

DOI: 10.12474/cdlgzrxx.2026051501



深部隧道围岩分级——传统体系演进 与极端环境挑战的应对

李天斌^{1,2}, 马俊杰^{1,2*}, 高东源^{1,2}

1. 成都理工大学 环境与土木工程学院, 成都 610059;

2. 地质灾害防治与地质环境保护全国重点实验室(成都理工大学), 成都 610059

[摘要] 针对深部热水力极端环境条件下隧道围岩分级面临的难题, 本文在阐明隧道围岩分级技术发展历程的基础上, 对比分析了 BQ(basic quality)、RMR(rock mass rating)和 Q-system 分级方法的局限性与围岩智能分级的适用条件, 剖析了深部热水力环境对围岩质量的劣化作用, 探讨了深部热水力极端环境下的围岩分级框架。研究表明, 传统围岩分级方法在深部热水力环境下的指标及其评分不合理; 现有数据驱动的围岩智能分级模型因缺乏关键地质与物理力学机制的约束, 在极端工况下的预测性、泛化性和可解释性仍显不足。为此, 初步构建了考虑热水力极端环境的深部围岩分级框架, 确立了包含岩体组成、岩体赋存环境和开挖扰动因素的深部围岩质量评价逻辑。未来深部围岩分级研究需探索机理驱动与智能算法的协同作用, 为未来融合多模态地质大模型与智能体, 构建具备自主感知、持续学习与动态协同决策能力的隧道智能建造体系提供参考。

[关键词] 深部隧道; 围岩分级; 人工智能; 热水力环境; 可解释性

[分类号] U452.11; U452.12

[文献标志码] A

Rock mass classification for deep tunnels: evolution of traditional methods and responses to extreme environmental challenges

LI Tianbin^{1,2}, MA Junjie^{1,2*}, GAO Dongyuan^{1,2}

1. College of Environment and Civil Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;

2. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

Abstract: To address challenges in deep tunnel rock mass classification under deep thermo-hydro-mechanical (THM) extreme environments, this paper reviews the technique's evolution; illustrates the limitations of methods like basic

收稿日期: 2026-05-11; 改回日期: 2026-06-09。 责任编辑: 甘娟娟。

期刊主页: <https://xbzrxx.cdut.edu.cn/>

基金项目: 地质灾害防治与地质环境保护全国重点实验室开放基金项目(SKLG2026K019); 国家自然科学基金重点项目(42130719); 四川省科技计划资助项目(2025NSFSC2003)。

第一作者: 李天斌(1964—), 男, 博士, 教授, 研究方向: 深地工程地质灾害机理与防控, E-mail: lbt@cdut.edu.cn。

*通信作者: 马俊杰(1994—), 男, 博士, 讲师, 研究方向: 深地工程地质灾害机理与防控, E-mail: junjie.ma@cdut.edu.cn。

引用格式: 李天斌, 马俊杰, 高东源, 2026. 深部隧道围岩分级——传统体系演进与极端环境挑战的应对[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 53(4): 840—855.

Li T B, Ma J J, Gao D Y, 2026. Rock mass classification for deep tunnels: evolution of traditional methods and responses to extreme environmental challenges[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 53(4): 840—855.

quality, rock mass rating, and Q-system, and the applicability of intelligent classification methods; analyzes quality degradation in deep THM environments; and proposes a classification framework for such extreme conditions. The findings reveal that the index and its ratings for traditional classification methods are inadequate for deep THM conditions. Moreover, existing data-driven intelligent classification models lack the essential constraints of geological and physical-mechanical mechanisms, leading to insufficient predictability, generalizability, and interpretability under extreme conditions. Consequently, a preliminary deep rock mass classification framework accounting for THM environments is constructed, establishing a quality evaluation logic that integrates rock mass composition, rock mass environments, and excavation disturbance factors. Future research on deep rock mass classification should emphasize the synergy between mechanism-driven models and intelligent algorithms. This study provides a theoretical reference for the future integration of large multimodal geological models and autonomous agents, which is based on the construction of an intelligent tunnel construction system with autonomous perception, continuous learning, and dynamic collaborative decision-making capabilities.

Key words: deep tunnel; rock mass classification; artificial intelligence; thermo-hydro-mechanical environment; interpretability

随着中国隧道及地下空间建设的快速发展,更大规模、更大埋深、更复杂工程地质环境的隧道工程不断增多,如世界埋深最大的公路隧道——大峡谷隧道(最大埋深1 944 m)、锦屏地下实验室最大埋深达2 400 m、引汉济渭秦岭隧洞最大埋深达2 012 m、在建的拉月铁路隧道最大埋深约2 080 m。这些重大工程具有“深埋、超长、地质环境极端复杂(高地应力、高地温和高渗透压地质环境)”的特点,给传统的地下工程建造技术带来了严峻挑战(陈湘生等, 2024)。在钻爆法隧道施工中,围岩分级是连接地质勘察与工程设计的核心纽带,其准确与否决定了开挖工法的选择、支护参数的确定以及地质灾害防控的成败(李利平等, 2024)。因此,建立科学、高效、适应复杂工程地质环境的围岩分级体系,一直是隧道与地下工程领域的前沿热点与重大需求。

国内外隧道围岩分级方法的发展大致经历了从定性、半定量到定量分级的发展历程。早期围岩分级方法依赖于单一指标[如普氏坚固系数、RQD(rock quality designation)法等],难以全面反映围岩性能及状态。随后以南非 Bieniawski(1973)提出的 RMR(rock mass rating)法、挪威 Barton et al.(1974)提出的 Q-system 以及中国《工程岩体分级标准》(GB 50218—1994)BQ(basic quality)法为代表的多因素综合评价体系逐渐成为主流围岩分级方法。这些方法在过去几十年的中浅埋隧道工程中的应用取得了成功。然而,传统半定量或定量围岩分级方法依赖人工现场实测与专家

经验,存在参数获取主观性强、耗时长、难以与当前钻爆法隧道机械化、快速化和智能化施工节奏相匹配的局限性。

近年来,随着人工智能技术的跨越式发展,隧道围岩分级迈入智能化研究中。大量学者利用智能凿岩台车的随钻参数、掌子面图像和三维点云数据,结合机器学习算法,实现了掌子面围岩级别的快速智能判识(Ma et al., 2023; 卢向前, 2023; 陈卫东等, 2024; 王明年等, 2024)。这种数据驱动的围岩智能分级方法极大地提高了施工现场围岩分级效率,并在一定程度上消除了人工评价的主观偏差。

然而,当地下工程建设面向千米级甚至两千米级深度的极端热水力地质环境时,现有围岩定量分级与智能分级方法的适用性面临严峻挑战。深部地下工程面临着高地应力、高地温、高渗透水压与强开挖扰动(简称“三高一扰动”)的复杂工程地质环境,在“三高一扰动”环境耦合作用下,围岩质量呈现出显著的复杂非线性劣化特征(Tsang, 2024; Vaezi et al., 2025)。此时,传统定量围岩分级体系中基于浅部地下工程常温常压经验设定的分级指标权重或评分发生变化,导致围岩分级结果失效;而现有的围岩智能分级模型由于缺乏足够的深部围岩分级案例与深部岩体物理机理的约束,极易在智能分级模型的黑盒运算中产生误判,其预测与泛化性能面临挑战。

面对深部极端环境带来的全新挑战,如何打破浅部地下工程经验的桎梏,建立适用于深部

热水力环境下的围岩分级方法或框架,成为当前亟待解决的科学难题。基于此,本文系统梳理钻爆法隧道围岩分级从定量评价到智能化赋能的发展历程及各自的适用范围;剖析深部热水力环境对围岩分级带来的挑战;在此基础上,初步探讨考虑深部热水力环境的围岩分级框架。最后,从数据驱动与物理机理相融合的视角,展望未来深部复杂隧道围岩分级的可解释性智能评价新范式。本文旨在为深部地下工程围岩稳定性评价与智能建造提供理论参考与新思路。

1 传统隧道围岩分级方法的演进与局限性

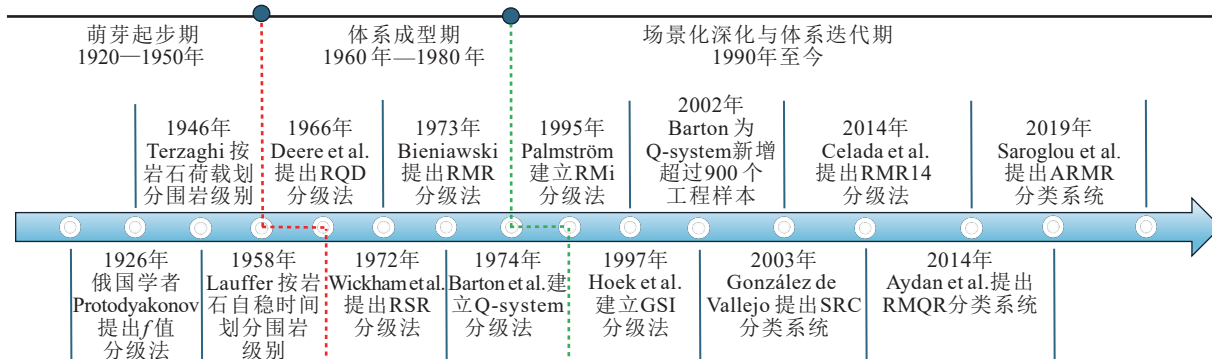
1.1 定量和半定量围岩分级方法发展历程

国内外传统隧道围岩分级方法发展历程如图 1 所示,其经历了从单因素到多因素评价、定性分级到半定量和定量分级的发展历程。

国外对围岩质量评价的研究较早,俄国学者 Protodyakonov 于 1909 年提出了岩石坚固性系数 f 的概念,于 1926 年调整 f 值计算方法并建立了岩

石分级法,将岩石分为 10 级(林韵梅,1996)。美国学者 Terzaghi(1946)基于压力拱理论,按岩性、裂隙发育程度和地下水状态将围岩分为 9 级,建立了以“围岩荷载”为核心的分类体系,是早期松散体理论的代表性方法。奥地利学者 Lauffer(1958)按岩石自稳时间将岩石分为 7 级。美国学者 Deere et al.(1966)提出了 RQD 岩石质量分级法,并将岩体质量划分为 5 级。日本国铁研究所于 1972 年提出了以弹性波速度为核心指标的隧道围岩强度分类方法(王明年和李玉文,2008)。美国学者 Wickham et al.(1972)提出了考虑地质和施工因素的 RSR(rock structure rating)岩石结构分级法。南非学者 Bieniawski(1973,1989)提出了考虑岩石强度、RQD 值、节理间距、节理状态、地下水和节理产状与隧道轴线关系的 RMR 岩体地质力学分类法,将围岩质量分为 5 级。挪威学者 Barton et al.(1974)选择 RQD 值、节理组数、节理粗糙度、节理蚀变程度、裂隙水和地应力 6 个指标建立 Q-system 分级法,将围岩质量分为 9 级。挪威学者 Palmström(1995)通过节理参数折减岩

国外发展历程 1926—2019 年



国内发展历程 1959—2008 年

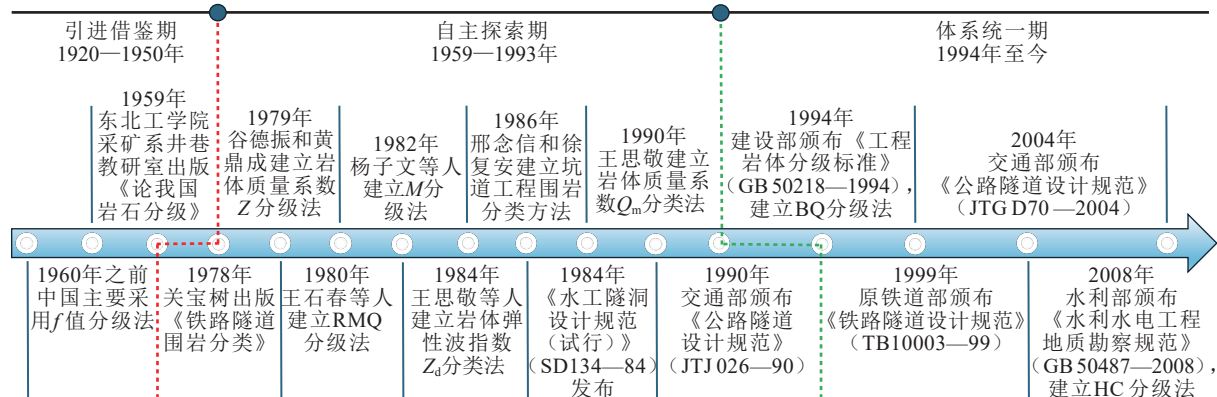


图 1 国内外传统隧道围岩分级方法发展历程

Fig. 1 Evolution of conventional rock mass classification methods for tunnels worldwide

石单轴抗压强度,建立 RMI(rock mass index)岩体指数分级法,将岩体质量分为6级。Hoek and Brown(1997)采用图解法建立 GSI(geological strength index)地质强度指标分级法。Barton(2002)新增了超过900个来自挪威、瑞士和印度的样本,并于2015年更新了Q-system操作手册。González de Vallejo(2003)针对高构造应力区的软弱岩石隧道提出了SRC(surface rock classification)岩体分类系统。Celada et al.(2014)将岩体体积节理数替换RQD,并考虑开挖方法和应力-应变行为指标,提出了RMR14方法。Aydan et al.(2014)考虑岩石的降解程度、不连续面的组数、间距和状态、地下水渗流和吸收情况,提出了RMQR(rock mass quality rating)分类系统。Saroglou et al.(2019)针对各向异性岩体提出了ARMR(anisotropic rock mass rating)分类系统。

中国围岩分级相关研究起步相对较晚,在20世纪60年代之前,中国主要采用 f 值分级法,且主要用于采矿工程中。东北工学院采矿系井巷教研室于1959年出版《论我国岩石分级》一书(东北工学院采矿系井巷教研室,1959),由此中国关于各类工程岩体分级的研究步入正轨。1975年,原铁道部颁布了《铁路工程技术规范·第3篇——隧道》(1974交铁基字2960号),该规范将围岩由稳定到不稳定共分为6类,这是中国第一部系统的隧道围岩分类标准,取代了沿用多年的 f 值分级法,标志着中国隧道围岩分级从借鉴国外经验走向独立发展的新阶段(林韵梅,1996)。关宝树(1978)出版《铁路隧道围岩分类》,详述了围岩分级方法的发展历程和其他围岩分级方法。谷德振和黄鼎成(1979)选取岩体完整性、结构面抗剪特性(结构面摩擦系数)和岩块坚强度(岩石饱和单轴抗压强度的1%)3个指标建立岩体质量系数 Z 分级法,将岩体质量划分为4个级别。杨子文等(1982)根据岩体和岩块的弹性纵波速度,建立 M 分级法,将岩体工程质量分为5级。1984年,原水利电力部颁布了《水工隧洞设计规范(试行)》(SD 134—84),该规范按岩石强度、岩体完整程度、结构面状态、地下水和主要结构面产状5项因素将围岩分为5类,是中国第一部包含围岩分类表的水工隧洞设计规范。王思敬等(1984)采用岩体完整性、岩石变形模量和岩体弹性波速3个指标,建立岩体弹性波指数

Z_d 分类法,将岩体质量分为5级。王石春等于1980年选择岩体完整性、岩石质量(强度)、地下水、主要结构面状态、结构面产状与洞轴线关系5个指标,建立RMQ法,将隧道围岩质量分为5级(王石春等,2007)。邢念信和徐复安(1986)选择岩体完整性、岩石单轴抗压强度、岩层产状与隧洞轴线关系、地应力和地下水5个指标,建立坑道工程围岩分类方法,将坑道围岩分为5级。王思敬(1990)基于岩体力学性能建立岩体质量系数 Q_m 分类法。1990年,交通部颁布了《公路隧道设计规范》(JTJ 026—90),该规范在1975年铁路隧道围岩分类的基础上,按围岩主要工程地质特征和开挖后的稳定状态将公路隧道围岩分为6类,是中国第一部正式的公路隧道围岩分类标准。原建设部1994年颁布《工程岩体分级标准》(GB 50218—1994),选取岩体完整性、岩石强度、地下水、软弱结构面产状和洞轴线关系、地应力5个指标建立BQ法。林韵梅(1996)出版《岩石分级的理论与实践》,系统总结了国内外岩石分级研究的历史、现状与发展趋势。原铁道部(1999)颁布《铁路隧道设计规范》(TB 10003—1999),其中铁路隧道围岩分级方法参考《工程岩体分级标准》(GB 50218—1994)。交通部2004年颁布《公路隧道设计规范》(JTG D70—2004),其中公路隧道围岩分级方法参考《工程岩体分级标准》(GB 50218—1994)和《铁路隧道设计规范》(TB 10003—1999)。水利部(2008)颁布《水利水电工程地质勘察规范(2022年版)》(GB 50487—2008),选取岩石强度、岩体完整性、结构面状态、地下水状态、结构面产状与隧洞轴线关系,考虑围岩强度应力比的修正,建立HC分级法。至此,中国逐渐形成了以BQ法为核心的较为统一的工程岩体分级方法。

1.2 国内外典型围岩分级方法研究现状

1.2.1 BQ分级法

BQ分级法源于原建设部于1994年颁布的《工程岩体分级标准》(GB 50218—1994),目前已更新到GB/T 50218—2014版本(计算见公式1)。另外,《公路隧道设计规范 第一册 土建工程》(JTG 3370.1—2018)和《公路隧道设计细则》(JTG/T D70—2010)为适应现场施工,在BQ分级法的基础上,提出了Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ级围岩的亚级划分。《铁路隧道设计规范(2024、2026年局部修订)》(TB 10003—2016)

在定性判断围岩质量等级的基础上,增加了围岩弹性纵波速度作为辅助判级;增加了地下水、地应力对围岩亚级影响的定性修正。

$$[BQ] = 90 + 3R_c + 250K_v - 100(K_1 + K_2 + K_3) \quad (1)$$

式中: $[BQ]$ 为围岩基本质量修正值; R_c 为岩石饱和单轴抗压强度; K_v 为岩体完整性系数; K_1 为地下水影响修正系数; K_2 为软弱结构面产状影响修正系数; K_3 为初始应力状态影响修正系数。

随着地下工程的不断建设发展,学者们针对 BQ 分级法在特殊工况下的局限性开展了大量研究,主要集中在以下 4 个方面: (1) 针对特殊地质构造和灾害环境效应的适用性修正,如针对岩溶(管洪良, 2011)、层间剪切带(闫长斌等, 2018)等不良地质构造,以及地震作用诱发的震裂岩体与潜在震害演化(安博, 2013; 刘华, 2020; Cui et al., 2021),提出了针对性的折减参数与修正公式。(2) 针对围岩基本质量的修正参数取值进行优化,如赵逸文(2020)引入 Jaeger-Donath 和 Mogi-Coulomb 准则来修正软弱结构面和初始应力状态影响修正系数;针对初始应力状态、地下水状态和软弱结构面修正系数的定量数学表征与二次修正(牛文林, 2015; 姜鹏等, 2020)。(3) 针对工程尺度效应的量化修正,如耿晓杰(2015)和吴秋军(2017)提出了考虑隧道跨度的修正 BQ 方法,殷明伦(2019)提出了考虑隧道尺度效应和结构面结合程度的 $[BQ]_{s-p}$ 分级法。(4) 针对传统 BQ 法的快速应用优化,如 Chen et al.(2021)提出了基于单轴抗压强度、RQD、Lugeon 值的 BQ 修正公式,赵文等(2022)采用图解法简化了围岩基本质量 BQ 值的计算公式。

1.2.2 Q-system 分级法

Barton et al.(1974)通过整理分析 212 个地下工程样本提出 Q-system(或简称 Q 法)分级法,并于 1993 年和 2002 年增加了 1 900 多条来自挪威、瑞士和印度的地下工程数据,对 Q-system 分级法进行了修订(计算见公式 2)。NGI(Norwegian Geotechnical Institute, 挪威岩土工程研究所)2015 年更新了 Q-system 操作手册,其内容包含地下工程围岩质量分级和岩石支护设计决策。

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF} \quad (2)$$

式中: Q 为围岩质量分数; RQD 为岩石质量指标; J_n 为节理组数; J_r 为(最脆弱)节理粗糙度; J_a 为

(最脆弱)节理蚀变程度或充填情况; J_w 为裂隙水折减系数; SRF 为应力折减系数。 RQD/J_n 表征节理程度; J_r/J_a 表征节理摩擦(嵌合岩块的抗剪强度); J_w/SRF 表征主动应力。

学者们针对 Q-system 分级法在特殊工况下的局限性开展了大量研究,主要集中在以下 3 个方面: (1) 针对核心评价参数的优化,如向明智(2009)利用水电工程案例优化 J_n 和 J_a 的取值; Ji et al.(2019)引入波速折减系数 R_{kv} 替代 RQD/J_n ; Rehman et al.(2019)考虑岩石强度来优化 SRF 的取值。(2) 针对特殊地质构造、灾害效应和结构面空间几何关系的适用性修正,如余莉等(2013)考虑断层、褶皱、地形和岩溶对洞室稳定性影响来修正 Q-system 分级法; Hajiazizi and Khatami(2013)考虑地震效应对 Q 值的修正; 王章琼等(2018)增加最大主应力方向与洞轴线夹角和片理面倾角折减系数。(3) 针对多场环境的适用性修正,如 Chen et al.(2015)和谭文辉等(2020)针对热-水-力-化环境提出修正 Q-system 分级法。

1.2.3 RMR 分级法

Bieniawski(1973)提出 RMR 地质力学分级法, Celada et al.(2014)基于 2 298 条案例,考虑了施工因素对岩体质量的影响,提出了 RMR14 方法,但目前广泛使用的是 Bieniawski(1989)改进的 RMR 分级法版本(计算见公式 3)。

$$RMR = A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + A_5 + B \quad (3)$$

式中: A_1 为岩石单轴抗压强度评分; A_2 为岩石质量指标 RQD 评分; A_3 为节理间距评分; A_4 为节理状态评分; A_5 为地下水状态评分; B 为节理产状与洞轴线关系修正评分。

学者们针对传统 RMR 分级法在处理指标评分边界跳跃、多场环境以及开挖扰动等方面的局限性,开展系统性研究主要遵循以下 4 个技术路径: (1) 针对指标评分的连续性优化,如针对岩石强度、RQD 和节理状况等参数进行连续性评分优化(陈近中, 2007; 张琦等, 2017; Rad and Jalali, 2019); (2) 针对多组节理同时存在的节理状态评分优化,如齐三红等(2013)利用加权平均法计算多组节理状况的评分值,戚伟等(2020)考虑不同节理组合切割的块体稳定性来修正 RMR 分级法; (3) 针对热水力复杂环境的适用性修正,如考虑高地温和地下水对岩石强度的劣化效应,同时增加高地应力评分折减参数来修正 RMR 分级法

(谢本贤等, 2007; Tong et al., 2022; 汪炳锋和江铃峰, 2023); (4) 考虑开挖扰动的精细化分级, 如李腾(2018)考虑爆破施工因素、葛伟杰等(2023)考虑开采扰动因素来修正 RMR 分级法。

1.3 传统围岩分级方法的局限性

1.3.1 BQ、Q-system 和 RMR 分级方法的核心区别

BQ、Q-system 和 RMR 虽同属多因素综合评价体系, 但在评价逻辑上存在差异。BQ 法采用加法-减法两级结构, 先利用岩石强度和岩体完整性确定围岩基本质量, 再考虑高地应力、地下水和软弱结构面产状与洞轴线走向关系对围岩基本质量的折减, 其核心逻辑是“岩体基本质量+扣除环境劣化”。Q-system 采用乘商法结构, 将 6 个参数按 3 组比值连乘, 其核心逻辑是“岩体完整性×结构面状况×应力状态”, 对极端参数值(如节理发育或 SRF 极高)的响应更为敏感。RMR 采用加法结构, 将 6 项指标评分直接求和, 其核心逻辑是“多因素线性叠加”, 计算最为简便, 但对各项指标的评分边界依赖较强。3 种方法的使用范围也有所不同, 如 BQ 法在国内交通隧道领域应用最广, Q-system 在北欧及国际硬岩工程中占主导地位, RMR 在全球矿山和边坡工程中广泛使用。

1.3.2 BQ、Q-system 和 RMR 分级方法的局限性

BQ 法针对地下水和软弱结构面产状的围岩质量修正过于粗略, 也没有考虑高地应力岩爆、大变形灾害对围岩质量的影响, 且忽略了高地温对围岩质量的影响。Q-system 分级法在无节理或少节理软岩、膨胀性岩石中的针对性较差; 其地应力折减系数取值复杂且与国内应力分级标准存在差异, 同样忽略了高地温影响。RMR 分级法对于岩石强度、RQD 和结构面间距等核心指标在划分临界点时存在评分跳跃与边界模糊性问题, 且未考虑高地应力和高地温对围岩质量的折减。

综上, 3 种主流传统定量分级体系在底层逻辑上均缺乏对“高地应力-高地温-高渗透水压”多场耦合劣化效应的系统表征。既有改进研究也多为针对特定工况进行参数的局部优化, 少有涵盖热力环境耦合作用的系统性修正方案, 导致传统定量分级结果在深部地下工程中极易发生偏于危险的误判。

2 隧道围岩分级的智能化赋能

2.1 基于工程地质参数的围岩智能分级

隧道围岩分级传统上依赖地质工程师现场素描获取岩体结构和赋存地质环境特征, 再结合室内试验进行综合判定。该方法存在参数获取繁琐、主观性强、效率低下等固有缺陷, 难以适应机械化快速施工对围岩级别实时判别的需求。为此, 模糊数学、可拓学、灰色理论等数学方法与计算机技术的融合, 推动了基于工程地质参数的围岩分级智能化研究。

早期研究以模糊综合评判为主, 如范新宇等(2019)和陈曦等(2019)利用模糊数学方法处理多因素分级问题。随后, 可拓学和熵权法也被相继引入, 如杨博文(2019)融合可拓学物元模型与熵权法, 降低了指标权重确定的主观性。随着人工智能技术的发展, 机器学习也被大量用于围岩分级, 如方昱等(2013)、马俊杰等(2019)、郑帅等(2019)、吕擎峰等(2020)和 Ma et al. (2022)利用决策树、逻辑回归、随机森林、朴素贝叶斯、支持向量机(SVM)、贝叶斯网络等机器学习算法构建了基于工程地质参数的围岩智能分级模型。数学方法与机器学习算法的有机结合显著提升围岩分级效率与准确性, 如 Ma et al. (2024)将分形理论与机器学习算法结合, 以分形维数量化结构面几何分布状态, 兼顾了分类精度与可解释性。

基于工程地质参数的围岩智能分级遵循传统分级体系的理论框架, 核心优势是与现行规范兼容、结果可追溯。但其未突破传统指标获取的效率瓶颈, 这为随钻参数和计算机视觉等方法的快速发展提供了驱动因素。

2.2 基于随钻参数的围岩智能分级

基于全电脑凿岩台车随钻测量(measurement while drilling, MWD)参数的智能分级技术, 是克服传统定量方法主观性强、时效性差的重要途径。随钻参数(包括钻进速度、推进压力、冲击压力和回转压力等)与开挖施工完全同步采集, 其本质直接反映了钻头与岩体相互作用的力学响应过程, 具备穿透掌子面表面、感知前方一定深度围岩质量的能力(Wang et al., 2024)。

国际上 MWD 技术研究起步较早, Ghosh et al. (2018)基于主成分分析提取综合指标以区分

硬岩、裂隙及空洞,率先实现了“数据采集-岩体分类-支护决策”的完整闭环;van Eldert et al.(2020)定量论证了归一化随钻参数与Q值及实际支护强度的强相关性;Hansen团队基于多个隧道的超大规模数据集,利用集成学习实现了86%的围岩级别判识准确率,并进一步通过无监督聚类路径,为无标签极端工况下的数据稀缺难题提供了解决思路(Hansen et al., 2024; Hansen and Aarset, 2025)。

国内研究聚焦于算法融合与工程应用,姚萌(2020)、吴俊(2025)和Li et al.(2025)利用SVM、随机森林及梯度提升树等多种机器学习算法构建了围岩级别智能判识模型;Wang et al.(2021)研发了搭载于台车的ICS-SR-DBT智能分级系统,实现了数据的原位采集与在线分类。近年来,国内学者在多源信息融合(王明年等, 2024)、围岩亚级精细化判识(赵思光, 2023)以及长短时序深度学习建模(Xiao et al., 2026)等方面取得了实质性突破,构建了适应中国隧道智能建造需求的随钻参数智能分级技术体系。

2.3 基于计算机视觉的围岩智能分级

机器视觉技术具备非接触、高效及自动化的特征,可在后方安全区域完成掌子面图像采集,其技术路径主要分为可见光图像的间接与直接判识,并逐步向多模态机器视觉协同方向演进。

在基于可见光图像的围岩智能判识方面,利用图像处理算法自动化提取岩体结构、完整程度、风化状态及地下水等关键分级指标,再结合多参数融合模型输出分级结果是主要研究方向之一(黄音昊, 2021; 周梦琳等, 2024; 徐常松, 2025)。该研究路径优势在于与现行规范兼容性好,分级结果具可追溯性。另一研究路径是无需人工定义中间指标与特征提取规则,直接通过深度学习模型建立掌子面图像到围岩级别的非线性映射(Kim and Yun, 2024; 向露露等, 2024)。该研究路径简化了技术流程,可有效避免中间参数提取环节的误差累积。

为弥补单一可见光图像在高粉尘、低光照环境下的感知局限,点云、高光谱等机器视觉信息被引入围岩智能判识体系。Mehrisal et al.(2025)开发的TRaiC平台集成了裂隙追踪、3D数字孪生建模与迹线网络分析功能;Yang and Li(2026)利用运动恢复结构和多视图立体视觉三维重建获取3D点云,结合ConvLSTM与自注意力机制,

实现了结构面三维分布及沿掘进方向的时空演化预测。许振浩等(2024)融合图像节理结构特征与光谱中的岩石强度特征,实现了高粉尘工况下的BQ/RMR智能分级。

3 深部极端环境下围岩分级的挑战与应对

3.1 热力环境环境下围岩分级面临的挑战

深部地下工程中,原岩应力、地温与地下水压呈现复杂的非线性增长与非均匀分布。这种“三高”环境与开挖扰动的动态耦合作用,导致现有基于浅部工程经验建立的围岩分级方法面临严峻挑战。这些挑战根源于传统方法对“三高一扰动”下岩体质量劣化机理与动态演化特征考虑的缺失,具体表现如下。

(1)高地应力环境下的响应畸变与指标缺失

传统定量围岩分级方法难以反映深部应力场在开挖扰动下的动态演化特征及致灾效应,如RMR分级法未将地应力纳入评价指标,其修正版RMR14分级法虽通过开挖面塑性变形间接考虑地应力影响,但计算流程繁琐,难以满足施工现场的快速判级需求;BQ法的地应力修正系数为范围值而非精确值,高与极高地应力的划分界限粗略;Q-system的应力折减系数确定过程复杂,且地应力分级标准与中国现行规范存在较大差异。国内外典型深埋隧道实测资料表明(表1),当最大初始地应力普遍超20 MPa时,在开挖应力重分布与瞬态卸荷效应下,硬岩极易爆发脆性岩爆,软岩则呈现强烈的大变形失稳(李天斌等, 2016; 何满潮等, 2022)。此外,主应力方向与隧道轴线的空间几何夹角对围岩的各向异性变形具有决定性影响(尤哲敏, 2013)。这种由高地应力主导的、对开挖方式和几何形态敏感的破坏模式,是传统静态分级和经验类比方法所无法涵盖的关键挑战。

(2)高渗透水压环境下的非线性劣化与参数获取困境

高渗透地下水压通过渗流场与应力场的耦合作用,动态劣化围岩力学参数(如围岩强度、内摩擦角和黏聚力等),在宏观上表现为围岩质量劣化和变形破坏(陈寿堂, 2012; 钱七虎, 2012; 李术才等, 2018)。传统分级体系对地下水的处理方式过于粗糙,未区分硬岩与软岩在多场耦合

表 1 国内外典型高地应力隧道案例
Table 1 Representative case studies of tunnels under high in-situ stress located worldwide

隧道名称	长度/km	最大埋深/m	最大地应力/MPa	主要岩性	高地应力灾害
巴陕高速米仓山隧道	13.790	1 070.00	25.81	花岗岩、闪长岩等	岩爆
成兰铁路平安隧道	28.400	1 720.00	31.50	灰岩、砂岩等	岩爆
川藏公路二郎山隧道	4.176	770.00	53.70	砂岩、砂质泥岩等	岩爆
大瑞铁路高黎贡山隧道	34.538	1 155.00	30.00	玄武岩、砂岩、灰岩、花岗岩	岩爆、大变形
大相岭泥巴山隧道	10.007	1 648.00	38.00	火山碎屑岩、熔岩等	岩爆、大变形
滇中引水香炉山隧洞	62.596	1 450.00	23.00	灰岩、粉砂质泥岩等	岩爆、大变形
峨汉高速大峡谷隧道	12.170	1 944.00	47.39	白云岩等	岩爆
锦屏水电站隧洞群	16.700	2 525.00	70.10	大理岩、砂岩等	岩爆
拉林铁路巴玉隧道	13.047	2 073.00	45.77	花岗岩	岩爆
拉林铁路桑珠岭隧道	16.258	1 347.00	35.80	闪长岩、花岗岩等	岩爆
兰渝铁路木寨岭隧道	19.020	715.00	27.16	板岩、碳质板岩等	大变形
兰新铁路乌鞘岭隧道	20.050	1 100.00	32.84	安山岩、千枚岩夹板岩等	大变形
南疆铁路中天山隧道	22.450	1 728.00	34.77	变质砂岩、角斑岩等	岩爆
青藏铁路关角隧道	32.690	900.00	22.04	灰岩、砂岩夹板岩等	大变形
色季拉山铁路隧道	37.965	1 687.85	45.52	花岗岩、闪长岩	岩爆、大变形
汶马高速鹫鸪山隧道	8.100	1 350.00	35.00*	千枚岩等	大变形
武九高速高楼山隧道	12.272	1 680.00	48.63*	变质砂岩、板岩等	岩爆
西康高速终南山隧道	18.020	1 600.00	36.16	混合片麻岩等	岩爆
雅康高速二郎山隧道	13.400	1 468.93	56.61*	花岗岩等	岩爆
引汉济渭秦岭隧洞	81.800	2 012.00	29.85	石英岩、花岗岩、闪长岩	岩爆
Lyon-Turin铁路隧道	54.000	2 000.00	36.00	砂页岩、灰岩、片麻岩	大变形
Gotthard base铁路隧道	57.090	2 450.00	65.79*	片麻岩、白云岩等	岩爆、大变形
Lötschberg base铁路隧道	34.600	2 200.00	38.00	片麻岩、花岗岩等	岩爆
Brenner base隧道	55.000	1 720.00	45.00*	片麻岩、花岗岩等	岩爆

注：表中的*指最大地应力值，通过埋深进行估算，即埋深×岩石重度。

下的差异化劣化路径：硬岩劣化主要受控于裂隙水压渗流驱动和结构面强度的渐进弱化；软岩劣化则涉及黏土矿物吸水膨胀、崩解及泥化等复杂的物理化学力学过程。此外，现行《工程岩体分级标准》(GB/T 50218—2014)以裂隙水压或者每 10 m 洞长的出水量定量判识地下水状况，但在深部钻爆法快速掘进工况下，上述参数无法原位、定量和准确获取，导致围岩分级在源头上缺乏即时可靠的数据支撑。

(3)高地温环境下的热应力附加效应与强化/劣化演化特征

根据《铁路隧道设计规范(2024、2026 年局部修订)》(TB 10003—2016)、《水利水电工程施工

组织设计规范》(SL 303—2017)、《公路隧道施工技术规范》(JTG/T 3660—2020)和拉日铁路高温隧道建设经验，可将围岩温度超过 28 ℃ 定义为高地温隧道。高地温对围岩力学特性的改造主要表现在两方面：一方面，开挖揭露与人工冷却使开挖面内外产生明显的温度梯度，诱发的非均匀附加热应力会显著影响围岩初始应力场的重分布(谢和平等, 2022; 郭平业等, 2023)；另一方面，在工程尺度高温环境下(≤120 ℃)，地温对围岩质量具有消极或积极的双向机制。当高温恰使岩体原生微裂隙产生热膨胀闭合时，能在一定程度上提高围岩抗压强度；而当高温诱发新生微裂纹并不断扩展，或遭遇快速人工降温引发冷击

热震效应而产生内生拉应力时,则会导致围岩发生显著的热损伤退化(李孟熠, 2023; 王新中, 2023)。这种温度场引起的材料力学性质演化与热应力效应,是传统围岩分级方法完全忽略的维度。

总之,开挖扰动与高地应力、高渗透水压、高地温环境的动态耦合作用,使深部围岩质量的劣化过程呈现出显著的复杂非线性特征。特别是热水力环境下软硬岩差异化的力学响应机制(Vaezi et al., 2025),是传统围岩分级方法难以准确表征的。这一瓶颈构成了当前川藏铁路、雅下水电工程等国家重大战略工程面临的核心挑战。因此,亟需突破传统“静态分级、经验修正”的范式局限,构建一套能够动态表征热水力环境耦合效应、兼容硬岩与软岩差异化劣化路径的深部围岩分级新框架。

3.2 考虑热水力环境的围岩分级框架

3.2.1 深部围岩质量分级框架

深部围岩质量(deep rock mass quality, DRMQ)是岩体组成、岩体赋存环境和开挖扰动因素非线性耦合作用的宏观结果。其中岩体组成决定了深部围岩的基本物理力学属性,是表征深部围岩基本质量的内在属性;在深部复杂热水力环境下,通过热损伤、有效应力削弱和脆延转换等力学机制,动态劣化围岩固有的基本物理力学特性,从而使围岩质量发生劣化作用;而深部地下工程开挖带来的强烈破岩动力扰动和应力卸荷,打破深部热水力状态动态平衡,是劣化围岩质量的动力外因。因此,本文初步构建考虑热水力环境的围岩分级框架(公式4),旨在从系统工程地质学视角下确立岩体内在属性、赋存环境与开挖扰动三者之间的宏观组合与映射逻辑,为深部复杂地下工程的围岩质量判识提供一种考虑多场劣化效应的宏观评价体系。

$$DRMQ = \begin{cases} f(RMC) + f(RME) + f(EMSO) \\ f(RMC) \cdot f(RME, EMSO) \end{cases} \quad (4)$$

式中: $f(RMC)$ 为岩体组成表征函数; $f(RME)$ 为环境劣化效应函数; $f(EMSO)$ 为开挖扰动响应函数; $f(RME, EMSO)$ 为多场耦合劣化效应函数。

公式4提供2种考虑热水力环境的围岩分级框架,第一种采用指标分别评分再求和的围岩质量评价思路,此分级框架的关键在于如何选取评价深部围岩质量的关键指标并合理确定各指标的最大评分;第二种采用环境因素和开挖扰动因

素综合劣化岩体基本组成评分的围岩质量评价思路,此分级框架的关键在于定量揭示环境因素和开挖扰动因素对围岩固有物理力学特性的影响作用,以此合理确定劣化系数 $f(RME, EMSO)$ 。第一个分级框架的优势在于简单易用,第二个分级框架的优势在于有效揭示深部围岩质量的劣化机制。

3.2.2 深部围岩质量影响因素

岩体组成包括完整岩石和结构面的物理条件,如岩石类型、完整岩石特征(强度、变形模量等)、不连续性特征(节理间距、粗糙度、蚀变情况、规模和状态等)、地质结构(断层、软弱带、褶皱和岩溶等)。不同类型的岩石具有不同的力学性质、结构性质和物理特征(如强度、孔隙度、矿物组成和地质背景等),岩石的各类性质也影响着岩体的性质。岩体的不连续性导致其具有不同的岩体结构特征,岩体的结构特征对于评价围岩质量具有重要意义。

岩体赋存环境包括原位应力条件、地下水条件和温度条件。原位应力指岩体的垂直应力和水平应力:垂直应力(又称自重应力)通常与覆盖层岩石的重量有关,由岩石的天然重度和埋深相乘得到;岩体的水平应力通常主要受构造运动影响,具有很强的方向性。地下水与岩体的相互作用本质为通过物理、化学和力学作用影响渗流场和应力场之间的耦合作用。在地热异常区的隧道开挖后,会导致开挖面内外产生明显的温度差异,由此产生的附加热应力会影响围岩应力场的重分布。

开挖扰动因素包括地下工程的开挖方法、开挖顺序及规模、断面形状以及开挖方向。通常机械开挖对围岩的扰动小于钻爆法开挖,但在节理不发育的硬岩中,钻爆法开挖有利于岩体中的高应力释放,从而降低岩爆发生风险(Celada et al., 2014; Li et al., 2017)。通常分步开挖比全断面开挖更有利于岩体的稳定;而分步开挖方法中,一次性开挖的岩石体积越小越有利于岩体的稳定。矩形断面开挖后在上下4个角容易出现应力集中,从而导致这些部位更容易发生变形破坏;圆形断面、马蹄形断面、半圆形或半椭圆形断面和矩形断面对开挖后岩体的稳定性影响越来越不利(申艳军和闫蕊鑫, 2014)。随着地下工程建设理念的更新和施工技术的提高,目前的钻

爆法开挖隧道基本为马蹄形,TBM开挖的隧道基本为圆形,故不必考虑断面形状对围岩质量的影响。洞室长轴线与最大主应力方向的夹角越小,越有利于洞室开挖后的稳定;洞室长轴线与主要软弱结构面走向的夹角越大,越有利于洞室开挖后的稳定(卢波等,2021)。

4 讨论

4.1 现有经验-数据协同分级范式的局限性

为克服传统围岩分级方法与纯数据驱动围岩智能分级模型存在的不足,目前研究多采用“经验评价提供标签、智能算法完成非线性映射”的协同分级模式(Saadati et al., 2025)。该模式在常规地下工程中取得了一定效果,但在深部“三高一扰动”环境下仍面临2方面限制。

首先,有监督学习模型的性能高度依赖训练标签的可靠性(Han et al., 2023)。而现有围岩分级方法大多建立于浅埋或中浅埋工程经验,其评价指标及权重难以充分反映“三高一扰动”环境下围岩性质的演化特征。当传统围岩分级结果直接作为智能模型训练标签时,标签本身可能存在系统偏差,导致智能模型学习并放大已有认知误差,从而限制其在深部热水力极端环境中的适用性。

其次,深部围岩质量劣化具有明显的时空演化特征,其形成过程受到开挖卸荷与热水力环境耦合作用的共同控制(谢和平等,2023)。然而,现有围岩智能分级研究缺乏对围岩劣化过程及演化规律的刻画,模型难以实现围岩状态的动态预测与超前预警。因此,如何建立能够反映围岩质量演化过程的分级框架,仍是当前研究亟待解决的问题。

4.2 多场劣化机制与多模态大模型的融合

围岩质量演化受岩体结构特征、赋存环境及工程扰动等多因素共同影响,其本质是复杂环境条件下岩体力学性质持续劣化的过程。因此,未来围岩分级研究的发展方向不应局限于数据规模扩展或算法复杂化,而应加强工程地质机理与智能模型的深度融合。

随着智能建造技术的发展,掌子面图像、三维点云、随钻参数、微震监测及地质编录等多源数据正逐步实现同步获取,为建立多模态智能分级模型提供了条件(Alejandro, 2025; Erharter et al.,

2025)。相较于单一数据驱动模式,多模态融合能够从结构特征、力学响应和施工反馈等多个层面表征围岩状态,有助于提高复杂地质条件下的识别能力。

与此同时,模型构建过程中应充分体现工程地质约束。例如,将岩体结构控制作用、环境劣化效应及开挖扰动影响等基本规律融入模型训练与推理过程,使模型预测结果不仅具有统计意义上的准确性,而且符合岩体力学演化规律。通过机理认知与多模态数据驱动的有机结合,可进一步提升模型在未知工况下的泛化能力和工程适用性。

4.3 面向工程应用的高可信度围岩智能分级体系

围岩分级结果直接服务于支护设计、施工组织及灾害防控,其工程决策属性决定了智能分级研究不能仅以预测精度作为评价标准,还应重点关注模型结果的可解释性与可信度。

一方面,智能分级模型需摆脱黑盒机制,显式表征各输入特征对分级结果的贡献度与因果映射关系,确保模型的推理逻辑符合岩体力学基本规律。另外,由于深部地下工程地质条件复杂,部分极端工况样本难以充分获取,模型预测不可避免地存在认知不确定性(王婧潇等,2026)。因此,在分级结果输出的同时,应同步给出预测可信度或不确定性范围,为工程人员提供风险判断依据。

未来智能围岩分级的发展趋势应由“结果预测”向“风险感知决策”转变,即不仅能够给出围岩等级,还能够识别模型适用边界并量化预测风险。当预测结果超出模型认知范围时,应及时触发人工复核或采取保守设计措施,从而提高围岩智能分级在深部地下工程中的应用可靠性和决策支撑能力。

5 结论

本文通过对钻爆法隧道围岩分级体系的发展历程、智能化现状及深部热水力极端环境挑战的系统梳理与深入探讨,得出以下主要结论。

(1)以BQ、RMR和Q-system分级方法为代表的多因素综合定量评价体系,在浅埋隧道工程中具有丰富的应用基础。但其核心指标及其评分权重基于常规环境工程经验确立,且参数获取耗时、主观性较强,难以满足当前隧道机械化、快

速化和智能化施工对围岩级别实时动态评价的需求。

(2) 基于工程地质参数、随钻参数和掌子面图像的围岩智能分级方法, 显著提升了围岩分级的效率与客观性。然而, 现有围岩智能分级方法存在可解释性差的黑盒问题。由于缺乏地质规律与岩体力学规则的约束, 智能分级模型在面临训练数据库之外的极端地质环境时, 其预测和泛化性能受到影响, 难以独立作为深部复杂隧道支护决策的刚性依据。

(3) 深部地下工程面临“三高一扰动”复杂环境, 开挖扰动与高地温引发的热损伤、高渗透压导致的有效应力折减以及高地应力导致的脆延转换的动态耦合作用, 使得深部围岩质量发生显著非线性劣化。现有围岩分级方法在深部热力极端环境下适用性差, 本文提出的考虑热力环境和开挖扰动因素的围岩分级框架可为深部热力极端环境下的围岩分级方法修正或重构提供理论参考。

(4) 针对现有围岩分级体系的瓶颈, 未来深部围岩分级可针对以下 2 个方向开展研究: 一是研发具备多模态感知能力的智能随钻装备, 可实时获取围岩的温度、渗透压和应力状态; 二是将岩体多场耦合本构方程嵌入损失函数中, 构建具备物理规则约束、高泛化性能的可解释性围岩分级大模型和智能体。

利益冲突声明: 本文所有作者声明本研究无任何利益冲突。

作者贡献声明: 马俊杰和李天斌参与论文构思和研究方法; 马俊杰和高东源参与数据分析和绘图; 马俊杰、李天斌和高东源参与论文写作和修改。所有作者均阅读并同意最终稿件的提交。

[参 考 文 献]

- 安博, 2013. 隧道震裂岩体的工程特性及处治措施研究[D]. 成都: 成都理工大学.
- An B, 2013. Discussion on engineering properties and of treatment measures of tunnel crossing shattered rock[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology. (in Chinese)
- 陈近中, 2007. 双江口电站工程岩体质量分级研究[D]. 成都: 成都理工大学.
- Chen J Z, 2007. Engineering rock mass classification of Shuangjiangkou hydroelectric station[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology. (in Chinese)
- 陈寿堂, 2012. 水岩耦合作用对隧道稳定性影响分析及隧道围岩分级修正方法研究[D]. 成都: 西南交通大学.
- Chen S T, 2012. Analysis on impact of water-rock coupling on tunnel stability and study on the modification method in rock classification[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University. (in Chinese)
- 陈卫东, 李天斌, 黄音昊, 等, 2024. 隧道围岩分级特征智能识别及可视化研究[J]. 铁道科学与工程学报, 21(1): 406—421.
- Chen W D, Li T B, Huang Y H, et al., 2024. Intelligent identification of classification features of tunnel surrounding rock and visualization[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 21(1): 406—421. (in Chinese)
- 陈曦, 曾亚武, 刘伟, 等, 2019. 岩体基本质量分级模糊综合评价法研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 52(6): 511—522.
- Chen X, Zeng Y W, Liu W, et al., 2019. Research on classification of rock mass basic quality based on fuzzy comprehensive evaluation method[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 52(6): 511—522. (in Chinese)
- 陈湘生, 全昭熹, 陈一凡, 等, 2024. 极端环境隧道建造面临的主要问题及发展趋势[J]. 隧道建设(中英文), 44(3): 401—432.
- Chen X S, Quan Z X, Chen Y F, et al., 2024. Primary challenges and developmental trends of tunnel construction in extreme environments[J]. Tunnel Construction, 44(3): 401—432. (in Chinese)
- 东北工学院采矿系井巷教研室, 1959. 论我国岩石分级[M]. 北京: 煤炭工业出版社.
- 范新宇, 贾志献, 白雪亮, 等, 2019. 熵权模糊综合评价模型在极软岩隧洞围岩分级中的应用[J]. 工程地质学报, 27(6): 1236—1243.
- Fan X Y, Jia Z X, Bai X L, et al., 2019. Classification of extremely soft rock tunnels using comprehensive evaluation model of entropy-weighted fuzzy[J]. Journal of Engineering Geology, 27(6): 1236—1243. (in Chinese)
- 方昱, 刘保国, 刘开云, 2013. 隧道围岩分级的遗传-支持向量分类耦合模型[J]. 铁道学报, 35(1): 108—114.
- Fang Y, Liu B G, Liu K Y, 2013. Tunnel surrounding rock grading model based on genetic-support vector classification coupling algorithm[J]. Journal of the China Railway Society, 35(1): 108—114. (in Chinese)
- GB 50487—2008 水利水电工程地质勘察规范(2022 年版)[S].
- GB 50487—2008 Code for engineering geological investigation of water resources and hydropower[S]. (in Chinese)
- GB/T 50218—1994 工程岩体分级标准[S].
- GB/T 50218—1994 Standard for engineering classification of rock masses[S]. (in Chinese)
- GB/T 50218—2014 工程岩体分级标准[S].
- GB/T 50218—2014 Standard for engineering classification of rock mass[S]. (in Chinese)
- 葛伟杰, 刘艳章, 秦绍兵, 等, 2023. 考虑采动影响的 ACI-

- RMR 法矿山巷道围岩质量分级研究[J]. 有色金属工程, 13(9): 121—129.
- Ge W J, Liu Y Z, Qin S B, et al., 2023. Quality classification for roadway surrounding rock by ACI-RMR method considering the influence of mining[J]. Nonferrous Metals Engineering, 13(9): 121—129. (in Chinese)
- 耿晓杰, 2015. 深埋条件下隧道稳定性评价方法及应用研究[D]. 北京: 北京科技大学.
- Geng X J, 2015. Research on stability evaluation method and application of deep tunnel[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing. (in Chinese)
- 谷德振, 黄鼎成, 1979. 岩体结构的分类及其质量系数的确定[J]. 水文地质工程地质, (2): 8—13.
- 关宝树, 1978. 铁路隧道围岩分类[M]. 北京: 人民铁道出版社.
- 管洪良, 2011. 岩溶隧道围岩分级系统研究[D]. 重庆: 重庆大学.
- Guan H L, 2011. Study on surrounding rock classification system for karst tunnel[D]. Chongqing: Chongqing University. (in Chinese)
- 郭平业, 卜墨华, 张鹏, 等, 2023. 高地温隧道灾变机制与灾害防控研究进展[J]. 岩石力学与工程学报, 42(7): 1561—1581.
- Guo P Y, Bu M H, Zhang P, et al., 2023. Review on catastrophe mechanism and disaster countermeasure of high geotemperature tunnels[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 42(7): 1561—1581. (in Chinese)
- 何满潮, 任树林, 陶志刚, 2022. 深埋隧道灾变防控方法[J]. 工程地质学报, 30(6): 1777—1797.
- He M C, Ren S L, Tao Z G, 2022. Disaster prevention and control methods for deep buried tunnels[J]. Journal of Engineering Geology, 30(6): 1777—1797. (in Chinese)
- 黄音昊, 2021. 隧道围岩分级特征参数的图像智能识别及应用[D]. 成都: 成都理工大学.
- Huang Y H, 2021. Image recognition of feature parameters of surrounding rock classification in tunnels and its application[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology. (in Chinese)
- 姜鹏, 章剑青, 朱征平, 2020. 公路隧道围岩分级岩体基本质量指标修正方法探讨[J]. 公路, 65(1): 332—335.
- JTG 3370.1—2018 公路隧道设计规范 第一册 土建工程[S].
- JTG 3370.1—2018 Specifications for design of highway tunnels section 1 civil engineering[S]. (in Chinese)
- JTG D70—2004 公路隧道设计规范[S].
- JTG D70—2004 Code for design of road tunnel[S]. (in Chinese)
- JTG/T 3660—2020 公路隧道施工技术规范[S].
- JTG/T 3660—2020 Technical specifications for construction of highway tunnel[S]. (in Chinese)
- JTG/T D70—2010 公路隧道设计细则[S].
- JTG/T D70—2010 Guidelines for design of highway tunnel[S]. (in Chinese)
- JTJ 026—90 公路隧道设计规范[S].
- JTJ 026—90 Design specification for highway tunnel[S]. (in Chinese)
- 李利平, 邹浩, 刘洪亮, 等, 2024. 钻爆法隧道智能建造研究现状与发展趋势[J]. 中国公路学报, 37(7): 1—21.
- Li L P, Zou H, Liu H L, et al., 2024. Research status and development trends in intelligent construction of drill-and-blast tunnels[J]. China Journal of Highway and Transport, 37(7): 1—21. (in Chinese)
- 李孟熠, 2023. 热水力作用下花岗岩细观劣化模型与细宏观损伤演进机制研究[D]. 武汉: 武汉大学.
- Li M Y, 2023. Investigation on the deterioration model for meso-mechanical strength and the meso-macro damage evolution mechanism of granite under thermo-hydro-mechanical treatment[D]. Wuhan: Wuhan University. (in Chinese)
- 李术才, 许振浩, 黄鑫, 等, 2018. 隧道突水突泥致灾构造分类、地质判识、孕灾模式与典型案例剖析[J]. 岩石力学与工程学报, 37(5): 1041—1069.
- Li S C, Xu Z H, Huang X, et al., 2018. Classification, geological identification, hazard mode and typical case studies of hazard-causing structures for water and mud inrush in tunnels[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 37(5): 1041—1069. (in Chinese)
- 李腾, 2018. 大型金矿深部充填法采场围岩稳定性分析及控制[D]. 北京: 北京科技大学.
- Li T, 2018. Study on the wallrock stability and safety control of deep filling stope in the large gold mine[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing. (in Chinese)
- 李天斌, 孟陆波, 王兰生, 2016. 高地应力隧道稳定性与地质灾害防治[M]. 北京: 科学出版社.
- Li T B, Meng L B, Wang L S, 2016. Stability of high-stress tunnels and prevention of large-scale rockburst disasters[M]. Beijing: Science Press. (in Chinese)
- 林韵梅, 1996. 岩石分级的理论与实践[M]. 北京: 冶金工业出版社.
- 刘华, 2020. 裂隙岩体卸荷机理与强震区围岩分级修正研究[D]. 杭州: 浙江工业大学.
- Liu H, 2020. Study on unloading mechanism of fractured rock mass and the amendment of rock classification in strong seismic area[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology. (in Chinese)
- 卢波, 张玉峰, 邹爱清, 等, 2021. 地应力张量特征对地下洞室轴线方位优化的启示[J]. 工程科学与技术, 53(2): 54—65.
- Lu B, Zhang Y F, Wu A Q, et al., 2021. Implications of geo-stress tensor characteristics in optimizing the azimuth of underground cavern[J]. Advanced Engineering Sciences, 53(2): 54—65. (in Chinese)
- 卢向前, 2023. 基于机器学习的隧道围岩快速分级方法及关键指标智能解析研究[D]. 成都: 成都理工大学.
- Lu X Q, 2023. Machine learning-based rapid classification method of tunnel surrounding rock and intelligent analysis of key indicators[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology.

- (in Chinese)
- 吕擎峰, 赵本海, 潘松杰, 等, 2020. 基于 TSP 和 PCA-Bayes 法的隧道围岩分级[J]. 地下空间与工程学报, 16(1): 80—86.
- Lv Q F, Zhao B H, Pan S J, et al., 2020. Classification of tunnel surrounding rock based on TSP system and PCA-Bayes discriminant method[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 16(1): 80—86. (in Chinese)
- 马俊杰, 李天斌, 孟陆波, 等, 2019. MSVM 在汶马高速公路隧道围岩分级中的应用[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 46(3): 373—380.
- Ma J J, Li T B, Meng L B, et al., 2019. Application of MSVM to the classification of surrounding rock in Wenchuan—Barkam Highway tunnels, Sichuan, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 46(3): 373—380. (in Chinese)
- 牛文林, 2015. 公路隧道围岩分级方法及智能判定系统研究——以泥巴山隧道为例[D]. 成都: 成都理工大学.
- Niu W L, 2015. Study on rock mass classification method and intelligent classification system of road tunnel—Niba Mountain tunnel as an example[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology. (in Chinese)
- 齐三红, 杨继华, 郭卫新, 等, 2013. 修正 RMR 法在地下洞室围岩分类中的应用研究[J]. 地下空间与工程学报, 9(增刊 2): 1922—1925.
- Qi S H, Yang J H, Guo W X, et al., 2013. Application study on underground caverns surrounding rock classification based on the revised RMR method[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 9(S2): 1922—1925. (in Chinese)
- 戚伟, 付建新, 李腾, 2020. 考虑节理劣化效应的深部围岩应力演化规律及敏感性分析[J]. 采矿与安全工程学报, 37(2): 327—337.
- Qi W, Fu J X, Li T, 2020. Stress evolution law and sensitivity analysis of surrounding rock in deep mine considering deterioration effect caused by joint[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 37(2): 327—337. (in Chinese)
- 钱七虎, 2012. 地下工程建设安全面临的挑战与对策[J]. 岩石力学与工程学报, 31(10): 1945—1956.
- Qian Q H, 2012. Challenges faced by underground projects construction safety and countermeasures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 31(10): 1945—1956. (in Chinese)
- SD 134—84 水工隧洞设计规范(试行)[S].
- 申艳军, 闫蕊鑫, 2014. 工程因素对施工期地下洞室围岩质量影响分析[J]. 长江科学院院报, 31(8): 66—72.
- Shen Y J, Yan R X, 2014. Impact of engineering factors on surrounding rock quality of underground caverns during construction[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 31(8): 66—72. (in Chinese)
- SL 303—2017 水利水电工程施工组织设计规范[S].
- SL 303—2017 Specifications for construction planning of water resources and hydropower projects[S]. (in Chinese)
- 谭文辉, 武洋帆, 刘景军, 等, 2020. 深部岩体质量分级 Q 系统的改进[J]. 中国矿业, 29(2): 161—165.
- Tan W H, Wu Y F, Liu J J, et al., 2020. An improved Q-system for deep rock mass classification[J]. China Mining Magazine, 29(2): 161—165. (in Chinese)
- TB 10003—1999 铁路隧道设计规范[S].
- TB 10003—1999 Code for design on tunnel of railway[S]. (in Chinese)
- TB 10003—2016 铁路隧道设计规范(2024、2026 年局部修订)[S].
- TB 10003—2016 Code for design of railway tunnel[S]. (in Chinese)
- 汪炳锋, 江铃峰, 2023. 基于深部岩体特征的 RMR 法修正[J]. 采矿技术, 23(5): 6—11.
- 王婧潇, 李培楠, 朱合华, 等, 2026. 隧道工程地质建模不确定性的综合分析与动态评估[J]. 岩石力学与工程学报, 45(7): 2012—2029.
- Wang J X, Li P N, Zhu H H, et al., 2026. Integrated analysis and dynamic assessment of uncertainty in geological modeling for tunnel engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 45(7): 2012—2029. (in Chinese)
- 王明年, 李玉文, 2008. 公路隧道围岩亚级分级方法[M]. 成都: 西南交通大学出版社.
- 王明年, 童建军, 易文豪, 等, 2024. 基于多元地质信息的钻爆法隧道围岩级别智能判识及软件系统[J]. 隧道建设(中英文), 44(12): 2451—2468.
- Wang M N, Tong J J, Yi W H, et al., 2024. Intelligent classification and software system for surrounding rock based on multivariate geological information[J]. Tunnel Construction, 44(12): 2451—2468. (in Chinese)
- 王石春, 何发亮, 李苍松, 2007. 隧道工程岩体分级[M]. 成都: 西南交通大学出版社.
- 王思敬, 1990. 坝基岩体工程地质力学分析[M]. 北京: 科学出版社.
- 王思敬, 杨志法, 刘竹华, 1984. 地下工程岩体稳定分析[M]. 北京: 科学出版社.
- 王新中, 2023. 热水力耦合条件下花岗岩力学特性与灾变行为研究[D]. 成都: 四川大学.
- Wang X Z, 2023. Study on mechanical properties and catastrophic behavior of granite under thermo-hydro-mechanical coupling conditions[D]. Chengdu: Sichuan University. (in Chinese)
- 王章琼, 晏鄂川, 王亚军, 2018. 基于修正 Q 值的武当群片岩岩体质量分级方法研究[J]. 现代隧道技术, 55(1): 65—70.
- Wang Z Q, Yan E C, Wang Y J, 2018. Rock mass quality classification of Wudang group schist based on a corrected Q-value[J]. Modern Tunnelling Technology, 55(1): 65—70. (in Chinese)
- 吴俊, 2025. 基于分区随钻参数的隧道围岩智能分级方法研

- 究[D]. 重庆:重庆交通大学.
- Wu J, 2025. Research on intelligent classification method of tunnel surrounding rock based on zonal drilling parameters[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University. (in Chinese)
- 吴秋军, 2017. 铁路隧道围岩变形机理与分级方法研究[D]. 成都:西南交通大学.
- Wu Q J, 2017. Deformation mechanism and classification method for surrounding rock of railway tunnels[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University. (in Chinese)
- 向露露, 童建军, 王明年, 等, 2024. 集成卷积神经网络和视觉Transformer的隧道掌子面岩性判识研究[J]. 隧道建设(中英文), 44(5): 1056—1067.
- Xiang L L, Tong J J, Wang M N, et al., 2024. Ensemble convolutional neural networks and visual Transformers: research on tunnel face rock identification[J]. Tunnel Construction, 44(5): 1056—1067. (in Chinese)
- 向明智, 2009. 金沙江白鹤滩电站工程岩体质量分类[D]. 成都:成都理工大学.
- Xiang M Z, 2009. Engineering rock mass classification of Bai Hetan hydroelectric station at Jinsha river[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology. (in Chinese)
- 谢本贤, 陈沅江, 史秀志, 2007. 深部岩体工程围岩质量评价的IRMR法研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 38(5): 987—992.
- Xie B X, Chen Y J, Shi X Z, 2007. IRMR method for evaluation of surrounding rock quality in deep rock mass engineering[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 38(5): 987—992. (in Chinese)
- 谢和平, 张茹, 任利, 等, 2022. 川藏铁路深埋隧道围岩灾变分析与思考[J]. 工程科学与技术, 54(2): 1—20.
- 谢和平, 张茹, 张泽天, 等, 2023. 深地科学与深地工程技术探索与思考[J]. 煤炭学报, 48(11): 3959—3978.
- Xie H P, Zhang R, Zhang Z T, et al., 2023. Reflections and explorations on deep earth science and deep earth engineering technology[J]. Journal of China Coal Society, 48(11): 3959—3978. (in Chinese)
- 邢念信, 徐复安, 1986. 坑道工程围岩分类与支护设计[J]. 岩石力学与工程学报, 5(4): 359—376.
- Xing N X, Xu F A, 1986. Surrounding rock classification and support design in tunnel engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 5(4): 359—376. (in Chinese)
- 徐常松, 2025. 基于视觉的隧道掌子面识别与围岩区域定位研究[D]. 武汉:江汉大学.
- Xu C S, 2025. Research on tunnel face recognition and surrounding rock location based on vision[D]. Wuhan: Jianghan University. (in Chinese)
- 许振浩, 张庆豪, 李千纪, 等, 2024. 基于高光谱成像技术的岩体质量评价方法、系统及装置: CN118503905B[P]. 2024-11-01.
- Xu Z H, Zhang Q H, Li Q J, et al., 2024. Rock mass quality evaluation method, system and device based on hyperspectral imaging technology: CN118503905B[P]. 2024-11-01. (in Chinese)
- 闫长斌, 吴伟功, 王贵军, 2018. 含层间剪切带的层状复合岩体质量分级[J]. 岩石力学与工程学报, 37(增刊1): 3449—3457.
- Yan C B, Wu W G, Wang G J, 2018. Quality classification of stratified composite rock mass with interlayer shear zones[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 37(S1): 3449—3457. (in Chinese)
- 杨博文, 2019. 基于可拓理论的动态围岩等级判定方法研究[D]. 湘潭:湖南科技大学.
- Yang B W, 2019. Study on the method of dynamic surrounding rock classification based on extension theory[D]. Xiangtan: Hunan University of Science and Technology. (in Chinese)
- 杨子文, 傅冰骏, 徐荣熙, 1982. 根据弹性纵波速度来定量评价岩体的工程质量[C]//地下工程经验交流会论文集. 北京:地质出版社: 343—349.
- 姚萌, 2020. 基于凿岩台车钻进参数的隧道围岩智能分级方法研究[D]. 成都:西南交通大学.
- Yao M, 2020. Study on intelligent classification of surrounding rock based on drilling jumbo's drilling parameters[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University. (in Chinese)
- 殷明伦, 2019. 隧洞岩体质量评价及围岩稳定性的尺度效应研究[D]. 北京:中国矿业大学(北京).
- Yin M L, 2019. Scale-effect study of tunnels on quality evaluation and stability of surrounding rock[D]. Beijing: China University of Mining and Technology (Beijing). (in Chinese)
- 尤哲敏, 2013. 大断裂区深埋隧道地应力特征及围岩稳定性分析[D]. 武汉:中国地质大学(武汉).
- You Z M, 2013. Analysis of characteristics of in situ stress and surrounding rock stability in deeply buried tunnel with large faults[D]. Wuhan: China University of Geosciences (Wuhan). (in Chinese)
- 余莉, 陈建平, 张磊, 2013. 修正Q值围岩分级方法在碳酸盐地区大断裂超深埋特长隧道的应用研究[J]. 现代隧道技术, 50(3): 32—39.
- Yu L, Chen J P, Zhang L, 2013. On the application of a modified Q-value classification to a long, deep tunnel near large faults in a carbonate area[J]. Modern Tunnelling Technology, 50(3): 32—39. (in Chinese)
- 张琦, 朱合华, 黄贤斌, 等, 2017. 基于Mamdani模糊推理的山岭隧道围岩RMR14分级[J]. 岩土工程学报, 39(11): 2116—2124.
- Zhang Q, Zhu H H, Huang X B, et al., 2017. A new rock mass rating method based on Mamdani fuzzy inference for rock tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 39(11): 2116—2124. (in Chinese)

- 赵思光, 2023. 基于凿岩台车钻进参数的隧道围岩智能精细化分级方法研究[D]. 成都: 西南交通大学.
- Zhao S G, 2023. Research on intelligent and refinement classification method of tunnel surrounding rock based on drilling parameters of drill jumbo[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University. (in Chinese)
- 赵文, 金陈, 路博, 等, 2022. 基于图解法的 BQ 分级限定条件及计算公式研究[J]. 东北大学学报(自然科学版), 43(1): 117—123.
- Zhao W, Jin C, Lu B, et al., 2022. Study on limited conditions and calculation formula of BQ classification based on graphic method[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 43(1): 117—123. (in Chinese)
- 赵逸文, 2020. 基于应力状态与结构面产状修正系数改进的层状岩体质量 BQ 分级研究[D]. 绍兴: 绍兴文理学院.
- Zhao Y W, 2020. Research on BQ classification of improved layered rock mass based on the stress state and the mechanism surface shape correction factor[D]. Shaoxing: Shaoxing University. (in Chinese)
- 郑帅, 姜谔男, 张峰瑞, 等, 2019. 基于机器学习与可靠度算法的围岩动态分级方法及其工程应用[J]. 岩土力学, 40(增刊 1): 308—318.
- Zheng S, Jiang A N, Zhang F R, et al., 2019. Dynamic classification method of surrounding rock and its engineering application based on machine learning and reliability algorithm[J]. Rock and Soil Mechanics, 40(S1): 308—318. (in Chinese)
- 周梦琳, 陈强, 汪波, 等, 2024. 基于图像识别的公路隧道围岩智能动态分级研究[J]. 隧道建设(中英文), 44(6): 1274—1282.
- Zhou M L, Chen Q, Wang B, et al., 2024. Intelligent dynamic classification of surrounding rock of highway tunnels based on image recognition[J]. Tunnel Construction, 44(6): 1274—1282. (in Chinese)
- Alejano L R, 2025. Rock mass classification systems: a useful rock mechanics tool, often misused[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 58(10): 11147—11167.
- Aydan Ö, Ulusay R, Tokashiki N, 2014. A new rock mass quality rating system: rock mass quality rating (RMQR) and its application to the estimation of geomechanical characteristics of rock masses[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 47(4): 1255—1276.
- Barton N, 2002. Some new Q-value correlations to assist in site characterisation and tunnel design[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 39(2): 185—216.
- Barton N, Lien R, Lunde J, 1974. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support[J]. Rock Mechanics, 6(4): 189—236.
- Bieniawski Z T, 1973. Engineering classification of jointed rock masses[J]. Transaction of the South African Institution of Civil Engineers, 15(12): 335—343.
- Bieniawski Z T, 1989. Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering[M]. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Celada B, Tardáguila I, Varona P, et al., 2014. Innovating tunnel design by an improved experience-based RMR system[C]// Proceedings of the World Tunnel Congress 2014—Tunnels for a better Life. Foz Do Iguaçu: 1—9.
- Chen K D, Song Y H, Zhang Y L, et al., 2021. Modification of the BQ system based on the Lugeon value and RQD: a case study from the Maerdang hydropower station, China[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 80(4): 2979—2990.
- Chen L, Wang J, Zong Z H, et al., 2015. A new rock mass classification system Q_{HLW} for high-level radioactive waste disposal[J]. Engineering Geology, 190: 33—51.
- Cui Z, Sheng Q, Zhang G M, et al., 2021. A modified rock mass classification considering seismic effects in the basic quality (BQ) system[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 80(3): 2249—2260.
- Deere D U, Hendron A J, Patton F D, et al., 1966. Design of surface and near-surface construction in rock[C]//The 8th U. S. Symposium on Rock Mechanics (USRMS). Minneapolis: OnePetro: 237—302.
- Erharter G H, Bar N, Hansen T F, et al., 2025. International distribution and development of rock mass classification: a review[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 58(10): 11169—11180.
- Ghosh R, Gustafson A, Schunnesson H, 2018. Development of a geological model for chargeability assessment of borehole using drill monitoring technique[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 109: 9—18.
- González de Vallejo L I, 2003. SRC rock mass classification of tunnels under high tectonic stress excavated in weak rocks[J]. Engineering Geology, 69(3/4): 273—285.
- Hajiazizi M, Khatami R S, 2013. Seismic analysis of the rock mass classification in the Q-system[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 62: 123—130.
- Han M, Wu H X, Chen Z Q, et al., 2023. A survey of multi-label classification based on supervised and semi-supervised learning[J]. International Journal of Machine Learning and Cybernetics, 14(3): 697—724.
- Hansen T F, Aarset A, 2025. Unsupervised machine learning for data-driven rock mass classification: addressing limitations in existing systems using drilling data[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 58(10): 11261—11291.
- Hansen T F, Erharter G H, Liu Z Q, et al., 2024. A comparative study on machine learning approaches for rock mass classification using drilling data[J]. Applied Computing and Geosciences, 24: 100199.

- Hoek E, Brown E T, 1997. Practical estimates of rock mass strength[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 34(8): 1165—1186.
- Ji F, Shi Y C, Li R J, et al., 2019. Modified Q-index for prediction of rock mass quality around a tunnel excavated with a tunnel boring machine (TBM)[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 78(5): 3755—3766.
- Kim Y, Yun T S, 2024. Enhanced rock mass rating prediction from tunnel face imagery: a decision-supportive ensemble deep learning approach[J]. *Engineering Geology*, 339: 107625.
- Lauffer H, 1958. Classification for tunnel construction[J]. *Geologie und Bauwesen*, 24(1): 46—51.
- Li T B, Ma C C, Zhu M L, et al., 2017. Geomechanical types and mechanical analyses of rockbursts[J]. *Engineering Geology*, 222: 72—83.
- Li Y, Chen J Y, Shen Y F, et al., 2025. MWD-based real-time identification of rock weathering: a comparison of supervised and unsupervised machine learning methods[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 163: 106744.
- Ma J J, Li T B, Li X, et al., 2022. A probability prediction method for the classification of surrounding rock quality of tunnels with incomplete data using Bayesian networks[J]. *Scientific Reports*, 12(1): 19846.
- Ma J J, Li T B, Faradonbeh R S, et al., 2024. Data-driven approach for intelligent classification of tunnel surrounding rock using integrated fractal and machine learning methods[J]. *Fractal and Fractional*, 8(12): 677.
- Ma J J, Li T B, Yang G, et al., 2023. A real-time intelligent classification model using machine learning for tunnel surrounding rock and its application[J]. *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards*, 17(1): 148—168.
- Mehrishal S, Leem J, Kim J, et al., 2025. Tunnel rapid AI classification (TRaiC): an open-source code for 360° tunnel face mapping, discontinuity analysis, and RAG-LLM-powered geo-engineering reporting[J]. *Remote Sensing*, 17(16): 2891.
- Palmström A, 1995. RMI—a rock mass characterization system for rock engineering purposes[D]. Oslo: University of Oslo.
- Rad H N, Jalali Z, 2019. Modification of rock mass rating system using soft computing techniques[J]. *Engineering with Computers*, 35(4): 1333—1357.
- Rehman H, Naji A M, Kim J J, et al., 2019. Extension of tunneling quality index and rock mass rating systems for tunnel support design through back calculations in highly stressed jointed rock mass: an empirical approach based on tunneling data from Himalaya[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 85: 29—42.
- Saadati G, Javankhoshdel S, Abad J M N, et al., 2025. AI-powered geotechnics: enhancing rock mass classification for safer engineering practices[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 58(10): 11319—11349.
- Saroglou C, Qi S W, Guo S F, et al., 2019. ARMR, a new classification system for the rating of anisotropic rock masses[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 78(5): 3611—3626.
- Terzaghi K, 1946. Rock defects and loads on tunnel supports[M]//Proctor R V, White T L. *Rock tunneling with steel supports*. Youngstown: Commercial Shearing and Stamping Company.
- Tong Y, Yue Y, Huang Z K, et al., 2022. Modified RMR rock mass classification system for preliminary selection of potential sites of high-level radioactive waste disposal engineering[J]. *Sustainability*, 14(23): 15596.
- Tsang C F, 2024. Coupled thermo-hydro-mechanical processes in fractured rocks: some past scientific highlights and future research directions[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 57(8): 5303—5316.
- Vaezi I, Yoshioka K, De Simone S, et al., 2025. A review of thermo-hydro-mechanical modeling of coupled processes in fractured rock: from continuum to discontinuum perspective[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 17(11): 7460—7488.
- van Eldert J, Schunnesson H, Johansson D, et al., 2020. Application of measurement while drilling technology to predict rock mass quality and rock support for tunnelling[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 53(3): 1349—1358.
- Wang J, Fang Q, Wang G, et al., 2024. Semi-supervised recognition of tunnel surrounding rock discontinuities using drilling jumbo data[J]. *Automation in Construction*, 166: 105623.
- Wang M N, Zhao S G, Tong J J, et al., 2021. Intelligent classification model of surrounding rock of tunnel using drilling and blasting method[J]. *Underground Space*, 6(5): 539—550.
- Wickham G E, Tiedemann H R, Skinner E H, 1972. Support determinations based on geologic predictions[C]//North American Rapid Excavation and Tunneling Conference. New York: Society of Mining Engineers of the American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers: 43—64.
- Xiao X, Yan Z Q, Yao R B, et al., 2026. Research on hybrid CNN-LSTM model based on drilling parameters for real-time refined intelligent classification and visualization of tunnel face rock mass[J]. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 51(10): 13177—13195.
- Yang G, Li T B, 2026. Development of a 3D-point cloud-based spatiotemporal series model for tunnel rock mass discontinuities prediction[J]. *Underground Space*, 26: 282—304.