洋构造域备受关注的热点地区<sup>[1]</sup>。前人对该地区火山岩开展了大量的地层学、年代学、岩石地球化学和大地构造背景等方面研究, 形成了较为统一的认识: 大兴安岭中生代以来经历了古太平洋和蒙古-鄂霍茨克洋两种构造体系作用的叠加和改造<sup>[2]</sup>, 构造-岩浆活动主要发生在  $174 \sim 110$  Ma, 即中侏罗世至早白垩世时期, 形成大量陆相火山-沉积岩和侵入岩, 分布在大兴安岭主脊及两侧<sup>[1,3]</sup>。形成

于早白垩世的光华组流纹质火山岩主要分布于大兴安岭北段东坡, 主脊零星出露, 前人对此开展了一定程度研究, 并积累了丰富的锆石 U-Pb 年代学数据<sup>[4]</sup>。目前主要分歧在于对构造背景的认识, 即: 光华组形成于古太平洋板块向西俯冲的伸展环境<sup>[5]</sup>, 还是蒙古-鄂霍茨克洋闭合造山后的伸展环境<sup>[4]</sup>。本文以大兴安岭北部十五里桥地区光华组为研究对象, 准确分析其上下地层关系, 并开展锆石 U-Pb 年代学和地球化学研究, 分析岩石成因, 进而分析早白垩世大兴安岭的构造背景。

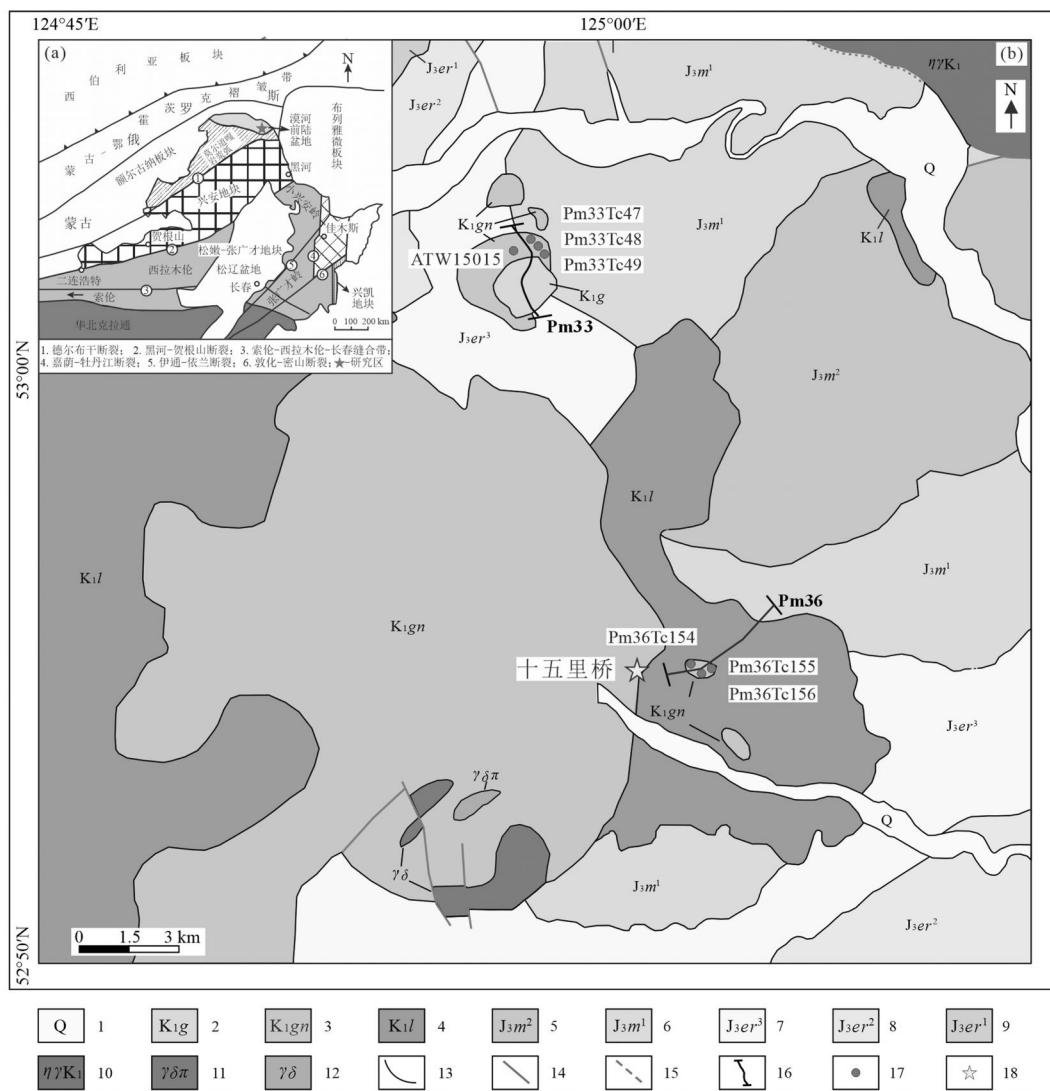
## 1 地质背景

大兴安岭在元古宙-古生代时期处于西伯

基金项目: 中国地质调查局项目(DD20243006, NO. 12120115041801); 东北地质科技创新中心区创基金项目(QCJJ2023-33)。

利亚克拉通南缘增生与华北克拉通北缘陆缘增生对接的多岛弧盆系演化阶段<sup>[6]</sup>,形成了以地块之间拼合碰撞为主体的造山体系。中生代以来,受古亚洲洋构造域影响,并叠加了蒙古-鄂霍茨克洋和滨太平洋构造域的作用,该地区发生了大量构造-岩浆活动并伴有盆地沉积作用<sup>[7]</sup>。中生代时期的火山岩主要呈 NE 和 NNE 向分布,从基性到酸性火山岩均有不同程度产出,火山岩地层主要有塔木兰沟组、满克头鄂博组、玛尼吐组、白音高老组、梅勒图组、龙江组、光华组、甘河组等。火山活动伴随 3 期盆地沉积作用,包

括:早-中侏罗世断陷盆地中的红旗组和万宝组煤系地层,以及新民组和七林河组含煤火山沉积岩系<sup>[3]</sup>;晚侏罗世漠河前陆盆地的漠河组、二十二站组、绣峰组河湖相岩系<sup>[8]</sup>;早白垩世具磨拉石建造的木瑞组和九峰山组含煤断陷盆地沉积。大兴安岭中生代构造活动强烈,形成了大量 NNE 向、NE 向区域性断裂构造,其中 NE 向断裂主要分布在大兴安岭西北部,NNE 向断裂主要在东南部展布,这些构造多沿火山喷发带和火山盆地边界分布,是蒙古-鄂霍茨克洋和古太平洋构造体系控制作用的产物<sup>[9]</sup>。中生代大兴安岭



1—第四系;2—下白垩统甘河组;3—下白垩统光华组;4—下白垩统龙江组;5—上侏罗统漠河组二段;6—上侏罗统漠河组一段;7—上侏罗统二十二站组三段;8—上侏罗统二十二站组二段;9—上侏罗统二十二站组一段;10—早白垩世二长花岗岩;11—花岗闪长岩;12—花岗闪长斑岩;13—地质界限;14—断层;15—推测断层;16—实测剖面;17—采样位置;18—地名

图 1 东北及邻区大地构造图(a)及研究区地质简图(b)

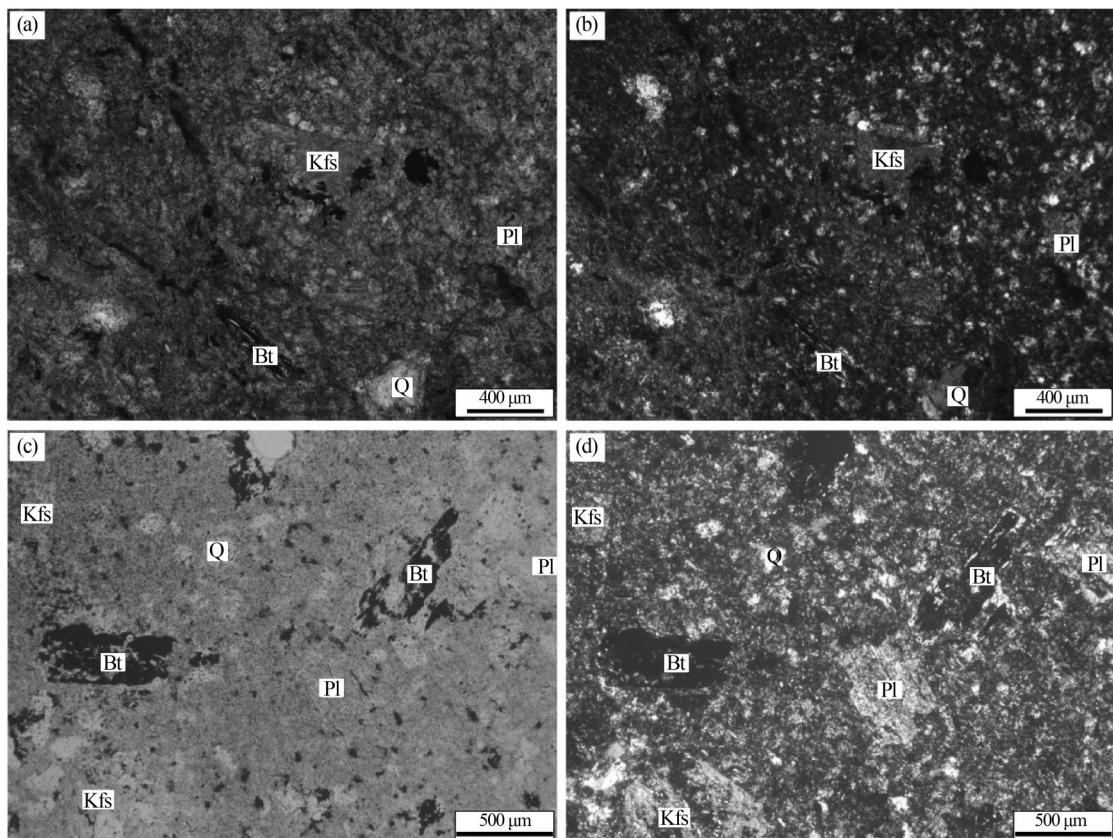
(审图号:GS(2024)0650 号)

侵入活动也十分强烈,侵入岩多与火山岩共生、同源,且具有相同的构造背景<sup>[1]</sup>。

研究区十五里桥位于塔河县依西肯乡一带,大地构造上隶属于大兴安岭北部、额尔古纳地块内漠河前陆盆地的东北部;东侧与布列雅微板块相接,南接莫尔道嘎岩浆弧,北邻蒙古-鄂霍茨克褶皱带(图 1a)。区内出露 3 套早白垩世火山岩地层和 2 套晚侏罗统碎屑沉积岩地层(图 1b):早白垩世火山岩地层有甘河组( $K_1g$ )、光华组( $K_1gn$ )和龙江组( $K_1l$ );晚侏罗世碎屑沉积岩地层有漠河组( $J_3m$ )和二十二站组( $J_3er$ )。区内构造发育不显著,仅少量 NE 向和 NNW 次级断裂分布于北部和南部。在研究区南部和东北部见少量岩浆侵入体,岩性主要为早白垩世二长花岗岩、花岗闪长岩、花岗闪长斑岩。

本次研究的光华组位于研究区西南部十五里桥地区,为一套酸性火山岩夹沉积岩组合,喷发不整合覆盖于龙江组之上,被甘河组喷发不整

合覆盖。控制剖面为上侏罗统漠河组一段、下白垩统光华组、甘河组实测剖面(PM33, PM36)。岩性以灰色、灰白色流纹岩、流纹质凝灰岩为主,含沉积夹层,并伴有不同程度的碳酸盐化、绢云母化、绿帘石化。光华组流纹岩岩相学特征如下(图 2):岩石多呈浅灰色、灰黄色、浅乳黄灰色,具斑状结构,流纹构造。斑晶成分主要为斜长石、钾长石、黑云母、石英。斜长石呈自形-半自形板状,粒径 0.2~2.0mm,含量 5%~15%;钾长石呈自形-半自形板状,粒径 0.3~1.5mm,含量 5%~10%;石英呈次圆状,少数港湾状,粒径 0.2~2mm,含量 5%~10%;黑云母呈半自形片状,粒径 0.2~1.0mm,含量 3%~5%。基质为隐晶的长英质组成,副矿物为磁铁矿、褐铁矿等。本文研究的光华组流纹岩样品采自 1:5 万十五里桥幅(PM33:塔河县下鱼亮子南,PM36:塔河县十五里桥北 544.3 高地),其中锆石 U-Pb 年龄样品 1 件,岩石地球化学样品 6 件,采样位置见图 1。



Q—石英;Kfs—钾长石;Pl—斜长石;Bt—黑云母

图 2 光华组流纹岩显微照片

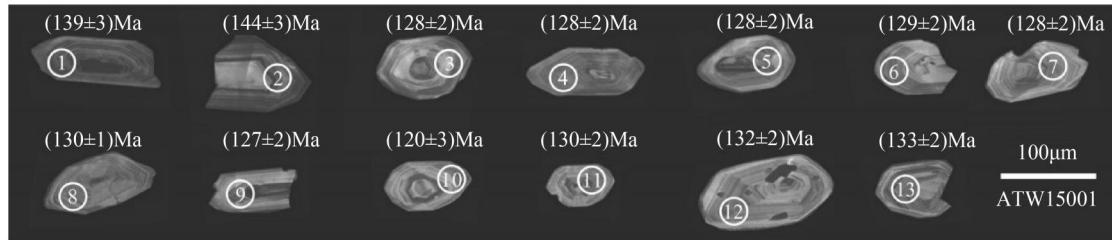


图 3 光华组流纹岩锆石阴极发光(CL)图像及年龄

## 2 分析测试方法

锆石挑选和制靶工作在河北省区域地质矿产调查研究所进行, 锆石阴极发光照相和微区原位 U-Pb 定年工作在中国地质调查局天津地质调查中心同位素实验室完成。依据锆石形态和自形程度选择晶形较为完好的锆石开展制靶、阴极发光照相和定年工作。外部锆石年龄标准为 TEMORA, 计算 Pb、U 和 Th 含量的外标采用 NIST612 玻璃标样。普通 Pb 校正通过 ComPb-Corr<sup>#3. 17</sup> 完成, 谐和图绘制和年龄计算通过 Isoplot 程序完成, 数据处理采用 ICP MS Data Cal 程序。

地球化学样品在河北省区域地质矿产调查研究所进行主量元素和微量元素分析测试。采用玻璃熔片 XRF 法开展主量元素分析, 分析仪器为 AxiosX 射线荧光光谱仪测定, 分析偏差优

于 2%; 微量元素分析采用 Thermo Fisher Scientific 公司的 XSeries II 型等离子体质谱仪 (ICP-MS), 分析误差优于 5%。

## 3 分析结果

### 3.1 锆石 U-Pb 定年

碎屑锆石 U-Pb 同位素数据见表 1。样品 ATW15015 中锆石均呈半自形-自形的柱状、长柱状结构, 长度变化 50~130 μm, 宽度变化 30~70 μm, 长宽比介于 1:1~4:1, CL 影像下锆石均具有典型的震荡环带(图 3)。所有锆石 Th/U 均>0.1 (0.37~0.66, 表 1), 具备岩浆锆石典型特征。计算加权年龄时剔除 3 个年龄偏移较大的点 (1, 2, 10), 10 个数据点的分析结果位于 U-Pb 谐和线上及其附近(图 4), 加权平均年龄为 129.3±1.4 Ma (MSWD = 1.3, n = 10), 为光华组流纹岩成岩年龄。

表 1 大兴安岭光华组流纹岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年结果

测点号	Th/U 比值	含量/ $10^{-6}$			同位素比值						年龄/Ma			
		Pb	U	Th	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ
ATW15015-01	0.39	26	1 182	466	0.021 8	0.000 4	0.148 5	0.005 2	0.049 5	0.001 7	139	3	141	5
ATW15015-02	0.66	15	598	396	0.022 5	0.000 5	0.151 4	0.010 0	0.048 8	0.003 1	144	3	143	9
ATW15015-03	0.48	4	209	101	0.020 1	0.000 3	0.150 5	0.007 3	0.054 4	0.002 8	128	2	142	7
ATW15015-04	0.38	8	391	148	0.020 0	0.000 3	0.140 8	0.007 7	0.051 1	0.002 9	128	2	134	7
ATW15015-05	0.46	10	472	217	0.020 0	0.000 2	0.164 4	0.007 3	0.059 7	0.002 8	128	2	155	7
ATW15015-06	0.59	8	386	227	0.020 3	0.000 3	0.134 5	0.007 3	0.048 1	0.002 6	129	2	128	7
ATW15015-07	0.53	9	408	217	0.020 0	0.000 3	0.143 0	0.007 7	0.051 8	0.002 7	128	2	136	7
ATW15015-08	0.38	8	378	143	0.020 4	0.000 2	0.150 7	0.006 6	0.053 7	0.002 4	130	1	143	6
ATW15015-09	0.59	8	377	221	0.019 9	0.000 3	0.141 5	0.006 5	0.051 6	0.002 3	127	2	134	6
ATW15015-10	0.47	5	237	113	0.018 8	0.000 5	0.157 0	0.015 8	0.060 6	0.006 8	120	3	148	15
ATW15015-11	0.43	10	461	197	0.020 4	0.000 2	0.152 8	0.006 5	0.054 2	0.002 4	130	2	144	6
ATW15015-12	0.37	9	443	165	0.020 7	0.000 3	0.148 2	0.005 2	0.051 9	0.002 0	132	2	140	5
ATW15015-13	0.39	9	422	163	0.020 8	0.000 3	0.166 7	0.008 6	0.058 0	0.003 2	133	2	157	8

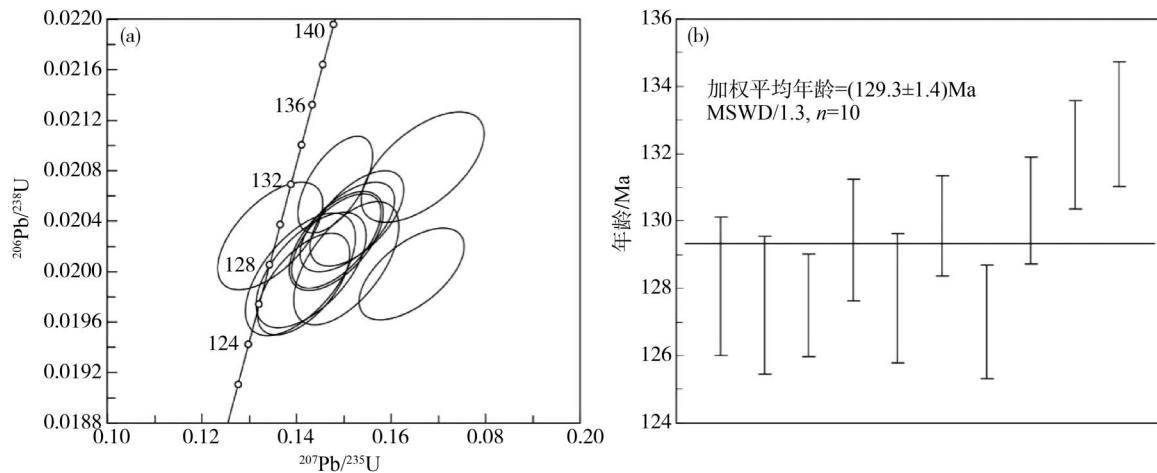


图 4 光华组流纹岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 谱和年龄图(a)和加权平均年龄(b)

### 3.2 岩石地球化学

#### 3.2.1 主量元素

6 件光华组流纹岩样品主量元素分析结果见表 2。结果显示:  $\text{SiO}_2$  含量为 70.15% ~ 77.68%, 高铝 ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量 12.11% ~ 14.44%), 高全碱 ( $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} = 6.19\% \sim 7.95\%$ , 且  $\text{K}_2\text{O} > \text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} = 1.72 \sim 2.37$ )、高钾 ( $\text{K}_2\text{O} = 3.48\% \sim 5.14\%$ ), 贫镁 ( $\text{MgO} = 0.12\% \sim 1.17\%$ ),

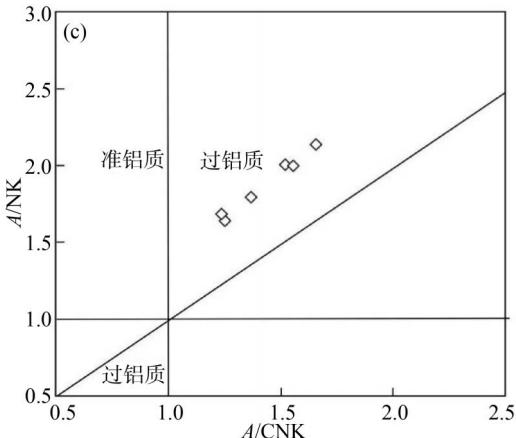
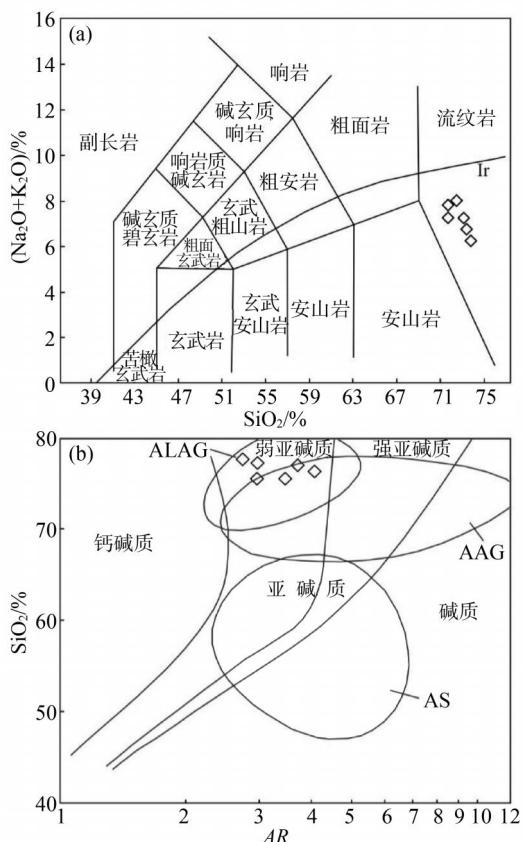


图 5 光华组流纹岩 TAS 图解(a)、  
 $\text{SiO}_2$ -AR 图解(b)和  $A/\text{NK}-A/\text{CNK}$  图解(c)  
Ir-Irvine 分界线(上方为碱性,下方为亚碱性)

低钙 (0.11% ~ 1.71%) 和  $\text{TiO}_2$  (0.05% ~ 0.54%)。铝饱和指数  $A/\text{CNK}$  介于 1.24 ~ 1.66 之间, 平均 1.43, 属过铝质岩石。样品点在 TAS 图解上(图 5a)全部落在亚碱性流纹岩区域, 在  $\text{SiO}_2$ -AR 图解上(图 5b)全部落在弱亚碱性区域, 在  $A/\text{NK}-A/\text{CNK}$  图解(图 5c)中全部落入过铝质区域。在 Harker 图解(图 6)上, 光华组流纹岩的  $\text{SiO}_2$  与大多数主量元素有较好的相关性, 与  $\text{TiFeO}$  呈正相关, 与  $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{K}_2\text{O}$ 、 $\text{TiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5$  呈负相关, 与  $\text{CaO}$  和  $\text{MgO}$  无明显相关性。

#### 3.2.2 微量元素

6 件光华组流纹岩微量元素和稀土元素测试结果见表 2。稀土元素结果显示: 样品稀土总

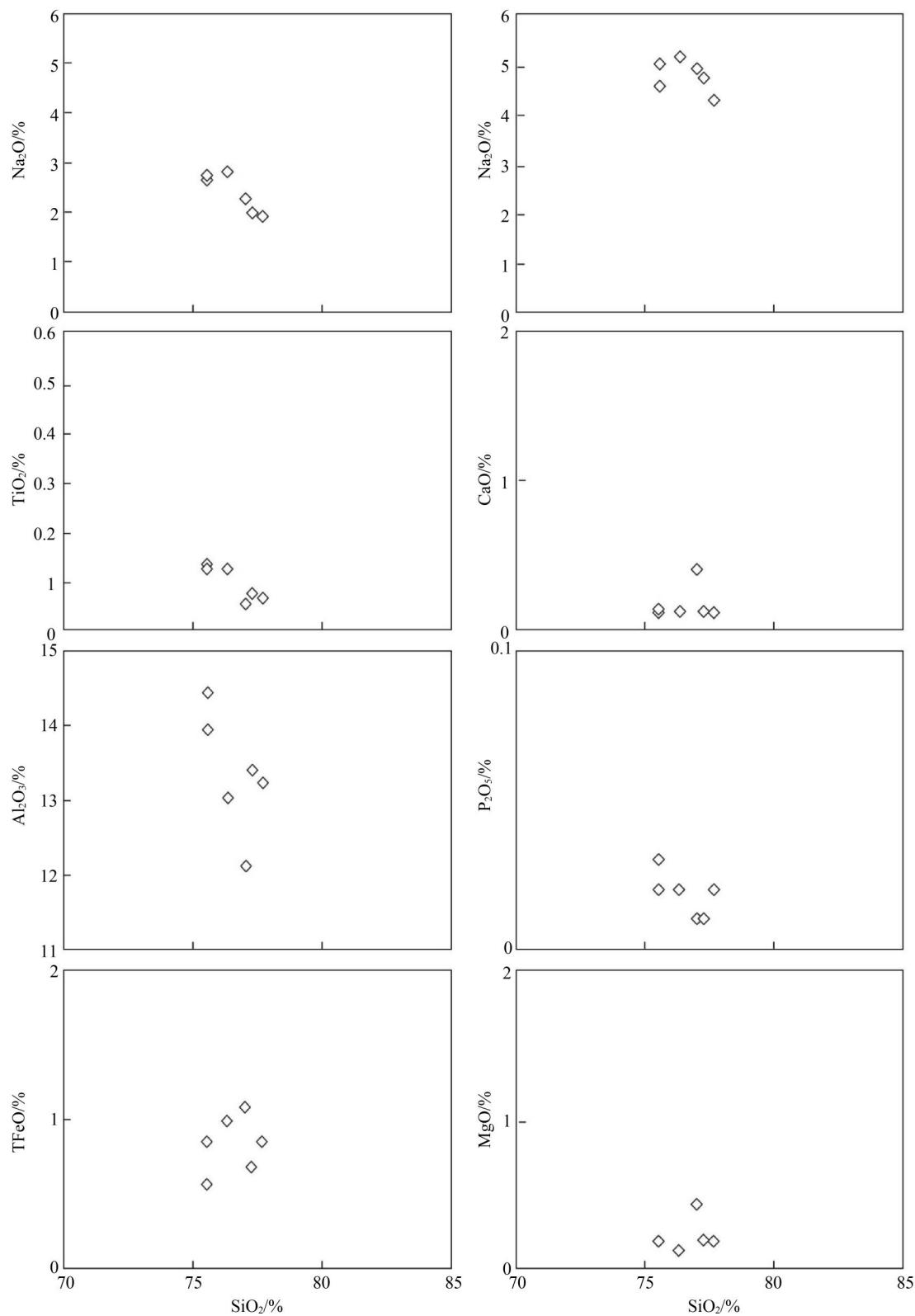


图 6 光华组流纹岩 Harker 图解

量较低,  $\Sigma \text{REE} = (84.9 \sim 207.48) \times 10^{-6}$  (平均  $151.42 \times 10^{-6}$ ), 重稀土总量为  $\Sigma \text{HREE} = (6.46 \sim 15.62) \times 10^{-6}$ , 轻稀土总量为  $\Sigma \text{LREE} = (76.73 \sim 191.86) \times 10^{-6}$ ,  $\text{LREE}/\text{HREE} = 9.40 \sim 17.25$  (平均 13.20)。稀土元素球粒陨石标准化图解(图 7a)显示, 样品的变化趋势一致, 表现为轻稀土富集(右倾)的特征和典型海鸥型稀土配分样式。轻重稀土元素分馏系数( $\text{La/Yb}$ )<sub>N</sub> = 11.68 ~ 29.53(平均 19.08), 指示光华组流纹岩形成过程发生较强轻重稀土元素分馏。轻稀土元素分馏系数( $\text{La/Sm}$ )<sub>N</sub> = 3.86 ~ 5.49(平均 5.05)和重稀土元素分馏系数( $\text{Gd/Yb}$ )<sub>N</sub> = 1.72 ~ 3.57(平均 2.43)指示在轻重稀土元素内部也存在一定程度的分馏。 $\delta \text{Eu} = 0.14 \sim 0.38$ (平均 0.24), 具有明显铕的负异常。在原始地幔标准化微量元素蜘蛛网图(图 7(b))显示富集高场强元素

(HFSE) Th、U 和大离子亲石元素(LILE) Rb、K, 亏损高场强元素(HFSE) Ta、Nb、Ti、P 和大离子亲石元素(LILE) Ba、Sr。

## 4 讨论

### 4.1 岩石成因

具有碱性(alkaline)、缺水(anhydrous)、非造山(anorogenic)三“A”特征的 A 型花岗岩被提出已有 40 余年<sup>[10]</sup>, 其形成于板内伸展环境或造山后地壳伸展减薄环境已被广泛验证<sup>[11]</sup>, 后被细分为与上地幔热柱、裂谷有关的 A<sub>1</sub> 型(非造山环境; AA 亚型)和与大陆边缘地壳伸展或陆内剪切作用有关的 A<sub>2</sub> 型(后造山拉张环境; PA 亚型)。A<sub>2</sub> 型花岗岩又分为铝质花岗岩(ALAG)和碱性花岗岩(AAG), 前者为弱过铝质、亚碱质岩石, 后者为准铝质、碱质-亚碱质岩石。

表 2 大兴安岭光华组流纹岩岩石地球化学分析结果

样品号	Pm36Tc155a	Pm36Tc155b	Pm36Tc153	Pm33Tc49	Pm33Tc48	Pm33Tc47
	流纹岩					
$\text{SiO}_2$	75.55	76.34	75.54	77.02	77.68	77.28
$\text{Al}_2\text{O}_3$	14.44	13.02	13.93	12.11	13.22	13.39
$\text{TiO}_2$	0.13	0.12	0.12	0.05	0.06	0.07
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	0.49	1.01	0.74	1.11	0.84	0.22
FeO	0.12	0.08	0.18	0.08	0.09	0.48
CaO	0.11	0.12	0.13	0.40	0.11	0.12
MgO	0.18	0.12	0.18	0.43	0.18	0.19
$\text{K}_2\text{O}$	4.55	5.14	5.00	4.92	4.28	4.71
$\text{Na}_2\text{O}$	2.65	2.81	2.75	2.27	1.91	1.99
MnO	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02
$\text{P}_2\text{O}_5$	0.03	0.02	0.02	0.01	0.02	0.01
LOI	1.71	1.17	1.34	1.54	1.52	1.48
TOTAL	99.96	99.95	99.94	99.95	99.94	99.94
A/CNK	1.52	1.25	1.37	1.24	1.66	1.56
A/NK	2.01	1.64	1.80	1.68	2.14	2.00
AR	2.96	4.06	3.46	3.70	2.73	2.97
F	366.22	279.73	683.25	231.91	269.22	516.32
Cl	68.4	79.7	26.2	50.7	42.5	21.3

续表

样品号	Pm36Tc155a	Pm36Tc155b	Pm36Tc153	Pm33Tc49	Pm33Tc48	Pm33Tc47
	流纹岩					
Rb	131.29	147.90	159.60	179.89	114.31	124.11
Sr	48.58	57.93	53.82	48.11	89.70	60.48
Zr	190.06	198.11	217.89	89.41	122.20	117.16
Nb	17.68	17.98	16.54	14.34	12.84	12.56
Ba	218.88	204.41	209.70	201.29	251.72	235.38
Hf	6.92	7.16	7.25	3.64	4.27	4.21
Ta	1.22	1.25	1.23	1.23	1.14	1.17
Th	21.37	23.14	19.31	18.35	17.06	16.95
U	6.52	7.02	3.90	2.83	6.32	3.37
Ga	16.92	16.46	18.35	16.15	15.29	14.87
Y	22.37	22.50	19.74	11.99	7.16	7.14
La	47.51	44.94	44.96	19.19	26.47	25.97
Ce	89.71	80.09	85.78	33.17	55.88	51.36
Pr	11.19	10.45	9.69	4.64	6.00	5.92
Nd	37.25	34.22	34.08	16.27	19.64	19.29
Sm	5.90	5.61	5.57	3.21	3.11	3.11
Eu	0.30	0.25	0.25	0.24	0.37	0.35
Gd	5.23	4.87	5.13	2.67	2.78	2.72
Tb	0.72	0.69	0.68	0.40	0.33	0.34
Dy	3.79	3.71	3.62	2.07	1.49	1.53
Ho	0.70	0.71	0.66	0.37	0.25	0.26
Er	2.16	2.19	1.98	1.10	0.75	0.75
Tm	0.35	0.35	0.30	0.17	0.11	0.11
Yb	2.32	2.34	1.92	1.18	0.64	0.67
Lu	0.35	0.37	0.32	0.20	0.10	0.11
$\delta$ Eu	0.16	0.14	0.14	0.25	0.38	0.36
$\delta$ Ce	0.92	0.87	0.96	0.83	1.04	0.98
$\Sigma$ REE	207.48	190.80	194.92	84.90	117.93	112.47
$\Sigma$ LREE	191.86	175.56	180.33	76.73	111.47	106.00
$\Sigma$ HREE	15.62	15.24	14.60	8.16	6.46	6.47
(La/Yb) <sub>N</sub>	14.68	13.79	16.79	11.68	29.53	27.99
(La/Sm) <sub>N</sub>	5.20	5.17	5.21	3.86	5.49	5.39
(Gd/Yb) <sub>N</sub>	1.86	1.72	2.20	1.87	3.57	3.37

注: 主量元素单位为%; 微量元素单位为  $10^{-6}$

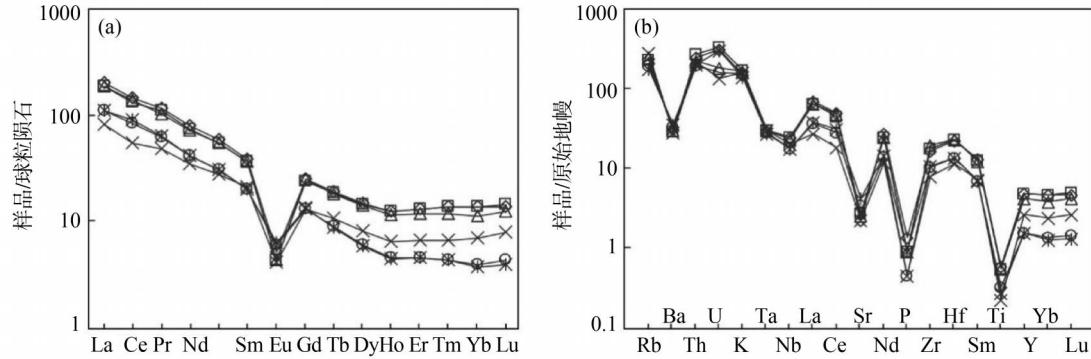


图 7 光华组流纹岩球粒陨石标准化稀土元素配分曲线图(a)和原始地幔标准化微量元素蛛网图(b)

研究区光华组流纹岩如下属性表现出 A 型花岗岩特征:①流纹岩的矿物组合以石英、长石为主,含少量黑云母,无碱性暗色矿物,岩石具高硅、富碱、低钙、贫镁特征,且  $A/CNK > 1$ ,总体符合 Whalen 等<sup>[12]</sup>关于碱性和偏碱性花岗岩的划分界限;②岩石稀土元素配分曲线呈轻稀土略富集、重稀土较为平坦的缓向右倾、铕负异常的典型“海鸥型”(图 7),与吉黑张广才岭地区典型 A 型花岗岩稀土特征相似<sup>[13]</sup>;③样品 F 含量 ( $231.91 \sim 683.25 \times 10^{-6}$  平均  $391.11 \times 10^{-6}$ ), Cl 含量 ( $21.30 \sim 79.70 \times 10^{-6}$  平均  $48.13 \times 10^{-6}$ ),  $F/Cl = 3.51 \sim 26.08$ , 以及哈克图解上  $\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$  和  $\text{SiO}_2 - \text{Na}_2\text{O}$ (图 6) 均呈负相关;④样品在  $10\,000\text{Ga}/\text{Al} - (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ 、 $10\,000\text{Ga}/\text{Al} - (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})/\text{CaO}$ 、 $10\,000\text{Ga}/\text{Al} - \text{Zr}$ 、 $10\,000\text{Ga}/\text{Al} - \text{Y}$  图解(图 8) 上均落入 A 型花岗岩区。

基于以下证据进一步分析得出光华组流纹岩属 A 型花岗岩  $\text{A}_2$  亚型:①样品  $10^4\text{Ga}/\text{Al} > 2.6$ , 范围为  $4.20 \sim 5.04$ (平均  $4.63$ ), 属  $\text{A}_2$  型花岗岩范围<sup>[14]</sup>;②轻稀土部分分馏明显 (( $\text{La}/\text{Sm}$ )<sub>N</sub> =  $3.86 \sim 5.49$ , 平均  $5.05$ ), 具有  $\text{A}_2$  亚型铝质花岗岩 (ALAG) 特征<sup>[14]</sup>;③碱度率 ( $AR$ ) 为  $2.73 \sim 4.06$ (平均  $3.31$ ), 具有  $\text{A}_2$  亚型 ALAG 特征<sup>[15]</sup>, 在图 5b 中样品点全落在弱亚碱质区域和典型铝质花岗岩 (ALAG) 中;④因锆石是最早结晶的副矿物,并常被铁镁矿物和长英质矿物包裹,故用锆石饱和温度<sup>[15]</sup>近似代表 A 型岩套岩浆近液相温度<sup>[16]</sup>,计算得出光华组流纹岩锆石饱和温度  $759 \sim 845^\circ\text{C}$ ,具有  $\text{A}_2$  亚型 ALAG 岩石

温度范围。

目前关于碱性长英质岩石的成因认识主要有:①幔源岩浆和深熔壳源岩浆的混合交代;②碱性岩浆的分离结晶;③富 F、Cl 麻粒岩高温部分熔融;④挥发组分作用下的下地壳岩石部分熔融。早白垩世时期大兴安岭造山带侵入岩和火山岩主要为闪长质和花岗质<sup>[1]</sup>,在研究区和相邻地区同样没有同时代铁镁质岩石的地质记录,且十五里桥地区光华组流纹岩富 Si 及贫 Ca、Mg,仅有壳幔混合作用不可能形成富硅的  $\text{A}_2$  型花岗岩,故排除是幔源岩浆分离结晶和与深熔壳源岩浆混合交代作用的可能。此外,岩石高 Si、贫 Ca、贫 Mg 和强烈 Eu 的负异常与麻粒岩高温部分熔融的成因作用不符<sup>[4]</sup>。

十五里桥地区各光华组流纹岩样品具有相似的主微量及稀土元素地球化学特征,这暗示它们具有相同的岩浆源。样品中  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  ( $5.23 \sim 6.36$ )、 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  ( $1.72 \sim 2.37$ )、 $\text{K}/\text{Rb}$  ( $0.02 \sim 0.03$ ) 比值变化较小,暗示成岩后受后期流体和热事件的影响较小<sup>[17]</sup>。岩石  $\text{SiO}_2$  含量高且变化范围小,具有低  $\text{FeO}$ 、低  $\text{MgO}$  以及明显 Ba、P、Sr、Eu、及 Ti 负异常特征,指示长英质成分源岩在低压下发生部分熔融,其中斜长石、磷灰石及 Ti、Fe 氧化物在源岩中残留<sup>[4]</sup>。如下证据表明光华组流纹岩源于地壳(主要为下地壳):①上文已证明十五里桥地区光华组流纹岩为  $\text{A}_2$  亚型的铝质 A 型花岗岩 (ALAG), 铝质 A 型花岗岩浆来自长英质地壳部分熔融,而非幔源镁铁质岩浆分异<sup>[16]</sup>;②岩石富  $\text{K}_2\text{O}$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的特征表明

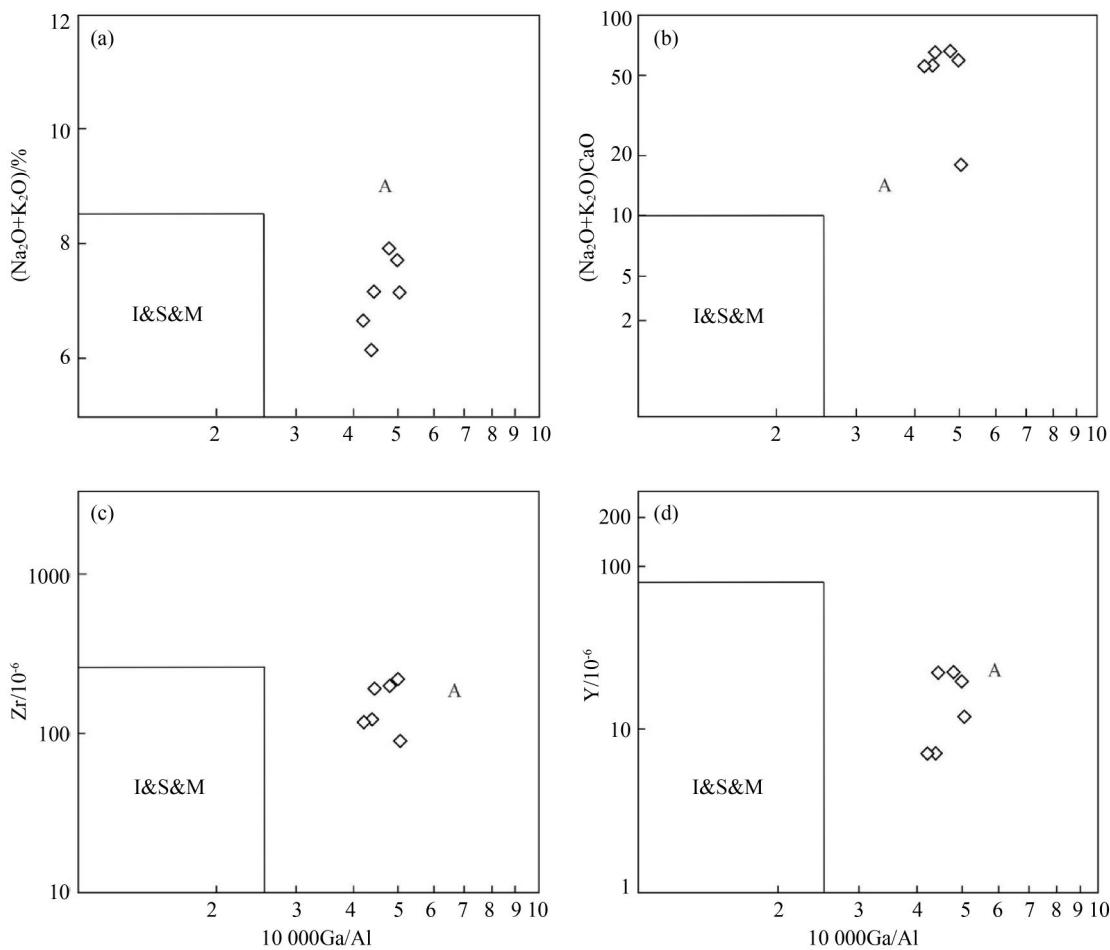


图 8 光华组流纹岩  $10000 * \text{Ga/Al}$  与  $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$  (a)、 $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})/\text{CaO}$  (b)、 $\text{Zr}$  (c) 和  $\text{Y}$  (d) 图解

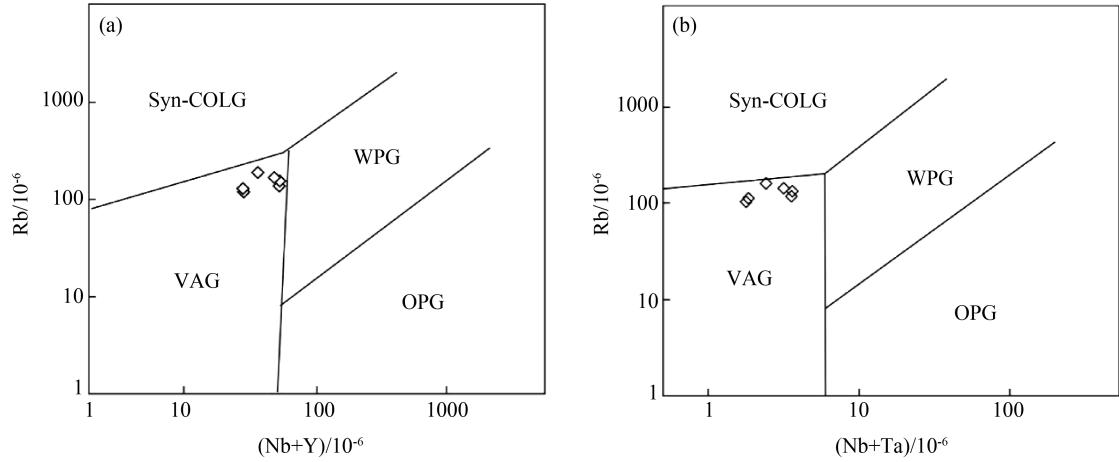
岩石成因与地壳有关,其最可能的岩浆源区物质为中-下地壳富  $\text{K}_2\text{O}$ 、贫水的玄武质岩石<sup>[18]</sup>;③样品  $\text{Rb/Sr} = 1.27 \sim 3.74$  (平均 2.55) 与壳源岩浆范围 ( $>0.5$ ) 一致<sup>[19]</sup>,且  $\text{Th/U} = 2.70 \sim 6.48$  (平均 4.29)、 $\text{La/Ta} = 15.60 \sim 38.94$  (平均 28.74),与地壳平均  $\text{Th/U}$  值 (4.3)、 $\text{La/Ta}$  值 (29) 接近<sup>[20]</sup>,主体更接近下地壳比值;④ $\text{Nb/Ta}$  可作为指示壳-幔体系地球化学作用的指标<sup>[21]</sup>,球粒陨石和原始地幔的  $\text{Nb/Ta}$  为  $17.5 \pm 2.0$ ,大陆地壳平均为 12.4。光华组  $\text{Nb/Ta}$  范围  $10.74 \sim 14.49$  (平均 12.66),说明陆壳参与融合或混染,且源区物质受地壳组分影响较大,这可能是源区位于下部地壳内,在熔融过程中钙角闪石作为难熔相,使熔体  $\text{Nb/Ta}$  下降和熔体铝过饱和度增高。综合以上考虑,本文认为十五里桥地区光华

组流纹岩是下地壳部分熔融产物,具壳源岩浆高硅、富碱、贫钙镁的特征,并在上升过程中经历了分离结晶作用。

#### 4.2 构造环境

蒙古-鄂霍茨克洋闭合和古太平洋板块俯冲深刻影响着中生代大兴安岭火山岩的形成和分布,但主导早白垩世光华组火山岩形成的是古太平洋板块俯冲<sup>[5]</sup>,还是蒙古-鄂霍茨克洋闭合<sup>[4]</sup>一直存在不同争议。从岩石成因类型、形成时代、空间分布 3 个角度探讨光华组流纹岩构造背景。

已证实十五里桥光华组流纹岩为 A 型花岗岩,属  $\text{A}_2$  亚型铝质花岗岩 (ALAG)。 $\text{A}_2$  亚型花岗岩形成于后造山伸展阶段、产于大陆边缘地壳



ORG—大洋中脊花岗岩;WPG—板内花岗岩;VAG—火山弧花岗岩;Syn-COLG—同碰撞花岗岩

图 9 光华组流纹岩 Rb-(Nb+Y) (a) 和 Rb-(Ta+Yb) (b) 构造判别图解

伸展环境或与陆内剪切作用有关的拉张环境已得到广泛共识<sup>[14]</sup>。此外,样品点在 Rb-(Nb+Y) 判别图(图 9a)和 Rb-(Ta+Yb) 判别图(图 9b)中全部落入火山弧范围内。以上证据表明研究区光华组火山岩形成于活动大陆边缘有关的岛弧环境。锆石 U-Pb 定年结果  $129.3 \pm 1.4$  Ma 既符合蒙古-鄂霍茨克洋中晚侏罗世至早白垩世剪刀式自西向东闭合的时间范围<sup>[22]</sup>,也支持伊泽奈岐板块在早白垩期间( $145 \sim 100$  Ma)由南到北作用于中国大陆东缘的观点,故应从火山岩空间分布上进一步思考。在整个侏罗纪时期,大兴安岭产出的侏罗纪火山岩均呈 NE 向展布,构造线与蒙古-鄂霍茨克构造带方向一致,期间伴有反映伸展构造背景的 A 型花岗岩、断陷盆地(如红旗组、万宝组和新民组)产生,反应大兴安岭侏罗纪火山岩主要产于蒙古-鄂霍茨克洋南向俯冲的弧后伸展背景<sup>[3]</sup>。但在早白垩世发育的大量火山岩呈 NNE 向展布,此构造线与古太平洋构造带近平行,并具有板块俯冲特征钙碱性火山岩和少量钾玄岩,暗示此时期可能存在古太平洋板块西向俯冲<sup>[23]</sup>。早白垩世早期( $145 \sim 130$  Ma)火山岩 NNE 向空间展布不同于中晚侏罗世火山岩的 NE 向展布,指示在晚侏罗世—早白垩世早期发生两个构造域转换<sup>[1]</sup>。法拉隆板块、伊泽奈岐板块和库拉板块是古太平洋板块重要组成部分<sup>[24]</sup>,大量研究成果表明:伊泽奈岐板

块从 145 Ma 开始,向北或北西向斜向俯冲于东亚大陆之下<sup>[25]</sup>。大兴安岭  $134 \sim 126$  Ma 的火山岩出露最多,指示该时期大兴安岭遭受构造运动作用和火山活动最强<sup>[1]</sup>,此时期伊泽奈岐板块也是运动最快、斜向俯冲作用最强(30 cm/a 高速北北西向运动)<sup>[26]</sup>。自早白垩世早期至晚期,大兴安岭火山岩总体上显示由西向东迁移的时空分布特征,响应了伊泽奈岐板块在此时期后退式西向俯冲作用,二者具有很好的同步性<sup>[1]</sup>。

综上分析认为,大兴安岭北部十五里桥地区光华组流纹岩形成于古太平洋板块中伊泽奈岐板块西向后退式俯冲后的伸展环境。

## 5 结论

通过对大兴安岭北段十五里桥地区光华组火山岩的年代学和岩石地球化学研究,可以得到以下结论:

- (1)十五里桥地区光华组流纹岩成岩年龄为  $129.3 \pm 1.4$  Ma,指示其形成于早白垩世晚期。
- (2)十五里桥地区光华组流纹岩属 A<sub>2</sub> 亚型中的 ALAG 型,是下地壳岩石部分熔融的产物。
- (3)十五里桥地区光华组火山岩形成于伊泽奈岐板块西向后退式俯冲后的伸展环境。

## 参考文献(References):

- [1] 杨晓平,江斌,杨雅军. 大兴安岭早白垩世火山岩的时空分布特征[J]. 地球科学, 2019, 44(10): 3237

- 3251.
- [2] 崔玉斌, 王凯, 何付兵, 等. 大兴安岭北段奇力滨地区玛尼吐组火山岩年代学、地球化学特征及其构造意义 [J]. 地质学报, 2021, 95(11): 3301–3316.
- [3] 杨雅军, 杨晓平, 江斌, 等. 大兴安岭中生代火山岩地层时空分布与蒙古—鄂霍茨克洋—古太平洋板块俯冲作用响应 [J]. 地学前缘, 2022, 29(02): 115–131.
- [4] 张超, 吴新伟, 张渝金, 等. 大兴安岭北段龙江盆地光华组碱流岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义 [J]. 地质通报, 2017, 36(09): 1531–1541.
- [5] 姜云鹏. 内蒙古呼伦贝尔北部中生代火山岩地层的划分及其成因机制 [D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2013.
- [6] 张克信, 何卫红, 徐亚东, 等, 肖庆辉, 潘桂棠. 中国洋板块地层分布及构造演化 [J]. 地学前缘, 2016, 23(06): 24–30.
- [7] 王志强, 李娟, 王丽娟, 等. 兴安地块南段哈达地区中晚侏罗世侵入岩成因及对蒙古—鄂霍茨克洋演化的制约 [J]. 华东地质, 2023, 44(04): 386–401.
- [8] 和政军, 李锦轶, 莫申国, 等. 漠河前陆盆地砂岩岩石地球化学的构造背景和物源区分析 [J]. 中国科学(D辑), 2003, 33(12): 1219–1226.
- [9] 杨晓平, 杨雅军, 庞雪娇. 大兴安岭区域地质调查片区总结与服务产品开发成果报告(大兴安岭地区区域地质志) [R]. 沈阳: 中国地质调查局沈阳地质调查中心, 2019.
- [10] Loiselle M C, Wones D R. Characteristics and origin of anorogenic granite [J]. Geological Society of America, Abstracts with Programs, 1979, 11: 468.
- [11] 张旗, 冉皞, 李承东. A型花岗岩的实质是什么? [J]. 岩石矿物学杂志, 2012, 31(04): 621–626.
- [12] Whalen J B, Currie K L, Chappell B W. A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1987, 95: 407–419.
- [13] 孙德有, 吴福元, 高山, 等. 吉林中部晚三叠世和早侏罗世两期铝质 A型花岗岩的厘定及对吉东东部构造格局的制约 [J]. 地学前缘, 2005, 12(02): 263–275.
- [14] 刘昌实, 陈小明, 陈培荣, 等. A型岩套的分类, 判别标志和成因 [J]. 高校地质学报, 2003, 9(04): 573–591.
- [15] Wright J B. A Simple alkalinity ratio and its application to question of non-orogenic granite genesis [J]. Geological Magazine, 1969, 106: 370–384.
- [16] King P, White A J R, Chappell B W, et al. Characterization and origin of alumous A-type granites from the Lachlan fold belt, Southeastern Australia [J]. Journal of Petrology, 1997, 38: 371–391.
- [17] Wang C L, Huang H, Tong X X, et al. Changing provenance of late Neoarchean metasedimentary rocks in the Anshan–Benxi area, north China craton: Implications for the tectonic setting of the world-class Dataigou banded iron formation [J]. Gondwana Research, 2016, 40: 107–123.
- [18] 韩振哲, 赵海玲, 王盘喜, 等. 黑龙江伊春地区晚三叠世—早侏罗世铝质 A型正长—碱长花岗岩地球化学特征及其构造意义 [J]. 岩石矿物学杂志, 2009, 28(02): 97–108.
- [19] Tischendorf G, Paelchen W. Zur Klassifikation von Granitoiden [J]. Zeitschrift fuer Geologische Wissenschaften, 1985, 13(05): 615–627.
- [20] Rudnick R L, Gao S. Composition of the continental crust. Treatise on Geochemistry [M]. Oxford: Elsevier –Pergamon, 2003: 1–64.
- [21] Green T H. Significance of Nb/Ta as an indicator of geochemical processes in the crust–mantle system [J]. Chemical Geology, 1995, 120: 347–359.
- [22] Guo Z X, Yang Y T, Zyabrev S, et al. Tectonostratigraphic evolution of the Mohe–upper Amur basin reflects the final closure of the Mongol–Okhotsk ocean in the latest Jurassic–earliest Cretaceous [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2017, 145: 494–511.
- [23] Wang F, Zhou X H, Zhang L C, et al. Late Mesozoic volcanism in the Great Xing'an range (NE China): timing and implications for the dynamic setting of NE Asia [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2006, 251(1–2): 179–198.
- [24] Maruyama S, Isozaki Y, Kimura G, et al. Paleogeographic maps of the Japanese islands: plate tectonic synthesis from 750 Ma to the present [J]. Island Arc, 2012, 6(01): 121–142.
- [25] Muller R D, Seton M, Zahirovic S, et al. Ocean basin

- evolution and global-scale plate reorganization events since Pangea breakup [J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 2016, 44(01): 107–138.
- [26] 杨海斌, 田小波, 白志明, 等. 浅谈中国大陆东缘中生代地质演化与泛太平洋板块活动的关系 [J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2016, 46(03): 781–797.

---

作者简介:

第一作者:王久懿,1993 年生,男,黑龙江伊春人,中国地质调查局哈尔滨自然资源综合调查中心,工程师,主要研究方向为区域地质矿产调查。Email: jywangcugb@163. com;

通讯作者:周传芳,1985 年生,男,黑龙江兰西人,硕士,中国地质调查局哈尔滨自然资源综合调查中心,正高级工程师,主要研究方向为区域地质矿产调查。Email: 546011015@qq. com

---

# U-Pb Chronology, Geochemistry and Geological Significance of Early Cretaceous Volcanic Rocks in Shiwuliqiao Area, Northern Greater Khingan Mountains

WANG Jiuyi<sup>1,2,3</sup>, GU Meng<sup>4</sup>, ZHOU Chuanfang<sup>1,2,3 \*</sup>

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

2. Northeast Geological S&T Innovation Center of China Geological Survey, Shenyang 110034, China;

3. Observation and Research Station of Earth Critical Zone in Black Soil, Harbin, Ministry of Natural Resources  
Harbin 150086, China;

4. Heilongjiang Farms & Reclamation Academy of Sciences, Harbin 150038, China)

**Abstract:** The tectonic environment of the early Cretaceous volcanic rocks widely developed in the northern Greater Khingan Mountains. The zircon U-Pb chronology and petrogeochemistry of Guanghua rhyolite in the Shiwuliqiao area of the northern Greater Khingan Mountains are researched to constrain its petrogenesis and tectonic setting. The LA-ICP-MS zircon U-Pb weighted average age of Guanghua Formation rhyolite is  $129.3 \pm 1.4$  Ma (late early Cretaceous), belonging to peraluminous, subalkaline series volcanic rocks. The fractionation of light and heavy rare earth elements in the rocks is significant, with the characteristics of light rare earth elements enrichment, heavy rare earth elements deficit, and an obvious negative europium anomaly; The ratios of Rb/Sr, Nb/Ta, Th/U and Nb/Th indicate that the rocks derived from crustal; Alkalinity ratio ( $AR$ ), zircon saturation temperature, high Zr content and 10 000Ga/Al ratio, with depleted Ba, Sr, Ti indicates that the rocks have A-type granite characteristics; The volcanic rocks of Guanghua Formation are rich in LILE (such as Rb and K), depleted in HFSE (such as Ta, Nb, Ti and P), and the distribution characteristics in Rb-(Nb+Y) and Rb-(Ta+Yb) discrimination maps show that the rocks have the geochemical characteristics of island arc volcanic rocks. Comprehensive analysis shows that the volcanic rocks in this area are the product of partial melting of the crust, formed in the extensional environment after the backward subduction of the Izenaki Plate to the East Asian continent.

**Key words:** zircon U-Pb dating; geochemistry; tectonic setting; Guanghua Formation; Greater Khingan Mountains

# 漠河古莲河林场侵入岩年代学、岩石地球化学特征研究

朱显男<sup>1,2</sup>, 陆胜<sup>1,2\*</sup>, 李一成<sup>1,2</sup>, 欧诗炜<sup>1,2</sup>, 苗志风<sup>1,2</sup>, 王佳辉<sup>1,2</sup>, 翡哲羽<sup>1,2</sup>

(1. 中国地质调查局哈尔滨自然资源综合调查中心, 哈尔滨 150086;  
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 150086)

**摘要:** 古莲河林场地区在大地构造单元上位于大兴安岭北段额尔古纳地块北部漠河前陆盆地边缘地带。本文在对大兴安岭漠河古莲河林场侵入岩岩相学特征分析的基础上, 结合年代学及地球化学特征研究, 分析探讨了其侵位时代、岩浆源区和形成的大地构造环境。锆石 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学分析结果表明, 区内花岗岩形成于  $203 \pm 1.6$  Ma, 反映其为晚三叠世—早侏罗世岩浆活动的产物。岩石地球化学特征表明: 花岗岩的  $w(\text{SiO}_2)$  为  $74.47\% \sim 76.85\%$ ,  $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$  为  $12.44\% \sim 13.62\%$ , 里特曼指数 ( $\sigma$ ) 为  $1.79 \sim 2.29$ , 属高钾钙碱性系列岩石, 具有较低的  $Mg^{\#}$  值 ( $18.22 \sim 28.38$ ),  $w(\text{TiFe}_2\text{O}_3)$  为  $0.98\% \sim 1.55\%$ ,  $w(\text{CaO})$  为  $0.19\% \sim 0.71\%$ , 轻重稀土分馏明显且显示出轻稀土富集、重稀土亏损的特征,  $\delta\text{Eu}$  介于  $0.07 \sim 0.74$ , Rb、Th、U、Pb 等大离子亲石元素表现出富集的特点, 高场强元素 Ba、Sr、Eu、Ti 等表现出一定程度的亏损。上述结果表明, 古莲河林场花岗岩原始岩浆来自于地壳, 形成于造山阶段挤压环境, 是蒙古—鄂霍茨克洋俯冲碰撞的产物。

**关键词:** LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年; 地球化学; 侵入岩; 古莲河林场

中图分类号:P585.3

文献标志码:A

文章编号:1672-2736(2025)09-0079-12

## 0 引言

研究区大地构造位置处于额尔古纳地块北部的漠河前陆盆地, 自元古代起直至中生代, 相继历经了基底形成、古亚洲洋形成与演化过程, 以及蒙古—鄂霍茨克洋的闭合, 滨太平洋板块的俯冲作用等一系列重要地质事件, 塑造了研究区的地质架构与演化历程。

研究区晚三叠世—早侏罗世侵入岩大面积出露, 关于该期侵入岩的岩石成因和构造背景等问题前人已经进行了一些研究, 但部分研究仍存在争议。一些学者认为, 大兴安岭漠河前哨林场花岗岩是起源于地幔的原始基性岩浆经结晶分异及地壳物质的同化混染的产物, 形成于蒙古—鄂霍茨克洋俯冲碰撞造山构造体制下的挤压环境<sup>[1,2]</sup>; 大兴安岭北段卧都河地区早侏罗世花岗

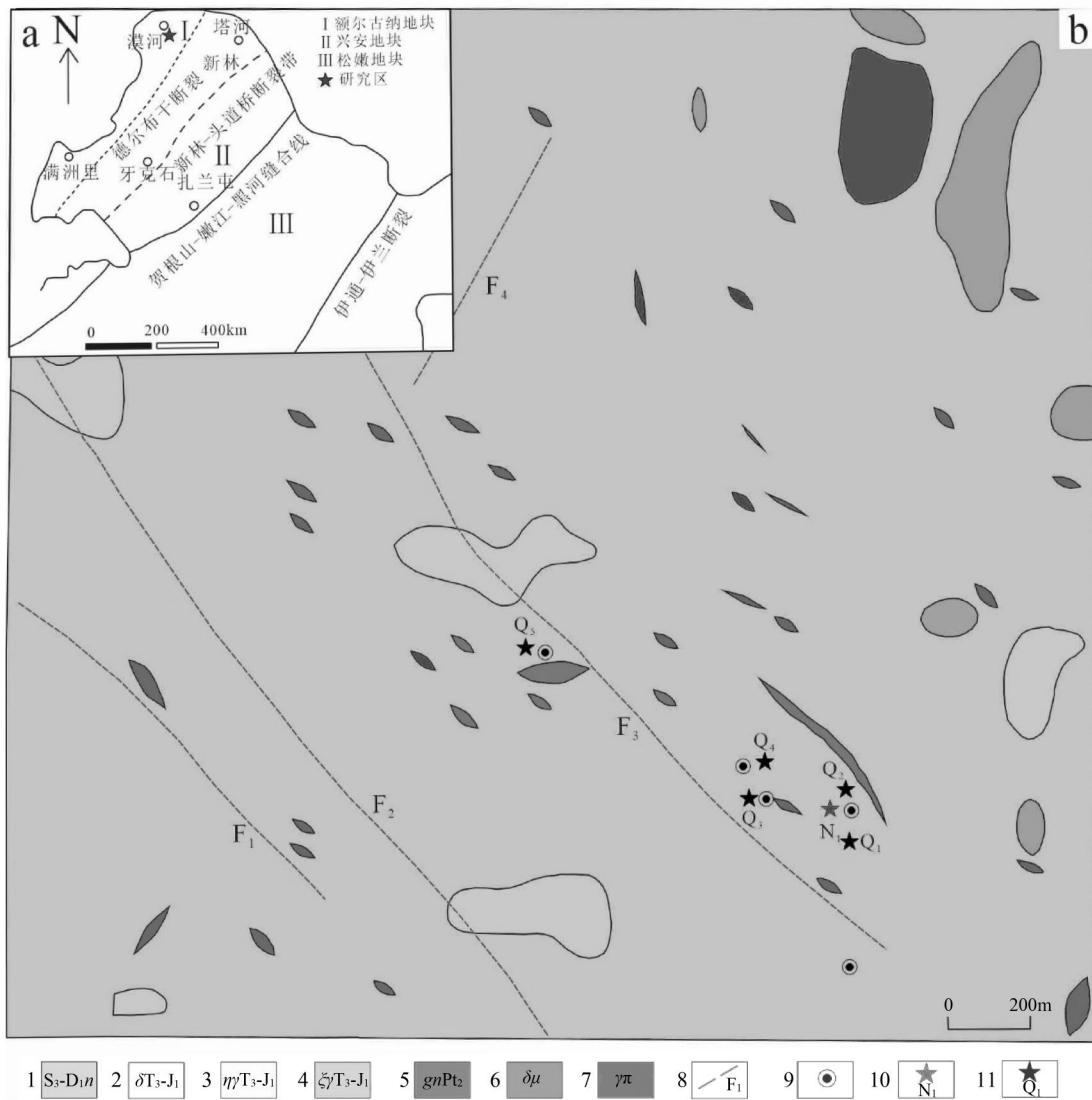
岩为地壳内岩浆岩熔融形成的 I 型花岗岩, 是蒙古—鄂霍茨克洋闭合构造背景下造山环境中岩浆活动的产物<sup>[3]</sup>; 分布于大兴安岭北段其地区的早侏罗世花岗岩则为后造山或后碰撞伸展环境下长英质地壳部分的熔融产物<sup>[4]</sup>; 大兴安岭北部早侏罗世侵入岩为 I 型花岗岩, 形成于造山环境<sup>[5]</sup>。

针对研究区晚三叠世—早侏罗世侵入岩岩石成因和构造背景等存在的争议, 笔者在对区内侵入岩岩相学特征分析的基础上, 结合年代学及地球化学特征研究, 分析探讨了其侵位时代、岩浆源区和形成的大地构造环境。

## 1 概况

研究区大地构造位置属于大兴安岭北段额尔古纳地块以北的漠河前陆盆地边缘(图 1a)。

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(DD20242753)。



1—泥鰍河组；2—晚三叠世—早侏罗世闪长岩；3—晚三叠世—早侏罗世二长花岗岩；4—晚三叠世—早侏罗世正长花岗岩；5—中元古代花岗质片麻岩；6—闪长玢岩脉；7—花岗斑岩脉；8—推测断裂；9—钻孔位置；10—年龄样位置及编号；11—套样位置及编号

图 1 研究区大地构造位置(a)及地质简图(b)

(图片来源:参考文献[3])

区内地层不发育,仅在东南部出露古生界志留系普里道利统-泥盆系中统泥鰍河组( $S_3-D_1n$ ),呈不规则状残留体状,面积 $0.01\text{km}^2$ ,岩性为深灰色泥质板岩(图 1b)。

研究区侵入岩发育,可划分为中元古代侵入岩和晚三叠世—早侏罗世侵入岩(图 1b)。中元古代侵入岩出露于研究区东北角,面积 $0.071\text{km}^2$ ,岩性为二长花岗质片麻岩( $\eta\gamma gnPt_2$ ),岩石呈灰色,中粗粒花岗结构,片麻状构造。岩石主要矿物组成为斜长石(含量为 $30\sim35\%$ )、钾

长石(含量为 $25\sim30\%$ )、石英(含量约 $35\%$ )和黑云母(含量约 $15\%$ )。其中,斜长石颜色为灰白色,形态上多呈半自形板状,粒径多在 $0.5$ 到 $1.5\text{mm}$ 之间;钾长石多表现出他形粒状,表现出一定的高岭土化,粒径变化于 $0.5\sim2\text{mm}$ 之间;石英为灰色,晶型呈他形粒状,粒径在 $0.5\sim1.2\text{mm}$ 之间;黑云母为黑色片状,粒径为 $0.2\sim1\text{mm}$ 。

晚三叠世—早侏罗世侵入岩在研究区大面积出露,面积 $6.554\text{km}^2$ ,岩性主要为细中粒二长

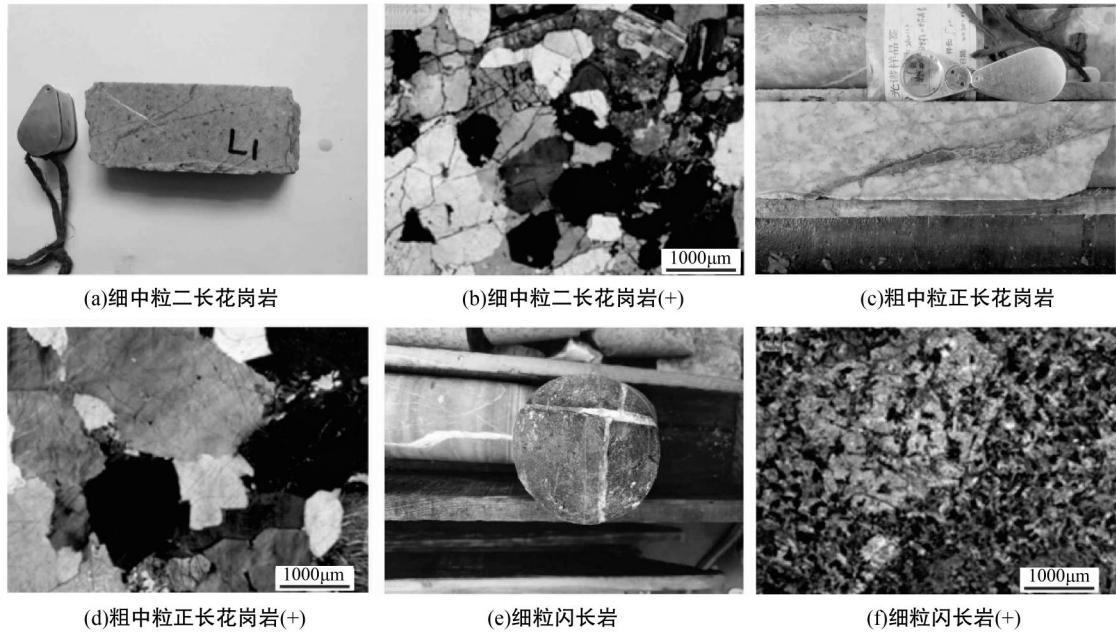


图 2 研究区侵入岩宏观及显微特征照片

花岗岩, 及少量粗中粒正长花岗岩、中细粒似斑状二长花岗岩和细粒闪长岩。细中粒二长花岗岩整体颜色为浅灰色, 为细中粒花岗结构, 块状构造, 主要矿物组成为斜长石(含量为 35~40%)、钾长石(含量为 30~35%)、石英(含量约 25%)、黑云母(含量为 3~5%), 粒径以 0.2~2mm 之间为主(图 2a-b); 粗中粒正长花岗岩新鲜面多呈浅肉红色, 为粗中粒花岗结构, 块状构造, 主要矿物组成为斜长石(含量为 15~20%)、钾长石(含量为 50~55%)、石英(含量为 20~25%)、黑云母(含量为 3~5%), 矿物粒径多在 2~5mm 之间(图 2c-d); 中细粒似斑状二长花岗岩呈浅灰色, 含白斑状中细粒花岗结构, 块状构造, 由粒径在 8~10mm 之间的斑晶(含量为 5~10%), 及粒径为 0.5~5.0mm 的基质(含量为 90~95%)所组成。其中, 斑晶主要由钾长石(含量为 2~5%)、石英(含量为 2~5%)组成; 细粒闪长岩呈灰色, 细粒结构, 块状构造, 由斜长石(含量为 55~60%)和角闪石(含量为 40~45%)所组成, 矿物粒径 0.3~2.0mm(图 2e-f)。

研究区内断裂构造发育, 北西向及北东向均有发育, 脉岩展布方向多呈北西向展布(图 1b)。

## 2 实验样品及分析方法

本文在研究区采集了 1 件细中粒二长花岗岩(样品编号:N<sub>1</sub>)进行 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素测年, 并采集了 5 件细中粒二长花岗岩(样品编号分别为 Q1、Q2、Q3、Q4 和 Q5)进行主量元素和微量元素的分析。锆石 U-Pb 同位素定年相关实验步骤, 包括样品破碎、锆石分选、制靶处理、阴极发光成像以及最终的测试分析, 均在河北省区域地质矿产调查研究所实验室开展。具体的处理步骤为, 将所采集的用来定新的新鲜岩石样品进行破碎, 粒度介于 80~120 目之间, 后续借助电磁分离技术将锆石从中分选出, 最终利用双目镜进行进一步的纯化挑拣。挑选出的锆石与标准锆石置于玻璃板之上, 运用环氧树脂进行浇筑包裹, 制备成可供测试使用的样品靶。其后进行精细研磨, 使样品靶厚度缩减至原来大致一半程度, 充分暴露出锆石中心部分, 经过精细抛光处理后, 再利用阴极发光(CL)扫描电镜完成图像的采集。锆石 U-Pb 分析工作采用 LA-ICP-MS 完成, 所用 GeolasPro 激光剥蚀系统, 其主要构成包括 COMPExPro 102 ArF 193 nm 准分子激光器以及 MicroLas 光学系统, 配套的 ICP-

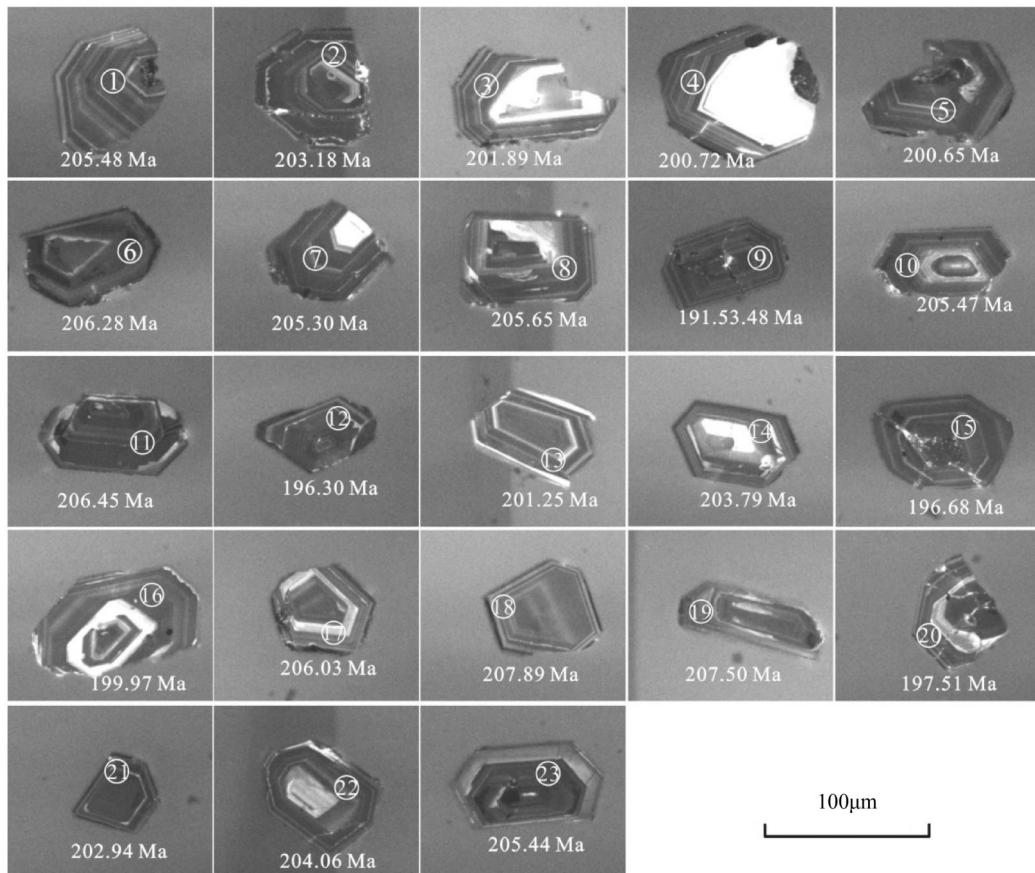


图 3 细中粒二长花岗岩锆石阴极发光照片

MS 设备型号为 Agilent 7900。U-Pb 同位素定年处理使用锆石标准 Tanz 和玻璃标准物质 NIST610 作为外标, 进行同位素校正, 分析数据的离线处理工作借助 ICPMSDataCal 软件完成, 借助 Isoplot/Ex\_ver3 软件完成了锆石 U-Pb 年龄谐和图绘制及年龄加权平均值计算。

全岩主量元素和微量元素分析工作均在河北省区域地质矿产调查研究所实验室开展。其中, 主量元素的测定采用熔片法 X-射线荧光光谱法 (XRF), 分析准确度与精度优于 2% 至 3%。对于微量元素和稀土元素的分析, 则先利用 Teflon 熔样罐进行熔样处理, 再运用 Finnigan MAT 公司 ICP-MS 进行测定, 分析的准确度和精度优于 10%。

### 3 测年结果

细中粒二长花岗岩中的锆石晶体展现出柱状晶面平整且发育良好的特征, 韵律环带构造清

晰可辨(图 3)。23 个测点 Th、U 含量较高, 分别为  $665.68 \times 10^{-6} \sim 3281.09 \times 10^{-6}$ 、 $1836.17 \times 10^{-6} \sim 4879.33 \times 10^{-6}$ , Th/U 值为 0.36~0.85, 显示为岩浆成因锆石(表 1)。

对采集的中细粒二长花岗岩样品中的 23 个锆石进行了 U-Pb 定年分析, 所有测点均位于 U-Pb 一致线上或紧邻该线的极小范围内, 谐和度高。 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄值介于 191~207Ma 区间, 加权平均年龄为  $203 \pm 1.6\text{ Ma}$ , MSWD = 1.9 (图 4)。鉴于锆石的岩浆成因和较好的谐和度, 可以认为  $203 \pm 1.6\text{ Ma}$  能够代表岩体结晶时代, 反映该中细粒二长花岗岩为晚三叠世至早侏罗世岩浆活动的产物。

## 4 地球化学特征

### 4.1 主量元素特征

研究区晚三叠世—早侏罗世侵入岩的岩石整体展现出高硅低镁, 其  $\text{SiO}_2$  含量为 74.47%~

表 1 细中粒二长花岗岩锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  比值及定年结果

测点号	同位素比值						年龄/Ma								
	$w_{\text{B}}/10^{-6}$	Th	U	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$			
					$1\sigma$	$1\sigma$	$1\sigma$	$1\sigma$	$1\sigma$	$1\sigma$	$1\sigma$	$1\sigma$			
1	2106.66	3928.04	0.54	0.04889	0.001353	0.22057	0.00576	0.03239	0.00047	142.68	64.8050	202.38	4.7930	205.48	2.9079
2	874.09	2311.44	0.38	0.05122	0.001451	0.22832	0.00613	0.03202	0.00042	250.07	69.4325	208.81	5.0669	203.18	2.6472
3	1222.12	2694.42	0.45	0.04728	0.001202	0.20928	0.00508	0.03181	0.00040	64.91	-137.9450	192.95	4.2649	201.89	2.5050
4	665.68	1836.17	0.36	0.04703	0.001289	0.20684	0.00540	0.03163	0.00037	50.10	72.2150	190.90	4.5449	200.72	2.3029
5	3281.09	3848.03	0.85	0.05177	0.001301	0.22780	0.00562	0.03162	0.00041	275.99	57.4000	208.38	4.6480	200.65	2.5841
6	1455.27	3051.71	0.48	0.04855	0.001089	0.22015	0.00514	0.03252	0.00038	124.16	58.3275	202.03	4.2766	206.28	2.3927
7	1204.48	1913.89	0.63	0.05443	0.001581	0.24749	0.00856	0.03236	0.00044	387.09	66.6600	224.54	6.9692	205.30	2.7458
8	1186.68	2240.61	0.53	0.05459	0.001435	0.24631	0.00656	0.03242	0.00040	394.50	54.6250	223.58	5.3431	205.65	2.5304
9	1762.88	3397.80	0.52	0.05686	0.001375	0.23851	0.00564	0.03016	0.00037	487.08	53.6975	217.20	4.6241	191.53	2.3325
10	1013.62	2121.75	0.48	0.05402	0.002035	0.24330	0.00636	0.03239	0.00043	372.28	85.1775	221.12	5.1976	205.47	2.7015
11	1736.87	3660.32	0.47	0.05388	0.001237	0.24368	0.00531	0.03254	0.00037	364.87	47.2175	221.43	4.3394	206.45	2.3316
12	2271.66	4879.33	0.47	0.07225	0.001352	0.31141	0.00614	0.03092	0.00032	994.45	38.8925	275.28	4.7582	196.30	2.0279
13	1342.36	2795.55	0.48	0.05000	0.001015	0.22063	0.00436	0.03171	0.00030	194.53	48.1400	202.43	3.6329	201.25	1.8804
14	966.74	2081.08	0.46	0.06736	0.003172	0.30271	0.00789	0.03212	0.00036	850.00	98.1450	268.52	6.1548	203.79	2.2772
15	1635.70	3451.40	0.47	0.05476	0.001743	0.23649	0.00517	0.03098	0.00029	466.71	72.2150	215.54	4.2462	196.68	1.8396
16	1817.86	3769.56	0.48	0.05348	0.001598	0.23451	0.00464	0.03151	0.00031	350.06	68.5125	213.92	3.8207	199.97	1.9253
17	1550.70	2627.34	0.59	0.05389	0.003210	0.24612	0.00586	0.03248	0.00041	364.87	130.5425	223.42	4.7742	206.03	2.5361
18	1191.72	2706.85	0.44	0.05093	0.001345	0.23287	0.00652	0.03277	0.00041	238.96	61.1000	212.57	5.3757	207.89	2.5313
19	1937.78	3528.91	0.55	0.04435	0.002909	0.20358	0.00465	0.03271	0.00036			188.15	3.9239	207.50	2.2518
20	1150.58	2356.79	0.49	0.05996	0.001575	0.25976	0.00664	0.03111	0.00038	611.13	57.3950	234.47	5.3539	197.51	2.3800
21	2657.71	4146.43	0.64	0.05395	0.001085	0.24015	0.00463	0.03198	0.00031	368.57	44.4400	218.54	3.7935	202.94	1.9498
22	938.05	2038.91	0.46	0.05734	0.001916	0.25628	0.00638	0.03216	0.00048	505.60	74.0675	231.67	5.1618	204.06	3.0209
23	1922.30	3890.63	0.49	0.05242	0.001280	0.23645	0.00579	0.03238	0.00049	305.62	55.5500	215.51	4.7548	205.44	3.0857

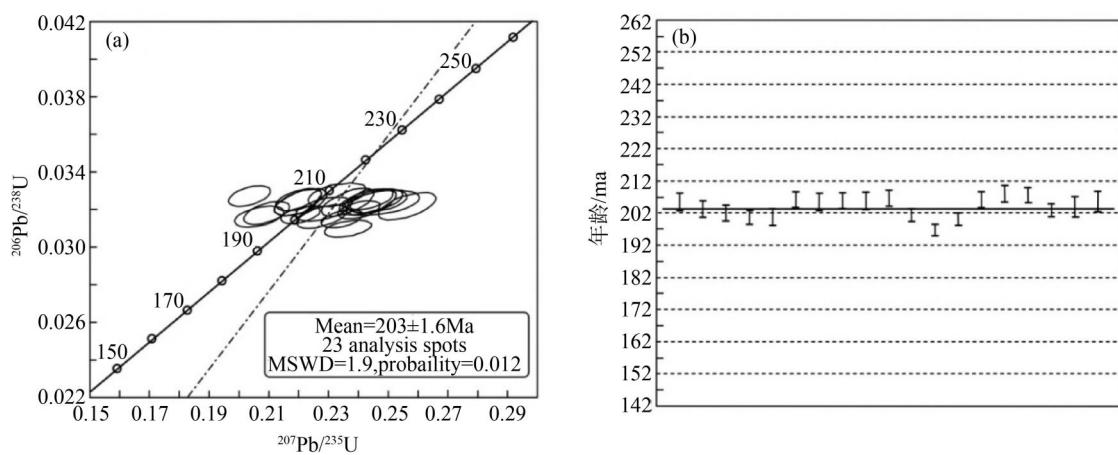


图 4 U-Pb 同位素测年谱和图和同位素测年加权平均图

76.85%,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量为 12.44%~13.62%,  $\text{TFe}_2\text{O}_3$  含量为 0.98%~1.55%,  $\text{CaO}$  含量为 0.19%~0.71%,  $\text{MgO}$  含量为 0.10%~0.20%,  $\text{Mg}^{\#}$  值范围在 18.22 至 28.38 之间,  $\text{TiO}_2$  含量介于 0.02%~0.10%, 特曼指数  $\sigma$  处于 1.79~2.29 的区间, 反映岩石属于钙碱性系列(表 2)。

在 TAS 图解(图 5a)中,所有样品的成分投点均位于花岗岩区域内。在  $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$  图解(图 5b)中,样品均归类于高钾钙碱性系列;其 A/CNK 比值在 1.00~1.16 之间, A/NK 比值则介于 1.09~1.21, 在铝饱和指数图解(图 5c)中,所有样品均显示为过铝质特征。在 A 型花岗岩判

别图解(图 5d-f)中,样品无一例外地落入 I 型花岗岩的分类区域。

#### 4.2 稀土元素特征

晚三叠世—早侏罗世侵入岩的稀土元素总量( $\Sigma \text{REE}$ )在  $103.87 \times 10^{-6}$ ~ $165.50 \times 10^{-6}$  之间, 平均为  $127.67 \times 10^{-6}$ 。 $\delta \text{Eu}$  负异常较为明显(0.07~0.74), 具有富集轻稀土亏损重稀土的特征( $\text{LREE}/\text{HREE} = 1.10 \sim 4.13$ ), 在稀土元素配分模式图(图 6a)上,所有样品表现出右倾的趋势。另外, 镓异常与轻重稀土分离具有明显的相关性(表 3)。

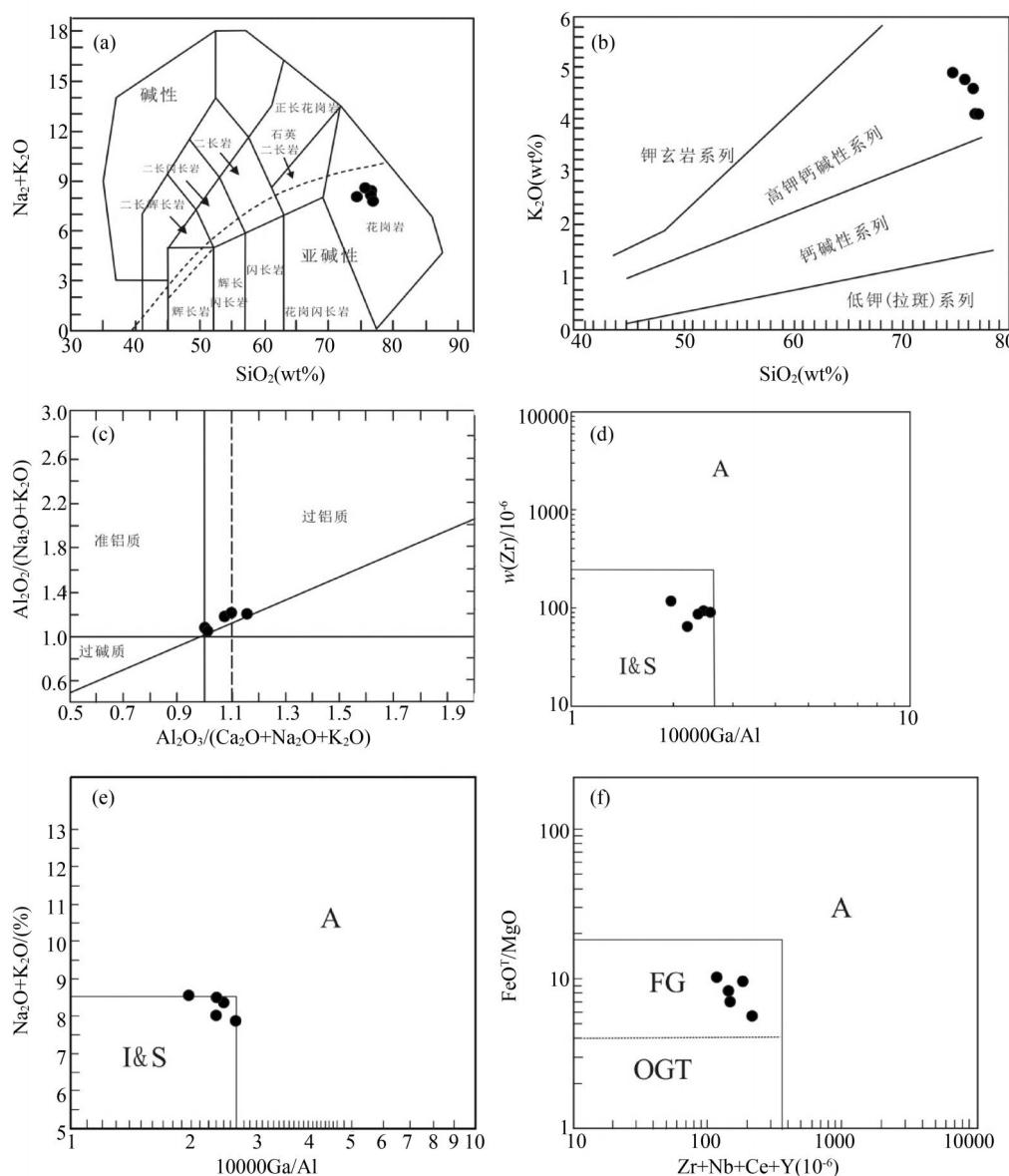


图 5 晚三叠世—早侏罗世侵入岩分类图解

表 2 常量元素化学分析结果

样号	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5
SiO <sub>2</sub>	76.74	76.66	76.85	75.84	74.47
TiO <sub>2</sub>	0.02	0.02	0.02	0.02	0.10
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12.55	12.72	12.44	12.86	13.62
TFe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.98	1.55	1.12	1.12	1.18
FeO	0.89	0.98	0.71	1.09	0.82
MnO	0.05	0.12	0.05	0.07	0.11
MgO	0.10	0.19	0.16	0.11	0.20
CaO	0.59	0.19	0.64	0.71	0.66
Na <sub>2</sub> O	4.27	3.42	3.64	3.83	3.62
K <sub>2</sub> O	4.13	4.60	4.13	4.78	4.86
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.03	0.03	0.03	0.03	0.05
LOI	0.92	1.06	1.23	1.20	1.40
Total	100.38	100.57	100.33	100.57	100.26
A/NK	1.09	1.20	1.19	1.12	1.21
A/CNK	1.00	1.16	1.07	1.01	1.10
σ	2.09	1.91	1.79	2.26	2.29
Mg <sup>#</sup>	19.41	22.08	24.93	18.22	28.38

注:  $\sigma = [ (w[\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}])^2 / (w(\text{SiO}_2)-43) ]^{1/2}$

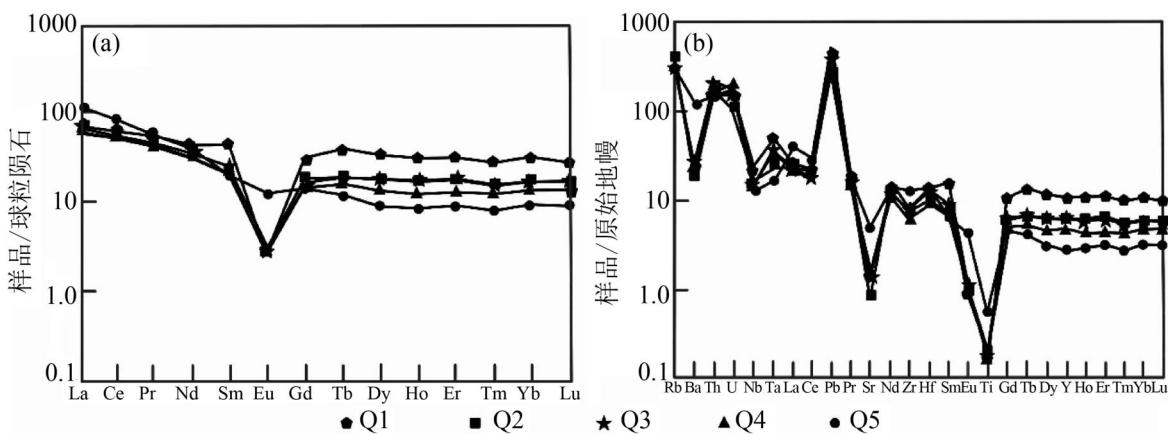


图 6 稀土元素球粒陨石标准化配分曲线和微量元素原始地幔标准化蛛网

#### 4.3 微量元素特征

晚三叠世—早侏罗世侵入岩微量元素数据见表 4,微量元素原始地幔标准化蛛网图见图

6b。可以看出,该期侵入岩表现出富集 Rb、Th、U、Pb 等大离子亲石元素,相对亏损 Ba、Sr、Eu、Ti 等高场强元素。

表 3 稀土元素化学分析结果

样号	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5
La	17.20	16.96	15.70	14.60	27.05
Ce	37.71	34.79	33.55	32.06	51.50
Pr	5.18	4.25	4.25	4.04	5.44
Nd	20.32	16.32	16.73	14.73	18.84
Sm	6.76	3.50	3.95	3.15	3.07
Eu	0.16	0.16	0.19	0.15	0.73
Gd	6.31	3.42	3.79	3.04	2.90
Tb	1.43	0.70	0.73	0.59	0.45
Dy	8.50	4.59	4.58	3.40	2.28
Ho	1.80	1.01	0.99	0.70	0.48
Er	5.26	3.14	3.01	2.15	1.51
Tm	0.72	0.40	0.40	0.32	0.21
Yb	5.43	2.89	2.96	2.36	1.59
Lu	0.72	0.42	0.44	0.36	0.23
Y	48.02	27.38	28.73	22.25	12.78
$\Sigma$ REE	165.50	119.92	119.99	103.87	129.08
LREE/HREE	1.10	1.67	1.62	1.93	4.13
$\delta$ Eu	0.07	0.14	0.15	0.15	0.74

表 4 微量元素化学分析结果

样号	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5
Li	1.37	2.52	2.69	1.65	2.13
Be	2.30	1.94	2.48	2.04	2.17
Sc	2.76	1.92	2.81	2.53	2.42
Ti	234.40	264.34	235.73	214.49	675.92
V	1.57	1.78	1.10	0.89	4.24
Cr	3.12	2.03	3.32	3.58	12.47
Co	0.28	0.39	0.33	0.29	0.75
Ni	0.95	0.56	0.82	0.85	1.41
Ga	16.23	15.50	17.14	15.74	13.90
As	0.70	0.90	0.91	0.76	0.64
Rb	219.25	252.16	218.75	257.79	196.72
Sr	30.00	17.25	32.97	32.81	101.97
Zr	90.43	84.43	86.95	67.92	142.17
Nb	16.08	11.84	11.53	10.66	9.03
Cd	0.24	0.12	0.11	0.11	0.75
In	0.02	0.02	0.04	0.02	0.01
Sb	0.71	1.76	1.44	1.20	4.50
Cs	1.90	2.88	2.49	3.12	3.13

续表

样号	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5
Ba	126.12	125.39	191.87	146.84	849.76
Zr	90.43	84.43	86.95	67.92	142.17
Nb	16.08	11.84	11.53	10.66	9.03
Cd	0.24	0.12	0.11	0.11	0.75
In	0.02	0.02	0.04	0.02	0.01
Cs	1.90	2.88	2.49	3.12	3.13
Ba	126.12	125.39	191.87	146.84	849.76
Hf	4.13	3.12	4.07	2.90	4.24
Ta	1.97	1.01	1.54	1.28	0.69
Re	0.08	0.09	0.09	0.09	0.09
Tl	1.11	1.30	1.20	1.37	1.24
Pb	29.68	18.44	19.90	18.32	34.53
Bi	0.14	0.15	0.13	0.13	0.09
Th	16.78	14.42	18.44	13.36	12.78
U	3.15	2.31	3.46	4.24	4.00

## 5 讨论

### 5.1 岩浆来源

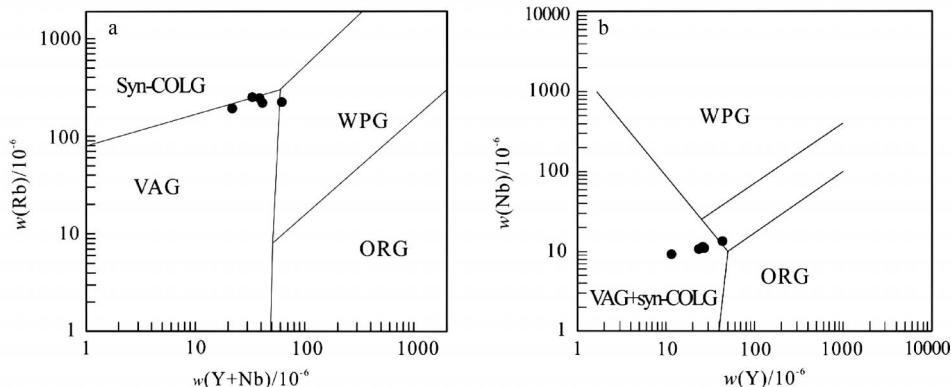
大兴安岭漠河地区古莲河林场侵入岩锆石 U-Pb 测年结果表明中细粒二长花岗岩形成于晚三叠世—早侏罗世。关于该期侵入岩的成因及岩浆来源存在三种不同的认识:一是其形成于古亚洲洋闭合后伸展构造环境下,岩浆起源于闭合过程中壳幔相互作用形成的地幔源区<sup>[14]</sup>;二是认为其为长英质地壳部分熔融的产物<sup>[3,4]</sup>;三是认为其属于壳幔混熔的 I 型花岗岩<sup>[5]</sup>。大兴安岭漠河地区古莲河林场地区广泛出露晚三叠世至早侏罗世侵入岩,主要岩性为花岗岩。这类花岗岩属于高钾钙碱性系列,具有较低的 Mg<sup>#</sup>值,轻稀土富集和重稀土亏损特征显著,显示出铕的负异常,富集大离子亲石元素而相对亏损高场强元素。根据这些岩石地球化学特征分析,可以推断该地区花岗岩的原始岩浆起源于地壳物质的熔融。

### 5.2 构造背景

研究区在元古代经历了 Rodinia 超大陆裂

解、新林-喜桂图洋洋内俯冲,古生代经历了古亚洲洋板块俯冲作用;中生代经历了华北板块与蒙古兴安地块的碰撞拼合、蒙古-鄂霍茨克洋陆内俯冲、蒙古-鄂霍茨克洋闭合及古太平洋斜向俯冲等作用<sup>[3,4,13]</sup>。关于额尔古纳地块北部晚三叠世—早侏罗世所处构造背景存在不同的认识:一种观点认为当时处于蒙古-鄂霍茨克大洋板块俯冲于额尔古纳地块之下<sup>[15]</sup>;二是认为该时期侵入岩形成于蒙古-鄂霍茨克洋闭合过程中的造山环境<sup>[3,5]</sup>;三是认为该时期侵入岩形成于造山运动之后或碰撞作用结束后的构造环境,反映了伸展型大地构造背景<sup>[4]</sup>。

研究区侵入岩广泛分布,在 A 型花岗岩判别图解(图 5d-f)中,该期侵入岩均落入 I 型花岗岩区域;在构造环境判别图解中(图 7),样品表现出火山弧花岗岩及同碰撞花岗岩的地球化学特点,指示研究区的侵入岩是在碰撞造山环境中形成;根据锆石 U-Pb 同位素定年结果表明,该期侵入岩形成于晚三叠世—早侏罗世,是蒙古-鄂霍茨克洋俯冲碰撞的产物。



WPG—板内花岗岩;VAG—火山弧花岗岩;ORG—洋脊花岗岩;Syn-COLG 同碰撞花岗岩

图 7 研究区侵入岩  $w(\text{Rb})$ - $w(\text{Y}+\text{Nb})$  图解(a) 及  $w(\text{Nb})$ - $w(\text{Y})$  图解(b)

## 6 结论

通过对研究区侵入岩进行的岩石地球化学和年代学的研究,可得到以下结论:

(1) 研究区侵入岩的锆石具有典型的岩浆成因特征,其形成时间为  $203 \pm 1.6 \text{ Ma}$ ,时代为晚三叠世—早侏罗世。

(2) 研究区侵入岩属于高钾钙碱性系列,表现出大离子亲石元素和轻稀土相对富集而重稀土及高场强元素相对亏损,表明该期侵入岩岩浆来源于地壳。

(3) 大兴安岭漠河地区古莲河林场侵入岩形成于蒙古-鄂霍茨克洋俯冲碰撞造山阶段,是该时期挤压环境下岩浆活动的产物。

## 参考文献(References):

- [1] 刘艳君. 大兴安岭北段卧都河地区中生代花岗岩地球化学特征及其构造意义[D]. 长春: 吉林大学, 2016.
- [2] 王粉丽, 王海鹏, 鲁红峰, 等. 大兴安岭北部上其地区中生代花岗岩年代学、岩石地球化学特征及构造背景[J]. 地质科技情报, 2016, 35(04): 18–28.
- [3] 陆胜, 王可勇, 赵焕利, 等. 大兴安岭漠河前哨林场侵入岩年代学、岩石地球化学特征及其地质意义[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2021, 51(01): 126–140.
- [4] 陆胜, 王可勇, 张涵远, 等. 黑龙江漠河推覆带前哨林场锑金矿床流体包裹体特征及其地质意义[J]. 世界地质, 2020, 39(03): 557–568.
- [5] 戴慧敏, 杨忠芳, 马振东, 等. 大兴安岭查巴奇地区中生代侵入岩岩石地球化学特征及构造背景[J]. 中国地质, 2013, 40(01): 232–247.
- [6] 冯志强, 刘永江, 温泉波, 等. 大兴安岭北段塔源地区~330Ma 变辉长岩-花岗岩的岩石成因及构造意义[J]. 岩石学报, 2014, 30(07): 1982–1994.
- [7] 鞠文信, 苏士杰, 白翠霞, 等. 大兴安岭乌尔旗汉地区晚石炭世半拉山序列侵入岩特征[J]. 地质与资源, 2005, 140(03): 161–165.
- [8] 王伟, 许文良, 王枫, 等. 满洲里-额尔古纳地区中生代花岗岩的锆石 U-Pb 年代学与岩石组合: 对区域构造演化的制约[J]. 高校地质学报, 2012, 18(01): 88–105.
- [9] 武广, 陈衍景, 孙丰月, 等. 大兴安岭北端晚侏罗世花岗岩类地球化学及其地质和找矿意义[J]. 岩石学报, 2008, 24(04): 899–910.
- [10] 胡新露, 姚书振, 何谋春, 等. 大兴安岭北段岔路口和大黑山斑岩型钼矿床硫、铅同位素特征[J]. 矿床地质, 2014, 33(04): 776–784.
- [11] 高源, 郑常青, 姚文贵, 等. 大兴安岭北段哈多河地区骆驼脖子岩体地球化学和锆石 U-Pb 年代学[J]. 地质学报, 2013, 87(09): 1293–1310.
- [12] 牛延宏, 刘渊, 周志广, 等. 大兴安岭东北部塔河地区早白垩世高 Sr 低 Yb 型侵入岩的年代学、地球化学特征及地质意义[J]. 沉积与特提斯地质, 2016, 36(04): 95–105.
- [13] 祝洪臣, 张炯飞, 权恒. 大兴安岭中生代两期成岩成矿作用的元素、同位素特征及其形成环境[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2005, 35(04): 436–442.

- [14] 林强, 葛文春, 吴福元, 等. 大兴安岭中生代花岗岩类的地球化学[J]. 岩石学报, 2004, 20(03): 403-412.
- [15] 许文良, 王枫, 裴福萍, 等. 中国东北中生代构造体制与区域成矿背景: 来自中生代火山岩组合时空变化的制约[J]. 岩石学报, 2013, 29(02): 339-353.

---

作者简介:

第一作者:朱显男,男,1987年生,黑龙江巴彦人,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,主要研究方向为岩石地球化学。Email: 960625827@qq.com;

通讯作者:陆胜,男,1985年生,哈尔滨人,硕士,中国地质调查局哈尔滨自然资源综合调查中心,高级工程师,主要研究方向为矿床学及岩石地球化学。Email: dkwy2021@163.com

---

## Geochronology and Geochemistry of Intrusive Rocks in Gulianhe Forest Farm of Mohe Area

ZHU Xiannan<sup>1,2</sup>, LU Sheng<sup>1,2\*</sup>, LI Yicheng<sup>1,2</sup>, OU Shiwei<sup>1,2</sup>, MIAO Zhifeng<sup>1,2</sup>, WANG Jiahui<sup>1,2</sup>, JI Zheyu<sup>1,2</sup>

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

2. Observation and Research Station of Earth Critical Zone in Black Soil, Harbin, Ministry of Natural Resources,  
Harbin 150086, China)

**Abstract:** Gulianhe forest farm is located at the edge of Mohe foreland basin in the northern part of Eeguna block in the north of Great Xing'an Range. The authors studied the geochemistry, and geochronology of intrusive rocks in Gulianhe forest farm in Mohe area of Great Xing'an Range, and discussed the formation age, petrogenesis, and tectonic environment of the intrusive rocks. The results of LA-ICP-MS zircon U-Pb dating show that the granite was formed at  $(203 \pm 1.6)$  Ma, the age is Late Triassic- Early Jurassic in the study area. The petro-geochemical studies show that the  $w(\text{SiO}_2)$  of granite is 74.47%~76.85%,  $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$  is 12.44%~13.62% and the Ritman index ( $\sigma$ ) is 1.79~2.29, indicating that they belong to high-k calc alkaline series, they have low  $Mg^{\#}$  values (18.22~28.38),  $w(\text{TiFe}_2\text{O}_3)$  is 0.98%~1.55% and  $w(\text{CaO})$  is 0.19%~0.71%, significant fractionation of light and heavy rare earth elements with enrichment of LREE and depletion of HREE, and  $\delta \text{Eu}$  of 0.07~0.74, enrichment of large ion lithophile elements Rb, Th, U, Pb, and depletion of high field strength elements Ba, Sr, Eu, Ti. The above geochemical characteristics show that the original magma of granite came from the crust. The intrusive rocks in the study area were formed in the compressive environment during the orogenic stage, which were the product of the subduction and collision between Mongolian and Okhotsk Sea.

**Key words:** LA-ICP-MS zircon U-Pb dating; geochemistry; intrusive rock; Gulianhe forest farm

# 黑龙江省北安市地表水资源现状与评价

张海成<sup>1,2</sup>,段明新<sup>1,2\*</sup>,宋昊南<sup>1,2</sup>,赵喜东<sup>1,2</sup>,辛有涛<sup>1,2</sup>,赵洪强<sup>1,2</sup>

(1. 中国地质调查局哈尔滨自然资源综合调查中心, 哈尔滨 150086;  
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 150086)

**摘要:**水是生存之本,文明之源,生态之基。近年来,水资源的合理开发、利用、保护和管理已成为关乎人类社会可持续发展的关键问题。随着城市化进程的加快和农业用水的增加,北安市作为黑龙江省重要的粮食主产区,其地表水资源面临着严峻的挑战。本文以北安市为研究区,对该地区的地表水资源进行了详细的调查、评价与分析。经还原计算,北安市年平均地表水资源量为  $11.2008 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 径流深 155.7mm。通过采用单因子评价法对北安市地表水进行水质评价,结果表明该地区地表水资源质量总体良好,但部分区域受工业废水、农业面源污染等因素影响,水质稍差。通过地表水开发利用现状和开发利用潜力分析,掌握了该地区的水资源情势,并为促进北安市地表水资源的可持续利用提出了相应建议。

**关键词:**地表水;单因子评价法;北安市;径流还原

中图分类号:P641.6,P962

文献标志码:A

文章编号:1672-2736(2025)09-0091-9

## 0 引言

水,是生命之源,是地球上一切生物生存和发展不可或缺的重要物质基础。从广袤的海洋到奔腾的江河,从静谧的湖泊到地下的含水层,水资源以其多样的形态在地球的生态系统和人类社会中扮演着至关重要的角色<sup>[1]</sup>。我国作为一个水资源相对短缺且时空分布不均的国家,水资源问题尤为突出,气候变化和极端气候现象频发使水资源时空分布更加不均<sup>[2]</sup>。我国南方水资源较为丰富,而北方水资源较为短缺,区域水资源分布也不均衡<sup>[3]</sup>。北安市是黑龙江省重要的粮食产区,中国书画之乡,全国农村一二三产业融合发展先导区,为省经济社会全面发展做出了显著贡献。北安市地处多条河流交汇处,拥有丰富的地表水资源。但随着城市的发展,农田灌溉面积持续增长,地表水资源的压力与日俱增。本文对北安市地表水资源现状进行研究,旨为对加强水资源的循环利用和有效保护提供参考<sup>[4]</sup>。

## 1 研究区域概况

### 1.1 地理位置与地形地貌

北安市位于黑龙江省黑河市南部,地处黑龙江省北部区域中心<sup>[5]</sup>。地理坐标为东经  $126^{\circ}16' \sim 127^{\circ}53'$ 、北纬  $47^{\circ}35' \sim 48^{\circ}33'$  之间,全市辖 6 个街道办事处,9 个乡镇,10 个农林牧场,62 个行政村,总面积  $7193 \text{ km}^2$ 。

北安市东临逊克县、绥棱县,西与拜泉县、克东县接壤(图 1),南边以通肯河为天然界线与海伦市相望,北边与五大连池市相邻。是周边城市间往来沟通的重要节点,其所处位置具有重要的战略意义和经济价值。

北安市处于小兴安岭西南麓,是松嫩平原向兴安山地过渡的中间地带,地势呈东高西低、北高南低状态。东部属山区,地势相对较高,平均海拔高度在 400m 以上,最高三景山海拔 565m;中部是丘陵漫岗;西部为松嫩平原的边缘地带。

基金项目:中国地质调查局地质调查项目(DD20220852)。

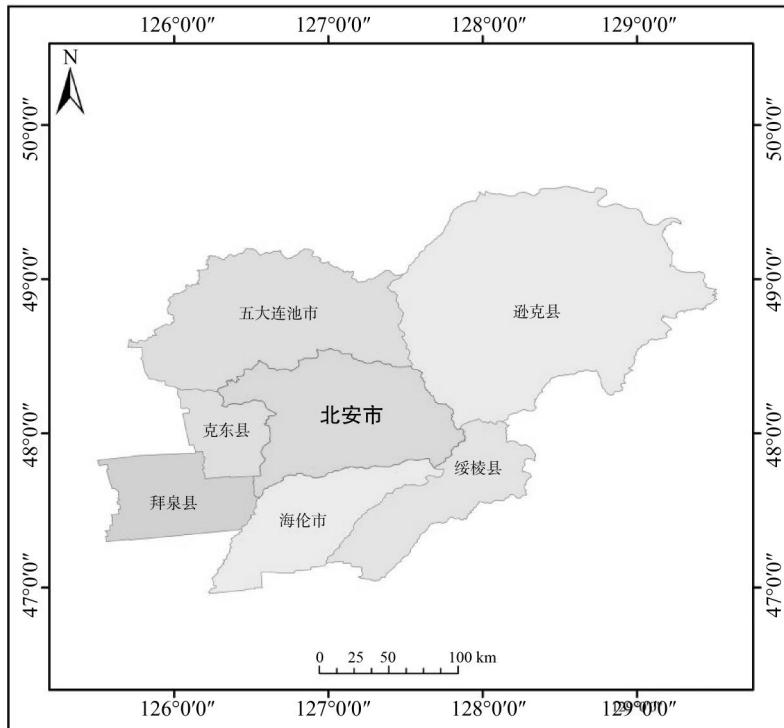


图 1 北安市地理位置图

(图片来源:<https://www.gscloud.cn/sources/index?pid=302>)

## 1.2 土壤植被

北安市土壤类型主要有黑土、暗棕壤、草甸土、沼泽土等。黑土是北安市较为肥沃的土壤类型之一,主要分布在平原地区,是农业生产的重要基础。暗棕壤多分布在山区,土层较薄,呈酸性反应,肥力相对较低。草甸土在河流沿岸、低地等水分充足的地方常见,土壤肥沃。沼泽土则多分布在低湿的地区。北安市属温带针阔叶混交林的边缘和由山前森林向松嫩草甸草原的过渡地带,野生植物共有 54 类 230 种,主要有大叶樟、小叶樟、苔草、三棱草等草本植物。

## 1.3 水文、气象条件

北安市属于中温带大陆性季风气候区,四季分明,降水充沛。冬季严寒而漫长,受西伯利亚冷空气影响显著,平均气温在零下 20℃ 左右,盛行西北风,降雪量较为可观,积雪期长,为农业土壤保墒与冬季生态系统的稳定提供了特殊的环境。春季气温波动回升,多大风天气,风速均值可达 3~5m/s,降水稀少,干燥的气候易造成土壤水分散失,对春播作物的出苗及早期生长构成挑

战。夏季短暂且温热,受东南季风影响,降水集中于 6~8 月,降水量约占全年的 60%~70%,常伴有雷暴等强对流天气,短时强降水可能导致局部地区出现洪涝灾害,而此时也是河流的丰水期,如乌裕尔河水位上涨,流速加快,径流量增大,对周边农田灌溉与水资源补给极为关键。秋季降温急剧,昼夜温差可达 10~15℃,初霜降临较早,一般在 9 月中旬前后,降水减少,河流径流量逐渐回落,整体气候向冬季过渡。

## 1.4 河流水系

北安市境内河流众多,主要属于嫩江流域。区域内河流纵横交错,有乌裕尔河、南北河、通肯河 3 条中型河流(图 2),多年平均径流总量为 10.86 亿 m<sup>3</sup><sup>[6]</sup>。此外,流域面积大于 50km<sup>2</sup> 的小河多达 45 条,干流和一级支流的总长达到 943km,形成了较为复杂的水系网络。

乌裕尔河发源于北安市的北部小兴安岭西侧,是嫩江左岸较大的无尾河流,流经北安、克东、克山、依安、富裕等县(市),为黑龙江省内最大的内陆河<sup>[7]</sup>。乌裕尔河全长 587km,流域面

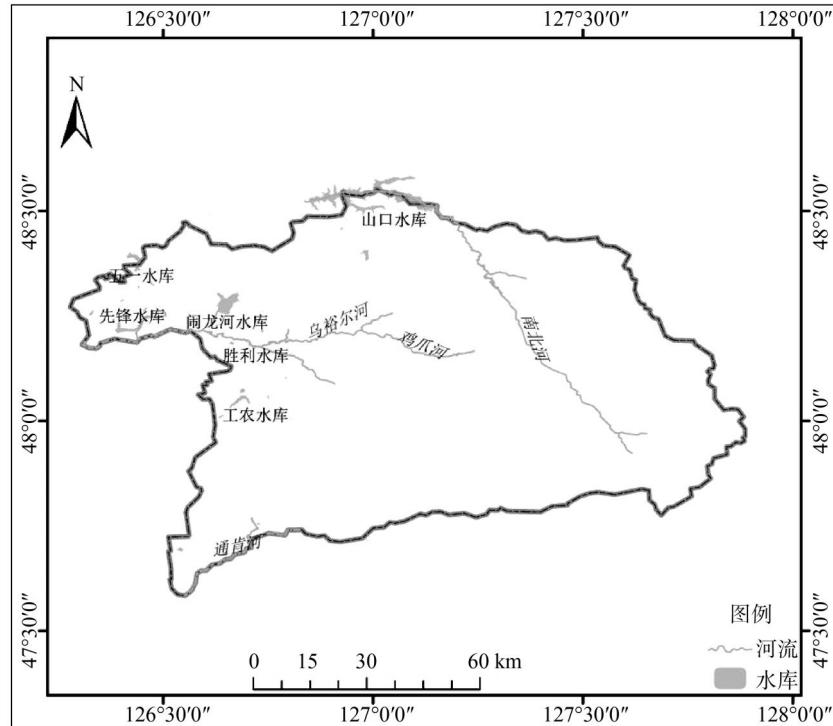


图2 北安市水系分布图

(图片来源: <https://www.gscloud.cn/sources/index?pid=302>)

积 $23110\text{km}^2$ 。

南北河发源于黑龙江省通北林业局井家店林场东南部,是讷谟尔河的支流。主河道经北安市东南向西北方向流去,经朝阳林场、建设林场、木沟河林场汇入讷谟尔河。南北河全长约98km,流域面积约 $1800\text{km}^2$ 。

通肯河发源于小兴安岭西南麓,是呼兰河流域的重要支流<sup>[8]</sup>,流经北安、海伦、拜泉、明水、青冈、望奎等县(市),汇入呼兰河。通肯河全长378km,流域面积 $10583\text{km}^2$ 。

## 2 地表水径流还原

北安市地表水资源较为丰富,市域面积 $7193\text{km}^2$ ,其地表水径流由降水、地下水、融雪、人工等方式补给。降水多集中于夏季,年际变化较大,导致地表水资源量在不同年份存在明显波动。地下水在一定程度上补给地表水径流,当地下水水位高于地表水水位时,地下水便会向地表水径流排泄,为其提供稳定的水量补充。在冬季降雪时段,春季气温回升后,积雪融化形成的水

流汇入地表水径流,成为季节性的重要补给源。此外,随着城市发展,人工调水、灌溉回流水等人工方式也在逐渐发挥作用,对地表水径流进行补给,进一步影响着北安市地表水资源的动态变化。

水资源调查评价和统计分析中采用的是天然年径流,由于人类活动改变了流域下垫面的自然状态<sup>[9]</sup>,同时也改变了河川径流量,使实测径流数值不能代表天然状态下的数值。所以,有必要把受人类活动影响的径流量还原至实测径流当中。也就是说,对于当年的实测径流量,要把人类活动所消耗、增加以及调蓄的水量尽可能全面细致地加以考虑并进行还原。唯有如此,方可确保径流量样本的一致性。在本文的调查评价里,针对因地表水资源开发利用而出现增减的水量,均予以还原计算,将还原后的径流量当作天然径流量。

### 2.1 还原计算方法

根据实际资料收集和实地调查情况,径流还原计算分别采用分项调查分析法<sup>[10]</sup>、经验公式

法。其计算公式为：

$$W_{\text{天然}} = W_{\text{实测}} + W_{\text{农灌}} + W_{\text{工业}} + W_{\text{城镇生活}} \pm W_{\text{库蓄}} \pm W_{\text{其它}} \quad (1)$$

式中： $W_{\text{天然}}$  为还原后的天然径流量； $W_{\text{实测}}$  为水文站实测径流量； $W_{\text{农灌}}$  为农业灌溉耗损量； $W_{\text{工业}}$  为工业用水耗损量； $W_{\text{城镇生活}}$  为城镇生活用水耗损量； $W_{\text{库蓄}}$  为大中型水库蓄水变量，增加为正，减少为负； $W_{\text{其它}}$  为矿坑排水以及地下水开采所产生的退水等。

根据北安市的实际情况，主要考虑农业灌溉耗损量、工业用水耗损量、城镇生活用水耗损量和水库蓄变量。

## 2.2 还原项目及计算

### (1) 农业灌溉耗水量

北安市主要作物有玉米、大豆等。据调查，玉米的灌溉定额  $M_1 = 3000 \text{m}^3/\text{hm}^2$ ，其生育期内的有效降水量  $P_1 = 1000 \text{m}^3/\text{hm}^2$ ，土壤储水量变化  $S_1 = 30 \text{m}^3/\text{hm}^2$ ，灌溉面积  $A_1 = 20000 \text{hm}^2$ ，灌溉回归系数  $\beta_1 = 0.2$ ；大豆的灌溉定额  $M_2 = 2500 \text{m}^3/\text{hm}^2$ ，生育期内的有效降水量  $P_2 = 800 \text{m}^3/\text{hm}^2$ ，土壤储水量变化  $S_2 = 20 \text{m}^3/\text{hm}^2$ ，灌溉面积  $A_2 = 15000 \text{hm}^2$ ，灌溉回归系数  $\beta_2 = 0.15$ 。运用公式：

$$W_{\text{灌还}} = \sum_{i=1}^n (M_i - P_i - S_i) \times A_i \times \beta_i \quad (2)$$

计算可得：

玉米灌溉耗水量还原量

$$W_{\text{玉米灌还}} = (3000 - 1000 - 30) \times 20000 \times 0.2 = 7880000 \text{m}^3$$

大豆灌溉耗水量还原量

$$W_{\text{大豆灌还}} = (2500 - 800 - 20) \times 15000 \times 0.15 = 3990000 \text{m}^3$$

则农业灌溉耗水量还原量

$$W_{\text{灌还}} = 7880000 + 3990000 = 11870000 \text{m}^3$$

农业灌溉耗水量经验公式：

$$W = \sum_{i=1}^{50} W_i = \sum_{i=1}^{50} k_i \times (A_{e,i} + A_{s,i}) \times m_i \quad (3)$$

式中： $W$  为农业灌溉耗水量； $i$  代表不同作物； $k_i$  为综合修正系数； $A_{e,i}$  为灌溉面积； $A_{s,i}$  为

其他相关面积； $m_i$  为灌溉定额。

通过调查数据计算可得：

$$W = 8400000 + 4125000 = 12525000 \text{m}^3$$

分项调查分析法计算为  $11870000 \text{m}^3$ ，经验公式法计算为  $12525000 \text{m}^3$ ，两者接近，原农业灌溉耗水量还原量计算合理。

### (2) 工业耗水量

经调查，北安市制造业取水量  $Q_1 = 500000 \text{m}^3$ ，用水重复利用率  $\alpha_1 = 0.5$ ；加工业取水量  $Q_2 = 300000 \text{m}^3$ ，用水重复利用率  $\alpha_2 = 0.45$ 。运用公式：

$$W_{\text{工还}} = \sum_{j=1}^m Q_j \times (1 - \alpha_j) \quad (4)$$

计算可得：

制造业耗水量还原量

$$W_{\text{制造业工还}} = 500000 \times (1 - 0.5) = 250000 \text{m}^3$$

加工业耗水量还原量

$$W_{\text{加工业工还}} = 300000 \times (1 - 0.45) = 165000 \text{m}^3$$

则工业耗水量还原量

$$W_{\text{工还}} = 250000 + 165000 = 415000 \text{m}^3$$

工业耗水量经验公式：

$$W = Q \times (1 - r) \quad (5)$$

式中： $W$  为工业耗水量； $Q$  为工业取水量； $r$  为用水重复利用率。

通过调查数据计算可得：

$$W = 800000 \times (1 - 0.47) = 424000 \text{m}^3$$

分项调查分析法计算为  $415000 \text{m}^3$ ，经验公式法计算为  $424000 \text{m}^3$ ，两者接近，原工业耗水量还原量计算合理。

### (3) 生活耗水量

根据人口统计数据，北安市城镇居民人口数  $P_{\text{城}} = 250000$  人，农村居民人口数  $P_{\text{乡}} = 180000$  人。结合居民用水调查得到城镇居民人均日用水量  $C_{\text{城}} = 0.18 \text{m}^3$ ，农村居民人均日用水量  $C_{\text{乡}} = 0.1 \text{m}^3$ 。运用公式：

$$W_{\text{生还}} = W_{\text{城还}} + W_{\text{乡还}} \quad (6)$$

其中  $W_{\text{城还}} = P_{\text{城}} \times C_{\text{城}} \times 365$ ， $W_{\text{乡还}} = P_{\text{乡}} \times C_{\text{乡}} \times 365$

计算可得：

城镇居民生活耗水量还原量

$$W_{城还} = 250000 \times 0.18 \times 365 = 16425000 \text{m}^3$$

农村居民生活耗水量还原量

$$W_{乡还} = 180000 \times 0.1 \times 365 = 6570000 \text{m}^3$$

则生活耗水量还原量

$$W_{生还} = 16425000 + 6570000 = 22995000 \text{m}^3$$

生活耗水量经验公式:

$$W = P \times q \times 365 \quad (7)$$

式中:  $W$  为生活耗水量;  $P$  为人口数量;  $q$  为人均日用水量。

通过调查数据计算可得:

$$W = 430000 \times 0.14 \times 365 = 22031000 \text{m}^3$$

分项调查分析法计算为  $22995000 \text{m}^3$ , 经验公式法计算为  $22031000 \text{m}^3$ , 差异在合理范围内, 原生活耗水量还原量计算合理。

#### (4) 水库蓄变量

通过对水库水位、库容曲线以及不同时段的监测数据, 确定计算时段内水库蓄水变量  $\Delta V = -200000 \text{m}^3$  (表示水库蓄水量减少), 则  $W_{库还} = -200000 \text{m}^3$ 。

水库蓄变量经验公式:

$$\Delta V_{水库蓄变量} = Q_{入} \times t - Q_{出} \times t - E \times S \quad (8)$$

式中:  $Q_{入}$  为入库流量;  $Q_{出}$  为出库流量;  $t$  为计算时段;  $E$  为水库水面蒸发量;  $S$  为水库水面面积。

通过调查数据计算可得:

$$\Delta V_{水库蓄变量} = 684900 - 864000 - 500 = -179600 \text{m}^3$$

分项调查分析法计算为  $-200000 \text{m}^3$ , 经验公式法计算为  $-179600 \text{m}^3$ , 差异在合理范围内, 原

水库蓄变量计算合理。

(5) 总径流还原量计算与分析。将上述各项还原量相加, 即:

$$W_{还} = W_{灌还} + W_{工还} + W_{生还} + W_{库还} \quad (9)$$

$$W_{还} = 11870000 + 415000 +$$

$$22995000 - 200000 = 34080000 \text{m}^3$$

经验公式法各项还原量相加, 即:

$$Q_{天然} = W_{农灌} + W_{工业} + W_{城镇生活} + \Delta V_{蓄}$$

(10)

$$Q_{天然} = 12525000 + 424000 +$$

$$22031000 - 179600 = 34800400 \text{m}^3$$

经分项调查分析法径流还原计算结果为  $34080000 \text{m}^3$ , 经验公式法径流还原计算结果为  $34800400 \text{m}^3$ , 本文采用分项调查分析法计算结果进行径流还原。

北安市年平均径流量为  $R_{实} = 1086000000 \text{m}^3$ , 天然径流量  $R_{天} = 1086000000 + 34080000 = 1120080000 \text{m}^3$ 。

(6) 径流深计算。运用公式:

$$h = \frac{Q}{A} \quad (11)$$

式中:  $h$  为径流深,  $Q$  为地表水资源量,  $A$  为面积。

计算可得:

$$h = 155.7 \text{mm}$$

### 2.3 计算成果分析

经计算, 北安市年平均地表水资源量为  $11.2008 \times 10^8 \text{m}^3$ , 折合径流深  $155.7 \text{mm}$ 。详见表 1 所示。

表 1 北安市地表水资源量统计表

行政分区	面积( $\text{km}^2$ )	年平均地表水资源量 ( $\times 10^8 \text{m}^3$ )	径流深(mm)	径流系数
北安市	7193	11.2008	155.7	0.311

通过收集整理北安市历年水文监测资料, 并结合实地勘察数据, 对北安市地表水资源量进行了详细调查。结果表明, 北安市平均年地

表水资源总量较为丰富, 但受气候变化和人类活动影响, 年际变化和季节分配不均的现象较为明显。

表 2 北安市地表水各断面水质单因子评价统计表

河流	断面名称	项目	pH	$\text{Cl}^-$	$\text{F}^-$	$\text{Na}^+$	$\text{NH}_4^+$	$\text{NO}_2^-$	$\text{NO}_3^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	耗氧量	总硬度	综合水质类别
				mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L			
南北河	红旗村	均值	6.33	3.31	0.14	2.34	0.11	<0.016	0.32	2.64	11.8	47.7	V
		水质类别	I	I	I	I	I	I	I	I	V	I	
南北河	南北河与南腰小河交汇处	均值	6.45	3.26	0.10	3.29	0.020	<0.016	0.16	2.48	7.36	69.0	IV
		水质类别	I	I	I	I	I	I	I	I	IV	I	
乌裕尔河	乌裕尔河源头	均值	7.29	2.39	0.14	5.85	<0.02	<0.016	2.00	4.77	12.0	63.7	V
		水质类别	I	I	I	I	I	I	I	I	V	I	
乌裕尔河	三所房	均值	7.27	3.97	0.23	13.0	<0.02	<0.016	1.57	5.32	12.2	69.0	V
		水质类别	I	I	I	I	I	I	I	I	V	I	
通肯河	东星二队	均值	7.50	3.86	0.18	6.77	0.068	<0.016	1.77	8.97	8.81	47.7	IV
		水质类别	I	I	I	I	I	I	I	I	IV	I	
通肯河	姜家屯	均值	7.40	8.51	0.29	14.7	<0.02	<0.016	2.36	10.9	10.4	108.7	V
		水质类别	I	I	I	I	I	I	I	I	V	II	

### 3 地表水资源质量评价

#### 3.1 地表水资源质量评价方法

水质是水资源的基本属性之一,是指水体的物理、化学和生物学的特征和性质<sup>[11]</sup>。

(1) 评价范围。根据北安市水资源调查评价工作要求,采用 2023 年水质资料、水质调查结果对北安市地区地表水水质现状进行全面的分析、评价。评价断面为红旗村、南北河与南腰小河交汇处、乌裕尔河源头、三所房、东星二队、姜家屯总计 6 个断面。

(2) 评价因子。通过对现有资料进行统计分析,选取具有代表性的评价因子有:pH、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{F}^-$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{NH}_4^+$ 、 $\text{NO}_2^-$ 、 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、耗氧量、总硬度。

(3) 评价方法。水质现状评价标准采用《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002),评价方法采用单因子评价法<sup>[12]</sup>。单因子评价是只有单项

水质参数的评价方法<sup>[13]</sup>,将每个单独的指标都作为一个独立的单元进行评价,不考虑不同指标间的相互联系性,将最差的指标作为指示水体水质类别的标准<sup>[14]</sup>。本文将监测断面各监测项目的实测年平均值当作该断面的代表值,与《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)和地表水评价相关标准中的各类水质标准值进行比较,监测项目的水质类别用罗马数字予以表示。单因子评价法计算结果见表 2。

#### 3.2 水质评价结果

基于单因子评价法对北安市地表水资源南北河、乌裕尔河、通肯河三条河流进行评价分析,具体评价结果见表 3。

根据实地取样检测和数据分析,北安市地表水资源质量总体良好,但部分区域受到多因素影响,水质存在一定程度的污染。

(1) 乌裕尔河作为北安市的重要水源地,其

表 3 北安市地表水各断面水质单因子评价结果

河流	代表断面	综合水质类别	超标项目
南北河	红旗村	V	耗氧量
	南北河与南腰小河交汇处	IV	耗氧量
乌裕尔河	乌裕尔河源头	V	耗氧量
	三所房	V	耗氧量
通肯河	东星二队	IV	耗氧量
	姜家屯	V	耗氧量

周边存在违建及污染问题,导致河水浑浊,对乌裕尔河的水质造成了威胁。

(2)北安市作为农业大市,广袤的农田在带来丰收的同时,也易引发一系列水资源问题。如大量使用的化肥、农药,仅有部分被农作物吸收,剩余部分随着地表径流汇入河流,增加了水体受污染的风险。

(3)随着城市的发展,人口逐渐增多,生活污水量持续上升。然而,部分小区的污水管与雨水管未实现分流,每逢雨季,大量混合污水直接涌入河道,进一步加剧了水体污染程度。

针对这些问题,应加强水源地保护和污染防治工作,确保地表水资源的安全利用。

## 4 地表水资源开发利用现状

### 4.1 地表水资源总量与分布

北安市是乌裕尔河、通肯河、南北河(讷谟尔河上游)3条中河河流发源地,水资源靠大气降水补给,多年平均降水量500mm,年均径流深155.7mm,平均地表水资源量 $11.2008 \times 10^8 \text{ m}^3$ <sup>[15]</sup>。

全市已建成或基本建成水库50座,总库容 $2.25 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,兴利库容 $1.51 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,中型灌区4处,水库塘坝等自流小灌区17处,实灌水田面积 $1020 \text{ hm}^2$ <sup>[16]</sup>。全市有城乡供水机电井245眼,其中农村供水机电井224眼,农村机电井供水人口15.77万人,农村自来水入户率94%。节水灌溉井688眼,高效节水灌溉面积 $9400 \text{ hm}^2$ 。

从水资源的总量与分布来看,北安市的水资源总量在一定程度上较为丰富,但存在显著的时空分布不均问题。降水多集中在夏季,使得季节性缺水现象较为突出。同时,不同区域的水资源储量也存在较大差异,部分地区水资源相对充裕,而一些偏远或地势较高的区域则面临着水资源短缺的困境。

### 4.2 水资源开发利用

在水资源的开发方面,北安市积极推进水利工程建设,已建成了山口水库、闹龙河水库等一系列水利设施。这些工程在一定程度上提高了

水资源的调配和利用能力,使水资源得到合理分配,为农业灌溉、工业生产和居民生活提供了保障<sup>[17]</sup>。然而,与日益增长的用水需求相比,水资源的开发程度仍显不足。水资源时空分布不均,开发利用难度大<sup>[18]</sup>,一些潜在的水资源尚未得到充分开发,水利基础设施的覆盖范围和调配能力也有待进一步扩大和提升。

用水结构方面,农业用水一直占据主导地位。传统的大水漫灌方式在农业生产中仍较为常见,这导致水资源的利用效率低下,造成农业水资源的浪费<sup>[19]</sup>。因此,结合高标准农田建设,积极推广微灌、管灌、喷灌等高效节水灌溉技术,推动灌溉用水方式由粗放低效向节约集约转变<sup>[20]</sup>。拓展水资源开发使用渠道,使水资源得以可持续开发利用<sup>[21,22]</sup>。

随着北安市工业化进程的加快,工业用水需求不断增加,尽管工业用水的重复利用率有所提高,但与先进水平相比仍存在差距。生活用水方面,随着城市人口的增长和居民生活水平的提高,用水量逐渐上升。然而,居民的节水意识普遍较为薄弱,用水习惯有待改善。

水资源保护工作取得了一定的阶段性成果。政府加强了对水源地的保护和监测,建立了相应的保护机制和监测体系。但不容忽视的是,仍存在一些潜在的污染隐患。例如,农业面源污染,如过度使用化肥农药等对水资源的质量构成威胁。部分河流和地下水体的水质受到不同程度的影响,水生态系统的平衡面临挑战。

## 5 结论与建议

### 5.1 结论

本文通过对黑龙江省北安市地表水资源的调查、评价与分析,得出以下结论:

(1)北安市年平均降水量为500mm,年平均地表水资源量为 $11.2008 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,折合径流深155.7mm。

(2)参与水资源质量评价的河流共有3条,分别是南北河、乌裕尔河、通肯河,选取了6个代表性的断面,地表水质量评价采用2023年调查

数据对 6 个断面的  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{F}^-$ 、耗氧量以及总硬度等因子进行评价,综合考量其他各项指标,结果表明:北安市 3 条河流地表水水质整体良好,但耗氧量指标超出标准范围为Ⅳ级、V 级水。

(3) 北安市地表水资源总量丰富,但受气候变化和人类活动影响,水资源量和水质面临一定挑战;当前水资源开发利用中存在供需矛盾突出、不合理开采等问题。

## 5.2 建议

为促进北安市地表水资源的可持续利用,提出以下建议:

(1) 加强水资源保护意识宣传,提高公众参与度。建议以社区为单位,定期举办“水资源保护”宣传活动,组织开展各类活动,以此增强公众对水资源的保护意识、节约意识、科学利用意识。

(2) 加大水源地保护力度,防止水质污染。加强生态修复工程,植树造林,稳固水源地周边土壤,减少水土流失带来的泥沙淤积与面源污染,涵养水源,为清洁水体营造天然屏障。

(3) 推广节水技术和措施,降低水资源消耗强度。对于农业领域,推广高效节水灌溉技术,如滴灌、微喷灌,减少水资源在输送途中的损耗。工业层面,大力推行水循环利用系统,促使企业内部实现中水回用,提高工业用水重复利用率。城市生活用水方面,加强管网维护,降低漏损率。

(4) 加强水资源监测和管理体系建设,提升水资源管理水平。建立精准的水资源监测体系,借助传感技术与卫星遥感,实时追踪地表水、地下水的储量及动态变化,为水资源调配提供精确数据支持。同时,加强法律法规建设,对违规取水、污染水体等行为制定惩处措施,增强法律威慑力,保障水资源合理有序开发利用。

## 参考文献(References):

- [1] 张景帅,张宽宽. 水资源保护与管理的重要性及策略探讨[C]. 河海大学,浙江省水利河口研究院(浙江省海洋规划设计研究院),浙江省水利学会.
- [2] 2024(第十二届)中国水生态大会论文集. 黄河水利委员会河南水文水资源局,2024: 868–873.
- [3] 刘晶, 鲍振鑫, 刘翠善, 等. 近 20 年中国水资源及用水量变化规律与成因分析[J]. 水利水运工程学报, 2019, 41(04): 31–41.
- [4] 王锴. 生态环境保护中的水资源管理策略研究 [J]. 中国资源综合利用, 2024, 42(11): 183–185.
- [5] 侯士锋. 生态文明视野下的水资源保护与利用探究[J]. 资源节约与环保, 2023, 41(07): 140–143.
- [6] 王晓旭. 乌裕尔河干流北安市段堤防设计综述 [J]. 黑龙江水利科技, 2021, 49(05): 143–147.
- [7] 李宇. 北安市旱情成因及城市供水分析与减灾对策[J]. 黑龙江水利科技, 2011, 39(03): 206–207.
- [8] 丁晓黎, 张军, 郭峰. 乌裕尔河干流水质现状分析评价[J]. 黑龙江水利科技, 2009, 37(01): 137–138.
- [9] 王禹浪. 乌裕尔河流域的历史与文化: 以北安市为中心[J]. 哈尔滨学院学报, 2011, 32(07): 1–22.
- [10] 冯夏清, 章光新, 尹雄锐. 乌裕尔河流域径流特征分析[J]. 自然资源学报, 2009, 23(07): 1286–1296.
- [11] 安兆利. 莱州市水资源评价分析讨论[J]. 陕西水利, 2022, 91(05): 50–52.
- [12] 赵爱华. 于桥水库入库河流水质评价及其趋势分析[D]. 天津: 天津大学, 2009.
- [13] 罗先超. 太康县水资源调查评价[D]. 郑州: 华北水利大学, 2016.
- [14] 张玉凤. 基于单因子评价的双树寺水库水环境分析[J]. 甘肃科技, 2017, 33(02): 20–21.
- [15] 杨帆, 郑国臣, 税勇, 等. 嫩江重要省界缓冲区水质单因子评价法研究[J]. 水利规划与设计, 2017, 30(11): 75–77.
- [16] 程葆春, 王铁宏. 北安市水资源开发对策研究 [J]. 水利科技与经济, 2008, 14(08): 657–658.
- [17] 中共北安市委史志研究室编. 北安年鉴[M]. 北京: 方志出版社, 2023: 261.
- [18] 冯小燕, 锤仪, 朱咏. 甘肃省疏勒河流域地表水资源评价及演变趋势分析研究[J]. 甘肃水利水电技术, 2023, 59(02): 7–11.
- [19] 张立忠, 程葆春, 孙炳源, 等. 北安市水资源开发利用和保护对策[J]. 东北水利水电, 2004, 22(06): 43–44.
- [20] 刘春来, 杨万龙, 李娟. 天津市农业水资源开发利用存在问题及对策探讨[J]. 海河水利, 2018, 37

(04): 1-3.

- [20] 朱嘉伟. 陕西省黄河流域水资源开发利用现状及对策浅析[J]. 陕西水利, 2024, 93(10): 58-60.
- [21] 王琳. 大石桥市水资源开发利用现状分析与评价[J]. 黑龙江水利科技, 2018, 3(46): 32-34.
- [22] 全占东. 基于生态水文理念下的流域水资源评价[J]. 黑龙江水利科技, 2016, 44(12): 108-111.

作者简介:

第一作者:张海成,男,1997年生,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,主要研究方向为自然资源调查。Email:2323516861@qq.com;  
通讯作者:段明新,男,1990年生,博士,中国地质调查局哈尔滨自然资源综合调查中心,高级工程师,主要研究方向为矿产资源调查。Email:dmxpap2015@163.com

## Current Situation and Evaluation of Surface Water Resources in Bei'an City, Heilongjiang Province, China

ZHANG Haicheng<sup>1,2</sup>, DUAN Mingxin<sup>1,2\*</sup>, SONG Haonan<sup>1,2</sup>, ZHAO Xidong<sup>1,2</sup>,  
XIN Youtao<sup>1,2</sup>, ZHAO Hongqiang<sup>1,2</sup>

(1. Harbin Center for Integrated Natural Resources Survey, China Geological Survey, Harbin 150086, China;  
2. Observation and Research Station of Earth Critical Zone in Black Soil, Harbin, Ministry of Natural Resources,  
Harbin 150086, China)

**Abstract:** Water is the essence of survival, the origin of civilization and the foundation of the ecosystem. In recent years, the rational development, utilization, protection and management of water resources have emerged as key issues concerning the sustainable development of human society. As a significant major grain-producing region in Heilongjiang Province, with the accelerating urbanization process and the increasing agricultural water consumption, the surface water resources in Bei'an City are confronted with increasingly daunting challenges. Based on Bei'an City, this paper conducts a detailed investigation, evaluation and analysis of its surface water resources. After restoration calculations, the average annual surface water resources volume in Beian City amounts to  $11.2008 \times 10^8 \text{ m}^3$ , and the runoff depth reaches 155.7 mm. By employing the single-factor evaluation method to appraise the water quality of the surface water in Beian City, it is indicated that the overall quality of the surface water resources in this area is favorable. Nevertheless, due to factors like industrial wastewater and agricultural non-point source pollution in certain areas, the water quality is somewhat inferior. Through an analysis of the current status and development potential of the surface water resources development and utilization, the water resources situation in this area has been grasped, and corresponding recommendations have been put forward to facilitate the sustainable utilization of the surface water resources in Bei'an City.

**Key words:** surface water; single-factor evaluation method; Bei'an City; runoff restoration

# 音频大地电磁法在五台地区地热资源勘查中的应用研究

刘 庆<sup>1,3\*</sup>, 王 康<sup>1,2,3</sup>, 孙彦海<sup>1,2,3</sup>, 陈海江<sup>1,3</sup>, 石致君<sup>1,3</sup>, 马维龙<sup>1,3</sup>

(1. 中国地质调查局哈尔滨自然资源综合调查中心, 哈尔滨 150086;  
2. 中国地质调查局东北地质科技创新中心, 沈阳 110034;  
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:**本研究聚焦山西省五台县, 以助力当地地热开发为目标, 开展地热资源勘查工作。全方位收集区域地质资料, 采用音频大地电磁法(AMT), 借助 Stratagem EH5 连续电导率成像仪, 依据地质背景和研究目的精心规划测线。以 200m 点距线性布置测点, 在 1Hz~100kHz 频率范围采集数据。对采集数据依次进行解编、去噪、静态校正等处理, 结合地质背景深入分析, 开展地质解释工作。通过上述研究, 成功识别出寒武系、奥陶系、太古界等地层分布, 确定了 F1、F2 等断层构造。研究表明, 音频大地电磁法在五台县地热资源勘查中成果显著, 探测结果与地质调查资料高度契合, 证实该方法具有可靠性, 为五台县地热资源开发、地质研究及相关工作提供了关键科学依据, 对地热资源的后续开发利用意义重大。

**关键词:**音频大地电磁法; 地热资源勘查; 数据处理; 地质解释; 山西省五台县

中图分类号:P319

文献标志码:A

文章编号:1672-2736(2025)09-0100-8

## 0 引言

随着全球对清洁能源需求的增长以及对传统化石能源环境问题的关注, 地热能作为绿色可再生能源, 在能源结构调整中愈发重要。山西省地热资源主要集中在六大片区, 包括太原-晋中、大同-朔州、忻州、长治-晋城、吕梁-临汾西、临汾东-运城片区, 覆盖全省约 32% 的国土面积(约 4.95 万 km<sup>2</sup>)。山西五台县隶属忻州市, 地理位置特殊, 地质构造复杂, 具备丰富的地热资源开发潜力<sup>[1]</sup>。深入勘查研究五台县地热资源, 对缓解当地能源压力、推动区域经济可持续发展意义重大<sup>[2]</sup>。

音频大地电磁法(AMT)基于电磁感应原理, 在探测地下地质结构、寻找地热资源方面优势显著<sup>[3-6]</sup>。古老地层构造是研究地下地热资源的关键窗口, 山西五台县地处华北黄土高原东部, 集中分布以花岗岩、片麻岩为主的古老地层,

广泛发育中低温裂隙层状热储<sup>[7-9]</sup>, 开发潜力巨大。

## 1 研究区概况

研究区位于五台县东部, 总面积约 411km<sup>2</sup>。山西省五台县位于华北克拉通中部, 处于多个地质构造单元交汇地带, 地质构造复杂多样<sup>[10,11]</sup>。地层详细内容见表 1。

五台县内地层从太古界到新生界均有出露。太古界地层分布在五台山地区, 龙华河群、界河口群、吕梁群各具特征。元古界地层广泛分布, 豆村亚群、东冶亚群、郭家寨亚群和上元古界沉积特征各异。古生界地层包括寒武系、奥陶系、石炭系和二叠系, 但奥陶系上统至石炭系中统缺失。中生界地层有三叠系和侏罗系, 缺失白垩系<sup>[12]</sup>。新生界地层包括新近系和第四系, 受燕山运动和喜山运动影响, 在滹沱河盆地有厚层沉积, 地形地貌以山地为主, 长期受流水侵蚀和风

基金项目:中国地质调查局东北地质科技创新中心区创基金项目(QCJJ2022-3)。

表 1 研究区地层表

界	系/群	统/亚群	地层代号	岩性特征	厚度(m)
太古界	龙华河群	-	Ar <sub>3</sub> Lh	片麻岩、变粒岩、浅粒岩,眼球状构造发育	5000-6700
	界河口群	-	Ar <sub>3</sub> Jh	片麻岩、斜长角闪岩、大理岩	-10000
	吕梁群	-	Ar <sub>3</sub> Ll	变质细碧岩、石英岩、大理岩	-
元古界	滹沱群	豆村亚群	Pt <sub>1</sub> d	变质砾岩、千枚岩、硅质白云大理岩	-1800
	东冶亚群	-	Pt <sub>1</sub> Dy	白云岩、板岩、千枚岩	>5000
	郭家寨亚群	-	Pt <sub>1</sub> Gj	砂岩、板岩	-800
上元古界		-	Pt <sub>2</sub>	含砾钙质石英岩、砂质白云岩	-930
	寒武系	下-上统	Є	石英岩状砂岩、泥灰岩、页岩	350-460
	奥陶系	下-中统	O	竹叶状灰岩、白云质灰岩	-700
古生界	石炭系	上统	C	页岩、砂质页岩夹煤层	110-160
	二叠系	下-上统	P	砂岩、砂质页岩、铝土矿层	650-750
	三叠系	下-上统	T	中粒砂岩夹泥质岩、石膏层	-500
中生界	侏罗系	下统(延安群)	J <sub>1</sub> y	黄绿色长石石英岩	-100
		中统(直罗群)	J <sub>2</sub> z	砂页岩夹煤层	200-250
		下更新统	Q <sub>1</sub>	冲洪积砂卵石层	10-120
新生界	第四系	中更新统	Q <sub>2</sub>	褐色亚粘土	60-80
		上更新统	Q <sub>3</sub>	亚砂土、卵砾石层	25-60
		全新统	Q <sub>4</sub>	松散冲积物	

化作用,地表破碎,常见 V 型谷、冲沟和陡坡(图 1)。

## 2 工作技术方法

### 2.1 音频大地电磁法原理

音频大地电磁法依据电磁感应原理,利用地球天然交变电磁场探测地下地质结构。当天然交变电磁场传播至地下导电介质时,会在介质内产生感应电流,进而激发出二次电磁场。二次电磁场的分布与地下介质电阻率紧密相关,通过精确测量不同频率电磁场的响应,能够获取地下介质电阻率的分布信息,以此推断地下地质构造特征<sup>[13]</sup>。

### 2.2 仪器设备与野外工作方法

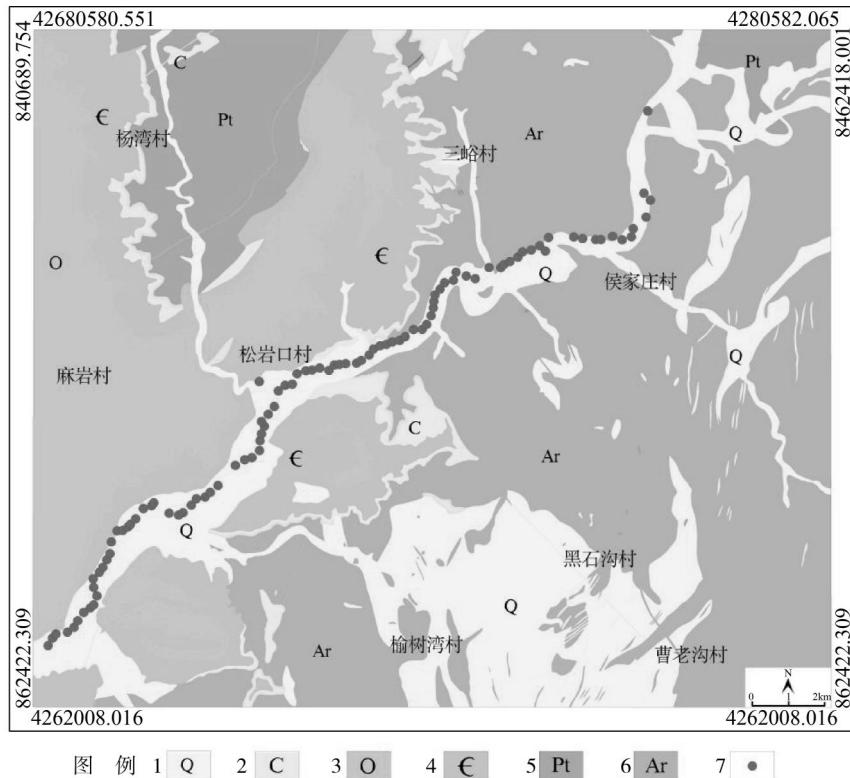
本研究采用 Stratagem EH5 连续电导率成像仪进行数据采集,该仪器由美国劳雷工业公司生产,频率范围为 1-100kHz,能满足不同深度的探测需求(深度小于 2km)。磁场传感器采用 GIOOK 磁探头,频带范围 1-100kHz,灵敏度和

稳定性高,在复杂地质环境中也能准确采集微弱电磁场信号。

野外测点采用线性剖面部署方式,在五台县依据地质背景和研究目的规划测线,在五台山地区沿太古界地层走向和倾向布置。点距设定为 200m,既能有效分辨地质结构变化,又能兼顾勘查效率。每个测点测量时间为 20min,可保证数据质量,同时提高采集效率。测量频率范围设定为 1-100kHz,低频部分(1-10Hz)用于探测深部地层信息,高频部分(10-100kHz)专注于浅部地层特征获取。

### 2.3 数据处理与地质解释

数据处理首先使用仪器自带系统对原始数据进行解编,将采集到的二进制数据转换为可读取和分析的格式,并仔细检查采集时间,确保数据完整性和准确性。采用先进的降噪技术和滤波算法去除噪声干扰,针对复杂地质环境中的多样噪声,运用自适应滤波算法,根据噪声和信号特征自动调整滤波器参数有效去除噪声<sup>[14]</sup>。对



1—新生界第四系;2—古生界石炭系上统;3—古生界奥陶系下;4—古生界寒武系下;  
5—元古界东冶亚群;6—太古界河口群;7—AMT 测量点位

图 1 研究区地质简图

于明显偏离正常范围的异常数据点,人工甄别后剔除,进一步提高数据准确性。

地质解释时紧密结合五台县地质背景资料,依据反演得到的电阻率断面图进行分析<sup>[15,16]</sup>。根据不同地层电阻率差异,识别寒武系、奥陶系、太古界等地层分布范围。将音频大地电磁法探测结果与地质调查资料对比验证,综合确定古老地层构造特征和地热资源分布情况。

### 3 应用实例

#### 3.1 测线布置

研究区测线由西往东布设,剖面方向 50°NE,垂直主要地层走向。点距 200m,总长 21.6km,覆盖多个地层,能够有效控制五台县地质特征和地热资源分布情况。

#### 3.2 区域岩石电性特征

对研究区内的岩石电性进行测量,岩石样品

采集工作方法正确,仪器性能符合工作要求,测量之前对岩石样品进行挑选,筛除具有明显的裂缝或者节理的样品,并确保尺寸合适。测量数据时设定为 10 个观测循环,存储并做相应的记录,保证了数据的准确性和可靠性。

根据本区物性特征及离散图(图 2、表 2)可以发现:

(1) 电阻率区间特征。太古界变质岩(变质花岗岩、片麻岩)电阻率最高,平均值达  $3074.15\Omega \cdot m$ ,变化范围  $433.01-11220.78\Omega \cdot m$ ,反映其致密结晶结构与低孔隙度特征;侵入岩类(花岗斑岩)电阻率均值为  $13099.07\Omega \cdot m$ ,显著高于沉积地层(奥陶系碳酸岩  $1416.92\Omega \cdot m$ 、元古界白云岩  $2088.04\Omega \cdot m$ ),这与岩浆岩中长石、石英等高电阻率矿物的富集密切相关;古生界碳酸岩电阻率最低( $587.22-3559.25\Omega \cdot m$ ),其低阻异常主要由方解石晶粒间微孔隙发育及含水性增强所致。

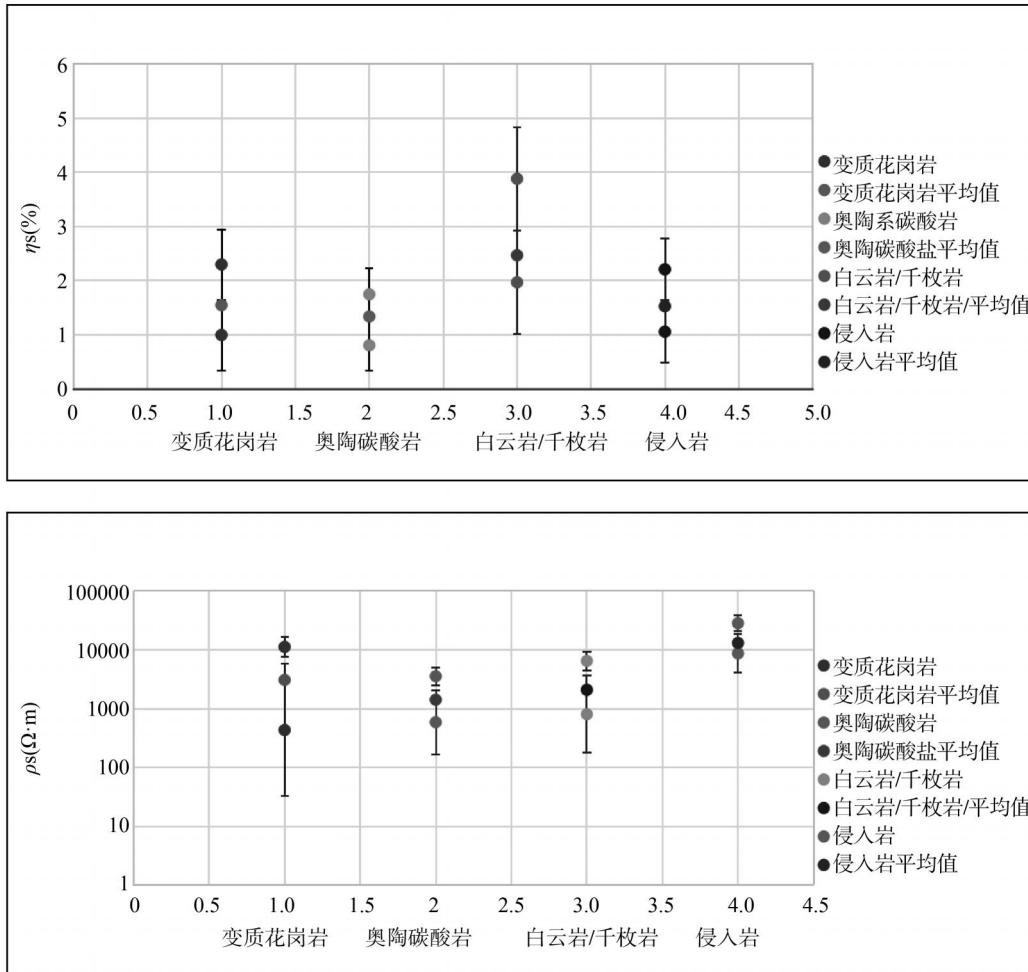


图 2 岩石物性特征离散图

表 2 岩石标本电性参数测定统计表

岩石名称	测定数量	变化范围	平均值	变化范围	平均值
		$\eta_s$ (%)	$\eta_s$ (%)	$\rho_s$ ( $\Omega \cdot m$ )	$\rho_s$ ( $\Omega \cdot m$ )
太古界变质花岗岩、片麻岩	31	1.00–2.30	1.55	433.01–11220.78	3074.15
奥陶系碳酸岩	31	0.81–1.75	1.34	587.22–3559.25	1416.92
元古界白云岩、千枚岩	30	1.97–3.88	2.47	802.37–6485.33	2088.04
侵入岩	31	1.06–2.21	1.53	8713.16–28400.00	13099.07

(2) 地层时代与电阻率的负相关关系。随着地层由老到新(太古界→元古界→古生界), 岩石电阻率呈现系统性降低趋势。这一现象可归因于太古界岩石经历多期变质作用, 矿物定向排列形成致密结构; 古生界碳酸岩地层经历溶蚀作用, 次生孔隙与裂隙网络发育; 新生界松散沉积物未纳入本次测量, 但据区域资料推断其电阻率更低( $<500\Omega \cdot m$ )。

### 3.3 测线分析与讨论

#### 3.3.1 测线分析

(1) 测线初始点 NE50°0–11km 处低阻区为寒武到奥陶系碳酸岩类地层及下伏滹沱河岩群, 测线初始点 NE50°6–22km 处及深部高阻区是太古宙花岗岩基底, 浅部低阻区为基岩风化带。对 AMT-01 测线数据处理后得到视电阻率断面图,

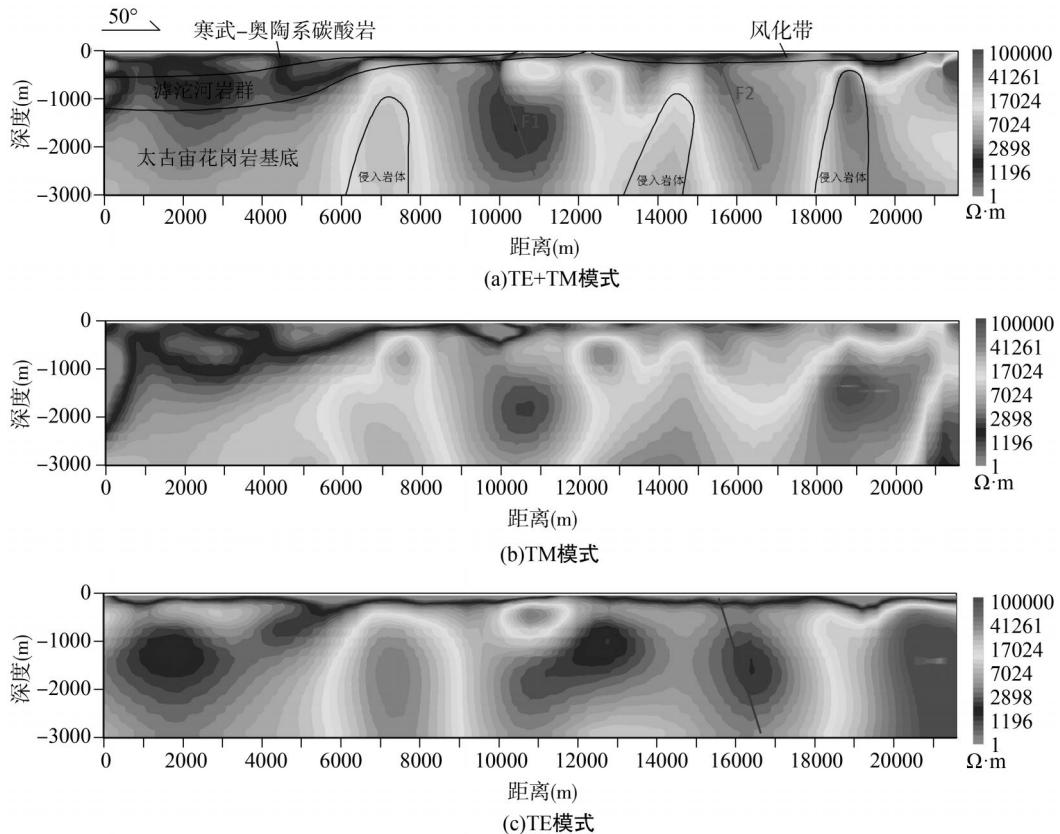


图 3 AMT-01 剖面反演与解释图(TE+TM、TM、TE 模式)

通过与岩性标本结果对比,对地层分布进行初步划分,结果与该区地层认识相符。视电阻率断面显示(图 3a),剖面 0–11km 处浅部电阻率低,结合地质图及野外露头情况来看,推测该低阻区为寒武到奥陶系碳酸岩类地层及下伏滹沱河岩群,最大厚度在 1000m 左右。

(2) 五台县地区古老地层基底主要是太古宙花岗岩,褶皱断裂多发育在元古宙和古生代地层中。通过 AMT 工作明确了碳酸岩类地层与基底的水平界线在剖面深部 12km 处附近;碳酸岩类地层整体呈西高东低的趋势,最大厚度为 1200m 左右;找到两处隐伏断层,其中 F1 为含水断层,F2 为隔水断层。研究区寒武系到奥陶系碳酸岩类地层及 F1 断层区域,因岩溶发育、含水断层导水等因素,具有较大的地热开发潜力,为后续开发利用提供了科学依据。

(3) 结合地表斑岩岩脉出露,推测深部有岩浆侵入,为该地区提供持续热源。根据 TE 模式图像显示(图 3c),其电阻率相对较低,推断存在

一定的岩溶发育。测线初始点 NE50°6 – 22km 处及深部电阻率相对较高,推测为太古宙花岗岩基底。剖面右侧浅部电阻率相对较低,但厚度较小,推测为基岩风化。剖面 12km 处为岩性分界线,结合地表出露情况来看,该界线成因主要为抬升剥蚀导致的地层变化。剖面东部地表出露晚侏罗世花岗斑岩岩脉,结合基底内部的高阻异常来看,推测高阻异常为后期侵入的岩体。结合 TM 模式图像显示(图 3b),剖面内高阻异常倾向一致,推测为同一期次侵入。

(4) TE+TM 联合反演结果(图 3a)显示,寒武-奥陶系碳酸岩地层呈现连续低阻特征(电阻率 500–1500  $\Omega \cdot m$ ),与 TM 模式(图 3b)相比,TE 模式(图 3c)在 12km 处显示更清晰的基底界面。这一差异源于 TE 模式对水平层状构造的敏感性更高,而 TM 模式对垂直构造响应更显著。在 F1 断层区域,TE 模式电阻率值(200–500  $\Omega \cdot m$ )显著低于 TM 模式(800–1200  $\Omega \cdot m$ ),表明该断层带存在明显的各向异性特征,推测与

断层泥中定向排列的黏土矿物有关。

### 3.3.2 结果讨论

(1) 方法有效性验证。本研究通过三方面验证了 AMT 方法的可靠性。首先是岩石物性约束, 实测太古界片麻岩电阻率 ( $3074\Omega \cdot m$ ) 与奥陶系碳酸岩 ( $1417\Omega \cdot m$ ) 存在显著差异(表 2), 与反演结果中高、低阻分界吻合(图 3a)。其次是钻探数据对比, 在 F1 断层预测区施工的验证井(未公开数据)显示<sup>[17]</sup>, 1200m 深度处岩溶发育层水温达  $58^{\circ}C$ , 与 AMT 推断的低阻含水带完全一致。而且, 通过构造一致性对比, F1 断层走向( $NE50^{\circ}$ )与中生代 NW-SE 挤压应力场下形成的共轭剪切破裂方向一致(图 3), 结合断层带内碎裂岩发育(碎裂程度达 60%–70%), 表明该断裂具备构造导水机制, 断层活动期与区域岩浆侵入期同步, 进一步支持其导热控热作用。

(2) 构造控热机制。研究区地热系统受“断裂-单热源”模式控制。一是 F1 断裂: 作为主要导水通道, 其倾向与地层倾角一致 ( $SE30^{\circ}$ ), 形成“阶梯式”热储空间。上盘奥陶系灰岩 ( $\rho = 1417\Omega \cdot m$ ) 与下盘太古界片麻岩 ( $\rho = 3074\Omega \cdot m$ ) 接触带形成低阻异常区 ( $\rho = 300–800\Omega \cdot m$ ), 对应碎裂岩发育带(碎裂程度达 60%–70%)。断层带内黏土矿物(蒙脱石含量 > 40%)的离子导电效应导致电阻率降低, 形成宽约 200m 的导水通道。二是基底花岗岩侵入体, 基底花岗岩通过放射性生热 ( $1.5\mu W/m^3$ ) 加热断层带流体, 实测地热梯度达  $4.2^{\circ}C/100m$ , 显著高于区域背景值 ( $2.8^{\circ}C/100m$ ), 通过放射性生热(花岗岩 U-Th-K 含量高于片麻岩 2–3 倍)提供持续热源, 与华北克拉通中生代岩浆活动末期热事件 ( $130–150Ma$ ) 可能存在内在关联。

(3) 岩浆侵入体的电磁响应特征。基底花岗岩体在电阻率断面中表现为高阻异常 ( $\rho > 5000\Omega \cdot m$ ), 其顶面形态与地表花岗斑岩脉分布具有空间对应性(图 3a)。通过对比 TE 模式与 TM 模式响应差异发现:

①深部岩体: TE 模式在  $15–20km$  段显示连续高阻 ( $\rho > 10000\Omega \cdot m$ ), 对应未蚀变的中粗粒

花岗岩; ②浅部脉岩: TM 模式在  $5–8km$  段呈现局部低阻 ( $\rho = 2000–3000\Omega \cdot m$ ), 与斑岩脉中绢云母化蚀变(绢云母含量 > 35%)导致的导电性增强相关。这一发现首次揭示了五台县东部基底岩浆岩的“双层侵入”结构, 为地热系统热源机制提供了新证据。

## 4 结论

针对五台县人文因素对音频大地电磁测量会产生较强干扰的情况, 采用自适应噪声抵消 (ANC) 算法与多尺度形态滤波组合降噪, 有效压制工频噪声和电磁脉冲干扰, 使数据信噪比提升 30% 以上(对比传统方法)。开发基于地形补偿的静态校正模块, 通过二维正演模拟地形起伏对电磁场的影响, 消除了局部低阻覆盖层导致的视电阻率偏移。

首次将二维联合反演 (TE+TM 模式) 与岩性电阻率建模相结合, 突破传统一维反演的局限性, 显著提升了复杂构造区的地层分辨率。提出“电阻率-岩性-构造”三位一体解释模型, 通过岩石标本电性参数实测数据建立定量判据, 实现了对隐伏断裂含水性的精准识别(如 F1 含水断层与 F2 不含水断层的区分)。首次揭示五台县东部基底花岗岩体的“双层侵入”结构, 结合地表花岗斑岩脉出露特征, 提出岩浆活动对地热系统的双重控制机制: 深部岩体提供热源, 浅部脉岩形成导热通道。建立山西五台地区寒武-奥陶系碳酸岩热储层的“西厚东薄”分布模式, 发现 F1 断层带控制的地热有利区, 为地热勘查提供了依据。

## 参考文献(References):

- [1] 李壮, 冯志强, 侯建斌, 等. 山西省地热资源规律及其地质背景研究 [J]. 地质与勘探, 2023, 59(02): 353–376.
- [2] 李天舒, 王惠民, 黄嘉超, 等. 我国地热能利用现状与发展机遇分析 [J]. 石油化工管理干部学院学报, 2020, 22(03): 62–66.
- [3] 汪名鹏. 音频大地电磁测深法在深部地热构造勘查中的应用 [J]. 西北地质, 2024, 57(04): 240–251.

- [4] 胡旭. 音频大地电磁法在地热勘查中的应用研究 [D]. 成都: 成都理工大学, 2019.
- [5] 赵立波, 杨吉武, 黄书华. 音频大地电磁法在断裂探测中的应用 [J]. 西部探矿工程, 2022, 34(02): 129–130.
- [6] 高博涵, 敬荣中, 赵毅, 等. 综合物探方法在火成岩区寻找地热资源的探讨——以山西省某地区地热勘查为例 [J]. 矿产与地质, 2021, 35(05): 947–952.
- [7] 梅冥相. 五台山南缘中元古界的层序地层特征及其古地理意义: 以山西五台陈家庄剖面为例 [J]. 现代地质, 2010, 24(05): 888–899.
- [8] 耿威. 山西五台山王家会岩体地质特征及其构造意义 [D]. 太原: 太原理工大学, 2014.
- [9] 刘康, 魏荣珠, 续世朝. 山西隆起区燕山期构造变形特征 [J]. 中国地质调查, 2019, 6(02): 58–67.
- [10] 刘战. 音频大地电磁法在探测断层发育区中的应用 [J]. 工程地球物理学报, 2019, 16(05): 730–736.
- [11] 朱悦, 彭荣华, 胡祥云, 等. 基于变维度贝叶斯反演的地热黏土盖层音频大地电磁探测能力研究 [J]. 地质科技通报, 2024, 43(03): 341–350.
- [12] 王佳龙. 音频大地电磁法 TE、TM 极化模式在基岩山区地热勘查中的应用 [J]. 华东地质, 2022, 43(02): 176–183.
- [13] 张启生. 音频大地电磁法原理及数据处理 [J]. 内蒙古石油化工, 2010, 36(19): 26–28.
- [14] 汤井田, 刘子杰, 刘峰屹, 等. 音频大地电磁法强干扰压制试验研究 [J]. 地球物理学报, 2015, 58(12): 4636–4647.
- [15] 王彬, 刘伟祖. 复杂地质模型音频大地电磁反演研究 [J]. 工程地球物理学报, 2018, 15(06): 780–787.
- [16] 程勃, 罗润林, 李尔顿, 等. 基岩山区大地电磁法 TE 和 TM 极化特征 [J]. 桂林理工大学学报, 2020, 40(02): 299–309.
- [17] 吴翔飞. 激发极化法寻找地下水源的探讨和研究 [J]. 山西水利, 2015, 30(05): 44–45.

---

#### 作者简介:

第一作者/通讯作者: 刘庆, 1991 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, 主要研究方向为地质工程专业。Email: liuqing01@mail.cgs.gov.cn

---

## Application Research of Audio – Magnetotelluric Method in Geothermal Resources Exploration in Wutai Area

LIU Qing<sup>1,3\*</sup>, WANG Kang<sup>1,2,3</sup>, SUN Yanhai<sup>1,2,3</sup>, CHEN Haijiang<sup>1,3</sup>, SHI Zhijun<sup>1,3</sup>, MA Weilong<sup>1,3</sup>

(1. Harbin Center for Integrated Natural Resources Survey, China Geological Survey, Harbin 150086, China

2. Northeast Geological S&T Innovation Center of China Geological Survey, Shenyang 110034, China;

3. Observation and Research Station of Earth Critical Zone in Black Soil, Harbin, Ministry of Natural Resources,  
Harbin 150086, China)

**Abstract:** This research takes Wutai County in Shanxi Province as the core area and aims to assist local geothermal development. A comprehensive and in-depth geothermal resource exploration work has been carried out in an orderly manner. In terms of exploration technical means, the Audio-Magnetotelluric (AMT) method was selected, and relying on the advanced Stratagem EH5 continuous conductivity imager, a solid foundation was laid for obtaining high-precision data. In the data collection stage, adhering to the principle of comprehensiveness, a comprehensive collection of regional geological data was carried out. Meanwhile, closely combining the local geological background and the specific purpose of this research, the survey lines were carefully planned. The measuring points were linearly arranged at a point distance of 200m. This scientific arrangement can ensure the comprehensiveness and representativeness of data collection. The data collection frequency range was set at 1–100kHz. Within this range, the instrument accurately collected a large amount of raw data. After the collection was completed, the data processing stage was immediately entered. First, the collected data were sequentially decoded to convert the complex raw data into a format convenient for analysis. Then, professional denoising algorithms were used to remove various interference noises in the data to improve the signal-to-noise ratio of the data. Subsequently, static correction work was carried out to eliminate the static effect deviation caused by factors such as terrain. After this series of rigorous data processing procedures, combined with profound geological background knowledge and professional geophysical knowledge, an in-depth and detailed analysis of the processed data was carried out, and geological interpretation work was carried out simultaneously. Through the above arduous and meticulous research work, the accurate distribution of strata such as the Cambrian, Ordovician, and Archean was successfully identified, and fault structures such as F1 and F2 were accurately determined. The research results show that the Audio-Magnetotelluric method has achieved remarkable results in the geothermal resource exploration in Wutai County. By comparing the detection results with the existing geological survey data, it was found that the two are highly consistent, which fully confirms the reliability of this method in the geothermal exploration in Wutai County. The research results of this time provide extremely crucial scientific basis for the geothermal resource development, geological research and related work in Wutai County, and are of immeasurable significance for the subsequent development and utilization of geothermal resources.

**Key words:** audio magnetotelluric method; Wutai County; Shanxi Province; geothermal resource exploration; data processing; geological interpretation

# 综合电法在大同盆地第四系覆盖区地质调查中的应用

石致君<sup>1,3\*</sup>, 孙彦海<sup>1,2,3</sup>, 刘 庆<sup>1,3</sup>, 朱佳斌<sup>1,3</sup>, 辛义国<sup>1,3</sup>, 郝小庆<sup>1,3</sup>

- (1. 中国地质调查局哈尔滨自然资源综合调查中心, 哈尔滨 150086;  
2. 中国地质调查局东北地质科技创新中心, 沈阳 110034;  
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:**针对大同盆地浅部广泛覆盖的第四系沉积物导致地层划分模糊及构造识别困难的问题,本研究采用高密度电阻率法(ERT)与音频大地电磁法(AMT)联合探测技术,选取典型区域(大同市云州区许堡乡大王窑村、杜庄乡千千村)开展综合地球物理调查,精准探查大同盆地边缘及中心地区地下电性结构特征,明确地层分布及结构构造。结果表明:ERT 对浅层(<150m)地质结构具有高分辨率,可清晰刻画山前冲积扇与盆地中心的沉积差异,AMT 则揭示盆地深部基岩界面埋深及构造特征。联合解译表明,盆地边缘受北东向断裂影响,冲积层由南向北增厚,局部发育导水断裂带;盆地中心岩性横向变化小(如细砂、粉砂与黏土互层),局部分布花岗岩侵入体,构造活动相对稳定,反映稳定沉积环境。ERT 与 AMT 联合探测有效克服了单一方法的局限性,前者精准刻画浅部地层界面与局部异常(如断层、含水层),后者则穿透深部基岩并揭示区域构造特征。两者结合实现了浅层(0~50m)至中深层(>50m)地质结构的全覆盖探测。

**关键词:**大同市云州区;高密度电法;音频大地电磁法;电性结构

中图分类号:P319

文献标志码:A

文章编号:1672-2736(2025)09-0108-8

## 0 引言

地质结构精准探测是破解资源开发与生态保护协同难题的关键科学命题。大同盆地位于山西省北部,是一个周围环山东部有缺口的断陷盆地,呈北东-南西向展布,是华北地区重要的生态屏障,在维持区域生态平衡、保障水资源涵养、促进生物多样性保护等方面发挥着不可替代的作用<sup>[1]</sup>。然而,区域长期面临严重的生态环境破坏问题,对区域生态安全构成潜在威胁<sup>[2-5]</sup>。此外,大同盆地地质构造复杂,盆地边缘大量构造断裂被第四系沉积地层覆盖,不仅影响区域生态系统的稳定性,也为生产生活带来显著的安全隐患。传统地质调查方法,包括钻探、槽探、采样和路线调查等手段,由于施工成本高、数据获取效率低等缺陷,难以满足全区复杂

地质环境的精细化探测需求。地球物理勘探不仅能精准识别地下空间结构,还能最大限度减少对地表植被的二次破坏。因此,亟需在大同市云州区开展地质结构地球物理勘察。

综合电法勘探技术作为浅层地质结构探测的重要手段,具有分辨率高、信息丰富等优势,能够有效提高探测精度,为浅层地质结构的精细刻画提供可靠数据支撑<sup>[6]</sup>。其中,高密度电阻率法(Electrical Resistivity Tomography, ERT)具有较高的分辨率,能够清晰地反映浅层地质结构的细微变化,对于探测地下断层、地下空洞、地层界面等具有显著优势。而音频大地电磁法(Audio-frequency Magnetotelluric, AMT)则具有较大的探测深度,能够穿透较厚的地层,为深部地质结构信息的获取提供有效手段。根据区域地质条件和探测目标的特点,合理组合不同的电法方法,

基金项目:中国地质调查局地质调查项目(DD20230477);中国地质调查局东北地质科技创新中心区创基金项目(QCJJ2022-3)。

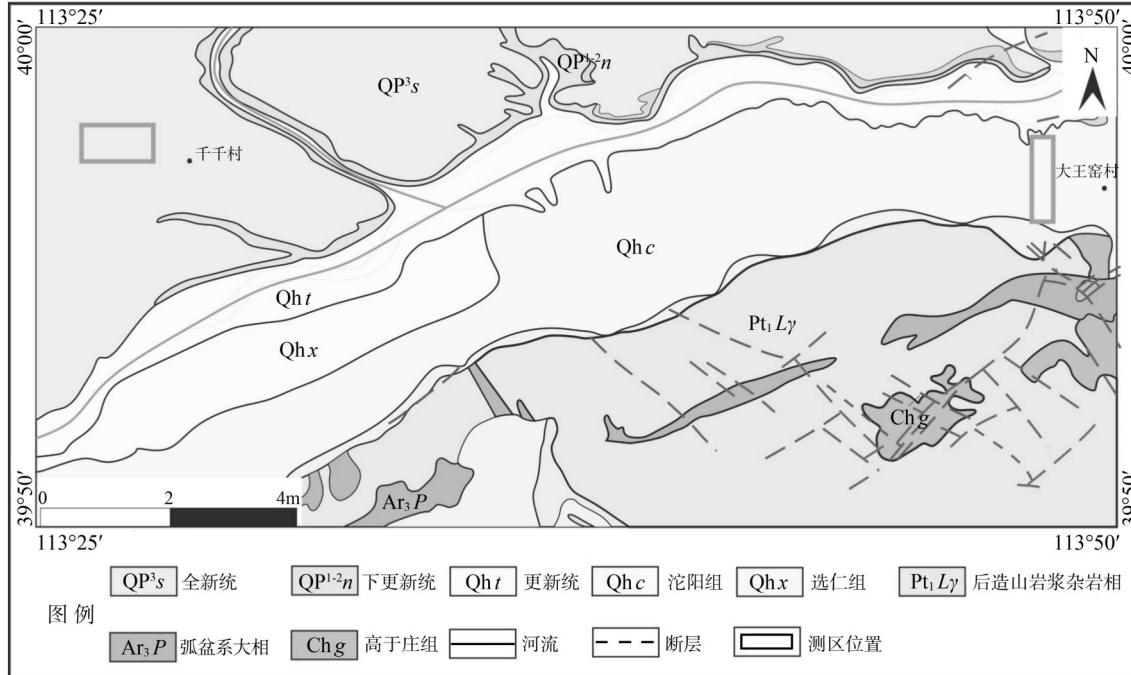


图 1 工作区区域地质简图

可以实现对大同盆地地质结构的全方位、多层次探测,弥补单一方法的局限性,显著提高探测精度和探测深度。

## 1 研究区概况

### 1.1 区域地质概况

研究区位于华北地台北缘构造交汇带,属山西台背斜与阴山隆起的构造过渡区域,隶属于大同盆地。区域构造格局主要受北东向断裂体系控制,中生代燕山运动与新生代喜马拉雅运动的叠加改造显著,地震活动频发<sup>[7]</sup>。区域地层序列完整,其基底由太古宙集宁群变质杂岩构成,上覆古生代海相碳酸盐岩系及陆相含煤建造。中生代陆相碎屑岩系与新生代河湖相沉积构成上覆盖层,其中第四纪风成黄土、冲洪积物及玄武质火山碎屑具有典型性,大同火山群的多期喷发事件在区域内形成独特的火山机构地貌<sup>[8-10]</sup>。许堡乡大王窑村与杜庄乡千千村虽同处大同盆地,但地质特征呈现显著差异(图1)。大王窑村位于盆地东北部构造活跃带,属于盆地边缘地区,出露地层以第四系冲洪积松散层与上新世玄武岩为主,受肖家窑头山火山机构控制明显<sup>[11]</sup>。

山前盆地至盆地中心,粒度整体表现为由粗到细,山前盆地冲洪积层发育,砾石、粗砂包裹其中,内部孔隙度较大,是主要的储水层和地下水补给通道。盆地中心以砂土、亚粘土、细砂等细粒沉积物为主,夹杂薄层中粗粒砂层,盆地内亚粘土、亚砂土主要分布在盆地表层,中粗粒砂层分布于盆地深部<sup>[8]</sup>。千千村剖面则位于黄土高原东北缘过渡带,属于盆地腹地,发育完整的第四系泥河湾组湖相沉积序列<sup>[12,13]</sup>。

### 1.2 区域地层电性特征

根据研究区物性参数特征分析(表1),第四系沉积物电阻率呈现明显的粒度与赋存环境协同控制规律:沉积物电阻率值总体随粒度增大呈阶梯式递增趋势,但受控于不同地貌单元的水文条件差异,高含水率显著降低介质电阻率响应。如表1所示,山前至盆地中心区亚砂土、亚粘土电阻率( $20\text{--}40\Omega \cdot \text{m}$ )较两河沿岸盐碱区同类型沉积物( $0\text{--}20\Omega \cdot \text{m}$ )略微升高。沉积序列中细砂、粉砂( $40\text{--}50\Omega \cdot \text{m}$ )至中粗砂、砾石( $50\text{--}300\Omega \cdot \text{m}$ )的电阻率呈现增大趋势,则直观体现了碎屑颗粒粒度和胶结程度对电流传导效率的影响,而基岩( $>100\Omega \cdot \text{m}$ )作为高阻基底的电性

表 1 研究区地层岩性与电阻率对照表<sup>[6]</sup>

岩性	电阻率(Ω·m)
亚砂土、亚粘土	20–40(山前至盆地中心区) 0–20(两河两岸的盐碱区)
亚砂土与粉细砂互层	30–40
细砂、粉砂	40–50
中粗砂、砾石	50–300
基岩	>100

标志层,构成区域电性结构的重要分界。因此,在解译研究区盆地边缘和盆地中心区域的地层电性结构时,要考虑到这些因素导致的电阻率特征差异。

## 2 工作技术方法

### 2.1 高密度电阻率法(ERT)

高密度电阻率法是通过向地下供入有一定规律的直流电流,再通过一定间距的接收电极来观测其中心位置一次场,再通过一次场结合观测装置相关参数反算地下介质的视电阻率,利用地下不同深度、不同介质的电阻率差异来探测和区分异常<sup>[14]</sup>。经过处理后的高密度电阻率断面资料直观反映测线位置的地下构造形态特征。

### 2.2 音频大地电磁法(AMT)

音频大地电磁法是基于天然电磁场源的被动源电磁探测技术,其有效工作频段为 0.35–10400Hz。该方法通过测量相互正交的电场分量( $E_x$ )与磁场分量( $H_y$ ),基于平面波传播理论计算 Cagniard 视电阻率公式:

$$\rho_{xy} = |E_x|^2 / (\omega\mu|H_y|^2) \quad (1)$$

其中, $\rho_{xy}$  表示视电阻率(单位: $\Omega\cdot m$ ), $E_x$  表示电场强度在  $x$  方向上的分量, $H_y$  是磁场强度在  $y$  方向上的分量, $\omega$  是角频率, $\mu$  是磁导率(单位为: $H/m$ )。

野外数据采集采用分频带观测模式,设置 2–4 号频带分别对应 24000Hz、2400Hz 和 150Hz 采样率,覆盖 0.35–10040Hz 范围内的 60 个离散频点。每个频点同步记录电磁场振幅数据,进而

计算各频点的 Cagniard 视电阻率值。根据电磁场的趋肤深度计算公式:

$$\delta \approx 503(\rho/\mu f)^{0.5} \quad (2)$$

其中, $\delta$  是趋肤深度(单位为:m), $f$  是电磁波的频率(单位为:Hz), $\mu$  是导体的磁导率(单位为: $H/m$ ), $\rho$  是导体的电导率(单位为: $S/m$ )。

### 2.3 仪器装置与数据处理

本次高密度电法野外工作使用吉林大学研制 E60DN 型分布式高密度电法仪,工作中配套设备有外接电瓶、电极开关、分布式电缆、电极等。本次数据处理采用 RES2DINV,该软件专门用于处理二维高密度电法数据。它能对采集到的原始数据进行预处理,包括剔除明显的坏点、对数据进行平滑滤波等操作,以提高数据质量。同时可以进行反演计算,通过建立合适的地质模型,反演出地下介质的电阻率分布情况,并以直观的图像形式展示出来。详细流程见图 2。

音频大地电磁法选用加拿大凤凰地球物理公司生产的 V8 电法工作站。V8 电法工作站配备的 AMT 方法组件具垂向分辨率高、探测范围和深度大、抗干扰能力强、采样密度高等特点。AMT 方法测量参数为  $E_x$ 、 $H_y$ ,最终获取卡尼雅视电阻率,实现电性结构垂向分层与横向变化的可视化表征。大地电磁资料的处理和基本流程见图 3。

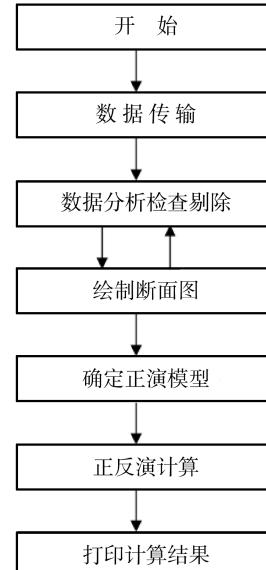


图 2 高密度电法处理流程图

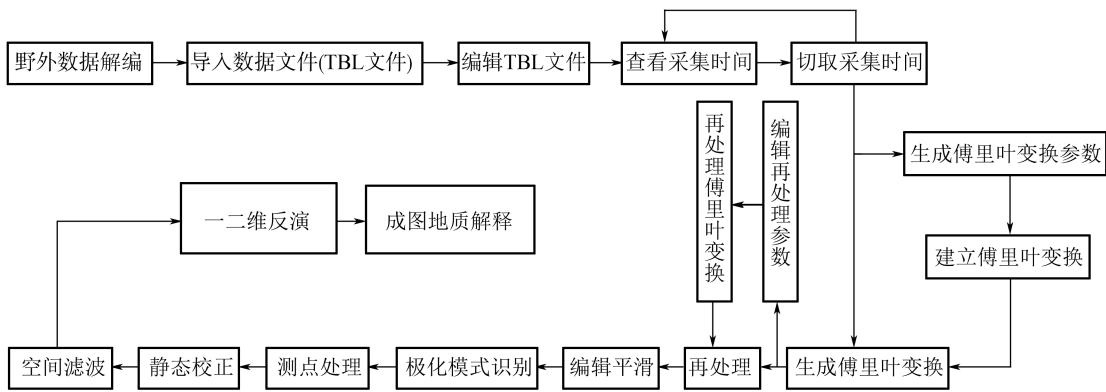


图3 资料处理流程框图

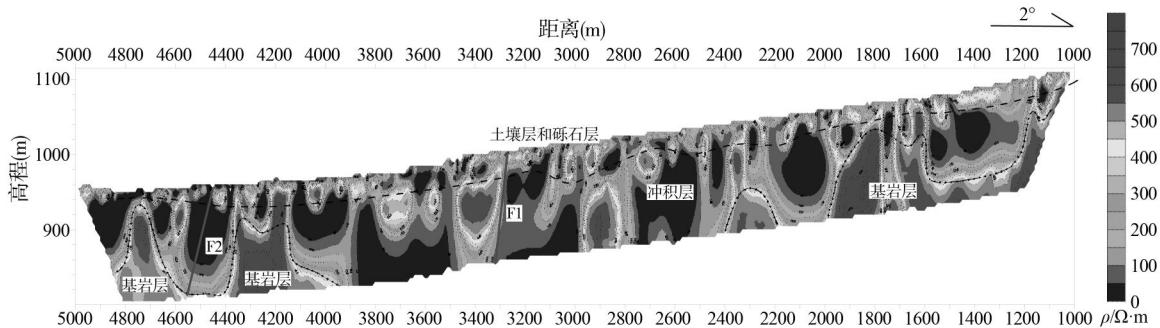


图4 L1线 ERT 视电阻率反演断面图

## 2.4 测线布设

根据对探测区实地踏勘,结合已知地质资料,分别在云州区许堡乡大王窑村西侧和云州区杜庄乡千千村西侧布设高密度电法测线和音频大地电磁点位。为实现联合探测目的,两种方法测线与测点重合,以提高成果解译的可靠性。

云州区许堡乡大王窑村西侧部署的测线L1,剖面总长度为4km,电极间距5m。测线方位角 $2^{\circ}$ ,测线由南到北经过恒山山脉北缘、大同盆地,最终抵达云州水库附近。测点均位于大同盆地内第四系冲(洪)积沉积物中,各电极接地电阻200–1000Ω之间,接地情况较好;AMT测深剖面与高密度剖面完全重合,点距100m,完成物理点41个。

云州区杜庄乡千千村西侧部署测线L2,剖面总长度为1.1km,电极间距5m,测线方位角 $113^{\circ}$ 。剖面整体位于盆地中心,东侧为桑干河支流坊城河,地形平坦。本剖面接地条件较好,各

电极接地电阻200–1000Ω之间。AMT测深剖面与高密度剖面完全重合,点距100m,完成物理点12个。

## 3 结果分析与讨论

### 3.1 云州区许堡乡大王窑村 L1 线

#### 3.1.1 反演结果

从L1线ERT反演解译剖面来看,在地表附近部分区段电阻率等值线呈现小的峰值,为表层接地不均或表层物性不均的电性反映(图4)。断面图垂向上电性特征主要为三层反映,结合实地踏勘与已知地质资料分析,从上到下依次为表层土壤砾石层、冲积层以及基岩。水平方向上,表层土壤层不连续,部分区段缺失,砾石层与土壤层互层或位于土壤层下方,厚度0–50m;冲积层变化也较大,厚度10–150m;基岩在1000–2450m、3950–4900m体现较明显,部分区段在150m深度上无基岩层,如2450–3950m。

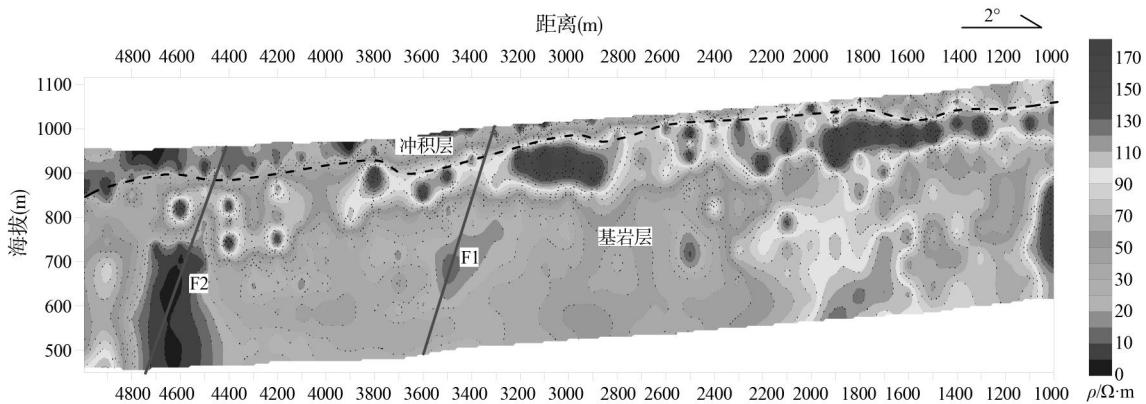


图 5 L1 线 AMT 视电阻率断面图

L1 线 AMT 反演解译剖面(图 5)来看,整体电性结构明显,纵向上可以分为两层,由于土壤和砾石层较薄反应不明显,推测第一层主要为冲积层的反应,第二层为基岩层,基岩和山前冲积层分界面较明显。横向上看,由南向北,山前冲积层逐渐变厚,在 3000—3800m 和 4400—4800m 区域内视电阻率较小,下部的基岩层出现低阻。

### 3.1.2 分析讨论

(1) 垂向分层特征及成因分析。根据 ERT 与 AMT 反演结果分为三层结构:

表层(0—50m): 电阻率范围约  $0\text{--}50\Omega \cdot \text{m}$ , 土壤-砾石互层的不连续性(部分区段缺失)可能反映山前冲积扇边缘的沉积特征,受古地形起伏或后期侵蚀作用控制,山前水流分选作用可能导致砾石层与细粒沉积物的空间交替,AMT 对浅部薄层( $<50\text{m}$ )的分辨率有限,导致 ERT 识别的表层土砾石层未被单独区分。

冲积层(10—150m): 大部分地层电阻率处于  $50\text{--}100\Omega \cdot \text{m}$ , 厚度剧变(如 2450—3950m 区段缺失基岩)可能指示构造控制的沉积差异。基岩埋深较浅区(1000—2450m、3950—4900m)对应稳定基底,而基岩缺失区可能为古河道或断陷盆地(如地堑构造);

基岩层,基岩电阻率普遍高于  $100\Omega \cdot \text{m}$ (表 1),其局部缺失(如 2450—3950m)可能与断裂破碎带或风化剥蚀有关。AMT 反演剖面中 3000—3800m 和 4400—4800m 区段的基岩低阻( $<100\Omega \cdot \text{m}$ )与 ERT 的基岩缺失区(2450—3950m)部分重叠,可

能共同指向断裂带。低阻成因包括断裂破碎带充水和基岩风化壳富含黏土矿物。

(2) 横向分层特征及成因分析。冲积层南薄北厚,L1 线由南向北冲积层逐渐增厚,符合山前冲积扇向盆地中心沉积加厚的规律。厚度突变(如 4400—4800m)可能受基底断裂差异沉降控制,与区域北东向断裂活动(大同盆地构造演化)相关。此外,该地区存在富水性断层,ERT 揭示的基岩缺失区(2450—3950m)与 AMT 的低阻基岩区(3000—3800m)部分重合,可能构成断裂带的双方法响应。ERT 显示基岩顶界凹陷(正断层特征),而 AMT 低阻反映断裂导水性。

## 3.2 云州区杜庄乡千千村

### 3.2.1 反演结果

从高密度电法反演解译剖面(图 6)来看,垂向上电性特征主要分为 3 层,结合实地踏勘与已知地质资料分析,从上到下依次为表层土壤和砾石层、冲积层以及基岩。水平方向上,表层土较薄,很难区分,土壤层和砾石层比较稳定,厚度在 0—25m; 冲积层变化较大,厚度 25—120m; 120m 以下为基岩层。

从 AMT 反演解译剖面(图 7)来看,整体电性结构明显,纵向上可以分为两层,由于土壤和砾石层较薄反应不明显,推测第一层为冲积层,第二层为基岩层。总体上看,该线下部基岩层视电阻率值较低,推断是由于地层富水引起。横向上看视电阻率比较均匀,反应地层比较稳定。

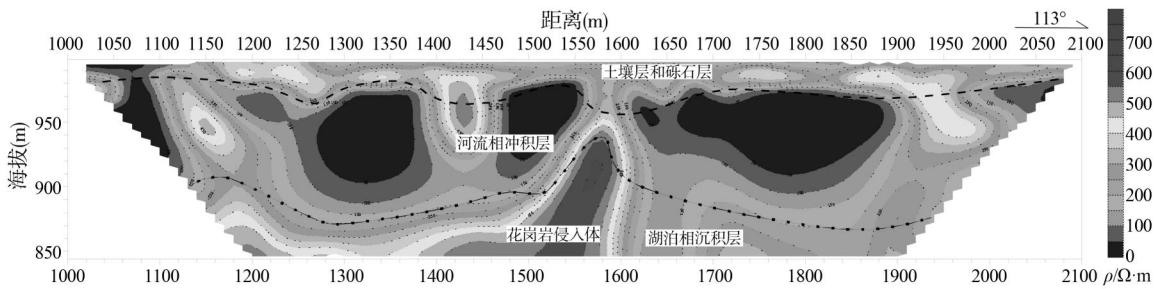


图 6 L2 线 ERT 视电阻率反演断面图

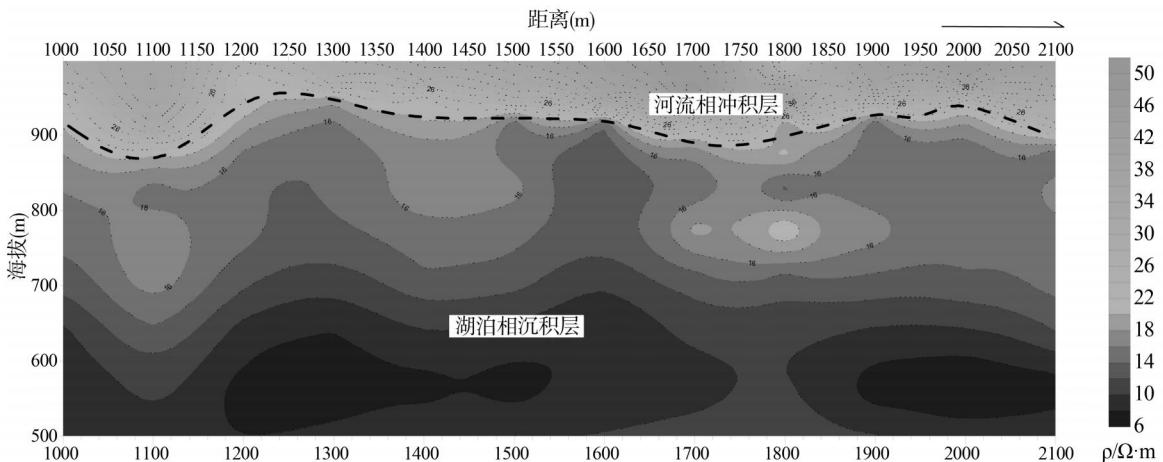


图 7 L2 线 AMT 视电阻率断面图

### 3.2.2 分析讨论

(1) 垂向分层特征及成因分析。根据 ERT 与 AMT 的反演结果(图 6、图 7), L2 线垂向电性分层特征如下:

表层土壤和砾石层(0~25m): ERT 显示该层厚度较薄且稳定, 电阻率范围约  $30\text{--}50\Omega \cdot \text{m}$ , 与岩性描述中的“亚砂土与粉细砂互层”一致。其较薄且均一的特征可能反映盆地中心长期稳定的湖相沉积环境(泥河湾组), 水流分选作用使沉积物粒度趋于均质化, 孔隙度较低, 富水性较弱, 导致电阻率相对稳定。

河流相冲积层(25~120m): 冲积层厚度变化显著(25~120m), 电阻率约  $30\text{--}50\Omega \cdot \text{m}$ (图 6), 与“细砂、粉砂”及“亚砂土”的电性参数( $40\text{--}50\Omega \cdot \text{m}$ )略有差异。这种偏差可能源于实际含水量的空间差异, 盆地中心湖相沉积物通常富水性, 导致电阻率略低于理论值。此外, 冲积层厚度的波动可能受古盆基底地形或局部沉积中心控。

湖泊相沉积层(>120m): AMT 反演显示基岩层整体电阻率偏低( $<100\Omega \cdot \text{m}$ ), 显著低于区域基岩典型值( $>100\Omega \cdot \text{m}$ , 表 1)。结合研究区位于大同盆地中心且发育湖相沉积的背景, 低阻成因可归因于泥河湾组湖相沉积中的黏土质泥岩或页岩的天然低阻特性。

(2) 横向分层特征及成因分析。沉积环境稳定性: 盆地中心长期接受连续湖相沉积, 水流能量较低, 沉积物分选良好, 岩性横向变化小(如细砂、粉砂与粘土互层), 导致电性分布均匀。这与许堡乡大王窑村(L1 线)山前冲积扇的非均质性形成鲜明对比。

构造活动微弱:L2 线横向电性结构分布未出现类似 L1 线的电阻率突变或低阻异常带, 表明该区域未受显著断裂活动影响, 说明大同盆地中心区域构造相对稳定。AMT 未识别到深部构造响应, 支持区域构造活动以差异沉降为主, 而非断裂主导。

## 4 结论

本研究聚焦大同盆地地层结构调查,通过高密度电阻率法(ERT)与音频大地电磁法(AMT)综合探测,系统揭示了盆地边缘及中心地区地质结构的空间分布特征,结论如下:

(1) 大同盆地边缘地层可分为表层土砾石层、冲积层及基岩层三层。盆地边缘受北东向断裂影响,冲积层由南向北增厚,局部发育导水断裂带;盆地中地层可分为表层土砾石层、冲积层及沉积层三层(未见基岩面),岩性横向变化小(如细砂、粉砂与黏土互层),局部分布花岗岩侵入体,构造活动相对稳定,反映稳定沉积环境。

(2) ERT 与 AMT 联合探测有效克服了单一方法的局限性,前者精准刻画浅部地层界面与局部异常(如断层、含水层),后者则穿透深部基岩并揭示区域构造特征。两者结合实现了浅层(0~50m)至中深层(>50m)地质结构的全覆盖。

(3) 基岩低阻特征( $<100\Omega \cdot m$ )指示深部可能存在富水层,结合冲积层中粗砂(50~300 $\Omega \cdot m$ )的潜在渗透性,该区域或具双层含水系统(浅部冲积层孔隙水+深部基岩裂隙水)。

### 参考文献(References):

- [1] 郑芬. 山西省生态修复工作中的问题及对策[J]. 山西水利, 2004, 20(03): 24~24+56
- [2] 王伟. 矿山生态环境保护与恢复治理评价指标体系的研究[D]. 太原: 中北大学, 2014.
- [3] 孙娟绒. 御河流域山西段生态修复与保护对策[J]. 华北水利水电大学学报(社会科学版), 2016, 32(05): 20~23.
- [4] 王强. 浅谈山西省水土流失问题及防治措施[J]. 科技情报开发与经济, 2010, 20(27): 166~168.
- [5] 魏新宇, 魏彤宇. 生态文明视阈下的污染损毁土地治理[J]. 农业技术与装备, 2016, 32(04): 28~30.
- [6] 刘怀庆. 大同盆地高砷地下水系统的地球物理特征[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2008.
- [7] 岑敏, 董树文, 施炜, 等. 大同盆地形成机制的构造研究[J]. 地质论评, 2015, 61(06): 1235~1247.
- [8] 杨小鹏. 山西裂谷系成因机制研究—以大同盆地为例[D]. 长春: 吉林大学, 2023.
- [9] 刘爱荣, 徐永婧, 刘成林, 等. 大同盆地地质特征及构造演化研究[J]. 现代地质, 2021, 35(05): 1296~1310.
- [10] 李小琴, 聂鑫, 白卓娜, 等. 山西大同新生代玄武岩的岩石地球化学特征研究[J]. 太原理工大学学报, 2021, 52(02): 219~225.
- [11] 安卫平, 苏宗正. 山西大同火山地貌[J]. 山西地震, 2008, 36(01): 1~59.
- [12] 张飞, 宁显林, 殷红飞. 大同县孔隙地下水富集规律研究[J]. 地下水, 2012, 34(01): 36~37.
- [13] 蔡莹莹, 李继彦, 屈欣, 等. 大同土林地貌沉积物粒度特征分析[J]. 干旱区研究, 2021, 38(03): 892~900.
- [14] 董浩斌, 王传雷. 高密度电法的发展与应用[J]. 地学前缘, 2003, 10(01): 171~176.
- [15] 陈文华. 音频大地电磁法及其今后研究方向[J]. 河北地质学院学报, 1980, 3(02): 22~34+78.
- [16] 张娟. V8 多功能电法工作站在广西长大深埋公路隧道勘察中的应用研究[D]. 南宁: 广西大学, 2015.

### 作者简介:

第一作者/通讯作者:石致君,1996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,主要研究方向地球物理。Email: 635361321@qq.com。

## Application of Integrated Electrical Methods in Geological Survey of Quaternary-Covered Areas in Datong Basin

SHI Zhijun<sup>1,3\*</sup>, SUN Yanhai<sup>1,2,3</sup>, LIU Qing<sup>1,3</sup>, ZHU Jiabin<sup>1,3</sup>, XIN Yiguo<sup>1,3</sup>, HAO Xiaoqing<sup>1,3</sup>

(1. Harbin Center for Integrated Natural Resources Survey, China Geological Survey, Haerbin 150086, China

2. Northeast Geological S&T Innovation Center of China Geological Survey, Shenyang 110034, China

3. Observation and Research Station of Earth Critical Zone in Black Soil, Harbin, Ministry of Natural Resources, Haerbin 150086, China)

**Abstract:** This article focuses on the large-scale coverage of Quaternary sediments in the shallow layer of Yunzhou District, Datong City, which affects the division of shallow strata and the identification of structures. The comprehensive electrical method plays a crucial role in this process. Compared with traditional geophysical methods, it has significant advantages, enabling the rapid acquisition of the underground stratum structure, lithological characteristics, and the distribution of water-bearing areas. This paper expounds on the working technology of the comprehensive electrical method, covering the principles, instruments, data processing, and survey line layout of the high-density resistivity method and the audio magnetotelluric method. It also accurately explores the characteristics of the underground electrical structure in Dawangyao Village, Xubao Township, and Qianqian Village, Duzhuang Township, Yunzhou District, clarifying the stratum distribution and structural features. The high-density resistivity method has a relatively high resolution for depths within 150 meters, and the audio magnetotelluric method can effectively detect deeper layers. The combined detection of these two methods not only takes into account the distribution status of the aquifer and the structural geological features in the shallow layer but also reflects the changes in the stratum structure in the deep layer. It provides a basis for the utilization of water resources and the prevention of geological disasters in regional ecological restoration, and offers data support for subsequent research.

**Key words:** Yunzhou District, DaTong City; electrical resistivity tomography; audio magnetotelluric method; electrical structure

# 基于音频大地电磁测深法的地下水勘探研究

——以山西省五台县斗咀村与两涧村为例

王 康<sup>1,2,3\*</sup>, 孙彦海<sup>1,2,3</sup>, 陈海江<sup>1,3</sup>, 刘 庆<sup>1,3</sup>, 石致君<sup>1,3</sup>, 詹佛祥<sup>1,3</sup>

- (1. 中国地质调查局哈尔滨自然资源综合调查中心, 哈尔滨 150086;  
2. 中国地质调查局东北地质科技创新中心, 沈阳 110034;  
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:**本研究针对五台县斗咀村和两涧村水资源匮乏问题,采用音频大地电磁测深法(AMT)进行地下水资源探测。结合已知区域地质和水文地质资料研究,运用音频大地电磁测深法,选用 GDP-32 II 多功能电法仪进行数据采集,经严格测线布设和数据处理,精准预测有利含水区,有效勘查了斗咀村和两涧村地表以下 1000m 范围内地层岩性结构、构造破碎带及地下含水区的分布特征,并对成井模式及推荐井位进行探讨。研究成果为当地水资源合理开发利用提供了关键科学依据,有效解决了用水难题。

**关键词:**音频大地电磁测深法;五台县;找水实践;地质分析;成井模式

中图分类号:P319

文献标志码:A

文章编号:1672-2736(2025)09-0116-7

## 0 引言

水是生命之源,对人类生存和发展至关重要。五台县斗咀村和两涧村地表水资源匮乏,河流径流量小且季节性变化明显,干旱季节甚至干涸。地下水资源成为当地生活和农业用水的主要依赖,但目前对其分布和储量认识不足。现有民用水井多为浅层井,出水量随用水需求增长逐渐减少,水质也存在问题,部分区域浅层地下水受到污染,影响居民健康<sup>[1,2]</sup>。

音频大地电磁法(AMT)作为一种有效的地球物理勘探方法,在找水领域具有独特优势。它利用天然交变电磁场为场源,通过测量不同频率下的电场和磁场分量计算卡尼雅视电阻率值,以推断地下地质结构和含水层分布情况。与传统找水方法相比,AMT 具有探测深度大、效率高、成本相对较低等优点,能在不破坏地下地质结构的前提下快速获取深部地质信息<sup>[3-5]</sup>。

本次研究目的在运用音频大地电磁测深法

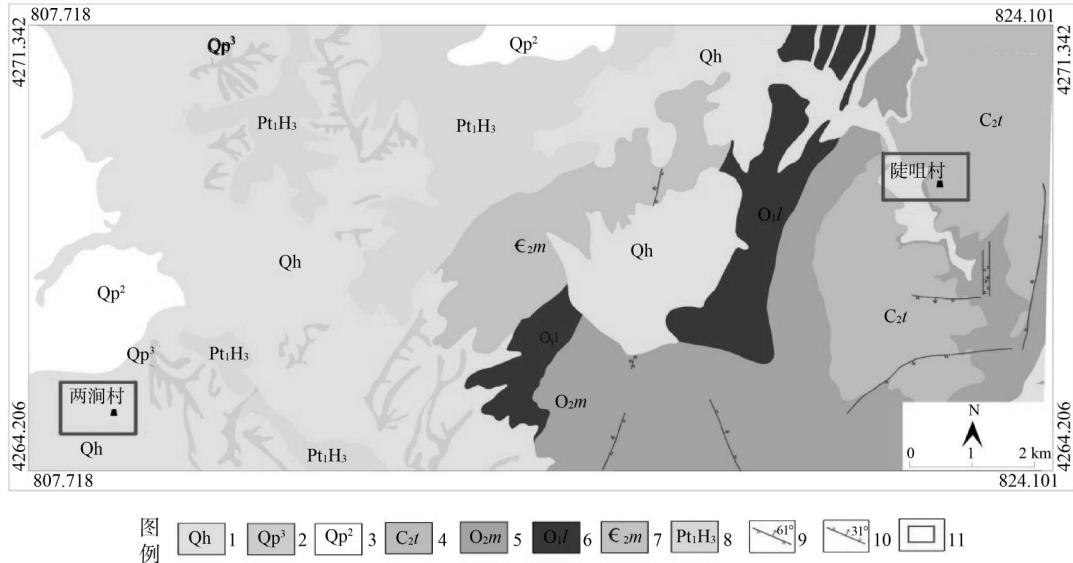
精准探测两村地下水资源分布,根据地下岩性电阻率差异,划分其富水区展布状态,为水资源合理开发利用提供科学依据。具体研究内容包括查明地下不同深度地质结构、构造,确定主要岩层分布和特征;识别含水层位置、厚度,大致了解富水性和地下水补给情况。

## 1 研究区概况

### 1.1 区域地质

五台县地处华北板块北缘,地质演化历史漫长复杂,地质构造呈现多种构造体系交织格局<sup>[6-8]</sup>。整体处于山间谷地,地势略缓且大部分地区被植被覆盖,四周陡山环绕,靠近村镇开辟有大量农田,研究区分别处于五台县内的斗咀村和两涧村(图 1)。出露地质体主要为滹沱群东治亚群板岩、白云岩,寒武系中统馒头组页岩、灰岩,奥陶系中统亮甲山组灰岩,奥陶系中统马家沟组灰岩、白云岩,石炭系上统太原组页岩、砂

基金项目:中国地质调查局东北地质科技创新中心区创基金项目(QCJJ2022-3)。



1—第四系全新统;2—第四系上更新统;3—第四系中更新统;4—石炭系上统太原组;5—奥陶系中统马家沟组;  
6—奥陶系中统亮甲山组;7—寒武纪中统馒头组;8—滹沱群东治亚群;9—正断层;10—逆断层;11—测区位置

图 2 研究区地质简图

岩、灰岩<sup>[9,10]</sup>,第四系更新统与全新统的沉积物,主要为粘土、砂土以及砂砾等。这些沉积物的厚度与地形地貌关联紧密,在沟谷区域,其厚度能够达到数十米,而在丘陵区域,厚度则不足十米。两洞村位于五台县正南方向,处于山谷之中,区内发育着厚层的第四纪坡积物。斗咀村地处五台县茹村乡南部,地势略有起伏,石炭系页岩在此出露,可见因构造原因破碎的基岩,第四系松散层也呈零星分布状态。历经漫长岁月的构造运动,五台县形成了一系列褶皱与断裂。古老的岩层在这一过程中发生了强烈变质,不仅导致了五台山区的隆起与拗陷,还引发了强烈的岩浆活动<sup>[11]</sup>(图 2)。

## 1.2 水文地质

五台县斗咀村和两洞村地下水类型主要有松散岩类孔隙水、基岩构造裂隙水以及可溶类岩溶水<sup>[12]</sup>。

松散岩类孔隙水赋存于第四系黄土层中,黄土多孔,孔隙连通,为地下水储存提供一定空间。部分区域黄土覆盖厚、降水入渗条件好,此类孔隙水有一定分布,但水量较小,水位受季节影响大,雨季上升,旱季下降。

基岩构造裂隙水存在于太古界五台群变质

岩和元古界滹沱群地层中。太古界变质岩虽致密,但构造运动形成大量节理裂隙,成为地下水储存和运移通道。

可溶类岩溶水主要分布在白云岩地层中。白云岩经长期岩溶作用,发育溶蚀裂隙和溶洞,相互连通形成复杂岩溶管道系统,为岩溶水储存和径流提供良好空间<sup>[13,14]</sup>。

## 2 工作技术方法

### 2.1 原理及方法

音频大地电磁测深法(AMT)基于电磁感应原理,利用天然交变电磁场(频率范围 0.1Hz–10kHz)作为场源,该场源来自地球外部电磁现象,如太阳活动、雷电活动等。场源穿透地下与地质体相互作用,携带地下地质信息<sup>[15,16]</sup>。

实际测量时,在地面布置观测装置,利用天然场源平面波建立电磁场。观测装置由相互垂直的电偶极和磁偶极组成,电偶极测量电场  $E_x$  分量,通过一对电极感应地下电场变化,电位差与电场强度成正比;磁偶极测量磁场  $H_y$  分量,通常用感应线圈检测磁场变化。一般情况下,岩石致密程度的高低,反应在卡尼雅视电阻率上也呈现高低的变化;在相同地质背景下,地下存在含

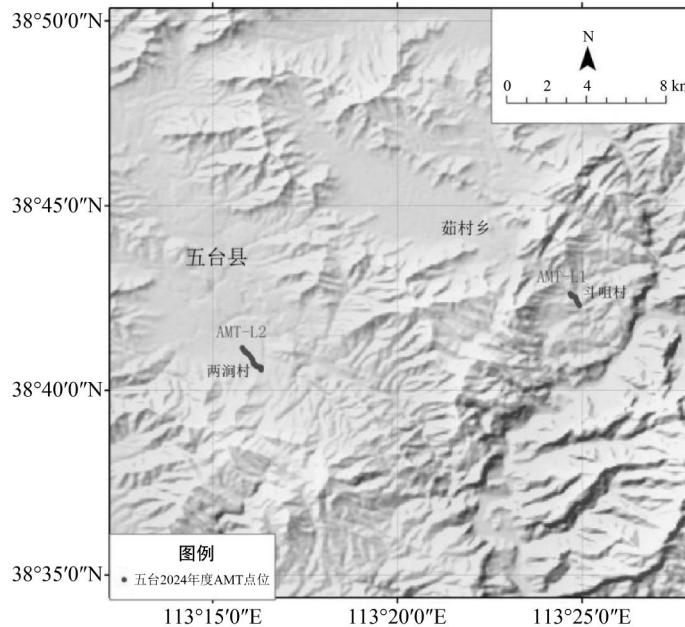


图 1 AMT 测线位置图(地形底图来自于国家地理信息公共服务平台(<https://www.tianditu.gov.cn>))

水层时,水导电性好、电阻率低,在卡尼亞视电阻率剖面上表现为低阻异常。通过分析解释卡尼亞视电阻率的变化,可推断地下含水层位置、厚度和大致富水性,为地下水资源勘探提供依据。

## 2.2 仪器装置与数据处理

本次选用美国 Zonge 公司生产的 GDP-32 II 多功能电法仪,该仪器有 8 个接收通道,可同时采集分析多个电磁信号,提高数据采集效率和全面性。工作频率范围 0.75~8192Hz,能适应不同深度地质体探测要求<sup>[17,18]</sup>。

数据处理流程为:利用 GDP-32 II 多功能电法仪采集数据;采用 MTFT 软件对原始数据预处理,去除噪声、校正;利用 SCS2D 专业反演软件反演计算,得到地下电阻率分布模型;结合地质背景和已有水文地质资料,解释分析地下地质结构和含水层分布,确定富水区域,推荐井位;不断验证优化数据和解释结果,确保研究结果准确可靠。

## 2.3 测线布设

根据探测目标和地形条件,在五台县斗咀村和两涧村部署测线。在五台县斗咀村西南侧沟内 1000m 以浅地下水分布,部署测线 AMT-L1。测线由北西往南东布设,走向 150°,点距 40m,剖

面长度 600m,最大探测深度约 1km。五台县两涧村北东侧部署测线 AMT-L2。测线由北西往南东布设,走向 140°,点距 50m,剖面长度 1250m,最大探测深度约 1km(图 2)。

## 3 成果解释应用

### 3.1 AMT-L1 测线分析

从 AMT-L1 反演剖面图(图 3)可见,1000m 以内由浅到深卡尼亞视电阻率可划分为 4 种类型:

(1) 地表~100m,视电阻率高低混杂,横向变化大。结合地质背景推断主要岩性为砂岩、泥(页)岩,部分位置夹杂灰岩、白云质灰岩。总体较破碎,在破碎处含水性较好,含水层类型主要为裂隙水,部分砂砾岩内亦应含孔隙水。本层是研究区主要的潜水层。

(2) 埋深 100~350m,总体为 200 数千  $\Omega \cdot m$  的高视电阻率区。在测线右端存在一个倾向南东且较陡立的低阻异常,推断主要岩性为灰岩、白云质灰岩,右侧低阻带为富含水断层或裂隙岩溶。高阻区厚度大、连续性好,为本区主要隔水层。右侧陡立低阻区则为沟通上下 2 个含水层的地下水通道。

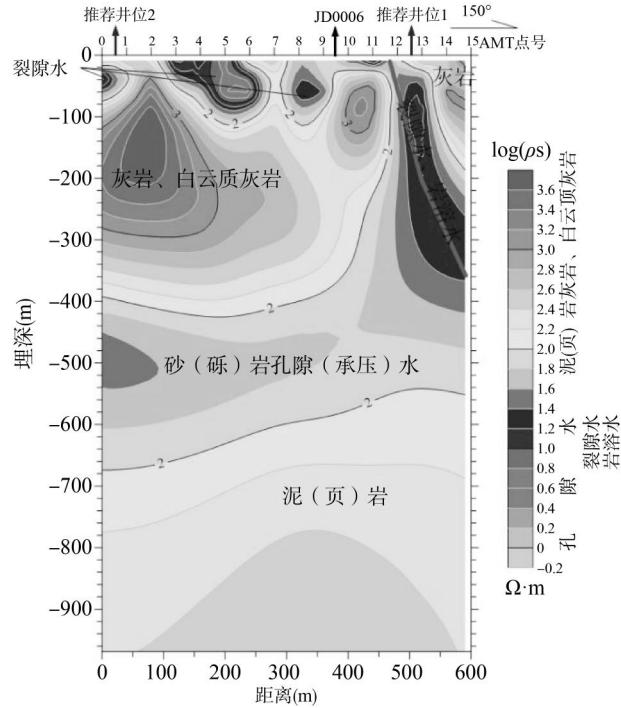


图 3 AMT - L1 反演与解释剖面图

(3) 埋深 350—650m, 总体为  $30\text{--}100\Omega \cdot \text{m}$  的层状中低视电阻率区。推断主要岩性为砂(砾)岩。本层地层孔隙中含水性较好, 是本区主要的承压水层。

(4) 埋深 650m—未见底, 总体为大于  $100\Omega \cdot \text{m}$  的近层状中高视电阻率区。推断岩性主要为泥(页)岩, 可能夹具有一定含水性相对薄层的砂(砾)岩。

### 3.2 AMT - L2 测线分析

从 AMT-L2 反演剖面图(图 4)可见, 整个测线首先从左往右在 650—800m 处可分为 2 个类型:

(1) 测线 0—800m, 整体视电阻率相对较低。推断主要岩性为砂岩、泥(页)岩。埋深 400m 以浅总体较破碎, 在破碎处含水性较好, 含水层类型主要为孔隙水、裂隙水, 浅部 2 个封闭低阻带推测为岩溶水。大于 200m 的深部高阻区厚度大、连续性好, 推测含水性较差。

(2) 测线 800—1250m, 整体视电阻率相对较高, 在测线右端 200m 以浅存在 2 个相对较封闭的低阻区, 推断为岩溶水。200m 以下高阻区推断主要岩性为灰岩、白云质灰岩。

### 4 成井模式探讨及验证

根据反演结果和已知的水文地质资料推断: 斗咀村主要含水层主要为 2 个: 第一是埋深 100m 以内、横向变化差异大的裂隙、孔隙潜水层; 第二是 350m 以深的砂(砾)岩孔隙承压水。二者以测线右端的断层或岩溶沟通。故推荐井位 1 位于测线右端 500 余米处测点 12—13 之间, 地下具有丰富的裂隙, 岩溶水, 井深大于 100m 即可。推荐井位 2 位于测线左端测点 0—1 之间, 80m 以浅有潜水, 大于 350m 有较好的承压水, 推荐井深大于 500m(图 3)。两涧村主要含水层主要为 2 个: 第一是测线 200—800m 处, 埋深 800m 左右的孔隙、裂隙水层; 第二是测线右端测点 17—18 之间, 和测点 20—22 之间 200m 以浅的岩溶水。故推荐井位 1 位于测线 400m 左右的测点 8 处, 地下具有丰富的裂隙, 岩溶水, 推荐井深 80—100m。推荐井位 2 位于测线右端测点 21 处, 推荐井深 250m(图 4)。

后期对两涧村井位 1 进行打孔验证, 钻孔柱状图如图 5 所示, 60m 以浅为粉质粘土、砂质粘土, 60m 以深为风化的砂岩, 含砾石。地层岩性

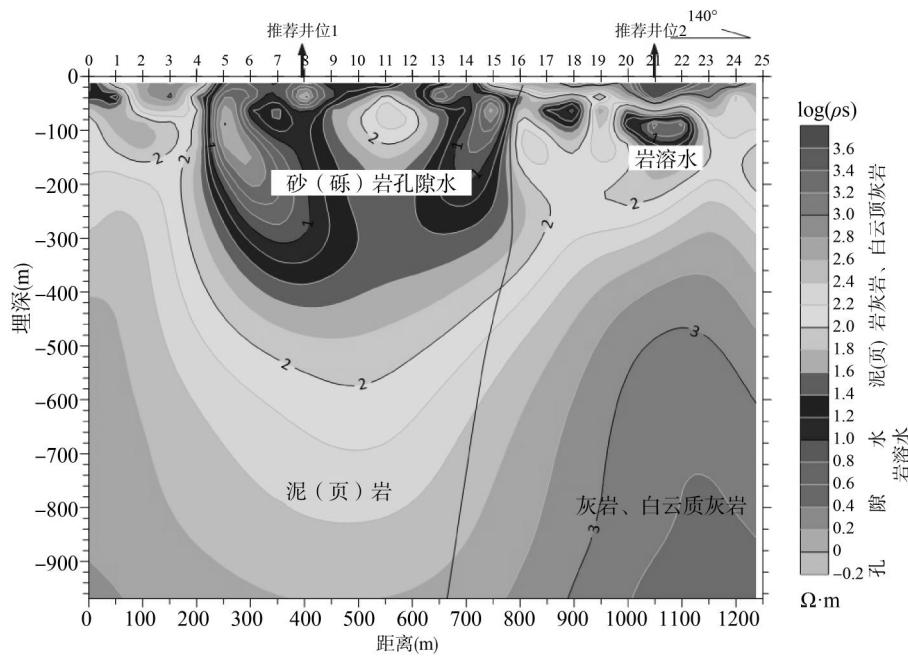


图 4 AMT-L2 反演与解释剖面图

深度(M)	岩性	地层	层厚(M)	底深(M)
0				
10	9	粉质黏土，土黄色，中等硬度，夹杂有砾石	45.6	45.6
20	5	灰黄色砂质黏土	13.5	59.1
30				
40				
50				
60				
70				
80				
90				
100				
110				
120				
130				
140				
150				

图 5 两涧村 zk-01 柱状图

与反演结果相互吻合,井水属于孔隙水,出水量  $550\text{m}^3/\text{d}$ ,解决了该村饮水困难、农作物严重缺

水减产问题。

## 5 结论

在五台县斗咀村和两涧村的实际作业过程中,运用音频大地电磁测深法开展寻水定井工作,取得了颇为良好的效果。通过该方法成功定位到了富含地下水的区域,为后续定井工作奠定了坚实基础。

然而,需要明确的是两涧村部分区域地势较为平坦,可能存在由河流冲积形成的松散堆积层,这类地层往往具备良好的透水性和储水性,地下水多以孔隙水的形式赋存;而斗咀村则可能存在一些丘陵地带,基岩出露相对较多,储水类型或转变为裂隙水,依赖岩石中的裂隙作为储水空间和运移通道。这种储水类型的显著差异,使得定井工作无法一概而论。

因此,在定井环节,必须结合具体地层、岩性、水文信息资料进行综合判断。与此同时,也需充分考量所选井位是否符合当地土地利用规划,避免占用农田保护区、生态敏感区等特殊用地。只有综合权衡这些因素,才能从众多候选位置中筛选出最佳井位,确保水井能够长期稳定地为当地居民提供充足、优质的水源,助力当地的

生产生活及社会发展。

参考文献(References):

- [1] 贺艳华. 五台县水资源开发利用程度分析[J]. 山西水利, 2014, 30(08): 6+8.
- [2] 李鹏强. 山西省忻州盆地地下水污染特征研究[J]. 节能与环保, 2021, 39(04): 79–80.
- [3] 李世军, 王力斌. 物探方法在找水方面的应用[J]. 吉林地质, 2008, 27(03): 110–112.
- [4] 邬健强, 甘伏平, 张伟, 等. 音频大地电磁法在怀化方石坪村红层找水中的应用研究[J]. 中国岩溶, 2018, 37(06): 918–924.
- [5] 王家俊, 杨炳南, 朱大伟, 等. 音频大地电磁法在黔西南金矿区域地电特征研究中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2024, 21(04): 611–620.
- [6] 杨振升, 耿元生, 李德伦, 等. 山西五台山地区前滹沱群变质岩构造变形史[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 1982, 26(01): 15–28.
- [7] 魏春景. 华北中部造山带五台-恒山地区古元古代变质作用与构造演化[J]. 地球科学, 2018, 43(01): 24–43.
- [8] 王兴安. 华北板块北缘中段早古生代-泥盆纪构造演化[D]. 长春: 吉林大学, 2014.
- [9] 罗曼. 五台山元古界滹沱群沉积相与古环境演化研究[D]. 北京: 北京大学, 2008.
- [10] 杜利林, 杨崇辉, 王伟, 等. 五台地区滹沱群时代与地层划分新认识: 地质学与锆石年代学证据[J]. 岩石学报, 2011, 27(04): 1037–1055.
- [11] 杜利林, 杨崇辉, 宋会侠, 等. 以地质事件性质讨论华北克拉通古元古界典型地层时代——以五台地区滹沱群为例[J]. 岩石矿物学杂志, 2023, 42(06): 767–787.
- [12] 卢清峰. 山西地下水类型及主要含水层特征[J]. 山西煤炭管理干部学院学报, 2006, 19(03): 121–122.
- [13] 王大纯. 水文地质学基础[M]. 北京: 地质出版社, 1986.
- [14] 常士骠, 张苏民. 工程地质手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.
- [15] 辛会翠. 音频大地电磁远参考点信号特征及远参考大地电磁法在信号处理中的应用研究[J]. 承德石油高等专科学校学报, 2019, 21(04): 41–46.
- [16] 渠继明. 音频大地电磁测深法在复杂地质条件下勘察的应用[J]. 山西水利科技, 2022, 52(03): 23–25.
- [17] 郭文波, 王凯, 王善勋, 等. GDP-32Ⅱ多功能电法仪及应用效果[C]. 陕西省地球物理学会. 2003年陕西省地球物理学会年会: 陕西地球物理文集(四). 西北有色地质勘查局物化探总队, 2003: 152–155.
- [18] 郭文波, 王凯, 王善勋, 等. GDP-32Ⅱ多功能电法仪在资源和工程勘察中的应用效果[J]. 矿产与地质, 2004, 24(06): 587–590.

作者简介:

第一作者/通讯作者:王康,男,1994年生,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,主要研究方向为地质工程。Email: wangkang@mail.cgs.gov.cn

## Research on Groundwater Exploration Using Audio Magnetotelluric Sounding Method: A Case Study of Douzui Village and Liangjian Village in Wutai County, Shanxi Province

WANG Kang<sup>1,2,3\*</sup>, SUN Yanhai<sup>1,2,3</sup>, CHEN Haijiang<sup>1,3</sup>, LIU Qing<sup>1,3</sup>, SHI Zhijun<sup>1,3</sup>, ZHAN Fuxiang<sup>1,3</sup>

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

2. Northeast Geological S&T Innovation Center of China Geological Survey, Shenyang 110034, China;

3. Observation and Research Station of Earth Critical Zone in Black Soil, Harbin, Ministry of Natural Resources 150086, China)

**Abstract:** This study focuses on the long-term water scarcity dilemma faced by Douzui Village and Liangjian Village in Wutai County, Shanxi Province. These two villages are located in a special geological area, where the main rock types are limestone and dolomitic limestone. The uneven development degree of these rocks leads to extremely complex precipitation infiltration conditions. Meanwhile, the terrain has large undulations, and the surface runoff has a high flow rate, making it difficult to retain water effectively. Moreover, there is a lack of stable conventional water sources such as rivers and lakes in the surrounding area, and the access to water is extremely limited, which severely restricts the improvement of the living quality of local residents and the development of agricultural production. Against this backdrop, this study uses the Audio Magnetotelluric Sounding (AMT) method to conduct the exploration of groundwater resources. When applying this method, the advanced GDP-32 II multi-functional electrical prospecting instrument is selected for data collection. Before the field operation, a detailed geological analysis was carried out, including research on aspects such as regional structures and stratigraphic distributions. During the preliminary field investigation, technicians comprehensively examined the topography and geomorphology and marked the factors that might affect the layout of the survey lines. The survey lines were laid out in strict accordance with scientific norms to ensure that the data could comprehensively cover the target area and be representative. After the data collection was completed, the SCS2D professional inversion software was used for inversion calculation and processing. Through a series of meticulous operations, the favorable water-bearing areas were accurately predicted, and the distribution characteristics of the stratigraphic lithology structure, tectonic fracture zones, and underground water-bearing areas within a range of 1,000 meters below the surface of Douzui Village and Liangjian Village were successfully explored. Based on the exploration results, an in-depth discussion was carried out on the well completion mode and recommended well locations, taking into comprehensive consideration factors such as geological stability, the thickness of the aquifer, and water quality. Ultimately, the research results provide crucial scientific evidence for the rational development and utilization of local water resources, effectively solve the long-standing water use problem, and contribute to the local sustainable development.

**Key words:** audio magnetotelluric sounding method; Wutai County; water-finding practice; geological analysis; well-completion mode



# 哈尔滨自然资源综合调查中心

《黑龙江国土资源》编委会主任单位



## 单位简介

中国地质调查局哈尔滨自然资源综合调查中心(简称哈尔滨中心),成立于2020年9月,由原中国人民武装警察部队黄金第一总队和第三支队转制合并组建,为正局级公益一类事业单位。主要承担自然资源综合调查、国土空间生态修复工作,向社会提供公益性服务,领域涵盖自然资源综合调查监测、地质矿产、生态调查与国土空间修复、水文地质、分析测试等。中心内设处室20个,拥有省部级野外观测站、重点实验室3个(自然资源部哈尔滨黑土地地

关键带野外科学观测研究站、大兴安岭漠河冻土与寒区环境野外科学观测研究站(共建)和黑龙江省“两大平原”地下水资源开发与保护重点实验室(共建)),承担省市级科研项目26项。

党的十八大以来,以习近平同志为核心的党中央站在战略和全局的高度,对地质调查工作作出一系列重要指示批示。哈尔滨中心始终牢记“找矿报国”初心,聚焦中国式现代化对地质调查工作的重大需求,全面提升地质调查治理能力,持续优化完善以东北地区(北部)自然资源调查与科技创新为业务根基(根),以森林等浅覆盖区物化遥等矿产勘查技术应用与服务能力等5项业务为核心业务(干),以矿产地质调查与勘查等8项业务为应用服务(叶)的“根-干-叶”业务体系,发扬“西口子”精神,带领全体干部职工,转观念、凝共识,提能力、勇创新,重治理、惠民生,奋力谱写高质量发展新篇章。

## 人才团队



刘占辉  
大国工匠  
第十六届全国技术能手  
黑龙江省高层次人才



周传芳  
自然资源部青年科技人才  
黑龙江省高层次人才  
中国地质学会金罗盘奖



杨柯  
黑龙江省高层次人才  
土地质量地球化学专家



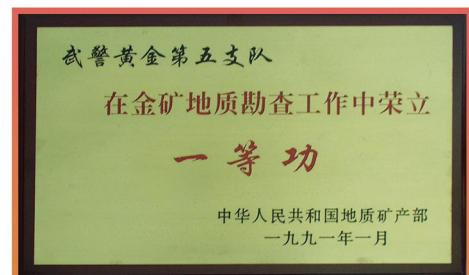
陆胜  
自然资源部青年科技人才  
黑龙江省高层次人才

拥有一支多学科、高学历、专业化技术人才队伍。现有在编人员434人,含正高级工程师17人、高级工程师47人、工程师53人、博士研究生12人、硕士研究生85人。拥有“大国工匠”1人、“全国技术能手”1人、金罗盘奖1人、自然资源部青年科技人才3人、部生态环境专家1人、省科技进步三等奖1人、省部高层次人才5人。

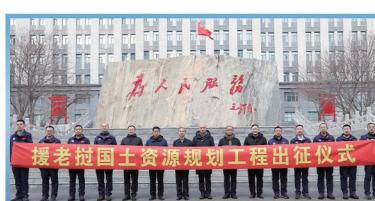
扎根龙江 深耕东北 服务国家 贡献社会

## 荣誉奖励

中心转制前曾 59 次受到中央国家机关、军队和武警部队表彰，获评“全国地质勘查功勋单位”和“全国模范地勘单位”。转制后先后获得地质工作诚信单位、全国总工会“职工书屋”示范单位、部先进职工之家、局信息化建设先进单位、局新闻宣传先进单位等多项荣誉；地质成果获评局地质调查十大进展 5 项、全国区域地质调查优秀图幅 2 幅、自然资源科学技术二等奖 1 项、中国国土经济学会 2023 年度十大科技进展 1 项。



## 资质业绩



中心成立以来，十分重视资质和能力建设。建立质量环境职业健康管理体系，具备分析测试中国合格评定国家认可委员会（CNAS）和国家级检验检测（CMA）资质和地质灾害评估和治理工程勘查设计、监理乙级资质。现拥有专利及软件著作权 56 项，发表 SCI 论文 43 篇，出版专著 2 部，发布地方标准 1 项。

我们秉承科学精神、恪守公益职能，愿与各界携手，在自然资源调查、生态修复、科技攻关等领域深化合作，共同守护绿水青山，助力美丽中国建设。



地址：黑龙江省哈尔滨市南岗区保健副路1号  
<http://www.hagsnrc.cgs.gov.cn/>

电话：0451-51150100  
传真：0451-51060521

设计排版：徐伟  
吕胜男