



## 离子型稀土矿区深部三维结构与 底板破碎带勘探试验

闵刚<sup>1</sup>, 舒荣波<sup>2</sup>, 刘康<sup>1</sup>, 程蓉<sup>2</sup>, 陈书<sup>1</sup>, 袁慧玲<sup>1</sup>

(1. 成都理工大学 地球勘探与信息技术教育部重点实验室, 成都 610059;  
2. 中国地质科学院 成都矿产资源综合利用研究所, 成都 610041)

**摘要:** 对于离子型稀土矿原地浸矿的开采模式而言, 矿体下方(花岗岩基底)发育的裂隙构造(破碎带)、地下暗河等渗漏通道, 会严重降低离子型稀土矿的采收率, 同时沿不良地质体流出的浸矿液体会还会造成环境污染, 因此调查花岗岩基底破碎带(渗漏通道)的发育状态具有重要的意义。本研究针对福建省长汀稀土矿C2勘探区的地层及构造特征, 设计了12条勘探剖面来完成高密度电阻率法测量的数据采集, 并通过反演计算获得了研究区的深部电性结构模型。结果表明: 勘探剖面较好地圈定了花岗岩风化层的厚度以及深部断裂构造的空间展布特征, 解释结果与研究区布置的钻探结果一致。勘探成果对于离子型稀土矿储量评估、渗漏通道封堵及回收巷道的布置等提供了重要的参考资料。

**关键词:** 离子型稀土矿; 高密度电阻率法; 电性结构; 渗漏通道

文章编号: 1004-0609(2022)-06-1833-11

中图分类号: P631

文献标志码: A

**引文格式:** 闵刚, 舒荣波, 刘康, 等. 离子型稀土矿区深部三维结构与底板破碎带勘探试验[J]. 中国有色金属学报, 2022, 32(6): 1833-1843. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2022-40165

MIN Gang, SHU Rong-bo, LIU Kang, et al. Exploration test of 3D deep structure and floor fracture zone in ion type rare earth ore district[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2022, 32(6): 1833-1843. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2022-40165

稀土资源在世界各国的科学技术发展中是不可替代的战略物资, 稀土分为重稀土和轻稀土, 离子型稀土矿以重稀土为主, 重稀土的价值高储量少, 比轻稀土更为宝贵<sup>[1]</sup>。闽西南(福建西南)地处滨太平洋大陆边缘活动带, 古火山及岩浆侵入活动强烈, 在燕山期、华力西-印支期和加里东期地质时代均广泛发育含稀土花岗岩<sup>[2]</sup>; 温暖湿润的亚热带气候, 致使含稀土花岗岩遭受强烈的化学和生物风化作用, 岩体中的稀土元素呈离子状态吸附于黏土矿物表面, 在闽西南地区形成大面积分布的离子吸

附型稀土矿床<sup>[3]</sup>。

由于稀土以离子形式吸附在黏土矿物上, 因此浸矿和流出液的采收是离子型稀土矿山开采中的关键步骤<sup>[4-5]</sup>。开采方法主要有原地浸矿和池浸两种方式<sup>[6]</sup>, 相对于池浸而言, 原地浸矿具有环境相对友好、开采成本相对较低等优点<sup>[7]</sup>。但是原地浸矿时, 浸矿液体会往往会沿花岗岩底板上发育的渗漏通道向外逃逸<sup>[8]</sup>, 降低稀土矿资源的采收率, 并会对周围土壤造成污染。

研究区地处闽西南拗陷带(见图1), 该区位于政和-大田断裂带以西, 南平-宁化构造岩浆带以

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(91755215); 中国地质调查局地调项目(DD20190033)

收稿日期: 2021-04-22; 修订日期: 2022-04-08

通信作者: 闵刚, 副教授, 博士; 电话: 15928002361; E-mail: mingang2012@cdut.edu.cn

南,处于地幔拗陷带上。区内除上杭-云霄和宁化-安溪北西向断裂带外,断褶变形也主要表现为北东向断裂及北西、南东对冲或背向滑脱的推覆、滑脱构造<sup>[9]</sup>。由此可见,闽西南拗陷带以及周缘构造发育,花岗岩底板可能发育大型的破碎带,浸液存在从深部破碎带逃逸的可能。因此,选择闽西南地区龙岩长汀稀土矿C2勘探区开展方法试验,研究花岗岩底板渗漏通道的空间展布特征,研究成果具有典型性和代表性。

地球物理勘探方法是以地下介质物性差异为基础,通过研究和观测各种地球物理场来探测地下结

构,是一种重要的深部结构调查技术<sup>[10]</sup>。高密度电法勘探是工程环境物探领域应用比较广泛且应用比较早的一种地球物理探测技术,具有相对快捷、精细、准确和无损等特点<sup>[11]</sup>,在重金属污染源扩散通道调查<sup>[12]</sup>、防渗墙检测<sup>[13]</sup>、煤田采空区的调查<sup>[14]</sup>、地下隐蔽水库探测<sup>[15]</sup>、堤坝隐患排查<sup>[16]</sup>、深部隐伏断层调查<sup>[17-18]</sup>等领域都得到了较好的应用效果。测区的破碎带发育于高阻花岗岩基底上,结合国内外实践经验,本文选择高密度电阻率法调查离子型稀土矿区底板破碎带和基底构造的空间展布特征,具有理论依据和实践依据。

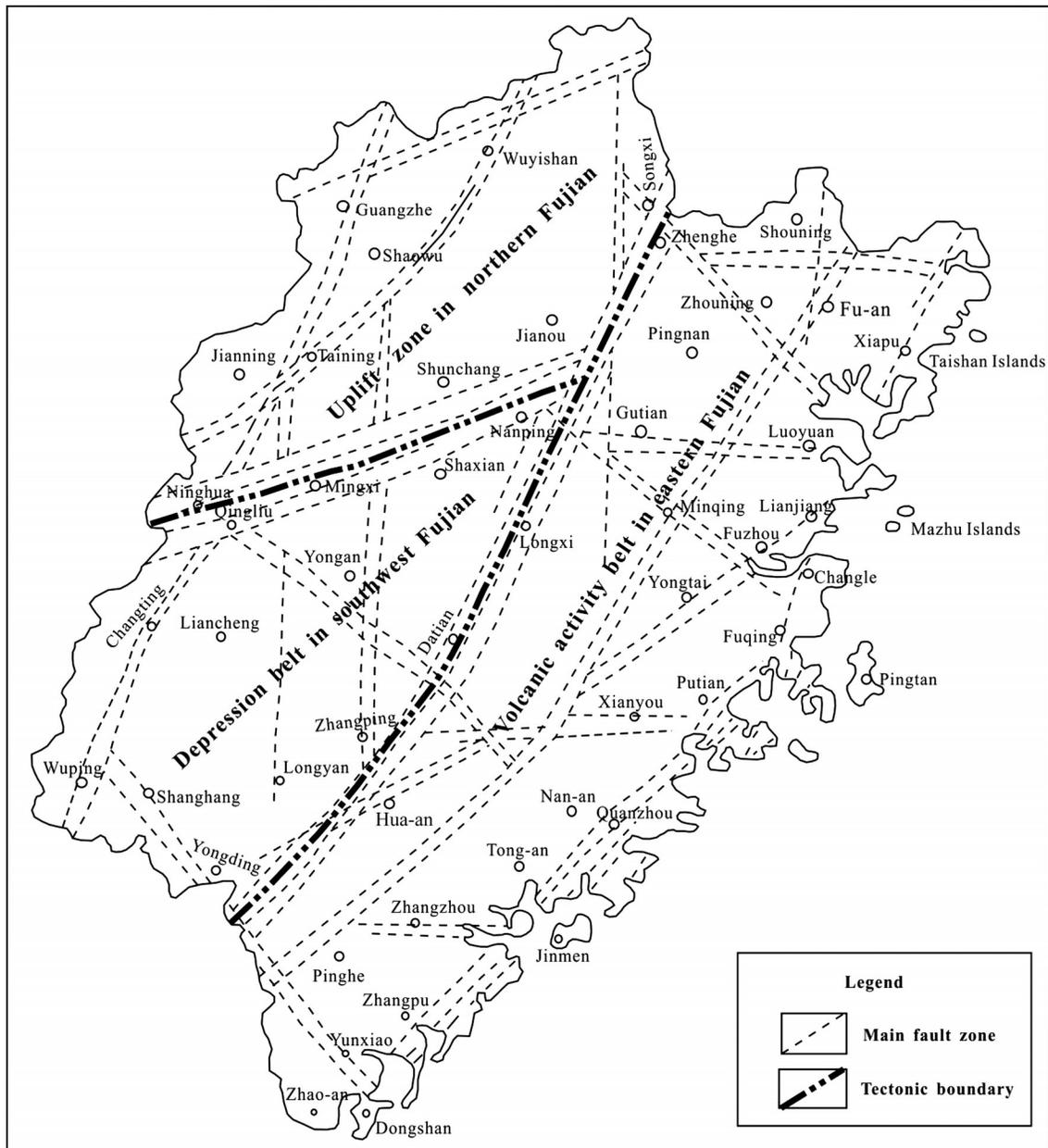


图1 福建省主要断裂带分布图<sup>[9]</sup>

Fig. 1 Distribution map of main fault zones in Fujian Province, China<sup>[9]</sup>

综上所述,本文选择在闽西南龙岩长汀稀土矿C2勘探区开展高密度电阻率法方法实验和资料解释,通过综合研究查明深部渗漏通道的空间展布特征和花岗岩基底的起伏形态,分析总结高密度电阻率法在离子型稀土矿深部结构和渗漏通道调查中的有效参数组合,能够为离子型稀土矿的高效、绿色开采提供技术支持,具有重要的现实意义。

## 1 工区概况与物性特征

### 1.1 工区概况

勘探区位于福建省长汀县河田镇中坊村境内,地表花岗岩风化层较厚,地质构造主要表现为岩体的节理及裂隙;花岗岩基岩在勘探区的南侧水坝沟谷出露;勘探区地层不发育,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)质黏性土,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<sup>[9,19]</sup>。

闽西南花岗岩的风化程度较深,有利于形成富含高岭土的风化壳,稀土离子便于次生富集,是找矿的有利地区。另外,现有研究表明,该区的离子型稀土矿床主要有蚀变标志、构造标志及地貌标志等三个找矿标志。蚀变标志主要表现为成矿母岩具有自变质现象;构造标志主要表现为主要断裂控制矿带,次级断裂控制矿区,低级断裂和密集的裂隙控制矿床;地貌标志主要表现为山势平缓的低山丘陵区<sup>[20]</sup>。虽然断裂是主要的找矿标志之一,但在断裂的作用下,深部花岗岩基底存在破碎带的可能性极大,破碎带不仅会降低离子型稀土矿原位地浸采收

率,而且浸矿液体的外溢还会造成环境污染。

### 1.2 物性特征

物性差异是进行地球物理勘探的前提,因此在进行电法勘探之前,首先需要了解研究区各套地层及构造的电性差异<sup>[21]</sup>。经过踏勘及收集地质资料,本区岩性主要为花岗岩、花岗岩风化层及矿山两侧的第四纪沉积,本次勘探目标为花岗岩基底上发育的破碎带。

由岩矿石物性特征可知,风化层及半风化层是离子型稀土矿资源的主要富集地层,其与下赋基岩具有明显的电性差异,风化层由于破碎含水的原因,其电阻率相对于基岩呈现为低阻的电性结构特征。基岩内部发育的裂隙构造与基岩之间也具有明显的电性差异,裂隙内部的填充物及含水都会使其电阻率降低,故而基岩内部的裂隙相对于基岩而言具有低电阻率的特征。因此,从物性(电阻率)角度来看,电法勘探或电磁法勘探能够有效识别风化层与基岩之间的接触过渡带、基岩内部具有一定规模的裂隙构造体系。

## 2 测线布置与数据采集

根据勘探区地质构造特征,在勘探区布置了12条高密度电阻率法勘探测线,实际完成的测线编号为C2-01至C2-12(见图2),有效勘探深度一般为 $AB/4$ <sup>[22]</sup>,测线长600 m,理论上能实现最大勘探深度为150 m,但环境因素会影响实际勘探深度,故而将预期勘探深度定为100 m。为保证足够的分辨率,横向测量点距需要设置为合适的参数(在电极数量固定的情况下,既要考虑勘探深度也要考虑横向分辨率),本次工作选择的勘探仪器共120道,

表1 工区主要岩性及地层电性参数统计表

Table 1 Average formation resistivity of electrical test results

Serial number	Lithology and stratum	Resistivity/( $\Omega \cdot m$ )	Remark
1	Argillaceous loess and clay	50-300	Water content has a great influence on resistivity value
2	Weathered granite	300-600	Water content has a great influence on resistivity value
3	Intact granite	1000-10000	Water content has a great influence on resistivity value
4	Fault fracture zone	20-200	Water content has a great influence on resistivity value

按照 600 m 测线长度和勘探分辨率的需要, 将测量点距(电极距离)设定为 5 m。

数据采集采用 WS-2(温纳-施伦贝尔 2)装置, 供电电压为 226 V 稳定直流电压。由于时处旱季, 地表比较干燥, 为了改善电极接地效果, 每个电极均是打在约 10 cm 小坑中, 并在测量之前, 多次浇水, 保证接地良好。数据采集过程中, 预设电压异常最大值是 6000 mV, 电压异常最小值是 3 mV, 预设电流异常最大值是 3000 mA, 最小电流异常值

2 mA。异常数据低于总数据的 1%。

数据采集所用仪器为重庆地质仪器厂生产的 DUK-2A 型高密度激电仪, 设置剖面层数为 45 层, 温纳-施伦贝尔 2 装置电极按照 AMNB 排列(AB 为供电电极, MN 为测量电极), 野外实际测量过程中, AM 和 NB 的间距会随着隔离系数的变化而变化, 测量电极 NM 的距离在第一层为 1 个电极距, 每隔 12 层变化一次, 按 1 个电极距、3 个电极距、5 个电极距、7 个电极距...的方式递增变化, 测量方式见图 3。

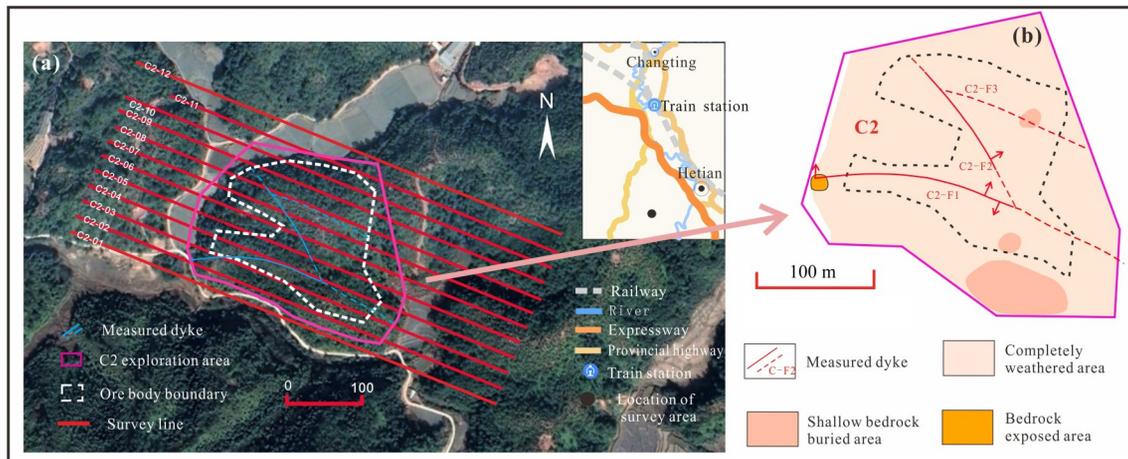


图2 测区构造、地形及实际测线分布图

Fig. 2 Structural geological map, topographic map and distribution of profiles: (a) Topographic map and distribution of profiles; (b) Structural geological map of study area

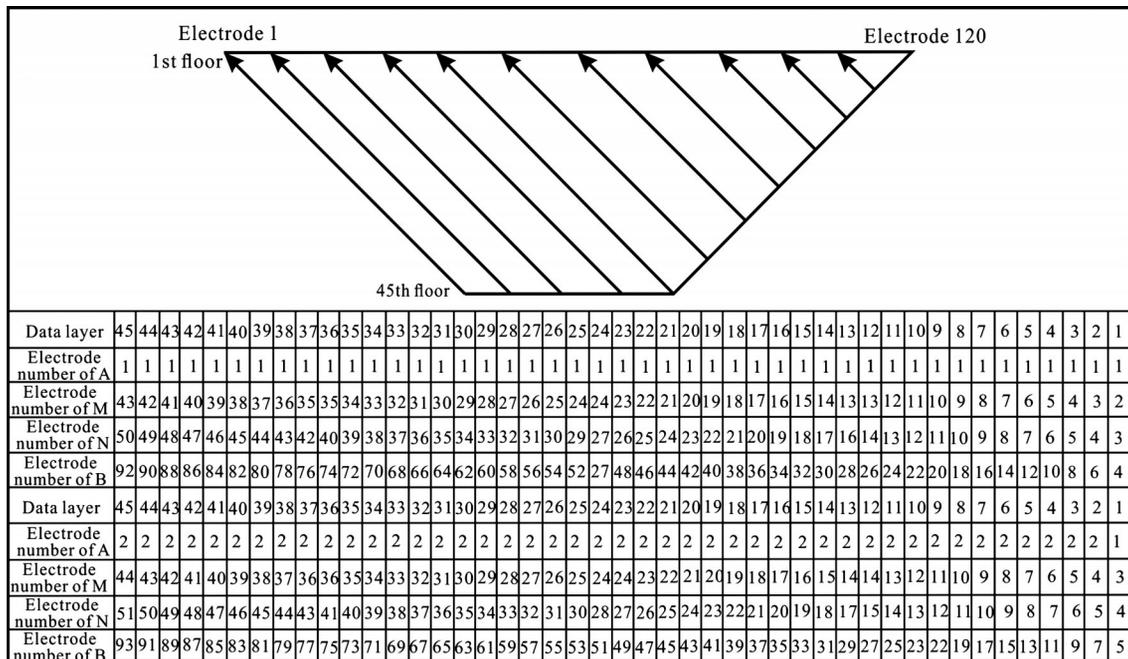


图3 高密度电阻率法 WS-2 装置数据测量方式示意图

Fig. 3 Schematic diagram of data measurement mode of multi-electrode resistivity method with WS-2 device

### 3 数据处理解释与钻井验证

#### 3.1 数据处理与质量评价

数据采集完成后,使用德国DMT公司所研发的Res2dinv软件开展原始数据的预处理和二维反演计算。首先使用该软件对“飞点”数据进行剔除;然后开展2D反演计算,以2019-C2线为例,反演的初始阻尼系数为0.16,随着深度的增加,阻尼系数增大为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1~30000  $\Omega\cdot\text{m}$ 之间。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小于8%。图4所示由上至下分别为:原始观测数据等值线断面图、理论模型(以二维反演结果建立的电阻率模型)的正演视电阻率等值线断面图以及反演结果等值线断面图。

由图4可以看出,原始数据与理论模型(以二维反演结果建立的电阻率模型)的正演响应变化特征基本一致,说明反演结果真实可靠;拟合误差也比较小,为7.6%,进一步说明了反演结果的可靠性。所以,二维反演结果可以用于开展地质地球物理综

合解释。因为本次勘探区完成的测线较多,我们选取其中一条的解释结果进行详细说明。

#### 3.2 二维反演结果解释与钻井验证

C2-02测线走向为北西西-南东东,总长600 m,穿越勘探区及两侧的延伸区域,位于勘探区西南侧斜坡地形上,沿测线方向的地形起伏主要位于C2勘探区南东方向的边界处。结合研究区地貌及地质构造特征,完成了该剖面的分析解释。如图5所示。

如图5所示,横向里程0~160 m地段,视电阻率整体偏低;这是由于该地段位于一个冲沟内,区内发育规模较小的溪流,覆盖层较厚,再加上因为勘探深度有限,受到高阻基岩的影响较小。横向里程160~460 m地段位于C2勘探区的核心位置,电阻率纵向上呈现为明显的分层性,浅地表发育厚度较薄的高阻地层,厚度大概在1~5 m之间;这是由于勘探时刚好处于旱季,该区长期缺乏降水,风化层干燥的原因;中间低阻层为含水风化层和半风化层的综合响应,加上浅地表高阻风化层后,花岗岩风化层与半风化层的厚度最大可达30 m;最底下发

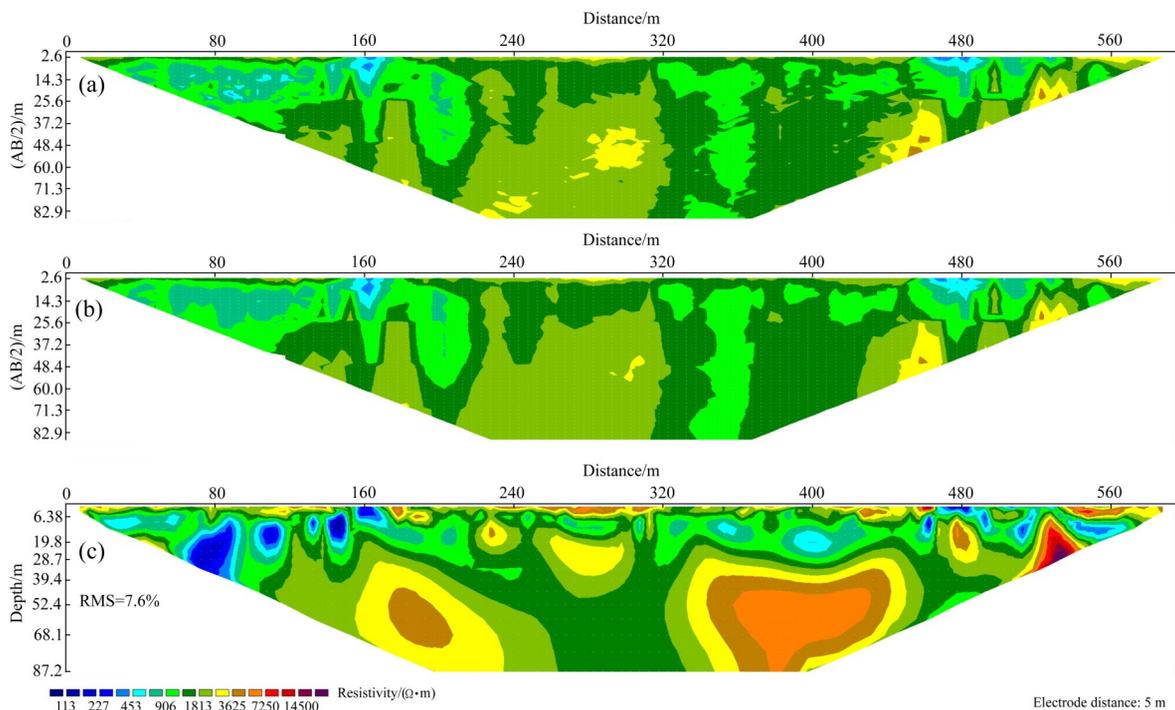


图4 测线C2-02的原始数据、理论响应及反演结果等值线断面图

Fig. 4 Contour section map of original data, theoretical response and inversion results of survey line C2-02: (a) Apparent resistivity of measured values; (b) Apparent resistivity of calculated values from 2D theoretical response; (c) Resistivity of 2D inversion values

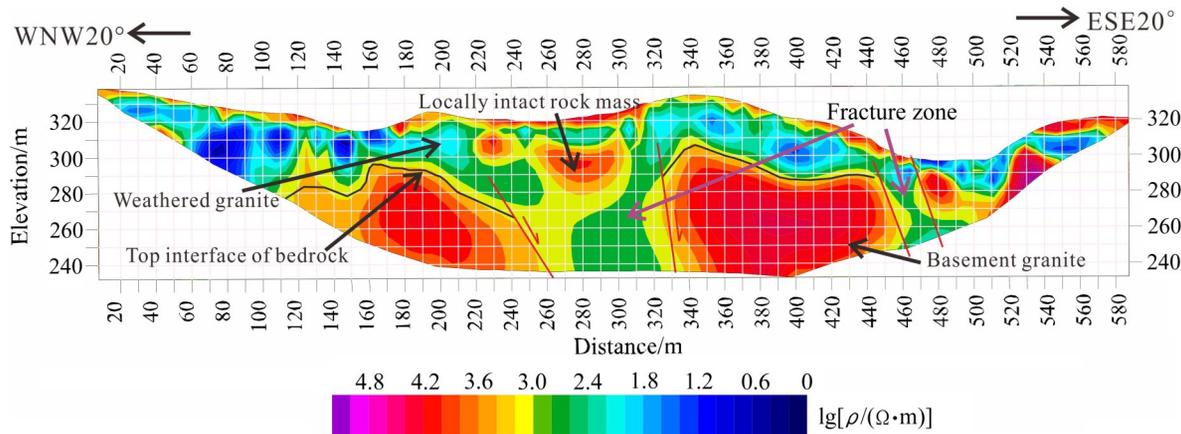


图5 测线C2-02的高密度电阻率法勘探反演结果等值线断面图及解释结果

Fig. 5 Contour map of inversion results of multi-electrode resistivity survey and its interpretation of survey line C2-02

育高阻地层，在里程260 m和里程310 m左右被纵向低阻条带分割，推测低阻条带异常为断层破碎带。在横向里程460~470 m之间也发育一切穿深部高阻的低阻带，推测其为风化层和含水破碎带的综合响应。在横向里程470~580 m之间，纵向上也呈现为三层电性结构特征，其解释与160~460 m段的三层结构类似。

根据C2-02测线的解释思路，完成了12条高密度电阻率法测线反演结果的综合解释。图6所示为12条高密度电阻率法测线解释结果与钻井验证的综合展示。由图6可知，深部电性结构总体上呈现为高阻-低阻-高阻的变化特征，浅地表高阻层为花岗岩风化层，其呈现为高阻的原因是勘探区长期干旱，严重缺水；中间低阻层为花岗岩风化层，风化层孔隙发育，含有一定的水分；深部高阻层解释为花岗岩基底，孔隙不发育，含水性较差；基底构造横向呈现为分块性的特征，自北西西至南东东，依次呈现为高阻-低阻-高阻异常特征，中间低阻异常推测为断层破碎带所致。图6显示每条测线的中部都存在切穿深部高阻的低阻异常带，故推测在研究区存在贯穿测区的渗漏通道(低阻破碎带)。

根据高密度电阻率法的反演结果，结合研究区的构造背景及稀土矿开采的实际需求，布置了相应的验证钻井，钻探结果如图6所示；钻孔C2-04-300靠近破碎带边缘且偏向破碎带一侧，落实破碎带的边界位置以及C2-04测线深部55 m左右发育的相对高阻异常；钻孔C2-04-380位于完整基岩上

方，落实覆盖层的厚度与基岩的完整性；钻孔C2-05-245靠近破碎带边缘且偏向基岩一侧，落实破碎带的边界位置；钻孔C2-06-275位于破碎带正上方，落实破碎带的解释是否正确；C2-07测线横向里程380 m处基岩高阻呈现为明显的上隆特；钻孔C2-07-380落实基岩是否埋深较浅；C2-09测线横向里程270 m左右深部低阻异常呈现为明显的下凹特征，覆盖层较厚；钻孔C2-09-270落实基岩深埋区的覆盖层厚度。

从勘探区C2-06线的钻探成果可以看出，当钻井深度为42~47 m时，遇到了严重破碎的花岗岩基底，较好地验证了物探勘探成果，说明高密度电阻率法能够较好地识别深部基岩上发育的破碎带，为确定深部渗漏通道提供支持，为稀土矿的高效开采提供了重要的参考资料。

#### 4 三维显示与三维建模

为了便于分析C2勘探区深部电性结构的展布特征，查明深部渗漏通道(破碎带)的空间展布特征以及花岗岩风化层厚度的展布特征，本文使用VOXLER软件完成了12条测线反演电阻率数据的导入与三维透明显示，如图7所示。另外，也使用GOCAD软件完成了多切面反演电阻率展示和部分地质解译立体展示，如图8所示。

从图7可以看出，浅部蓝色低阻异常是花岗岩风化层的综合响应，在蓝色低阻异常上不均匀分布

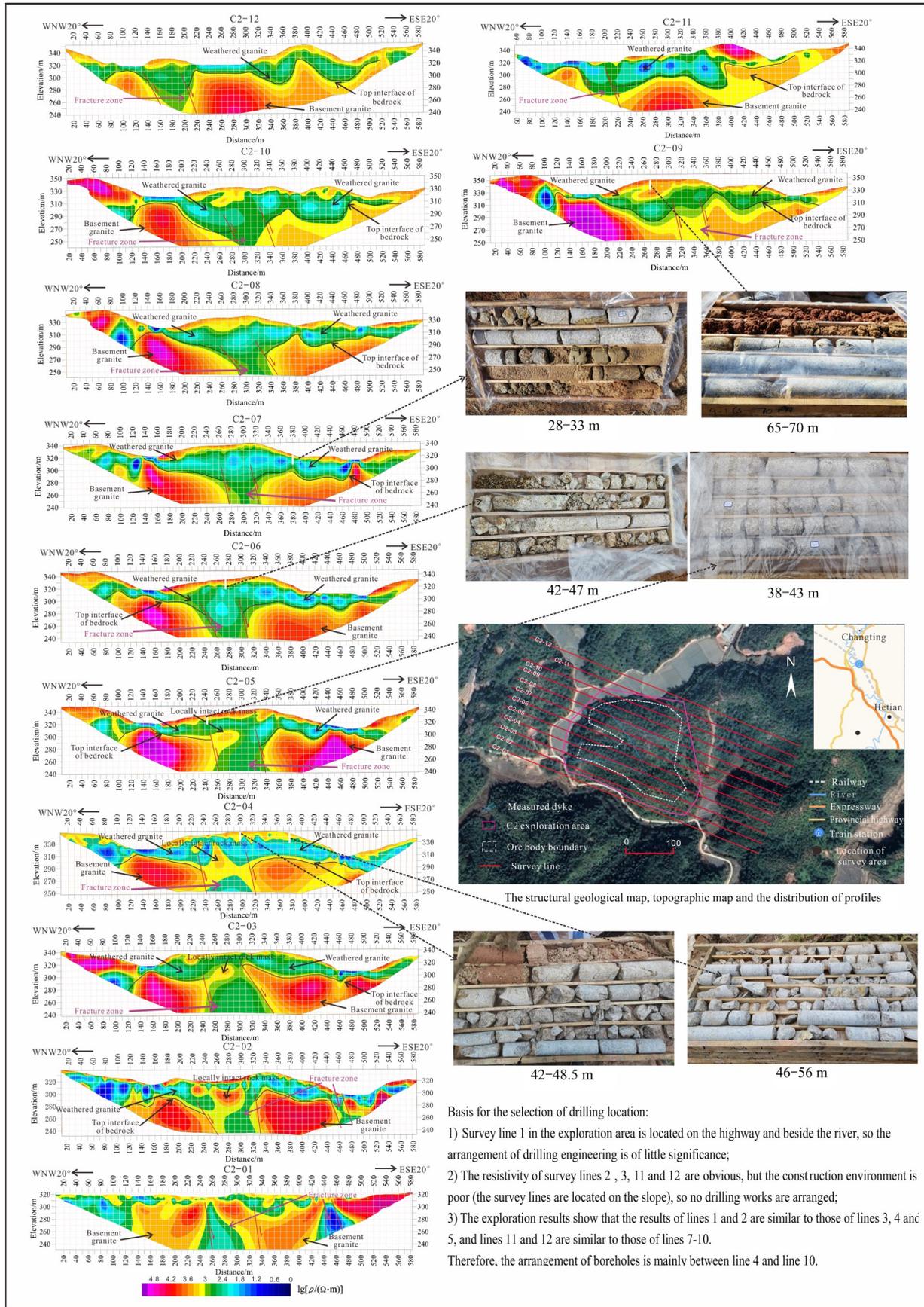


图 6 高密度电阻率法勘探解释成果及钻井验证对比

Fig. 6 Comparison results between multi-electrode resistivity survey and drilling verification

Basis for the selection of drilling location:

- 1) Survey line 1 in the exploration area is located on the highway and beside the river, so the arrangement of drilling engineering is of little significance;
- 2) The resistivity of survey lines 2, 3, 11 and 12 are obvious, but the construction environment is poor (the survey lines are located on the slope), so no drilling works are arranged;
- 3) The exploration results show that the results of lines 1 and 2 are similar to those of lines 3, 4 and 5, and lines 11 and 12 are similar to those of lines 7-10.

Therefore, the arrangement of boreholes is mainly between line 4 and line 10.

红色异常, 这些红色高阻异常是由于测量期间恰逢旱季, 浅地表缺水所致; 深部红色高阻异常是完整花岗岩基底的综合响应; 浅部蓝色低阻异常往深部延伸主要出现在左上角和正面中间位置(用黄色虚线圈出的地方)。本文前面介绍过, 研究区的地质较为简单, 浅部发育花岗岩风化层, 深部发育花岗岩基底<sup>[9]</sup>, 黄色虚线圈闭的低阻异常就可以推断为是由于花岗岩基底破碎富水的原因所致, 也就是花岗岩基底上发育的渗漏通道(破碎带), 图7中表面

的带箭头虚线则展示了破碎带在地表的延伸趋势。

从图8(a)和(b)可以看出, 研究区的地质电阻率总体呈现为层状结构特征, 第一层为不均匀分布的相对高阻异常, 这是由于旱季缺少降雨, 风化层储水性较差, 导致浅地表相对电阻率变高; 浅地表相对高阻之下发育明显的低阻异常, 可以解释为湿度相对较大的花岗岩风化层; 在深部高阻花岗岩基底上, 发育纵向贯穿高阻异常的低阻带, 推测为渗漏通道(破碎带)的综合响应。图8(a)和(b)较好地刻画出了风化层的厚度以及渗漏通道的空间展布特征,

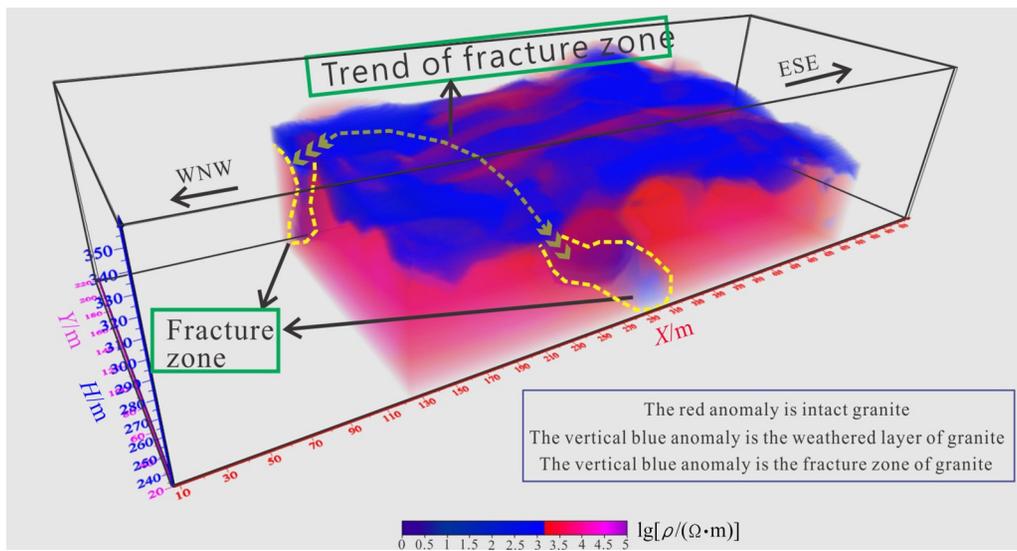


图7 高密度电阻率法勘探解释结果的三维透明化显示

Fig. 7 Three dimensional transparent display of multi-electrode resistivity survey results (Without data triangle areas on both sides)

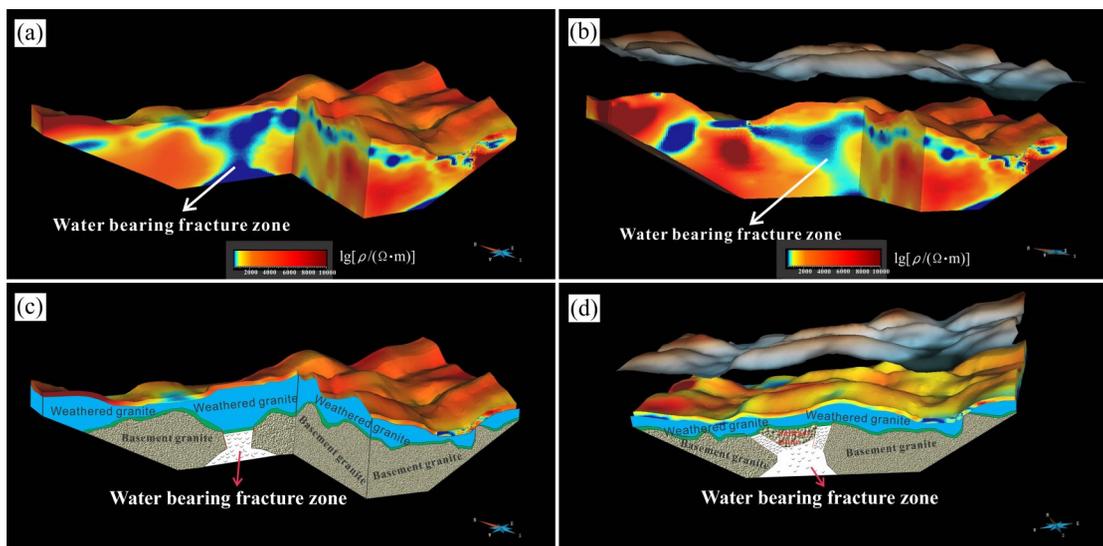


图8 三维数据体多切面展示与部分地质解译立体展示

Fig. 8 Multi section display ((a), (c)) of 3D data volume and stereoscopic display ((b), (d)) of partial geological interpretation: (a), (b) Resistivity contour display results of different sections; (c), (d) 3D geological modeling results of different sections

其地质地球物理综合解释结果见图8(c)和(d)。

从三维透明显示结果和三维多切面显示结果来看,三维显示相对于二维显示具有很多灵活性,后期可以根据解译者的需求,使用专业软件在电脑上分析任何角度的电性结构特征,分析渗漏通道的空间展布特征,便于防渗工程的实施与评价。

## 5 结论

1) 花岗岩风化层和半风化层裂隙较发育,在含水的条件下,呈现为低阻特征;花岗岩基底因为裂隙不发育,呈现为高阻异常特征;花岗岩基底上发育的裂隙构造或断层破碎带中,会填充沉积物或风化层介质,在含水的条件下呈现为低阻异常特征。从物性差异的角度来分析,利用高密度电阻率法探测深部渗漏通道是可行的。

2) 本次高密度电阻率法勘探共计采集了12条测线的数据,每条测线的长度为600 m,按照理论公式,能够保证C2勘探区大于80 m的勘探深度;使用的供电电压稳定在226 V,实践证明供电电压基本能够保证每个测量数据的电位差大于3 mV,供电电流大于2 mA,采集数据稳定可靠。

3) 勘探结果较好地揭示了风化层的厚度、局部风化残留物的位置以及基岩破碎带的分布位置,这些解释结果得到了钻井验证。研究成果说明高密度电阻率法对离子型稀土矿区底板花岗岩上发育的破碎带有较好的勘探效果,在离子型稀土矿区深部渗漏通道调查中,是一种效率高、效果好的地球物理勘探方法。

4) 因为地球物理方法勘探的分辨率问题,建议在矿山防渗工程完成后,选取测线做小极距二维高密度电阻率法测量,检测防渗效果是否达到设计要求。为降低单一方法的多解性问题,在施工经费允许的情况下,建议使用其他物探方法与高密度电阻率法联合勘探,以确定地下构造情况。

## REFERENCES

[1] 李刚,朱志成,梁健,等.某稀土矿原地浸矿工业试验研究[J].世界有色金属,2019,(21):268-270.

LI Gang, ZHU Zhi-cheng, LIANG Jian, et al. Industrial experimental study on in-situ leaching of a rare earth ore[J]. *World Nonferrous Metals*, 2019(21): 268-270.

[2] 王锦荣,张哲坤,凌明星,等.南岭早侏罗世稀有金属成矿作用研究:以闽西南大坪花岗斑岩为例[J].岩石学报,2020,36(1):125-140.

WANG Jin-rong, ZHANG Zhe-kun, LING Ming-xing, et al. Early Jurassic rare metals mineralization in Nanling Region: A case of Daping granite porphyry in Southwest Fujian[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2020, 36(1): 125-140.

[3] 赵芝,王登红,陈郑辉,等.南岭离子吸附型稀土矿床成矿规律研究新进展[J].地质学报,2017,91(12):2814-2827.

ZHAO Zhi, WANG Deng-hong, CHEN Zheng-hui, et al. Progress of research on metallogenic regularity of ion-adsorption type REE deposit in the Nanling range[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2017, 91(12): 2814-2827.

[4] 郭钟群,赵奎,金解放,等.离子型稀土矿原地浸矿过程溶质运移机制研究[J].中国稀土学报,2019,37(1):121-128.

GUO Zhong-qun, ZHAO Kui, JIN Jie-fang, et al. Solute transport mechanism of ion-adsorption type rare earth in-situ leaching mining[J]. *Journal of the Chinese Society of Rare Earths*, 2019, 37(1): 121-128.

[5] 刘琦,周芳,冯健,等.我国稀土资源现状及选矿技术进展[J].矿产保护与利用,2019,39(5):76-83.

LIU Qi, ZHOU Fang, FENG Jian, et al. Review on rare earth resources and its mineral processing technology in China[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2019, 39(5): 76-83.

[6] 高国华,颜鋆,赖安邦,等.离子吸附型稀土矿抗坏血酸强化-还原浸取过程[J].中国有色金属学报,2019,29(6):1289-1297.

GAO Guo-hua, YAN Yun, LAI An-bang, et al. Intensification-reduction leaching process of ion-adsorption type rare earths ore with ascorbic acid[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2019, 29(6): 1289-1297.

[7] 尹升华,齐炎,谢芳芳,等.不同孔隙结构下风化壳淋积型稀土的渗透特性[J].中国有色金属学报,2018,28(5):1043-1049.

YIN Sheng-hua, QI Yan, XIE Fang-fang, et al. Permeability characteristic of weathered crust elution-deposited rare earth ores under different pore structures[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2018, 28(5): 1043-1049.

[8] 王炯辉,张喜,陈道贵,等.南方离子型稀土矿开采对地下水的影响及其监控[J].科技导报,2015,33(18):23-27.

WANG Jiong-hui, ZHANG Xi, CHEN Dao-gui, et al.

- Influence of during south ion-absorbed-type rare earth deposit mining on groundwater and it's monitoring[J]. *Science & Technology Review*, 2015, 33(18): 23-27.
- [9] 韦德光, 揭育金, 黄廷淦. 福建省区域地质构造特征[J]. *中国区域地质*, 1997, 16(2): 162-170.  
WEI De-guang, JIE Yu-jin, HUANG Ting-gan. Regional geological structure of Fujian[J]. *Regional Geology of China*, 1997, 16(2): 162-170.
- [10] 薛国强, 底青云, 程久龙. 资源与环境地球物理的前沿问题综述[J]. *地球物理学进展*, 2017, 32(4): 1838-1841.  
XUE Guo-qiang, DI Qing-yun, CHENG Jiu-long. Review the forefront problem of resources and environmental geophysics[J]. *Progress in Geophysics*, 2017, 32(4): 1838-1841.
- [11] 雷宛, 邓一歆, 肖宏跃. 工程与环境物探[M]. 北京: 地质出版社, 2007.  
LEI Wan, DENG Yi-qian, XIAO Hong-yue. Engineering and environmental geophysical exploration[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2007.
- [12] BENYASSINE E M, LACHHAB A, DEKAYIR A, et al. An application of electrical resistivity tomography to investigate heavy metals pathways[J]. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 2018, 22(4): 315-324.
- [13] 郭成超, 杨建超, 石明生, 等. 高密度电法在高聚合物防渗墙检测中的应用研究[J]. *地球物理学进展*, 2019, 34(2): 709-716.  
GUO Cheng-chao, YANG Jian-chao, SHI Ming-sheng, et al. Application of high density electrical method in detection of polymer cutoff wall[J]. *Progress in Geophysics*, 2019, 34(2): 709-716.
- [14] 李树军, 张国, 张旭东, 等. 分布式高密度电法在浅埋采空区调查中的应用[J]. *工程地球物理学报*, 2017, 14(2): 231-237.  
LI Shu-jun, ZHANG Guo, ZHANG Xu-dong, et al. The application of the distributed high density resistivity method to the survey of the shallow buried mined-out area[J]. *Chinese Journal of Engineering Geophysics*, 2017, 14(2): 231-237.
- [15] 陈军, 杨川, 陈泽元. 地下隐蔽水库的高密度电法探测研究[J]. *地球物理学进展*, 2015, 30(2): 934-939.  
CHEN Jun, YANG Chuan, CHEN Zhe-yuan. Study on high density resistivity method of underground reservoir[J]. *Progress in Geophysics*, 2015, 30(2): 934-939.
- [16] 李宏恩, 徐海峰, 李铮, 等. 地面核磁共振法与高密度电法联合探测堤坝渗漏隐患原位试验研究[J]. *地球物理学进展*, 2019, 34(4): 1627-1634.  
LI Hong-en, XU Hai-feng, LI Zheng, et al. In situ experimental study on resistivity-magnetic resonance sounding coupling imaging diagnosis method for an embankment dam with seepage defects[J]. *Progress in Geophysics*, 2019, 34(4): 1627-1634.
- [17] 王志鹏, 刘江平, 易磊. 2D、3D高密度电法探测断层效果及其应用[J]. *科学技术与工程*, 2019, 19(25): 75-82.  
WANG Zhi-peng, LIU Jiang-ping, YI Lei. Effect and application of 2D and 3D high density resistivity method for fault detection[J]. *Science Technology and Engineering*, 2019, 19(25): 75-82.
- [18] WANG Zhi-hui, CAI Xiang-min, YAN Jia-yong, et al. Using the integrated geophysical methods detecting active faults: A case study in Beijing, China[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2018, 156: 82-91.
- [19] 张颐, 丘文, 王文亮. 福建龙岩万安稀土矿床地质特征及成因探讨[J]. *福建地质*, 2014, 33(3): 185-191.  
ZHANG Yi, QIU Wen, WANG Wen-liang. On the geologic characteristics and genesis of the Wan'an REE deposit in Longyan City, Fujian Province[J]. *Geology of Fujian*, 2014, 33(3): 185-191.
- [20] 何耀, 程柳, 李毅, 等. 离子吸附型稀土矿的成矿机理及找矿标志[J]. *稀土*, 2015, 36(4): 98-103.  
HE Yao, CHENG Liu, LI Yi, et al. The mineralization mechanism of the ion adsorption type rare earths ore and prospecting marks[J]. *Chinese Rare Earths*, 2015, 36(4): 98-103.
- [21] 李颜贵, 刘子龙, 罗水余. 三维高密度电法用于工程勘察的试验[J]. *煤田地质与勘探*, 2009, 37(6): 71-73.  
LI Yan-gui, LIU Zhi-long, LUO Shui-yu. Application of three dimensional high-density resistivity method in engineering investigation[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2009, 37(6): 71-73.
- [22] 张振勇. 三维高密度电法在积水采空区探测中的应用[J]. *矿业安全与环保*, 2015, 42(1): 76-79.  
ZHANG Zhen-yong. Application of 3D high-density electrical method in detection of water-accumulated gob[J]. *Mining Safety & Environmental Protection*, 2015, 42(1): 76-79.

## Exploration test of 3D deep structure and floor fracture zone in ion type rare earth ore district

MIN Gang<sup>1</sup>, SHU Rong-bo<sup>2</sup>, LIU Kang<sup>1</sup>, CHENG Rong<sup>2</sup>, CHEN Shu<sup>1</sup>, YUAN Hui-ling<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Earth Exploration and Information Technology of Ministry of Education, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;

2. Institute of Multipurpose Utilization of Mineral Resources, Chengdu 610041, China)

**Abstract:** For the mining of ion type rare earth (ITRE) by in-situ leaching, the fracture structure, underground river and karst cave developed beneath the ore body, will become leakage pathways for the leaching liquors to escape and seriously reduce the recovery rate of ITRE. In addition, the leach liquor along leakage pathways will also cause environmental pollution. Therefore, it is of great significance to study the deep structures and identify the leakage pathways. Aiming the stratigraphic and structural characteristics of the C2 exploration area of Changting rare earth mine in Longyan, Fujian province, China, twelve exploration sections for completing data acquisition of the multi-electrode resistivity method measurement were designed in this study, the deep electrical structure model of the study area was obtained by inversion calculation. The results show that the exploration sections delineate the thickness of the granite weathering layer and the spatial distribution characteristics of deep fault structures well, and the interpretation results are consistent with the drilling results laid out in the study area. The exploration results provide important reference for the reserve evaluation of ion type rare earth ore, the sealing of leakage pathways and the layout of recovery pathways.

**Key words:** ion type rare earth ore; multi-electrode resistivity method; resistivity structure; leakage pathways

**Foundation item:** Project(91755215) supported by the National Natural Science Foundation of China; Project (DD20190033) supported by the China Geological Survey

**Received date:** 2021-04-22; **Accepted date:** 2022-04-08

**Corresponding author:** MIN Gang; Tel: +86-15928002361; E-mail: mingang2012@cdut.edu.cn

(编辑 何学锋)