

隧道围岩塌方风险预警及防控技术研究进展与发展趋势

刘帅帅

中铁十六局集团第三工程有限公司, 浙江 湖州

收稿日期: 2025年3月16日; 录用日期: 2025年4月7日; 发布日期: 2025年4月18日

摘 要

近年来, 随着我国基础设施建设的快速发展, 隧道工程建设规模不断扩大, 这对确保隧道围岩稳定性和安全施工提出了重大挑战。本文系统梳理了隧道安全施工中3个关键环节的研究进展, 包括风险评估、监测预警及防控技术。首先对目前常用的塌方风险评估方法进行了汇总, 分析了定性、定量和混合评估方法的优缺点; 其次对现场监测和理论计算两种预警技术进行了介绍; 最后, 阐述了隧道工程塌方防控技术与智能支护方法的应用。通过对这些关键技术的系统分析, 提出了未来可能的发展趋势。研究成果在预防和管理隧道塌方事故方面具有重大现实意义。

关键词

塌方预警, 风险评估方法, 防控措施

Advancements and Development Trend of Tunnel Surrounding Rock Collapse Risk Warning and Prevention Technology

Shuaishuai Liu

China Railway 16th Bureau Group Third Engineering Co. Ltd., Huzhou Zhejiang

Received: Mar. 16th, 2025; accepted: Apr. 7th, 2025; published: Apr. 18th, 2025

Abstract

In recent years, China's expanding infrastructure development has led to increasingly extensive tunnel construction projects, presenting significant challenges in maintaining the stability and

safety of tunnel surrounding rock structures. This paper provides a systematic review of the research advancements in three critical aspects of safety construction within tunnel engineering: risk assessment, monitoring and early warning, and prevention and control technology. Initially, it delineates the primary methodologies employed in collapse risk assessment, offering a comparative analysis of the strengths and limitations inherent in qualitative, quantitative, and mixed-method approaches. Subsequently, the paper explores two types of early warning techniques, namely on-site monitoring and theoretical calculation. Lastly, it examines the technologies for preventing and controlling tunnel collapse, including the application of intelligent support methods. Through systematic analysis of these key technological aspects, this research identifies potential future developments in the field. The research findings offer practical value for preventing and managing tunnel collapse accidents.

Keywords

Collapse Warning, Risk Assessment Methods, Prevention and Control Measures

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

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

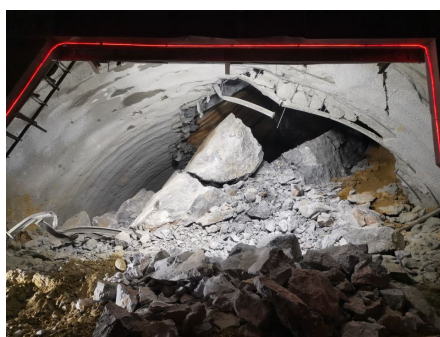
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着我国经济的快速发展和基础设施建设的不断推进，公路、铁路建设取得了举世瞩目的成就，其中高速公路里程位居世界第一[1]。2022年7月，新颁布的《国家公路网规划》[2]提出以下目标：我国公路网规划总规模约46.1万公里，其中国家高速公路网约16.2万公里，高速公路净增里程约2.6万公里，规划期至2035年。这表明我国的公路建设在今后很长一段时间内仍处于高速发展阶段，而隧道工程作为现代交通基础设施建设的关键环节，其施工安全水平直接影响着国家路网建设的可持续发展。然而，在隧道施工过程中，由于地质条件复杂、岩体力学参数不明确等因素，隧道围岩塌方事故时有发生，给施工人员的生命安全带来严重威胁[3]。例如，2020年09月，广西乐业大道隧道左洞540 m处进行施工时突发洞顶岩石塌方，造成9名施工人员遇难，如图1(a)所示；2024年06月，青海加西公路互助北山特长隧道右洞出口约3公里处发生塌方，3名施工人员失联，如图1(b)所示。



(a) 广西乐业大道隧道塌方



(b) 青海加西公路互助北山隧道塌方

Figure 1. Tunnel collapse accidents

图 1. 隧道塌方事故

由于隧道塌方事故频发，对塌方的预测预防逐渐引起人们的重视和关注。1990年，吴火纯首先发明

了隧道施工及地下工程塌方的报警器。随着技术的发展，越来越多的监测技术被引入到施工过程中，通过监测围岩的动态变形数据，可以掌握施工中的异常情况，以尽可能减少生命财产损失。此外，在施工过程中亦可以采取一些防控措施预防塌方事故的发生，常用的措施有：管棚法、小导管注浆法等，如图 2 所示。然而，传统的监测技术主要针对岩体的应力和位移进行监测，由于现场监测工作存在一定程度的误差，导致无法彻底预防塌方事故。近年来，国内外学者对此展开了大量的研究，并形成了丰富的理论实践体系。本文系统梳理了隧道施工阶段中围岩塌方风险评估、监测预警及防控技术的研究进展，针对存在的研究不足，提出未来可能的发展趋势。

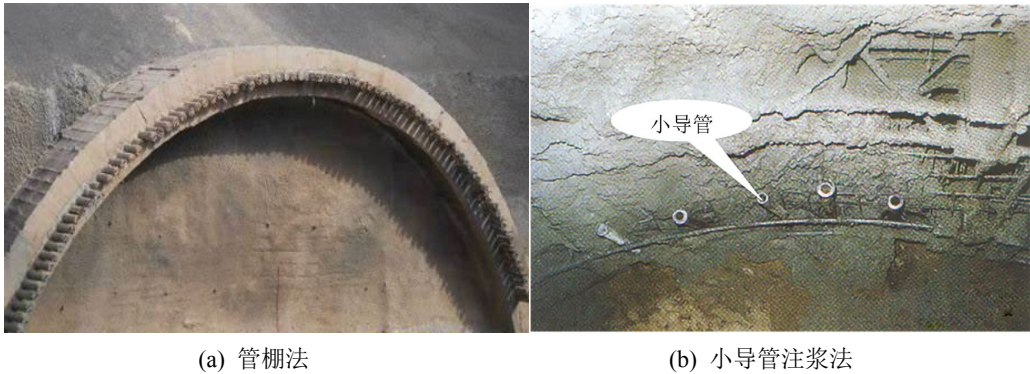


Figure 2. Tunnel collapse support measures
图 2. 隧道塌方支护措施

2. 隧道塌方风险评估研究现状

在隧道建设中，通过结合施工区域的地质条件、施工方法、支护设计等多方面因素，运用科学的技术和手段识别出潜在的塌方风险因素，并对这些因素的可能性和后果严重性进行评估，可实现隧道围岩塌方风险评估，这为隧道建设规避风险提供科学而有效的依据。目前，塌方风险评估方法多种多样，具有代表性的方法如表 1 所示。

Table 1. Risk assessment method and system of tunnel collapse
表 1. 隧道塌方风险评估方法及体系

序号	作者	年份	评估方法	隧道围岩塌方风险评估指标体系
1	陈洁金等[4]	2009	模糊层次分析法	① 围岩级别；② 开挖深度；③ 埋深；④ 偏压角度；⑤ 地下水；⑥ 施工水平
2	Adoko 等[5]	2013	人工神经网络法	① 围岩级别；② 内摩擦角；③ 粘聚力；④ 杨氏模量；⑤ 岩石密度；⑥ 隧道覆盖层；⑦ 监测站与巷道工作面的距离；⑧ 监测时间
3	Moradi 等[6]	2013	风险矩阵法	① 断层带；② 偏压；③ 隧道稳定性；④ 地下水；⑤ 泥泞条件；⑥ 气体排放；⑦ 岩溶带
4	Hyun 等[7]	2015	故障树法	① 工程地质；② 施工设计；③ 施工管理水平
5	杨卓等[8]	2016	熵权物元可拓理论	① 围岩级别；② 跨度；③ 偏压角度；④ 埋深；⑤ 地下水；⑥ 断层破碎带；⑦ 施工管理技术与技术水平
6	吕擎峰等[9]	2018	模糊层次法 - 后果当量法	① 地下水；② 围岩等级；③ 不良地质；④ 开挖跨度；⑤ 塌方施工应对措施
7	刘灿等[10]	2020	熵权 - 改进灰色关联模型	① 工程地质；② 水文气象；③ 施工设计；④ 施工水平

续表

8	Jeongheum 等[11]	2021	层次分析法	① 岩石性质及类型；② 隧道工程条件；③ 地下水状况；④ 开挖情况；⑤ 支护情况
9	吴波等[12]	2023	博弈组合赋权-逼近理想解排序法	① 工程地质；② 勘察设计；③ 组织管理；④ 环境气候
10	赵雪等[13]	2023	人工蜂群优化支持向量机回归法	① 工程地质；② 水文气象；③ 设计因素；④ 施工因素

由表 1 可知，目前隧道围岩塌方风险评估方法在多样性和综合性方面取得了显著进展，对隧道坍塌风险分析和管理做出了重要贡献。这些方法可概括为定性评估方法、定量评估方法与混合评估方法[1]。定性评估方法虽简单易用，但该类方法一般需参考专家经验，如模糊层次分析法，其流程图如图 3 所示，该方法在确定各因素权重时，需要根据专家经验进行判断，这无疑会增大评价结果的主观性。定量评估方法将评估指标体系内的各项评估指标转化为数值形式，但对系统本身的不确定性与模糊性考虑欠佳，导致结果往往依赖于数据的充分性和可用性，在实际应用过程中较难获得准确的风险概率值。混合评估方法通过结合定性和定量方法来评估复杂环境风险情况，是一种有效的综合方法，目前更多的研究致力于通过混合评估方法来获得隧道塌方的总体风险水平。

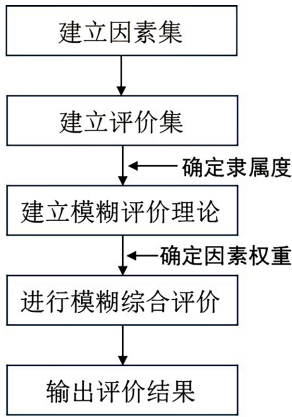


Figure 3. Fuzzy analytic hierarchy process
图 3. 模糊层次分析法流程

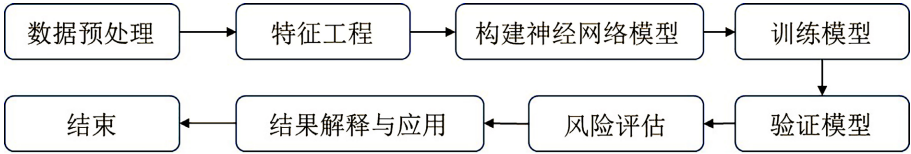


Figure 4. Neural network flow diagram
图 4. 神经网络流程图

随着计算机水平的发展，隧道围岩塌方风险评估方法也在与时俱进，逐步实现智能化升级，借助先进的算法、大数据分析以及人工智能技术，能够更精准、高效地对隧道围岩塌方风险进行评估。然而，评估方法的通用性与模型的解释性仍存在问题[14]，如某些在特定情况下有效的方法在不同的地质条件或工程环境下的适用性有待深入研究；一些新型模型，如神经网络(其流程图如图 4 所示)，依赖于训练数据的质量和数量，决策过程不透明。因此，在未来的研究中，风险评估需要重点关注数据驱动的研究及模型融合与优化，从而提高隧道风险评估的准确性、稳健性和实用性，建议结合实际工程状况，在

传统方法的基础上,结合 BN 方法、神经网络、云理论、可拓评判法、熵权法等,对隧道风险进行更为全面和精确的评估。

3. 隧道围岩塌方预警研究现状

由于隧道施工期间常面临地质条件的多变性、工程结构的复杂性以及施工环境的不稳定性等诸多问题,导致产生围岩变形、拱顶塌方、净空收敛、初期支护开裂等多种难以预测和控制的风险,这些风险不仅影响工程的整体质量和稳定性,还会对施工安全构成威胁[15]。因此,需要对隧道施工过程进行持续监测,从而进行隧道塌方预警。目前,塌方预警方法主要分为现场监测预警与理论计算预警两大类,现场监测预警通过实时监控和量测隧道施工过程中围岩的变形、应力等关键数据,发现潜在塌方风险并发出预警。理论计算预警则以围岩强度、围岩变形量或变形速率、围岩松动圈为判据,结合经典力学理论对隧道稳定性进行分析和预测,本节主要对这两方面的内容进行综述。

3.1. 现场监测预警

塌方在发生前会出现一定的征兆,通过观察围岩的受力及变形状态、检查支护结构是否产生较大变形、观察岩层与节理裂隙是否变大等均可以较好地预测塌方[16]。此外,亦可通过分析实测变形数据曲线,可针对不同类型的围岩提出塌方预警预测体系的建议标准[17];根据监测数据的动态反馈情况,可及时采取措施,有效控制围岩病害,从而实现对塌方的精准预测[18];综合分析各项监控量测指标,可更为准确地预报施工中的塌方险情。

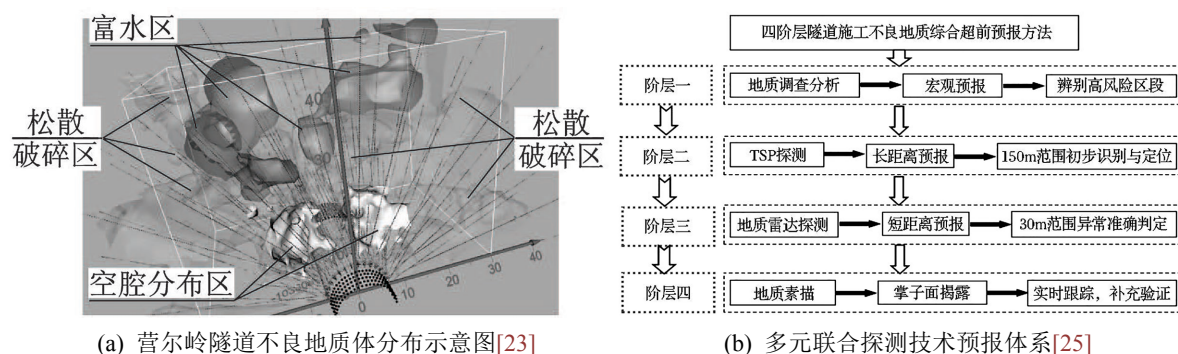


Figure 5. Application of geophysical prospecting technology in tunnel collapse prediction

图 5. 物探技术在隧道塌方预测中的应用

随着监测技术的发展,以传感器为基础的自动化监测系统逐渐被应用于隧道工程建设中。通过射频识别、红外感应、全球定位、激光扫描等信息传感设备,按预定协议连接互联网进行信息交互通讯,从而实现对物体的智能化识别、定位、跟踪、监控和管理。例如激光隧道围岩位移远程实时监测系统[19]、GPS 在线位移监控和预警系统[20]、最优化的光纤监测系统[21]等,这些新技术的涌现显著提高了塌方灾害预测的准确性。此外,岩体破坏会伴随着多种物理信息响应,包括声发射、热红外、电磁辐射等。通过综合分析多种物探信息能够有效地提高灾变前兆预警的准确性[22]。因此,地球物探手段在塌方预测中逐渐得到应用。张国炜[23]通过地震三维成像技术(AGI-T3)对营尔岭隧道前方围岩中的隐伏地质体进行探测,成像探测效果良好,如图 5(a)所示。高辉等[24]利用 TSP 探测技术对隧道塌方的规模、塌方上方空洞大小等进行了较为成功的探测。高昆[25]采用多元联合探测技术成功预报了 F27 断层破碎带的出现,不良地质隧道施工综合超前预报体系如图 5(b)所示。然而,对于复杂地质条件的隧道围岩段,单一物探手段无法精准预报,如地震波发射法以波阻抗差异为探测基础,在断层发育带存在波阻抗变化明显的特征;

直流电法以电性差异为基础,对地下水的反应较明显。因此,未来可基于多源信息融合提出高精度高效率的组合预报方法。

3.2. 理论计算预警

在隧道塌方预测中的理论主要有极限平衡法、滑移线法、关键块理论、突变理论、灰色系统理论等。随着相关理论的不断发展与成熟,众多学者建立了隧道塌方预警模型,如张明聚等[26]基于突变理论建立了城市隧道塌方突变模型,通过该模型计算得到隧道坍塌时地面沉降临界值,从而实现对塌方的预测。杨志刚等[27]基于拱顶岩体稳定理论,结合地质素描及数值计算,对掌子面稳定性进行了预测。徐海清等[28]基于尖点突变理论建立了软岩隧道塌方预测模型,并通过现场监测数据对其进行了验证。随着更多数学方法的引入,基于数学理论的非线性理论和算法发展了起来。刘学增等[29]结合多级模糊评判方法与层次分析法,建立了隧道穿越断层时的二级模糊综合评判预测模型,并通过工程实例验证了其有效性。苏永华等[30]将粗糙集理论中的补齐算法与广义回归神经网络理论相结合,构建了隧道塌方预测模型,该模型在实际工程应用中表现出较高的准确性。随着计算机技术和人工智能的发展,近年来人工智能技术逐渐被引入到隧道工程中来,学者们通过整合无线通信、机器学习等相关技术,更加高效精确地对隧道施工过程进行监测与预警,Zhou 等[31]采用 6 种机器学习模型来预测高速公路隧道围岩的收敛度,通过优化算法来选择所有模型的最优超参数,从而提供预测精度。然而,尽管机器学习模型能高效地处理和分析大量复杂监测数据,但模型的有效性极度依赖数据的质量和数量,且大多机器学习模型以“黑盒”方式运作,缺乏透明性,在某些情况下阻碍了对模型解释性和结果的验证[15]。

4. 隧道围岩塌方防控技术研究现状

目前,国内外许多学者结合实际工程案例,提出了相应的塌方防控方案。赵志忠[32]针对富水隧道塌方变形问题,提出了采用帷幕注浆的措施来提高隧道围岩土体的密实度,从而使围岩变得更加稳定。该工艺适应于黄土富水以及围岩破碎的特殊地质条件,与传统的超前管棚支护相比,在预防隧道坍塌、冒顶等灾害方面更具优势。黄志驹[33]针对公路隧道洞身的开挖支护工程,基于不同围岩结构的特性,提出了采用砂浆锚杆、挂钢网、喷混凝土联合超前小导管等多种支护方法组合的防控方式,以避免隧道施工中发生坍塌事故,并提出在出现塌方情况时,可采取对滑动面根部采用临时回填压脚的措施防止塌方的进一步扩大。何光[34]针对小塌方情况,提出喷混凝土并根据实际情况加锚杆和钢筋网等的加固方法;对于中大塌方情况,则提出了套拱法、超前小导管灌浆法、超前钢管棚支护法以及地表灌浆等方法。王伟[35]针对某分离式四车道隧道塌方,提出采用工字钢支撑,并在隧道顶部设置钢筋网,喷射混凝土形成坚固的护拱后,对塌腔进行填充密实的治理措施。胡强等[36]针对风化花岗岩地层隧道所产生的连续塌方事故,提出了一套较为全面的预防措施,包括前期的综合探测、加强超前排水、采用灌浆式超前支护等。赵虎生[37]针对梨树塔隧道局部塌方,结合隧道特征及塌方原因,采用地表旋喷桩的形式进行加固治理。陈诚[38]针对某 TBM 引水隧洞塌方段进行超前地质预报并对其进行风险评估,最终确定采用拱架加钢筋排超前半米进行支护,并采用注浆和喷混凝土继续围岩封闭,以保证隧道继续开挖时围岩的稳定性。沈孟龙等[39]利用有限差分法软件 FLAC3D 对治理地表注浆进行了数值模拟,为中风化花岗岩隧道塌方的防控治理提供参考。综合来看,尽管这些研究成果可以为塌方的预警和防控提供借鉴与参考,但在复杂地质条件下,如富水断层破碎带、软弱围岩等,现有防控技术的适应性不足。此外,目前针对隧道智能支护方法的研究尚处在探索阶段,相关研究较少,但也有一些学者开展了相关研究。如何川等[40]从多指标融合(力学及变形控制指标、支护体系协同度相关系数)的角度提出一种适配度表征的支护体系评价方法,同时对比 PSO-SVM、SA-PSO-SVM、CLS-PSO-SVM 算法在支护体系智能反馈模型应用中的特点后,

对生成的智能设计及反馈模型进行了检验。当前国外对此直接相关的研究几乎处于空白状态,可能与支护参数与研究场景的多样性、数据收集的局限性、智能算法适应性等因素的制约有关[41]。

5. 结论与展望

本文通过系统梳理隧道塌方风险评估、监测预警及防控技术的研究进展,发现现有的风险评估、预警和防控技术虽在一定程度上能够为隧道施工提供安全保障,但仍存在一些不足之处。针对这些不足,在未来的研究中应加强新技术、新方法的研究和应用,如人工智能、大数据等技术在隧道围岩塌方防控中的应用,提高预警的准确性和及时性;进一步优化风险评估模型,提高评估结果的可靠性和实用性;加强智能化和信息化技术在隧道塌方防控中的应用(尤其是智能支护方法方面),提高防控效率和质量。

基金项目

中铁十六局集团有限公司科技计划项目(K2023-6B), 中国铁路上海局集团有限公司科研项目(2024141, 2024140)。

参考文献

- [1] 叶华政. 基于贝叶斯理论的山岭隧道施工坍塌风险评估及预警研究[D]: [硕士学位论文]. 西宁: 广西大学, 2023.
- [2] 交通运输部. 国家公路网规划[Z]. 2022.
- [3] 彭欣. 九绵高速公路水牛家隧道塌方机制及处治措施研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2020.
- [4] 陈洁金, 周峰, 阳军生, 等. 山岭隧道塌方风险模糊层次分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(8): 2365-2370.
- [5] Adoko, A., Jiao, Y., Wu, L., Wang, H. and Wang, Z. (2013) Predicting Tunnel Convergence Using Multivariate Adaptive Regression Spline and Artificial Neural Network. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **38**, 368-376. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2013.07.023>
- [6] Moradi, M.R. and Farsangi, M.A.E. (2013) Application of the Risk Matrix Method for Geotechnical Risk Analysis and Prediction of the Advance Rate in Rock TBM Tunneling. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, **47**, 1951-1960. <https://doi.org/10.1007/s00603-013-0464-x>
- [7] Hyun, K., Min, S., Choi, H., Park, J. and Lee, I. (2015) Risk Analysis Using Fault-Tree Analysis (FTA) and Analytic Hierarchy Process (AHP) Applicable to Shield TBM Tunnels. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **49**, 121-129. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2015.04.007>
- [8] 杨卓, 戎晓力, 卢浩, 等. 基于熵权物元可拓理论的隧道塌方风险评估[J]. 安全与环境学报, 2016, 16(2): 15-19.
- [9] 吕擎峰, 霍振升, 赵本海, 等. 基于模糊层次和后果当量法的隧道塌方风险评估[J]. 隧道建设(中英文), 2018, 38(S2): 31-38.
- [10] 刘灿, 郑邦友, 李政, 等. 基于熵权-改进灰色关联模型的公路隧道塌方风险评估[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(15): 6292-6297.
- [11] Jeongheum, K., Changyong, K., Garam, K., Kim, I., Abbas, Q. and Lee, J. (2021) Probabilistic Tunnel Collapse Risk Evaluation Model Using Analytical Hierarchy Process (AHP) and Delphi Survey Technique. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 120, Article 104262. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2021.104262>
- [12] 吴波, 周路, 刘聪. 基于博弈组合赋权-TOPSIS 法的富水软岩山岭隧道塌方风险评价[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(4): 1726-1733.
- [13] 赵雪, 顾伟红. 基于人工蜂群优化支持向量机回归的隧道塌方风险预测[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(9): 3997-4003.
- [14] 苏元琛. 基于风险耦合的隧道塌方事故风险评估方法研究与应用[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安建筑科技大学, 2024.
- [15] 乔雄, 扈士静, 田正. 隧道施工期实时自动监测技术应用研究进展[J]. 隧道建设(中英文), 2025, 45(1): 46-56.
- [16] 陈小雄. 现代隧道工程理论与隧道施工[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2006.
- [17] 郑陈旻. 隧道塌方预警预测体系及治理措施研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 同济大学, 2008.
- [18] 鄢露秋, 王国欣. 公路隧道施工塌方的预报[J]. 西部探矿工程, 2006, 18(3): 158-160.

- [19] 周国浩. 激光隧道围岩位移远程实时监测系统的研制[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安科技大学, 2004.
- [20] 项伟, Jager, R. 德国 GPS 在线位移监控和预警系统工作原理与工程应用[J]. 地质科技情报, 2005, 24(S1): 126-128.
- [21] Song, B., Zhong, M., Dong, X. and Wang, P. (2009) Optimization of Monitoring the Stability of Surrounding Rock in a Metal Mine. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, **16**, 359-367. [https://doi.org/10.1016/s1674-4799\(09\)60065-0](https://doi.org/10.1016/s1674-4799(09)60065-0)
- [22] 张艳博, 刘祥鑫, 梁正召, 等. 基于多物理场参数变化的花岗岩巷道岩爆前兆模拟实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(7): 1347-1357.
- [23] 张国伟. 地震三维成像技术在荣乌高速公路营尔岭隧道塌方腔体探测中的应用[J]. 国防交通工程与技术, 2019, 17(S1): 85-86, 89.
- [24] 高辉, 杨振江, 张素磊. TSP 探测技术在铜锣山隧道塌方中的应用[J]. 山西交通科技, 2006(6): 27-29.
- [25] 高昆. 多元联合探测技术在不良地质隧道施工中的应用[J]. 北方交通, 2023(5): 74-77.
- [26] 张明聚, 晋刘杰, 周秋华, 等. 城市浅埋暗挖隧道施工诱发地面塌陷的预测模型[J]. 防灾减灾工程学报, 2015, 35(5): 568-573.
- [27] 杨志刚, 肖伯强, 杨钊, 等. 破碎岩体隧道塌方预测及台阶工法调整技术研究[J]. 人民长江, 2017, 48(11): 72-76.
- [28] 徐海清, 陈亮, 王伟, 等. 软岩隧道围岩塌方的尖点突变预测分析[J]. 铁道工程学报, 2016, 33(11): 97-101.
- [29] 刘学增, 包浩杉, 米东阳. 公路隧道穿越断层塌方预测多级模糊综合评判[J]. 现代隧道技术, 2011, 48(6): 65-71.
- [30] 苏永华, 刘科伟, 罗正东. 基于粗糙集补齐算法与神经网络的隧道塌方预测系统[J]. 工业建筑, 2013, 43(S1): 407-411, 420.
- [31] Zhou, J., Chen, Y., Li, C., Qiu, Y., Huang, S. and Tao, M. (2023) Machine Learning Models to Predict the Tunnel Wall Convergence. *Transportation Geotechnics*, **41**, Article 101022. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2023.101022>
- [32] 赵志忠. 榆林子富水黄土隧道塌方段帷幕注浆处治技术[J]. 建筑技术开发, 2021, 48(24): 151-153.
- [33] 黄志驹. 某公路隧道洞身支护和塌方部位处理措施[J]. 人民黄河, 2021, 43(S2): 188-190.
- [34] 何光. 隧道施工中塌方的预防与处治措施浅析[J]. 中国勘察设计, 2019(2): 97-99.
- [35] 王伟. 分离式四车道隧道塌方段处治技术[J]. 资源信息与工程, 2022, 37(1): 93-96.
- [36] 胡强, 杨春平. 风化花岗岩地层隧道塌方预防措施研究[J]. 交通科技, 2022(1): 92-96.
- [37] 赵虎生. 梨树塔隧道病害成因分析及综合治理[J]. 公路, 2014, 59(5): 63-68.
- [38] 陈诚. 某 TBM 引水隧洞塌方段控制技术研究[J]. 水利规划与设计, 2021(7): 85-87, 118.
- [39] 沈孟龙, 杨华清, 茶增云, 等. 景海高速公路全-强风化花岗岩隧道塌方机理分析与处置[J]. 勘察科学技术, 2021(5): 21-25.
- [40] 何川, 陈子全, 周子寒, 等. 基于机器学习的隧道支护体系智能化设计与评价方法[J]. 中国公路学报, 2023, 36(11): 205-217.
- [41] 李想. 基于机器学习的隧道智能支护方法研究及应用[D]: [硕士学位论文]. 成都: 成都理工大学, 2023.