

南方稀土矿区隐伏断裂带高密度电法勘探实验

陈书¹, 舒荣波², 闵刚¹, 刘康¹, 袁慧琳¹, 程蓉²

(1. 成都理工大学地球勘探与信息技术教育部重点实验室, 四川 成都 610059;

2. 中国地质科学院矿产综合利用研究所, 四川 成都 610041)

摘要: 当下南方稀土矿的开采模式依旧为原地浸矿模式, 这种开采模式而言, 矿山地下发育的裂隙构造、地下暗河、岩溶等不良地质体, 会严重降低浸矿液的回收率, 同时沿不良地质体泄露的浸矿液对环境会造成严重污染, 因此对矿山地下不良地质体的发育状态的调查具有重要的意义。本文针对南方某稀土矿 C2 矿区的地质分布及构造特征, 首先开展高密度电法参数实验, 选择合适的测量参数以及温纳-斯伦贝耳 2 装置测量模式, 完成了 4 条测线的高密度电法测量; 通过反演计算获得了实验区的隐伏电性结构模型, 圈定了风化层(富含稀土矿的地层)厚度以及隐伏断裂构造的空间展布特征, 解释结果与实验区布置的钻探结果一致。勘探成果对于离子性稀土矿储量评估、渗漏通道封堵及收液巷道的布置等提供了重要的参考资料。

关键词: 稀土矿; 高密度电法; 渗漏通道; 断裂构造

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2022.01.009

中图分类号: TD981 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2022) 01-0068-06

引言

稀土有着“工业维生素”的称号^[1], 可以分为轻稀土和重稀土两大类, 重稀土主要来源是离子吸附型稀土矿, 随着工业的发展重稀土需求量在不断的增加。我国稀土储量和产量位居世界第一, 其中离子型稀土占世界储量的 80%, 主要分布在我国南方地区^[2-3]。离子性稀土矿开采工艺主要分为堆浸、池浸和原地浸矿等开采工艺, 当下主流开采方式为原地浸矿模式^[4]。池浸和堆浸两种传统开采工艺对矿山原生环境破坏很大; 原地浸矿开采模式, 采用山上注液, 山下挖掘巷道回收浸矿液, 虽然不会对地表植被造成破坏, 但是浸矿液的泄露对矿区地下水会造成严重污染^[5]。而地下断裂构造是浸矿液泄露的主要途经, 为了避免浸矿液的泄露对环境造成严重污染, 在离子吸附型稀土矿正式开采前, 在矿区进行物探工作, 对地下隐伏地质构造的探查是十分必要的。但利用高密度电法针对风化层较厚的离子吸附型稀土矿床是否有效果, 需要结合勘探实验结果及钻孔验证结果来判断。

1 实验区地质概况

实验区域属于亚热带季风性湿润气候区, 湿热多雨, 年平均气温 18.3℃^[6]。该区域在晚古生代以来受岩浆入侵, 形成分布较广的粗粒花岗岩, 出露粗粒花岗岩在湿润气候下风化作用, 形成抗蚀较差的酸性红壤^[7-8]。实验区内地质构造不发育, 地表未发现有明显的断裂构造, 地质构造主要表现为岩体的节理及裂隙; 实验区花岗岩基岩较完整, 在实验区的侧水坝沟谷出露基岩; 实验区地层不发育, 主要为第四纪冲洪积地层与第四纪残坡积地层, 第四纪冲洪积地层主要岩性有黏土、粉质黏土、细砂及卵石; 第四纪残坡积地层主要岩性为残积砂(砾)质粘性土, 为花岗岩风化残留的产物, 局部地段风化较不完全, 主要为山脊线、山顶等处, 风化残留较多, 残留基岩多呈透镜体状。

2 数据来源及处理

2.1 野外数据采集

高密度电法测量基于直流电阻率法原理^[9-10],

收稿日期: 2021-05-24

作者简介: 陈书(1994-), 男, 硕士, 主要研究地球物理方法在生产中的应用。

利用地下介质的电阻率为电性参数，利用异常体周围介质的电性差异，通过观测和计算人工建立的地下稳定电场的分布特征来确定探测目标的空分布特征以解决地质问题。

在地表水平，地下半空间被导电性均匀、各向同性的岩石所充满的特定条件下的点电源 A^+ 和 B^- 向地下攻入电流强度为 I 时，根据点电源电场的基本公式，可知任意两点 M 和 N 的电位 U_M 、 U_N 从而推导出电阻率 ρ 。^[11-12]

$$U_N = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right) \quad (1)$$

$$U_M = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right) \quad (2)$$

$$\Delta U_{MN} = U_M - U_N = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BM} + \frac{1}{BN} \right) \quad (3)$$

$$\rho = \frac{2\pi}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BM} + \frac{1}{BN}} \cdot \frac{\Delta U_{MN}}{I} \quad (4)$$

其中， AM ， AN ， BM ， BN 是 A ， B ， M ， N 四个电极的水平距离。各电极的位置关系通常用装置系数 K 来表示

$$K = \frac{2\pi}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BM} + \frac{1}{BN}} \quad (5)$$

则电阻率为：

$$\rho = K \frac{\Delta U_{MN}}{I} \quad (6)$$

高密度电法的不同装置勘探的效果不同，结合实验区内风化层厚度较厚，地表导电干燥等特征，为保证探测深度，经实验不同装置的勘探效果对比，最终选择温纳-施伦贝尔 2 装置。温纳-施伦贝尔 2 装置，该装置的 AM 电极距与 BN 电极距相等， NM 电极距受温施隔系数的控制，在一定层数内电极距为固定距离，图 1 为数据采集示意图。

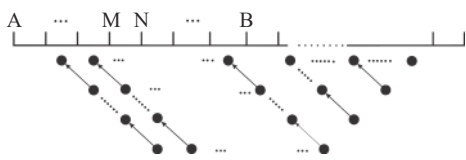


图 1 温纳-施伦贝尔 2 测量装置跑极示意图

Fig.1 Schematic diagram of running pole of Wenner-Schlumberger 2 measuring device

为了实验准确性，综合实地踏勘以及实验区内矿区的范围，结合矿区内的出露的岩脉和推测

岩脉的走向，在实验区域布设了 4 条长度为 600 mm，线距为 20 mm，点距为 5 mm 的二维高密度测线，见图 2。

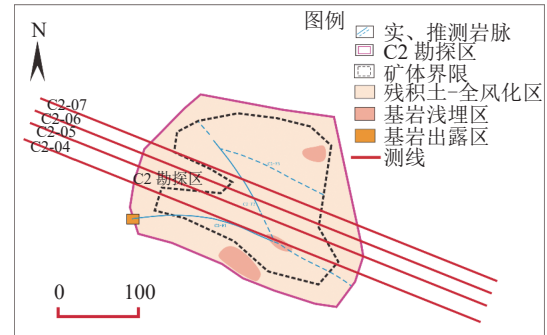


图 2 测线布置示意图

Fig.2 Schematic diagram of line layout

为了验证数据的真实性，在测线数据进行正式采集前，采用野外露头小四极测量方法在矿山实验区域内对露头的花岗岩，以及上覆地层等做了物性参数的测量得到表 1。

2.2 数据处理基本原理及过程

在高密度电阻率勘探方法数据处理中，测量的视电阻率断面图是不能精确介绍地下地质构造的，必须通过反演处理才能得到更加精确的地下介质电性分布图。瑞典 Res2dinv 软件是以最小二乘法为软件的核心算法之一，进行高密度电法实测数据反演处理^[13-15]。

反演方法的核心算法为最小二乘法，最小二乘法是在电法反演计算中应用最为广泛的算法之一^[16]。阻尼最小二乘的公式：

$$(J^T J + \lambda C^T C) P = J^T g$$

在式中： J 偏导数雅可比矩阵， J^T 是 J 的转置矩阵， g 是计算的比值参数理论值与实际视电阻率计算得到的比值参数之差的矢量矩阵， λ 是阻尼因子， P 是模型参数的矢量矩阵。

我们首先使用软件对异常数据进行剔除；然后开展 2D 反演计算，反演的初始阻尼系数为 0.16，阻尼系数随深度增加系数为 1.1，垂直/水平平滑滤波比设置为 1.5，反演电阻率范围限定在 1~10000 $\Omega \cdot m$ 。在反演过程中，根据反演结果调整反演参数，最后得到的反演的 RMS 均小于 5%，数据处理流程见图 3。

3 反演结果解释与钻孔验证

根据反演结果，在矿山核心区域内分别布置

表 1 矿区内各地质体物性参数

Table 1 Physical parameters of geological bodies in the mining area

序号	岩性与地层	测量点/个	电阻率/ $(\Omega \cdot m^{-1})$	备注
1	第四系砂质黏土	10	50~500	不同湿度差别较大
2	花岗岩风化层	12	300~800	含水不同差别较大
3	完整花岗岩基岩层	10	1000~10000	含水不同差别较大
4	断层破碎带	6	20~400	含水不同差别较大

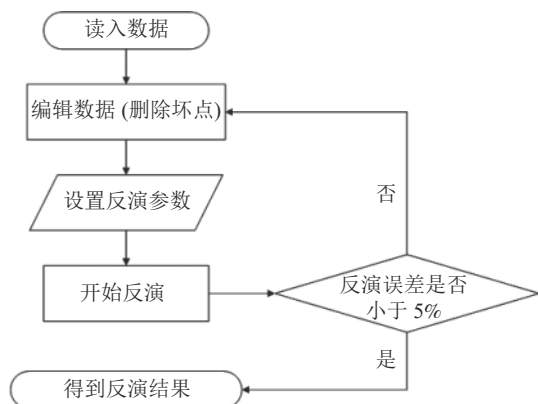


图 3 数据处理流程

Fig.3 Data processing flow chart

几口钻孔来验证此次勘探结果的准确性。根据反演结果，在矿山核心区域内分别布置 5 口钻孔来验证此次勘探结果的准确性。分别为钻孔#4-300，#4-380，#5-245，#6-275，#7-380。根据钻探结果

来约束反演结果的解释及基岩分界面的划分。

4 条测线距较小，反演结果在大体构造上是相同的，但是在细小结构上有所差异。4 条测线的反演结果大体构造在测线剖面的纵向呈现分层结构，基岩分界面以上的风化层和基岩层，在剖面的横向以完整基岩体-破碎带-完整基岩体的构造形态。

测线 C2-04 的横向里程 150~470 mm 区域内是矿山的核心区域，在该区域内，风化层最厚度约为 50 mm，在在横向 250~310 mm 与纵向 250~310 mm 区域，基底为破碎带区域，破碎带两侧为完整基岩，在横向里程 270 mm 与纵向 290~330 mm，有局部完整基岩体，体积较大，测线表层高阻为干燥地表。测线 C2-L5 测线在横向里程 150~470 mm 为矿山区域，矿山区域基岩埋深约在 300 mm 以下的海拔深度，横向 260~330 mm

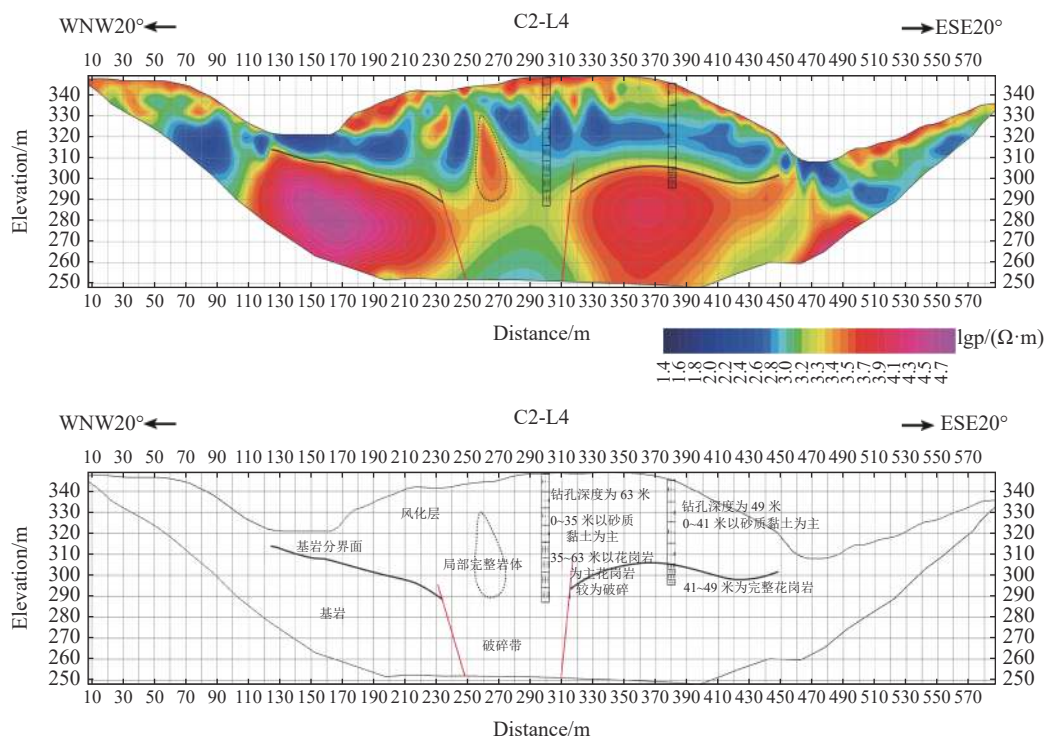


图 4 C2-L4 线综合解释

Fig.4 Comprehensive explanation diagram of line C2-L4

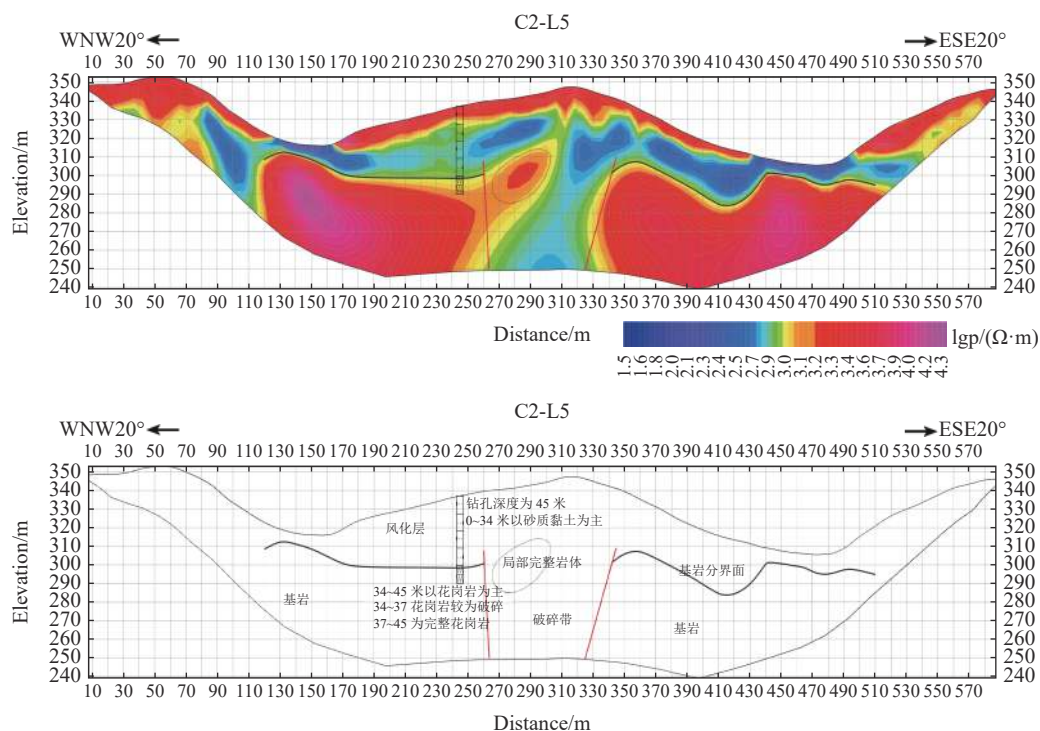


图 5 C2-L5 线综合解释
Fig.5 Comprehensive explanation diagram of line C2-L5

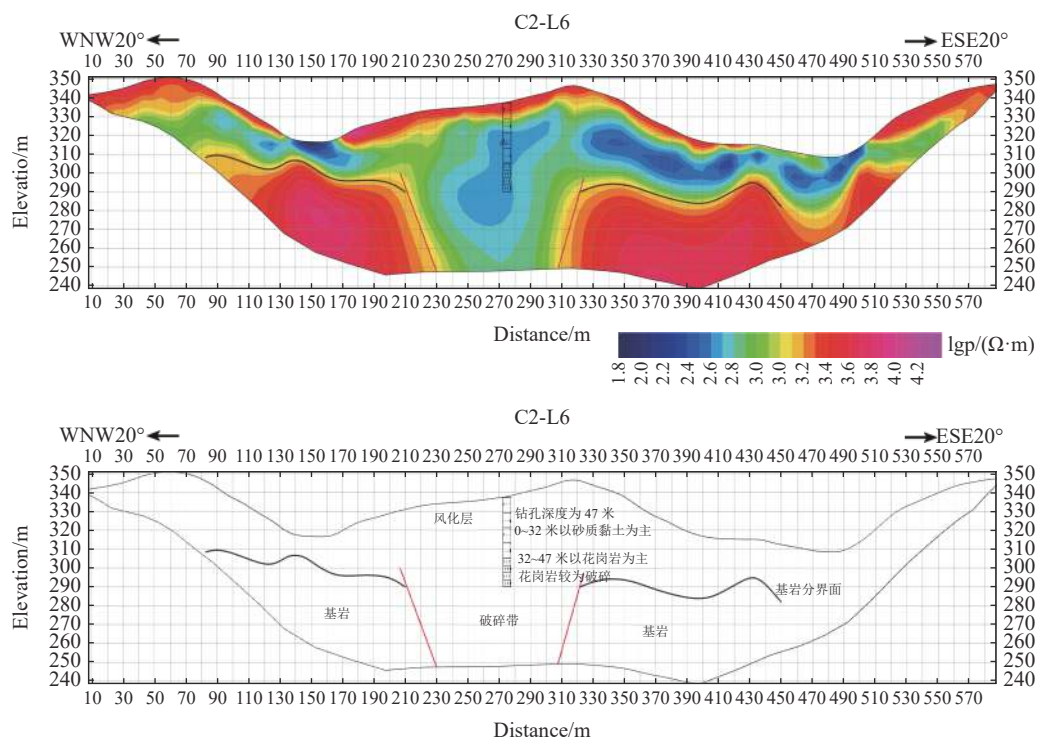


图 6 C2-L6 线综合解释
Fig.6 Comprehensive explanation diagram of line C2-L6

区域为破碎带区域两侧为完整基岩，构造与测线 C2-L4 相似。

测线 C2-L6 穿过矿山中部，在横向往程 160~450 m 区域为矿山区域，该测线的反演结果构造较

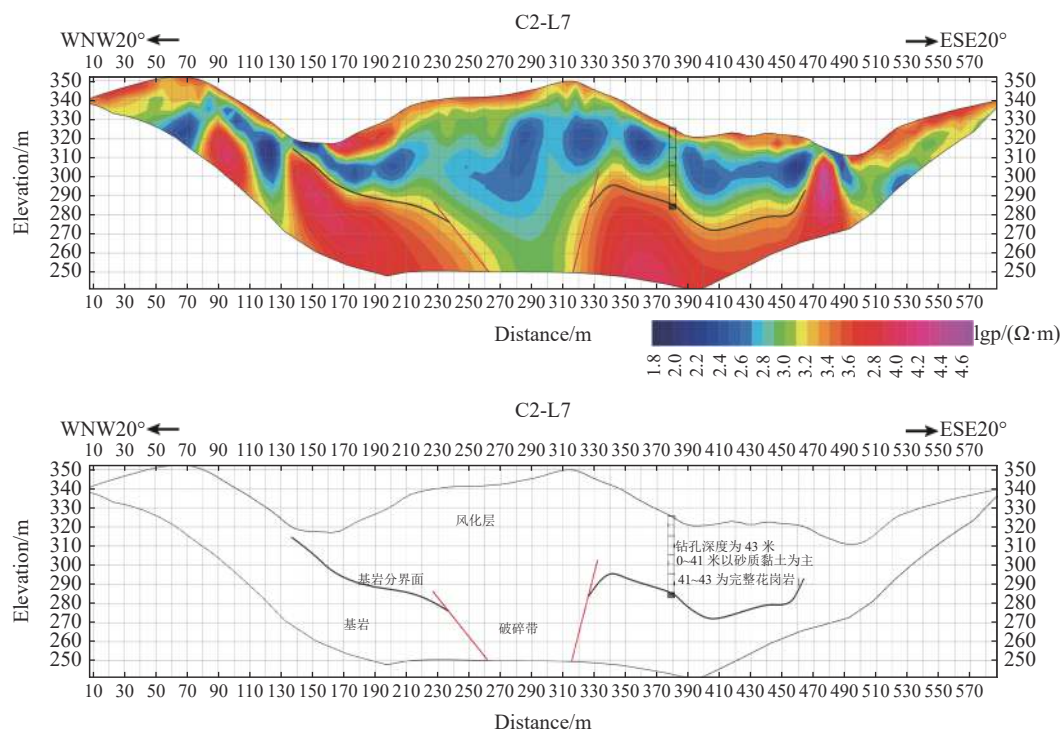


图7 C2-L7线综合解释

Fig.7 Comprehensive explanation diagram of line C2-L7

为简单,从反演结果图上能看出,覆盖层的厚度较厚,海拔越高覆盖层越厚,最厚约为55 mm,最浅约为25 mm,在海拔300 mm以下为基岩,在横向230~310 mm区域为基岩破碎区域,破碎区域较大,两侧为完整基岩。测线C2-L7与测线C2-L6相距15 mm,反演结果反应的地下构造较为相似,该测线的160~420 mm区域为矿山区域,在矿山区域内,风化层的厚度约为50 mm,在横向260~320 mm区域基岩较为破碎。

钻孔#4-300与钻孔#4-380分别在4号线横向里程300 m处与380 m处,钻孔#4-300布置在破碎带上,其深度为63 m,0~35 m为覆盖层,以砂质黏土为主,35~63 m以花岗岩为主,花岗岩较为破碎;钻孔#4-380的深度为49 m,0~41 m以砂质黏土为主,41~49 m为完整地花岗岩。4号线的两口钻孔结果与高密度反演结果较为吻合。

钻孔#5-245布置在5号线245 m处,钻孔#5-245的深度为45 m,0~34 m以砂质黏土为主,34~45 m以花岗岩为主,而34~37 m花岗岩较为破碎,37~45 m为完整花岗岩。钻孔结果与高密度反演结果较为吻合。

钻孔#6-275布置在C2-L6号线横向275 m处,在高密度反演结果图上,钻孔#6-275孔在破

碎带中部,深度为47 m,0~32 m以砂质黏土为主,32~47 m以花岗岩为主,花岗岩较为破碎。

钻孔#7-380在C2-L7号测线的380 m处,钻孔#7-380的深度为43 m,0~41 m以分砂质黏土为主,41~43 m为完整花岗岩。

由几口钻孔的结果,我们验证此次高密度电法勘探的准确性。根据钻孔结果,我们在高密度反演结果的解释上对于基岩分界面的划分,风化层厚度,以及破碎带的范围划分起着很好的参考作用。

4 结 论

(1) 高密度电法在探测风化层较厚的吸附型离子性稀土矿床的风化层与隐伏地质构造是特征是可行的。并且能很好的反应矿山地下构造,破碎带的分布特征。在已知地下构造的前提下,对于浸矿液是否会泄露,泄露方向有着很好的判断,对矿山的防渗措施提出宝贵意见。

(2) 无论是高密度的二维反演结果在矿山风化层和地底基岩都有明显区分;对风化层内的不完全风化体,有这很好的显示效果,对于收液巷道布置和在山体内部的挖掘方向有着较好的指导作用。

参考文献：

- [1] 周贺鹏, 胡洁. 离子型稀土矿化学溶浸影响因素及其调控[J]. 矿产综合利用, 2019(3):146-151.
- ZHOU H P, HU J. Influencing factors and control of chemical leaching of ion-type rare earth ore[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2019(3):146-151.
- [2] 詹光, 黄草明, 朱景和, 等. 南方离子型稀土冶炼废水治理现状与展望[J]. 矿产综合利用, 2018(3):18-25.
- ZHAN G, HUANG C M, ZHU J H, et al. The status quo and prospect of the treatment of ionic rare earth smelting wastewater in southern China[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2018(3):18-25.
- [3] 张博, 宁阳坤, 曹飞, 等. 世界稀土资源现状[J]. 矿产综合利用, 2018(4):7-12.
- ZHANG B, NING Y K, CAO F, et al. The status quo of rare earth resources in the world[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2018(4):7-12.
- [4] 赖丹, 吴一丁. 南方离子性稀土产业发展现状、问题及出路——以赣州为例[J]. 稀土, 2019, 40(4):140-148.
- LAI D, WU Y D. The status quo, problems and solutions of the ionic rare earth industry in Southern China: Taking Ganzhou as an example[J]. Rare Earths, 2019, 40(4):140-148.
- [5] 郭钟群, 金解放, 赵奎, 等. 离子吸附型稀土开采工艺与理论研究现状[J]. 稀土, 2018, 39(1):132-141.
- GUO Z Q, JIN J F, ZHAO K, et al. Ion adsorption type rare earth mining technology and theoretical research status[J]. Rare Earths, 2018, 39(1):132-141.
- [6] Ziqiang Chen, Zhibiao Chen, Xinyu Yan, et al. Stoichiometric mechanisms of dicranopteris dichotoma growth and resistance to nutrient limitation in the Zhuxi watershed in the red soil hilly region of China[J]. Plant and Soil, 2016, 398(1/2):367-379.
- [7] 陈志彪, 陈志强, 岳辉. 花岗岩红壤侵蚀区水土保持综合研究：以福建省长汀朱溪小流域为例 [M]. 北京：科学出版社, 2013.
- CHEN Z B, CHEN Z Q, YUE H. Comprehensive research on soil and water conservation in granite red soil erosion area: a case study of Zhuxi small watershed in Changting County, Fujian Province[M]. Beijing: Science Press, 2013.
- [8] 潘宗涛, 陈志强, 陈志彪, 等. 南方离子吸附型稀土矿区表层土壤稀土有效性及芒其稀土元素迁移、吸收特征[J]. 稀土, 2019, 40(1):1-13.
- PAN Z T, CHEN Z Q, CHEN Z B, et al. The availability of rare earth elements in surface soils of southern ion-adsorbed rare earth mining areas and the characteristics of migration and absorption of rare earth elements of dichotoma[J]. Rare Earths, 2019, 40(1):1-13.
- [9] 刘海飞. 高密度电阻率法数据处理方法研究 [D]. 长沙：中南大学, 2004.
- LIU H F. Research on data processing method of high density resistivity method[D]. Changsha: Central South University, 2004.
- [10] 张来福, 李士强, 刘国强, 等. 输电杆塔下采空区电法探测电极系统设计[J]. 物探与化探, 2020, 44(1):220-225.
- ZHANG L F, LI S Q, LIU G Q, Yet al. Design of electrode system for electric detection of goaf under transmission towers[J]. Physical and Geochemical Exploration, 2020, 44(1):220-225.
- [11] 李金铭, 罗延钟. 电法勘探新进展 [M]. 北京：地质出版社, 1996.
- LI J M, LUO Y Z. New progress in electrical exploration[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1996.
- [12] 董浩斌, 王传雷. 高密度电法的发展与应用[J]. 地学前缘, 2003(1):171-176.
- DONG H B, WANG Z L. The development and application of high-density electrical method[J]. Earth Science Frontier, 2003(1):171-176.
- [13] Yasir Safaa F, Jani Janmaizatulriah, Mukri Mazidah. A dataset of visualization methods to assessing soil profile using RES2DINV and VOXLER software. 2019, 24: 103821.
- [14] 韦乙杰, 袁忠明. RES2DINV 在粤北某铅锌矿区激电测深反演中的应用[J]. 物探与化探, 2013, 37(5):827-829.
- WEI Y J, YUAN Z M. The application of RES2DINV in the IP sounding inversion in a lead-zinc mining area in northern Guangdong[J]. Physical and Geochemical Exploration, 2013, 37(5):827-829.
- [15] 王磊, 蔡晓光, 李孝波, 等. 西吉县西南山区典型黄土地震滑坡高密度电法物探解译分析[J]. 地球物理学进展, 2020, 35(1):351-357.
- WANG L, CAI X G, LI X B, et al. Analysis of high-density electrical geophysical exploration of typical loess seismic landslides in the southwest mountainous area of Xiji County[J]. Progress in Geophysics, 2020, 35(1):351-357.
- [16] 刘成功, 金胜, 魏文博, 等. 高密度电阻率法比值参数基于阻尼最小二乘反演[J]. 物探与化探, 2019, 43(2):351-358.
- LIU C G, JIN S, WEI W B, et al. High-density resistivity method ratio parameter based on damping least squares inversion[J]. Physical and Geochemical Exploration, 2019, 43(2):351-358.