

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2025.226>



# 基于多源信息的岩溶区岩体完整 与溶蚀程度规律及评估研究

李 漪<sup>1</sup>, 王友恒<sup>2</sup>, 蔡玉娟<sup>2</sup>, 蔡静森<sup>2</sup>, 郝永浩<sup>2</sup>, 晏鄂川<sup>2</sup>

1. 湖北省电力规划设计研究院有限公司, 湖北武汉 430040

2. 中国地质大学工程学院, 湖北武汉 430074

**摘要:** 岩溶洼地或冲沟汇集区为抽蓄工程建设提供了天然的有利地形条件, 减少开挖量及建设成本; 但此处强烈的岩溶作用将孕育多种潜在的工程地质问题, 不利于工程建设; 合理地评估岩溶区岩体完整程度和溶蚀程度是其中的关键问题. 为克服评估过程中指标测定条件非简易满足、重复琐碎耗精力和区分精细度不够等问题, 以秭归岩溶区某抽水蓄能工程为例, 利用多源勘察信息, 包括钻孔岩芯、钻孔声波和钻孔电视影像, 三者协同互补, 揭示了研究区各地层岩体完整与溶蚀程度规律, 据此明确各地层岩体地质特点, 再根据地层岩体地质特点不同赋予地层标签, 以地层标签和岩体声波波速数据为输入, 采用加权随机森林方法(weighted random forests, WRF), 由此提出了一套适用于岩溶区岩体完整程度和溶蚀程度的多源信息融合评估方法. 结果表明: 相同位置的各信息相互关联, 只因勘察手段和信息来源不同, 信息的呈现形式存在差异; 研究区各地层岩体的地质特点有很大差别, 相应的各勘察手段信息的特征表现不尽相同, 这影响我们利用多源勘察信息对岩体完整和溶蚀程度的评估. 通过 1 073 个样本训练并用 118 个样本测试, 训练集/测试集完整程度评估吻合率达 95.67%/94.92%, 溶蚀程度评估测试集吻合率达 98.02%/97.46%, 且与野外针对性复勘校核结果吻合良好. 与传统方法相比, 本文方法综合利用了多源勘察信息, 通过地层标签将各地层岩体地质特点融入岩体完整和溶蚀程度评估, 更加高效、自动化与精细准确, 绕开了传统方法的固有问题, 便于岩溶区抽蓄工程岩体完整和溶蚀程度分级评价应用.

**关键词:** 岩溶区; 抽水蓄能工程; 岩体完整程度; 岩体溶蚀程度; 岩体地质特点; 多源勘察信息.

中图分类号: P642

文章编号: 1000-2383(2026)02-602-18

收稿日期: 2025-04-13

## Patterns and Evaluation of Rock Mass Integrity and Dissolution Degree in Karst Area Based on Multi-Source Data

Li Yi<sup>1</sup>, Wang Youheng<sup>2</sup>, Cai Yujuan<sup>2</sup>, Cai Jingsen<sup>2</sup>, Hao Yonghao<sup>2</sup>, Yan Echuan<sup>2</sup>

1. PowerChina Hubei Electric Engineering Co., Ltd., Wuhan 430040, China

2. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

**Abstract:** Karst depressions and gully convergence zones offer favorable topographic conditions for the construction of pumped storage power stations, reducing excavation volumes and construction costs. However, intense karstification in these regions

**基金项目:** 中国地质大学(武汉)教学实验室开放基金项目(Nos. SKJ2023002, SKJ2024002); 企业技术服务研究项目(No. 03-Q-Q-2023-025).

**作者简介:** 李漪(1987-), 男, 硕士, 正高级工程师, 主要研究方向为电力工程岩土体稳定性及利用. ORCID: 0000-0002-2591-2706. E-mail: liyisj@powerchina-hb.com

\* **通讯作者:** 蔡静森, ORCID: 0000-0002-7260-0772. E-mail: jingsenca@cug.edu.cn

**引用格式:** 李漪, 王友恒, 蔡玉娟, 蔡静森, 郝永浩, 晏鄂川, 2026. 基于多源信息的岩溶区岩体完整与溶蚀程度规律及评估研究. 地球科学, 51(2): 602-619.

**Citation:** Li Yi, Wang Youheng, Cai Yujuan, Cai Jingsen, Hao Yonghao, Yan Echuan, 2026. Patterns and Evaluation of Rock Mass Integrity and Dissolution Degree in Karst Area Based on Multi-Source Data. *Earth Science*, 51(2): 602-619.

introduces complex engineering geological risks. Accurate evaluation of rock mass integrity and karstification degree is therefore critical for safe and efficient project development. (Purpose/Significance) To resolve challenges in the assessment process, such as difficulty meeting index measurement requirements, tedious repetitive work, and insufficient differentiation precision this study takes a pumped storage project in the Zigui karst area as a case. It uses multi-source exploration data (including drilled rock cores, borehole sound wave, and borehole TV images) for mutual complementarity. This reveals the patterns of rock mass integrity and dissolution degree across different strata in the study area, identifies the geological characteristics of each stratum, and assigns stratum labels accordingly. With stratum labels and rock mass acoustic wave velocity data as inputs, the Weighted Random Forests (WRF) method is applied to propose a multi-source information fusion assessment method for rock mass integrity and dissolution degree in karst areas. (Method) The results show that the various types of information at the same location are interrelated, and the differences in the presentation forms of the information only arise from the different exploration methods and information sources; there are significant differences in the geological characteristics of rock masses in different strata of the study area, and the corresponding characteristic manifestations of information from various exploration methods also vary, which affects the evaluation of rock mass integrity and dissolution degree using multi-source exploration information. The proposed method was trained with 1 073 samples and tested with 118 samples. The consistency rates for integrity assessment in the training set/test set reached 95.67%/94.92%, and the consistency rates for dissolution degree assessment in the training set/test set reached 98.02%/97.46%. Moreover, the results are in good agreement with the field targeted re-exploration and verification results. (Result) Compared with traditional methods, the proposed approach achieves higher accuracy, finer resolution, and improved automation, while effectively accounting for stratigraphic geological features. It provides a practical and efficient tool for evaluating engineering rock mass quality in karst-area pumped storage projects.

**Key words:** karst area; pumped storage project; rock mass integrity; rock mass dissolution degree; rockmass geological characteristics; multi-source investigation data.

## 0 引言

抽水蓄能电站是一种特殊形式的水电站,其工程建设需依山借势.例如,抽水蓄能电站站址应选在地形高陡、高差较大的地区,这样的地形条件具有良好的水头利用条件.岩溶洼地或冲沟为上水库提供了绝佳地形条件,减少了开挖量及建设成本.因此,抽水蓄能电站上水库常选择岩溶区进行建设(郭果等,2025).然而,受岩性、构造及岩溶水文地质条件等因素控制,岩溶区溶孔溶隙、溶沟溶槽、落水洞、溶洞等岩溶现象较为普遍且分布差异大,其岩体完整程度和溶蚀程度具有强烈的非均质性,相应地产生许多工程地质问题,如上水库库盆岩溶渗漏问题和地基不均匀沉降、岩溶塌陷等稳定性问题.因此,合理地评估岩溶区工程岩体完整程度和溶蚀程度,是关系到岩溶区抽水蓄能工程建设安全和成本的重要问题.

各类工程应用与研究利用勘察获得的信息确定场地岩体完整程度和溶蚀程度.最常利用的勘察信息是钻孔岩芯,相应的研究最多.例如,陈金桥(2023)根据研究区的钻孔岩芯图像建立数据集,构建了水工岩体完整性评价模型.Baraboshkin *et al.* (2022)在岩芯图像样本较少的情况下,采用图像扩

增方法生成样本数据集,结合UNet网络和ResNet模型实现岩芯的识别,用于岩体完整程度分析.曹贤发等(2020)根据研究区各勘察阶段的钻孔岩芯资料,结合传统的线溶蚀率、遇洞率等参数,提出新的岩溶发育程度评价指标.

钻孔声波也是常被利用的勘察信息.例如,Zhang *et al.* (2021)建立了钻孔超声图像分形盒维数与岩体岩石质量指标(RQD)的联系,研究发现基于钻孔超声波成像提取的参数可作为深部岩体完整性快速评价的可靠指标.李明超等(2020)基于岩体对穿声波波速数据和加权随机森林方法建立多尺度岩体完整性评价指标,对岩体完整性进行不同尺度的精细化评价.丰赞等(2020)总结了岩溶勘察的各种方法,指出可以利用钻孔声波查明岩溶发育程度及范围.

还有的研究中利用了钻孔电视影像信息.例如,陈睿等(2025)通过钻孔电视测试技术对四川一露天高边坡开展测试,提出基于钻孔电视技术的岩体完整性指标.Wang *et al.* (2022)利用钻孔电视图像及其他钻孔测试数据,基于多元数据分析,建立岩体完整程度评价方法.彭耀等(2018)在武汉地铁岩溶勘察中运用钻孔电视成像技术,直接观测岩体完整性、岩溶与裂隙发育及充填情况.

除此之外,其他一些物探及测试手段也被用于岩体完整程度和溶蚀程度的评估.例如,Hasan *et al.* (2023)提出了一种基于电阻率成像技术评估岩体完整性系数的方法.Chen *et al.* (2023)采用三维激光扫描技术,结合改进区域生长算法,开展了岩体完整性快速评价研究.张优等(2016)借雷达波反射强度划分隧道岩体完整、裂隙及溶蚀区.

虽然各个勘察手段信息均能单独用于评估岩体完整和溶蚀程度,但毕竟它们依赖于各自的原理,由此提供的信息具有片面性,这影响我们利用这些勘察信息对岩体完整和溶蚀程度的评估.更好的方式是把这些信息综合起来,方能使多源勘察信息互为补充、获得综合可靠的规律认识,进而提高岩体完整程度和溶蚀程度的评估精度.目前这方面的研究越来越多,如 Wang *et al.* (2025)提出基于钻孔图像、声波、雷达数据融合的巷道围岩多尺度完整性的综合评价.Chen *et al.* (2023)采用高光谱成像技术、X射线衍射等数据,通过分形维数计算和随机森林回归模型,开展碳酸盐岩溶蚀程度研究.Kin-pour *et al.* (2022)综合利用纵波速度和电阻率等数据,通过模糊 C-均值聚类方法,建立了灰岩溶蚀程度的预测模型.这些研究不仅综合利用了多源勘察信息,而且多采用机器学习方法来实现多源勘察信息的融合,表现出高效、自动的数据处理能力和较高的岩体特性评估的准确度(师学明等,2025;王统荣等,2025).这方面研究的不足之处在于:多个勘察手段信息的关联情况及各个信息解译的岩体完整/溶蚀程度的对应情况仍有待探讨,且在具备多勘察信息条件时,值得开展场地各地层地质特点及其岩体完整与溶蚀程度规律的研究工作.

综上所述,本文以秭归岩溶区某抽水蓄能工程为例,利用多个勘察手段信息,包括钻孔岩芯、钻孔声波和钻孔电视影像,三者协同互补,揭示了研究区场地各地层岩体完整与溶蚀程度规律,据此明确各地层岩体地质特点,再根据地层岩体地质特点不同赋予地层标签,以地层标签和岩体声波波速数据为输入,通过加权随机森林方法(weighted random forests, WRF),提出了一套新的岩体完整程度和溶蚀程度的评估方法;最后将预测评估结果与现场复勘认识对比,验证方法的可靠性.

表 1 岩体完整程度分级表

Table 1 Classification table of rock mass integrity

| RQD 值   | 岩体完整程度分级 | 岩体完整程度 |
|---------|----------|--------|
| <25%    | I        | 极破碎    |
| 25%~50% | II       | 破碎     |
| 50%~75% | III      | 较破碎    |
| 75%~90% | IV       | 较完整    |
| >90%    | V        | 完整     |

注:据工程岩体分级标准(中华人民共和国国家标准编写组,2015)

表 2 岩体溶蚀程度分级表

Table 2 Classification table of rock mass dissolution degree

| 线溶蚀率 $k$ | 岩体溶蚀程度分级 | 岩体溶蚀程度 |
|----------|----------|--------|
| 0%~5%    | I        | 微溶蚀    |
| 5%~20%   | II       | 低溶蚀    |
| >20%     | III      | 高溶蚀    |

注:据建筑地基基础设计规范(中华人民共和国住房和城乡建设部,2012)

## 1 勘察信息解译方法

### 1.1 岩芯钻探

岩芯钻探是指钻井中刻取并取出岩芯,用以研究地下地质情况的钻探方法(杜平等,2014).钻探岩芯的完整程度通过岩石质量指标 RQD 得到(表 1),RQD 值为钻探每次进尺中长度大于 10 cm 的柱状岩芯的累计长度与每次钻探进尺的比值.实际工程中,岩芯可能受到钻掘影响而破碎,这不利于基于岩芯对原位岩体完整程度的评判.

钻探岩芯的溶蚀程度通过线溶蚀率  $k$  确定(表 2),线溶蚀率指溶蚀洞隙的钻探进尺之和与钻探总进尺的比值.受钻掘破碎影响,通过岩芯判断溶蚀程度困难.即便能够从中辨别机械致碎的裂隙,破碎的岩体条件也不利于岩体溶蚀程度的观察与评判.

### 1.2 钻孔声波测试

钻孔声波测试(王宇等,2015)是利用超声波在岩土体介质中的传播波速、振幅、频率和能量的变化来确定岩土体的物理力学性质的一种钻孔原位测试技术(图 1),钻孔声波波速由式 1 确定.

$$V_i = \frac{\Delta L}{t_1 - t_2}, \quad (1)$$

式中:  $V_i$  为第  $i$  个测点位置岩体纵波速度;  $\Delta L$  为接收器布置间距,本文设置为 0.2 m;  $t_1$  为滑行波自声源发出至接收器 R1 的时间,  $t_2$  为滑行波自声源发出

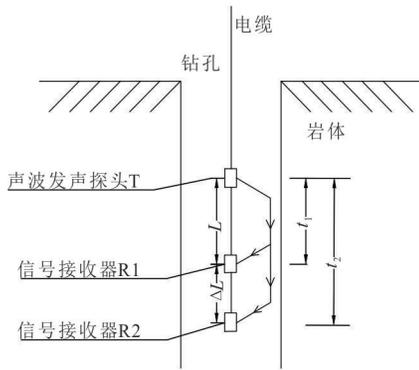


图 1 单发双收钻孔声波测试原理图

Fig.1 Schematic diagram of single transmission and dual reception borehole sonic testing

至接收器 R2 的时间。

利用声波速度对岩体完整程度进行评估,主要是通过测得的声波速度先计算完整性指数  $K_v$ ,再按表 3 对岩体的完整程度进行分级。其中完整性指数  $K_v$ 按式 2 计算:

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

式中:  $V_{pr}$ 是该岩性各分段岩芯(岩体)的弹性纵波速度,  $V_{po}$ 是各岩性岩石的弹性纵波速度,需对现场钻孔编录人员划分的岩性中的新鲜完整岩芯(岩石)进行纵波速度测量获得。由此可见,在实际应用中,需要以新鲜岩芯纵波速度为参考,这涉及到不同岩性的新鲜岩芯(岩石)的获取、界定及其纵波速度测量,此条件在实际中并非简易满足。例如,当地地层岩体均较风化破碎时,本方法的适用性就很差。正因为此,本文简单地将各地层的  $V_{po}$ 均设置为研究区内纵波波速测量的最大值 6.55 km/s,进而能够利用表 3 中分级界限值和式 2 反算出岩体完整程度分级的纵波波速界限值(见下图 3~图 5 中的红色线)。由此判断的岩体完整程度仅使用了实测纵波速度信息。

对于利用波速评估岩体溶蚀程度,水利水电工程地质勘察规范(中华人民共和国国家标准编写组,2009)指出可根据测定的波速大小来圈定钻孔的岩溶深度范围。这主要利用的是波速大小在不同条件岩体的相对变化进行的推估。事实上,由于波速大小受如岩石的孔隙度、饱和度、岩体裂隙发育程度等多种因素影响,波速无法明确对应到溶蚀程度,有关规范中也未明确不同溶蚀程度的波速界限。

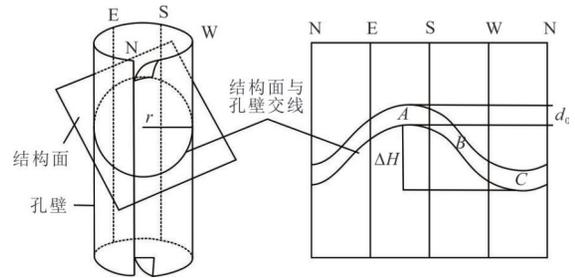


图 2 结构面展开示意图

Fig.2 Schematic diagram of structural plane development

表 3 基于完整性指数的岩体完整程度分级表

Table 3 Classification table of rock mass integrity based on integrity index

| 完整性系数 $K_v$ | 岩体完整程度分级 |
|-------------|----------|
| <0.15       | 极破碎      |
| 0.15~0.35   | 破碎       |
| 0.35~0.55   | 较破碎      |
| 0.55~0.75   | 较完整      |
| >0.75       | 完整       |

注:据水利水电工程地质勘察规范(中华人民共和国国家标准编写组,2009)

表 4 基于钻孔电视的岩体完整程度分级表

Table 4 Classification table of rock mass integrity based on borehole televiewing

| 岩体完整程度 | 结构面间距(m) | 结构面结合程度  |
|--------|----------|----------|
| 极破碎    | 无序       | 结合差      |
| 破碎     | <0.2     | 结合一般或结合差 |
|        | 0.2~0.4  | 结合差      |
| 较破碎    | 0.2~0.4  | 结合一般     |
|        | 0.4~1.0  | 结合差      |
| 较完整    | 0.4~1.0  | 结合好或结合一般 |
|        | >1.0     | 结合差      |
| 完整     | >1.0     | 结合好或结合一般 |

注:据岩土工程勘察规范(中华人民共和国国家标准编写组,2002)

### 1.3 钻孔电视成像

钻孔电视成像的工作原理是利用带有锥形反射棱镜的摄像头对钻孔孔壁进行扫描,将采集到的数字信号实时转换为 360°全方位图像。这些图像经过校正、展开和拼接处理,生成连续的全孔壁展示图,由此显示和记录孔壁岩土体的完整状况及断层、裂缝、节理等。

钻孔电视成像的结构面解译采用解析几何的方法实现。具体而言,首先将孔壁图像沿 N(北)→E(东)→S(南)→W(西)→N(北)(该方向定义为  $x$  方

表 5 各勘察信息评估岩体完整和溶蚀程度的原理和优缺点对比

Table 5 Comprehensive comparison of principles, advantages and disadvantages of various survey information for evaluating rock integrity and dissolution degree

| 勘察手段 | 钻孔岩芯                                       | 声波测试  | 钻孔电视   |
|------|--|---|--|
| 基本原理 | 根据原位岩芯的 RQD 和线溶蚀率 $k$ 确定岩体完整程度和溶蚀程度        | 根据完整性系数 $K_v$ 确定岩体完整程度, 根据波速大小来圈定钻孔的溶蚀深度范围                                    | 根据孔壁图像结构面间距和结合程度确定岩体完整程度, 根据孔壁溶蚀形态、溶蚀尺寸等确定溶蚀发育情况                 |
| 优点   | 直观观察岩芯的完整特点与溶蚀现象                           | 钻孔波速为连续信息, 反映岩体的完整程度、溶蚀程度   | 可视化孔壁原位结构面和溶蚀形态  |
| 缺点   | 受钻掘破碎影响, 破碎的岩体条件不利于完整和溶蚀程度评估, 且工作重复, 人工成本高 | $K_v$ 需要以新鲜岩芯纵波速度为参考, 地层岩体均较风化破碎时, 适用性变差; 波速无法明确对应到溶蚀程度, 有关规范中也未明确不同溶蚀程度的波速界限 | 受环境/光线影响, 图像及其识别的结构面数目及岩体完整程度精度差; 无法直接得到孔周岩体内部的溶蚀情况; 量化影像数据仍有待实践 |

向)展开(图 2). 结构面的产状和宽度信息可以通过三点法或两点法进行测定. 三点法通过识别正弦曲线的波峰点 A、波谷点 C 及中间点 B, 结合其几何特性进行计算; 而两点法则通过测量波峰点 A 和波谷点 C 并结合其几何特性进行计算:

$$\alpha = x_1/r, \quad (3)$$

$$\beta = \tan^{-1}(\Delta h/2r), \quad (4)$$

$$d = d_0 \cos \beta, \quad (5)$$

上式中:  $x_1$  为结构面迹线最低点的  $x$  坐标;  $r$  为钻孔半径;  $\alpha$  为结构面的倾向(弧度);  $\Delta h$  为最高点与最低点的高差;  $\beta$  为结构面的倾角;  $d$  为结构面的厚度;  $d_0$  为结构面在孔壁上的出露厚度.

依据岩土工程勘察规范(中华人民共和国国家标准编写组, 2002), 利用钻孔电视图像和解译的结构面密度及结合程度等, 可对岩体完整程度进行划分(表 4). 实际应用中受光线及孔壁泥浆影响, 钻孔电视图像及识别出的结构面数目和张开度精度差, 确定的岩体完整程度与实际存在差异.

利用钻孔电视成像评估岩体溶蚀程度, 主要是观察孔壁图像上溶蚀形态、溶蚀尺寸等岩溶发育情况, 进而对钻孔处岩体溶蚀程度做出判断. 由于钻孔电视只能反映孔壁表面溶蚀情况, 无法直接得到孔周岩体内部的溶蚀情况, 而声波测试信息有望弥补这一方面. 其次, 钻孔电视是影像数据, 如何利用其量化溶蚀信息也有待实践.

综上所述, 岩芯钻探、钻孔声波测试及钻孔电视等勘察手段因其方法原理不同, 信息的呈现形式存在差异, 在利用其评估岩体完整和溶蚀程度时优缺点各异(表 5), 常存在指标测定条件非简易满足、重复琐碎耗精力和区分精细度不够等问题, 有必要使不同勘察手段信息互为补充, 综合利用, 方能获

得可靠的认识与评估结果.

#### 1.4 研究区地层岩体地质特点的多源勘察信息解译分析

研究区位于湖北省秭归县磨坪乡, 地势南高北低, 坡度在  $25^\circ \sim 35^\circ$  之间; 区内地质构造以断层为主, 共发育 3 条正断层, 岩体节理裂隙较为发育; 区内地层岩性主要有二叠系基岩地层和第四系覆盖层, 可溶岩地层主要分布在栖霞组 ( $P_1q$ )、茅口组 ( $P_2m$ )、吴家坪组 ( $P_3w$ ) 中, 岩性以灰岩为主; 难溶或不溶地层分布在孤峰组 ( $P_2g$ )、龙潭组 ( $P_2l$ )、第四系 (Q) 中, 岩性以泥灰岩、泥岩、煤层、含碎石黏性土为主; 岩溶发育, 多为沿地层层面向倾向方向, 其深度受控于节理裂隙分布长度; 多因素组合下发育多种形态的溶蚀构造, 主要包括大尺度的溶洞、岩溶洼地、落水洞、溶沟溶槽、石芽以及小尺度的溶孔、溶隙等.

虽然钻探、声波测试及电视成像原理及解译方法存在差异, 但在利用其解译得到研究区各类地质信息及对比后发现: 相同位置的各种信息相互关联, 只因勘察手段不同, 信息的呈现形式与状态存在差异.

吴家坪组岩性为中厚层灰岩(岩芯呈灰色、钻孔电视图像偏蓝紫色), 含少量方解石岩脉(岩芯及钻孔电视呈白色条纹), 节理较发育、多为张开节理且无充填(钻孔电视密集分布的倾斜曲线, 具有厚度且中空). 岩体完整性较差且岩溶发育强烈(图 3a), 岩芯 RQD 值为 57%, 线溶蚀率为 32%. 22.9~23.3 m 段岩溶形态以大尺寸孔洞为主, 相应波速较小 ( $2.14 \sim 3.01$  km/s), 完整程度为极破碎, 电视图像见不规则裂隙(间距  $< 0.2$  m、无序且结合差).

茅口组岩性有厚层灰岩(岩芯呈浅灰色)、中厚层燧石灰岩和条带燧石灰岩(岩芯呈黑色), 节理裂隙发育程度低, 岩体完整性较好. 图 3b 为完整茅口

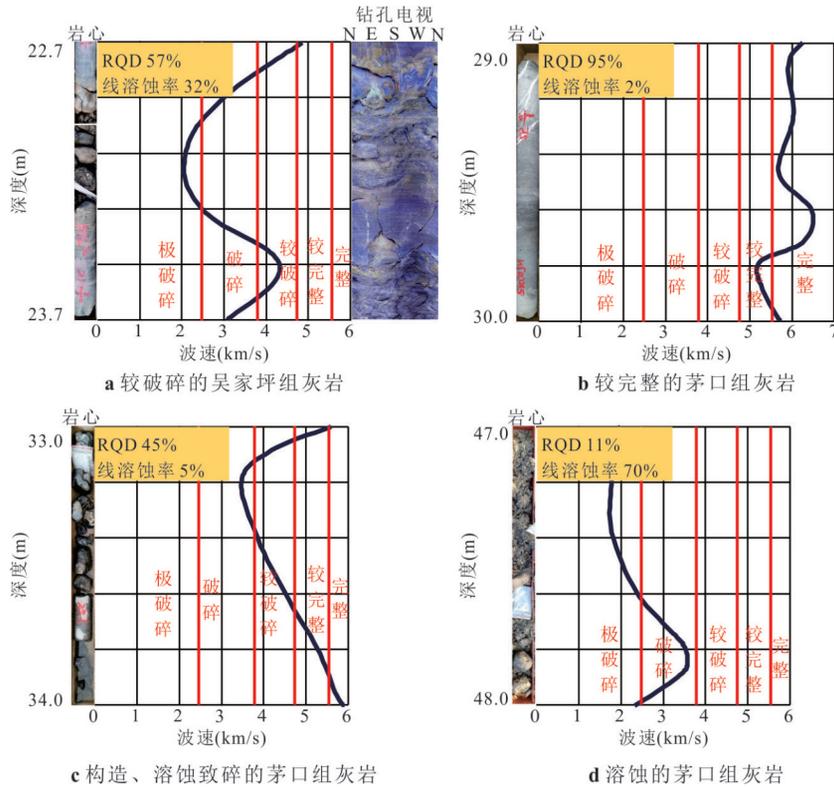


图 3 吴家坪组、茅口组岩芯解译图

Fig.3 Core interpretation diagram of Wujiaping Formation and Maokou Formation

组灰岩,岩芯 RQD 值为 95%,相应的波速大(5.21~6.41 km/s). 图 3c 茅口组灰岩受构造影响,RQD 值为 45%,钻孔波速为 3.29~5.68 km/s,岩体完整程度为较破碎;岩体溶蚀程度较低,线溶蚀率为 5%. 图 3d 为茅口组高溶蚀灰岩,线溶蚀率为 70%,溶蚀形态以泥质填充的溶洞为主,岩芯 RQD 小于 25%,波速较小(1.75~3.42 km/s).

栖霞组岩性为厚层状灰岩(岩芯呈深灰色),局部含少量燧石结核(岩芯中黑色圆块)和方解石脉,溶蚀发育强烈,溶蚀形态以溶孔为主,岩体完整性较好,部分位置岩体完整性差. 图 4a 为完整的栖霞组灰岩,岩芯 RQD 值为 93%,溶蚀程度低,线溶蚀率为 6%,孔壁岩体波速大(5.95~6.41 km/s). 图 4b 为较破碎的栖霞组灰岩,岩芯 RQD 值为 49%,线溶蚀率为 16%,相应的波速略小(3.42~5.81 km/s),如 36.6~36.7 m 段波速为 3.42 km/s,岩体破碎,而 36.2~36.4 m 段波速较大,介于 5.32~5.81 km/s,表明实际岩体完整程度为较完整~完整,所见岩芯为钻进时机械致碎. 图 4c 为栖霞组高溶蚀的灰岩,岩芯 RQD 值为 15%,线溶蚀率为 84%,岩芯碎散但对应波速较大(5.32~6.05 km/s),这是因为栖霞组溶蚀孔洞内多为水体,水体对溶蚀孔洞的充填作用弥

补了岩体之间的空隙,使声波传播路径更为通畅.

龙潭组岩性由泥岩(岩芯为灰黑色,钻孔电视图像光滑,偏蓝紫色)和煤层(岩芯为黑色,钻孔电视图像崎岖不平)组成,无岩溶发育. 图 4d 为龙潭组极破碎~破碎泥岩,岩芯 RQD 值为 25%,对应波速较小(2.29~2.63 km/s). 图 5a 为龙潭组破碎煤层,岩芯 RQD 为 25%,电视图像上煤层凹凸不平,对应波速较小(2.66~3.47 km/s).

孤峰组岩性为中厚层泥灰岩(岩芯呈深灰色)及方解石组分高的泥灰岩(岩芯呈灰白色). 图 5b 孤峰组泥灰岩岩芯 RQD 值为 88%,线溶蚀率为 10%,电视图像上岩层面被方解石填充闭合(白色正弦曲线)且较缓(正弦曲线振幅较小),对应波速较大(3.01~5.32 km/s),40.6~41.0 m 较完整泥灰岩波速大于 5 km/s,41.0~41.6 m 段内的泥灰岩破碎,电视图像上结构面间距小于 0.2 m 且结合差,波速小于 4 km/s. 图 5c 为孤峰组方解石组分高的泥灰岩,岩芯 RQD 值为 75%,线溶蚀率为 5%,岩体实际完整程度为较完整,因方解石组分增加,岩芯及电视图像颜色偏白,对应波速较小(3.85~4.26 km/s). 图 5d 孤峰组泥灰岩线溶蚀率为 15%,溶蚀形态以溶隙为主(电视图像见不规则凹陷),31.2~31.4 m 溶

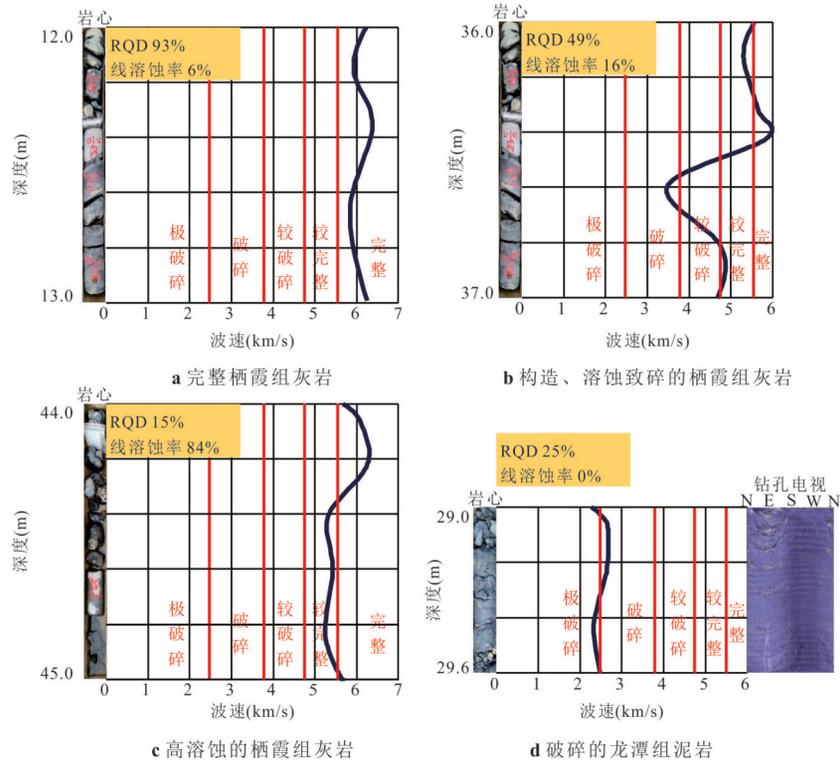


图 4 栖霞组、龙潭组岩芯解译图

Fig.4 Core interpretation diagram of Qixia Formation and Longtan Formation

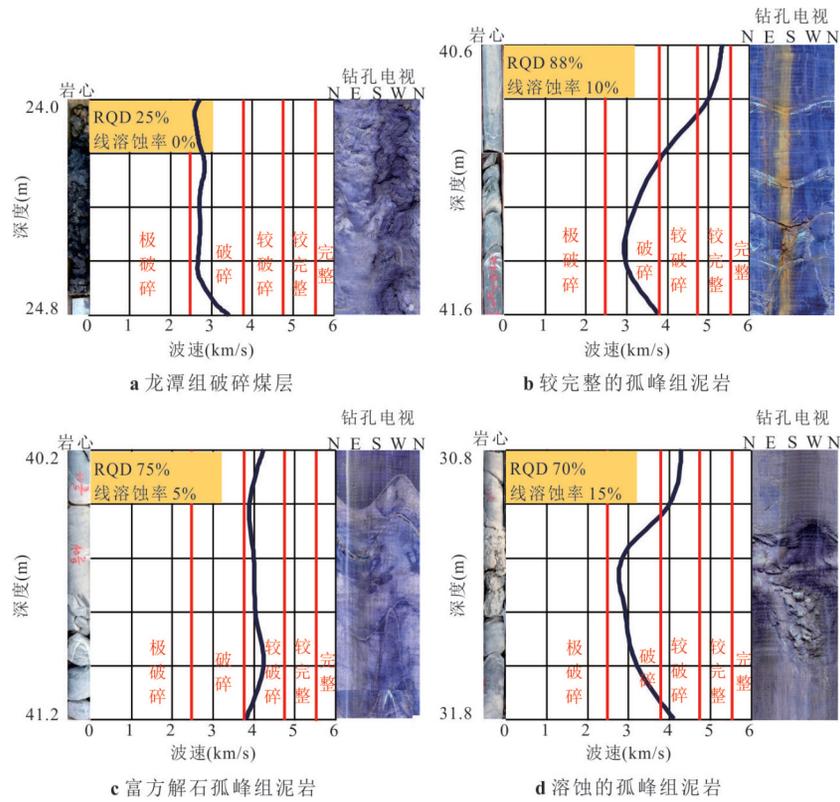


图 5 龙潭组、孤峰组岩芯解译图

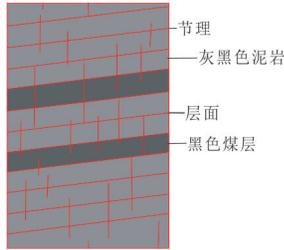
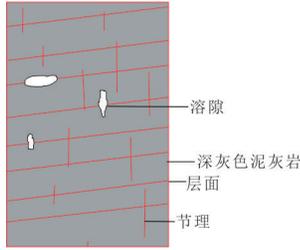
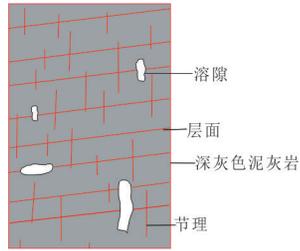
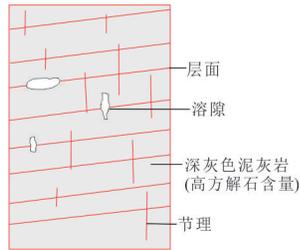
Fig.5 Core interpretation diagram of Longtan Formation and Gufeng Formation

表 6 研究区地层岩体地质特点统计表

Table 6 Statistical summary of stratigraphic geological characteristics in study area

| 地层年代 | 岩性        | 层厚  | 完整情况 | 溶蚀情况 | 示意图  | 钻孔波速范围(km/s) |
|------|-----------|-----|------|------|--|--------------|
| 吴家坪组 | 灰—深灰色灰岩   | 中厚层 | 较破碎  | 高溶蚀  | <p>灰—深灰色灰岩<br/>方解石脉<br/>层面<br/>(溶孔)泥质填充<br/>节理</p>         | 2~4          |
| 茅口组  | 浅灰—灰色灰岩   | 厚层  | 较完整  | 低溶蚀  | <p>节理<br/>溶隙<br/>燧石条带<br/>浅灰—灰色灰岩<br/>层面</p>               | >5           |
|      |           |     | 较破碎  | 高溶蚀  | <p>节理<br/>(溶孔)泥质填充<br/>燧石条带<br/>浅灰—灰色灰岩<br/>层面</p>         | 3~5          |
| 栖霞组  | 深灰色灰岩     | 厚层  | 较完整  | 低溶蚀  | <p>节理<br/>溶隙<br/>深灰色灰岩<br/>方解石脉<br/>层面</p>                 | >5           |
|      |           |     | 较破碎  | 高溶蚀  | <p>层面<br/>(溶孔)泥质填充<br/>节理<br/>方解石脉<br/>深灰色灰岩</p>           | 3~5          |
|      | 深灰色灰岩(饱水) |     | 较破碎  | 高溶蚀  | <p>深灰色灰岩<br/>地下水位线<br/>(溶孔)水体填充<br/>节理<br/>方解石脉<br/>层面</p> | >4           |

续表 6

| 地层年代 | 岩性             | 层厚  | 完整情况 | 溶蚀情况 | 示意图  | 钻孔波速范围(km/s) |
|------|----------------|-----|------|------|--|--------------|
| 龙潭组  | 灰黑色泥岩、黑色煤层     | 薄层  | 较破碎  | 无    |    | 2~3          |
| 孤峰组  | 深灰色泥灰岩         |     | 较完整  |      |    | >5           |
|      |                | 中厚层 | 较破碎  | 低溶蚀  |   | 2~5          |
|      | 深灰色泥灰岩(高方解石含量) |     | 较完整  |      |  | 3~4          |

蚀段内波速较小(2.78~2.94 km/s).

由此可见,各地层的地质特点有很大差别,相应的各勘察手段信息(如岩芯、声波波速、钻孔电视图像等)的特征表现不尽相同,这影响我们利用这些勘察信息对岩体完整和溶蚀程度的评估.例如,波速对岩体完整程度和溶蚀程度的反映受到地层岩性影响.为了便于后续岩体完整和溶蚀程度评估与分级,将研究区常见地层岩体的地质特点汇总整理(表6).

## 2 基于多源勘察信息融合的岩溶区岩体完整与溶蚀程度确定方法

本节首先明确多源勘察信息的综合利用策略;接着,分析不同地层岩体完整和溶蚀程度指标规律.基于此,利用加权随机森林算法,分别提出岩体

完整程度和溶蚀程度评估的机器学习模型.

### 2.1 多源勘察信息利用策略

钻孔声波测试结果为量化数据且对各地层岩石的孔隙度、裂隙密度、岩性变化十分敏感,能够显示细微的地层变化和不均匀性,甚至在岩芯样品未能显现的情况下识别出隐蔽的层间或构造特征,这为我们对地层完整程度和溶蚀程度的精细划分奠定了基础.钻孔岩芯和钻孔电视分别为孔内岩芯及孔壁岩体的直观展示,如岩芯的颜色、层厚信息,钻孔电视图像上的孔壁岩体裂隙与溶蚀发育情况.然而,岩芯在钻探过程可能受到机械破坏、应力释放等影响,岩芯与原位地层特性不一定完全相同或其条件不利于观察评估;钻孔电视图像需要人为解读,受主观影响较大.因此,在评估岩体完整程度与溶蚀程度时,可通过声波数据综合反映岩体完整与溶蚀情况的变化,而岩芯及钻孔电视更适合以佐

表7 不同地层岩体完整程度及其波速范围

Table 7 Integrity levels and velocity ranges of different stratigraphic rock masses

| 地层岩性       | 地层标签 | 完整程度 | 波速(km/s) |
|------------|------|------|----------|
| 吴家坪组灰岩     | 1    | 较破碎  | 2~4      |
| 茅口组、栖霞组灰岩  | 2    | 较完整  | >5       |
| 栖霞组饱水灰岩    | 3    | 较破碎  | 3~5      |
| 龙潭组泥岩、煤层   | 4    | 较破碎  | >4       |
| 孤峰组泥灰岩     | 5    | 较完整  | 2~3      |
| 孤峰组富方解石泥灰岩 | 6    | 较破碎  | >5       |
|            |      | 较完整  | 2~5      |
|            |      | 较完整  | 3~4      |

证、形象化的方式来提供并丰富相应位置地层岩体的地质特点信息(图3~图5)。

## 2.2 指标规律认识

对于完整程度指标,本文综合考虑地层的岩性、层厚、完整情况及钻孔波速范围(表6),进行分组或合并处理。例如,茅口组与栖霞组灰岩的完整情况及对应的波速区间基本一致,但在饱水条件下,栖霞组完整性差、波速却偏高;又如,孤峰组泥灰岩多为方解石重结晶,虽完整性较好,但波速值偏低。基于上述差异性,最终将研究区地层划分为六类:吴家坪组灰岩、茅口组和栖霞组灰岩、栖霞组饱水灰岩、龙潭组泥岩及煤层、孤峰组泥灰岩和孤峰组富方解石泥灰岩,分别用地层标签1至6表示(表7)。

同样,对于溶蚀程度指标,本文综合考虑地层的岩性、层厚、溶蚀情况及钻孔波速范围(表6),进行分组或合并处理。例如,高溶蚀的茅口组和栖霞组均发育大尺寸溶孔,但孔内充填物存在差异,导致两者在相似溶蚀强度下表现出不同的波速特征,因此将两者赋予不同的地层标签分开评估。按照这种思路,最终将研究区地层分为吴家坪组灰岩、茅口组灰岩、栖霞组灰岩、龙潭组泥岩和煤层、孤峰组泥灰岩五类,分别用地层标签1、2、3、4和5表示(表8)。

## 2.3 岩体完整与溶蚀程度确定方法

基于上述关于多源勘察信息利用策略(2.1节)和岩体完整程度和溶蚀程度指标规律的认识(2.2节),本文提出了基于多源勘察信息的岩体完整程度和溶蚀程度确定方法。

以岩体完整程度评估为例进行说明:基于场地某处的钻孔岩芯、声波和钻孔电视影像等勘察信息,即可综合评判该处的地层标签,这一地层标签

表8 不同地层岩体溶蚀程度及其波速范围

Table 8 Dissolution levels and velocity ranges of different stratigraphic rock masses

| 地层岩性     | 地层标签 | 溶蚀程度 | 溶蚀形态       | 波速(km/s) |
|----------|------|------|------------|----------|
| 吴家坪组灰岩   | 1    | 高溶蚀  | 溶隙、溶孔      | 2~4      |
| 茅口组灰岩    | 2    | 高溶蚀  | 溶孔(泥质填充)   | 3~5      |
| 栖霞组灰岩    | 3    | 低溶蚀  | 溶隙         | >5       |
| 龙潭组泥岩、煤层 | 4    | 高溶蚀  | 溶蚀孔洞(水体充填) | >4       |
| 孤峰组泥灰岩   | 5    | 低溶蚀  | 溶隙         | >5       |
|          |      | 无    | 无          | 2~3      |
|          |      | 低溶蚀  | 溶隙         | 2~5      |

携带着前述的地层岩体地质特点及其完整程度的规律认识,为岩体完整程度评估提供了规律性依据,类似工程场地也可按前述方式进行总结以获得规律认识;再将此地层标签与该处钻孔波速值相结合,以评估此处岩体完整程度。与传统的岩体完整程度评估方法相比,所提方法综合利用了多源勘察信息,通过地层标签将各地层岩体地质特点融入岩体完整程度的评估,显著提高了模型评估结果的可靠度。

虽然按照上述流程即可进行人工的岩体完整程度评估,但为了使评估过程更加地高效、自动化与精细准确,引入加权随机森林算法(weighted random forest, WRF),训练出以地层标签(表7,8)和钻孔波速值2个指标作为输入,岩体完整性(或岩体溶蚀程度)作为输出(表9,10)的岩体完整程度(或岩体溶蚀程度)评估机器学习模型。

现详细论述岩体完整程度评估的机器学习模型的建立流程(图6,岩体溶蚀程度评估模型建立流程与此类似)。加权随机森林算法(WRF)是一种基于随机森林算法改进的集成学习方法,其超参数包括决策树数量、最大树深度及加权策略等(闫长斌等,2023)。决策树数量是指WRF算法中随机有放回抽样总次数,抽样后通过分析地层标签和钻孔波速对岩体完整程度评估结果的信息增益大小来确定决策树节点分裂,例如,在岩体完整程度评估时,钻孔波速的信息增益更大,其重要性更高,决策树根节点会基于钻孔波速进行第一次分裂。实际应用中决策树数量往往根据模型样本集数据复杂程度作经验取值。最大树深度是指决策树从根节点到叶节点的最长路径上的节点数量,其值与模型特征值数目相关,特征值数量直接影响决策树的分裂复杂

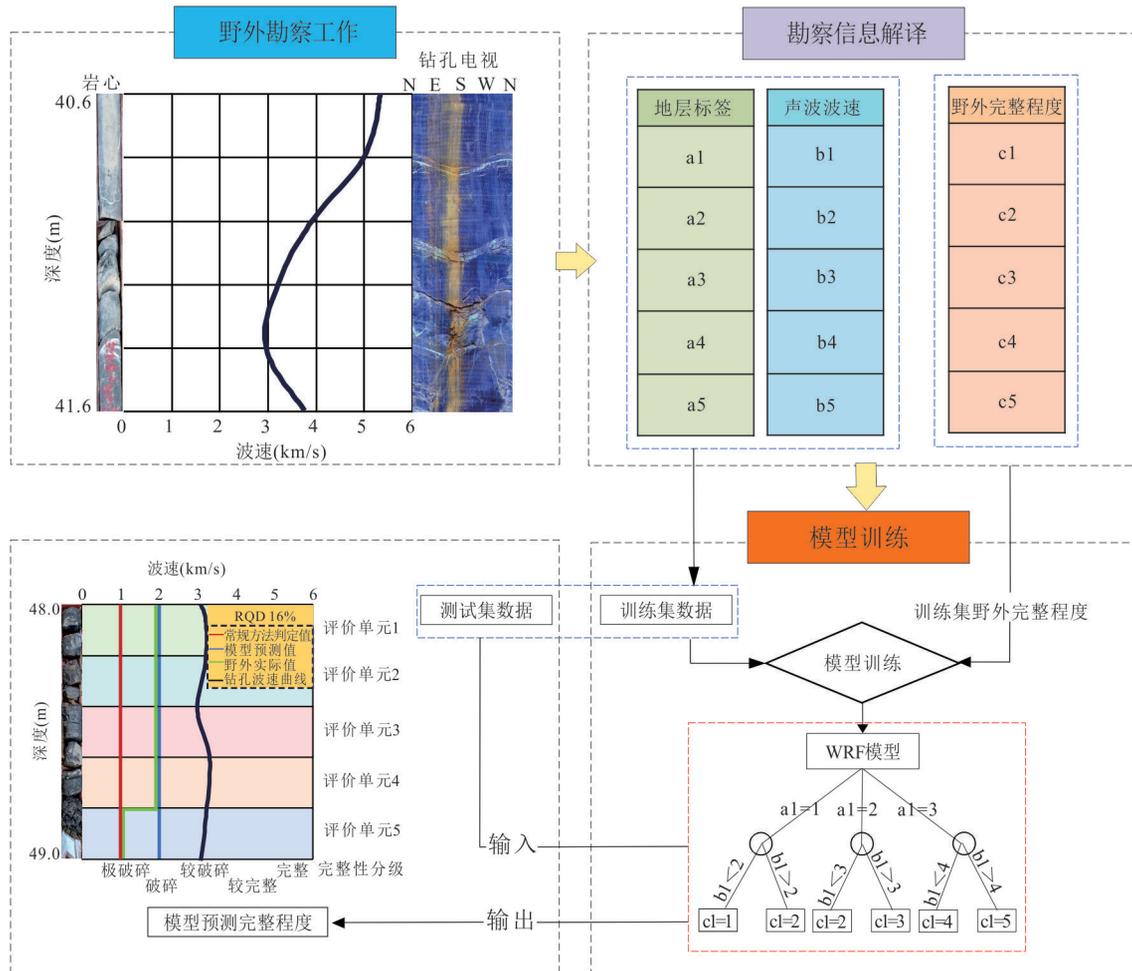


图 6 方法流程图(以岩体完整程度评估为例)

Fig.6 Flowchart of the proposed method (for the rock mass integrity assessment)

表 9 WRF 模型中完整程度标签

Table 9 Integrity Level Labels in the WRF Model

| 岩体完整性 | 标签 |
|-------|----|
| 极破碎   | 1  |
| 破碎    | 2  |
| 较破碎   | 3  |
| 较完整   | 4  |
| 完整    | 5  |

表 10 WRF 模型中溶蚀程度标签

Table 10 Erosion Level Labels in the WRF Model

| 岩体溶蚀程度 | 标签 |
|--------|----|
| 微溶蚀    | 1  |
| 低溶蚀    | 2  |
| 高溶蚀    | 3  |

度和最终树的结构. WRF 算法的加权方式有决策树加权和模型特征值加权(吴冬, 2023). 本文选用

模型特征值加权, 该方式着眼于单个数据特征的重要性, 通过为数据集中不同特征赋予权重, 表征各特征对最终分类结果的影响程度, 这种方式能够突出数据集中具有主导作用的特征, 从而优化模型的决策能力.

在模型训练和评估过程中, 数据集被分为训练样本集和测试样本集. 每颗决策树训练时, WRF 从训练样本集中有放回地随机抽取样本形成新的训练样本集(bootstrap 取样), 以新的训练样本集中的地层标签和钻孔波速为模型输入值, 对应的野外完整程度(来源于基于多源勘察信息的人工综合评判)为评估结果. 随后, 根据地层标签和钻孔波速的信息增益来确定决策树分裂: 决策树会依次评估每个特征(如地层标签和钻孔波速)的分裂效果, 计算分裂前后的信息增益, 并选择信息增益最大的特征优先分裂. 对于连续型特征(如钻孔波速), 决策树会尝试多个候选阈值, 将钻孔波速划分为多个区

间,选择使信息增益最大的阈值作为钻孔波速的分裂点;对于离散型特征(如地层标签),则按标签类别划分数据子集,计算各自的信息增益并选择最优特征.

计算信息增益时,将岩体完整程度的分类结果作为目标变量,统计训练样本集中各类别(如完整、较完整、破碎等,或溶蚀程度的不同等级)的占比 $p_i$ ,利用式(6)计算数据集整体信息熵 $H_t$ ,其反映了分类的不确定性.接着,对地层标签、钻孔波速这两个特征,分别按其取值将样本划分成若干子集,计算每个子集的信息熵 $H_s$ (方法同式6),并结合子集占总样本的比例 $q_j$ ,通过式7得到条件熵 $H_f$ .最后,信息增益 $IG$ 为整体信息熵与条件熵的差值(式8).差值越大,表明该特征对降低分类不确定性的贡献越大,以此分别算出地层标签和钻孔波速的信息增益.

$$H_t = -\sum_{i=1}^n p_i \log_2 p_i, \quad (6)$$

$$H_f = \sum_{j=1}^k q_j H_s, \quad (7)$$

$$IG = H_t - H_f, \quad (8)$$

式中; $p_i$ 为训练样本集中各类别的占比, $q_j$ 为子集在总样本中的占比; $H_t$ 、 $H_s$ 、 $H_f$ 分别为数据集整体信息熵、数据集子集信息熵、数据集条件熵, $IG$ 为信息增益.得到地层标签和钻孔波速的信息增益后,对二者进行归一化处理(使权重和为1),即得到特征权重.其计算公式为:

$$\omega_{\text{label}} = \frac{IG_{\text{label}}}{IG_{\text{label}} + IG_{\text{wave}}}, \quad (9)$$

$$\omega_{\text{wave}} = \frac{IG_{\text{wave}}}{IG_{\text{label}} + IG_{\text{wave}}}, \quad (10)$$

式中: $IG_{\text{label}}$ 、 $IG_{\text{wave}}$ 分别为地层岩性、钻孔波速的信息增益, $\omega_{\text{label}}$ 、 $\omega_{\text{wave}}$ 分别为地层岩性、钻孔波速的特征权重.

节点分裂完成后,完成一棵决策树模型 $\{h(X, L_k) | k=1, 2, \dots\}$ ,其中 $X$ 是初始的训练样本集, $L_k$ 为用于控制树生长的随机向量.重复上述过程,直至训练出预期决策树数量组成的随机森林模型 $\{h_1(X, L_1), h_2(X, L_2), \dots, h_k(X, L_k)\}$ .测试样本集未参与模型训练,仅用于评估模型的分类预测性能.通过这种划分策略,训练集充分学习了不同的样本特性,覆盖了样本数据的全局分布;而测试集评估结果可以较为真实地反映模型在未知数据上的表现.

在决策树的生长过程中,加权随机森林算法通过选择加权Gini不纯度 $\Delta G_w$ 来寻找子节点的最佳分裂点. $\Delta G_w$ 越小,子节点的分裂效果越好,其计算

公式为:

$$p_i^w = \frac{\sum_{k \in c_i} \omega_k}{\sum_{k \in c} \omega_k}, \quad (11)$$

$$G_w(t) = 1 - \sum_{i=1}^c (p_i^w)^2, \quad (12)$$

$$\Delta G_w = G_w(t) -$$

$$\left[ \frac{\sum_{k \in t_L} \omega_k}{\sum_{k \in t} \omega_k} G_w(t_L) + \frac{\sum_{k \in t_R} \omega_k}{\sum_{k \in t} \omega_k} G_w(t_R) \right], \quad (13)$$

式中: $\omega_k$ 为样本 $k$ 的权重(由样本数据集特征权重 $\omega_i$ 赋予); $C_i$ 为第 $i$ 类数据标签的样本集合, $C$ 为节点所有的样本集合; $G_w(t)$ 为当前节点 $t$ 的加权Gini不纯度; $G_w(t_L)$ 和 $G_w(t_R)$ 为左、右子节点的加权Gini不纯度.

完成随机森林训练后,为了验证模型的泛化能力和实际应用效果,将测试集的地层标签和钻孔波速数据输入模型后,WRF中每棵决策树对其投票结果的众数即为岩体完整程度预测值.

为了判断模型的准确性和实用性,本文运用 $n \times n$ 的混淆矩阵,矩阵的每一行 $i$ 表示不同完整程度的实际结果(来源于基于多源勘察信息的人工综合评判),矩阵的每一列 $j$ 表示不同完整程度的模型评估结果;再定义训练集或测试集的混淆矩阵的吻合率 $K$ (式14):

$$K = \frac{m}{M}, \quad (14)$$

其中: $m$ 为混淆矩阵对角元素和, $M$ 为混淆矩阵元素总和.根据吻合率高低来判断模型评估的准确性.

此外,定义精确率 $J_j$ (式15)、召回率 $Z_i$ (式16)及 $F1$ 分数(式17)等指标反映模型在测试集中评估结果的好坏,计算公式为:

$$J_j = \frac{C_{j,j}}{\sum_{i=1}^n C_{i,j}}, \quad (15)$$

$$Z_i = \frac{C_{i,i}}{\sum_{j=1}^n C_{i,j}}, \quad (16)$$

$$F1_{i,j(i=j)} = 2 \times \frac{J_j \times Z_i}{J_j + Z_i}, \quad (17)$$

其中: $C_{i,j}$ 为混淆矩阵第 $i$ 行第 $j$ 列的元素, $n$ 为混淆矩阵维度.精确率 $J_j$ 表示在所有被模型评估为某一完整程度 $j$ 的样本中实际为该完整程度样本的概率;召回率 $Z_i$ 表示在实际为某一完整程度 $i$ 的样本中被模型评估为该完整程度样本的概率; $F1$ 分数是某一完整程度分级的精确率和召回率的调和平均

表 11 具备多源勘察信息的钻孔及样本数据集划分

Table 11 Drilling and sample dataset division with multi-source survey information

| 钻孔编号 | 深度范围 (m)  | 地层岩性                | 样本总数  | 训练集样本数 | 测试集样本数 |
|------|-----------|---------------------|-------|--------|--------|
|      | 22.0~24.0 | P <sub>3w</sub> 灰岩  | 10    | 9      | 1      |
| ZK02 | 24.0~38.4 | P <sub>2l</sub> 煤岩  | 72    | 64     | 8      |
|      | 38.4~62.8 | P <sub>2g</sub> 泥灰岩 | 122   | 109    | 13     |
| ZK04 | 25.2~47.0 | P <sub>2g</sub> 泥灰岩 | 109   | 98     | 11     |
| ZK05 | 40.4~52.0 | P <sub>3w</sub> 灰岩  | 58    | 52     | 6      |
|      | 38.0~51.1 | P <sub>2g</sub> 泥灰岩 | 65    | 59     | 6      |
| ZK06 | 51.1~54.0 | P <sub>2m</sub> 灰岩  | 15    | 14     | 1      |
| ZK07 | 9.2~90.2  | P <sub>2m</sub> 灰岩  | 405   | 365    | 40     |
| ZK08 | 10.8~47.0 | P <sub>1q</sub> 灰岩  | 181   | 163    | 18     |
| ZK09 | 63.4~69.8 | P <sub>2m</sub> 灰岩  | 32    | 29     | 3      |
| ZK10 | 41.2~60.0 | P <sub>2m</sub> 灰岩  | 94    | 86     | 8      |
| ZK11 | 90.8~96.4 | P <sub>2g</sub> 泥灰岩 | 28    | 25     | 3      |
|      | 总计        |                     | 1 191 | 1 073  | 118    |

数,能反应该模型的评估质量。

### 3 工程实例分析

#### 3.1 加权随机森林模型构建

基于所研究的抽水蓄能工程场地多源勘察数据,验证所提出方法在实际工程中评估岩体完整程度和溶蚀程度的有效性。数据集来源于9个钻孔,包括钻孔岩芯582.2 m,其中具备钻孔声波、钻孔电视图像等多源数据的钻孔地层段长度为238.2 m(表11)。

在确定钻孔地层岩性后,按照前述岩体完整程度和溶蚀程度规律认识(见表6)、综合多源勘察数据进行细分并赋予其地层标签,再由地层标签和钻孔波速数据构建模型的样本数据集。本文钻孔波速的测试间距为0.2 m,因此设置模型最小评价单元为0.2 m,共计1 191个评价单元。随后对样本数据集进行划分,为了让模型学习到更多信息,倾向于大比例(训练集样本数:测试集样本数=9:1)的训练样本集,因此选定训练集样本数为1 073个,测试集样本数为118个。各钻孔及地层岩性的样本数分布情况详见表11。为充分捕获样本数据集的数据特征,减小决策树过少对模型预测性能的影响,本文根据经验取值确定模型决策树数量为300,确定每次抽选参与决策树训练样本数300。此外,因为本模型特征值较少,仅有地层标签和钻孔波速,设置模型的最大树深度为5;本模型的加权策略为模型特

表 12 研究区完整程度评估模型特征值权重

Table 12 Characteristic value weights of the integrity assessment model

| 特征指标 | 权重   |
|------|------|
| 钻孔波速 | 0.83 |
| 地层岩性 | 0.17 |

表 13 研究区溶蚀程度评估模型特征值权重

Table 13 Characteristic value weights of the dissolution degree evaluation model

| 特征指标 | 权重   |
|------|------|
| 钻孔波速 | 0.04 |
| 地层岩性 | 0.96 |

征值加权的方式,在训练模型前利用样本集拟合分类决策树模型,依据式6~10计算确定每个特征值(即地层标签、钻孔波速)的信息增益及对应的特征权重,计算结果如表12,表13所示。随后在构建每棵决策树时,赋予各特征值相应的权重,使某些特征在训练过程中对岩体完整程度或溶蚀程度分类评估结果的贡献更大。

值得说明的是,计算结果在溶蚀程度评估模型特征值权重中地层标签对溶蚀程度的贡献达0.96,而波速的贡献为0.04(表13),这与场地岩溶发育受岩性控制的地质特点相符。因为本场地内岩溶发育受地层岩性控制显著,各地层内部的溶蚀差异性较小。具体而言,在溶蚀程度指标规律认识中,吴家坪组灰岩、龙潭组泥岩和煤层、孤峰组泥灰岩等地层的溶蚀程度单一,此外,研究区低~高溶蚀的茅口组和栖霞组灰岩地层中,也主要以低溶蚀发育为主,例如茅口组和栖霞组灰岩地层被划分为718个评价单元,但其中仅有55个评价单元为高溶蚀。

需要补充的是,特征权重大小并非一成不变,而是取决于所研究区域的地质特点及指标规律。可想而知,当地质条件更为复杂时,地层受到断裂、褶皱等构造因素影响,造成相同岩性内部的溶蚀程度出现显著差异,仅依赖岩性可能难以准确反映岩溶发育实际状态。在此类情况下,钻孔波速的特征权重就会相应地变大。由此可见,所提出方法综合利用地层标签和钻孔波速进行溶蚀程度评估,显得合理且必要。

表14为完整程度评估模型和溶蚀程度评估模型的训练结果,完整程度评估模型训练集吻合率为95.67%,溶蚀程度评估模型训练集吻合率为

98.02%。完整和溶蚀程度评估模型训练集吻合率高说明其具有较好的分类评估能力,为了保证模型的泛化能力和实际应用效果,后续用测试集继续验证模型的性能。

3.2 岩体完整程度的测试集评估与校核分析

为验证本方法的合理性,组织专家进行多源勘察信息查阅和实地踏勘,综合评判各评价单元岩体的野外实际完整程度。模型预测值是机器学习模型根据输入的地层标签和钻孔波速确定。对于岩体完整程度评估而言,本方法的评估结果与野外针对性复勘校核结果基本一致,测试集吻合率 94.92%,混淆矩阵如图 7a 所示;此外,任一分级完整程度评估结果的精确率、召回率和 F1 分数值均较大(表 15)。这些均说明模型的完整程度预测质量较好。

在岩体完整性评估时,常规方法值由岩芯质量指标 RQD 或钻孔波速计算的完整性指数  $K_v$  确定。

表 14 WRF 模型训练集吻合率统计表

Table 14 Statistical table of match rates for the training set in the WRF model

| 预测指标 | 训练集吻合率 |
|------|--------|
| 完整程度 | 95.67% |
| 溶蚀程度 | 98.02% |

表 15 岩体完整程度的测试集评估效果

Table 15 Test set evaluation effect of rock mass integrity

| 指标    | 完整程度评估效果 |      |      |      |      |
|-------|----------|------|------|------|------|
|       | 极破碎      | 破碎   | 较破碎  | 较完整  | 完整   |
| 精确率   | 1.00     | 0.96 | 0.89 | 0.73 | 1.00 |
| 召回率   | 0.67     | 1.00 | 0.73 | 0.89 | 1.00 |
| F1 分数 | 0.80     | 0.98 | 0.80 | 0.80 | 1.00 |

表 16 列出了岩体完整程度测试集中常规方法判定结果与模型预测值及野外复勘不一致的单元段的评估情况,图 8 展示了相应的勘察信息,用于分歧分析。

具体分析如下:

(1)图 8a 孤峰组泥灰岩岩芯 RQD 值为 16%,据此判断图中各单元岩体完整程度为极破碎。野外针对性复勘时综合多源信息及实地踏勘评判各单元的野外实际完整程度为破碎。模型评估中,根据输入的孤峰组地层标签和钻孔波速值确定各单元的模型预测值为破碎。原因是区内孤峰组泥灰岩地层埋深较大,48.0~49.0 m 段内的极破碎泥灰岩在较大应力下岩体被压密,岩体完整性更强。

(2)图 8b 孤峰组富方解石泥灰岩的钻孔波速偏小(4.05~4.25 km/s),根据波速判断图中各单元岩体完整程度为较破碎。野外针对性复勘时对比多源信息后确定各单元的野外实际完整程度为较完整。模型评估时,根据输入的孤峰组富方解石泥灰岩地层标签和钻孔波速确定各单元模型预测值为较完整。原因是该地层泥灰岩方解石重结晶程度高,岩

表 16 岩体完整程度评估存在分歧的典型单元段各方法评估结果

Table 16 Results of evaluating the integrity of rock mass using various methods for typical unit sections with divergent evaluations

| 典型单元段<br>地层岩性 | 本文方法<br>评估结果 | 常规方法<br>判定结果 | 野外针对性复<br>勘校核结果 |
|---------------|--------------|--------------|-----------------|
| 孤峰组泥灰岩        | 破碎           | 极破碎          | 破碎              |
| 孤峰组富方解石泥灰岩    | 较完整          | 较破碎          | 较完整             |
| 茅口组灰岩         | 较完整          | 较破碎          | 较完整             |

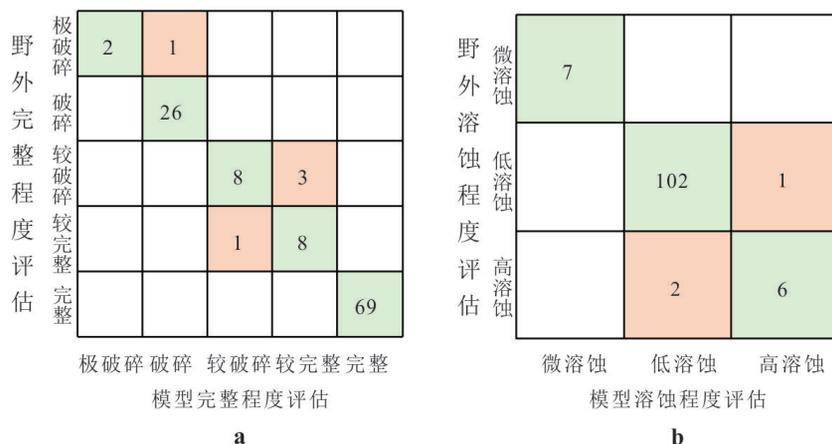


图 7 测试集混淆矩阵

Fig.7 Confusion matrix of the test set

体完整程度好,但由于其内部存在不均匀的矿物分布,声波在传播过程中对微裂隙或不均匀矿物很敏感,在裂隙及矿物界面发生反射,波速衰减.

(3)图 8c 茅口组灰岩岩芯 RQD 值为 52%,据此判断其完整程度为较破碎.野外针对性复勘时综合评判各单元的完整程度为较完整.模型预测值也为较完整.原因是茅口组灰岩通常脆性较高,在钻探过程中,大的钻压和钻速条件以及钻头施加的高频振动和应力导致了岩芯碎裂,而岩体实际完整程度较好.

### 3.3 岩体溶蚀程度的测试集评估与校核分析

对于岩体溶蚀程度评估而言,本方法的评估结果与野外针对性复勘校核结果基本一致,测试集吻合率 97.46%,混淆矩阵如图 7b 所示;此外,溶蚀程度分级评估结果的精确率、召回率和 F1 分数值均较大.可见模型的溶蚀程度预测质量较好(表 17).

岩体溶蚀程度评估时,常规方法值由岩芯线溶

蚀率确定.表 18 列出了岩体溶蚀程度测试集中常规方法判定结果与模型预测值及野外复勘不一致的单元段评估情况,图 9 展示了相应的勘察信息,用于分歧分析.

具体分析如下:

(1)图 9a 吴家坪组灰岩线溶蚀率为 32%,由此判断单元 1、2、3 的溶蚀程度为高溶蚀,而未出现明显溶蚀现象的单元 4、5 的溶蚀程度为微溶蚀.专家野外复勘时发现从上往下评价单元 1、2、3 的溶蚀形态从溶洞(泥质填充)过渡到大尺寸的溶蚀裂隙,确定单元 1、2 的野外实际溶蚀程度为高溶蚀,单元 3 的野外实际溶蚀程度为低溶蚀.模型评估时,根据输入模型的吴家坪地层标签和钻孔声波确定单元 1、2 的溶蚀程度为高溶蚀、单元 3 为低溶蚀.原因是区内吴家坪组地层位于浅表层,泥质颗粒易随着水流进入岩体裂隙孔洞,使得岩溶构造多为泥质充填,这抑制了水流下游的岩溶发育,溶蚀程度降低,体现在相应的钻孔波速增大.

(2)图 9b 栖霞组灰岩线溶蚀率为 45%,由此判断图中 5 个评价单元溶蚀程度为高溶蚀.野外针对性复勘时发现从上到下 5 个单元的溶蚀形态从溶蚀裂隙过度到溶蚀孔洞(水体填充),确定单元 1 和 2 的溶蚀程度为低溶蚀,单元 3、4、5 的溶蚀程度为高溶蚀.模型评估时,根据输入模型的栖霞组地层标

表 17 岩体溶蚀程度的测试集评估效果

Table 17 Test set evaluation effect of rock dissolution degree

| 指标    | 溶蚀程度评估效果 |      |      |
|-------|----------|------|------|
|       | 微溶蚀      | 低溶蚀  | 高溶蚀  |
| 精确率   | 1.00     | 0.98 | 0.86 |
| 召回率   | 1.00     | 0.99 | 0.75 |
| F1 分数 | 1.00     | 0.98 | 0.80 |

表 18 岩体溶蚀程度评估存在分歧的典型单元段各方法评估结果

Table 18 Evaluation results of different methods for evaluating the degree of rock dissolution in typical units with different evaluation results

| 典型单元段地层岩性         | 本文方法评估结果 | 常规方法判定结果 | 野外针对性复勘校核结果 |
|-------------------|----------|----------|-------------|
| 吴家坪组灰岩(评价单元 3)    | 低溶蚀      | 高溶蚀      | 低溶蚀         |
| 栖霞组灰岩(评价单元 1 和 2) | 低溶蚀      | 高溶蚀      | 低溶蚀         |

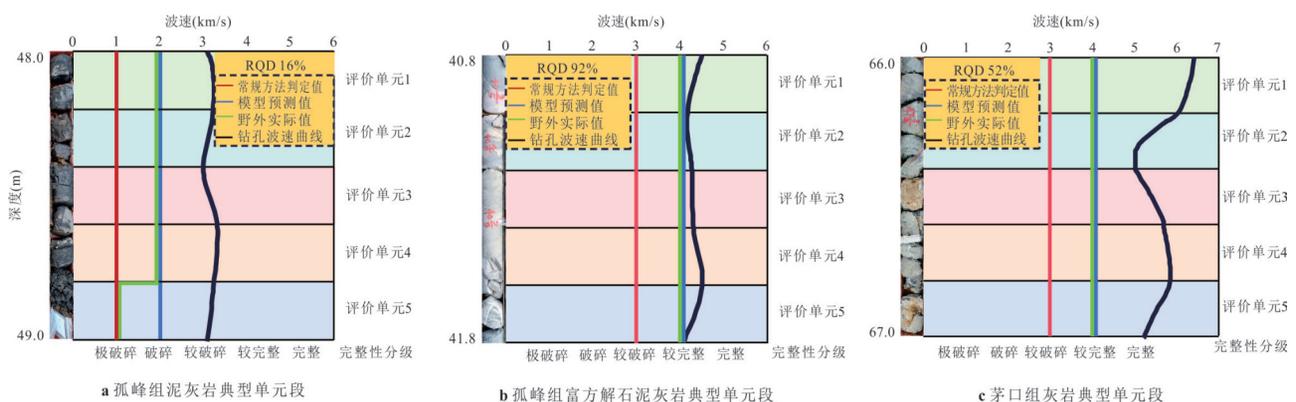


图 8 典型单元段各方法评估岩体完整程度分歧的分析

Fig.8 Analysis of differences in rock mass integrity assessment using various methods for typical unit sections

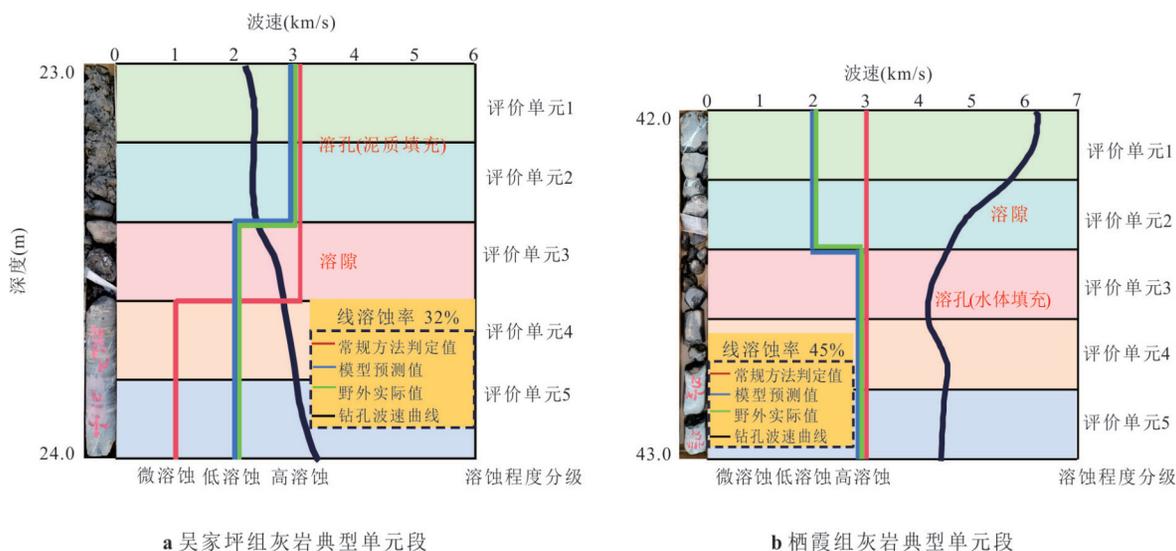


图9 典型单元段各方法评估岩体溶蚀程度分歧的分析

Fig.9 Analysis of differences in the evaluation of rock dissolution degree by various methods in typical unit sections

表 19 本文方法与传统方法的对比

Table 19 Comparison between this method and traditional methods

| 评估方法 | 准确率             | 计算依据                  | 指标测定条件 | 分析成本          |
|------|-----------------|-----------------------|--------|---------------|
| 本文方法 | 精细准确            | 需做好场地地层划分和各地层岩体地质特点分析 | 易满足    | 高效且自动化程度高、耗时短 |
| 传统方法 | 区分精细度不够,且存在主观成分 | 规范查表并结合工程经验           | 非简易满足  | 重复琐碎耗精力、人工成本高 |

签和钻孔波速确定评价单元1、2的溶蚀程度预测值为低溶蚀,评价单元3、4和5的溶蚀程度预测值为高溶蚀.原因是虽然区内栖霞组通常为高溶蚀且波速总体偏大(地层标签认识),但此处评价单元1、2为低溶蚀到高溶蚀过渡带,所测声波波速更大(5~6 km/s),由此修正地层标签认识、综合判定单元1、2的岩体溶蚀程度为低溶蚀.

### 3.4 讨论

本文提出的评估方法综合利用了多源勘察信息(如岩芯、声波波速、钻孔电视图像等),仅需做好场地地层划分和各地层岩体地质特点(规律)分析,评估结果就能客观体现钻孔不同地层内岩体完整和溶蚀程度的变化,使得岩体完整和溶蚀程度评估更加地高效、自动化与精细准确,这给工程岩体完整和溶蚀程度分级评价的实践应用带来了便利(表19).

## 4 结论

为克服传统岩体完整与溶蚀程度评估方法中指标确定条件非简易满足、重复琐碎耗精力和区分精细度不够等问题,本文以秭归岩溶区某抽水蓄能

工程为例,利用岩芯、声波波速、钻孔电视图像等多源勘察信息,提出了一套新的岩体完整程度和溶蚀程度评估方法.通过将预测评估结果与现场复勘认识对比验证本文方法的有效性.论文主要得到以下结论:

(1)相同位置的各种信息(如岩芯、声波波速、钻孔电视图像等)相互关联,只因勘察手段不同,信息的呈现形式存在差异.研究区各地层的地质特点有很大差别,相应的各勘察手段信息的特征表现不尽相同,这影响我们利用多源勘察信息对岩体完整和溶蚀程度的评估.

(2)对于完整程度指标,吴家坪组灰岩岩芯整体完整性差;茅口组与栖霞组灰岩的完整情况及对应的波速区间基本一致,但在饱水条件下,栖霞组完整性差、波速却偏高;龙潭组泥岩及煤层完整性差;孤峰组泥岩多为方解石重结晶,虽完整性较好,但波速值偏低.

(3)对于溶蚀程度指标,吴家坪灰岩溶蚀程度较高,形态上以溶隙、溶孔为主;高溶蚀的茅口组和栖霞组均发育大尺寸溶孔,但孔内充填物存在差异,导致两者在相似溶蚀强度下表现出不同的波速特征;龙潭组泥岩及煤层无溶蚀发育;孤峰组泥灰

岩溶蚀程度低,形态上以溶隙为主。

(4)本文方法通过 1 073 个样本训练并用 118 个样本测试,训练集/测试集完整程度评估吻合率达 95.67%/94.92%,溶蚀程度评估测试集吻合率达 98.02%/97.46%,且模型的精确率、召回率等指标值均较高,与野外针对性复勘校核结果吻合良好,这些证明了本文方法的有效性。

(5)限于研究场地的地质特点和勘察数据量条件,无法保证不同地层各完整程度和溶蚀程度具有均衡及足量的样本数。例如,研究场地岩溶发育受地层岩性控制显著,各地层内部的溶蚀差异较小,多为低溶蚀。这导致某些程度的样本数(特别是测试集的样本数)偏少。因此,本文方法的可靠性有待不同地质复杂程度和勘察数据量的场地检验。其次,本文方法的有效性依赖于场地地层的合理划分和各地层岩体地质特点(规律)分析。

(6)与传统的岩体完整和溶蚀程度评估方法相比,本文方法综合利用了多源勘察信息,通过地层标签将各地层岩体地质特点融入岩体完整和溶蚀程度评估,更加高效、自动化与精细准确,绕开了传统方法的固有问题,便于岩溶区抽蓄工程岩体完整和溶蚀程度分级评价应用。

## References

- Baraboshkin, E.E., Demidov, A.E., Orlov, D.M., et al., 2022. Core Box Image Recognition and Its Improvement with a New Augmentation Technique. 2204:08853. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2204.08853>
- Cao, X.F., Liu, Y.K., Liu, Z.K., et al., 2020. Evaluation Method of Foundation Karst Development Degree Based on Characteristics of Strong Karstification Zone. *Karst*, 39(4): 577—583(in Chinese with English abstract).
- Chen, C. W., Yang, H. Q., Song, K. L., et al., 2023. Dissolution Feature Differences of Carbonate Rock within Hydro-Fluctuation Belt Located in the Three Gorges Reservoir Area. *Engineering Geology*, 327: 107362. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2023.107362>
- Chen, L., Ge, Y. F., Zeng, X. M., et al., 2023. Rapid Evaluation of Rock Mass Integrity of Engineering Slopes Using Three-Dimensional Laser Scanning. *Journal of Earth Science*, 34(6): 1920—1925. <https://doi.org/10.1007/s12583-023-2007-z>
- Chen, J.Q., 2023. Research on Intelligent Evaluation Method of Hydraulic Rock Mass Quality Based on Deep Features of Core Images(Dissertation). Xi'an University of Technology, Xi'an(in Chinese with English abstract)
- Chen, R., Gao, Y.T., Meng, H., et al., 2025. Research on Evaluation Method of Rock Mass Integrity Based on Borehole Television Technology. *Metal Mine*, 1—13(in Chinese with English abstract).
- Du, P., Zhang, L.X., Yang, L., 2014. *Drilling Engineering*. University of Electronic Science and Technology of China Press, Chengdu(in Chinese with English abstract).
- Feng, Y., Tang, H.W., Li, Q.Q., 2020. Borehole Geophysical Prospecting Test Methods in Karst Investigation. Proceedings of the 2020 Chinese Earth Science Joint Academic Annual Meeting, Chongqing, 2020:3645—3648(in Chinese with English abstract).
- Guo, G., Zheng, K.X., Yu, B., et al., 2025. Quantitative Evaluation of Geological Suitability for Site Selection of Upper Reservoirs of Pumped Storage in Karst Depressions. *Journal of Engineering Geology*, 33(4): 1487—1498(in Chinese with English abstract).
- Hasan, M., Shang, Y. J., Yi, X. T., et al., 2023. Determination of Rock Mass Integrity Coefficient Using a Non-Invasive Geophysical Approach. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 15(6): 1426—1440. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2022.07.008>
- Kianpour M, Sayari M, Fatemi Aghda S M., 2022. Statistical Analysis and Fuzzy Clustering Model to Predict Limestone Rock Mass Quality (QSRM) and Degree of Karstification (D.K) Using Geophysical Parameters (Case Study of Some Areas in Western Iran). *Modeling Earth Systems and Environment*, 8(1): 245—258. <https://doi.org/10.1007/s40808-020-01062-8>
- Li, M.C., Shi, B.W., Han, S., et al., 2020. New Index and Analysis Method for Multi-Scale Evaluation of Rock Mass Integrity Based on Cross-Pass Sonic Wave Velocity. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 39(10): 2060—2068(in Chinese with English abstract).
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, 2012. Code for Design of Building Foundation: GB 50007-2011. China Architecture & Building Press, Beijing(in Chinese).
- National Standards Compilation Group of the People's Republic of China, 2015. Standard for Classification of Engineering Rock Masses: GB/T 50218—2014. China Planning Press, Beijing(in Chinese).
- National Standards Compilation Group of the People's Republic of China, 2009. Code for Geological Investigation of Water Conservancy and Hydropower Projects: GB50487-2008. China Planning Press, Beijing(in Chinese).
- National Standards Compilation Group of the People's Republic

- of China, 2002. Code for Geotechnical Investigation (GB 50021-2001). China Architecture & Building Press, Beijing(in Chinese).
- Peng, Y., Fan, Y.S., Xu, L.Z., et al., 2018. Application of Borehole Television Imaging in Karst Investigation of Wuhan Metro. *Resources Environment & Engineering*, 32(1): 134-136(in Chinese with English abstract).
- Shi, X.M., He, J.L., Zhang, K., et al., 2025. Karst Feature Fusion and 3D Imaging Based on Improved DS Evidence Theory Algorithm. *Earth Science*, 50(7): 2912-2924(in Chinese with English abstract).
- Wang, J. C., Xu, H. H., Chen, W., et al., 2022. Evaluation Method for Rock Mass Structure Integrity Based on Borehole Multivariate Data. *International Journal of Geomechanics*, 22: 04021248. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gm.1943-5622.0002232](https://doi.org/10.1061/(asce)gm.1943-5622.0002232)
- Wang, J. C., Han, Z. Q., Wang, C., et al., 2025. Rock Mass Integrity Evaluation Method of Roadway Surrounding Rock Mass Based on Borehole Image Acoustic Radar Data. *Scientific Reports*, 15: 22050. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-06049-y>
- Wang, T.R., Ji, X.B., Wang, J.B., et al., 2025. Implicit 3D Geological Modeling Based on Machine Learning: A Case Study of the Lazi Gou Gold Deposit in the Muru Metallogenic Belt. *Earth Science*, 50(8):3167-3181(in Chinese with English abstract)
- Wang, Y., Li, X., Hu, R.L., et al., 2015. Research Progress and Application Review of Geotechnical Ultrasonic Testing. *Journal of Engineering Geology*, 23(2):287-300(in Chinese with English abstract).
- Wu, D., Yan, W.D., Wang, J.L., 2023. Random Forest Point Cloud Classification Research Based on Feature Importance Weighting. *Electronic Measurement Technology*, 46(20): 120-127(in Chinese with English abstract).
- Yan, C.B., Gao, Z.A., Yao, X.T., et al., 2023. Weighted Random Forest Prediction Model for TBM Construction Speed Considering Uncertainty. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 45(12):2575-2583(in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y. Z., Ji, H. G., Li, W. G., et al., 2021. Research on Rapid Evaluation of Rock Mass Quality Based on Ultrasonic Borehole Imaging Technology and Fractal Method. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2021: 8063665. <https://doi.org/10.1155/2021/8063665>
- Zhang, Y., Wang, D.F., Zhang, X., et al., 2016. Application of Ground-Penetrating Radar in Tunnel Advanced Geological Prediction. *Subgrade Engineering*, 32(1):4(in Chinese with English abstract).

## 中文参考文献

- 曹贤发, 刘玉康, 刘之葵, 等, 2020. 基于强溶蚀带特征的地基石溶发育程度评价方法. *中国岩溶*, 39(4): 577-583.
- 陈金桥, 2023. 基于岩芯图像深度特征的水工岩体质量智能评价方法研究(博士学位论文). 西安: 西安理工大学.
- 陈睿, 高永涛, 孟豪, 等, 2025. 基于钻孔电视技术的岩体完整性评价方法研究. *金属矿山*, 1-13.
- 杜平, 张立新, 杨丽, 2014. 钻探工程学, 成都: 电子科技大学出版社.
- 丰赞, 唐洪武, 李强强, 2020. 岩溶勘察中的钻孔物探测试方法. 重庆: 2020年中国地球科学联合学术年会论文集, 3645-3648.
- 郭果, 郑克勋, 余波, 等, 2025. 岩溶洼地抽蓄上库选址地质适宜性定量评价研究. *工程地质学报*, 33(4):1487-1498.
- 李明超, 史博文, 韩帅, 等, 2020. 基于对穿声波波速的岩体完整性多尺度评价新指标与分析方法. *岩石力学与工程学报*, 39(10):2060-2068.
- 彭耀, 樊永生, 徐联泽, 等, 2018. 钻孔电视成像在武汉地铁岩溶勘察中的应用. *资源环境与工程*, 32(1):134-136.
- 师学明, 何家乐, 张凯, 等, 2025. 改进 DS 证据理论算法岩溶特征融合与三维成像. *地球科学*, 50(7):2912-2924.
- 王统荣, 纪旭波, 王江波, 等, 2025. 基于机器学习的隐式三维地质建模: 以牟乳成矿带腊子沟金矿为例. *地球科学*, 50(8): 3167-3181.
- 王宇, 李晓, 胡瑞林, 等, 2015. 岩土超声波测试研究进展及应用综述. *工程地质学报*, 23(2):287-300.
- 吴冬, 阎卫东, 王井利, 2023. 基于特征重要性加权的随机森林点云分类研究. *电子测量技术*, 46(20):120-127.
- 闫长斌, 高子昂, 姚西桐, 等, 2023. 考虑不确定性的 TBM 施工速度加权随机森林预测模型. *岩土工程学报*, 45(12):2575-2583.
- 张优, 王登峰, 张霄, 等, 2016. 地质雷达在隧道超前地质预报中的应用. *路基工程*, 32(1):4.
- 中华人民共和国住房和城乡建设部, 2012. 建筑地基基础设计规范 GB50007-2011. 北京: 中国建筑工业出版社.
- 中华人民共和国国家标准编写组, 2015. GB/T50218-2014 工程岩体分级标准. 北京: 中国计划出版社.
- 中华人民共和国国家标准编写组, 2009. GB50487-2008 水利水电工程地质勘察规范. 北京: 中国计划出版社.
- 中华人民共和国国家标准编写组, 2002. 岩土工程勘察规范 (GB50021-2001). 北京: 中国建筑工业出版社.