

doi: 10.11720/wtyht.2020.1190

刘道涵, 罗士新, 陈长敬. 高密度电阻率法在丹江口水源区尾矿坝监测中的应用[J]. 物探与化探, 2020, 44(1): 215–219. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2020.1190>

Liu D H, Luo S X, Chen C J. The application of high density resistivity method to the monitoring of tailings dam[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2020, 44(1): 215–219. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2020.1190>

# 高密度电阻率法在丹江口水源区 尾矿坝监测中的应用

刘道涵, 罗士新, 陈长敬

(中国地质调查局 武汉地质调查中心, 湖北 武汉 430223)

**摘 要:** 以丹江口水源区某铁矿尾矿库为例, 采用高密度电阻率法对尾矿库进行了拟三维探测, 针对出现的疑似渗流通道开展了尾矿坝二维精细剖面探测, 查明了 4 处尾矿坝结构薄弱区; 同时, 鉴于渗漏主要由地下水运移作用导致, 在雨季前后对尾矿坝进行了三次监测研究, 得到了坝体电性结构的动态响应, 确定了 1 处疑似泄露点, 验证了高密度电阻率法在尾矿坝监测应用中的可行性, 为尾矿坝稳定性研究提供了一种技术手段。

**关键词:** 尾矿坝; 高密度电阻率法; 监测; 渗流通道

**中图分类号:** P631

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000–8918(2020)01–0215–05

## 0 引言

尾矿坝是贮存尾矿和水的尾矿库外围坝体构筑物, 一般指初期坝和堆积坝<sup>[1]</sup>。尾矿库存在溃坝危险, 威胁下游居民及设施的安全, 是重要的环境灾害隐患<sup>[2]</sup>。国内外学者对尾矿坝溃坝机理和稳定性进行了研究, 总结了尾矿坝在坝体形式、填筑方式、坝料组成和溃决机制等方面的特点<sup>[3–6]</sup>。随着勘查技术的发展, 地球物理方法逐渐被应用于水库坝体塌陷探测<sup>[7]</sup>、土坝渗漏隐患勘察<sup>[8]</sup>, 以及尾矿库隐患勘查中<sup>[9–12]</sup>, 地球物理方法在坝体结构改变早期就具有探测内部侵蚀过程和异常渗流的潜力。在安全监测新技术方面, Mainali 使用地球物理方法对瑞典的 Kiruna, Aitik 和 Kristineberg 3 个尾矿坝进行了现场试验, 证明了高密度电法和自然电位法在监测尾矿坝内部物理性质和变异性的可行性<sup>[13]</sup>; Coulibaly<sup>[14]</sup>、Sjodahl<sup>[15]</sup>等分别使用电阻率成像仪探测了加拿大 Westwood 与瑞典南部 Enemossen 尾矿坝内部含水饱和度、裂缝及变形情况; 针对浸润线观测准确度低的问题, 李晓新<sup>[16]</sup>设计了基于高密度电阻率

法的监测方案。

高密度电法属于直流电阻率法的一种阵列勘探方法, 兼具电测深和电剖面的特点。高密度电法具有一次完成电极布设, 测量中无需跑极, 采集数据量大、工作效率高、能直观、准确地反映地下空间电性异常体特征等优点, 因而被广泛应用于环境地质调查中<sup>[17–18]</sup>。

丹江口水库以上的汉江流域是南水北调中线工程核心水源区, 尾矿库作为重要的点污染源, 其运行状况直接关系着调水水质。应丹江口水源区环境地质调查项目需要, 笔者针对区内某典型尾矿库开展了尾矿坝隐患勘察及监测研究。前人研究表明降雨对尾矿坝结构影响明显<sup>[19]</sup>, 因此, 笔者分别在雨期前后开展了监测研究。

## 1 地质概况及地球物理特征

该尾矿库所处的大地构造位置隶属于秦岭褶皱系南秦岭印支褶皱带东段南缘武当隆起两郧褶皱束高庙短轴背斜南东侧的次级构造——陈家垭倒转背斜, 由一系列 NWW 向的紧密线状褶皱和断裂组成,

收稿日期: 2019–04–02; 修回日期: 2019–10–31

基金项目: 中国地质调查局项目“丹江口水库南阳—十堰市水源区 1:5 万环境地质调查”(DD20160256)

作者简介: 刘道涵(1987–), 男, 湖北人, 工程师, 硕士, 地球探测与信息技术专业, 主要从事地球物理勘查与研究工作。

并形成横贯东西的郧西—郧县复背斜倒转褶皱与逆断层,陈家垭倒转背斜就是一个次一级倒转褶皱。附近出露地层主要为中晚元古代震旦纪陡山沱组( $Zd$ )和耀岭河组( $Zyl^3$ )(图1)。两套地层之间发育顺层韧性滑脱剪切构造,围岩蚀变强烈,以绢云母化、硅化为主,黄铁矿化、绿泥石化次之。耀岭河组( $Zyl^3$ )是一套富含磁铁矿的基性—中酸性的细碧角斑岩建造,由多个火山喷发韵律组成,岩性上主要为含砾纳长绿帘绢云千枚岩、纳长绿泥片岩、纳长绿帘阳起片岩、石英绿泥绢云片岩、绿帘石英绢云千枚岩。陡山沱组( $Zd$ )主要由绢云千枚岩、绿帘绢云千枚岩和石英砂岩为主。

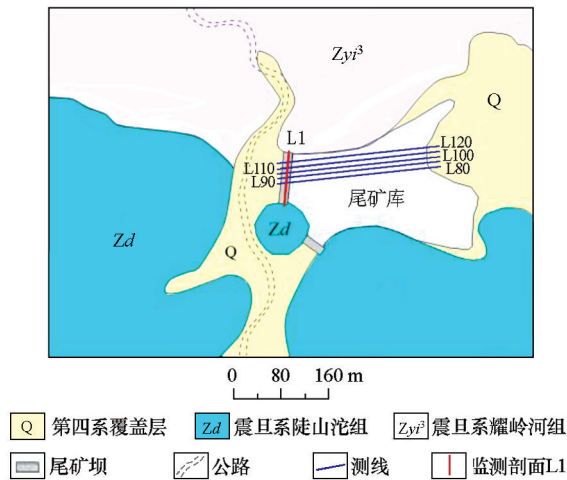


图1 测区地质构造及工作部署示意

Fig.1 The schematic diagram of geological structure and work deployment

在水文地质条件方面,该区地下水类型主要以第四系冲积孔隙水和震旦系白云岩、绢英片岩裂隙水为主。其中,第四系冲积孔隙含水岩组中井泉出露较多,且水位埋深一般小于3 m。其富水性一般,整体较强,单井出水量一般10~100 m<sup>3</sup>/d。震旦系岩溶不发育,南华系变质火山岩往深部裂隙发育逐渐减弱,直到消失,因此含水性较差。

尾矿库矿渣来源为变质中酸性—基性火山岩型磁铁矿床,依其矿石矿物自然组合分为两类:变熔岩型和变凝灰岩型。变熔岩型矿床主要金属矿物为磁铁矿(占总矿物量的17.12%~22.63%)和赤铁矿(包括少量褐铁矿,占总矿物量14.49%~18.10%),其余少见金属矿物为黄铁矿、黄铜矿、斑铜矿、钛铁矿等。变凝灰岩型主要金属矿物为磁铁矿(占总矿物量7.07%~14.6%)、赤铁矿(包括磁赤铁矿、褐铁矿,占总矿物量5%~15.55%),其余含少量黄铜矿、黄铁矿、钛铁矿等。

结合区内地质资料,陡山沱组和耀岭河组变质岩和震旦系白云岩等均表现为明显的高阻特征,由于含有铁、铜等金属元素,尾矿砂电阻率较第四系黏土层更低(见表1)。尾矿库坝体设计初期为透水性碾压堆石坝,后期采用黏土堆积压实而成,在电性结构上具有明显的分层性,而在坝体薄弱区,受地下水携带重金属尾矿砂的影响会产生明显的低阻异常,这些电性特征为高密度电法的开展提供了物性前提。工作中考虑利用电阻率精细剖面探测坝体结构,查明坝体内部的薄弱区,同时,通过多期次探测并进行电阻率反演,实现对坝体结构的动态监测。

表1 工作区电性特征

Table 1 Statistical table of physical parameters

岩性	电阻率范围/( $\Omega \cdot m$ )
变质岩	$2 \times 10^2 \sim 5 \times 10^4$
白云岩	$5 \times 10^2 \sim 6 \times 10^3$
黏土	$5 \times 10^1 \sim 2 \times 10^2$
尾矿砂	$1 \times 10^0 \sim 5 \times 10^1$

2 实例应用

本次野外数据采集使用美国 AGI 公司生产的 SuperSting R8 多通道高密度电法仪,考虑工区施工条件,选择偶极—偶极装置测量,在尾矿坝处布设高密度电法测线 L1 线(见图1),电极道数为74道,电极距为2 m,共采集测点数据2 507个,探测深部可达30 m,水平分辨率小于1 m。

数据处理采用仪器自带的 EarthImager 软件,该软件支持2D\3D数据带地形正反演计算,数据处理流程主要包含数据预处理、反演拟合和成图等部分。对采集的 L1 测线数据采用2D有限元正演计算,计算中近似求解方法采用共轭梯度方法,边界条件选择 dirichlet 方法,反演算法采用阻尼最小二乘方法,通过3次迭代计算求得最优解,拟合标准差为2.85%,二阶范数为0.9,表明反演结果能够较好拟合原始数据,将所有采集数据和拟合数据取对数绘制数据拟合交会图(图2),可见数据呈线性紧密分布,仅有个别测点未能较好拟合。由此可见,对于尾矿坝这种二维结构较好的人工坝,小极距偶极—偶极装置能够较好平衡数据分辨率和抗干扰能力。

经过上述反演计算得到 L1 线的反演断面(图3)。分析可见,坝体电阻率具有明显的分层性,主要表现为三层“K型”电性曲线。表层低阻层为地表黏土压实层,厚约3 m,该层主要受地表大气降雨、植物生长及人为活动等影响,使其电性特征改变

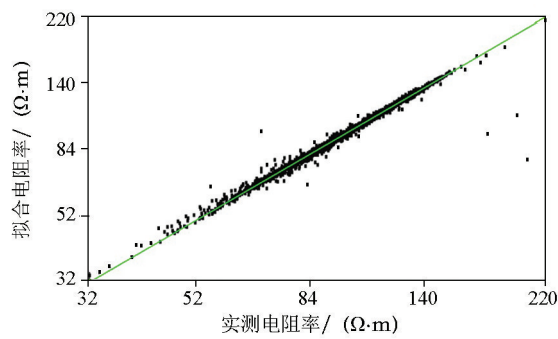


图2 数据拟合分布

Fig.2 Distribution of fitting data with dipole-dipole device

明显,电阻率值约  $50\ \Omega\cdot\text{m}$ ,部分位置电阻率甚至可达  $30\ \Omega\cdot\text{m}$  以下,并延伸至地表,与地表滞留水能较好对应,两端见明显的高阻异常,与两侧变质岩地层出露吻合。第二层为相对高阻层,为碎石土压实层,电阻率可达  $200\ \Omega\cdot\text{m}$  以上,顶部界线清晰,界面水平,底部界线模糊,存在渐变带,厚度最大可达  $12\ \text{m}$ ,水平上电性连续性较好,有 2 处较为明显的低阻异常,分别位于 98 点(A 异常)和 136 点(B 异常)。第三电性层为低阻层,电阻率在  $65\sim 100\ \Omega\cdot\text{m}$ 。

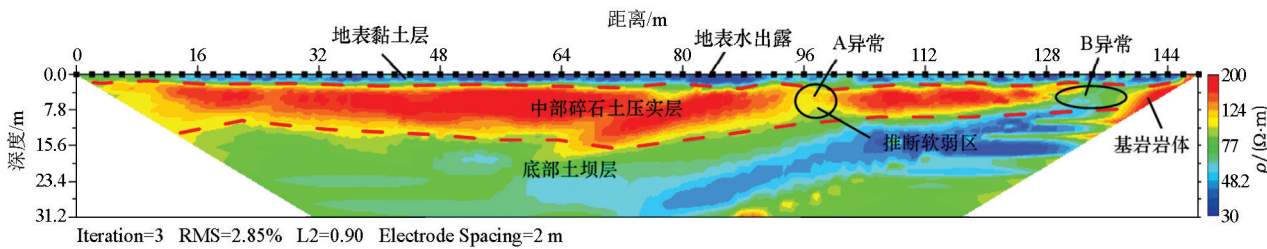


图3 尾矿坝二维高密度电法反演断面

Fig.3 Inversion section of 2D high density resistivity method in tailing dam

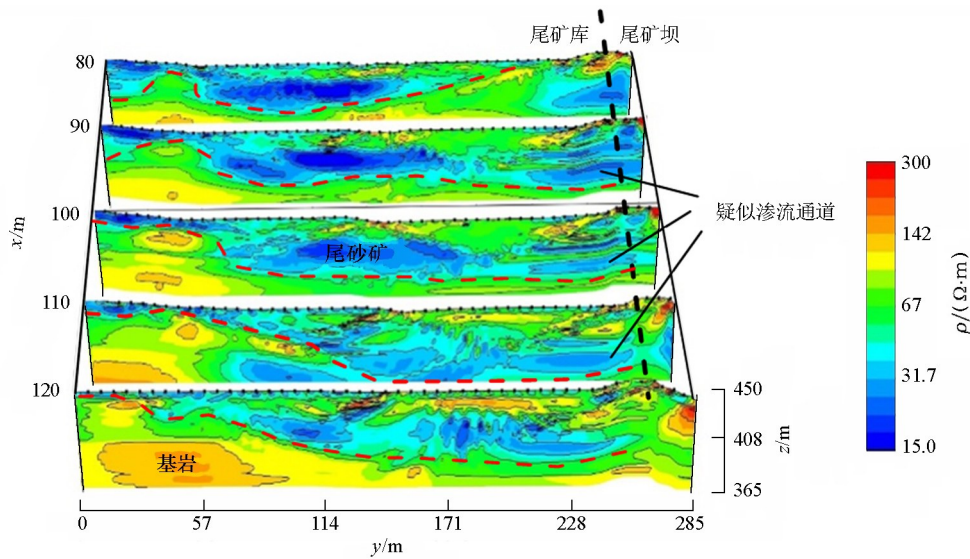


图4 二维高密度电法反演断面

Fig.4 Inversion section of 2D high density resistivity method perpendicular to tailing dam

m 之间,结合以往地质、地形资料,推断该层为坝体建设初期的土坝堆积层,该层右端延伸至 B 异常处,紧邻基岩,推断为坝体结构薄弱区,在地下水作用下易混入尾矿砂,形成渗流通道。

为进一步研究该尾矿坝体结构特征,在 L1 线  $80\sim 120\ \text{m}$  段布设 5 条垂直坝体的高密度电法测线(见图 1),测线自尾矿库内切坝体至坝下,极距  $5\ \text{m}$ ,线距  $10\ \text{m}$ ,偶极-偶极装置,图 4 为 5 条测线的电阻率反演断面。

尾矿坝比尾矿砂高出约  $3\ \text{m}$ ,因此在数据处理中采用带地形二维高密度电法反演,尾矿砂因金属元素和地下水作用显示为低阻,尾矿坝显示为相对高阻,尾矿周边基岩主要为耀岭河组和陡山沱组变质岩,在电性上均表现为高阻。由图可见,电阻率分布与尾矿坝体测线 L1 结果吻合较好,尾矿砂边界清晰,库内尾矿砂大体呈中间厚、两侧薄形态分布。在 X 坐标为  $80\ \text{m}$  和  $120\ \text{m}$  处,尾矿砂的分布明显减少,在尾矿坝附近,低电阻的尾矿砂明显被高阻坝体阻隔,而  $90、100、110\ \text{m}$  处低阻体呈连续分布,表明尾矿砂已进入尾矿坝体,高程为  $405\sim 430\ \text{m}$ 。



### 3 监测研究

为监测坝体内部结构的动态响应,对坝体进行 3 次不同时间段的电阻率动态监测,考虑尾矿砂的运移主要受控于地下水运移作用,选择雨季和汛期分别对坝体进行二维电阻率剖面探测,选用相同的数据采集装置、电极布设和处理参数,得到不同时间的电阻率断面(图 5)。由图可见,不同时期尾矿坝的电阻率结构具有相同的特征,相互验证了数据采

集质量的可靠性。对比可见,随着雨期和汛期降雨的不断增大,地表黏土层受雨水下渗影响,电阻率明显降低,两侧岩体电阻率未明显降低,与该区基岩具隔水特性相符;中部碎石土压实层未见明显电性变化,尤其是推测软弱区 A、B 异常位置未见电阻率变化,反映了该层的隔水特征;同时在下部出现了 C、D 两处低阻异常,其中 C 异常电阻率降低明显,而之前推断的结构软弱区 D 电阻率降低却不明显,因此,推断异常 C 处受地下水作用影响明显,为疑似泄露点。

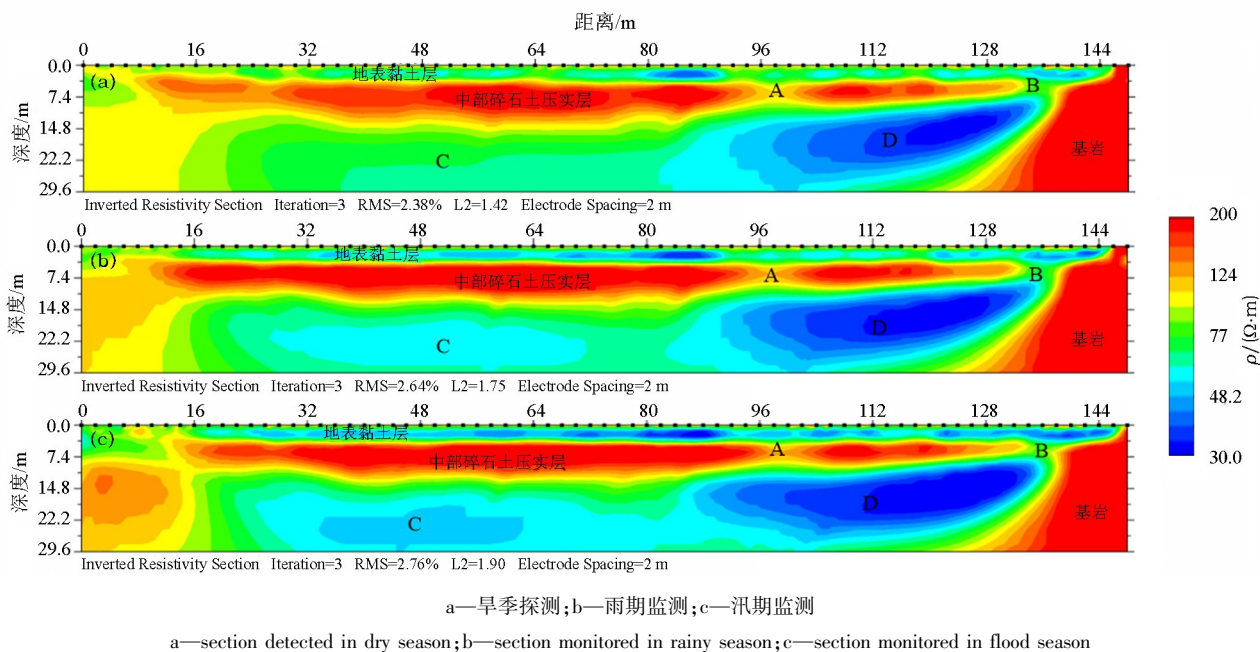


图 5 尾矿坝不同时期高密度电法监测断面

Fig.5 Inversion section of 2D high density resistivity method in tailing dam at different times

### 4 结论

采用高密度电法对尾矿坝开展了结构探测和监测研究,划定了 3 处尾矿坝结构薄弱区,发现 1 处疑似泄露点。本次工作表明:尾矿坝坝体物质结构较为均匀,小极距偶极-偶极采集装置具有良好水平分辨率;尾矿坝结构薄弱区受地下水和尾矿砂作用电阻率明显降低,通过高密度电法能够较好监测坝体电性结构变化。该方法为评价和监测尾矿坝结构稳定性提供了一种较为有效的技术手段。

### 参考文献 (References):

[1] 于广明, 宋传旺, 潘永战, 等. 尾矿坝安全研究的国外新进展及我国的现状和发展态势[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(S1): 3238-3248.  
Yu G M, Song C W, Pan Y Z, et al. Review of new progress in tailing dam safety in foreign research and current state with devel-

opment in china[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(S1): 3238-3248.  
[2] 李长洪, 卜磊, 陈龙根. 尾矿坝致灾机理研究现状及发展态势[J]. 工程科学学报, 2016, 38(8): 1039-1049.  
Li C H, Bu S, Cheng L G. Research situation of the disaster-causing mechanism of tailing dams and its developing trend [J]. Chinese Journal of Engineering, 2016, 38(8): 1039-1049.  
[3] 陈殿强, 王来贵, 李根. 尾矿坝稳定性分析[J]. 辽宁工程技术大学学报: 自然科学版, 2008, 27(3): 359-361.  
Chen D Q, Wang L G, Li G. Analysis of tailing dam's stability[J]. Journal of Liaoning Technical University: Natural Science Edition, 2008, 27(3): 359-361.  
[4] 张力霆. 尾矿库溃坝研究综述[J]. 水利学报, 2013, 44(5): 594-600.  
Zhang L T. Summary on the dam-break of tailing pond [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(5): 594-600.  
[5] 赵天龙, 陈生水, 钟启明. 尾矿坝溃决机理与溃坝过程研究进展[J]. 水利水运工程学报, 2015(1): 105-111.  
Zhao T L, Chen S S, Zhong Q M. Advances in studies of tailing dam break mechanism and process [J]. Hydro-Science and Engi-

- neering, 2015(1): 105 – 111.
- [6] 王昆,杨鹏,Karen Hudson-Edwards,等. 尾矿库溃坝灾害防控现状 & 发展[J]. 工程科学学报,2018,40(5):526 – 539.  
Wang K, Yang P, Karen Hudson-Edwards, et al. Status and development for the prevention and management of tailings dam failure accidents [J]. Chinese Journal of Engineering, 2018, 40(5): 526 – 539.
- [7] 李军,马新龙. 高密度电法在水库大坝陷测中的应用[J]. 工程勘察, 2010, 38(1):89 – 94.  
Li J, Ma X L. The application of high-density electrical method to the collapse surveying on the dam [J]. Geotechnical Investigation Surveying, 2010, 38(1):89 – 94.
- [8] 郑灿堂.应用自然电场法检测土坝渗漏隐患的技术[J].地球物理学进展,2005,20(3):854 – 858.  
Zheng C T. The technique to detect the leakage of dam by applying the spontaneous electric field [J]. Progress in Geophysics, 2005, 20(3):854 – 858.
- [9] 王艳丽,刘兴华,李桂龙. 浅层地震折射波法在荣成—乌海高速公路尾矿勘察中的应用[J]. 工程地球物理学报,2012,9(02):212 – 215.  
Wang Y L, Zhang X H, Li G L. Application of shallow seismic refraction in tailing investigation of Rongchen—Wuhai expressway [J]. Chinese journal of Engineering Geophysics, 2012, 9(02): 212 – 215.
- [10] 史殿胜,田玉民,孙建宏. 瞬态瑞雷波技术在尾矿库工程勘察中的应用[J]. 工程地球物理学报,2009,6(5):566 – 570.  
Shi D S, Tian Y M, Sun J H. Application of transient rayleigh wave technology to the tailing pond engineering exploration [J]. Chinese journal of Engineering Geophysics, 2009, 6(5):566 – 570.
- [11] 赵江倩,鞠海燕,黎剑华. 综合物探法在尾矿坝隐患勘察中的应用[J]. 金属矿山, 2011(2): 102 – 105.  
Zhao J Q, Ju H Y, Li J H. Application of the comprehensive geophysical survey method to the surveying of hidden trouble of tailings dam[J]. Metal Mine, 2011(2): 102 – 105.
- [12] 王传雷,董浩斌,刘占永. 物探技术在监测堤坝隐患上的应用[J]. 物探与化探,2001,25(4):294 – 299.  
Wang C L, Dong H B, Liu Z Y. An investigation into the monitoring and forewarning technique for dyke ridden trouble under the condition of high water level [J]. Geophysical Geochemical Exploration, 2001,25(4):294 – 299.
- [13] Mainali G. Monitoring of tailings dams with geophysical methods [D]. Sweden; Lulea University of Technology, 2006.
- [14] Coulibaly Y, Belem T, Cheng L Z. Numerical analysis and geophysical monitoring for stability assessment of the Northwest tailings dam at westwood mine [J]. International Journal of Mining Science and Technology,2017,27(4):701.
- [15] Sjodahl P, Dahlin T, Johansson S. Using resistivity measurements for dam safety evaluation at Enemossen tailings dam in southern Sweden [J]. Environ Geol,2005,49(2):267.
- [16] 李晓新,王吉宇,牛昱光. 基于高密度电阻率法的尾矿坝浸润线监测系统设计[J].工矿自动化,2013,39(4):20.  
Li X X, Wang J Y, Niu Y G. Design of seepage line monitoring system for tailings dam based on high density resistivity method [J]. Industry and Mine Automation, 2013, 39(4): 20.
- [17] 严加永,孟贵祥,吕庆田,等. 高密度电法的进展与展望[J]. 物探与化探,2012,36(4):576 – 584.  
Yan J S, Mong G X, Lv Q, et al. The progress and prospect of the electrical resistivity imaging survey [J]. Geophysical Geochemical Exploration, 2012, 36(4):576 – 584.
- [18] 陈松,余绍文,刘怀庆,等.高密度电法在水文地质调查中的应用研究——以江平圩幅为例[J]. 地球物理学进展, 2017, 32(2): 849 – 855.  
Chen S, Yu S W, Liu H Q, et al, Application and research of high density resistivity method in hydrogeological prospecting—a case study on Jiangping town map [J]. Progress in Geophysics, 2017, 32(2): 849 – 855.
- [19] 何锦龙,伍跃胜,刘泽东,等.不同降雨量对尾矿坝稳定性的影响规律分析[J].金属矿山,2015(8):150 – 153.  
He J L, Wu Y S, Liu Z D, et al. Influence Law Analysis of Different Precipitation to the Stability of Tailings Dam [J]. Metal Mine, 2015(8):150 – 153.

## The application of high density resistivity method to the monitoring of tailings dam

LIU Dao-Han, LUO Shi-Xin, CHEN Chang-Jing

(Wuhan Center, China Geological Survey, Wuhan 430223, China)

**Abstract:** The dam failure and leakage risk of tailings dam are directly related to the safe operation of tailings pond, which is an important environmental safety problem. In this paper, the authors used the high density resistivity method to detect the two-dimensional fine section of tailings dam, and found four weak areas of tailings dam structure. Since the leakage is mainly caused by the movement of groundwater, monitoring studies were carried out for three times on the tailings dam before and after the rainy season and, as a result, the dynamic response of the electrical structure of the dam body was obtained, with a suspected dew point determined. The feasibility of application of high density resistivity method to the tailings dam monitoring was verified, and the result provides a new technical means for tailings dam stability study.

**Key words:** tailings dam; high density resistivity method; monitor; seepage channel

(本文编辑:沈效群)