

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^{1,3*}, 孙彦海^{1,2,3}, 刘庆^{1,3}, 朱佳斌^{1,3}, 辛义国^{1,3}, 郝小庆^{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 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, 盆地边缘受东北向断裂影响, 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^[1]。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^[2-5]。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, 难以满足覆盖全区复杂

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^[6]。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)。

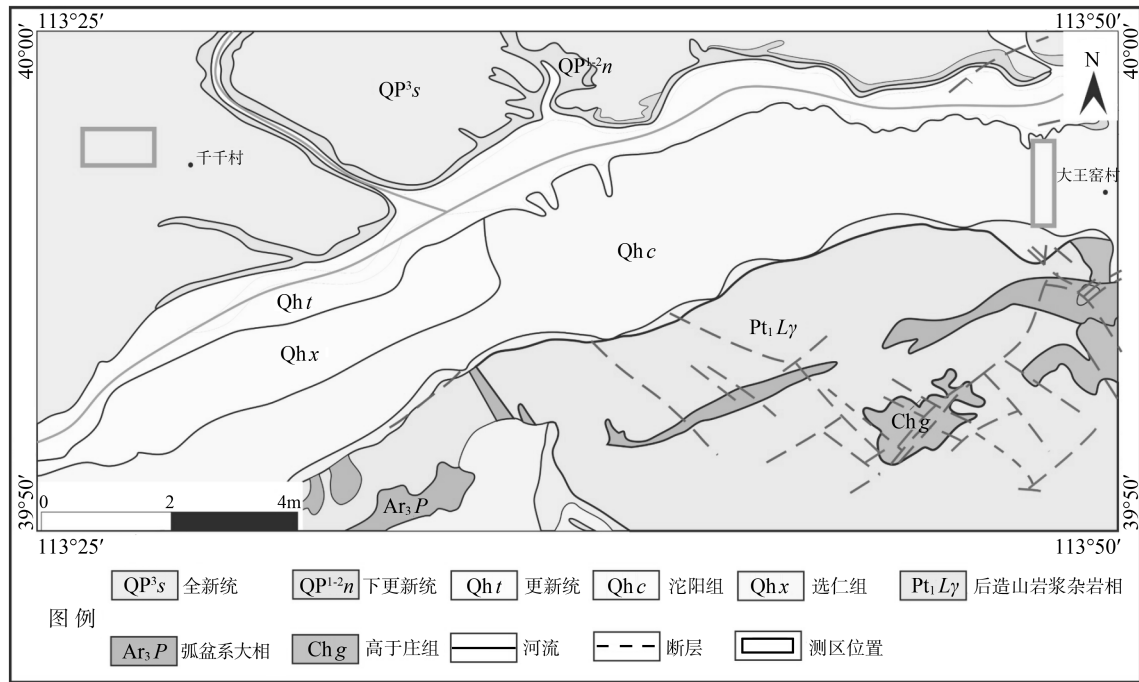


图 1 工作区区域地质简图

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^[7]。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^[8-10]。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^[11]。

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处^[8]。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^[12,13]。

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(20-40Ω·m)较两河沿岸盐碱区同类型沉积物(0-20Ω·m)略微升高。沉积序列中细砂、粉砂(40-50Ω·m)至中粗砂、砾石(50-300Ω·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(>100Ω·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^[6]

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^[14]。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, ρ_{xy} 表示视电阻率(单位:Ω·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, ω 是角频率, μ 是磁导率(单位: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, δ 是趋肤深度(单位为:m), f 是电磁波的频率(单位为:Hz), μ 是导体的磁导率(单位为:H/m), ρ 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 ,最终获取卡尼亚视电阻率,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。

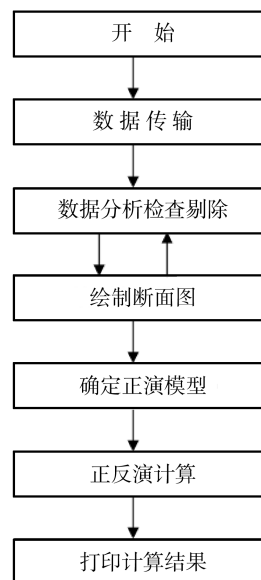


图 2 高密度电法处理流程图

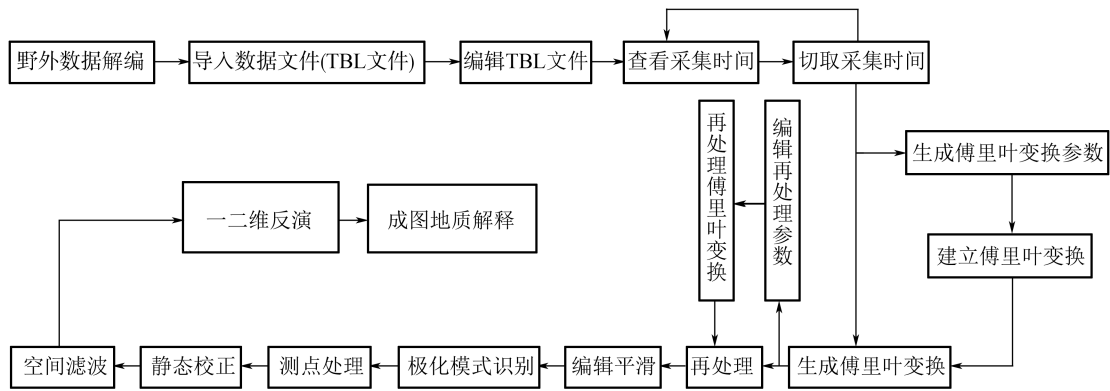


图3 资料处理流程框图

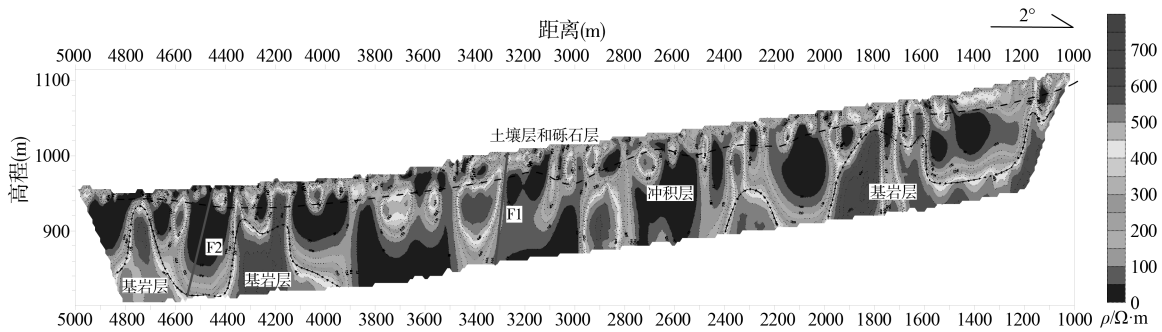


图4 L1线 ERT 视电阻率反演断面图

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°,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°。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。

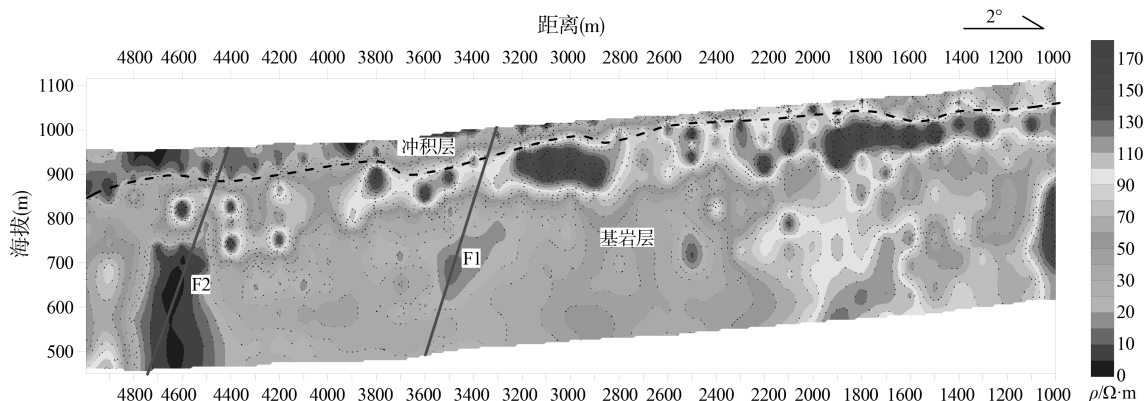


图 5 L1 线 AMT 视电阻率断面图

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 0-50Ω·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(<50m)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 50-100Ω·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 100Ω·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(<100Ω·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。

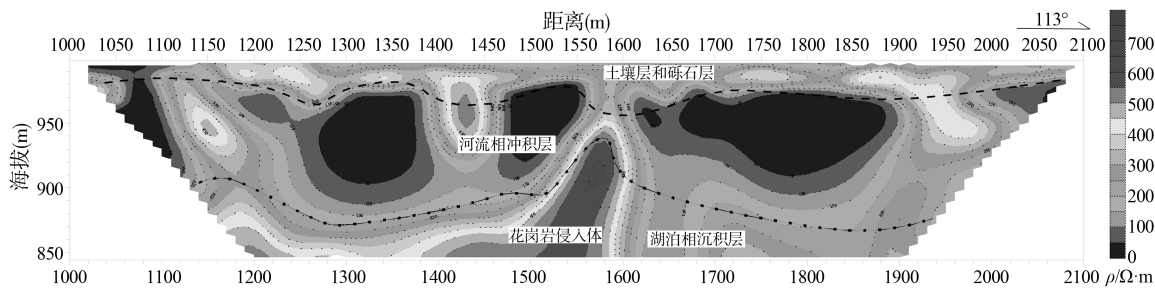


图 6 L2 线 ERT 视电阻率反演断面图

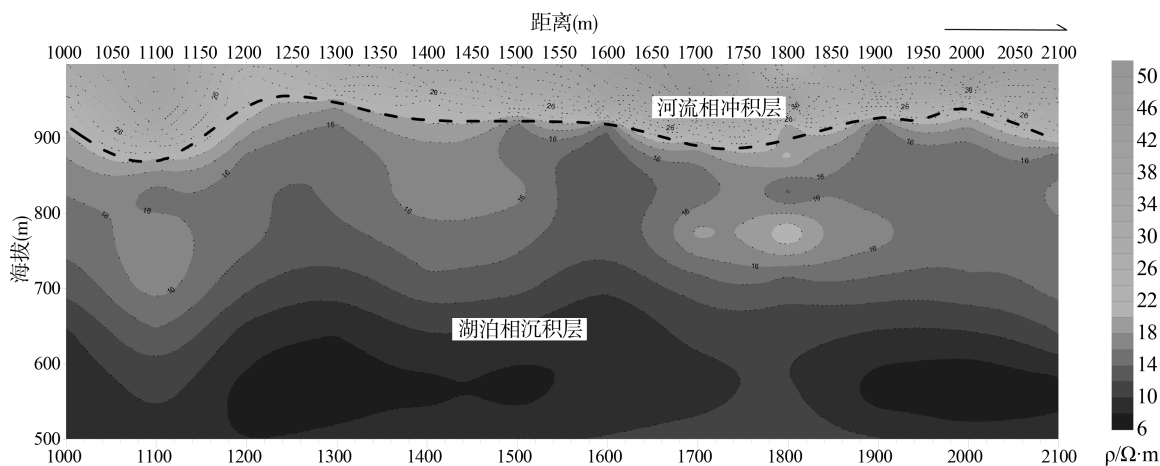


图 7 L2 线 AMT 视电阻率断面图

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 30-50Ω·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 30-50Ω·m(图 6), 与“细砂、粉砂”及“亚砂土”的电性参数(40-50Ω·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 反演显示基岩整体电阻率偏低(<100Ω·m), 显著低于区域基岩典型值(>100Ω·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), 导致电性分布均一。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. 大同盆地高钾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, 臧红飞. 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. 大同土地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^{1,3*}, SUN Yanhai^{1,2,3}, LIU Qing^{1,3}, ZHU Jiabin^{1,3}, XIN Yiguo^{1,3}, HAO Xiaoqing^{1,3}

(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