

东北黑土土壤退化区地层电性结构特征研究

——以小兴安岭北部孙吴—逊克地区为例

孙彦海^{1,2,3*}, 陈海江^{1,3}, 马维龙^{1,3}, 石致君^{1,3}, 姚 宇^{1,3}, 李宇航^{1,3}

(1. 中国地质调查局哈尔滨自然资源综合调查中心, 哈尔滨 150081;

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:东北黑土区是我国重要的粮食生产基地,其生态功能退化对粮食安全构成严峻挑战。以小兴安岭北部孙吴—逊克黑土关键带为研究对象,通过高密度电阻率法(探测深度约 150m),结合区域构造-地层格架,系统解析了地层电性结构特征及其对黑土退化的控制机制。研究表明:(1)垂向电性分层显著,浅部第四系松散沉积层(0-30m, 100-300Ω·m)受古河道迁移影响呈现高阻非均质性,加剧浅层渗漏与水土流失;中部低阻粘土隔水层(20Ω·m)横向连续分布,限制水分垂向交换,诱发土壤盐渍化;深部嫩江组地层(30Ω·m 左右)在约 80m 处以深视电阻率值基本稳定,指示深部阻水层对水文过程的调控作用。(2)NW 向高阻异常体($\rho > 150\Omega \cdot m$, 倾角 45°左右)被解译为张扭性断裂,导致上盘沉积减薄(22m, 全区平均 30m),通过改变地表径流路径与增强渗透性,加速侵蚀与盐分迁移。基于电性结构特征,提出构造控灾靶区优先修复策略,包括植被固坡、隔水层保护性排水及深部水文调控。本研究成果为东北黑土区生态修复提供了地球物理依据与技术范式,对协调农业开发与生态保护具有重要实践意义。

关键词:高密度电法;黑土退化;电性结构;断裂构造;生态修复

中图分类号:P319 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2736(2025)07-0059-7

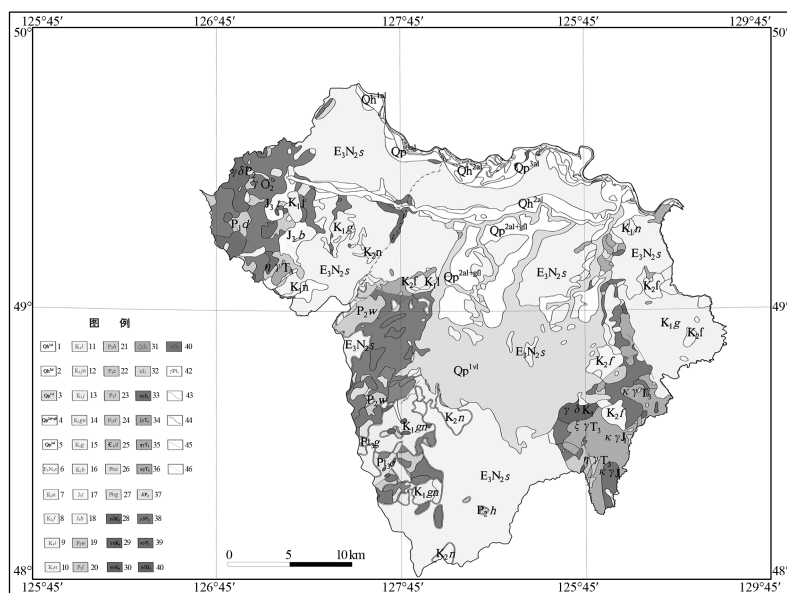
0 引言

东北黑土带作为全球稀缺的耕地资源,其生态功能维系对保障粮食安全具有战略意义。孙吴—逊克地区地处小兴安岭北麓黑土关键带核心区,独特的地貌演化与第四纪沉积序列塑造了全球罕见的肥沃黑土资源。然而,近三十年高强度农业开发导致该区土壤有机质流失严重,沟壑侵蚀面积年均扩张率超 2%,生态屏障功能显著退化^[1,2]。生态修复成为解决这些问题的关键,而准确掌握地下地质结构是生态修复的重要基础^[3-6]。现有研究表明,黑土退化机制与下伏地质结构控水-控养分特性密切相关,但传统地质

调查手段受限于探测深度较浅(<10 m),难以揭示深部“基岩-风化壳-沉积层”的分布规律。

高密度电阻率法通过量化介质视电阻率的层状分布,可非破坏性解析土壤-基岩界面、含水层结构与构造破碎带等关键地质要素,为生态修复工程提供地质模型约束^[7-12]。当前高密度电阻率在黑土区的应用多聚焦浅层(<50m)水文地质调查,对基底构造-岩相分布(>100m)地球物理响应特征研究仍存空白^[10-12]。本研究创新性地将高密度电法探测深度提高至 150m,结合区域构造-地层格架建立电性解释模型,旨在揭示黑土关键带地层分布情况,为优选生态修复靶区与设计工程参数提供地球物理依据。

基金项目:中国地质调查局项目“太行山区山西段生态修复综合调查”(DD20208069);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—第四系高河漫滩堆积;2—第四系低河漫滩堆积;3—第四系玄武岩;4—第四系冲击、冰水堆积层;5—第四系冲积层;6—孙吴组;7—中白垩统嫩江组;8—中白垩统福民河组;9—下白垩统洮淇河组;10—下白垩统宁远村组;11—下白垩统龙江组;12—下白垩统建兴组;13—下白垩统九峰山组;14—下白垩统光华组;15—下白垩统甘河组;16—下白垩统板房子组;17—上侏罗统塔木兰沟组;18—上侏罗统白音高老组;19—中二叠统五道岭组;20—中二叠统林西组;21—中二叠统红山组;22—下二叠统哲斯组;23—下二叠统土门岭组;24—下二叠统大石寨组;25—下寒武统铅山组;26—新元古界额头山组;27—新元古界固安屯组;28—早白垩世花岗岩闪长岩;29—早白垩世花岗斑岩;30—早白垩世二长花岗岩;31—晚侏罗世正长花岗岩;32—早侏罗世辉长岩;33—早侏罗世碱长花岗岩;34—晚三叠世正长花岗岩;35—晚三叠世二长花岗岩;36—晚三叠世碱长花岗岩;37—晚二叠世闪长岩;38—晚二叠世花岗闪长岩;39—晚二叠世碱长花岗岩;40—晚泥盆世花岗岩闪长岩;41—中奥陶世花岗岩;42—中元古代混合花岗岩;43—地质界线;44—角度不整合界线;45—断层;46—推测断层

图2 调查区地质简图

种电性特征构成了该方法的地球物理前提^[13]。该技术通过地表布设的阵列式电极系统,向地下介质注入人工激发电流场,利用多极距排列装置实现电场分布的二维空间采样。在电流场传播过程中,介质电性参数的横向及垂向变化会引发电流密度的空间重分布现象。为有效捕捉这些电性异常响应,需采用多参数阵列观测模式,通过多通道同步测量系统记录不同方位电极对位的电位梯度数据。这种多维度数据采集方式可显著提高对复杂地质结构的分辨能力,并通过二维反演算法实现地下电性结构的空间重构。

2.2 仪器装置与数据处理

本研究采用重庆奔腾科仪研发的WGMD-9型高密度电阻率仪开展野外数据采集,该设备集成多通道电位测量模块与智能供电控制系统,可实现高精度电场分布检测。探测装置选用

温纳-施伦贝尔格装置类型(Wenner-Schlumberger),其四极对称排列结构在保持垂向分辨率优势的同时,具备优良的共模抑制特性,可有效压制地表随机噪声对电位差的干扰,特别适用于复杂地表条件下的深部电性结构探测^[14]。

原始数据经RES2DINV反演平台实施系统化预处理:首先通过异常数据甄别与剔除算法消除电极接触不良导致的离群值;继而采用自适应中值滤波消除高频干扰,并运用空间滑动平均法实现数据场的各向异性平滑。反演计算阶段融入地形校正模块,基于带约束的阻尼最小二乘优化算法,构建正则化目标函数对电位场进行迭代拟合,最终生成包含地形高程补偿的二维视电阻率反演成像剖面。该反演模型通过调整正则化因子平衡数据拟合度与模型粗糙度,有效缓解了等效性原则引起的反演多解性问题。

2.3 测线布设

在孙吴-逊克地区实施高密度电阻率法勘探时,针对该区多期复杂的地质结构(含火成岩体、构造破碎带及沉积层序交替展布),采用动态优化布设方案。实际作业中依据地表露头岩性变化及构造线走向,对测线方位进行 $\pm 5^\circ$ 范围适配调整。采用改进型温纳四极装置,配置 240 道全排列电极系统,电极间距 10m,通过分布式电位同步采集技术有效捕捉电性突变界面。该参数设置兼顾了深部基底探测需求与浅部电性异常体的高分辨率识别能力,显著提升了复杂构造区电性层序的解析精度。

3 孙吴-逊克地区岩(土)层电性特征

本次研究深入分析孙吴—逊克地区岩(土)层物性特征,综合前人资料与本单位近年工作成果,获取大量岩(土)层电阻率数据,为了解该地区地电结构和反演提供依据。不同岩性电阻率范围差异显著,是识别和区分岩性的基础(表 1)。根据表中的岩性和相应的电阻率数据,分析和总结如下:从电阻率值可以粗略地对岩性进行分类。岩层电阻率呈现显著三阶分布特征:低阻相($< 100\Omega \cdot m$)对应富水或含导电矿物地层(如粘土质碎石层);中阻相($100-1000\Omega \cdot m$)对应砂砾岩、泥岩等碎屑沉积岩系;高阻相($> 1000\Omega \cdot m$)表征结晶基底岩体(花岗岩、闪长岩类)岩石电阻率受控于孔隙水饱和度、裂隙-孔隙结构及金属矿物含量的多因素综合作用。鉴于此,电阻率数据解译需融合构造-岩相多维地

质约束条件,结合岩石物理模型开展反演,以实现地质体精细解译与成因机制反演。

4 区域地层电性结构

垂向电性分层特征:浅部电性层(0-30m)表现为典型的第四系松散沉积结构,其厚度沿水平方向(距离 200-2400m)存在显著变化,其中 0-1240m 与 1480-1950m 区段砂砾石层($100-300\Omega \cdot m$)的高阻特征与晚更新世冲积扇粗粒相沉积环境相符,并存在横向电阻率幅值差异(前段 $> 200\Omega \cdot m$,后段 $100-150\Omega \cdot m$)。剖面尾部孙吴组砂砾石层($100-150\Omega \cdot m$)电阻率显著降低;中部低阻层($20\Omega \cdot m$)横向连续,具有 50m 的稳定厚度及低阻特性($< 30\Omega \cdot m$),表现为连续低阻异常带,横向延伸稳定,厚度约 50m,作为区域性隔水层,对浅层地下水垂向运移具有显著阻滞作用;深部嫩江组地层($30\Omega \cdot m$)未呈现明显底界特征,垂向等深范围内电阻率值域稳定,指示泥岩-粉砂岩互层结构的均一性,可能构成基岩层上部的阻水层。

地层横向构造特征:剖面右段(距离 900-1100m)识别出一处 NW 向电阻率异常体(电阻率远大于 $150\Omega \cdot m$),倾角在 45° 左右,两侧电阻率低于 $50\Omega \cdot m$ 。结合该地区区域大地构造特征,孙吴-逊克地区是孙吴地堑的重要组成部分,该区域受逊河-铁力断裂带和依兰-伊通断裂带等深大断裂控制,这些断裂在新生代表现为张性活动,导致地壳伸展和断陷盆地发育。断裂上盘浅部第四系沉积层厚度显著减薄至 22m(全

表 1 岩(土)层物性参数表

岩性	电阻率范围($\Omega \cdot m$)	主控因素
粘土质碎土层	30-80	含水量($> 25\%$)、粘粒吸附
砂砾岩	100-300	粒度分选、胶结程度
玄武岩	270-450	镁铁质矿物、低孔隙
中酸性凝灰岩	126-204	硅铝质矿物、高孔隙
花岗岩	677-7271	石英含量(25%-30%)、结晶度
闪长岩	181-2544	角闪石/斜长石比值、蚀变强度

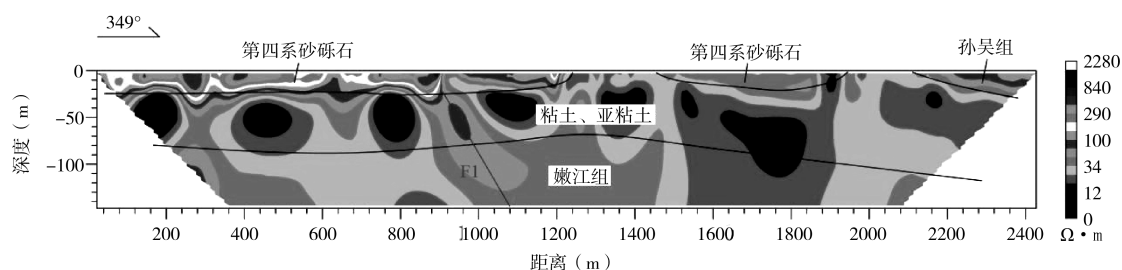


图3 高密度电法剖面反演与解释图

区平均 30m), 部分地区第四系砂砾石完全剥蚀, 推测为走滑运动引发基底差异隆升, 导致上盘局部抬升, 剥蚀区与沉降区并存, 形成沉积厚度空间分异。此外, 断裂带内电阻率梯度变化剧烈 ($\Delta\rho/\Delta x$ 大于 $15\Omega \cdot \text{m}/\text{m}$), 反映构造破碎带的渗透性可能增强。

5 讨论

5.1 电性分层与黑土退化机制的耦合关系

研究区垂向电性分层特征(浅部第四系松散层—中部粘土隔水层—深部嫩江组地层)揭示了黑土退化与地质过程的深层次关联。浅部第四系松散沉积层(0–30m)的高阻特征($100\text{--}300\Omega \cdot \text{m}$)反映了晚更新世冲积扇的粗粒相沉积环境, 其电阻率空间差异($\Delta\rho/\Delta x$)可归因于古河道迁移导致的沉积物分选性变化。这种沉积结构的非均质性加剧了浅层渗漏通道的形成, 成为地表水土流失的关键诱因。中部低阻粘土隔水层($20\Omega \cdot \text{m}$)的横向连续展布表明其对区域水文循环的显著控制作用。该层通过限制垂向水分交换, 可能诱发表层土壤盐渍化, 并进一步削弱黑土持水保肥能力。深部嫩江组地层($30\Omega \cdot \text{m}$)垂向等深范围内电阻率值域稳定则暗示其泥岩-粉砂岩互层结构的均一性, 这种低渗透性地层可能通过基底阻水效应间接影响浅层土壤水动力学过程。由此可见, 黑土退化并非单一地表过程, 而是深部地质结构与浅层环境相互作用的结果。

5.2 断裂构造的动力学响应及其生态效应

研究区内 NW 向展布的低阻-高阻-低阻异

常区(推测断裂区)为区域构造活动提供了关键证据。结合电性反演剖面及区域构造应力场特征(NE-SW 向主压应力), 该异常体被解译为张扭性断裂的电阻率响应。断裂活动通过基底错动引发差异沉降, 导致上盘浅层第四系沉积厚度显著减薄(全区平均厚度 30m, 上盘仅 22m)。

电性参数的空间分异进一步揭示了断裂带的生态效应。首先, 沉积厚度的非均质性直接改变地表径流路径, 在断裂上盘形成局部高梯度区, 导致地表侵蚀潜能提升。其次, 断裂破碎带的高渗透性可能成为深层地下水上升的优先通道, 加剧浅层土壤盐分迁移与养分流失。上述过程表明, NW 向断裂不仅是地质历史演化的记录载体, 更通过多圈层耦合效应(如基底错动影响沉积分布、断裂渗透性调控水文过程)驱动现代黑土退化。因此, 生态修复需优先关注构造控灾靶区, 例如在断裂上盘采取植被固坡与梯田工程以减缓侵蚀, 并结合隔水层分布优化排水系统设计, 阻断盐分迁移路径。

6 结论

本研究通过高密度电阻率法(探测深度 150m)与构造-地层综合分析, 揭示了孙吴—逊克地区黑土退化的地质控制机制, 并提出系统性修复策略:

1. 黑土退化的多尺度驱动机制: 垂向电性分层(第四系松散层—粘土隔水层—嫩江组地层)表明, 古河道迁移($\Delta\rho/\Delta x = 15\Omega \cdot \text{m}/\text{m}$)导致的浅层渗漏、粘土层阻水诱发的盐渍化及基底阻水效应共同驱动黑土退化, 凸显地质结构与表生过程的深度耦合。断裂构造的生态效应方面, NW

向张扭性断裂活动引发上盘沉积减薄(22m vs. 全区 30m),加剧地表侵蚀与盐分迁移。

2. 基于电性结构特征,构造控灾靶区(如断裂上盘及古河道迁移带)应被优先纳入生态修复规划。针对断裂上盘沉积减薄区,可通过植被固坡与梯田工程减缓侵蚀速率;而粘土隔水层的空间分布信息可为排水系统设计提供关键约束,避免因盲目开挖破坏其天然阻水功能。此外,深部嫩江组地层的弱渗透性特征表明,生态修复需注重表层水分调控,例如通过有机质改良提升土壤持水能力。高密度电阻率法提升至 150 m 的探测深度,为识别深部控水构造(如基底断裂)提供了技术保障,未来可结合钻孔验证与水文模型,实现“地质结构—水文过程—生态响应”的多维度协同优化。

本研究为东北黑土区生态修复提供了地球物理依据与方法范式,对保障粮食安全与生态屏障功能具有重要实践价值。

参考文献(References):

- [1] 张孝德. 资源环境约束下大国工业化的困境与文明模式的创新:“成本外化工业文明”的反思与生态文明建设思考[J]. 甘肃社会科学, 2008, 29(06): 38-41.
- [2] 王心茹, 关鑫, 魏琨翔, 等. 农业农村空间生态修复质量测算方法研究:以辽宁省凤城市为实证[J]. 中国国土资源经济, 2024, 37(03): 67-76.
- [3] 周启星, 魏树和, 刁春燕. 污染土壤生态修复基本原理及研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(02): 6.
- [4] 陈欣洁. 近地表电法在湖南地区垃圾填埋场渗漏探测中的应用研究[D]. 长沙: 中南大学, 2023.
- [5] 范平阳. 综合探测技术在滑坡稳定性分析及治理设计中的应用研究[D]. 长沙: 中南大学, 2023.
- [6] 张君超. 城市浅埋异常体面波正演模拟与反演分析[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2022.
- [7] 毛聪, 聂小力, 王世界, 等. 高密度电法在第四系地层找水中的应用研究[J]. 西部资源, 2021, 17(01): 177-178.
- [8] 洗诗盛. 高密度电法在复杂地质构造条件下的找水效果[J]. 地质与资源, 2015, 24(02): 132-136.
- [9] 王关凤, 庞丽娟, 张磊. 高密度电法在地质灾害危险性评估中的应用[J]. 煤, 2011, 20(11): 3.
- [10] 王世界. 高密度电法在断裂构造探测中的应用[J]. 有色金属文摘, 2021, 35(05): 036.
- [11] 杜华光. 高密度电法在工程地质勘察中的应用[J]. 路基工程, 2008, 25(04): 110-112.
- [12] 刘晓东, 张虎生, 朱伟忠. 高密度电法在工程物探中的应用[J]. 工程勘察, 2001, 28(04): 64-66.
- [13] 李聪聪, 王佟, 赵欣, 等. 边坡监测与治理技术在高寒矿区露天煤矿生态修复中的应用研究[J]. 中国矿业, 2024, 33(04): 122-131.
- [14] 胡国辉. 高密度电阻率法探测技术及应用研究[D]. 合肥: 安徽建筑大学, 2014.

作者简介:

第一作者/通讯作者:孙彦海,1987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,研究方向地球物理, Email: sunyanhai@mail.cgs.gov.cn

Research on the Characteristics of Strati-graphic Electrical Structure in the Soil Degradation Area of Northeast Black Soil: Case Study of Sunwu-Xunke Area in the Northern Lesser Khingan Mountains

SUN Yanhai^{1,2,3*}, CHEN Haijiang^{1,3}, MA Weilong^{1,3}, SHI Zhijun^{1,3}, YAO Yu^{1,3}, LI Yuhang^{1,3}

(1. Harbin Natural Resources Comprehensive Survey Center, CGS, Harbin 150081, China;

2. Northeast Geological Science and Technology Innovation Center, CGS, Shenyang 110034, China;

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

Abstract: The black soil region in Northeast China, as a vital grain production base, are faced by severe ecological degradation threatening national food security. This study investigates the Sunwu-Xunke critical zone in the northern Lesser Khingan Mountains, where intensive farming has exacerbated soil erosion. By advancing the high-density resistivity method (HDRM) with a 150-meter detection depth and combining with regional tectonic-stratigraphic frameworks, we systematically analyzed electrical stratigraphy and its role in soil degradation. Results reveal: (1) vertical electrical stratification includes a heterogeneous shallow Quaternary layer (0–30 m, 100–300 $\Omega \cdot m$) influenced by paleo-channel migration, intensifying seepage and erosion; a continuous clay aquiclude (20 $\Omega \cdot m$) at intermediate depths restricts vertical water flow, promoting salinization; and the deep Nenjiang Formation (30 $\Omega \cdot m$) exhibits weak anisotropy, suggesting a homogeneous mudstone-siltstone structure modulating hydrology; (2) A NW-trending high-resistivity anomaly ($\rho > 150 \Omega \cdot m$, dip $\sim 45^\circ$) is interpreted as a NE-SW stress-driven strike-slip fault, thinning hanging-wall sediments to 22 m (vs. regional 30 m), altering runoff paths and enhancing permeability to accelerate erosion and salt migration. Priority restoration strategies target tectonically vulnerable zones (e. g. , fault hanging walls, paleo-channels), advocating vegetation-based slope stabilization, aquiclude-aligned drainage systems, and deep hydrological regulation leveraging the Nenjiang Formation's low permeability. This study establishes a geophysical framework linking subsurface electrical features to surface degradation, offering actionable solutions to balance agriculture and ecological sustainability, with global implications for critical zones under similar anthropogenic pressures.

Key words: high-density resistivity method; black soil degradation; electrical stratigraphy; fault structure; ecological restoration