

DOI: 10.11779/CJGE20220718

耦合多源勘察信息的水工岩体完整性智能评价方法

李明超¹, 李明泽¹, 韩帅^{2*}, 张佳文¹, 赵文超^{1,3}

(1. 天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300350; 2. 香港理工大学建筑与房地产学系, 香港 999077;

3. 中水北方勘测设计研究有限责任公司, 天津 300222)

摘要: 岩体完整性是评价水工岩体质量等级的重要参数, 传统方法往往采用的单一指标难以全面反映结构面、地下水、卸荷等地质条件对评判结果的综合影响。提出了一种耦合多源勘察信息的水工岩体完整性智能评价方法。首先利用合成少数类过采样算法对勘察信息数据进行均衡处理, 改善数据集结构; 进而采用随机森林算法分别对原始岩体完整性数据和预处理后的数据进行预测, 结合实际工程数据进行有效性及适用性验证, 并针对影响岩体完整性的不同因素对预测结果进行了讨论分析。结果表明, 所提出的方法对数据集的均衡处理可有效改善少数类岩体样本完整性的评价准确率, 通过耦合并挖掘不同完整性指标中的深层信息, 实现岩体完整性的智能评价, 为进一步辅助岩体质量评价提供新的方法。

关键词: 岩体完整性; 岩体质量评价; 多源勘察信息; 随机森林; 合成少数类过采样

中图分类号: TU451 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2023)08-1674-10

作者简介: 李明超(1979—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事水利工程仿真与智能分析方面的研究工作。E-mail: lmc@tju.edu.cn.

Intelligent evaluation method for integrity of hydraulic rock mass by coupling multi-source survey information

LI Mingchao¹, LI Mingze¹, HAN Shuai², ZHANG Jiawen¹, ZHAO Wenchao^{1,3}

(1. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300350, China; 2. Architecture and

Real Estate Learning, The Hong Kong Polytechnic University, Hongkong 999077, China; 3. Bei Fang Investigation, Design & Research

Corporation Limited, Tianjin 300222, China)

Abstract: The integrity of rock mass is an important parameter in evaluating the quality grade of hydraulic rock mass. The traditional methods often adopt a single index that cannot fully reflect the comprehensive influences of geological conditions such as structural plane, groundwater, and unloading on the evaluation results. An intelligent evaluation method for the integrity of hydraulic rock mass is proposed by coupling with multi-source survey information. Firstly, the synthetic minority oversampling (SMOTE) algorithm is used to balance the survey information data to improve the data set structure. Then the random forest algorithm is used to predict the original rock mass integrity data and the pre-processed data, respectively. Based on the data of actual projects, the validity and applicability are verified, and the predicted results are discussed and analyzed according to different factors affecting the integrity of rock mass. The results show that the proposed method can effectively improve the evaluation accuracy of the integrity of a few rock samples by balancing the data sets. By coupling and mining the deep information of different integrity indexes, the intelligent evaluation of rock mass integrity can be realized, which provides a new method for further assisting the evaluation of rock mass quality.

Key words: rock mass integrity; evaluation of rock mass quality; multi-source survey information; random forest; SMOTE

0 引言

在水利水电工程当中, 快速正确的对岩体完整性以及质量进行分级与评价是岩体开挖和加固支护设计、快速施工必不可少的条件, 其作为重要课题一直被科研人员密切关注^[1-5]。岩体质量主要受到岩体内部结构特性的影响, 岩体完整性是重要作用的因素之一,

在分类时需要考虑参数的不确定性。因此, 如何对岩体完整性及岩体质量进行快速有效的划分, 是岩土工

基金项目: 国家自然科学基金面上基金项目(51879185); 天津市杰出青年科学基金项目(17JCJQC44000)

收稿日期: 2022-06-06

*通信作者 (E-mail: drjasonhan@163.com)

程领域解决岩体安全稳定的一个重要问题。目前, 岩体质量评价的方法主要有 T 评分^[6]、Q 系统^[7]、地质强度指标(GSI)^[8]、岩体地质力学分类(RMR)^[9]等。这些指标结合了岩体本身的性质, 在一定程度上反映了岩体的完整性, 而这也对岩体质量的优劣起控制性作用。

针对岩体完整性判断问题, 李明超等^[10]基于岩体对穿声波波速数据, 采用加权随机森林算法, 提出了一种新的多尺度岩体完整性评价指标和相应的分析方法, 该方法没有考虑节理及岩体岩性等情况。曹瑞琅等^[11]通过提出钻进过程指数 DPI, 建立了 DPI 与 RQD 之间联系, 为评价岩体完整性提供一种新指标, 但钻孔中会忽略各向异性等问题。李清波等^[12]基于边缘阈值分割钻孔图像的方法, 对 RQD 进行自动分析, 与波速测试及钻孔图像对比, 提高 RQD 统计的准确性, 但对于图像中反射差异不明显的结构面, 还未能进行研究。Guo 等^[13]基于高清数字钻孔电视技术, 提出了一种新的完整性评价方法, 克服了 RQD 计算过程中岩心脱落和破碎问题的影响, 在实际施工过程中, 能够对岩体的完整性及裂隙的演化过程进行动态评价, 但缺乏对结构面发育情况以及特征的研究。殷明伦等^[14]通过统计调研大量工程数据, 研究体积节理数 J_v 与岩体完整性系数 K_v 之间的关系, 提出了考虑结构面类别的 J_v 表征 K_v 的修正方法, 但理论上还是根据 K_v 对岩体完整性进行评价, 并且在实际工程中 J_v 与 K_v 的关系较差。Song 等^[15]根据岩体完整性系数 K_v 与地质强度指标 GSI 关系, 推导出 K_v 与 RMR 评分体系中某些项的关系, 用这些指标进行预测 K_v 有着很高的相关性, 其最终只是得到 K_v 值, 是预测获取 K_v 值的另一途径, 不能很好地进行岩体完整性评价。

实际工程中评价岩体质量时, 常利用 RQD、 K_v 、 J_v 中某一定量指标对岩体完整性进行分析, 不能综合反映岩体特征, 导致结果代表性差, 与实际情况不符^[16]。例如, RQD 不能与岩块挂钩, 具有多解性; K_v 主要考虑的是地下水、高地应力、卸荷等影响; J_v 仅能反映结构面的几何发育特征。

针对水利工程中岩体完整性评价问题, 耦合多源勘察信息, 通过采用熵权-云模型对工程中误判数据进行修正, 并使用少数类过采样方法对岩体完整性分级中不平衡数据进行预处理, 改进数据集结构, 利用随机森林算法对岩体完整性进行分类预测; 由于影响岩体完整性评价的因素较多(如节理、地质构造、风化程度以及地下水等), 为避免单一指标误差大, 减少人为判断的主观性, 结合影响因素对实际情况进行具体分析, 并对所提出的方法进行应用拓展, 为工程岩体完整性分析提供新的方法。

1 岩体完整性指标及多指标的融合

1.1 岩体质量指标 RQD

岩体质量指标 (rock quality designation, RQD) 自 Deere^[17]提出后, 便成为划分岩体结构特征的基本方法及重要参数。RQD 常用岩芯钻探法进行获取, 需要严格采用金刚石钻头、双层岩芯管钻进进行实现^[18]。RQD 为一定量指标, 是某岩组中大于或等于 10 cm 的柱状岩芯的累计长度与某岩组钻探总进尺之比^[19], 以百分数表示:

$$RQD = \frac{A_1}{A} \times 100\% \quad , \quad (1)$$

式中, A_1 为累计大于等于 10 cm 岩芯长度, A 为单位岩芯钻孔总长度。

RQD 计算方式便捷, 同时作为裂隙间距以及密度的指标, 可以很好地反映岩体的连通性、压缩性、渗透性等物理力学性质, 能定量反映岩体的完整性。但是, 传统的 RQD 计算方法没有考虑阈值的合理性, 不能很好地体现岩体的尺寸效应和各向异性, 没有涉及岩体中结构面的发育情况^[20], 难以反映岩体结构本身的复杂性, 导致评价结果会与真实情况有一定出入。

1.2 岩体体积节理数 J_v

岩体体积节理数 J_v 是国际岩石力学委员会推荐使用评价岩体完整性和岩体节理化程度的指标, J_v 的定义为单位体积内包含节理的数目, 工程中常常采用间距法及条数法进行计算, 最后取二者均值得出该施工阶段或工程地质勘察阶段的情况。间距法公式为

$$J_v = \left(\frac{1}{S_1} + \frac{1}{S_2} + \dots + \frac{1}{S_n} \right) \quad (i=1, 2, 3, \dots, n) \quad , \quad (2)$$

式中, S_i 为各组裂隙平均间距, i 为裂隙数。

条数法计算方法如下:

$$J_v = \frac{\sum_{i=1}^N n_i}{N} \times (1.3 \sim 1.5) \quad (i=1, 2, 3, \dots, n) \quad , \quad (3)$$

式中, n_i 为第 i 个单位测量面积内的节理条数, N 为同级别岩体中的样本数, 一般不少于 10 个。

获取 J_v 的方法简单快捷, 并且该指标能很好反映结构面的组数、迹长、间距等岩体结构面的几何发育特征, 可以定量评价岩体的完整性, 然而其不能够反映结构面的结合程度, 评价的结果依赖于专家的个人经验与能力, 会产生一定的误差。

1.3 岩体完整性系数 K_v

岩体完整性系数可以定量表达岩体的完整程度, K_v 定义为岩体中纵波的传播速度与岩石中的传播速度的比值的平方, 即

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

式中： v_{pm} 为岩体当中的纵波波速，纵波波速通常采用弹性波勘探技术进行收集； v_{pr} 为岩石当中的纵波波速。

岩体完整性系数 K_v 的大小反映了岩体相对于岩石的完整或破坏程度，常作为各种评价指标中的一项重要参数，通常 K_v 值小于 1；当所测岩体处于高地应力^[21]、试验测试方向以及岩体含水状态等^[22]情况时，会出现 K_v 值大于 1；当岩块从原有岩层取出时，产生卸荷效应，使波速发生变化，导致结果不准^[23]。

1.4 多源数据耦合方法

目前，用于表征岩体完整性的指标较多^[24]，常用指标为岩体质量指标 RQD、岩体完整性系数 K_v 以及岩体体积节理数 J_v 。GB50487—2008^[6]及 GB50287—2016^[24]根据结构面组数及结构面间距确定，但只用 K_v 对岩体完整性进行定量评价；GB50287—2016^[24]中可使用 J_v 及 K_v 作为岩体完整性的定量指标；3 个规范对于 K_v 的评分范围皆是相同的， J_v 采用 GB/T50218—2014^[25]中评分，具体见表 1；鲁布革、二滩水电站、《中小型水利水电工程地质勘察规范：SL55—93》^[26]采用 RQD 对岩体完整性程度进行分析，但 RQD 评分范围不同，学者常用表 1 中的数据进行研究^[27]。

因此，根据相关工程经验以及各种评价方法，将岩体按照完整程度划分为完整、较完整、完整性差、较破碎和破碎 5 个等级。相关岩体完整性评价标准如表 1 所示。

表 1 岩体完整性评价标准

Table 1 Evaluation standards for rock mass integrity

完整程度	完整	较完整	完整性差	较破碎	破碎
RQD/%	90~100	75~90	50~75	25~50	0~25
J_v (条·m ⁻³)	0~3	3~10	10~20	20~35	>35
K_v	0.75~1	0.55~0.75	0.35~0.55	0.15~0.35	0~0.15

工程数据中存在工程师误判的情况，因此利用熵权-云模型对数据进行修正，具体步骤如下：

(1) 整理确定岩体完整性评价指标，并依据规范确定各级分类标准见表 1。

(2) 将各指标进行归一化处理，并根据下式利用熵权法确定指标权重：

$$H_j = \frac{-\sum_{i=1}^m k_{ij} \ln k_{ij}}{\ln m} \quad (5)$$

$$W = \frac{1 - H_j}{\sum_{j=1}^n (1 - H_j)} \quad (6)$$

式中： H_j 为信息熵； k_{ij} 为无量纲化后的评价指标值； m 为待评对象数量； n 为每个待评对象包含的评价指标； W 为个指标权重。

(3) 通过各个指标的上下限，根据下式确定云模型的数字特征：

$$\left. \begin{aligned} E_x &= (C_{\min} + C_{\max})/2, \\ E_n &= (C_{\max} - C_{\min})/6, \\ H_c &= k. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中， C_{\min} 与 C_{\max} 为某一岩体完整性等级范围的最小值与最大值， E_x 为该范围内期望， E_n 为该范围内熵， H_c 为该范围内超熵， k 为常数，取 0.002。

(4) 采用正向发生器生成不同指标对应的云模型，根据

$$Y = \sum_{i=1}^n \mu_i W_i \quad (8)$$

计算综合确定度 Y ，最后依据最大综合确定度原则，修正岩体完整性等级。

经过熵权-云模型预处理后，得到的数据评价结果与真实情况更加符合。该处理可以修正工程中判断误差较大部分，对于相邻评价等级则以工程师评价为准。

2 岩体完整性智能评价方法

2.1 总体流程

针对单一指标评价岩体完整性的局限性，本文将耦合工程中常用评价 3 个指标 RQD、 J_v 、 K_v ，综合评价岩体完整性，增加准确率。图 1 为主要研究路线，主要包括：①计算工程中 3 个评价岩体完整性指标，利用熵权-云模型对工程数据修正；②利用 SMOTE 算法对少数类样本中数据进行均衡；③使用随机森林分别对原始样本数据及均衡后数据进行训练分类；④计算 Kappa 系数及绘制混淆矩阵，结合影响岩体完整性因子，对多工程进行评价分析。

2.2 SMOTE 算法

合成少数类过采样技术(synthetic minority oversampling technique, SMOTE)^[28]通常用于处理不平衡数据集。分类模型处理不平衡数据集时对少数类样本的分类效果通常较差，且当少数类样本远小于多数类样本时，预测精度易出现虚高现象。利用 SMOTE 方法对实际工程数据进行预处理，可使样本集达到均衡，进而优化评价结果。SMOTE 算法的具体思路如下：

(1) 假设某一少数类样本集为 $S = \{s_1, s_2, \dots, s_a\}$ ， a 为少数类岩体完整性样本数量。对于少数类中每一个样本 s ，采用欧氏距离计算它到少数类样本集中所有样本的距离，得到其 k 近邻。

(2) 根据样本不平衡比例，确定生成的样本数量

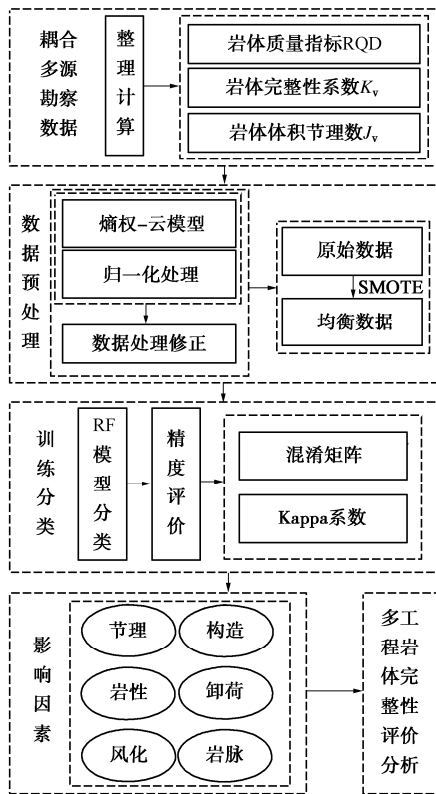


图 1 方法总体结构

Fig. 1 Overall framework

占原少数类样本的百分比 $N\%$, 对于每一个样本 $s_i (i=1, 2, \dots, a)$ 从 k 近邻中随机选取 b 个样本数据, 放入 $sample = \{s'_1, s'_2, \dots, s'_b\}$ 集合当中, 每个数据记为 s'_i , 其中, $0 \leq b \leq a, 1 \leq i \leq b$ 。

(3) 记采样倍数 $c = \text{int}(N/100)$, 取 $(0, 1)$ 随机数 $r = \text{rand}(0, 1)$, 依据式 (9) 生成新的样本。

$$S_j = s_i + r(s'_i - s_i) \quad (j = 1, 2, 3, \dots, c) \quad (9)$$

(4) 重复 (1) ~ (3) 步骤合成其他少数类样本。

2.3 随机森林算法

随机森林算法(random forest, RF)是由 Breiman^[29]提出的一种分类算法, 其有着简单、抗噪能力强、性能稳定等优点, 被广泛地运用于各种领域数据处理中。RF 模型算法的思路如下:

(1) 设总集合为 W , 采用 Bootstrap 自助法随机有放回的选取训练样本, 形成 k 个子训练集 $\{N_i\} (i=1, 2, 3, \dots, k)$, 每一个训练样本为一棵 CART 决策树。

(2) k 棵 CART 树组成了随机森林, 每棵分类树的子节点进行分裂时, 会从 M 个特征变量中随机选取 m 个变量 $(0 < m \leq M)$, 作为每棵 CART 训练模型的指标。

(3) 重复步骤 (2), 构建出随机森林中所有子树。

(4) 将训练集导入构建好的 RF 模型当中, 利用投票选举的方式进行统计, 将票数最多的一类作为最终的预测结果。

RF 算法在使用时通过 Gini 值作为切分节点的标

准, Gini 值反映了每个特征在每个 CART 树上做了多大的贡献, 最后取均值, 得出每个特征的贡献大小。RF 预测模型的准确率跟 CART 树的数量以及最大深度有关, 合理控制 RF 模型的参数可以使模型达到最优。

2.4 分类模型评价指标

岩体完整性预测模型通常为多分类模型可利用敏感性 (sensitivity)、F1 指标 (F1-measure) 等指标进行分析, 但其步骤繁琐, 因此本文采用混淆矩阵以及 Kappa 系数进行分析。混淆矩阵是一种图像精度评价, 将实际值与预测值显示在同一个 n 行 n 列的矩阵中, 效果直观简单。Kappa 系数是基于混淆矩阵的一种统计学评估方法, 实际工程中取值为 $[0, 1]$, Kappa 系数越高, 代表模型分类准确度越高,

$$P_c = \frac{\sum_{i=1}^k m_i n_i}{\sum_{i=1}^k m_i} \quad (i = 1, 2, 3, \dots, k) \quad (10)$$

$$K = \frac{P_0 - P_c}{1 - P_c} \quad (11)$$

式中: k 为类别总数; m_i 为第 i 类真实样本数; n_i 为第 i 类预测出来的样本数; P_0 为总体分类精度。

一致等级情况如表 2 所示。

表 2 Kappa 系数一致等级表

Table 2 Scales of Kappa coefficient

系数	0~0.2	0.2~0.4	0.4~0.6	0.6~0.8	0.8~1.0
一致等级	极低	一般	中等	高度	几乎完全一致

3 工程应用

3.1 平硐勘察数据预处理与模型训练

为了验证模型的有效性, 先依据某水电站坝址平硐勘探数据 (记为工程 1), 分析模型在岩体完整性评价中的适用情况, 再利用另一水利工程坝址勘探平硐数据 (记为工程 2) 进行有效性验证, 两工程数据均使用 1.4 节中熵权-云模型流程进行修正。工程 1 河谷狭窄, 两岸陡峻, 坡顶行对高差最多可达 1000~1700 m, 坡度可达 $30^\circ \sim 90^\circ$ 。其中数据包括 9 个勘探线, 27 个平硐, 共被划分为 118 个平硐岩体完整性分段, 岩体岩性以大理岩、粉砂质板岩为主。

采用 RQD, J_v , K_v 3 个常用评价岩体完整性指标进行模型训练及验证。 J_v 在计算时, 式 (3) 中系数为 1.3~1.5, 因此取二者系数均值 1.4, 在与式 (2) 计算结果取均值; K_v 计算时岩体中纵波波速选用对穿声波波速, 少数缺省值利用插值进行计算。表 3 列举出部分典型的实际勘探数据。

工程 1 包含完整分段数据 9 个, 较完整分段数据 45 个, 完整性差分段数据 54 个, 较破碎分段数据 10

表3 工程岩体多源勘察数据

Table 3 Multi-source survey data of engineering rock mass

序号	平硐	桩号	RQD/ %	J_v /(条·m ⁻³)	K_v	应力分带	岩体结构类型	岩体嵌合程度	完整性
1	PD01	220—250	99	6.0	0.85	集中带	块状结构	紧密	完整(1)
2	PD04	130—175	63	12.9	0.37	过渡带	次块状结构	较紧密	完整性差(3)
3	PD05	146.7—188	55	7.3	0.87	平稳带	镶嵌碎裂结构	较紧密	较完整(2)
4	PD07	70—160	80	5.5	0.88	过渡带	中厚层状结构	较紧密	较完整(2)
5	PD12	37—75	29	21.0	0.17	弱卸荷带	层状破碎结构	松弛	较破碎(4)
6	PD30	17—65	51	16.8	0.53	释放带	破碎结构	较松弛	完整性差(3)

个, 采用的训练集与测试集比例为 7 : 3。由于 4 个分段数据比例不均衡, 先利用 SMOTE 算法对完整数据与较破碎进行扩充, 使得 4 个分段数据基本上相等, 再使用 RF 算法对预处理后的数据进行调参训练, 得到最优时最大树深为 7, 决策树数目为 50, 其余参数为默认值。同时, 将未采用 SMOTE 算法处理的数据也进行训练, 作为对比。

3.2 完整性评价与分析

如表 4 所示, 可以看出完整、较破碎两个少数类样本经过均衡调节处理后, 准确率有所上升, 分析数据可知, 仅利用 RF 模型会将完整性岩体分类成较完整岩体, 将较破碎岩体分类成较破碎岩体, 使得与实际情况更加不符。而提前用 SMOTE 算法处理后再进行分类, 整体准确率从 83.3% 提升到 94.4%, 提升明显。

表 4 两种模型输出结果与岩体完整性对应关系

Table 4 Correspondence between output results of two models and rock mass integrity

岩体完整性	两种机器学习模型测试准确率/%	
	RF 模型	SMOTE-RF 模型
完整	33.3	66.7
较完整	92.3	92.3
完整性差	88.2	100.0
较破碎	66.7	100.0
总准确率	83.3	94.4

SMOTE-RF 模型与 RF 模型 K 值分别为 0.91, 0.73, 两者混淆矩阵如图 2, 3 所示。说明经过预处理后的数据, 预测模型更加可靠, 且少数类样本预测概率有所提升。

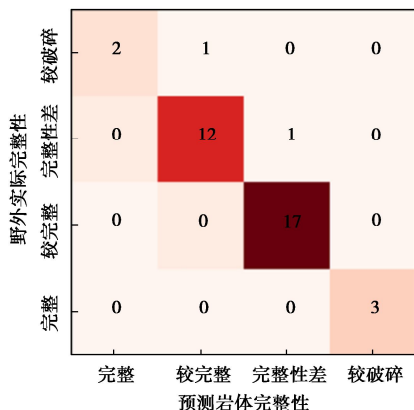


图 2 SMOTE-RF 模型混淆矩阵

Fig. 2 Confusion matrix of SMOTE-RF model

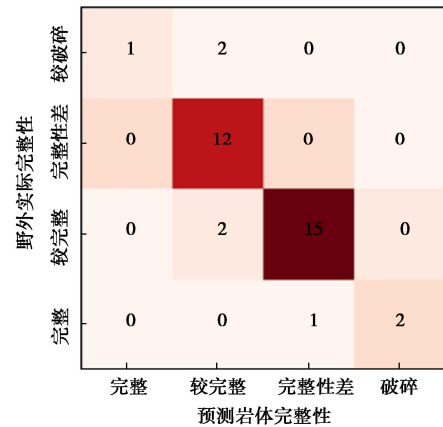


图 3 RF 模型混淆矩阵

Fig. 3 Confusion matrix of RF model

如表 5 所示, 为 SMOTE-RF 模型训练结果与实际情况不符分段。根据影响岩体完整性节理、岩性、卸荷、构造、风化、岩脉等因素对不符合分段进行简要分析。

表 5 工程岩体分段评价结果

Table 5 Sectional evaluation results of engineering rock mass

序号	平硐	桩号	野外勘探岩体完整性评价	SMOTE-RF 模型岩体完整性评价
1	PD01	250—301.5	完整(1)	较完整(2)
2	PD46	190—215	较完整(2)	完整性差(3)

PD01 位于 I 线右岸抗力体, 硐深 301.5 m, 硐口高程 1656.09 m。RQD、 J_v 、 K_v 值为 96.3, 9.25, 0.96。岩体结构类型为镶嵌碎裂结构, 以厚层角砾状大理岩为主, 局部夹绿片岩透镜体, 岩体整体处于微风化, 局部弱风化, 沿 NWW 向溶蚀裂隙发育, 间距 0.2~0.5 m, 沿 #114、#117 溶蚀张开 1~3 cm。250~301.5 m 之间有 4 组规则裂隙, 裂隙发育特征如表 6 所示, 说明该分段岩体裂隙发育, 而 RQD 值没有考虑裂隙的发育情况, 导致数值过高, 与真实情况存在一定出入。

另外, 岩块嵌合较紧密, 应力分带为集中-平稳带, 存在地下水, 如图 4 中蓝色虚线框所示, 在 250~260 m, 局部张开 0.5~2 cm 线状水, 259 m 附近处有滴水存在; 285 m 附近岩体湿润; 296 m 处为绿片岩与大理岩接触面, 有连续滴水-流水, 层面起伏, 这些会导致测得的纵波波速偏高^[30], 从而导致 K_v 值变高。

表 6 裂隙发育特征

Table 6 Characteristics of fracture development

组别	规则裂隙产状	裂隙线平均间距统计 (5 m×2 m)	规则裂隙延伸长度	张开度 /mm	粗糙度	充填物类型	主要结构面类型	地下水
1	N40-60°E/SE∠65-80°	一般>1, 个别 0.1~0.5	一般 1~3	0~2	平糙	少许钙膜	节理裂隙	干燥
2	N30-50°E/NW∠25-35°	薄—中层	>2	0~2	起滑	绿泥石膜	节理裂隙	湿润
3	N5-20°W/SW∠50-70°	零星	1~3	0~5	起糙	不连续泥膜、岩屑	结构面	湿润
4	N30-50°W/NE∠25-30°	零星	>1	0~2	起糙	不连续泥膜、岩屑	结构面	湿润

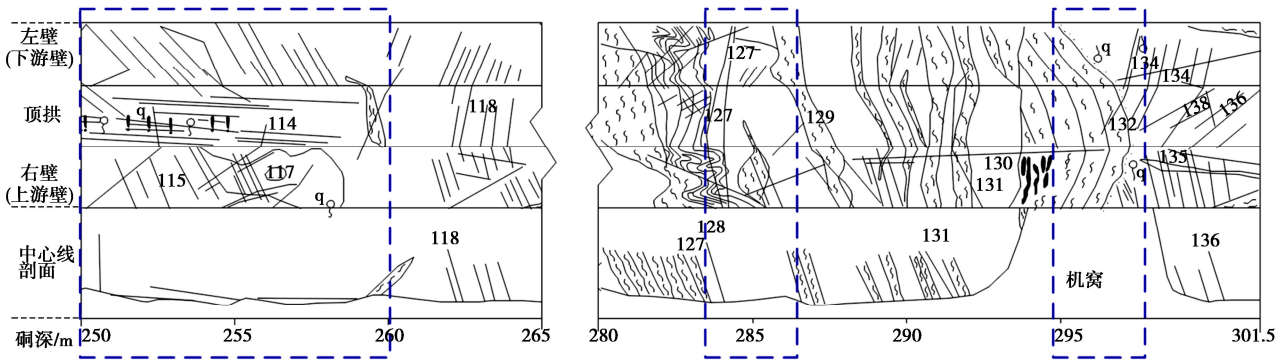


图 4 PD01 局部展开图

Fig. 4 PD01 partial expansion diagram

表 7 该岩体分段三组构造带基本情况与特征

Table 7 Basic situations and characteristics of three groups of structural zones in rock mass

编号	构造类型	产状	起伏情况	充填物	力学性质	其他特征
f46-1	切层错动带	N25E/SE∠80	起伏	灰黄色压碎岩	压性	上游壁与顶拱接触处见一长 25 cm, 宽 6 cm, 深 60 cm 的溶洞
f46-3	切层错动带	N75E/NW∠70	起伏	黑色压碎岩	压性	含土白色方解石粉末, 局部软化夹泥; 上游壁见宽 40~80 cm 影响带, 逆断层
f46-4	切层错动带	N20E/SE∠25	微起伏	灰黑色角砾岩及压碎岩	压扭性	局部软化, 泥化; 下盘见宽 1.2 m 破碎岩, 破碎结构, 上盘湿润

因此, 虽然该分段的 RQD 与 K_v 值较高, 但 J_v 值处于较完整分段, 并且接近于完整性差分段, 岩体完整性有待商榷。

PD46 位于 VI 线左岸抗力体下游部位, 硐口高程为 1818.1 m, 硐深 250.3 m。RQD, J_v , K_v 值为 74.6, 9.13, 0.56。如表 7 所示, 该段受 f46-1、f46-3、f46-4 三组构造带影响, 断层两侧同倾向裂隙发育, 岩体较松弛、完整性差, 在顶拱 213.2 m 处存在一平硐层间挤压带, 风化较强烈, 裂隙主要发育 3 组, 裂面普遍中锈, 充填不连续钙膜, 岩块嵌合较松弛。虽然整体野外评价为较完整, 但是此分段存在各种不良地质体, 且三者值处于较完整与完整性差边界处, 因此需要酌情考虑此处岩体完整性, 避免施工造成损失。

3.3 SMOTE-RF 模型工程应用拓展

为进一步验证方法模型的有效性及其适用性, 利用工程 2 中的数据对工程 1 所训练的模型进行研究。工程 2 距离区域性断裂较近, 区域内岩体主要由燕山早

期侵入岩-花岗闪长岩组成, 地质构造相对简单。其中数据包括 7 个勘探线, 16 个平硐, 共被划分为 87 个平硐岩体完整性分段, 岩性以花岗岩为主, 存在砂岩; 包含完整、较完整、完整性差和较破碎分段数据分别为 20, 34, 25, 2 个, 由于较破碎岩体分段数据较少, 因此选择前 3 个分段进行验证, 训练集与测试集比例为 7:3, 保持两种模型的各项参数, 得出模型分类的准确率如表 8 所示, 可以看出分类为完整以及完整性差的岩体准确率有所上升, 说明 SMOTE-RF 模型更优, 更加符合实际情况。

表 8 两种模型输出结果与岩体完整性对应关系

Table 8 Correspondence between output results of two models and rock mass integrity

岩体完整性	两种机器学习模型测试准确率/%	
	RF 模型	SMOTE-RF 模型
完整	66.7	83.3
较完整	100.0	100.0
完整性差	62.5	87.5
总准确率	79.2	91.7

两种模型的 K 值分别为 0.87, 0.67, 二者混淆矩阵如图 5, 6 所示。可以看出, 完整与完整性差少数类分段在 SMOTE 数据处理过后, 预测效果更好, 可以进一步扩充该类中的关键特征。

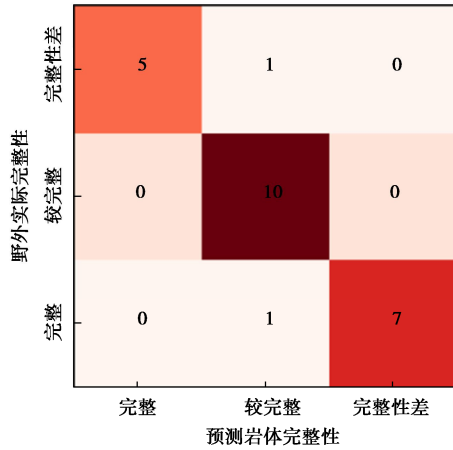


图 5 SMOTE-RF 模型混淆矩阵

Fig. 5 Confusion matrix of SMOTE-RF model

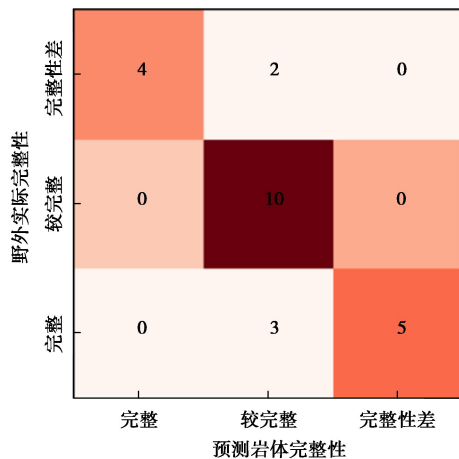


图 6 RF 模型混淆矩阵

Fig. 6 Confusion matrix of RF model

SMOTE-RF 模型评价与实际不符情况如表 9 所示。包括 PD102 与 PD107 中两个分段, 将完整以及完整性差岩体均预测成了较完整岩体, 先对这两分段进行分析。

PD102 位于 III 勘探线左岸下坝址, 洞深 152 m, 洞口高程 2263 m, RQD, J_v , K_v 分别为 94, 3.7 和 0.74。该段岩性为花岗闪长岩, 有 2 组裂隙发育, 间距 20~

30 cm, 中度发育, 岩体新鲜, 较紧密, 次块-镶嵌结构, 岩体无卸荷, 存在两条岩脉, 弱风化, 较坚硬, 与围岩焊接接触, 湿润, 岩脉其它特征描述表如表 10 所示, 两组岩脉如图 7 所示, 因此该段为较完整岩体更合适。

表 9 工程岩体分段评价结果

Table 9 Sectional evaluation results of engineering rock mass

序号	平硐	桩号	野外勘探岩体完整性评价	SMOTE-RF 模型岩体完整性评价
1	PD102	64—85	完整(1)	较完整(2)
2	PD107	25—38	完整性差(3)	较完整(2)



(a) Ym102-5 岩脉



(b) Ym102-6 岩脉

图 7 PD102 岩脉照片

Fig. 7 PD102 rock vein photograph

PD107 位于下横 IV 线左岸, 洞深 151 m, 洞口高程为 2263 m。RQD, J_v , K_v 分别为 86, 9.85, 0.32。该段岩体为花岗闪长岩, 裂隙发育 2 组, 间距 30~50 cm, 中度发育; 该分段岩体质量等级为 III₂, 弱风化, 弱卸荷, 较紧密, 次块-块状结构, 但此处岩体干燥, 岩体含水率低, 导致对穿声波波速值较小, 因此将此

表 10 工程岩体岩脉特征描述表

Table 10 Description of dike characteristics of engineering rock mass

编号	桩号	产状	宽度/cm	颜色	特征	完整性	蚀变程度
Ym102-5	左 72 顶 72.8 右 75	N60°E/NW∠80°	30~60	浅黄色	发育断层 f102-5 及宽 2~4 cm 的石英脉, 石英脉局部宽 9 cm	完整性差	蚀变不明显
Ym102-6	左 78.3~79.4 顶 78.5~79.1 右 81~81.6	N60°E/NW∠60°	60~110	灰白-浅黄色	宽 2~3 cm 的石英脉, 断续延伸	较完整	上盘局部蚀变 3~5 cm

处岩体完整性评定为较完整更加合理,但具体施工时还需要依据现场情况采取相应措施。

3.4 讨 论

依据表 1 利用常用传统指标 RQD, K_v , J_v 对两个工程测试集中数据分别进行岩体完整性评价,三者评价及耦合勘探信息情况如图 8 所示。利用单一指标对岩体分段进行评价时,工程 1 与工程 2 中的依据单一指标 RQD, K_v , J_v 评价准确率分别为 75%, 50%, 83.3% 以及 50%, 41.7%, 62.5%, 而经过少数类样本生成后,利用 RF 进行预测的准确率分别为 94.4%, 91.7%。

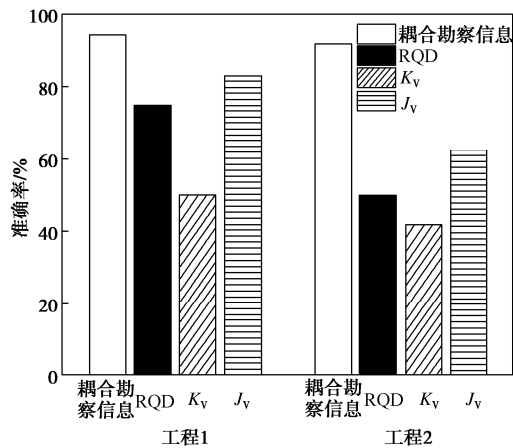


图 8 各方法评价情况

Fig. 8 Evaluation of various methods

可以看出,单一指标评价方法只能从部分角度反映岩体的完整程度,较为片面。耦合多源勘察信息指标可以减少因单一指标的造成的误差,增加岩体完整性评价的准确率,有助于工程师在进行野外勘探时判断岩体的分类情况。

4 结 论

针对传统工程岩体完整性评价时仅利用单一指标导致的评价精度差、准确率低等问题,提出了耦合多源勘察数据的 SMOTE-RF 模型,对具体工程岩体完整性数据不均衡分段进行定量评价分析,得到以下 3 点结论。

(1) 运用熵权-云模型方法对数据进行预处理,可以检测出工程中误判数据。通过耦合多源勘探信息方法以及对比传统的方法,不难看出利用该方法得出来的效果比传统方法好,可以减少因单一指标反映岩体情况不周导致的效果差、准确率较低等问题,可以有效减少主观评价时存在的问题。

(2) 对于工程中原始岩体完整性分段数据比例不均衡问题,利用 SMOTE 算法对少数类样本进行过采样处理,使训练集数据分布均衡,改善数据结构,进

而采用 RF 机器学习模型对工程岩体完整性分段数据进行分类预测与验证,准确率得到较大提升。对其他工程进行了应用拓展,进一步说明了 SMOTE-RF 模型的有效性,且相较 RF 模型岩体完整性预测结果与实际情况更加符合,证明了该模型的有效性和普适性。

(3) 预测结果问题分析:①样本数据量一直都是影响分类算法中的重要因素,少数类样本特征信息包含不全面,导致将少数类分类为多数类中;②当数据处于边界位置时,例如 PD46 中 RQD, J_v , K_v 值为 74.6, 9.13, 0.56, 依据表 1 分类为较完整岩体,但分类为完整性差岩体;③当勘探参数跨度较大时,例如 PD107 中 RQD, J_v , K_v 值分别为 86, 9.85, 0.32, 跨度较大原因为各参数考虑因素不同,因此可能导致分类不准。

针对上述存在预测结果的问题,尚需进一步深入研究:结合其他工程数据,增加数据量,以减少单工程中分段特征相似情况,对于边界数据能更好考虑;将机器学习算法与评价标准进一步融合,提升模型方法的准确率。

参考文献:

- [1] 刘飞跃, 刘一汉, 杨天鸿, 等. 基于岩芯图像深度学习的矿山岩体质量精细化评价[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(5): 968-974. (LIU Feiyue, LIU Yihan, YANG Tianhong, et al. Meticulous evaluation of rock mass quality in mine engineering based on machine learning of core photos[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(5): 968-974. (in Chinese))
- [2] 梁 靖, 崔圣华, 裴向军, 等. 考虑岩体构造损伤的强震大型滑坡启动成因[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(6): 1039-1049. (LIANG Jing, CUI Shenghua, PEI Xiangjun, et al. Initiation mechanism of earthquake-induced large landslides considering structural damage[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(6): 1039-1049. (in Chinese))
- [3] NIKAFSHAN R H, JALALI Z, JALALIFAR H. Prediction of rock mass rating system based on continuous functions using Chaos-ANFIS model[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2015, 73: 1-9.
- [4] GHOLAMI R, RASOULI V, ALIMORADI A. Improved RMR rock mass classification using artificial intelligence algorithms[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2013, 46(5): 1199-1209.

- [5] ZHANG Y Z, JI H G, LI W G, et al. Research on rapid evaluation of rock mass quality based on ultrasonic borehole imaging technology and fractal method[J]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2021, **2021**: 1-9.
- [6] 水利水电工程地质勘察规范: GB 50487—2008[S]. 北京: 中国计划出版社, 2009. (Code for Engineering Geological Investigation of Water Resources and Hydropower: GB 50487—2008[S]. Beijing: China Planning Press, 2009. (in Chinese))
- [7] BARTON N, LIEN R, LUNDE J. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support[J]. *Rock Mechanics*, 1974, **6**(4): 189-236.
- [8] HOEK E, BROWN E T. Practical estimates of rock mass strength[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1997, **34**(8): 1165-1186.
- [9] 许宏发, 陈 锋, 王 斌, 等. 岩体分级BQ与RMR的关系及其力学参数估计[J]. *岩土工程学报*, 2014, **36**(1): 195-198. (XU Hongfa, CHEN Feng, WANG Bin, et al. Relationship between RMR and BQ for rock mass classification and estimation of its mechanical parameters[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2014, **36**(1): 195-198. (in Chinese))
- [10] 李明超, 史博文, 韩 帅, 等. 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[J]. *岩石力学与工程学报*, 2020, **39**(10): 2060-2068. (LI Mingchao, SHI Bowen, HAN Shuai, et al. New index and analysis method for multi-scale rock mass integrity assessment based on P-wave velocity[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2020, **39**(10): 2060-2068. (in Chinese))
- [11] 曹瑞琅, 王玉杰, 赵宇飞, 等. 基于钻进过程指数定量评价岩体完整性原位试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2021, **43**(4): 679-687. (CAO Ruilang, WANG Yujie, ZHAO Yufei, et al. *In-situ* tests on quantitative evaluation of rock mass integrity based on drilling process index[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2021, **43**(4): 679-687. (in Chinese))
- [12] 李清波, 杜朋召. 基于边缘阈值分割的钻孔图像 RQD 自动分析方法研究[J]. *岩土工程学报*, 2020, **42**(11): 2153-2160. (LI Qingbo, DU Pengzhao. Automatic RQD analysis method based on information recognition of borehole images[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2020, **42**(11): 2153-2160. (in Chinese))
- [13] GUO H S, FENG X T, LI S J, et al. Evaluation of the integrity of deep rock masses using results of digital borehole televiewers[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2017, **50**(6): 1371-1382.
- [14] 殷明伦, 张晋勋, 江玉生, 等. 岩体体积节理数表征岩体完整系数的结构面类别修正研究[J]. *岩土力学*, 2021, **42**(4): 1133-1140. (YIN Minglun, ZHANG Jinxun, JIANG Yusheng, et al. Study of correction of the structural plane category based on the rock mass integrity coefficient characterized by the volumetric joint count[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2021, **42**(4): 1133-1140. (in Chinese))
- [15] SONG Y H, XUE H S. Correlations between rock mass intactness index (K_v) and other rock mass classification indices (RMR₈₉ system and GSI)[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2021, **80**(10): 7807-7816.
- [16] PELLIS P J, BIENIAWSKI Z T, HENCHER S R, et al. Rock quality designation (RQD): time to rest in peace[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2017, **54**(6): 825-834.
- [17] DEERE D U. Technical description of rock cores for engineering purpose[J]. *Rock Mechanics and Engineering Geology*, 1964, **1**(1): 17-22.
- [18] 张 文, 陈剑平, 牛岑岑, 等. 基于三维裂隙网络 RQD 的确定及最佳测线数量的研究[J]. *岩土工程学报*, 2013, **35**(2): 321-327. (ZHANG Wen, CHEN Jianping, NIU Cencen, et al. Determination of RQD and number of optimum scanlines based on three-dimensional fracture network[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, **35**(2): 321-327. (in Chinese))
- [19] 薛秋池, 赵其华, 何云松. 岩体结构面网络模拟的改进与应用[J]. *岩土工程学报*, 2016, **38**(7): 1351-1356. (XUE Qiuchi, ZHAO Qihua, HE Yunsong. Improvement and application of network simulation of rock mass discontinuities[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, **38**(7): 1351-1356. (in Chinese))
- [20] ZHANG L Y. Determination and applications of rock quality designation (RQD)[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2016, **8**(3): 389-397.
- [21] FALLS S D, YOUNG R P. Acoustic emission and ultrasonic-velocity methods used to characterise the excavation disturbance associated with deep tunnels in hard rock[J]. *Tectonophysics*, 1998, **289**(1/2/3): 1-15.
- [22] 段世委, 许仙娥. 岩体完整性系数确定及应用中的几个问题探讨[J]. *工程地质学报*, 2013, **21**(4): 548-553. (DUAN Shiwei, XU Xiane. Discussion of problems in calculation and

- application of rock mass integrity coefficient[J]. Journal of Engineering Geology, 2013, **21**(4): 548-553. (in Chinese))
- [23] 陈 祥, 孙进忠, 谭朝爽, 等. 岩块波速 - 应力关系及其卸荷效应[J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(5): 757-761. (CHEN Xiang, SUN Jinzhong, TAN Chaoshuang, et al. Relation between P-wave velocity and stress of rock samples and their unloading effect[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(5): 757-761. (in Chinese))
- [24] 水力发电工程地质勘察规范: GB/T 50287—2016[S]. 北京: 中国计划出版社, 2017. (Code for Hydropower Engineering Geological Investigation: GB/T 50287—2016 [S]. Beijing: China Planning Press, 2017. (in Chinese))
- [25] 工程岩体分级标准: GB/T 50218—2014[S]. 北京: 中国计划出版社, 2015. (Standard for Engineering Classification of Rock Mass: GB/T 50218—2014[S]. Beijing: China Planning Press, 2015. (in Chinese))
- [26] 中小型水利水电工程地质勘察规范: SL 55—1993[S]. 北京: 中国水利电力出版社, 1994. (Specification of Engineering Geological Investigation for Medium-Small Water Resources and Hydropower Development: SL 55—1993[S]. Beijing: China Water&Power Press, 1994. (in Chinese))
- [27] 韩振华, 张路青, 袁广祥. 基于 BQ 系统的阿拉善巴彦诺日公 NRG01 号钻孔岩体质量评价[J]. 工程地质学报, 2019, **27**(6): 1208-1215. (HAN Zhenhua, ZHANG Luqing, YUAN Guangxiang. Rock mass quality assessment of borehole NRG01 in bayannuorigong Alxa based on bq-system[J]. Journal of Engineering Geology, 2019, **27**(6): 1208-1215. (in Chinese))
- [28] CHAWLA N V, BOWYER K W, HALL L O, et al. SMOTE: synthetic minority over-sampling technique[J]. Journal of Artificial Intelligence Research, 2002, **16**: 321-357.
- [29] BREIMAN L. Random forests[J]. Machine Learning, 2001, **45**(1): 5-32.
- [30] 陈 旭, 俞 缙, 李 宏, 等. 不同岩性及含水率的岩石声波传播规律试验研究[J]. 岩土力学, 2013, **34**(9): 2527-2533. (CHEN Xu, YU Jin, LI Hong, et al. Experimental study of propagation characteristics of acoustic wave in rocks with different lithologies and water contents[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, **34**(9): 2527-2533. (in Chinese))

岩土工程西湖论坛（2023）一号通知

岩土工程西湖论坛（2023）拟定于 2023 年 10 月 20—22 日在杭州花家山庄召开。近年来，城市地下空间开发和利用在我国发展很快，许多岩土工程新理论、新技术和新方法在城市地下空间开发建设中得到应用和发展，也有不少技术难题尚待解决。为了加强技术交流，促进城市地下空间开发中岩土工程技术的进一步发展和提高，更好地为我国城市化建设服务，本

次会议主题设定为“城市地下空间开发中岩土工程新进展”。本次会议前，将围绕该主题组织有关专家学者编写岩土工程西湖论坛系列丛书第 7 册《城市地下空间开发中岩土工程新进展》，并在中国建筑工业出版社出版。热忱欢迎各位同行积极参与。联系人：宋秀英(0571-88208775, xysong2020@163.com)。了解更多信息请关注网站：www.geo-forum.cn。

(浙大滨海和城市岩土工程研究中心，岩土工程西湖论坛组委会)