

国内隧道围岩领域研究进展知识图谱分析

李安琪*, 张好, 何漠然, 张涤之

重庆科技大学安全工程学院, 重庆

收稿日期: 2024年3月8日; 录用日期: 2024年3月26日; 发布日期: 2024年4月23日

摘要

随着交通强国战略的部署, 我国隧道工程建设的投入逐年增加。隧道围岩相关研究掀起学术研究热潮。为量化分析我国隧道围岩领域的研究热点、学科发展脉络发展、领域领先团队及未来发展态势, 以1992~2024年中国知网CNKI收录的2697篇文献为研究对象, 借助文献计量分析软件CiteSpace, 构建生成作者及机构合作网络、关键词共现、关键词突现图谱。研究表明: 我国隧道围岩领域的研究成果丰富, 研究历史久远, 方向各异, 学科呈现交叉融合等特性; 国内领军人物及机构发文量多且平均水平较高, 作者及机构间的合作积极, 极具行业参考性; 研究热点分布广泛, 数值模拟、围岩变形、铁路隧道等关键词热度持续, 理论研究和实践应用相呼应统一; 未来, 隧道围岩领域学科的发展将集中在盾构隧道、深度学习等方面。

关键词

隧道围岩, 量化分析, 研究热点, 数值模拟, 深度学习

Research Progress of Tunnel Surrounding Rock in China Based on Knowledge Map Analysis

Anqi Li*, Hao Zhang, Moran He, Dizhi Zhang

School of Safety Engineering, Chongqing University Science and Technology, Chongqing

Received: Mar. 8th, 2024; accepted: Mar. 26th, 2024; published: Apr. 23rd, 2024

Abstract

With the deployment of the strategy of the powerful country, the investment in tunnel engineering

*通讯作者。

文章引用: 李安琪, 张好, 何漠然, 张涤之. 国内隧道围岩领域研究进展知识图谱分析[J]. 矿山工程, 2024, 12(2): 184-191. DOI: 10.12677/me.2024.122021

construction in our country increases year by year. The research on tunnels surrounding rock has set off an upsurge in academic research. In order to quantitatively analyze the research hotspots, discipline development context, field-leading teams and future development trends in the field of tunnel surrounding rock in China, 2697 kinds of literature collected by CNKI from 1992 to 2024 were taken as the research objects, and bibliometric analysis software CiteSpace was used. Construct and generate author and institution cooperation network, keyword co-occurrence, keyword emergence map. The research results show that the research achievements in the field of tunnel surrounding rock in China are rich, the research history is long, the direction is different, and the disciplines present the characteristics of cross-integration. The number of papers issued by domestic leading figures and institutions is large and the average level is high, and the cooperation between authors and institutions is active, which is a great reference for the industry; Research hotspots are widely distributed. Keywords such as numerical simulation, deformation of surrounding rock and railway tunnel continue to be hot, and theoretical research and practical application echo and unify; In the future, the development of tunnel surrounding rock disciplines will focus on shield tunnel, deep learning and other aspects.

Keywords

Tunnel Surrounding Rock, Quantitative Analysis, Research Hotspot, Numerical Simulation, Deep Learning

Copyright © 2024 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

我国是多山之国，山地、丘陵和高原的面积占全国土地总面积的 69%。隧道因线路平顺、方便快捷等优点，成为交通工程建设中不可或缺的重要组成部分[1]。随着城市基础设施建设力度的不断加大，隧道工程建设蓬勃发展。纵观有关隧道工程领域的研究，从理论探索到应用实践，专家学者均围绕着隧道围岩结构设计[2]、隧道围岩工程特性[3] [4]、围岩压力及变形机理[5]、支护结构及控制措施[6] [7]、风险评估及分析[8]等方面展开研究。研究内容多以针对某一特殊工况，而量化研究隧道围岩领域共性规律的文献却少之又少。

采用 CiteSpace 文献计量软件生成的图谱能针对文献外部的潜在特征进行量化分析，在一定程度上，避免主观定性因素的影响，清晰准确的分析领域的学科动态、评价学科领域的现状、各机构研究水平、捕捉研究热点等。现今 CiteSpace 软件应用广泛，研究成果丰硕，在各个领域均有所涉及，如公共卫生、城市发展及治理、医学[9] [10]等领域。

基于此，本文应用 CNKI 数据库检索得到的 2697 篇中文文献作为数据源，采用可视化文献量化分析软件 CiteSpace，生成隧道围岩领域知识图谱。从文献计量学的角度，实现归纳隧道围岩领域学科发展规律、主要研究热点、预测未来发展走势等功能，以期对隧道围岩领域研究提供宏观参考。

2. 软件及数据来源

2.1. 软件简介

CiteSpace 是由美国德雷塞尔大学计算机与情报学领军人物陈超美教授使用 Java 语言开发的一款信息可视化软件[11]。其创作灵感来源于科学结构的演进理论。理论的主要观点为科学知识本身是不断变化

的，并且科学发展的足迹是可以通过已经发表的文献中提取得到。由此，CiteSpace 又称为引文空间，通过软件得到的科学知识图谱是以知识域为对象，能够显示出科学知识的发展进程与结构关系。软件主要依据共引分析理论和寻径网络算法[12]对检索到的文献实现统计集合，并通过绘制一系列可视化图谱形成对学科潜在规律的分析和发展前沿的探测。软件能有效帮助专家学者们宏观的理解所从事的研究领域，既能展示领域的整体概况，又能细化突显领域的代表性转折点。

具体而言，CiteSpace 能助于回答以下几个有针对性问题，如在领域中哪些主题占据研究主流地位，哪些文献更具有开创性和标志性，不同研究领域如何相互关联等，不仅为研究人员提供一个全新的视角，还成为一个极具价值的科学研究工具。

2.2. 数据来源

基于隧道围岩的研究视角，本文选取具有代表性的中文文献检索数据库 CNKI 为研究源。首先，为了提高文献潜在信息的精确性和显著性，在文献来源类别中选择“核心期刊”，学科类型涵盖交通运输、建筑科学与工程、地质学、矿业工程、水利水电工程、自动化技术、力学、地球物理学等；其次在高级检索中选择主题 = “隧道围岩” OR “隧道工程” OR “隧道建设” OR “巷道围岩”，时间区间限制为 1992 年~2024 年；最后手动剔除无关、重复或无有效意义的文献，将所有检索文献导入软件并实现格式转换，最终获取 2697 篇有效文献。

2.3. 合作网络分析

科研合作作为合作的一种特殊形式。正如科学家计量学家普赖斯所言，科研合作成为当今科学发展的重要动力，不同科学领域的交叉、融合与渗透不断增强，重大科学发现均通过合作来完成。CiteSpace 软件通过作者、发文机构两个衡量指标，评价国内隧道围岩领域的合作情况，极大地助于科研水平的有效提升和资源的合理配置。

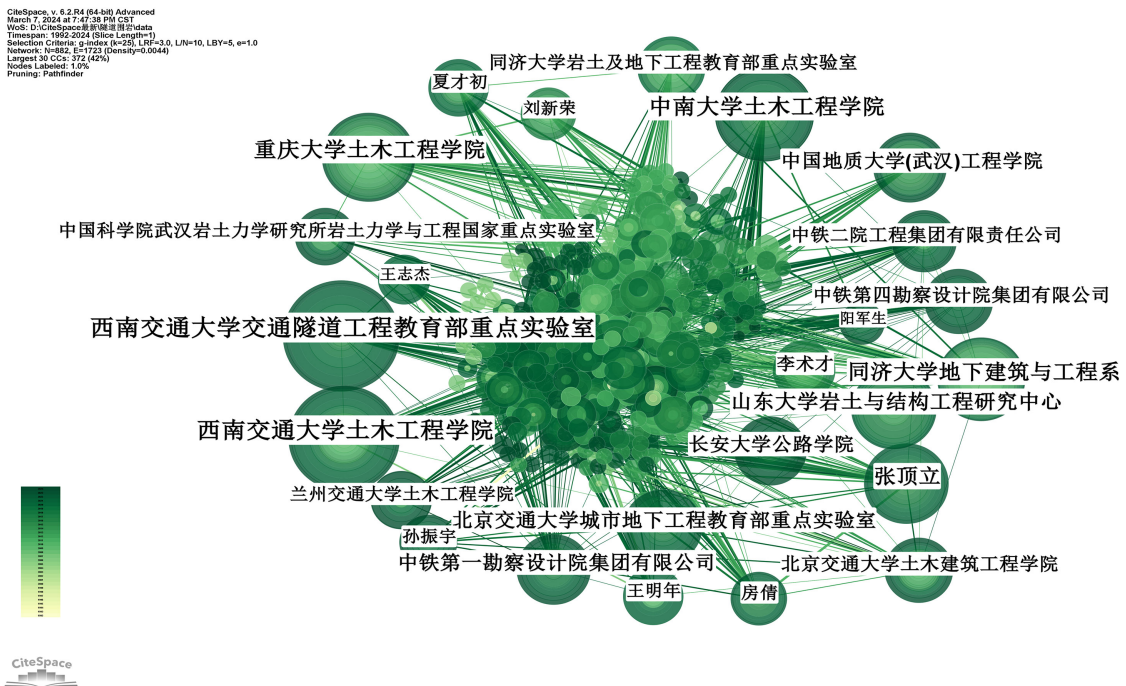


Figure 1. Knowledge graph of authors and institutions in tunnel surrounding rock field
图 1. 隧道围岩领域作者与机构知识图谱

为保留所有关系的相互联系,不采用任何剪枝网络算法对生成图谱网络进行简化。选择节点类型为“*Institution*”和“*Author*”,生成节点个数为 882,连线为 1723 条,网络密度为 0.0044 的作者与机构耦合合作网络图谱,如图 1。节点大小表示作者或机构自 1992~2024 年累计发文频次,节点间连线表示两节点间存在科研合作关系,节点色阶由浅至深表示发文的年份更替。

图中节选了发文频次较高的作者与发文机构进行显示,从图中看出隧道围岩领域的领军人物与科研团队及机构均处于行业顶尖水平,且以高水平高校居多。各机构与机构间、各机构与作者间,作者与作者间的合作密切,如西南交通大学王明年教授与北京交通大学、中铁二院工程集团有限责任公司共同提出高速铁路大断面深埋黄土隧道围岩压力的计算方法[13],获得较多专家学者的认同;同济大学的夏才初教授与宁波大学岩石力学研究所、绍兴文理学院土木工程学院共同探讨了考虑应力路径的深埋隧道黏弹-塑性围岩与支护相互作用[14]。

从科研机构及作者两个方面细化分析,列举具有代表性的科研机构和作者及其被引频次较高的文献,见表 1。科研机构层面,西南交通大学科研成果斐然,以 196 篇核心文献位居榜首,其中张志强[15]等人针对南京地铁区间盾构掘进施工及监控量测等问题,通过建立三维有限元力学模型,为盾构隧道工程的顺利实施提供了有效参考,并被广大学者所借鉴。中南大学土木建筑学院紧跟其后,以 110 篇文献位居第二,其发表的浅埋小净距偏压隧道施工工序的数值分析,合理解决了该类小净距隧道设计与施工挖苦顺序等问题[16]。发文作者层面,排在前五位的高产作者分别是张顶立、李术才、夏才初、房倩和王明年。结合普赖斯定律定义[17][18]的核心作者 $N \cong 0.749\sqrt{\eta_{\max}}$ 计算公式,式中 η_{\max} 为最高产所发的论文数,计算发文数量超过 N 的作者则均为领域内的核心作者。由张顶立教授发文数量为 59 篇,代入计算得到 $N \cong 6$,即发文数量累计超过 6 篇即为核心作者,除以上作者外,核心作者还有孙振宇、刘新荣、王志杰、阳军生、李利平、姜谔男、于丽、张鹏、赵勇等众多学者。

Table 1. Highly cited literature published by representative institutions and authors

表 1. 代表机构及作者发表的高被引文献

代表机构或第一作者	高频被引文献[13][16][19][20][21]	被引频次
李术才(山东大学岩土与结构工程研究中心)	隧道施工超前地质预报研究现状及发展趋势	584
夏才初(同济大学)	大断面小净距公路隧道现场监测分析研究	239
杨小礼(中南大学土木工程学院)	浅埋小净距偏压隧道施工工序的数值分析	211
张顶立(北京交通大学)	地铁隧道施工拱顶下沉值的分析与预测	211
王明年(西南交通大学)	高速铁路大断面深埋黄土隧道围岩压力计算方法	123

3. 研究热点分析

关键词是文章主题的高度凝练[22],通过提取文献中的关键词能进一步反馈文章的中心思想,快速掌握主要研究内容,进而实现对研究热点的分析和解读。为简化网络,提高网络结构的效率和图谱的可读性,选择“*Pathfinder*”、“*Pruning sliced networks*”、“*Pruning the merged network*”三种算法剪切数据实现初步阈值筛选。在控制面板中的节点类型中选择“*Keyword*”,生成关键词共现图谱,如图 2 所示。若两个关键词在同一篇文献中被提及,则两两关键词间将共同出现在图谱中,并用一条连线连接,连线粗细的程度表征关键词联系的紧密程度,节点的大小表征出现频次的高低,节点色阶由深至浅表示发文的年份更替。

CiteSpace, v. 6.2.R4 (64-bit) Advanced
March 5, 2024 at 8:48:32 PM CST
WoS: D:\CiteSpace最新隧道围岩\data
Timespan: 1992-2024 (Slice Length=1)
Selection Criteria: q=0.25, LRF=3.0, L/N=10, LB=5, e=1.0
Network: N=685, E=880 (Density=0.0038)
Largest 30 CCs: 663 (96%)
Nodes Labeled: 1.0%
Pruning: Pathfinder



Figure 2. Knowledge graph of keyword co-occurrence in tunnel surrounding rock field
图 2. 隧道围岩领域关键词共现知识图谱

如图 2 所示，关键词生成的共现图谱由 685 个文献节点，880 条关联连线组成。其中频次靠前的二十个关键词分别为隧道工程、隧道、数值模拟、围岩、公路隧道、围岩压力、稳定性、围岩变形、隧道围岩、模型试验、围岩分级、数值分析、软弱围岩、监控量测、铁路隧道、深埋隧道、浅埋隧道、高地应力、寒区隧道、现场监测。其中隧道与稳定性、围岩变形、围岩分类联系密切，监控量测与隧道施工、新奥法、围岩变形联系密切，数值模拟与预测、围岩应力、解析解联系密切。具体概括为以下几个方面：

1) 从宏观上看，隧道工程的相关研究是一项理论与实践并驾齐驱的工作。多数学者倾向于从围岩土体力学的角度，探究围岩变形、围岩压力等机理特征，如郭波前[23]结合地质情况、初始应力、岩体结构、地下水等角度分析影响围岩的因素，并结合现场监测数据全面系统分析了极高地应力区隧道围岩变形特征及机制；王亚琼[24]等人通过水压致裂试验反演了初始地应力场，对缓倾层状围岩挤压变形情况进行了预测分析并提出了有效缓解变形的控制措施；赵瑜[25]等人运用 FLAC3D 三维有限差分软件，并基于摩尔-库仑剪破坏与拉破坏复合的应变软化模型，探讨了隧道围岩变形局部化与渐进破坏的关系，最终指出弹塑性挤出变形是隧道开挖后围岩变形的的主要原因。

与此同时，学者对于围岩破坏机制的理论研究并不脱离于实际工程的应用，针对某一特殊隧道实施特定的研究方案也是学科研究的热点趋势，如吴浩[26]等人收集国内外 159 组隧道收敛变形实例数据并基于隧道埋深、强度应力比、隧道等效直径等指标构建围岩变形等级识别框架，采用改进的一维卷积神经网络方法提取隧道变形的隐含特征，最终成功应用于多雄拉公路隧道，验证该方法的准确性和普适性；王述红[27]等人为探究围岩变形与岩体力学参数间的非线性复杂关系，依托重庆花阳隧道，针对海量测试

数据实现机器学习找寻参数反演与变形预测之间的规律,为相同工况隧道围岩变形预测提供了有效参考。在个性问题中找寻共性规律,已成为国内隧道围岩领域研究的聚焦点。

2) 从微观上看,隧道围岩领域的研究对象不局限单一,铁路隧道、深埋隧道、公路隧道、海底隧道甚至寒区隧道均有涉及,探究隧道围岩的研究方法有数值模拟、数值分析与计算、模型试验、深度学习、神经网络、灰色模型、回归分析等,研究方向各异,有关围岩应力、围岩压力、高地应力、围岩稳定性、围岩分级、变形预测、温度场、初期支护等。相关文献贯穿隧道工程建设从设计、施工、维护的全过程,融合并渗透到了各个学科,体现出国内隧道围岩领域的成果丰富,突显了国家对隧道工程建设的重视。

4. 学科发展及阶段性前沿分析

在学科研究过程中,研究内容中词汇频次的变化往往可以反映该研究的前沿动态。在软件中,采用 J.Kleinberg [28]的关键词突变 Find Burst Phrases 算法映射知识基础和研究前沿的关系,进一步分析学科领域的发展及前沿走势。

选择节点类型为“Keyword”,在生成关键词共现图谱的基础上,点击 Burstness 将突变值调整为 1,获得并显示排名前 20 的突变词,如图 3。

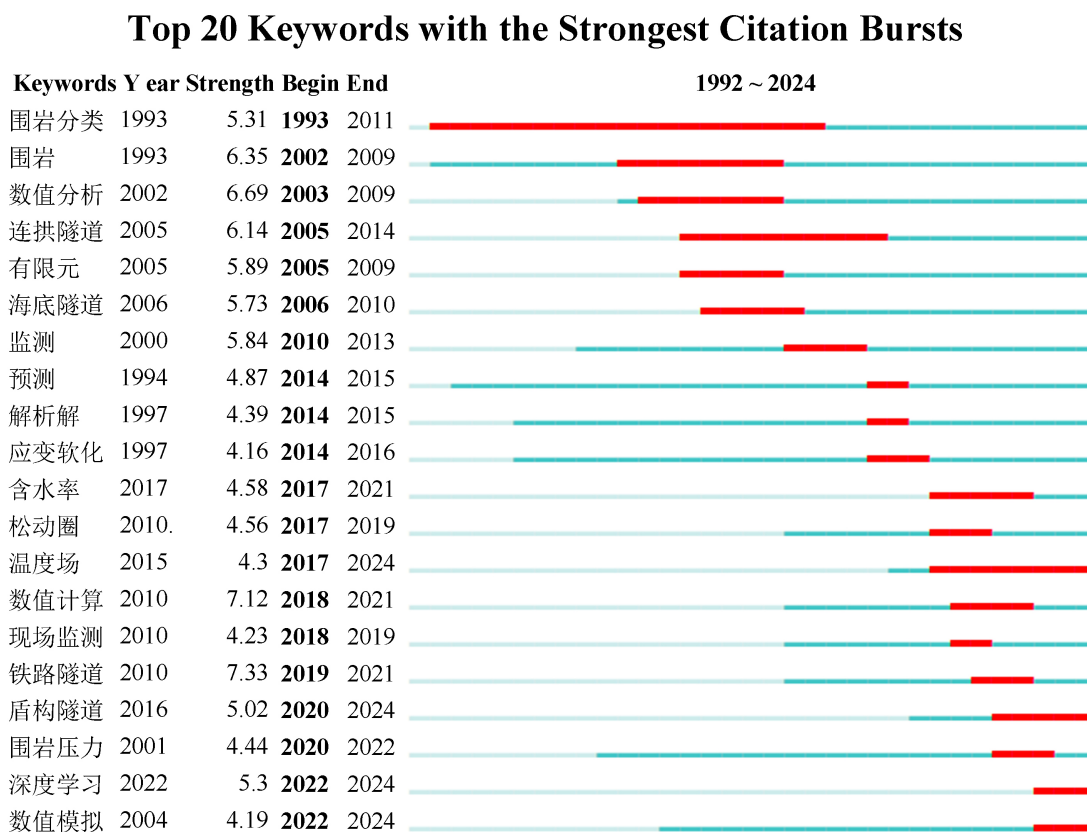


Figure 3. Tunnel surrounding rock field keyword abrupt map

图 3. 隧道围岩领域关键词突变图

据图 3 所示,图中有两个明显的转折点。其一关键词为预测,突变性骤降至 4.87,其二为数值计算,突变性突增达到峰值 7.12。这表明数值计算及分析相关研究自 2003 年开始,直到 2021 年热度持续保持,贯穿隧道围岩学科发展。由该转折点,可将隧道围岩领域划分为三个阶段:

1) 1992年~2013年,该阶段为学科萌芽及飞速发展时期。累计发文为1166篇,约占总发文量的43%,自1995年《工程岩体分级标准》[29]实施起,学科研究重点始终围绕围岩岩体、隧道本身展开。研究方法单一,多以经验公式计算分析为主且存在效率低、准确率低等局限性。随着国家盾构隧道建设工程的大力推进,连拱隧道、海底隧道等地质条件复杂,施工难度大的隧道逐渐走入研究学者的视野。

2) 2014年~2017年,该阶段为学科稳步发展时期。学科发展具有持续时间短,突发性较低等特点。研究内容不在不局限于静态分析,学者在研究过程中逐渐把握围岩与时间效应的关系,涌现出了应变软化、松动圈等动态影响因素的分析,将隧道围岩学科的发展推入新潮。

3) 2018年~2024年,该阶段为学科智能化发展时期。现场监测技术由耗费大量人力物力的有线布线到无线遥感、三维模拟层出不穷。智能盾构的概念一经提出,便被广泛应用。随着计算机技术蓬勃发展、万物互联的普及,隧道围岩学科与机器学习、深度学习等智能算法的高效融合,在未来,隧道围岩理论与体系建设将趋于普适性、绿色性、创新性、智能性及国际性的方向全面发展[30][31]。

5. 结论

本文运用CiteSpace软件量化分析国内隧道围岩领域的文献,并从中总结归纳共性规律,提取出学科研究特点、研究演进,并基于关键词突变探讨学科研究发展进程。从合作网络图谱、关键词共现图谱、关键词突变图谱中得到以下结论:

1) 国内合作网络方面:国内隧道围岩领域的研究成果丰富,合作网络呈现密度高、方向发散等特点。隧道围岩领域有显著发文贡献的机构为西南交通大学、重庆大学、中南大学等岩土领域研究所及其实验室,行内领军人物为张顶立、李术才、夏才初等教授。机构及学者间的相互合作大力推进了国内隧道围岩的学科建设进程,促使领域朝着多元化、跨学科交叉化发展。

2) 研究热点聚焦方面:热点围绕理论与实践两个方面展开。一是以围岩稳定性、围岩变形理论、围岩破坏机理分析、围岩分类为基础的理论基础,二是以隧道工程、数值模拟、模型试验、监控量测、铁路隧道、深埋隧道、浅埋隧道、寒区隧道等实际工程角度实现隧道工程需求。两部分缺一不可,相互联系,相互统一论证,两者共同构建出隧道围岩领域研究体系。

3) 学科演进方面:学科发展具有阶段性特点,每一阶段的研究重点呈现时代性和差异性。研究重点的突变是响应当下国家政策、举措,契合实际应用面临的复杂问题。学科研究由静态预测到动态预测监测一体化,研究方法由传统经验公式推断到结合机器学习等精确度高、代价小的预测智能方法。打破学科间壁垒,串联学科交叉融合,隧道围岩中盾构隧道与深度学习等方法还存在大量深入的研究空间。

基金项目

重庆科技学院研究生创新计划项目(YKJ CX2220729)。

参考文献

- [1] 张顶立. 隧道及地下工程的基本问题及其研究进展[J]. 力学学报, 2017, 49(1): 3-21.
- [2] 吕刚, 刘建友, 赵勇, 等. 超大跨度隧道围岩作用效应与支护结构设计方法研究[J]. 中国铁道科学, 2019, 40(5): 73-79.
- [3] 李永靖, 岳玮琦, 邢洋. 基于收敛约束法的隧道围岩空间变形特性分析[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2018, 37(3): 553-557.
- [4] 柳旻, 夏玉云, 乔建伟, 等. 炭质板岩工程特性的钻孔弹模试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2022, 18(z1): 114-120.
- [5] 吕擎峰, 李钰, 牛荣, 等. 基于深度学习的特殊岩土隧道围岩变形预测研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2023, 31(6): 1590-1600.

- [6] 朱汉华, 周小涵, 王葵, 等. 隧道围岩与支护结构变形协调控制机理及工程应用[J]. 地下空间与工程学报, 2023, 19(1): 79-86, 94.
- [7] 杜胜, 杨昱衡, 周斌. 降雨条件下槽渔滩隧道初期支护变形原因分析及治理措施研究[J]. 现代隧道技术, 2019, 56(S2): 263-269.
- [8] 黄宏伟, 陈佳耀. 基于机器视觉的隧道围岩智能识别分级与开挖安全风险研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2023, 31(6): 1382-1409.
- [9] 何文凤, 鲜国炜, 马勇. 基于文献计量分析的我国突发公共卫生事件应急治理研究现状[J]. 中国医院, 2024, 28(2): 24-28.
- [10] 何继新, 孟浩浩, 郑沛琪. 中国城市韧性治理研究进展与趋势(2000-2021)——基于 CiteSpaceV的可视化分析[J]. 灾害学, 2022, 37(3): 148-154.
- [11] 李杰, 陈超美. CiteSpace: 科技文本挖掘及可视化[M]. 北京: 首都经济贸易大学出版社, 2016.
- [12] Brown, B. and Butler, J.E. (1995) Competitors as Allies: A Study of Entrepreneurial Networks in the U.S. Wine Industry. *Journal of Small Business Management*, **33**, 57.
- [13] 王明年, 郭军, 罗禄森, 等. 高速铁路大断面深埋黄土隧道围岩压力计算方法[J]. 中国铁道科学, 2009, 30(5): 53-58.
- [14] 夏才初, 徐晨, 杜时贵. 考虑应力路径的深埋隧道黏弹-塑性围岩与支护相互作用[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(9): 1789-1802.
- [15] 张志强, 何川, 余才高. 南京地铁盾构掘进施工的三维有限元仿真分析[J]. 铁道学报, 2005, 27(1): 84-89.
- [16] 杨小礼, 睦志荣. 浅埋小净距偏压隧道施工工序的数值分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2007, 38(4): 764-770.
- [17] 宗淑萍. 基于普赖斯定律和综合指数法的核心著者测评——以《中国科技期刊研究》为例[J]. 中国科技期刊研究, 2016, 27(12): 1310-1314.
- [18] Kipp, M.E.I. and Campbell, D.G. (2006) Patterns and Inconsistencies in Collaborative Tagging Systems: An Examination of Tagging Practices. *Proceedings of the American Society for Information Science & Technology*, **43**, 1-18. <https://doi.org/10.1002/meet.14504301178>
- [19] 李术才, 刘斌, 孙怀凤, 等. 隧道施工超前地质预报研究现状及发展趋势[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(6): 1090-1113.
- [20] 夏才初, 龚建伍, 唐颖, 等. 大断面小净距公路隧道现场监测分析研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(1): 44-50.
- [21] 张顶立, 黄俊. 地铁隧道施工拱顶下沉值的分析与预测[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(10): 1703-1707.
- [22] 赵丹群. 基于 CiteSpace 的科学知识图谱绘制若干问题探讨[J]. 情报理论与实践, 2012, 35(10): 56-58.
- [23] 郭波前. 极高地应力区隧道地质特征及围岩变形机制研究[J]. 隧道建设, 2017, 37(5): 586-592.
- [24] 王亚琼, 杨强, 高启栋, 等. 缓倾层状隧道围岩挤压变形分级与控制分析[J]. 地下空间与工程学报, 2022, 18(2): 562-576.
- [25] 赵瑜, 张春文, 刘新荣, 等. 高应力岩石局部化变形与隧道围岩灾变破坏过程[J]. 重庆大学学报, 2011, 34(4): 100-106.
- [26] 吴浩, 陈运涛, 朱赵辉, 等. 改进一维卷积神经网络的隧道围岩收敛变形分级预测[J]. 应用基础与工程科学学报, 2024, 32(1): 145-159.
- [27] 王述红, 董福瑞. 基于变形预测和参数反演的山岭隧道围岩稳定性分析[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(5): 1024-1035.
- [28] Kleinberg, J. (2003) Bursty and Hierarchical Structure in Streams. *Data Mining and Knowledge Discovery*, **7**, 373-397. <https://doi.org/10.1023/A:1024940629314>
- [29] 起草责任人. GB 50218-94 工程岩体分级标准[S]. 北京: 中华人民共和国水利部, 1995.
- [30] 陈湘生, 李克, 包小华, 等. 城市盾构隧道数字化智能建造发展概述[J]. 应用基础与工程科学学报, 2021, 29(5): 1057-1074.
- [31] 申艳军, 吕游, 李曙光, 等. 隧道围岩分级方法研究进展及“人工智能+”应用动态[J]. 隧道建设(中英文), 2023, 43(4): 563-582.