

北山花岗岩渗透结构特征及高密度电法三维探测研究

凡净^{1,2}, 美丽娅·玉素甫江³, 吕现福¹, 马殿妍¹, 李应芸¹

¹昭通学院地理科学与旅游学院, 云南 昭通

²昆明理工大学国土资源工程学院, 云南 昆明

³同济大学法学院, 上海

收稿日期: 2025年6月13日; 录用日期: 2025年7月18日; 发布日期: 2025年7月30日

摘要

甘肃北山作为高放废物地质处置库场址预选区, 其围岩渗透结构类型是研究岩体渗透性和核素在裂隙通道中迁移路径的重要内容。根据岩体结构面级别划分理论为基础, 结合甘肃北山高放处置库围岩不同尺度地质结构面工程意义, 分为2大类5小级: 一大类为断裂带, I级结构面为区域断裂(数十公里级), II级结构面为边界断裂(公里级); 二大类为节理裂隙, III、IV级结构面为长大裂隙与小断层(数十米~数百米级), V级结构面为处置孔周围微裂隙与节理(厘米~米级)。其中, 根据岩体的宏观渗透特征, 甘肃北山围岩结构面主要以网络状渗透结构存在。结合现场地形条件, 运用电阻成像技术对岩体网络状三维渗透结构进行探测, 通过测线布置、数据采集、解编处理, 反演岩体全空间电阻率, 可视化地呈现了裂隙岩体渗透结构在压水试验下的渗透路径及变化范围。结果表明, 电阻层析成像探测结果与压水试验渗水量相吻合, 表明地球物理勘探方法可以运用于花岗岩体渗透结构探测。

关键词

高放处置库, 岩体结构面, 渗透结构, 渗透性, 运移路径, 电阻层析成像

Three-Dimensional Detection Technology on the Network-Like Permeability Structure of Granitic Rock Mass

Jing Fan^{1,2}, Meiliya·Yusufjiang³, Xianfu Lyu¹, Dianyan Ma¹, Yingyun Li¹

¹School of Geographic Science and Tourism, Zhaotong University, Zhaotong Yunnan

²School of Land and Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming Yunnan

³School of Law, Tongji University, Shanghai

Received: Jun. 13th, 2025; accepted: Jul. 18th, 2025; published: Jul. 30th, 2025

文章引用: 凡净, 美丽娅·玉素甫江, 吕现福, 马殿妍, 李应芸. 北山花岗岩渗透结构特征及高密度电法三维探测研究[J]. 土壤科学, 2025, 13(3): 139-149. DOI: 10.12677/hjss.2025.133017

Abstract

As a preselected area of geological disposal site of high-level radioactive waste in Beishan, Gansu province, the type of surrounding rock permeability structure is an important content to study the permeability of rock mass and the migration path of nuclides in the fracture channel. Based on the classification theory of rock mass structural plane and the engineering significance of geological structural plane of different scales in the surrounding rocks, it is divided into two categories and five grades. The structural planes of grade III and IV are large cracks and small faults (tens of meters to hundreds of meters), and the structural planes of grade V are micro-cracks and joints around the disposal hole (centimeters to meters). According to the macroscopic seepage characteristics of rock mass, five types I~V of rock permeability structure in preselected area are granular, interlayered, banded, network-like and pipe-like permeability structure. Combined with the topographic conditions of the site, electrical resistivity technology was used to detect the permeability structure of the rock mass. Three-dimensional resistivity data of the rock mass was inverted through the data collection, compilation processing, and the permeability path and variation range of the fractured rock mass permeability structure were visualized. Through the compared results of electrical resistivity tomography and packer permeability test, it indicates that the geophysical exploration method can be used to detect the permeability structure types of multiple-scales structural plane of granitic rock mass.

Keywords

High Level Disposal Repository, Structural Plane of Rock Mass, Permeable Structure, Permeability, Migration Path, Electrical Resistance Tomography

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

岩体渗透结构决定其渗透性及水质和溶质运移路径,因此研究岩体渗透结构至关重要[1]-[3]。谷德振先生等(1981)、Qingbo Li (2009)、Zhang F (2012)等学者根据岩体的宏观渗透特征(即渗透介质及扩散路径),将岩体渗透结构类型划分为5类:散体状渗透结构、层状渗透结构、带状渗透结构、网络状渗透结构、管道状渗透结构[4]-[6]。国内外学者针对低渗透性的岩石的渗透结构特征开展了大量研究:Tsang C 等(2013)指出对于低渗透性的岩石,压水试验十分的耗时,急需开发集中更快的技术[7]。Neuman (2003), Coronado M (2008)等介绍了采用示踪技术来表征导电地质断层和裂隙岩石的水力特性的需求和挑战[8][9]。Yue N 等(2017)利用 ERT 监测了低渗透裂隙岩体内部的三维渗流过程[10]。王刚等(2012)在甘肃北山对花岗岩基岩进行探测,结果表明利用 ERT 对低渗透性介质的非均质性空间分布特征及三维裂隙网络进行原位识别是可行的[11]-[15],且从三维空间角度分析水流的入渗过程及了解岩体的渗透性空间分布特征具有重要的意义[16][17]。国内外众多学者在研究裂隙岩体的渗透结构方面取得了重大进展,但对岩体渗透结构类型进行三维探测关键技术亟需解决。压水试验是“单孔之见”测取渗透系数,示踪技术是“点-点”描述结构面渗透连通性,电阻层析成像技术可定性描述裂隙渗透结构空间分布特征[18][19]。

以北山岩体网络状渗透结构为研究对象,结合现场压水试验基础上,采用电阻层析成像技术对裂隙岩体渗透结构进行定量探测,识别岩体渗透结构、压水渗流范围以及运移路径,对研究核废物地质处置库场

址的选择、安全性的评价以及了解核素在岩体中的迁移规律，具有重要的科学意义和实际的应用价值。

2. 研究区地质条件

高放射性废物处置库预选区主要位于甘肃北山新场花岗岩场址内。新场岩体呈东西向展布，东西长约 20 km，南北宽约 5 km，地表出露面积约 94 km²。区内地质构造复杂，其中以 NNE~EW 向构造为主，其次为 NE 向断裂。东西两侧分别存在一条 NNE 向的断裂，即 F31 和 F32 (图 1)。F31 断裂位于测区最西侧，是区内最大断裂之一，总体呈直线形连续延伸，地貌上形成直线形大沟，走向大约 20°，倾向 NW，倾角陡，一般 70°~80°。F32 断裂位于测区东侧，走向约 20°，长度 2.6 km，是区内较大断裂之一。断裂总体形态为中段略向东弯曲的直线型，地表断裂出露处形成较大的冲沟或负地形。区域内地形平缓，相对高差较小，地表多为低矮的缓坡，露头面倾角多在 10°~20°。场址区内发育的 NNE~EW 断层，裂隙发育均以陡倾角为主，少部分为中等倾角及缓倾角。

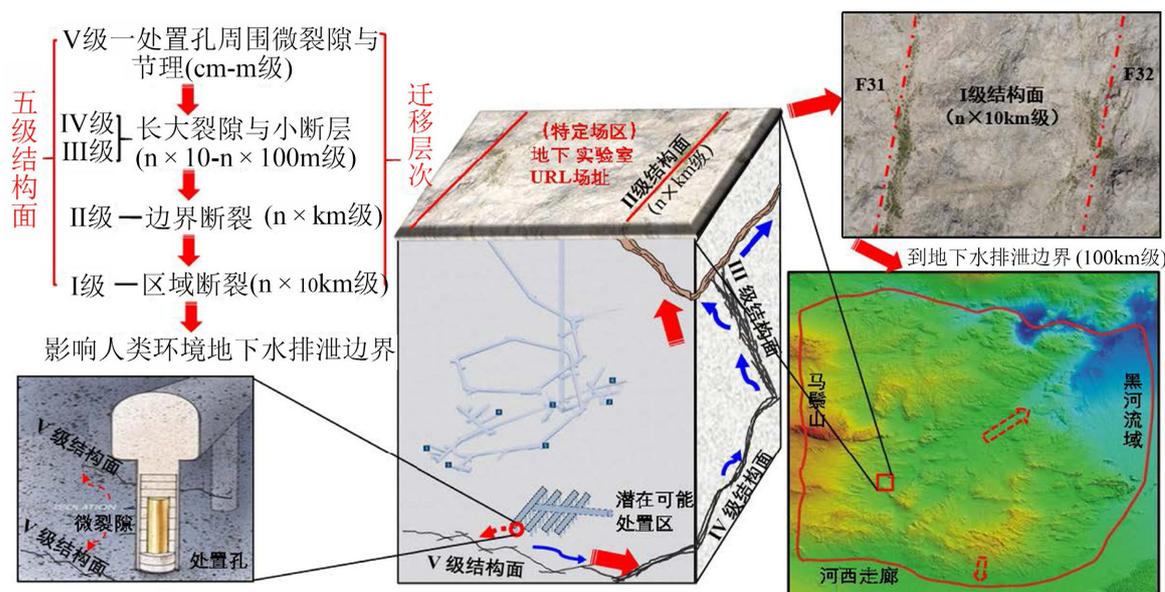


Figure 1. Aerial view of geological structure in candidate site

图 1. 预选区选址及处置库地理区位示意图

Table 1. Classification and characteristics of multi-scale rock structural plane

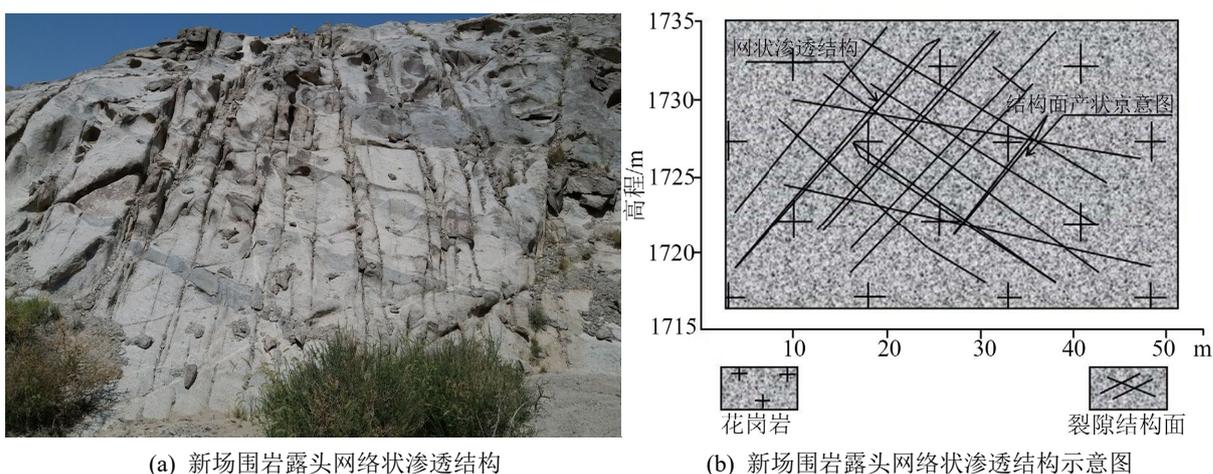
表 1. 多尺度岩体结构面分级及特征

类型	级别	定义	基本特征
断裂带	I 级结构面	区域断裂(数十公里级)	对整个区域构造起控制作用，决定大区域内地下水渗流场的流向。
	II 级结构面	边界断裂(公里级)	对区域内处置库中核素迁移起屏障作用，长度和宽度的差异是决定断裂宏观导水的主导因素，也是决定流体运移的快慢。
节理、裂隙	III 级结构面	小断层(数十米~数百米级)	决定地下水由裂隙向断裂带迁移和核素运移的关键枢纽。
	IV 级结构面	长大裂隙(数十米)	作为岩体微裂隙与节理内水流和溶质运移的导水路径和通道。
	V 级结构面	处置孔周围微裂隙与节理(厘米~米级)	节理延伸长度和张开度是影响岩体局部稳定性和渗透性能的主要因素，也是流体运移和核素迁移的突破口。

由于断裂构造作用使岩体中产生裂隙，在各种应力作用下破裂变形而产生的孔隙。裂隙对工程建设影响较大，特别是对隧道及地下工程的稳定性影响更大。根据不同尺度岩体裂隙不同的工程意义，对甘

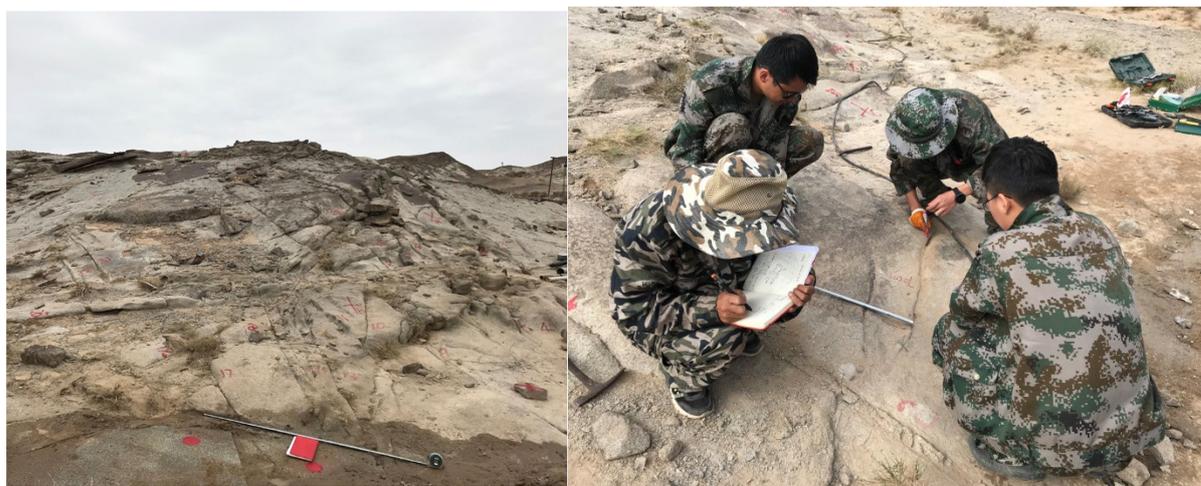
肃北山高放废物处置库预选区内结构面进行尺度上分级, 普遍分为 2 大类 5 小级, 见表 1。

经过前期预选区现场踏勘、调研分析发现, 甘肃北山场址区内岩体渗透结构主要以 VI、V 级网络状裂隙结构面为主(图 2(a))。网络状渗透结构发育具有普遍性和广泛性, 是地质构造运动和后期风化作用的产物。渗透介质以网络状分布的裂隙介质为主。岩浆岩成岩作用时常形成镶嵌结构-次块状结构的非闭合裂隙岩体, 后期风化作用下(包括物理风化作用、水岩化学风化、生物风化作用等)也会将完整花岗岩体形成网络状裂隙, 具有显著的各向异性、不连续、非均一等渗透特性。网络状渗透结构渗透性主要由网络裂隙及其渗透性决定, 现场压水试验发现, 裂隙岩体渗透性在 $10^{-6}\sim 10^{-8}\text{m/s}$ 。结合室内建立的随机-确定的裂隙网络三维模型, 计算得出网络裂隙岩体的渗透张量约 10^{-10}m/s , 网络裂隙岩体的渗透张量预测对流体运移及核素迁移的方向和速率具有重要意义。图 2 为新场网络状裂隙结构发育的围岩露头, 通常存在 4~5 组优势结构面, 少量结构面存在充填物和胶结情况, 决定岩体优势渗透路径。



(a) 新场围岩露头网络状渗透结构

(b) 新场围岩露头网络状渗透结构示意图



(c) 新场围岩露头裂隙网络密度统计

(d) 新场围岩岩性产状统计

Figure 2. Photograph of network-like permeability structure in candidate site

图 2. 场址区内网络状渗透结构围岩露头及岩性产状统计

北山花岗岩网络状渗透结构的形成受控于构造应力场演化和表生风化作用的双重机制。在构造应力方面, 区域 NE-SW 向主压应力场(印支期 - 燕山期)导致岩体发育 NNE~EW 向高角度断裂系统(图 2(c)), 其中 I、II 级断裂作为应力释放主通道, 控制着裂隙网络的宏观展布格局; 而 III-V 级结构面则受局部应

力分异作用影响,在断裂带周边形成次级裂隙网络。现场露头调查表明(图 2(d)),裂隙密度与距主断裂距离呈负相关关系,距离 F31 断裂 200 m 范围内裂隙发育强度达 5.3 条/m²,显著高于外围区域(1.8 条/m²)。

风化作用对渗透结构的改造具有垂直分带性。地表 20 m 深度内,昼夜温差导致的冰劈作用(年均温差 46.8℃)及生物根系机械侵蚀使裂隙宽度扩展 38%~65%;化学风化则通过长石水解生成高岭石等次生矿物,部分充填裂隙(充填率约 15%),但伴随体积膨胀效应产生新微裂隙。构造主导、风化加强的作用,最终形成具有显著各向异性和非均质特征的网络状渗透结构。而岩体中发育的各种规模的结构面是控制岩体渗流的先决条件,尤以Ⅲ级及以上规模的结构面在渗流中起主导作用,它是导水的良好通道,与周围随机裂隙之间发生水力联系。结构面统计分析时,主要以Ⅲ级结构面为主,容易忽略周围Ⅵ、Ⅴ级结构面对渗流的影响。基于此,课题组选取北山典型围岩露头面,针对Ⅵ、Ⅴ级裂隙岩体网络状渗透结构,通过“加压加盐加水”人工驱动,采用地球物理勘探方法进行探测,形成一套科学、合理的岩体渗透结构的探测技术。

3. 裂隙岩体三维渗透结构探测

3.1. 电阻层析成像法原理

探测对象为网络状渗透结构面的围岩露头,其岩性为花岗岩,具有各向异性且不均一的特征。由于风化作用,单裂隙岩体张开度较大,从现场压水试验结果也得知其渗透系数比深部较大。花岗岩为电阻值较高介质约为 600~600000 Ω·m,纯水介质为 10~100 Ω·m 的低电阻介质,加上 NaCl 盐水溶液其电阻率低至 0.1~10 Ω·m,较大的电性差异也为高密度电阻层析成像提供基础。本次探查重点是围岩渗透结构渗透路径及其渗水量与电阻率之间相关性研究,当网络状渗透结构中充填 NaCl 盐水溶液后,其电阻率会产生相应的改变,如结构中富水量增加,富水区域范围与正常渗透结构间存在明显的电性差异,通常表现为低电阻率值区域。通过网络式电极测线布置,全覆盖地采集裂隙渗透结构中电性数据,图 3 为电透视工作原理图。现场采用并行电法仪采集全电场空间电位值,保持电位测量的同步性,避免了不同时间测量数据的干扰问题,从而探查其富水区域位置和特征。

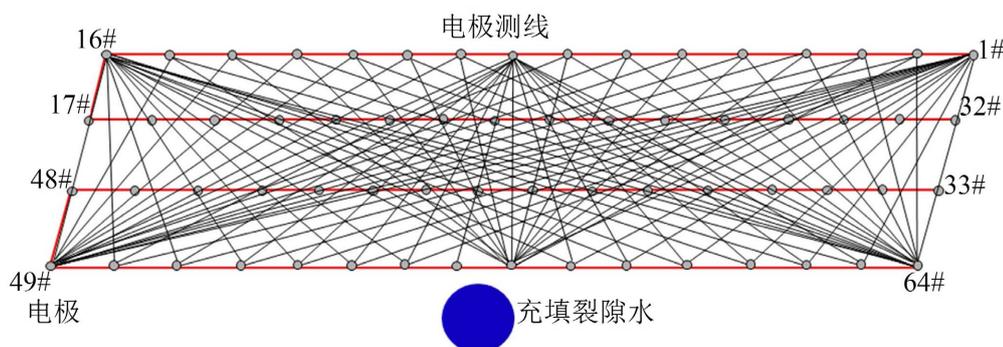


Figure 3. Schematic diagram of principle of high density resistivity tomography

图 3. 高密度电阻层析成像探测原理图

3.2. 裂隙岩体三维渗透结构探测

研究对象露头由于远离边界断裂构造作用影响,岩体较为完整,主要为网络状渗透结构。根据现场地质条件,课题组主要采用电阻层析成像技术探测网络状裂隙岩体渗透结构,结合现场原位压水试验,对露头面内 1 号、2 号、3 号优势裂隙组进行渗透试验,一方面采集裂隙岩体渗透性参数,另一方面针对甘肃北山花岗岩体低渗、闭合、充填的特点,通过添加 NaCl 盐溶液提高裂隙物理响应强度,从而实现岩

体裂隙三维渗透结构在充水情况下电性参数的测取。

(1) 测线布置

根据现场裂隙分布及钻孔位置分布，布置测线 4 条，测量电极 64 个，极距 0.5 m，测线总长度为 31.5 m，覆盖裂隙面积 7.5 m × 1.5 m；4 条测线相互平行，将 XC02~XC08 号钻孔完全覆盖，见图 4。鉴于花岗岩强度较大，现场采用电钻钻孔，电极孔洞深度在 20 cm 左右，电极与岩体之间用黄泥进行耦合，提高导电性能。在数据采集前，对每个电极孔洞加 NaCl 盐溶液，增强裂隙物理响应强度。

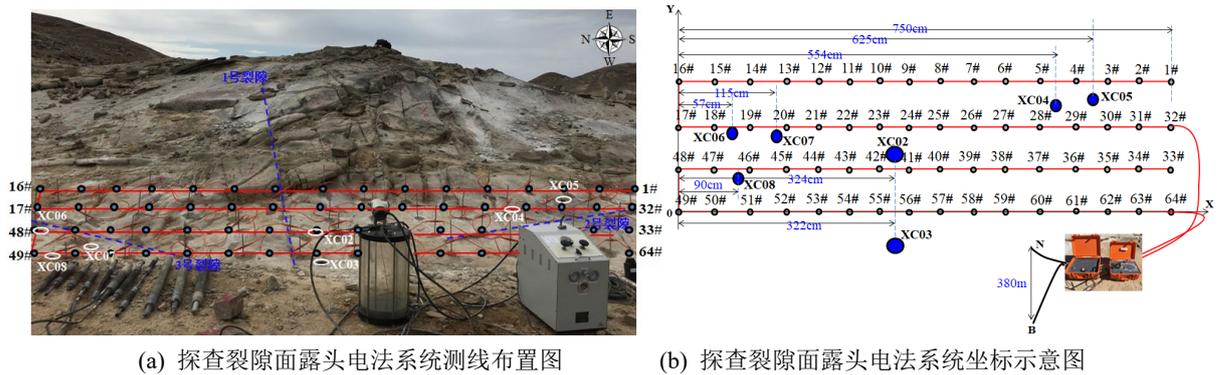


Figure 4. Layout of survey lines and coordinate diagram of electrical resistivity method in fractured rock
图 4. 裂隙露头高密度电阻层析成像探测系统布置图

(2) 数据采集

并行电法数据采集时，任一电极供电可在其余所有电极上同时进行电位测量，能清楚反映探测区域的自然电位、一次供电场电位的变化情况，采集数据效率比传统的高密度电法仪有大大提高。现场采用 AM、ABM 法供电方法进行数据采集，设置参数为 0.5 s 恒流时间、50 ms 采样时间间隔，供电方式采用单正法，取得海量电法数据便于立体电阻率反演，部分数据采集情况见表 2。现场共计采集数据 7 天，设置三极 AM 法和四极 ABM 法采集电法数据，对钻孔 XC02、XC06 同步进行压水试验，对 XC03、XC07、XC08 进行实时监测，测取岩体渗透结构压水量及渗水深度等参数，见表 2。

Table 2. Data acquisition of monitoring permeability structures in fractured rock
表 2. 围岩裂隙渗透结构监测部分数据采集表

测试编号	测试时间	供电方式	恒流时间	采样时间间隔	压水量	压水段深度
No.1	09:30	AM/ABM 法	0.5 s	50 ms	3.6 L	16 cm
No.2	10:40	AM/ABM 法	0.5 s	50 ms	7.3 L	16 cm
No.3	11:55	AM/ABM 法	0.5 s	50 ms	9.4 L	16 cm
No.4	12:04	AM/ABM 法	0.5 s	50 ms	9.4 L	16 cm
No.5	13:15	AM/ABM 法	0.5 s	50 ms	13.7 L	16 cm
No.6	14:27	AM/ABM 法	0.5 s	50 ms	18.4 L	16 cm
No.7	15:31	AM/ABM 法	0.5 s	50 ms	26.4 L	16 cm

(3) 反演处理

通过在花岗岩裂隙面布置电法测线，结合露头面地形平坦条件建立测试电极坐标系，以 49# 电极为原点，平行露头面往南方向为 x 轴正向，垂直露头面往东方向为 y 轴正向(见图 5(a))。依次对并行电法采集

数据进行解编, 畸变数据剔除, 装置数据提取等, 形成具有软件反演格式的数据体文件。数据反演采用电阻层析成像反演软件 AGI 完成, 花岗岩电阻率值设为 $2000 \Omega\cdot\text{m}$, NaCl 水溶液电阻率值设为 $150 \Omega\cdot\text{m}$, 设定反演迭代次数 6 次, 误差控制 27.2% (见图 5(b))。设置初始化参数、正演参数及反演参数, 执行反演程序后获得反演电阻率数据体, 并可切取所需钻孔不同深度切面进行物理响应解释。

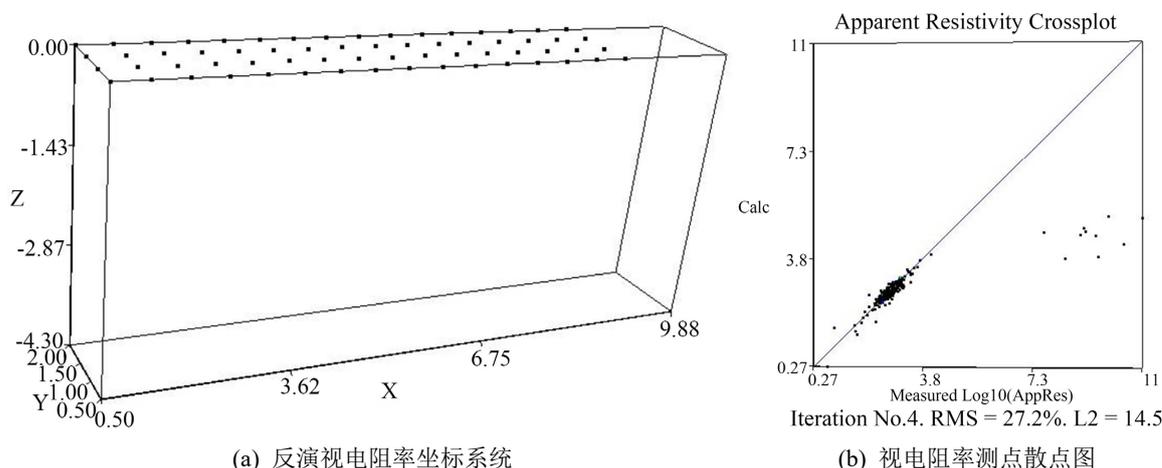


Figure 5. Coordinate system of measuring line and scatter diagram of measuring point of inverted resistivity image
图 5. 花岗岩裂隙面电阻层析成像测线坐标系统及测点散点图

数据反演时选择全场数据中单极 - 单极电位值或单极 - 偶极电位差值进行处理。电阻率三维反演问题的一般形式可表示为:

$$\Delta d = G\Delta m \quad (1)$$

式中, G 为 *Jacobi* 矩阵行列式; Δd 为观测数据 d 和正演理论值 d_0 的残差向量; Δm 为初始模型 m 的修改向量。

将模型剖分成三维网格, 求解各网格单元内的电导率值。由于反演参数太多, 传统的阻尼最小二乘反演往往导致过于复杂的模型, 即产生所谓多余构造, 它是数据本身所不要求的或是不可分辨的构造信息, 给解释带来困难。Sasaki 在最小二乘准则中加入光滑约束, 反演求得光滑模型, 提高了了解的稳定性。其求解模型修改量 Δm 的算法为:

$$(G^T G + \lambda C^T C)\Delta m = G^T \Delta d \quad (2)$$

式中, C 是模型光滑矩阵。

通过求解 *Jacobi* 矩阵 G 及大型矩阵逆的计算, 来求取各三维网格电性数据, 进一步得出裂隙面内及其不同深度的电阻率分布情况, 并进行地质解释。

(4) 结果分析

甘肃北山裂隙花岗岩作为高阻介质, 对电流具有阻碍作用, 而 NaCl 水溶液作为低阻介质, 通过压水试验对裂隙进行充填, 从而提高电阻层析成像的分辨率, 增加物理响应异常强度。表 3 对电阻层析成像探测花岗岩网络状渗透结构裂隙面不同部位的异常体进行了统计与说明。图 6(a) 为 XC03、XC07、XC08 号孔不同时间段压水量视电阻率三维反演异常区域响应图, 图 6(b) 为 XC03、XC07、XC08 号孔不同时间段视电阻率反演压水量变化图。

由图 5 中可知, XC03、XC07、XC08 号孔在不同时间段压水过程中, 通过对钻孔内“加压加盐加水”, 岩体渗透结构充水后电性特征增强。鉴于花岗岩体的电阻率值较高, 确定低阻区相对视电阻率阈值为 400

$\Omega\cdot m$ ，低于阈值视电阻率区域解释为压水量变化区域。当加压盐水量 13.7 L 时，高密度电阻层析成像监测 XC03 号孔相应低电阻异常区域变化范围为 0.0128~0.0147 m^3 ，XC07 号孔低电阻异常区域变化范围为 0.0131~0.0143 m^3 ，XC08 号孔低电阻异常区域变化范围为 0.0133~0.0141 m^3 ；当加压盐水量 18.4 L 时，XC03 号孔相应低电阻异常区域变化范围为 0.0176~0.0193 m^3 ，XC07 号孔低电阻异常区域变化范围为 0.0179~0.0189 m^3 ，XC08 号孔低电阻异常区域变化范围为 0.018~0.019 m^3 ；当加压盐水量 26.4 L 时，XC03 号孔相应低电阻异常区域变化范围为 0.0259~0.027 m^3 ，XC07 号孔低电阻异常区域变化范围为 0.026~0.0268 m^3 ，XC08 号孔低电阻异常区域变化范围为 0.0262~0.0267 m^3 。由此可见，当三次不同压盐水量依次由 13.7 L、18.4 L、26.4 L 增大时，其测得的视电阻率变化范围也在变大，且呈现出正相关关系。结果表明，证明电阻层析成像探测裂隙岩体渗透结构具有科学性、可行性。

Table 3. Abnormal interpretation of resistivity tomography of network-like permeable structure
表 3. 网络状渗透结构电阻层析成像异常解释

压水量	异常编号	距原点坐标 m	视电阻率范围($\Omega\cdot m$)	异常响应范围(深度 m, 半径 m)	异常特征分析
13.7 L	XC03	(3.22, 0.25)	400~350	H = 0.71~1.13, $\varphi = 0.06$	第一次加压加盐加水后，裂隙充填盐溶液增加
	XC07	(1.15, 0.9)	350~300	H = 0.87~0.95, $\varphi = 0.45$	
	XC08	(0.9, 0.4)	300~260	H = 0.73~0.85, $\varphi = 0.5$	
18.4 L	XC03	(3.22, 0.25)	398~350	H = 1.06~1.35, $\varphi = 0.25$	第二次加压加盐加水后，裂隙充填盐溶液增加
	XC07	(1.15, 0.9)	350~300	H = 1.22~1.43, $\varphi = 0.7$	
	XC08	(0.9, 0.4)	300~269	H = 1.18~1.35, $\varphi = 0.75$	
26.4 L	XC03	(3.22, 0.25)	398~350	H = 1.11~1.41, $\varphi = 0.55$	第三次加压加盐加水后，裂隙充填盐溶液增加
	XC07	(1.15, 0.9)	350~300	H = 1.27~2.03, $\varphi = 0.95$	
	XC08	(0.9, 0.4)	300~269	H = 1.25~2.41, $\varphi = 1.05$	

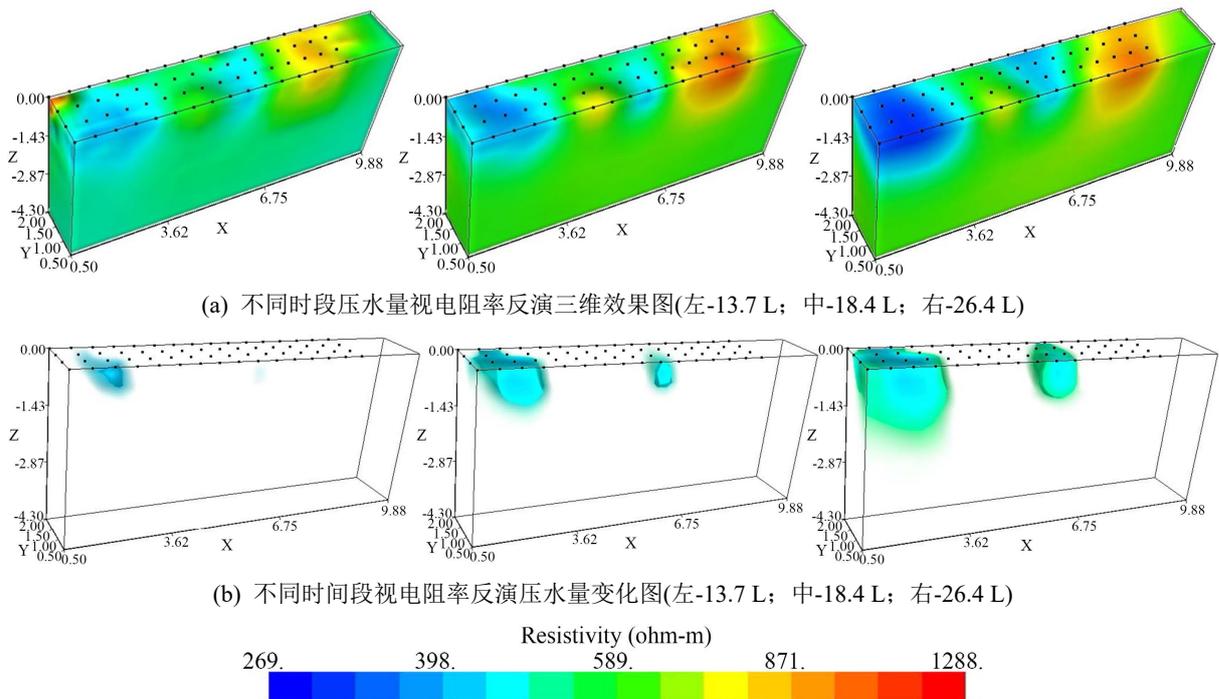


Figure 6. Inverted resistivity image of XC02~XC03、XC06~XC08 with ERT
图 6. ERT 监测 XC02~XC03、XC06~XC08 号孔不同段压水量反演视电阻率图

图 6(a)中 ERT 视电阻率反演结果显示, 低阻异常区($<400 \Omega \cdot m$)沿 $N65^\circ E$ 优势裂隙方向延伸, 与现场统计的 III 级结构面走向($N60^\circ \sim 70^\circ E$)高度吻合。当注水量从 13.7L 增至 26.4L 时, 异常区扩展呈现明显的方向选择性, 沿优势裂隙方向的扩展速率是垂直方向的约 3.1 倍, 证实构造应力形成的贯通性结构面主导渗流路径。压水试验过程中, XC07 孔注水 18.4L 时在距注水点 1.2 m 处的 XC08 孔率先出现电阻率响应(滞后时间 8 min), 而距离更近的 XC03 孔(0.9 m)响应滞后 22 min。表明微裂隙(V 级结构面)通过裂隙网络将水流重新分配, 局部闭合段产生绕流效应, 异常区形态不规则化(图 6(b)), 导致渗透路径呈现复杂树状分形特征。XC03 钻孔岩芯揭示部分裂隙含钙质胶结物(图 7), ERT 显示此类区域电阻率降幅显著小于清洁裂隙。表明充填物虽降低单裂隙渗透性, 实验室测试渗透系数下降 2 个数量级, 但通过阻截水流促使侧向分流, 反而增强网络系统的整体连通性, 这与压水量 - 异常体积线性关系揭示的系统级渗透能力提升现象一致。

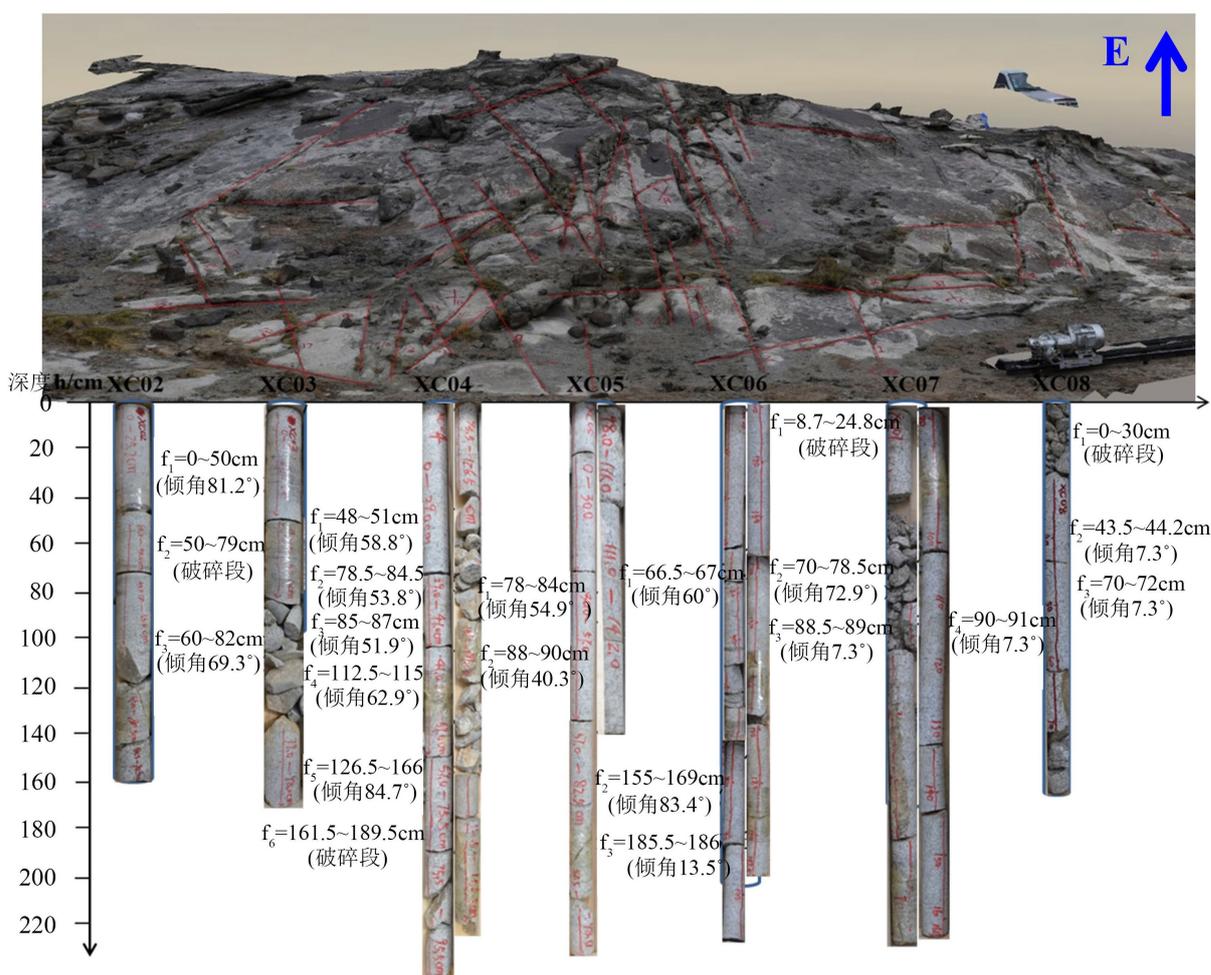


Figure 7. Photographs revealing fissures in core segments from borehole XC03

图 7. XC02-XC07 号孔不同段岩心裂隙揭露照片

4. 结论

甘肃北山高放废物处置预选区地质结构面主要分为 2 大类 5 小级: 一大类为断裂带, I 级结构面为区域断裂(数十公里级), 对区域构造起控制作用; II 级结构面为边界断裂(公里级), 对区域内处置库中核素

迁移起屏障作用，长度和宽度的差异是决定断裂宏观导水的主导因素；二大类为节理，III、IV级结构面为长大裂隙与小断层(数十米~数百米级)，V级结构面为处置孔周围微裂隙与节理(厘米~米级)，节理延伸长度和张开度是影响岩体局部稳定性和渗透性能的主要因素。本文针对V级结构面开展了裂隙渗透结构三维电阻率探测试验，得到以下结论：

(1) 采用电阻层析成像技术对网络状岩体渗透结构进行探测，结合压水试验，通过“加压加盐加水”人工驱动方式下，低电阻率异常信号增强。视电阻率反演结果表明，裂隙结构内电阻率变化值与原位压水试验压水量呈正相关关系。运用高效、无损的电阻层析成像技术，在花岗岩体渗透结构中探测具有科学性、可行性。

(2) 由于研究对象为网络状岩体裂隙，未能分离出单条裂隙水力参数与电性参数之间的关系。后期，将进一步分析岩体渗透结构中渗透率变化与电阻率变化值之间的定量方程，建立岩体内在渗透结构与电性结构之间关系，研发高分辨率的三维探测岩体渗透结构技术。

(3) 研究揭示了构造应力与风化作用的耦合控制机制。区域断裂系统奠定渗透网络格架，而风化作用通过物理扩隙、化学蚀变及生物作用改造局部渗透性能。渗透过程受优势结构面主导流向，裂隙网络调控分配，充填物质调节局部渗透能力。未来需开展显微CT-电阻率联测试验，建立裂隙几何参数与电性响应的定量转换模型。

基金项目

云南省教育厅科学研究基金项目“金沙江流域地质-地貌-气候多因素耦合作用及其孕灾机制研究”(2024J1071)；2024年度云南省本科高校基础研究联合专项-青年项目“云南省典型滑坡岩体结构面水力学特征及连通性研究”(202401BA070001-008)；2025年度昭通市“兴昭人才支持计划”项目；云财教(2024)104号中央资金高层次人才科研启动经费(S106240004)。

参考文献

- [1] Dezhen, G. and Sijing, W. (1981) On the Engineering Geomechanics of Rock Mass Structure. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, **23**, 109-111. <https://doi.org/10.1007/bf02594733>
- [2] Li, Q.B. and Yan, C.B. (2009) Classification of Permiability Structure Types of Rock Mass and Its Permiability Characteristics. *Journal of Engineering Geology*, **17**, 503-507.
- [3] 胡伏生, 杜强, 万力, 等. 岩体渗透结构与矿坑涌水强度关系[J]. 吉林大学学报(地), 2000, 30(2): 161-164.
- [4] 胡伏生, 万力. 岩溶裂隙介质的壳状渗透结构与矿山排水[J]. 水文地质工程地质, 2000, 27(2): 38-40.
- [5] 杜强, 李珀, 胡伏生, 等. 岩体渗透结构的条件模拟分析[J]. 水文地质工程地质, 2001, 28(1): 4-6.
- [6] Zhang, F. (2012) Analysis of Fractured Rock Mass Permeability Structure Types. *Journal of Engineering Geology*, **20**, 296-303.
- [7] Tsang, C. and Niemi, A. (2013) Deep Hydrogeology: A Discussion of Issues and Research Needs. *Hydrogeology Journal*, **21**, 1687-1690. <https://doi.org/10.1007/s10040-013-0989-9>
- [8] Neuman, S.P. and Di Federico, V. (2003) Multifaceted Nature of Hydrogeologic Scaling and Its Interpretation. *Reviews of Geophysics*, **41**, Article 1014. <https://doi.org/10.1029/2003rg000130>
- [9] Coronado, M. and Ramírez-Sabag, J. (2008) Analytical Model for Tracer Transport in Reservoirs Having a Conductive Geological Fault. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **62**, 73-79. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2008.07.001>
- [10] Yue, N., Wang, G., Kan, F., et al. (2017) Study of Low-Permeable Fractured Rock Mass in Three-Dimensional Infiltration Using High-Density Electrical Resistivity Tomography. *Journal of Lanzhou University*, **53**, 9-18.
- [11] 王刚, 刘汝学, 黄少文, 等. 基于高密度电阻率成像法的低渗透裂隙岩体水流入渗特征原位试验研究[J]. 中国科技论文, 2016, 11(3): 263-269.
- [12] 王刚, 周启友, 吴世艳, 等. 基于高密度电阻率成像法的基岩裂隙网络原位识别试验研究[J]. 地质论评, 2012, 58(1): 165-174.

-
- [13] 王刚. 高密度电阻率成像法在岩体裂隙及水流路径识别中的应用研究[D]: [博士学位论文]. 南京: 南京大学, 2010.
- [14] 周启友, 王刚, 吴世艳. 电阻率成像法的感度及其对岩体裂隙的整体分辨能力[C]//中国地球物理学会第二十五届年会论文集. 合肥: 中国科学技术大学, 2009: 299-300.
- [15] 伍开江, 周启友. 岩柱中水体入渗过程的高密度电阻率成像法研究[J]. 水文地质工程地质, 2005, 32(2): 76-81.
- [16] Caine, J.S., Evans, J.P. and Forster, C.B. (1996) Fault Zone Architecture and Permeability Structure. *Geology*, **24**, Article 1025. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1996\)024<1025:fzaaps>2.3.co;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1996)024<1025:fzaaps>2.3.co;2)
- [17] Faulkner, D.R., Lewis, A.C. and Rutter, E.H. (2003) On the Internal Structure and Mechanics of Large Strike-Slip Fault Zones: Field Observations of the Carboneras Fault in Southeastern Spain. *Tectonophysics*, **367**, 235-251. [https://doi.org/10.1016/s0040-1951\(03\)00134-3](https://doi.org/10.1016/s0040-1951(03)00134-3)
- [18] 侯学渊, 范文田. 中国土木建筑百科全书, 隧道与地下工程[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- [19] 凡净, 张平松, 吴荣新, 等. 大倾角煤层底板岩层富水性立体电法探测[J]. 矿业安全与环保, 2014(3): 54-56, 60.