



## 断裂构造中电阻率与声波波速特征分析及其在探测过程中的联合运用

高 健, 潘剑伟, 詹 林, 钱 伦, 杨 晨, 张成丽

**Analysis of electrical resistivity and acoustic wave velocity characteristics in fault structures and their combined application in the detection process**

GAO Jian, PAN Jianwei, ZHAN Lin, QIAN Lun, YANG Chen, and ZHANG Chengli

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202306046>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

##### 隐伏岩溶区地下空间探测技术方法研究——以武汉市为例

Techniques for detecting underground space in hidden karst region: Taking Wuhan as an example

何军, 刘磊, 黎清华, 刘道涵, 陈标典, 张傲, 赵永波 水文地质工程地质. 2020, 47(6): 47–56

##### 利用电导率测井与压水试验联合评价岩体渗透性的方法

Method of evaluating the permeability of rock mass by the combination of packer test and flowing fluid electrical conductivity log

张必昌, 胡成, 陈刚, 张, 段丹丹 水文地质工程地质. 2019, 46(3): 62–62

##### 不同勘探方法在丰水期和枯水期岩溶塌陷探测效果分析研究

Studies on effect analysis of different exploration methods for karst collapse detection in the periods of rainy and dry seasons

金爱芳, 刘磊, 殷秀兰 水文地质工程地质. 2022, 49(6): 171–178

##### 大武水源地断裂带关键水动力参数确定及污染防治对策

Determination of the key hydrodynamic parameters of the fault zone using colloidal borescope in the Dawu well field and strategies for contamination prevention and control

包锡麟, 费宇红, 李亚松, 曹胜伟 水文地质工程地质. 2020, 47(5): 56–63

##### 西藏波密冰川覆盖区大型河流与断裂带地下水转化关系

Transformation characteristics of the large-flow river and groundwater in the fault zone in the glacier-covered area of Bomi in Tibet

马剑飞, 李向全, 张春潮, 付昌昌, 白占学, 王振兴 水文地质工程地质. 2021, 48(5): 23–33

##### 青藏高原巴塘断裂带地震滑坡危险性预测研究

Predicting seismic landslide hazard in the Batang fault zone of the Qinghai-Tibet Plateau

杨志华, 郭长宝, 吴瑞安, 钟宁, 任三绍 水文地质工程地质. 2021, 48(5): 91–101



关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: [10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202306046](https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202306046)

高健, 潘剑伟, 詹林, 等. 断裂构造中电阻率与声波波速特征分析及其在探测过程中的联合运用 [J]. 水文地质工程地质, 2024, 51(2): 113-122.

GAO Jian, PAN Jianwei, ZHAN Lin, et al. Analysis of electrical resistivity and acoustic wave velocity characteristics in fault structures and their combined application in the detection process[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2024, 51(2): 113-122.

## 断裂构造中电阻率与声波波速特征分析及其在探测 过程中的联合运用

高 健<sup>1</sup>, 潘剑伟<sup>1,2</sup>, 詹 林<sup>1</sup>, 钱 伦<sup>1</sup>, 杨 晨<sup>1</sup>, 张成丽<sup>1</sup>

(1. 贵州大学资源与环境工程学院, 贵州 贵阳 550025; 2. 喀斯特地质资源与环境教育部  
重点实验室, 贵州 贵阳 550025)

**摘要:** 查明断裂构造的具体位置对于工程场址的选择和稳定性评价具有重要意义。高密度电阻率法和声波测井是广泛运用于探测断裂构造的地球物理方法。高密度电阻率法具有对低阻体敏感且探测范围较大的特点, 但高密度电阻率法的分辨率有限, 难以准确圈定地质体的边界位置; 声波测井具有准确识别地层的特点, 但其横向探测范围非常有限。为了克服上述问题, 结合 2 种方法在断裂构造探测中各自的优势以提高圈定地质体的精度, 文章首先通过物性试验证明岩石破裂前后电阻率与声波波速变化的相关性, 随后用一实例分析断裂构造的电阻率与声波波速特征以及两者在探测过程中的联合运用, 最后借助声波测井数据对高密度电阻率法反演结果进行深度校正, 得到断裂构造在地下空间的三维分布位置。结果表明: 岩石破裂后的电阻率与声波波速较未破裂前均偏低; 断裂构造的破碎带在高密度电阻率法反演剖面上以低阻异常区域存在, 在声波波速曲线上破碎带区域的波速值会有明显的骤降, 2 种方法的组合探测模式可为断裂构造具体位置的圈定提供更好的指导。钻探结果验证了借助声波测井数据校正后的高密度电阻率法反演结果比未校正之前更加符合实际地质情况。

**关键词:** 断裂构造; 深度校正; 物性参数; 高密度电阻率法; 声波测井

中图分类号: P642.27

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2024)02-0113-10

## Analysis of electrical resistivity and acoustic wave velocity characteristics in fault structures and their combined application in the detection process

GAO Jian<sup>1</sup>, PAN Jianwei<sup>1,2</sup>, ZHAN Lin<sup>1</sup>, QIAN Lun<sup>1</sup>, YANG Chen<sup>1</sup>, ZHANG Chengli<sup>1</sup>

(1. College of Resources and Environmental Engineering, Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550025,  
China; 2. Key Laboratory of Karst Georesources and Environment, Ministry of Education,  
Guizhou, China 550025, China)

**Abstract:** Finding out the specific location of the fault structure is of great significance for the engineering site selection and stability evaluation. Electrical resistivity tomography and acoustic logging are geophysical methods

收稿日期: 2023-06-27; 修订日期: 2023-08-16

投稿网址: [www.swdzgcdz.com](http://www.swdzgcdz.com)

基金项目: 贵州省科技计划项目([2020]1Y173); 国家自然科学基金青年基金项目(42004122)

第一作者: 高健(1998—), 男, 硕士研究生, 主要从事电磁法勘探研究。E-mail: [2636486606@qq.com](mailto:2636486606@qq.com)

通讯作者: 潘剑伟(1988—), 男, 博士, 副教授, 主要从事电磁法勘探方面的教学和科研工作。E-mail: [pjw1988@126.com](mailto:pjw1988@126.com)

widely used in detecting fracture structures. Although electrical resistivity tomography is sensitive to low resistance bodies and has a large detection range, it is difficult to accurately delineate the boundary position of geological bodies because of its limited resolution. Acoustic logging can identify strata accurately, but its lateral detection range is limited. This study combined the advantages of the two methods in fault structure detection to improve the precision of geological body delineation. Firstly, the correlation between the resistivity of rock before and after fracture and the change of acoustic wave velocity was proved by physical property experiments. Then the case analysis of the resistivity and acoustic wave velocity characteristics of the fault structure and their combined application in the detection process was conducted. Finally, the depth correction of the inversion result of the electrical resistivity tomography was carried out using the acoustic logging data; and the three-dimensional distribution position of the fault structure in the underground space was obtained. The results show that the resistivity and acoustic wave velocity of the rock after fracture are lower than those before fracture. The fracture zone of the fault structure exists in the inversion section of the electrical resistivity tomography with a low resistivity anomaly region. On the wave velocity curve, the wave velocity value in the fracture zone decreases significantly. The combined detection mode of the two methods could provide a guidance for the delineation of the specific location of the fracture structure. The drilling results also verified that the inversion results of the electrical resistivity tomography corrected by acoustic logging data are more consistent with the actual geological conditions than those without correction.

**Keywords:** fault gouge zone; depth correction; physical parameters; electrical resistivity tomography; acoustic logging

断层破碎带是断层生成过程中的伴随产物,其规模的大小和岩体破坏程度与受到的断裂活动强度密切相关<sup>[1-2]</sup>。断裂构造的位置和岩体性质是场址稳定性评估的重要研究内容<sup>[3-4]</sup>。因此,查明断裂构造的具体位置以及断面内岩体破碎带的物理性质对场址的选择有重要指导意义<sup>[5-7]</sup>。传统地质学方法能有效圈定大尺度的断裂构造范围,但在确定断裂构造的准确位置和断裂构造中介质岩性特征方面存在一定困难<sup>[8-9]</sup>。然而,断裂构造中岩石的导电性、纵波速度等物性参数与周围围岩的差异为地球物理方法探测断裂构造提供了前提条件。

基于断裂构造中的岩体与周围正常岩层间的电性差异,高密度电阻率法(electrical resistivity tomography, ERT)在探测研究浅层断裂构造方面备受学者青睐<sup>[10-11]</sup>。因其对地下含水构造灵敏性高,该方法已被广泛运用于工程地质、水文地质等领域。例如,周越等<sup>[12]</sup>利用ERT查明了滑坡体内部的地质构造以及滑面特征,并基于滑坡体电阻率特征建立了滑坡体地质模型。方艺翔等<sup>[13]</sup>将ERT运用于大坝防渗墙渗漏监测,结果表明ERT圈定的低阻异常区域与工程地质条件揭示的渗漏通道一致。丁超等<sup>[14]</sup>基于泄油窜漏通道赋存油水前后电阻率变化差异,运用ERT成功探

测出泄油的窜漏通道。但是,ERT方法也有一定的局限性,得到的电阻率反映的是地下介质的综合情况<sup>[15]</sup>。ERT与多数的地球物理方法一样,反演结果具有多解性,并不能确定电阻率异常体一定是由某种地质构造引起的,且由于供电极距增大,根据ERT反演结果难以准确圈定地质体的边界位置。

声波测井是基于岩石弹性差异发展起来的地球物理测井方法,是在原位状态下无扰动获取地层物性参数最直接的手段<sup>[16]</sup>。该方法能够对井壁进行小极距的声波波速测试,分辨率高,能对不同岩性的地层进行划分。由于断层破碎带与正常围岩具有明显波速差异,所以声波测井可以用于划分破碎带界面。声波测井成为工程地质领域常用的地球物理测井方法之一。例如,胡刚等<sup>[17]</sup>利用声波测井揭示了安宁河断裂带断层东、西两盘的纵波速度,为研究安宁河断裂带的物质组成、介质物性提供了基础资料。王新杰等<sup>[18]</sup>利用声波测井建立了广东省某地下油库库址全区纵波速度场的分布特征,为该油库库址的稳定性评价提供了基础的物性参数资料。但是,测井工作的前提条件是必须先打钻孔才能进行物性测试,而打钻孔耗时长;探测横向范围十分有限,测井结果仅能代表井径范围内的地层结果。

通过地面结合井间的综合地球物理方法研究断裂构造的具体位置, 提高反演结果解译精度是地球物理探测的一个发展趋势。朱飞飞<sup>[19]</sup>将地井联合的物探方法运用于岩溶注浆效果的检测, 其研究结果表明 ERT 联合地震 CT 的检测方式能够快速、高效的检测注浆加固效果。易强等<sup>[20]</sup>利用 ERT 数据结合钻孔波速测试对湖南某土洞的发育规模进行探测, 结果表明这 2 种方法能够有效圈定出土洞的空间位置以及分布范围。陈清<sup>[21]</sup>将地井联合的物探方法运用于岩溶探测, 先利用 ERT 初步确定可能存在岩溶异常的区域, 再利用跨孔电磁波 CT 进行精细探测, 结果证明 2 种方法组合探测岩溶是可行和有效的。前人研究结果表明地井物探方法组合模式能够有效提高探测结果的准确性。

因此, 根据 ERT 与声波测井在探测断裂构造中探测范围和分辨率上互补的优势, 本文尝试通过 ERT 确定测线长度内是否存在电阻率异常区域, 为声波测井提供孔位指导; 通过声波测井精确划分不同地层岩性的埋深和范围, 同时为 ERT 反演结果纵向深度的校正提供数据支撑, 通过 2 种方法的联合使用提高断裂构造探测的准确性。本文先从物性试验出发, 证明岩石破裂前后电阻率与声波波速的相关性, 再通过实例研究如何借助声波测井数据校正 ERT 反演结果, 从而获取断裂构造更为准确的空间分布位置。

## 1 试验原理及方法

### 1.1 高密度电阻率法原理

高密度电阻率法是以地下目标体与围岩之间的导电性差异为物性基础的地球物理方法<sup>[22]</sup>。通过观测和研究人工建立的地下稳定电流场的分布规律研究地质异常体的发育规模和形态分布特征。相比于传统电阻率法而言, 高密度电阻率法具有效率高、信息量丰富的优点。电阻率计算公式为<sup>[23]</sup>:

$$\rho = K \frac{\Delta U}{I} \quad (1)$$

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

式中:  $\rho$ —电阻率值/( $\Omega \cdot m$ );

$\Delta U$ —测量电极  $M$ 、 $N$  之间的实际电位差/mV;

$I$ — $A$ 、 $B$  供电回路的电流/mA;

$K$ —装置系数/ $m$ , 由供电电极  $A$ 、 $B$  和测量电极  $M$ 、 $N$  之间的相互位置决定。

### 1.2 声波测井原理

声波测井是利用地下岩矿石的弹性差异为物性基础的地球物理方法<sup>[24]</sup>。由于不同种类的岩石对声波的传播速度有着不同的响应, 因此可以通过分析声波测试结果推断地下介质的结构特征。该方法在井中的采样间距小, 对地层岩体结构具有较高分辨率, 根据纵波速度值能够划分正常围岩与破碎带的分界面以及评价岩体完整性。一般情况下, 超声波测试采用单发双收的工作方式, 由发射探头通过电-声转换向井内发射高频弹性脉冲波, 2 个接收探头会前后测量记录首波的初至时间形成接收时间差, 2 个接收探头之间的固定距离与接收时间差的比值即为该段岩体的声波波速值, 声波波速计算公式为<sup>[25]</sup>:

$$V_p = \frac{L}{\Delta t} \quad (3)$$

式中:  $V_p$ —纵波速度值/( $m \cdot s^{-1}$ );

$L$ —2 个接收探头之间的固定距离/m;

$\Delta t$ —2 个接收探头前后测量记录首波的初至时间形成接收时间差/s。

## 2 岩石破裂前后电阻率与声波波速的物性测试

### 2.1 试验材料和仪器

为了对比岩石破裂前后的导电性和纵波速度差异, 在岩石破裂前后分别对岩石样品进行电阻率和声波测试。岩石样品选用 5 个直径 5 cm, 高 11 cm 的圆柱状灰岩, 如图 1(a)所示。其中 1 个岩样因在破裂过程中损坏无法用于正常测试, 剩余 4 个岩样破碎后可用于试验。使用 WDJD-4 多功能激电仪测量岩样的电阻率, 电阻率的测量装置为对称四极装置, 采用 I-RPT 型岩石波速测试仪测试岩样声波波速。

### 2.2 试验过程

因制作的岩样各方向长度和直径并非完全一致, 因此需要使用游标卡尺对岩样进行测量, 取平均值作为圆柱体的长度和直径。首先对压裂前的岩样进行电阻率与声波测试。在声波测试前需在探头处涂抹耦合剂以确保探头与岩样充分耦合, 随后进行岩样声波测试。待声波测试结束后, 将岩样放入饱和盐水中浸泡 48 h, 取出擦干水分至岩样表面干燥, 即可以进行岩样电阻率测试。为了更真实模拟岩石在断裂构造过程中受到挤压、摩擦发生破碎的情况, 将岩样放入液压伺服控制压力机中进行破裂处理, 见图 1(b), 破裂后的岩样见图 1(c)。破裂后的岩样电阻率与声



(a) 破裂前岩样照片

(b) 岩样位于液压伺服控制压力机中

(c) 破裂后岩样照片

图1 岩样破裂前后照片

Fig. 1 Rock samples before and after fracturing

波波速物性试验过程与未破裂前一致。

### 3 岩石破裂前后电阻率与声波波速的物性测试结果

岩石破裂前后电阻率与声波波速结果见表1。岩样破裂后的电阻率与声波波速相较于未破裂前都显著降低。破裂后的声波波速值较未破裂前降低6.78%~20.20%，平均降低13.89%。破裂后的电阻率值较未破裂前下降83.73%~93.18%，平均下降88.77%。2种物性参数在破碎前后的变化趋势一致，说明岩石破裂前后的电阻率与声波波速存在一定的相关性。因此，可以借助电阻率法与声波测井方法识别地层中的断裂构造。

表1 岩石破裂前后的电阻率与声波波速变化特征

Table 1 Characteristics of resistivity and acoustic wave velocity changes in the rocks before and after hydraulic fracturing

岩石样品	岩样直径/mm	岩样长度/mm	破裂前		破裂后	
			电阻率值/(Ω·m)	声波波速值/(km·s⁻¹)	电阻率值/(Ω·m)	声波波速值/(km·s⁻¹)
1	50.50	110.40	1 261	6.42	86	5.16
2	50.63	111.54	1 892	5.36	139	4.28
3	50.60	110.38	1 182	5.21	171	4.72
4	50.47	110.41	1 291	5.02	210	4.68

### 4 场地试验案例

#### 4.1 研究区地质概况及测线布置

本研究尝试将高密度电阻率法与声波测井法参数联合应用于断裂构造探测中。选取山东莱阳县某断裂构造作为研究区(图2)，采用2种方法联合探测断裂构造并检验其效果。

研究区内地形平缓，地貌以丘陵为主，地下水水位约在6~7 m。根据已有地质资料显示，研究区内的断裂构造较为发育，地层主要为第四系和白垩系下统

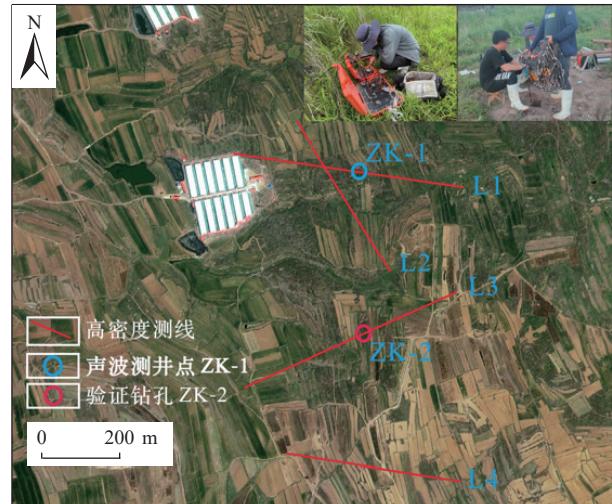


图2 研究区地理位置测线布置图

Fig. 2 Geographical location line layout in the study area

地层，岩性自上而下主要为第四系全新统残坡积粉质黏土、白垩系下统青山群八庙地组闪长玢岩、白垩系下统莱阳群曲格庄组石英砂岩、泥质砂岩和砾岩。

本次在研究区内共布置ERT测线4条L1—L4(图2)，测线均布置于丘陵地貌中。通过L1测线的ERT反演结果得知317 m存在低阻异常区域，在异常区域布设钻孔并进行声波测试。结合地表的基岩露头可初步推测断裂构造的大致走向，测线L2与L1相交是为了了解断裂构造的范围与走向，L3和L4测线大致垂直于推测的断裂构造走向进行布置，以达到追踪断裂构造的目的。ERT数据采集装置为Wenner装置，电极间距设置为5 m，L1、L3测线电极数为120道，L2和L4测线电极数为90道。

#### 4.2 ERT 和声波测井破碎带特征分析

通过物性试验可知，岩石破碎程度越大，声波的传播和反射受到的影响也越大，因此会导致破碎带中的声波波速值低于正常围岩。

破碎带内的导水性和渗透性明显增强, 为裂隙发育成导水通道提供了良好的水动力条件, 断层破碎带处的电阻率因含水量丰富而低于周围正常地层。因此, 在ERT反演剖面上断裂构造处的电阻率值会急剧变化。

L1测线的ERT反演剖面见图3。从图3中可见, 第四系覆盖层与下覆基岩层间存在显著电阻率差异, 表明高密度电阻率法能够较好地反映基岩面起伏特

征。ERT反演结果中断裂构造的低阻异常区域较明显。L1测线横向距离390~520 m处表层电阻率值较高, 这是由于地表出露基岩引起的。反演剖面在横向距离305~330 m处出现了断裂构造的典型电性特征, 主要表现为电阻率在横向明显不连续, 并且在地面深度下34 m内表现为近似直立的低阻异常, 电阻率值约为37~102 Ω·m, 低阻异常区域呈“U”状。

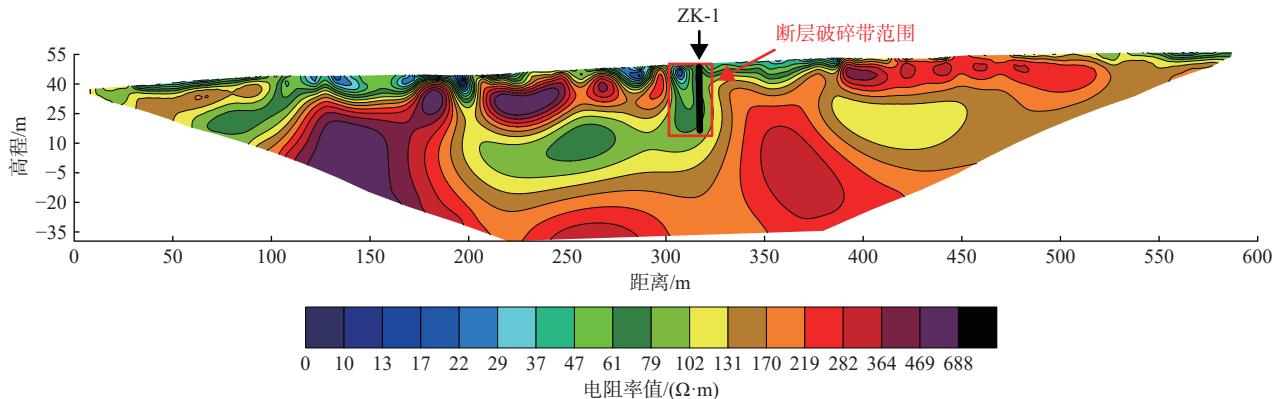


图3 L1测线高密度电阻率法反演剖面图

Fig. 3 Profile of electrical resistivity tomography inversion for L1 survey

根据ERT反演结果圈定的低阻异常位置布设了钻孔ZK-1(图3), ZK-1声波测试结果见图4。根据声波波速值的变化特征可将7.00~31.20 m深度的地层

分为3层。根据岩体完整性指数( $K_v$ )可以划分岩体的完整程度<sup>[26]</sup>(表2)。各地层的声波波速特征见表3。 $K_v$ 值计算公式为:

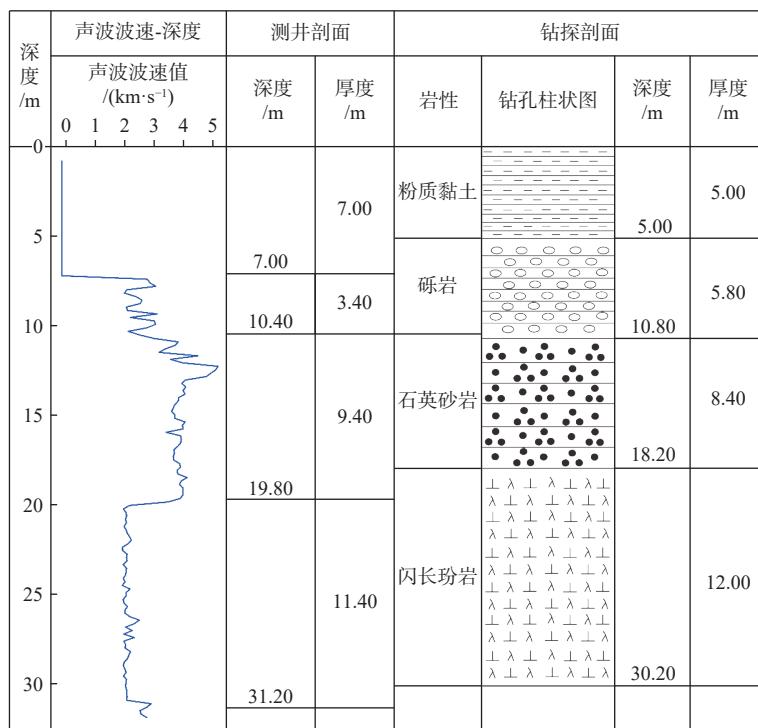


图4 ZK-1声波波速曲线与钻孔资料图

Fig. 4 Acoustic velocity curve of ZK-1 compared with drilling data

$$K_v = \left( \frac{V_{pm}}{V_{pr}} \right)^2 \quad (4)$$

式中:  $K_v$  —— 岩体完整性指数;

$V_{pm}$  —— 岩体弹性纵波速度/(km·s<sup>-1</sup>);

$V_{pr}$  —— 岩石弹性纵波速度/(km·s<sup>-1</sup>)。

声波波速值在 19.80 m 处由 3.79 km/s 降低至 2.16 km/s, 而在 19.80 ~ 31.20 m 范围内较为稳定, 声波波速平均值在 2.07 km/s, 表明岩体的破碎程度较高。声波波速曲线变化特征主要表现在 19.80 m 处出现明显的骤降, 在 19.80 ~ 31.20 m 内无明显波动, 从曲线形

态上看, 声波波速曲线形态呈“梳子”状。钻孔 ZK-1 的岩心也显示在 19.80 ~ 31.20 m 内的岩体较为破碎。因此, 综合声波波速异常特征值、曲线变化特征和钻孔资料判断 19.80 ~ 31.20 m 范围内的地层为断层破碎带。

表 2  $K_v$  与岩体完整程度的对应关系<sup>[26]</sup>

Table 2 Correspondence between  $K_v$  and the integrity degree of rock mass

$K_v$	>0.75	>0.55 ~ 0.75	>0.35 ~ 0.55	0.15 ~ 0.35	<0.15
岩体完整程度	完整	较完整	较破碎	破碎	极破碎

表 3 声波测井结果

Table 3 Results of acoustic well logging

孔深/m	层厚/m	岩性	声波波速值/(km·s <sup>-1</sup> )			$K_v$ 值	破碎程度
			极小值	极大值	平均值		
7.00							
10.40	3.40	砾岩	2.00	3.05	2.54	0.26	破碎
19.80	9.40	石英砂岩	3.11	5.00	3.83	0.61	较完整
31.20	11.40	闪长玢岩	1.98	2.48	2.07	0.15	极破碎

为更加直观地分析断层破碎带的电阻率和声波波速之间特征的异同, 进一步提取 L1 测线 ERT 反演剖面上 ZK-1 位置的电阻率与声波波速进行对比。由断层破碎带处电阻率和声波波速曲线对比图(图 5)可知, 电阻率曲线和声波波速曲线在破碎带内的共同特征为: 电阻率与声波波速值在破碎带内都低于周围正常地层, 二者都能粗略地将地层分为 4 层。但是, 两者之间也有一定的差异: 其一, 在确定断裂构造的范围上, 根据声波测井结果确定出断裂构造的边界范围为 19.80 ~ 31.20 m, 而电阻率曲线确定的破碎带范围与实际埋深有一定偏差, 电阻率值在深度 9 m 处开始

逐渐衰减, 且其低电阻率值对应的深度范围在 17.50 ~ 27.50 m, 这是由于 ERT 的分辨率有限导致的; 其二, 在断层破碎带边界处曲线的表现形式上, 电阻率值逐渐减小, 电阻率曲线呈递减趋势, 而声波波速值则在破碎带处出现明显的骤降。

虽然场地试验证明了电阻率法与声波测井能够在野外有效的识别断裂构造, 但是通过对比图 3 和图 4 可知, 声波测井划分的破碎带范围为 19.80 ~ 31.20 m, 破碎带厚度为 11.40 m, 较 ERT 反演结果圈定的范围更小。这是由于声波测井采用的是小极距测试, 分辨率高, 所以其划分的破碎带范围是准确的。对于地球物理方法而言, 提高地球物理反演结果的精度使其更符合实际地质情况具有重要意义。因此, 在圈定断裂构造的位置时可以借助声波测井结果校正 ERT 反演剖面的纵向深度, 提高 ERT 的解译精度。

## 5 基于声波测井数据的 ERT 反演过程校正

### 5.1 校正过程分析

由前述分析可知, ERT 圈定的破碎带范围与声波测井划分的破碎带范围不一致, 为了使 ERT 反演结果圈定的破碎带范围与实际地质情况更为符合, 尝试借助声波测井数据作为地层先验信息对 ERT 反演结果的纵向深度进行校正。ERT 的地层深度校正通过改变高密度电阻率法反演软件 RES2DINV 中的反演参

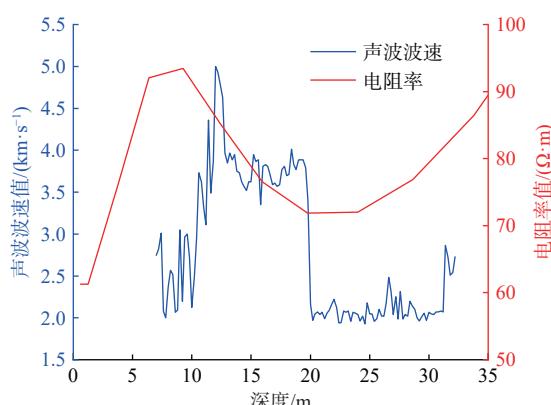


图 5 断层破碎带电阻率和声波波速曲线对比图

Fig. 5 Comparison of resistivity and acoustic velocity curves of a fractured fault zone

数——垂直滤波比系数(以下简称系数)进行校正处理。最佳系数的选取需结合声波测井数据和ERT反演结果共同进行。基于声波测井数据校正ERT反演结果的过程如下:首先拟定出能把电阻率曲线中较低的电阻率值范围所在的深度约束在声波测井划定破碎带范围内的系数,然后将拟定的系数校正后的ERT反演结果与声波测井确定的破碎带范围进行对比,最后将与声波测井结果最吻合的ERT反演结果所对应的系数确定为最佳系数。

通过L1测线的ERT反演结果可知,破碎带范围主要沿纵向变化,故选取值大于1的系数以获得最佳深度校正效果,选取的校正系数分别为1.0,1.2,1.6,2.0。从断层破碎带处不同垂直滤波比系数的电阻率曲线(图6)可知,随着系数增大,曲线不断向右平移,并且4条曲线在深度24 m处存在交点,在10~24 m范围内,电阻率值随着系数的增大而增大,而24~32 m的范围内,电阻率值随着系数的增大不断减小。不难看出未校正前的电阻率曲线(系数1.0)与校正后的相比,校正后的电阻率曲线低电阻率值对应的深度范围更接近声波测井数据划分的破碎带。

断层破碎带处不同垂直滤波比系数的电阻率曲线与声波波速曲线对比见图7。由图6和图7可知,系数为1.0的电阻率曲线低值范围为17.5~27.5 m;系数为2.0的电阻率曲线对应的低阻值范围为24.0~34.0 m,只有系数为1.2和1.6的电阻率低阻值对应深度范围符合声波测井划分的破碎带范围。但是,进一步对比系数1.2与1.6的电阻率曲线变化趋势可以发现,系数为1.6的电阻率曲线在20~32 m范围内的电阻率值变化平稳,而系数为1.2的电阻率曲线在24~32 m范围内电阻率值明显的上升。同时,通过系数为1.6的L1测线高密度电阻率反演剖面(图8)发现,校

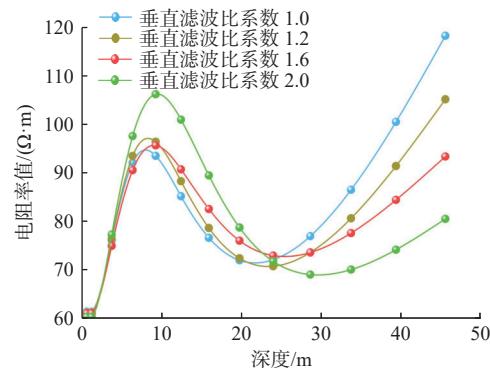


图6 断层破碎带处不同垂直滤波比系数的电阻率曲线图

Fig. 6 Resistivity with different vertical filtering coefficient values at the fractured fault zone

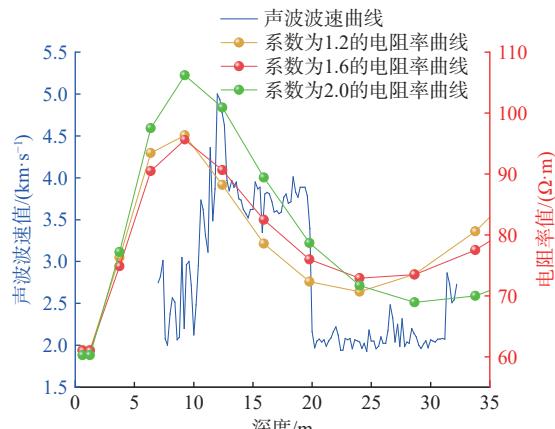


图7 断层破碎带处不同垂直滤波比系数的电阻率曲线和声波波速曲线对比图

Fig. 7 Comparison of resistivity with different vertical filtering coefficient values in the fractured fault zone and the acoustic wave velocity

正后的ERT反演结果圈定的破碎带范围为地下20~34 m,电阻率值范围为55~71 Ω·m,与声波测井结果确定的破碎带范围已十分接近。因此,可以将系数

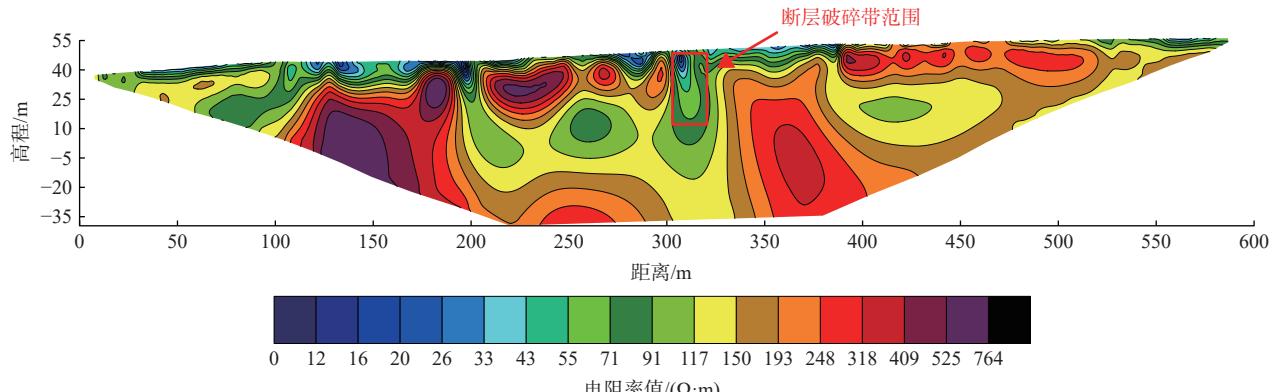


图8 系数为1.6的L1测线高密度电阻率反演剖面图

Fig. 8 Profile of electrical resistivity tomography inversion for L1 survey with a coefficient of 1.6

1.6作为ERT反演结果深度校正的最佳系数。

## 5.2 断裂构造三维空间分布

为了直观反映断裂构造的走向和范围等情况,将研究区4条ERT测线校正后的反演结果进行三维空间展示(图9),将反演结果中低阻异常区域界定为断层破碎带发育区域,圈定的断裂构造如图9所示。通过4条ERT反演结果可以判断断裂构造的走向为近南北向,破碎带的宽度范围约11 m。

### 5.3 钻孔验证

为了验证校正后的 ERT 反演结果所圈定的破碎带范围的可靠性,选取 ERT 测线 L3 横向距离 335 m 以深处的低阻异常区域进行了钻探验证, 钻孔位置见图 2 中的 ZK-2。图 10 为钻孔 ZK-2 岩心柱状图及岩心照片。

从图 10(a)(b)可见, 钻孔 ZK-2 揭露的破碎带深度范围在 7.40~17.30 m, 该处未校正前的 ERT 反演结果圈定的破碎带范围约在 9.30~23.00 m, 该范围内的岩心完整程度差, 几乎以 2~3 cm 碎石状的闪长玢岩

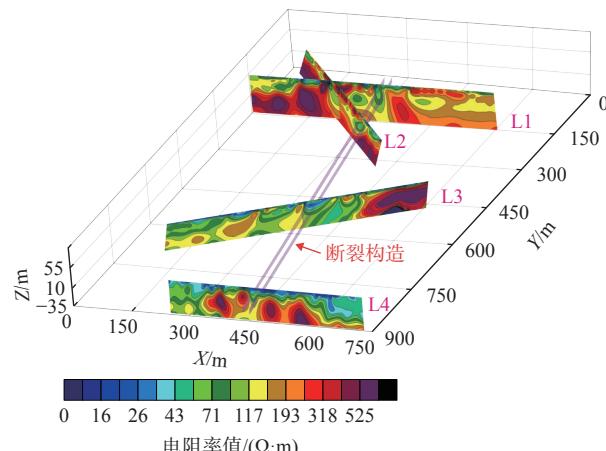
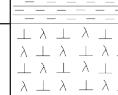
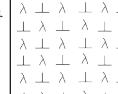
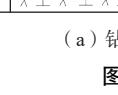
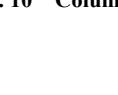
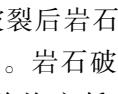


图 9 断裂构造三维空间分布图

Fig. 9 3D spatial distribution map of fault structures

为主,与 17.30 m 的岩心在完整程度上有着明显的区别。而校正后的 ERT 圈定的破碎带范围在 9~21 m,虽然校正后的 ERT 反演结果与破碎带实际范围仍存在一定误差,但是经校正后的 ERT 反演结果比未校正前更接近破碎带的实际埋深。

岩性	钻孔柱状图	深度/m	厚度/m
粉质黏土			7.40
		7.40	
闪长玢岩			9.90
		17.30	
			2.70
		20.00	

(a) 钻孔柱状图

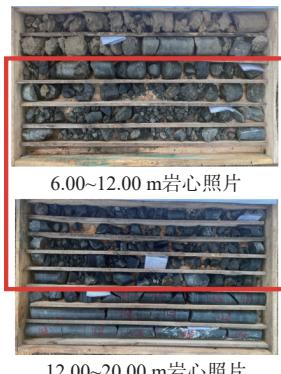
图 10 钻孔 ZK-2 柱状图及岩心照片图

**Fig. 10** Columnar diagram and core photograph of borehole ZK-2

6 结论

(1) 物性试验结果证明了破裂后岩石电阻率与声波波速之间存在一定的相关性。岩石破裂后的电阻率与声波波速相较于未破裂前均变低。岩石破裂前后的电阻率变化程度较声波波速的变化程度更为剧烈。

(2) 断裂构造中的破碎带在 ERT 反演结果中以低阻异常区域存在, 声波波速曲线中波速值在破碎带与正常地层分界面处会出现明显的骤降。两者联合探测断裂构造时, ERT 可以为声波测井提供孔位指导, 声波测井可以为 ERT 提供准确的地层边界。



(b) 岩心照片图

(3) 不同垂直滤波比系数下的 ERT 反演结果圈定破碎带的范围各不相同, 地层深度校正随着系数的增大而增大。声波测井数据校正后的 ERT 圈定的地质异常体的埋深和范围更符合实际地质情况。

### 参考文献 ( References ) :

- [ 1 ] FAVREAU P, WOLF S. Theoretical and numerical stress analysis at edges of interacting faults: application to quasi-static fault propagation modelling[J]. *Geophysical Journal International*, 2009, 179(2): 733 – 750.
  - [ 2 ] PERRIN C, WALDHAUSER F, SCHOLZ C H. The shear deformation zone and the smoothing of faults with

- displacement[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2021, 126(5): e2020JB020447.
- [3] 周保, 孙皓, 魏赛拉加, 等. 冷湖赛什腾山天文台工程地质选址评价 [J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(4): 165 – 174. [ ZHOU Bao, SUN Hao, WEI Sailajia, et al. Site selection evaluation of engineering geology of the Lenghu Saishiteng Mountain Observatory[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2022, 49(4): 165 – 174. (in Chinese with English abstract) ]
- [4] 刘明辉, 薛建, 王者江, 等. 工程场地隐伏断裂的探测与地震活动性评价 [J]. 物探与化探, 2018, 42(4): 839 – 845. [ LIU Minghui, XUE Jian, WANG Zhejiang, et al. The detection of buried faults in engineering sites and the evaluation of seismic activity[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2018, 42(4): 839 – 845. (in Chinese with English abstract) ]
- [5] 李坚, 邓宏科, 张家德, 等. 可控源音频大地电磁勘探在大瑞铁路高黎贡山隧道地质选线中的应用 [J]. 水文地质工程地质, 2009, 36(2): 72 – 76. [ LI Jian, DENG Hongke, ZHANG Jiade, et al. Application of geological routing about CSAMT exploration in Gaoligong Mountain tunnel of Dali-Ruili Railway[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2009, 36(2): 72 – 76. (in Chinese with English abstract) ]
- [6] 杨志华, 郭长宝, 吴瑞安, 等. 青藏高原巴塘断裂带地震滑坡危险性预测研究 [J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(5): 91 – 101. [ YANG Zhihua, GUO Changbao, WU Ruian, et al. Predicting seismic landslide hazard in the Batang fault zone of the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2021, 48(5): 91 – 101. (in Chinese with English abstract) ]
- [7] SANA H, TABORIK P, VALENTA J, et al. Detecting active faults in intramountain basins using electrical resistivity tomography: A focus on Kashmir Basin, NW Himalaya[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2021, 192: 104395.
- [8] 汪佳蓓, 陈青云, 胡怡, 等. 深部煤层小断层断距识别精度研究 [J]. 地球物理学进展, 2022, 37(3): 1159 – 1169. [ WANG Jiabei, CHEN Qingyun, HU Yi, et al. Study on the identification accuracy of small fault displacement in deep coal bed[J]. *Progress in Geophysics*, 2022, 37(3): 1159 – 1169. (in Chinese with English abstract) ]
- [9] 付光明, 黄进调, 刘阳, 等. 高密度电阻率法与CSAMT法在江西会昌县坝背地热勘查中的综合探测 [J]. 中国地质, 2019, 46(4): 927 – 936. [ FU Guangming, HUANG Jintiao, LIU Yang, et al. Multi-electrode resistivity method and CSAMT method in geothermal exploration of Babei Area in Huichang County, Jiangxi Province[J]. *Geology in China*, 2019, 46(4): 927 – 936. (in Chinese with English abstract) ]
- [10] SEMINSKY K Z, ZARIPOV R M, OLENCHENKO V V. Interpretation of shallow electrical resistivity images of faults: tectonophysical approach[J]. *Russian Geology and Geophysics*, 2016, 57(9): 1349 – 1358.
- [11] 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 Hua, WANG Donghui, ZHANG Wei, 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. (in Chinese with English abstract) ]
- [12] 周越, 曾昭发, 唐海燕, 等. 公路勘察中滑坡体的地球物理特征与分析——以张榆线公路勘察为例 [J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2021, 51(2): 638 – 644. [ ZHOU Yue, ZENG Zhaofa, TANG Haiyan, et al. Geophysical Characteristics of Landslide Body in Highway Reconnaissance: A Case Study in Highway Prospecting of Zhangyu Line. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 2021, 51(2): 638 – 644. (in Chinese with English abstract) ]
- [13] 方艺翔, 李卓, 范光亚, 等. 监测资料、压水试验与综合物探法在某心墙坝渗漏识别中的应用研究 [J]. 水利水电技术(中英文), 2022, 53(2): 87 – 97. [ FANG Yixiang, LI Zhuo, FAN Guangya, et al. Application of monitoring data, water pressure test and comprehensive geophysical method to identification of leakage of a core dam[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2022, 53(2): 87 – 97. (in Chinese with English abstract) ]
- [14] 丁超, 解阳波, 张家豪, 等. 三维高密度电法揭示SAGD地面窜漏通道 [J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2022, 52(6): 2021 – 2033. [ DING Chao, XIE Yangbo, ZHANG Jiahao, et al. Imaging the ground leakage channel of SAGD based on three-dimensional electrical resistivity tomography[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2022, 52(6): 2021 – 2033. (in Chinese with English abstract) ]
- [15] 陈松, 陈长敬, 罗士新, 等. 广州南沙厚覆盖区近地表地层结构分析: 基于二维地球物理多方法探测结果 [J]. 地质通报, 2023, 42(1): 168 – 179. [ CHEN Song,

- CHEN Changjing, LUO Shixin, et al. Near surface stratigraphic structure analysis in Nansha of Guangzhou thick overburden area: Based on multi method results of 2D geophysics exploration[J]. Geological Bulletin of China, 2023, 42(1): 168 – 179. (in Chinese with English abstract) ]
- [16] 贾龙,雷明堂,程小杰.基于井中超声波成像的岩溶特征高精度探测和评价[J].地质通报,2022,41(增刊1): 453 – 460. [ JIA Long, LEI Mingtang, CHENG Xiaojie. High precision detection and evaluation of karst features based on borehole ultrasonic imaging[J]. Geological Bulletin of China, 2022, 41(Sup 1): 453 – 460. (in Chinese with English abstract) ]
- [17] 胡刚,何正勤,李娜,等.跨安宁河断裂带浅孔综合地球物理测井成果分析[J].地震学报,2016,38(5): 684 – 692. [ HU Gang, HE Zhengqin, LI Na, et al. Analyses on integrated geophysical logging results in shallow hole across the Anninghe fault zone[J]. Acta Seismologica Sinica, 2016, 38(5): 684 – 692. (in Chinese with English abstract) ]
- [18] 王新杰,杨进平,王营超,等.声波测试技术在地下油库选址勘查中的应用[J].工程地球物理学报,2013, 10(5): 648 – 651. [ WANG Xinjie, YANG Jinping, WANG Yingchao, et al. The application of acoustical testing technique in site selection of oil cellar[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2013, 10(5): 648 – 651. (in Chinese with English abstract) ]
- [19] 朱飞飞.地井联合物探技术在岩溶注浆检测中的应用[J].工程地球物理学报,2022, 19(4): 450 – 458. [ ZHU Feifei. Application of geophysical prospecting technology combined with ground and well in Karst grouting detection[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2022, 19(4): 450 – 458. (in Chinese with English abstract) ]
- [20] 易强,李望明,景营利,等.高密度电法数据处理结合钻孔波速测试在土洞发育区的应用实例[J].物探化探计算技术,2021, 43(1): 104 – 107. [ YI Qiang, LI Wangming, JING Yingli, et al. The application of high-density resistivity method data processing combined with borehole wave velocity measurement in soil hole development area[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2021, 43(1): 104 – 107. (in Chinese with English abstract) ]
- [21] 陈清.高密度电法与跨孔层析成像在岩溶探测中的应用分析[J].工程地球物理学报,2017, 14(4): 427 – 434. [ CHEN Qing. Application of high density electrical method and cross-hole tomography imaging to Karst detection[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2017, 14(4): 427 – 434. (in Chinese with English abstract) ]
- [22] MENG Fangsong, ZHANG Gang, QI Yaping, et al. Application of combined electrical resistivity tomography and seismic reflection method to explore hidden active faults in Pingwu, Sichuan, China[J]. Open Geosciences, 2020, 12(1): 174 – 189.
- [23] 潘剑伟,占嘉诚,洪涛,等.地面核磁共振方法和高密度电阻率法联合找水[J].地质科技情报,2018, 37(3): 253 – 262. [ PAN Jianwei, ZHAN Jiacheng, HONG Tao, et al. Combined use of surface nuclear magnetic resonance and electrical resistivity imaging in detecting groundwater[J]. Geological Science and Technology Information, 2018, 37(3): 253 – 262. (in Chinese with English abstract) ]
- [24] 楚泽涵,黄隆基,高杰,等.地球物理测井方法与原理[M].北京:石油工业出版社,2007: 225 – 227. [ CHU Zehan, HUANG Longji, GAO Jie, et al. Geophysical logging methods and principles[M]. Beijing: Petrprium Industry Press, 2007: 225 – 227. (in Chinese) ]
- [25] 谭礼洪,张国强,谭忠健,等.利用阵列声波测井资料评价变质岩储层有效性[J].石油地球物理勘探,2022, 57(6): 1464 – 1472. [ TAN Lihong, ZHANG Guoqiang, TAN Zhongjian, et al. Evaluation of metamorphic rock reservoir effectiveness by array acoustic logging data[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2022, 57(6): 1464 – 1472. (in Chinese with English abstract) ]
- [26] 中华人民共和国住房和城乡建设部.工程岩体分级标准:GB/T 50218—2014[S].北京:中国计划出版社,2015. [ Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for engineering classification of rock mass: GB/T 50218—2014[S]. Beijing: China Planning Press, 2015. (in Chinese) ]

编辑: 张若琳