



## 高密度电法勘探数据在 Voxler 平台的三维可视化展示 ——及其在尾矿库隐患勘查中的应用

王守兴, 欧立鹏, 祁尧刚, 徐得忠, 曾思敏

中国地质调查局 西宁自然资源综合调查中心, 青海 西宁 810000

**摘 要:** 尾矿库内堆放的有污染的固体和液体废物若得不到合理妥善的处理, 会对周边的环境造成严重的污染. 为了确定尾矿库的稳定性, 分析尾矿库内的固、液废弃物对周边土壤和地下水的影响, 急需查明尾矿库的形态特征和库容规模. 高密度电法作为一种常规的物探方法, 以其简便、快捷、高效等特点, 在确定尾矿库形态特征方面成为现场探测的首选技术手段. 本研究运用高密度电法反演得到尾矿库的底界面范围, 并结合钻孔验证, 在 Voxler 平台构建了尾矿库的可视化三维模型, 从而更加精确计算尾矿砂的方量, 证明了高密度电法在确定尾矿库形态特征中的可行性.

**关键词:** 高密度电法; 尾矿库; 可视化; 三维模型; Voxler 软件

## 3D VISUAL DISPLAY OF HIGH DENSITY RESISTIVITY EXPLORATION DATA BASED ON Voxler PLATFORM: Its Application in Tailings Pond Hidden Danger Exploration

WANG Shou-xing, OU Li-peng, QI Yao-gang, XU De-zhong, ZENG Si-min

Xining Natural Resources Comprehensive Survey Center, CGS, Xining 810000, China

**Abstract:** It will cause serious contamination to surroundings if the polluted solid and liquid wastes piled up in tailings pond are not properly treated. To determine the stability of tailings pond and analyze the influence of solid and liquid wastes on the surrounding soil and groundwater, it is urgent to find out the morphological characteristics and storage capacity scale of tailings pond. As a conventional geophysical prospecting method, high-density resistivity technique is simple, rapid and effective, and has become the preferred option of on-site detection in determining the morphological characteristics of tailing ponds. In this study, the range of bottom interface of tailings pond is obtained by inversion of high-density resistivity method. Combined with drilling verification, the 3D visualization model of tailings pond is built on Voxler platform for more accurate calculation of volume of tailing sand, which proves the feasibility of high-density resistivity method in determining the morphological characteristics of tailings pond.

**Key words:** high-density resistivity; tailings pond; visualization; 3D model; Voxler

### 0 引言

尾矿库是指筑坝拦截谷口或围地构成的, 用以堆

存金属或非金属矿山进行矿石选别后排出的尾矿或其他工业废渣的场所<sup>[1]</sup>. 尾矿库内堆放的是有污染的固

收稿日期: 2022-01-06; 修回日期: 2022-02-14. 编辑: 张哲.

基金项目: 中国地质调查局“黄河上游甘肃-宁夏段矿集区综合地质调查”(DD20208076).

作者简介: 王守兴(1991—), 男, 主要从事水工环地质调查研究工作, 通信地址 青海省西宁市城中区泰青路 2 号, E-mail://1912077980@qq.com

体废物和液体废物,若得不到合理妥善的处理会对周边的环境造成严重的污染,同时尾矿库是一个具有高势能的人造泥石流的安全源<sup>[2]</sup>,其稳定性关系着周边居民、构筑物和环境安全<sup>[3]</sup>.尾矿库的管理和尾矿库对环境的影响一直是国内外学者关注的焦点.随着现代科技进步和勘查技术多样性多元化,地球物理勘探技术方法逐渐呈现出了它的优越性<sup>[4]</sup>,在尾矿库、垃圾填埋场等重要的点源污染场地的结构和隐患勘查中有了更多的应用<sup>[5]</sup>.三维地质建模作为“数字矿山”的基础,在对勘察结果的展示方面具有立体化、可视化的特点,可使用户看到一个数字化、智能化的成果<sup>[6]</sup>.

高密度电阻率法作为有效的电法勘探方法,有着很高的工作效率<sup>[7]</sup>,但传统的高密度电法只显示研究对象在二维空间上的电阻率差异.Voxler平台作为一款处理三维可视化软件,可用于绘制三维切片图、三维等值线图、等势面图、综合模型图等<sup>[8-9]</sup>,高密度电阻率法采集的数据在该软件的协助下可以提高分析解释的准确性<sup>[10]</sup>,能很好地对尾矿库坝体安全、溶液量和尾矿量等进行全面核算,以明确尾矿库在后期的管理和使用过程中遇到的问题,提升对尾矿库的综合管理水平.

## 1 尾矿库简介

甘肃省白银有色金属公司第一尾矿库建于20世纪50年代末,并于80年代停止使用,占地面积为2.75 km<sup>2</sup>,其类型为多金属尾矿库.尾矿库位于白银市东部,离白银市中心4.5 km,109国道从尾矿库南侧150 m处东西向经过,尾矿库的西侧和南侧为村庄,且西侧与村庄相连.区域地势总体呈北高南低,起伏较小.尾矿库位于黄河一级支流沙河的上游,距离支流入河口18 km.

## 2 地质概况及地球物理特征

研究区处于北祁连东段,位于我国重要的铜多金属成矿带<sup>[11]</sup>,也是重要的块状硫化物成矿带<sup>[12]</sup>.尾矿库周边主要出露岩性为三叠系中统粉砂岩和含砾砂岩、白垩系下统岩屑石英砂岩和第四系黄土及冲洪积物(图1).

尾矿库的矿渣主要为酸性火山岩及千枚岩-中基性火山岩组,是选矿厂处理块状含铜黄铁矿矿石、浸染状含铜黄铁矿矿石和少量辉铜矿、蓝铜矿、褐铁矿、闪

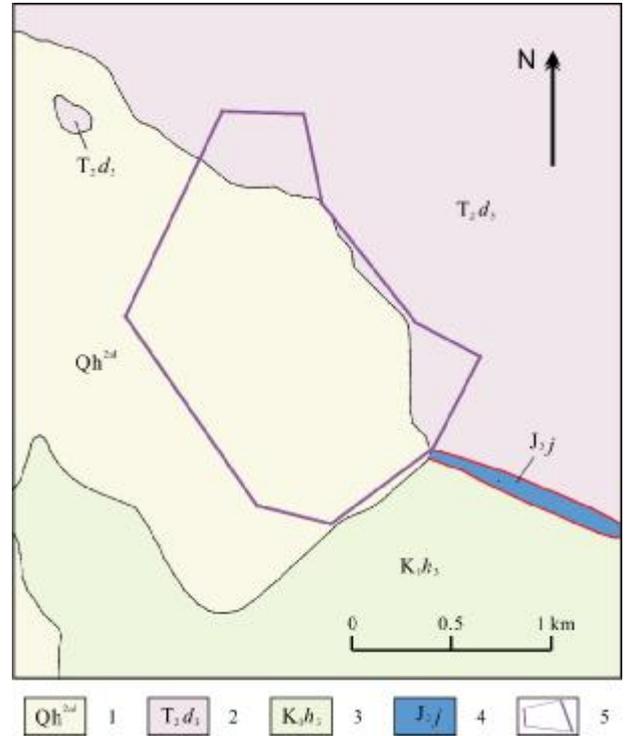


图1 研究区地质简图

Fig. 1 Geological sketch map of the study area

1—第四系松散砂砾石层和亚砂土(Quaternary loose sand gravel and sandy loam); 2—三叠系中统粉砂岩和含砾砂岩(Middle Triassic siltstone and gravel sandstone); 3—白垩系下统厚层状中粗粒岩屑石英砂岩(Lower Cretaceous thick-bedded medium-coarse grained lithic quartz sandstone); 4—侏罗系灰白色石英质砾岩夹含砾粗砂岩(Jurassic gray-white quartz conglomerate with gravel-bearing coarse sandstone); 5—尾矿库范围(tailings pond)

锌矿后留下的尾矿<sup>[13]</sup>.尾矿库周边岩性与尾矿砂在电性特征上具有较明显的差异性(表1),这是因为尾矿砂内较高的含水率及高于周边基岩的重金属离子而呈现低电阻率特征;同时尾矿库内的尾矿砂在经过几十年的堆积并且随着冶炼提纯工艺的发展,使得尾矿砂在水平方向和垂向上出现电性区别,为查明尾矿砂分布和库容提供了一定的参考依据.

表1 尾矿库及周边岩性物性特征

Table 1 Physical parameters of tailings pond and surroundings lithology

岩性	电阻率范围/ $\Omega\text{m}$
尾矿砂	13-56.4
含水尾矿砂	<13
第四系黄土	20.6-48
砂砾石层	60-200
基岩	>200

### 3 物探方法

高密度电阻率法具有测量电剖面 and 电测深的双重作用,因其工作效率高、布设简便、采集数据量大等特点<sup>[14-16]</sup>,被广泛用在地质勘探和环境地质调查等工作中<sup>[17]</sup>. 高密度电阻率法应用的依据是地下介质在水平方向或垂向上能显示出各个层位的不同电性特征<sup>[18-19]</sup>. 常用的装置系统有四电极排列三电位系统和三电极排列两电位系统<sup>[20-21]</sup>. 为了更具有时效性,本研究采用了四电极排列三电位系统的温纳装置,采用深圳赛赢地脉公司生产的 GD-10 型高密度电阻率法测量设备.

共布设高密度电阻率法测量剖面 13 条,其中 5 m 电极距剖面 11 条,10 m 电极距剖面 2 条(图 2). 在工作前期用中海达 RTK 测量各测量点的高程数据,用于后期地形改正.

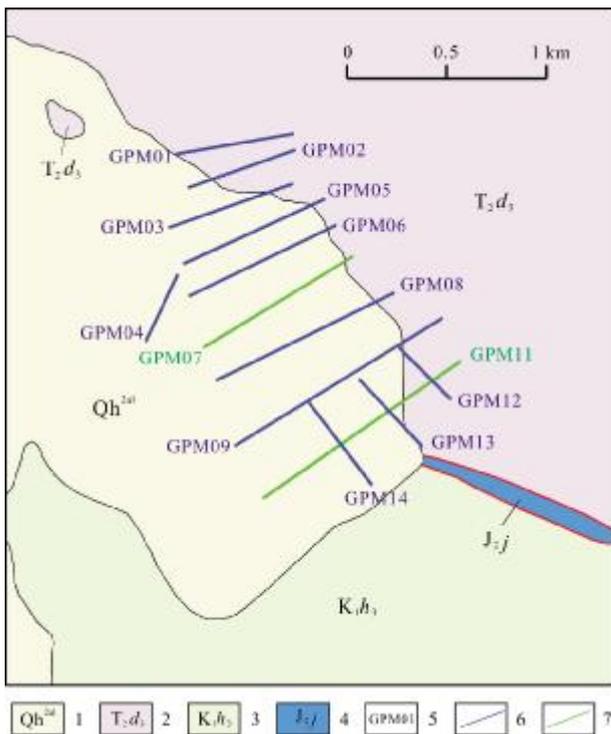


图 2 工作区勘探剖面部署图

Fig. 2 Deployment map of exploration section in the working area  
 1—第四系松散砂砾石层和亚砂土 (Quaternary loose sand gravel and sandy loam); 2—三叠系中统粉砂岩和含砾砂岩 (Middle Triassic siltstone and gravel sandstone); 3—白垩系下统厚层状中粗粒岩屑石英砂岩 (Lower Cretaceous thick-bedded medium-coarse grained lithic quartz sandstone); 4—侏罗系灰白色石英质砾岩夹含砾粗砂岩 (Jurassic gray-white quartz conglomerate with gravel-bearing coarse sandstone); 5—测线编号 (number of survey line); 6—5 m 点距测线 (survey line with 5 m electrode spacing); 7—10 m 点距测线 (survey line with 10 m electrode spacing)

### 4 建模数据处理及可视化成效

#### 4.1 数据准备和处理

利用瑞典 RES2DINV 软件,对数据进行预处理、剔除坏点、计算反演. 尾矿库可视化模型主要包括尾矿库的顶界面(即尾矿库地形)和尾矿库的底界面(即原始地形). 尾矿库顶界面由 RTK 地理测绘采集,底界面是通过物理勘探反演和工程钻孔校准验证后确定.

#### 4.2 地质界面的可视化

地质界面的可视化需要 Surfer 软件的协助才能完成,对尾矿库顶面完成的地理测绘数据( $x, y, z$ )整理导入到 Surfer 中完成网格化,在 Voxler 中将 GRD 格式文件导入后通过 Module Manager(模块管理器)、Network Manager(网络管理器)、Property Manager(属性管理器)三大模块,完成对需要显示对象的添加、连接、编辑和显示的操作任务. 调整后的显示效果如图 3.

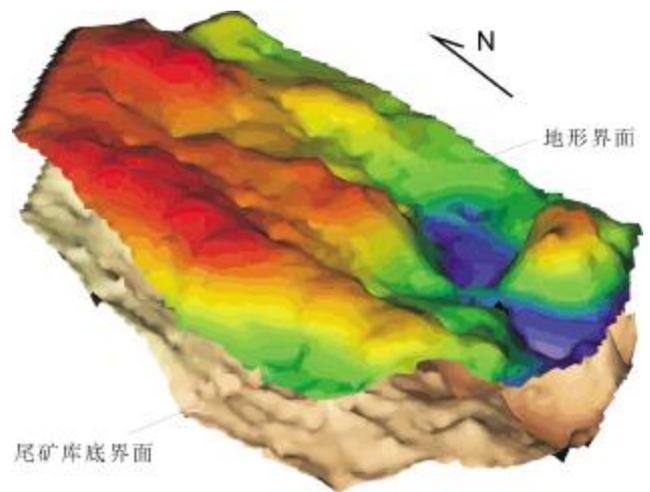


图 3 地质界面可视化效果

Fig. 3 Visualization effect of geological interface

尾矿库底界面的确定需要高密度电法数据和工程钻孔验证相结合. 图 4 所示为高密度测线 GPM01 的反演电阻率断面, 根据各介质的物性差异结合地质解译出尾矿库底界面(图中红色虚线). 尾矿在地表可见范围为 S19—S109 号电极,其中 S51—S62 出露紫红色砂岩在地表呈小山包, S65—S66、S89—S91 在地表出露紫红色砂岩, 3 处基岩出露将尾矿切割分段, 整条剖面中在 20 m 深度范围内电阻率的高低值分界明显, 结合各地质体的物性特征解译出电阻率小于  $19.4 \Omega m$  的低阻体为尾矿砂. 为了验证物探剖面解译的准确性,在该测线 S44 号测点处布置工程钻孔 ZK22, 孔深

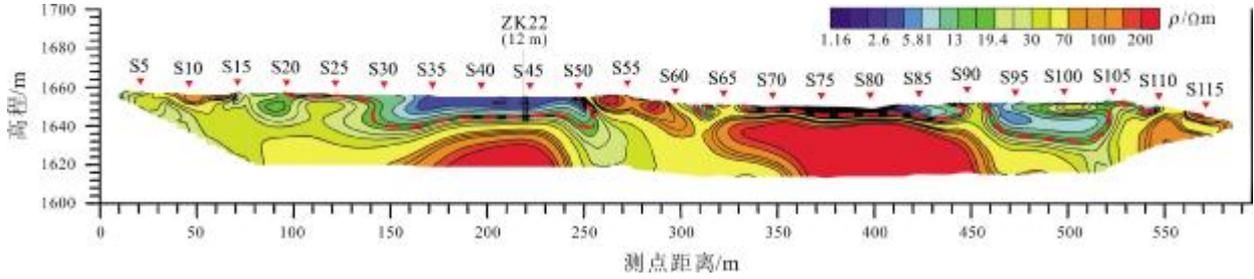


图4 GPM01反演电阻率断面图

Fig. 4 Resistivity inversion profile along survey line GPM01

12 m, 钻孔揭露出的尾矿砂深度为 10.8 m, 在物探断面解译中尾矿砂的深度 11 m. 由此, 物探方法解译的尾矿库底界面结果得以验证.

#### 4.3 验证钻孔的可视化

在 Voxler 中针对钻孔的可视化有专门的数据格式. 实现钻孔可视化需要将钻孔数据整理成 3 张表格, 分别为钻孔定位表(表 2)、钻孔测斜表(表 3)、岩性分层表(表4).

表 2 钻孔定位表

Table 2 Borehole positioning data

钻孔编号	X	Y	Z	方位角/(°)	倾角/(°)	终孔深度/m
ZK01	1193.2671	6842.0693	582.414	0	-90	270
ZK02	1411.3651	6983.6941	527.82	0	-90	193
ZK03	1059.1113	6754.9383	623.545	0	-90	284
ZK04	1407.5774	7227.5323	520.987	0	-90	156
ZK05	1282.0356	7288.2616	575.998	0	-90	170

注: 表中数据为处理过的非实际坐标, 只做演示.

表 3 钻孔测斜表

Table 3 Borehole inclination measuring data

钻孔编号	层面深度/m	方位角/(°)	倾角/(°)
ZK01	582.414	0	0
ZK01	404.414	0	0
ZK01	312.414	0	0
ZK02	527.83	0	0
ZK02	394.83	0	0

表 4 岩性分层表

Table 4 Lithological stratification data

钻孔编号	From	To	属性	岩性
ZK01	582.414	565.414	30	黄褐色尾矿
ZK01	565.414	408.414	20	灰黑色尾矿
ZK01	408.414	312.414	10	砂砾石黄土
ZK02	527.83	516.83	30	黄褐色尾矿
ZK02	516.83	394.83	20	灰黑色尾矿

将 3 张表导入到 Network Manager 中, 先对钻孔定位表做编辑. 在 Property Manager 中 Output 输出类型设置有 Wells 和 Points 两种, 钻孔不能以“点”类型显示, 所以只能设置为 Wells; 在 Well Columns 中依次设置表格中相对应的数据; 钻孔测斜表在 Property Manager 中的设置需要注意的是, Well Columns 中的 Sheet type 要设置为 Directional Survey, 其余步骤同上; 岩性分层表在 Property Manager 中的设置需要注意的是, Well Columns 中的 Sheet type 要设置为 From/To Logs, 其余步骤同上. 钻孔定位表右击鼠标, 选择 Well Date 并将钻孔测斜表和岩性分层表连接, 在 Well Date 中选择 Well Render 即可显示钻孔效果(如图 5).

#### 4.4 尾矿砂的可视化

将 13 条物探剖面解译之后的数据整理成 x、y、z、ρ 格式的 Excel 文件, 其中 x、y、z 为测点空间位置坐标值, ρ 为电阻率值; 将整理好的数据导入到 Network Manager 中, 在 Module Manager 中选 Gridder 计算模块与数据文件连接, 并进行网格化处理, 对网格化以后的数据做一次 Math 计算; 在 Module Manager 中选择 Math 模块然后与尾矿库顶面数据连接, 在 Property Manager 中对计算模块写入计算格式(if Z>B,0,A),

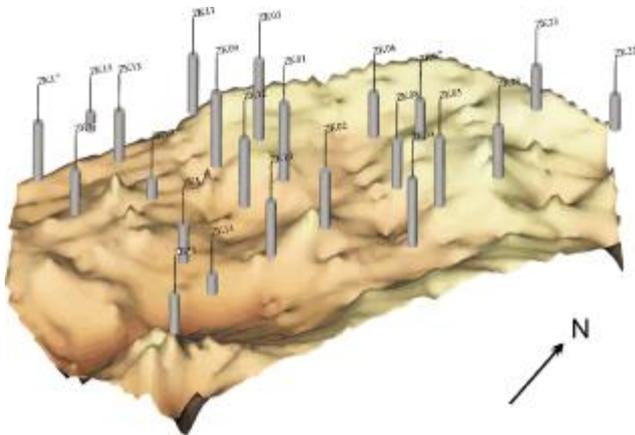


图 5 钻孔可视化效果

Fig. 5 Visualization effect of borehole

通过计算格式输入对尾矿库顶面以外的空间数据做白化处理,然后连接到 VolRender 模块显示尾矿砂和尾矿库顶面;对尾矿库底界面数据重复以上操作后可得尾矿砂模型。

通过以上各单元体可视化显示,将其集成到同一坐标系内即可得到尾矿库整体的三维可视化模型,多元素集成的关键是所有集成元素要在统一的坐标系内完成,将所有的元素集合之后呈现出要素齐全的尾矿库模型,如图 6 所示。

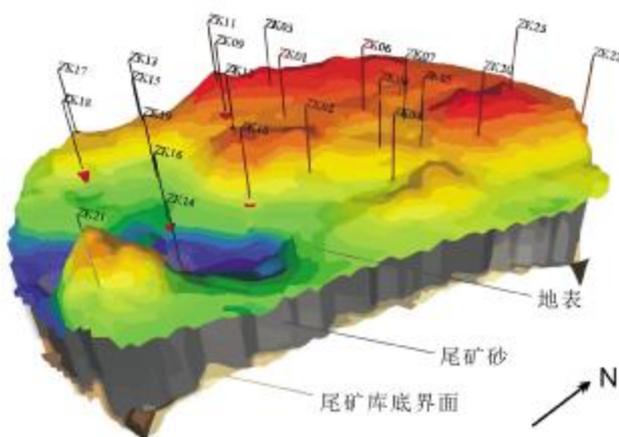


图 6 尾矿库模型

Fig. 6 Model of tailings pond

## 5 结论

Voxle 软件对三维空间的展示具有很好的效果,能有效地利用高密度电法数据集的三维控制信息( $x$ 、 $y$ 、 $z$ 、 $\rho$ )方便快捷地体现可视化三维模型,借助 Well 功能将钻孔数据通过 WellRender 模块呈现出钻孔模型。

利用可视化模型更精确地计算出尾矿砂的方量为  $2.027\ 56 \times 10^7\ \text{m}^3$ 。

致谢:在三维建模过程中,中国矿业大学杨海燕教授和中国地质调查局成都地质调查中心李富高级工程师给予了指导和帮助,审稿专家及编辑老师对论文提出宝贵意见,在此一并表示感谢。

## 参考文献(References):

- [1] 国家安全生产监督管理总局. AQ 2006—2005 尾矿库安全技术规程[S]. 北京: 煤炭工业出版社, 2006.  
State Administration of Work Safety. AQ 2006—2005 Safety technical regulations for the tailings pond[S]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2006.
- [2] 郭朝阳, 唐治亚. 尾矿库溃坝模型探讨[J]. 中国安全生产科学技术, 2010, 6(1): 63—67.  
Guo Z Y, Tang Z Y. Study on the tailings dam-break model[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2010, 6(1): 63—67.
- [3] 张书琛, 陈伟康, 刘芳斌, 等. 3DMine 在某尾矿库管理方面的应用[J]. 现代矿业, 2020, 36(11): 187—188, 199.  
Zhang S C, Chen W K, Liu F B, et al. Application of 3DMine in the management of a tailings pond[J]. Modern Mining, 2020, 36(11): 187—188, 199.
- [4] 李军, 马新龙. 高密度电法在水库大坝塌陷勘测中的应用[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.
- [5] 刘道涵, 伏永朋, 刘慧. 高密度电法在丹江口水源区某尾矿库三维探测中的应用研究[J]. 华南地质与矿产, 2020, 36(1): 33—37.  
Liu D H, Fu Y P, Liu H. Application of high density resistivity method in three-dimensional detection of a tailings pond in Danjiangkou water source area[J]. Geology and Mineral Resources of South China, 2020, 36(1): 33—37.
- [6] 刘彦奎, 王欣然, 李建, 等. 基于 3DMine 的胶东上庄金矿体三维建模及其应用[J]. 山东国土资源, 2020, 36(12): 53—59.  
Liu Y K, Wang X R, Li J, et al. Three dimensional geological modeling and application of Shangzhuang gold ore body in Jiaodong Peninsula based on 3DMine software[J]. Shandong Land and Resources, 2020, 36(12): 53—59.
- [7] 王守兴, 祁尧刚, 欧立鹏. 高密度电阻率法在老煤窑采空区勘探中的应用[J]. 科技尚品, 2021, 7(5): 27—28.  
Wang S X, Qi Y G, Ou L P. Application of high density resistivity method in exploration of goaf in old coal mine[J]. Premiere, 2021, 7(5): 27—28. (in Chinese)

- [8] 韦乖强, 孙林, 张广琦, 等. 基于 Voxler 和 Surfer 软件在瞬变电磁法三维切片图绘制中的应用与研究[J]. 煤矿开采, 2015, 20(4): 32-35.  
Wei G Q, Sun L, Zhang G Q, et al. Application of Voxler and Surfer software in slice-map drawing of transient electromagnetic method[J]. Coal Mining Technology, 2015, 20(4): 32-35.
- [9] 贾立国, 郭晓东, 张帆, 等. 高密度电法数据三维可视化快速实现及在复杂采空沉降区的应用[J]. 地质与资源, 2017, 26(1): 81-83.  
Jia L G, Guo X D, Zhang F, et al. Fast implementation of 3-D visualization of high-density resistivity data and application in complex goaf subsidence areas[J]. Geology and Resources, 2017, 26(1): 81-83.
- [10] Yasir S F, Jani J, Mukri M. A dataset of visualization methods to assessing soil profile using RES2DINV and VOXLER software [J]. Data in Brief, 2019, 24: 103821.
- [11] 张新虎, 苟国朝, 展积宝. 北祁连地区主要金属矿床成矿系列及区域成矿作用[J]. 地球科学进展, 1997, 12(4): 331-339.  
Zhang X H, Gou G C, Zhan J B. Metallogenic series of main ore deposits and regional metallogeny in North Qilian Mountains [J]. Advance in Earth Sciences, 1997, 12(4): 331-339.
- [12] 张洪培, 刘继顺, 方维萱, 等. 甘肃白银折腰山型和石膏洞型块状硫化物矿床综合信息找矿模型研究[J]. 矿床地质, 2003, 22(4): 408-414.  
Zhang H P, Liu J S, Fang W X, et al. Comprehensive information prospecting models for Zheyaoshan and Shiqingdong massive sulfide deposits in Baiyin, Gansu Province[J]. Mineral Deposits, 2003, 22(4): 408-414.
- [13] 尹观, 张树发, 范良明, 等. 甘肃白银金属硫化物矿床及其矿区主要地质事件的同位素地质年代学研究[J]. 地质地球化学, 1998, 26(1): 6-14.  
Yin G, Zhang S F, Fan L M, et al. Isotope geochronology studies of the main geological events on the sulfide ore deposits and neighborhood in Baiyin, Gansu[J]. Geology-Geochemistry, 1998, 26(1): 6-14.
- [14] 时彦芳, 李波. 综合电法在花岗岩地区找水中的应用效果分析[J]. 地质与资源, 2020, 29(4): 363-368.  
Shi Y F, Li B. Analysis on the application effect of integrated electrical method in water prospecting in granite regions[J]. Geology and Resources, 2020, 29(4): 363-368.
- [15] 贾立国, 吴继红. 高密度电法测量的应用及其在森林区的优势[J]. 地质与资源, 2014, 23(2): 181-183.  
Jia L G, Wu J H. Application of multi-electrode resistivity survey in forest-covered areas[J]. Geology and Resources, 2014, 23(2): 181-183.
- [16] 王超群, 贾丽云, 胡道功, 等. 海南岛北部马袅-铺前断裂东段活动性与地壳稳定性评价[J]. 中国地质, 2021, 48(2): 618-631.  
Wang C Q, Jia L Y, Hu D G, et al. Activity of eastern part of the Maniao-Puqian fault in northern Hainan Island and its evaluation of crustal stability[J]. Geology in China, 2021, 48(2): 618-631.
- [17] 李华, 王东辉, 张伟, 等. 地球物理探测技术在成都市浅表地质结构调查中的应用研究[J]. 中国地质, 2022, 49(5): 1438-1457.  
Li H, Wang D H, Zhang W, et al. Application research of geophysical exploration technology in the investigation of shallow geological structure in Chengdu[J]. Geology in China, 2022, 49(5): 1438-1457.
- [18] 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 Y, Meng G X, Lv Q T, et al. The progress and prospect of the electrical resistivity imaging survey[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2012, 36(4): 576-584.
- [19] 刘晓东, 张虎生, 黄笑春, 等. 高密度电法在宜春市岩溶地质调查中的应用[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2002, 13(1): 72-75.  
Liu X D, Zhang H S, Huang X C, et al. The application of high density electrical method to karst geological survey in Yichun city[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2002, 13(1): 72-75.
- [20] 韩锡勤, 程邈, 林松. 高密度电法在某防空洞勘探中的应用[J]. 大地测量与地球动力学, 2010, 30(S1): 165-166.  
Han X Q, Cheng M, Lin S. Application of high-density electrical method in investigation on air-raid shelter[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2010, 30(S1): 165-166.
- [21] 巩建军, 邓居智, 陈辉, 等. 高密度电阻率法在高速公路隧道勘察中的应用研究[J]. 工程地球物理学报, 2016, 13(4): 429-434.  
Gong J J, Deng J Z, Chen H, et al. The application of high density resistivity method to the tunnel exploration of expressways[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2016, 13(4): 429-434.