

基于知识图谱的隧道突水灾害可视化研究及趋势分析

张鸿涛¹, 杨 芍¹, 张应林¹, 李兴凯^{2*}, 欧小红², 李 鹏², 韩培锋², 陈代果²

¹中国水利水电第七工程局有限公司南方分公司, 广东 深圳

²西南科技大学土木工程与建筑学院, 四川 绵阳

收稿日期: 2022年3月2日; 录用日期: 2022年3月23日; 发布日期: 2022年3月30日

摘 要

为了分析当今隧道突水领域的发展趋势及目前研究现状,以“隧道突水”为主题词,通过CiteSpaceV文献分析软件对1999~2021年CNKI中国知网的搜集到的838条文献数据进行可视化分析。研究结果表明:1) 隧道突水领域的研究历经了发展停滞期、高速增长期和不确定波动期三个阶段,该研究领域引起学者重视比较晚,但目前该领域的研究处于稳定发展状态。2) 曾亚武、杜欣、卢春名、林玉山和许张炳晖等学者是该领域的核心研究人员,其发文量均在50篇以上。中国地质大学(武汉)工程学院和中铁隧道勘测设计院有限公司是该领域内的核心机构。而研究机构方面则更加的集中,形成两家独大的局面,领域内其他机构作者总体发文量不高,就整体合作情况来看,各个机构几乎都是单独发文,很少有合作关系。3) “岩溶隧道”、“突水突泥”、“隧道突水”、“超前地质预报”、“隧道工程”为近几年的主要研究热点词汇,相关学者在该领域取得了一系列的研究成果。本文研究结果可以为读者清晰梳理隧道突水研究近年来的研究成果及研究热点,并追溯隧道突水发展演化进程,从而为相关学者追踪该领域近期热点及未来发展趋势提供参考。

关键词

CiteSpace, 隧道突水, 知识图谱, 可视化

Visualization Research and Trend Analysis of Tunnel Water Inrush Disaster Based on Mapping Knowledge Domain

Hongtao Zhang¹, Shao Yang¹, Yinglin Zhang¹, Xingkai Li^{2*}, Xiaohong Ou², Peng Li², Peifeng Han², Daiguo Chen²

¹Southern Branch of China Water Resources and Hydropower Seventh Engineering Bureau Co., Ltd., Shenzhen Guangdong

*通讯作者。

文章引用: 张鸿涛, 杨芍, 张应林, 李兴凯, 欧小红, 李鹏, 韩培锋, 陈代果. 基于知识图谱的隧道突水灾害可视化研究及趋势分析[J]. 地球科学前沿, 2022, 12(3): 366-377. DOI: 10.12677/ag.2022.123038

²School of Civil Engineering and Architecture, Southwest University of Science and Technology, Mianyang Sichuan

Received: Mar. 2nd, 2022; accepted: Mar. 23rd, 2022; published: Mar. 30th, 2022

Abstract

In order to analyze the development trend and current research status in the field of tunnel water inrush, 838 documents collected by CNKI China Knowledge Network from 1999 to 2021 were visually analyzed by CiteSpaceV document analysis software. The results show that: 1) The research in the field of tunnel water inrush has gone through three stages: stagnation period, high-speed growth period and unstable fluctuation period, which attracted scholars' attention later, but at present the research in this field is in a stable development state. 2) Scholars such as Zeng Yawu, Du Xin, Lu Chunming, Lin Yushan and Xu Zhangbinghui are the core researchers in this field, and all of them have published more than 50 articles. Engineering College of China University of Geosciences (Wuhan) and China Railway Tunnel Survey and Design Institute Co., Ltd. are the core institutions in this field. However, the research institutions are more concentrated, forming a situation of two dominant ones. The authors of other institutions in the field generally have a low number of articles. As far as the overall cooperation situation is concerned, almost all the institutions publish articles independently, with few cooperative relations. 3) "Karst tunnel", "water inrush and mud inrush", "tunnel water inrush", "advanced geological forecast" and "tunnel engineering" are the main research hot words in recent years.

Keywords

CiteSpace, Tunnel Water Inrush, Mapping Knowledge Domain, Visualization

Copyright © 2022 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

隧道突水灾害是指隧道及地下工程施工过程中大量水体或泥水混合物沿岩体节理、断层等结构面、岩溶通道、地下暗河等不良地质构造瞬时涌入隧道内的一种地质灾害现象[1] [2] [3]。如果地下水携带有大量泥砂,或饱水的泥砂突然涌入隧道,则称之为突泥灾害。突泥可以看成为突水的伴生现象,因此,突泥灾害的关键仍是涌水,没有地下水作为动力和载体,突泥是不可能发生的。涌水突泥给隧道施工甚至隧道运行构成极大的威胁,轻则掩埋、淹没设备、堵塞坑道,重则造成人身伤亡,给隧道工程建设及运行造成巨大的经济损失[4] [5] [6]。例如,2018年7月14日,湖北广水的一个在建隧洞发生突水突泥事故,导致6名施工人员被困。

为此,针对隧道突水灾害的研究已经比较成熟、且研究内容较丰富,但是针对近20年有关隧道突水灾变的研究整体分析还不足,缺乏较系统地定量分析近年来关于隧道突水灾害的研究文献。基于此利用CiteSpace文献计量分析软件,区别以往对隧道突水的研究分析方向,对国内学者近20年来的研究成果进行数据可视化分析,从而具体量化本领域研究的发展历程、热点变迁及预测未来的研究的方向,从而为隧道突水灾害领域未来的研究提供参考。

目前,国内相关学者在“隧道突水”领域发表了一系列的相关性文章,如李术才[7]等以三峡库区典型岩溶隧道突涌水灾害为例,提出一套高风险岩溶隧道突涌水防治体系,三峡翻坝高速典型岩溶隧道鸡

公岭隧道的应用证明, 该体系可有效规避大型突涌水等地质灾害, 可为三峡库区和清江流域内其他工程所借鉴, 具有广泛的应用前景和工程实用价值。再例如袁永才[8]等以尚家湾强岩溶隧道突水突泥伴生灾害为例, 提出了突涌灾害是由压力水、泥砂相结合的伴生灾害源和突涌通道两部分组成, 伴生灾害源是内在源动力, 突涌通道是灾害源的优势运移路径, 还有肖鹏[9]等学者提出采用梯度式注浆压力对突水突泥高风险区作重点注浆加固治理。该方案应用在某隧道突水突泥灾害治理中, 取得了较好的效果。

可视化分析是指通过相关计量软件挖掘文本的数据信息, 分析研究领域热点, 采用科学计量算法, 绘制简洁的图谱等方法对某一领域知识进行方向分析, 具有知识导航作用[10]。自 2006 年, CiteSpace 引入国内后, 大量的学科领域采用可视化分析的方法对其知识热点进行研究分析。如唐刚[11]等基于 CiteSpace 软件进行可视化分析, 共检索 317 篇文献, 对装配式研究热点的演化及趋势进行了研究, 反应除了装配式建筑领域发展的必然性与良好的前景。再如张富程[12]等利用 CiteSpace 软件搜集和分析医疗卫生领域人工智能研究的相关文献 1001 条, 并对其进行可视化分析, 生成相关知识图谱, 通过对知识图谱的分析, 得出目前我国医疗卫生领域人工智能研究的热点与未来该领域研究趋势和发展方向的预测, 为该领域专家学者的深入研究提供借鉴与参考。本文将以一种新的角度, 基于 CiteSpace 可视化分析, 对我国隧道突水研究方向进行详细的脉络图谱分析, 探索学科领域研究热点及发展方向, 为后期发展提供参考。

2. 数据来源和分析方法

2.1. 数据来源

为了深入了解“隧道突水”热点问题, 了解相关领域机构, 作者, 及其之间合作关系, 发展状况, 领域热点, 进而深一步研究该领域发展趋势, 论文数据来源基于中国知网数据库(CNKI)以“隧道突水”为主题, 检索区间为 1999 年~2021 年, 共检索出 854 条相关文献, 检索时间为 2021 年 6 月 2 日早上 9:30, 进一步整理分类, 排除重复文献, 书评, 信息报道后, 共计检索得 838 条相关文献。

2.2. 分析方法

2.2.1. 分析方向

基于检索得 838 条基础文献, 通过 CiteSpaceV 对其进行分析, 由于 CNKI 可处理的数据源只能表达出作者及机构合作网络分析, 关键词共现分析, 本文主要通过以上各个知识图谱进行展开分析, 通过分析知识图谱, 了解学科内作者及机构之间的联系情况以及从关键词的共现程度判断学科目前发展趋势及热点研究方向。

2.2.2. CiteSpace 软件分析

通过知网所下载的数据源, 采用 CiteSpace 文献统计软件, 科学知识图谱是一种计量学引文分析新方法, 它以知识域为研究对象, 直观地揭示科学知识所呈现的结构和规律, 并探索其发展过程与结构的关系。CiteSpace 是一款基于 Java 开发的文献计量软件, 通过可视化图谱呈现科学领域中深度挖掘的知识结构。目前, CiteSpace 主要用于知识图谱研究综述, 探测知识领域的热点、动态、前沿和发展趋势等。该方法最初用于教育学、管理学等专业, 近几年, 在多学科交叉的趋势下, 开始在城乡规划、建筑等学科领域初步发展。

2.2.3. LLR 对数似然算法

LLR 对数似然算法可以得出某个聚类的紧密程度。Ochiai 相似系数能表现出文本之间的共现率[13]

$$\text{Cos}(A, B) = \frac{|A \cap B|}{\sqrt{|A| |B|}} (A \geq 0, B \geq 0)$$

A, B 分别代表关键词的出现频次, $A \cap B$ 代表关键词的共现频率, 所以依据三角函数定理, 当 $\text{Cos}(A, B) = 0$ 时, A, B 之间关联度为 0, 当 $\text{Cos}(A, B) = 1$ 时, A, B 之间关联度为最大。

3. 结果与分析

3.1. 文献历年发文量分析

为了深入分析近年来学者在隧道突水方面的研究成果及研究热点, 文章基于中国知网数据库(CNKI), 以“隧道突水”为关键检索词开展文献检索, 共计查询到 865 篇相关文献, 通过对重复文献进行筛选, 最终选取 2009 年 1 月到 2021 年 5 月 10 号之间的共计 838 篇文献开展本文的研究工作。下图 1 给出了 1999 年~2021 年有关隧道突水相关的文献, 对文献数量进行分析, 从而对该研究领域发展趋势进行研究, 具体数据如(图 1)所示。

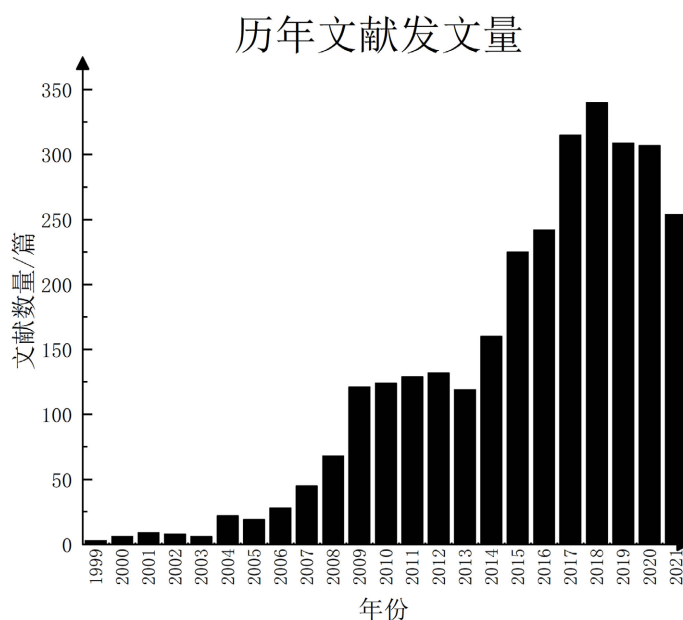


Figure 1. The number of “tunnel water intrusion” in China, 1999~2021
图 1. 1999~2021 年中国“隧道突水”发文数量分析图

从图 1 可知, 隧道突水灾害研究近年来文章数量总体上呈现快速上涨的趋势, 自 1999~2021 年, 发文数量呈整体上升趋势, 其中 2018 年的发文量为最高, 通过图 1 可以看出国内有关隧道突水的文献数量大致可分为三个阶段, 1999~2013 年属于缓慢增长时期, 文献数量整体较少, 2014~2018 年属于高速增长时期, 在该阶段对于隧道突水灾害的研究快速增长, 主要原因可能是该时期我国该领域工程建设量急剧增加, 隧道突水灾害问题凸显, 所以该时期的相关文献数量高速增长; 而 2018~2021 年则为平稳时期, 该时期文献数量整体稳定, 偶尔有波动, 表明我国隧道工程相关研究进入稳定发展时期。

3.2. 文献作者群体分析

为分析隧道突水研究领域的学者文献发表及其相关的学术联系, 将下载的数据经 CiteSpaceV 可视化分析, 下图 2 中文献发表量越多, 则其节点越大, 其中的连线则是作者群体之前存在的合作连接关系。下图 2 中, 共计有节点 298 个, 连接 185 个, 网络密度为 0.0042。在隧道突水学科领域中, 作者合作网络聚类关系呈“整体-局部”网络状, 其中大部分研究人员之间有较密切的联系, 形成了 4 个较大的团体, 另外有少量学者的分散。由表 1 分析可知, “整体团队部分”以曾亚武、杜欣、卢春名、林玉山和

张炳晖、刘术才等为中心，相关研究人员发表了大量有关隧道突水灾害相关的文献，排名靠前的几位核心学者的发文量在 838 篇总体文献中分别占比 10.73%、8.11%、8.00%、8.00%、8.00%，占总数的 42.84%。除此之外，大部分作者都是发文量仅在 2~4 次，说明研究隧道突水灾害的研究团队较集中，的作者众多，但核心作者较少。在隧道突水研究领域，核心作者各自形成紧密的合作联系网络，彼此之间联系紧凑，特别是以李术才，张庆松为核心的团体还有以卢春名和张炳坤等为核心的研究团体最为紧密。而“局部部分”中，部分学者之间存在单方面合作关系，或存在独自研究此学科领域目前尚未与他人合作形成网络的学者等。经图 2 分析可知，就作者合作关系而言，目前我国隧道突水已经初步形成以围绕核心作者为中心的网络合作雏形，但大部分学者处于比较离散的状态，但人数并不多。由此可预测，隧道突水领域合作关系网络会越来越完整，而学科发展也将逐渐走向成熟。

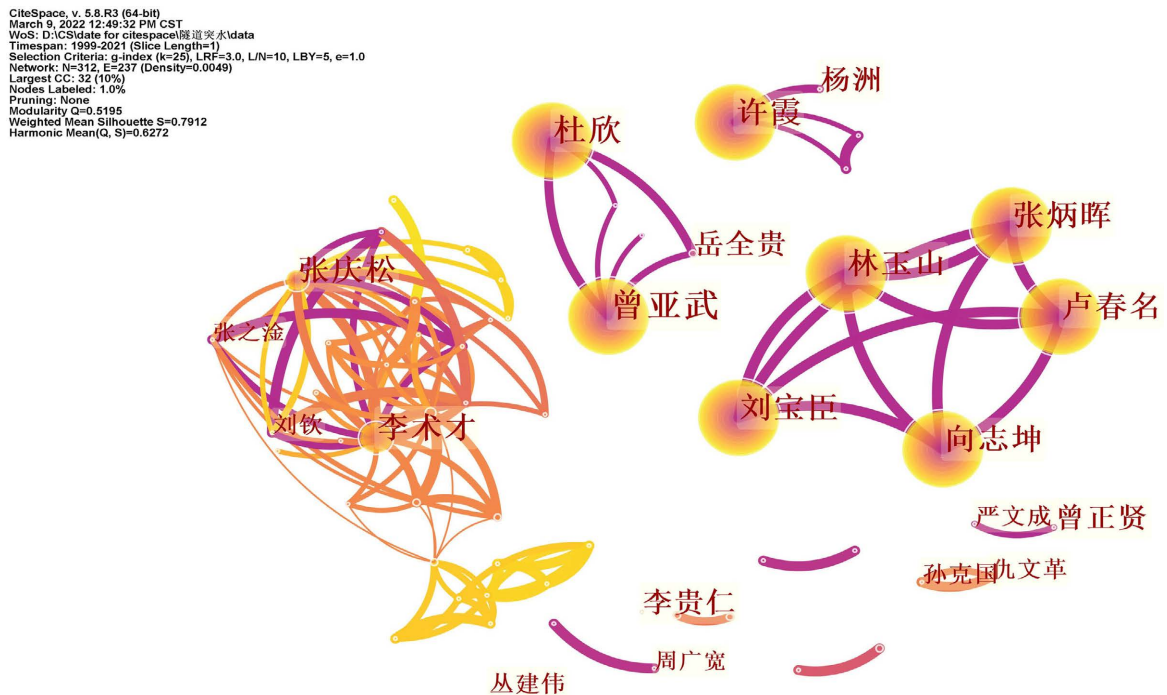


Figure 2. Authors of “tunnel water inrush” in China, 1999~2021

图 2. 中国 1999~2021 年“隧道突水”作者发文量

Table 1. Statistics of published papers by authors of “tunnel water inrush” in China, 1999~2021

表 1. 1999~2021 年中国“隧道突水”作者发文统计

序号	发文数量/篇	作者
1	90	曾亚武
2	68	杜欣
3	67	卢春名
4	67	张炳晖
5	67	刘宝臣
6	67	向志坤
7	66	许霞
8	63	李术才
9	53	张庆松
10	45	李贵仁

3.3. 机构合作分析

首先从检索得到的 838 条文献中进行可视化机构网络分析，节点类型“Node Types = Institution”，检索区间“Time slicing”取 1999~2021 年，时间切片“Year Per Slice = 1”，阈值取 Top = 50，即每时间切片的排名前 50 位机构，经可视化分析后，调节至只显示发文量 ≥ 5 以上的机构，得到隧道突水发文机构图谱如图 3 所示，并整理排名得出表 2。

```
CiteSpace, v. 5.8.R3 (64-bit)
March 9, 2022 1:04:55 PM CST
WoS: D:\C:\data for citespace\隧道突水\data
Timespan: 1999-2021 (Slice Length=1)
Selection Criteria: g-index (k=25), LRF=3.0, L/N=10, LBY=5, e=1.0
Networks: N=317, E=0 (Density=0)
Largest CC: 1 (0%)
Nodes Labeled: 1.0%
Pruning: None
Modularity Q=0.5195
Weighted Mean Silhouette S=0.7912
Harmonic Mean(Q, S)=0.6272
```

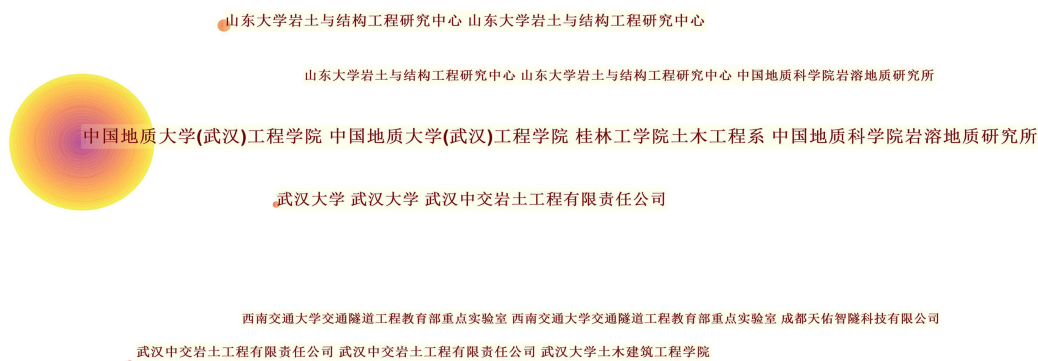


Figure 3. The institution of “tunnel water inrush” in China, 1999~2021

图 3. 1993~2019 年中国高速远程滑坡发文机构图谱

Table 2. Ranking of “tunnel water inrush” publishing agencies in China, 1999~2021

表 2. 1999~2021 年中国“隧道突水”发文机构排名

序号	频次	机构
1	67	中国地质大学(武汉)工程学院
2	46	中铁隧道勘测设计院有限公司
3	45	武汉大学
4	29	山东大学岩土与结构工程研究中心
5	21	中国地质科学院岩溶地质研究所
6	19	武汉中交岩土工程有限责任公司
7	14	湖北理工学院土木建筑工程学院
8	14	西交大交通隧道工程教育部重点实验室

由图 3 可知，节点 $N = 308$ ，连接线 $E = 0$ ，网络密度 $density = 0$ ，图 3 分析得出，目前国内隧道突水研究机构合作网络不紧密，中国地质大学武汉工程学院形成了一家独大的局面，其次是中铁隧道勘测设计院有限公司和武汉大学的发文量占第二，可以看出不论是理论研究层面还是设计实践层面，国内对隧道突水领域的研究呈现出一个百花齐放的态势，但各个机构还需加强团队之间的合作。

3.4. 关键词分析

3.4.1. 关键词共现图谱分析

通常一篇文献中的关键词往往互相存在着关联，通过关键词共现分析可以反应学科领域内重要的研究方向，以及逐年的学科演化与发展，还可直观体现不同时序内的热点领域、分析视角与研究方法的变化[14]。首先，在 CiteSpace 中将时间切片定为 1a，取阈值为 Top N = 50 得出关键词的知识网络图谱，而在此图谱中网络线的颜色反应了首次共被引的时间，那么整体上从网络线的颜色变化就能了解研究领域的新旧情况，因此可以通过网络线颜色的变化来考察领域的演进。下图 4 给出了 1999~2021 年隧道突水关键词图谱图。

CiteSpace, v. 5.8.R3 (64-bit)
 March 9, 2022 12:00:30 PM CST
 WoS: D:\CS\data for citespace\隧道突水\data
 Timespan: 1999-2021 (Slice Length=1)
 Selection Criteria: g-index (k=25), LRF=3.0, L/N=10, LBY=5, e=1.0
 Network: N=410, E=1132 (Density=0.0135)
 Largest CC: 372 (90%)
 Nodes Labeled: 1.0%
 Pruning: None

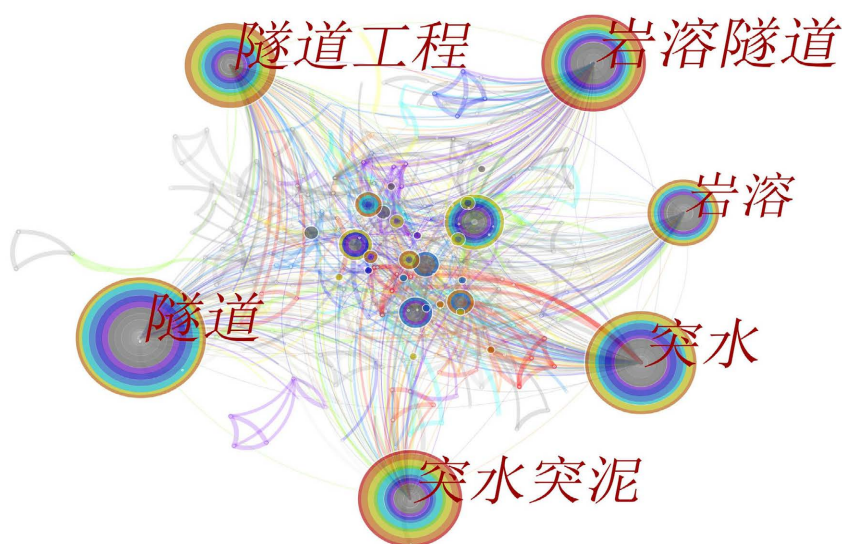


Figure 4. Keywords of “tunnel water inrush” in China, 1999~2021

图 4. 1999~2021 年隧道突水关键词知识图谱

通过图 4 可知，从学科发展演化的角度分析，关键词节点外圈出现紫色则代表此关键词中介性最强的节点，结合图 4 共现关系连接线可知，如“岩溶隧道”、“隧道工程”、“突水突泥”、等为近 20 年的研究热点所在。关键词中心度(Centrality)反映的是该关键词与其他关键词的共现程度，表现的是该关键词的连接作用的大小度。通过 CiteSpace 对关键词中心度分析，可以进一步了解整个时间过程中，研究领域的重点方向。通过量化关键词，使分析更加可靠，取 TopN = 10 的数据，在全部时间范围内进行统计得到下表 3。

Table 3. Key word centrality of “tunnel water inrush” in China from 1999 to 2021

表 3. 1999~2021 年中国“隧道突水”关键词中心度

序号	关键词	频次	中心度
1	隧道	114	0.32
2	突水突泥	96	0.20
3	隧道工程	89	0.30

Continued

4	岩溶隧道	80	0.35
5	突水	76	0.26
6	岩溶	54	0.16
7	涌突水	39	0.12
8	突泥	30	0.02
9	岩溶突水	26	0.09
10	地质灾害	25	0.11

3.4.2. 关键词聚类 LLR 算法分析

通过 CiteSpace 聚类分析, 并基于 LLR 对数似然算法(Log-Likelihood Ratio), 可以研究高速远程滑坡热点研究结构紧密程度, 判断研究热点。采用 CiteSpaceV 利用快速聚类方法, 提取关键词, 通过阈值调整, 得到图 5 所示的知识图谱。该图中, 模块值(Modularity)为 $Q = 0.558 > 0.3$ 说明聚类结果显著, 平均轮廓值(Mean)为 $S = 0.9536 > 0.7$, 说明聚类结果的可信度是非常高的。由此可得, 1999~2021 年隧道突水领域研究, 主要以图 5 中 7 大聚类模块展开。通过聚类结构特征可以将学科研究分成特定的板块阐述学科研究方向, 结合平均年份则可以研究学科领域的演化进程。通过平均年份可以得知学科发展初期在 2007 年左右, 原因在于 2007 年之前, 学术文献过少, 说明该阶段隧道突水灾害还没有引起学术界的足够重视, 而 07 年之后的隧道突水突泥事故频发, 国内学者开始对隧道突水开始逐渐加大研究力度。

CiteSpace, v. 5.8.R3 (64-bit)
 March 9, 2022 12:00:30 PM CST
 WOS: D:\CiteSpace\隧道突水\data
 Timespan: 1999-2021 (Slice Length=1)
 Selection Criteria: g-index (k=25), LRF=3.0, L/N=10, LBY=5, e=1.0
 Network: N=410, E=1132 (Density=0.0135)
 Largest CC: 372 (90%)
 Nodes Labeled: 1.0%
 Pruning: None
 Modularity Q=0.5195
 Weighted Mean Silhouette S=0.7912
 Harmonic Mean(Q, S)=0.6272

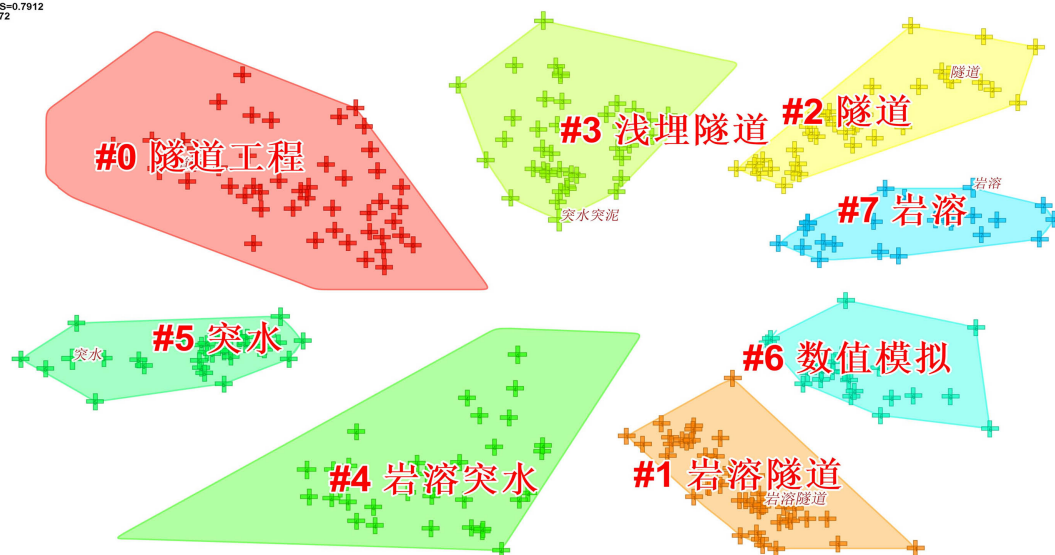


Figure 5. "Tunnel water inrush" cluster knowledge map in China, 1999~2021

图 5. 1999~2021 中国隧道突水聚类知识图谱

在研究初期(2007~2009 年), 国内学者开始初步探讨隧道灾害的能量原理以及防治措施等, 即聚类#1、#2、#3、#4; 研究中期(2009~2011 年)主要研究隧道突水突泥灾害的应用研究, 国内学者提出了很多关键技术理论与原理, 并向地下水方向等因素考虑, 分析隧道突水的特征以及治理的新型技术, 即聚类#5、#6、#7; 研究近期(2011 年~至今)主要是在对隧道突水灾害提前预报的技术进行研究[15] [16], 即聚类#0。

整体研究发现, 大部分聚类词平均年份较早, 说明隧道突水领域研究主要集中在 2007 年后几年内, 随着时间推移, 隧道突水突泥灾害数量增多, 导致该领域的研究呈发展稳定期, 后期需要继续加强该领域的研究。通过对关键聚类词的整理, 将每个聚类排名前三的关键词列出, 对聚类进行量化分析(summary of clusters), 节点代表关键词, 聚类包含关键词越多, ID 值越小, 其研究领域更为广泛。从表 4 可知, 包含关键数量前三的为超前地质预报, 公路隧道和岩溶隧道, 说针对数值模拟, 针对隧道工程的超前地质灾害预报的研究众多, 研究深入且广泛, 并且隧道突水常与修建高速公路, 高铁等重要交通枢纽联系在一起, 另外由于近期川藏铁路等工程建设, 越来越多的学者开始关注川藏区域内的大型地质灾害, 尤其是隧道突水。紧密程度体现每个聚类中的所有关键词的同质性, 该数值越大, 代表该聚类成员的相似性越高。其中除岩爆聚类紧密程度小于 0.9 以外, 其余聚类紧密程度均大于 0.9, 说明聚类效果很好, 同质性强, 关键词之间联系紧密。如在“岩溶隧道”聚类中, “岩溶隧道”、“防突厚度”和“力学模型”是最紧密的三个关键词, 在“突泥”聚类中, “突泥”、“隧道工程”和“颗粒-流体耦合”联系最为紧密。时间线视图(Time-line)将聚类分析和时间结合到一起, 同一聚类的节点按照时间顺序会被排布在同一水平线上, 同时不同聚类之间的联系也可以清晰展现在图中, Time-line 更加可以清晰直观的体现聚类的时间跨度以及历史进程, 从而可以清晰展示隧道突水的演进。如图 6 所示, #2 强度最短, 从 2006 年才开始出现, #5 地下水次之, 出现时间为 2003~2019 年; #0、#1、#3 聚类代表的研究时间跨度最长; #4、#5 聚类在 2019 年后就没有出现, 由此可预测在未来几年内此领域的研究热点将不在这两类上, 而#0、#1、#2、#3、#6、#7 等聚类都将持续作为研究热点进行探讨和研究。

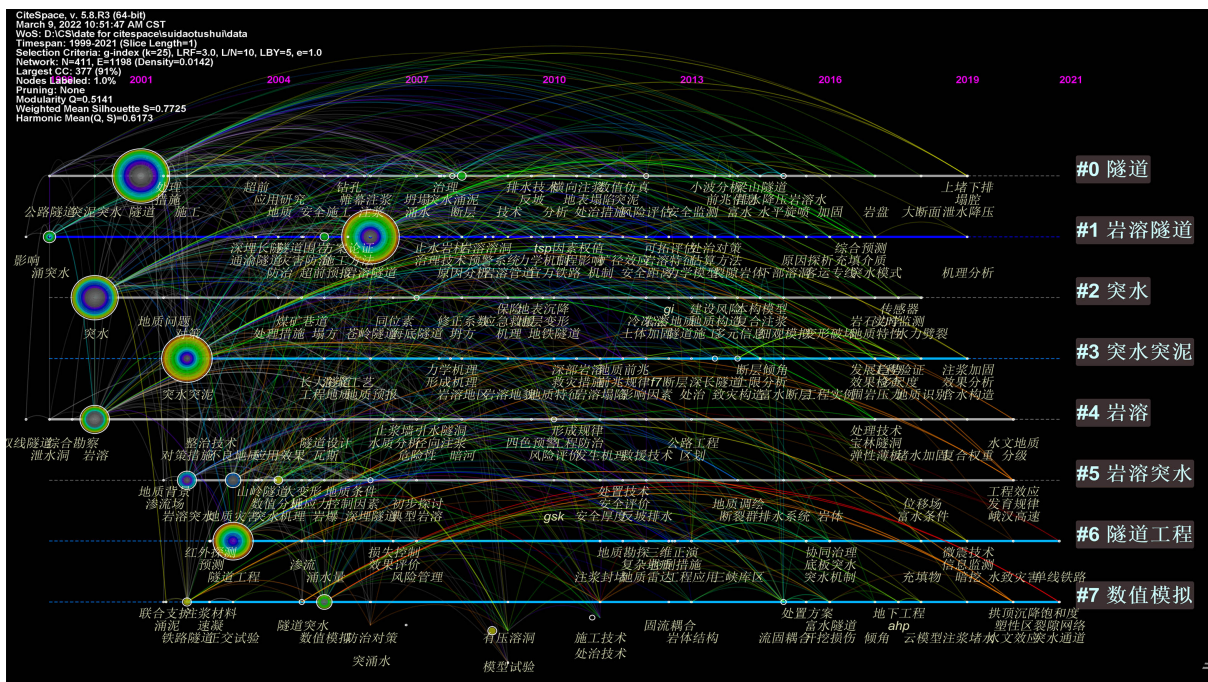


Figure 6. Cluster map of time-line of tunnel water inrush in China from 1999~2021

图 6. 1999~2021 年中国隧道突水时间线聚类图谱

Table 4. 1999~2021 China tunnel water inrush cluster analysis table

表 4. 1999~2021 中国隧道突水聚类分析详表

聚类号	节点数	紧密程度	平均年份	TOP terms (重要关键词)
#0 超前地质预报	40	0.949	2011	超前地质预报(36.57); 突水(18.92); 数值分析(18.16)

Continued

#1 公路隧道	38	0.958	2009	公路隧道(24.4); 突水涌泥(14.33); 层次分析法(12.09)
#2 岩溶隧道	35	0.975	2012	岩溶隧道(41.53); 防突厚度(14.74); 力学模型(9.81)
#3 突泥	33	0.995	2008	突泥(65.63); 隧道工程(58.03); 颗粒—流体耦合(57.26)
#4 岩溶	32	0.954	2009	岩溶(32.98); 注浆(20.14); 涌水量预测(15.43)
#5 地下水	31	0.955	2011	地下水(23.01); 隧道施工(18.12); 风险管理(11.45)
#6 岩爆	29	0.859	2009	岩爆(28.02); 深埋隧道(19.83); 地质灾害(19.08)
#7 浅埋隧道	27	0.985	2007	浅埋隧道(78.04); 能量原理(73.32); 三度空间(73.32)

3.4.3. 研究主题演进与研究前沿分析

通过 CiteSpace 软件的 Burst detection 功能可以探测某点时间内突然大量使用的关键词。在进行关键词突现分析时, 根据本研究 20 年的研究情况, 将突现词的最小持续时间设置为 2 年, 在其余设置均为默认值的情况下, 共得到突现词 7 个, 对突现关键词的强度、出现年份、结束年份、持续时间进行整理, 见表 5。从表 5 可以看出格子方法(ibm), 浅埋隧道, 离散元法(dem)持续突现的时间最长, 说明在很长一段时间内当时国内学者的研究重点偏理论原理方面, 例如离散元数值分析方法 PFC (图 7), UDEC (图 8) [17]。姚军[18]等基于格子 Boltzmann 方法采用二维平板模型, 研究了孔隙尺寸、压力和温度等因素对微

Table 5. Emergent key word of “tunnel water inrush” in China from 1999 to 2021

表 5. 1999~2021 年中国“隧道突水”突现关键词

序号	关键词	强度	出现年份	结束年份	持续时间
1	格子方法(ibm)	3.97	1999	2006	8 年
2	离散元法(dem)	3.75	1999	2005	7 年
3	浅埋隧道	3.33	1999	2006	8 年
4	超前地质预报	4.09	2008	2009	2 年
5	岩溶	3.94	2010	2011	2 年
6	断层	4.23	2011	2014	4 年
7	突水突泥	4.24	2016	2021	5 年

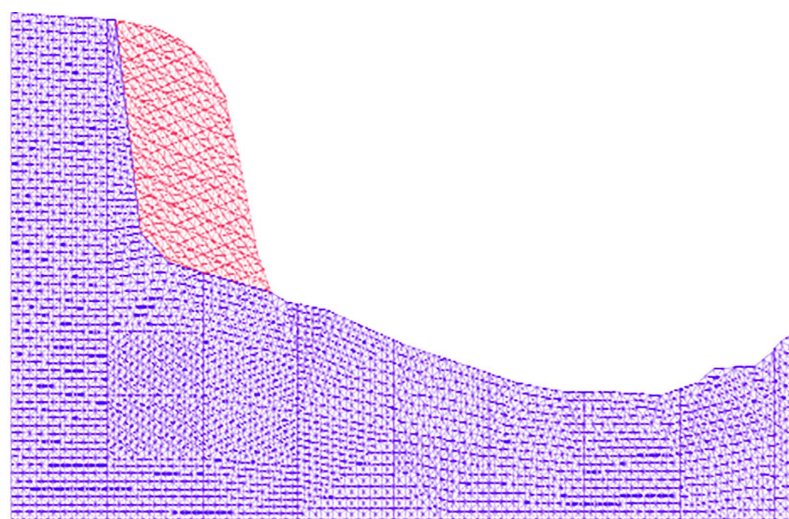


Figure 7. Meshing generation of numerical model for UDEC

图 7. UDEC 离散元数值模拟网格剖分

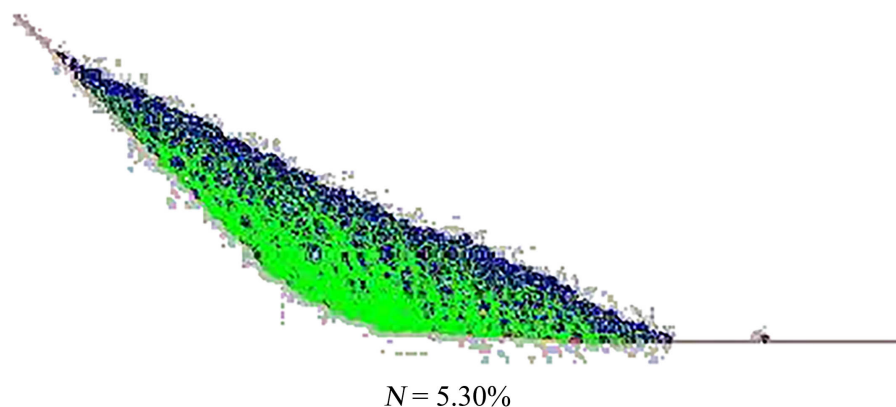


Figure 8. Calculation model and slope shape for PFC
图 8. PFC 完成的坡面形态和计算模型

尺度效应的影响, 郭亚丽[19]等利用格子 Boltzmann 方法模拟矩形腔内纳米流体 Raleigh-Benard 对流。汪成兵[20]等利用离散元的方法模拟了隧道塌方的全过程, 分析了隧道塌方影响因素对隧道塌方发生机制的作用。而在 08 年出现的超前地质预报虽然突现持续时间短, 但是突现强度比较强, 说明在 2008 和 2009 这两年时间内超前地质预报是研究的热点方向, 突水突泥的突现强度最强, 说明在近几年是国内的研究热点方向, 但在 2021 年有所下降。

4. 结论与展望

本文基于 CNKI 数据库, 对 1999~2021 年隧道突水领域的文献进行了知识图谱结构分析, 分别从文献历年发文量、文献作者群体、机构合作及关键词等方面进行了详细地阐述, 具体可得出以下几点结论。

1) 目前国内关于隧道突水的研究方向相较于较早年份有较大进展, 不仅仅体现在发文数量上, 学科相关研究人员在数量上也出现了增长, 并且形成了以曾亚武、杜欣、卢春名、林玉山和张炳晖等核心研究人员的合作研究网络。除此之外, 相较于较早年份的单方面研究, 07 年以后出现了大量的聚类方向, 进一步推动隧道突水学科的发展与完善。目前学科整体发文量一直处在稳定状态, 但大部分作者及机构仅仅发表 3~5 篇文章, 研究深度欠佳, 且各学者之间的合作关系也应该加强。

2) 在高速远程滑坡研究领域, 中国地质大学(武汉)工程学院、中铁隧道勘测设计院有限公司、武汉大学、山东大学岩土与结构工程研究中心、中国地质科学院岩溶地质研究所, 发文量远高于其他机构, 彼此之间联系较少, 在机构发文量中, 出现了严重的两级分化现象, 排名第一和排名倒数第一的发文量相差 10 倍左右。

3) 通过关键词共现图谱, 结合词频、中心度、聚类分析, “岩溶隧道”、“隧道工程”、“突水突泥”等为近几年的研究热点; 超前地质预报和公路隧道是此学科研究较为深入的两个方面, 在学习此学科的过程中, 需要重点关注这两方面。

4) 从 2018 年湖北广水隧道的突水事故发生后, 国内学者对此领域的研究又开始重视并呈现持续稳定发展的态势。一方面说明隧道突水灾害的发生仍不可较好的预防控制, 另一方面说明人们对于隧道工程的孕灾模式和灾变机理还需要进一步深入研究和探索。在未来研究隧道突水学科领域中, 各个学者和机构之间应该加强合作联系。隧道突水突泥重大灾害的致灾机理和预警控制方面的理论项目的研究取决于对隧道地质情况的认知深度, 未来应该响应国家“深空”“深陆”的计划, 从“水-陆-空”等多方面进行地质探测, 早日实现“地球透明化”, 随着数值模拟等方法的演进优化, 未来应该将研究重点放在这上面, 不仅能节约实体试验的成本和时间, 还能精准快速地从多方面分析隧道工程的试验数据。

基金项目

中国水利水电第七工程局有限公司 2021 年科技项目经费资助, 西南科技大学高教研究专项课题(20GJZX02); 西南科技大学 2019 年度本科教育教学改革与研究项目(19xn0063)。

参考文献

- [1] 李术才, 王康, 李利平, 周宗青, 石少帅, 柳尚. 岩溶隧道突水灾害形成机理及发展趋势[J]. 力学学报, 2017, 49(1): 22-30.
- [2] 仇文革, 黄海昀, 闫飞跃, 孙克国. 基于能量原理的上覆饱水砂层隧道突水灾变[J]. 隧道与地下工程灾害防治, 2021, 3(1): 1-11.
- [3] 宋建. 明月山隧道塌方突水治理分析[J]. 西部交通科技, 2021(2): 108-110.
- [4] 俞剑. 岩溶隧道突水突泥致灾构造评判方法研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2021, 18(6): 109-114.
- [5] 李继锋. 隧道岩溶突水涌泥原因与处理策略探讨[J]. 低碳世界, 2021, 10(9): 133-134.
- [6] 黄震, 曾伟, 李晓昭, 张培兴, 吴云, 赵奎, 李仕杰. 岩溶区地下工程裂隙渗流突水数值模拟研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2021, 29(2): 412-425.
- [7] 李术才, 李利平, 石少帅. 三峡库区典型岩溶隧道突涌水灾害防治与应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(9): 1887-1896.
- [8] 袁永才, 李术才, 李利平, 等. 尚家湾强岩溶隧道突水突泥伴生灾害源综合分析[J]. 中南大学学报, 2017, 48(1): 203-211.
- [9] 肖鹏, 刘春国, 孙康. 高速公路隧道突水突泥灾害注浆治理研究[J]. 交通世界, 2019(26): 103-104.
- [10] 韩增林, 李彬, 张坤领, 等. 基于 CiteSpace 中国海洋经济研究的知识图谱分析[J]. 地理科学, 2016, 36(5): 643-652.
- [11] 唐刚, 杨杨, 唐旭, 等. 基于 CiteSpace 装配式建筑的研究热点演化及趋势分析[J]. 四川建材, 2021, 47(2): 27-28.
- [12] 张富程, 高凯, 姜茂敏, 等. 医疗卫生领域人工智能的研究热点及发展趋势研究[J]. 中国医疗管理科学, 2020, 10(4): 45-51.
- [13] 王萍, 刘涛, 杜萍, 等. 2000-2017 年中国灾害风险研究的知识图谱分析[J]. 自然灾害学报, 2019, 28(4): 169-177.
- [14] 李杰, 陈超美. citespac: 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.
- [15] 黄鑫, 林鹏, 许振浩, 李术才, 潘东东, 高斌, 李召峰. 岩溶隧道突水突泥防突评判方法及其工程应用[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2018, 49(10): 2533-2544.
- [16] 李术才, 许振浩, 黄鑫, 林鹏, 赵晓成, 张庆松, 杨磊, 张霄, 孙怀凤, 潘东东. 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分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(5): 1041-1069.
- [17] 胡明鉴, 汪稔, 陈中学, 王志兵. 泥石流启动过程 PFC 数值模拟[J]. 岩土力学, 2010, 31(S1): 394-397+434. <https://doi.org/10.16285/j.rsm.2010.s1.013>
- [18] 姚军, 赵建林, 张敏, 张磊, 杨永飞, 孙致学, 孙海. 基于格子 Boltzmann 方法的页岩气微观流动模拟[J]. 石油学报, 2015, 36(10): 1280-1289.
- [19] 郭亚丽, 徐鹤函, 沈胜强, 魏兰. 利用格子 Boltzmann 方法模拟矩形腔内纳米流体 Raleigh-Benard 对流[J]. 物理学报, 2013, 62(14): 326-331.
- [20] 汪成兵, 朱合华. 隧道塌方机制及其影响因素离散元模拟[J]. 岩土工程学报, 2008(3): 450-456.