

基于知识图谱的隧道模型试验可视化研究及趋势分析

张鸿涛^{1*}, 杨 芍¹, 杨建江¹, 杨国成^{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5月27日; 录用日期: 2022年7月7日; 发布日期: 2022年7月14日

摘 要

为了分析当今隧道模型试验领域的发展趋势及目前研究现状, 以“隧道模型试验”为主题词, 通过CiteSpaceV文献分析软件对2001~2021年CNKI中国知网的搜集到的2252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缓慢期、高速增长期和下降期三个阶段, 该研究领域起步较晚, 但在过去20年间, 我国有关隧道模型试验的研究发展迅速, 目前该领域的研究处于稳定发展状态。2) 何川、李术才、高波、朱合华和王明年等学者是该领域的核心研究人员, 其发文量均在25篇以上。西南交通大学和同济大学是该领域内的核心机构, 但就研究机构方面则形成几家独大的局面, 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) “盾构隧道”、“相似材料”、“模型试验”、“沉管隧道”、“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, 并追溯隧道模型试验发展演化进程, 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, 隧道模型试验, 知识图谱, 可视化

Visualization Research and Trend Analysis of Tunnel Model Test Based on Mapping Knowledge Domain

Hongtao Zhang^{1*}, Shao Yang¹, Jianjiang Yang¹, Guocheng Yang^{2#}, Xiaohong Ou², Peng Li², Peifeng Han², Daiguo Chen²

¹South Branch of Sinohydro Bureau 7 Co., Ltd., Shenzhen Guangdong

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 张鸿涛, 杨芍, 杨建江, 杨国成, 欧小红, 李鹏, 韩培锋, 陈代果. 基于知识图谱的隧道模型试验可视化研究及趋势分析[J]. 地球科学前沿, 2022, 12(7): 967-978. DOI: 10.12677/ag.2022.127092

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

Received: May 27th, 2022; accepted: Jul. 7th, 2022; published: Jul. 14th, 2022

Abstract

In order to analyze the development trend and current research status in the field of tunnel model test, with the title of “tunnel model test”, a visual analysis of 2252 literature data collected by CNKI from 2001 to 2021 was carried out by CiteSpaceV literature analysis software. The results show that: 1) The research on tunnel water inrush has gone through three stages: Slow development stage, high growth stage and decline stage. This research field started late, but in the past 20 years, the research on tunnel model test in China has developed rapidly, and the research in this field is in a stable development state. 2) He Chuan, Li Shucai, Gao Bo, Zhu Hehua and Wang Mingnian are the core researchers in this field, and their publications are more than 25. Southwest Jiaotong University and Tongji University are the core institutions in this field, but in terms of research institutions, there are several dominant ones. The overall number of authors published by other institutions in this field is not high. In terms of overall cooperation, almost all institutions published independently, and there is little cooperative relationship. 3) “shield tunnel”, “similar material”, “model test”, “immersed tube tunnel” and “tunnel engineering” are the main research hot topics in recent years, and a series of research achievements have been made in this field by relevant scholars. The research results of this paper can clearly sort out the research achievements and hot spots of tunnel water inrush research in recent years, and trace the development and evolution process of tunnel model test, so as to provide reference for relevant scholars to track the recent hot spots and future development trend of this field.

Keywords

CiteSpace, Tunnel Model Test, 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

隧道模型试验，它以相似原理为理论基础，是一种发展较早、应用广泛、形象直观的岩土介质、工程结构和物理力学特性的研究方法。模型试验可以模拟各种相对复杂的边界条件，能较全面而又形象地呈现工程结构与相关岩土体共同作用下的应力和变形机制、破坏机理、形态及失稳阶段的全貌。长期以来，模型试验方法一直是研究解决大型复杂岩土与结构工程课题的重要手段[1] [2] [3]。

隧道模型试验是研究隧道科学的一个重要手段。物理模型由于是真实的物理实体，当它在基本满足相似原理的条件下，能避开数学和力学上的困难，真实、全面、直观、准确地反映隧道开挖过程中固岩支护体系各方面的变化和影响，使人们更容易全面掌握岩体工程的整体受力特征、变形趋势及稳定性特点。一方面可以与数学模型相互验证，另一方面也为发现一些新的力学现象和规律，为建立新的计算理论和数学模型提供重要的依据[4] [5] [6]。例如，周小文[7]等利用离心模型试验研究隧洞开挖中支护压力 P 与地层位移 S 的关系以及地面沉降槽的形态，为后续有关隧洞开挖提供了新的研究方向。就目前而言，

针对隧道模型试验的研究已经比较成熟、且研究内容较丰富,但是针对近 20 年有关隧道模型试验的研究整体分析还不足,缺乏较系统的定量分析近年来关于隧道模型试验的研究文献。基于此利用 CiteSpace 文献计量分析软件,区别以往对隧道模型试验的研究分析方向,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,从而为隧道模型试验领域未来的研究提供参考。

目前,国内相关学者在“隧道模型试验”领域发表了一系列的相关性文章,如邱长林,刘彬等[8]以针对连拱隧道复杂的施工力学特性,结合实际工程,通过模型试验和现场监测分别研究了整体式中隔墙连拱隧道在中导正洞台阶法施工过程中的位移和中隔墙应力变化情况,并详细分析了各开挖步骤对其的影响。再例如何本国,张志强等[9]采用结构力学方法确定隧道拱部、仰拱部分不等值环箍力模拟水荷载,研制了马蹄形断面隧道模型试验的全周密闭非均匀水压加载装置,实现“灯泡型”水压模拟加载。在此基础上进行模型试验,所得结论与数值模拟在关键部位受力结果相吻合,从而验证了水压模拟加载方法的正确性,成功解决了隧道结构试验中水压模拟加载“瓶颈”问题。还有关振长等[10]学者以福州市二环环路金鸡山隧道扩建工程为背景,设计制作了特大断面隧道的 1/30 缩尺模型,完成了 21 种工况下的模拟地震动试验,重点关注隧道模型加速度与接触压力的地震响应,为隧道抗震设计中,衬砌-地层接触压力的参数取值提供了定量参考。

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[11]。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[12]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[13]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,对我国隧道模型试验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“隧道模型试验”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“隧道模型试验”为主题,检索区间 2001 年~2021 年,共检索出 2140 条相关文献,检索时间为 2022 年 4 月 3 日,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 2102 条相关文献。

2.2. 分析方法

2.2.1. 分析方向

基于检索得 2102 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。Ochia 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[14]。

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模型试验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“隧道模型试验”为关键检索词开展文献检索,通过对重复文献进行筛选,最终选取 2001 年 1 月到 2021 年 12 月之间的共计 2102 篇文献开展本文的研究工作。下图 1 给出了 2001 年~2021 年有关隧道模型试验相关的文献,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。

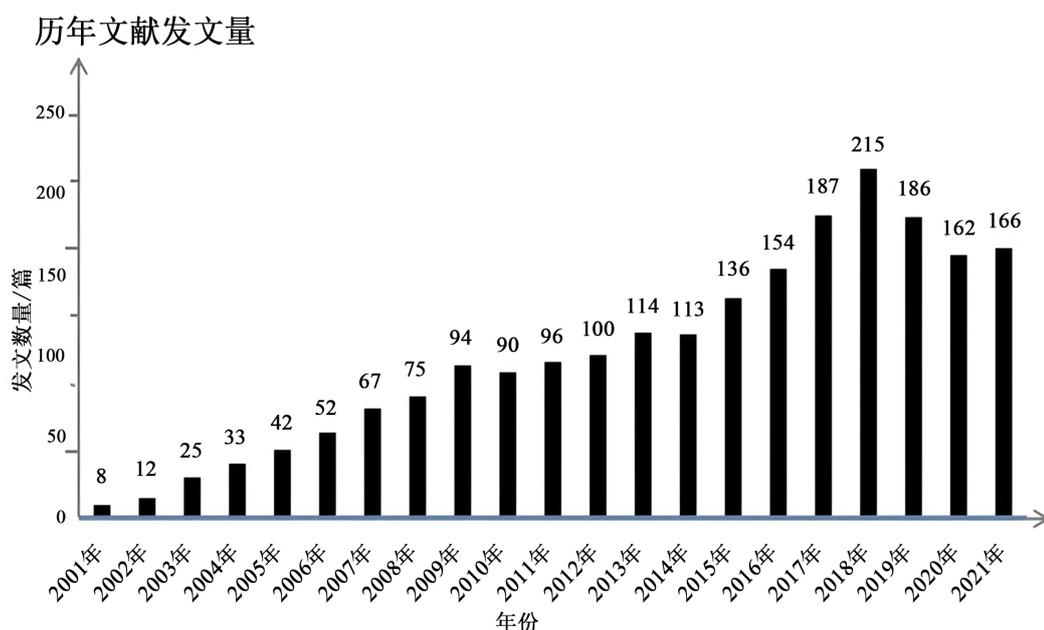


Figure 1. Quantitative analysis chart of “tunnel model test” in China, 2001~2021

图 1. 2001~2021 年中国“隧道模型试验”发文数量分析图

从图 1 可知, 隧道模型试验的研究近年来文章数量总体上呈现快速上涨的趋势, 自 2001~2021 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模型试验的文献数量大致可分为三个阶段, 2001~2013 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, 在该阶段对于隧道模型试验的研究快速增长, 主要原因可能是该时期我国在高速公路, 高铁建设量急剧增加, 隧道问题凸显, 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

为分析隧道模型试验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 681 个, 连接 823 个, 网络密度为 0.0036。在隧道模型试验学科领域中, 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”以何川、李术才、高波等为中心, 相关研究人员发表了大量有关隧道模型试验相关的文献, 排名靠前的几位核心学者的发文量在 2102 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, 说明虽然研究隧道模型试验的研究团队较集中, 作者众多, 但核心作者较少。在隧道模型试验研究领域中, 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, 目前我国隧道模型试验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, 隧道模型试验合作关系网络会越来越完整, 并且学科发展也将逐渐走向成熟。



图 2. 中国 2001~2021 年“隧道模型试验”作者发文量
Figure 2. Author publications of “tunnel model test” in China, 2001~2021

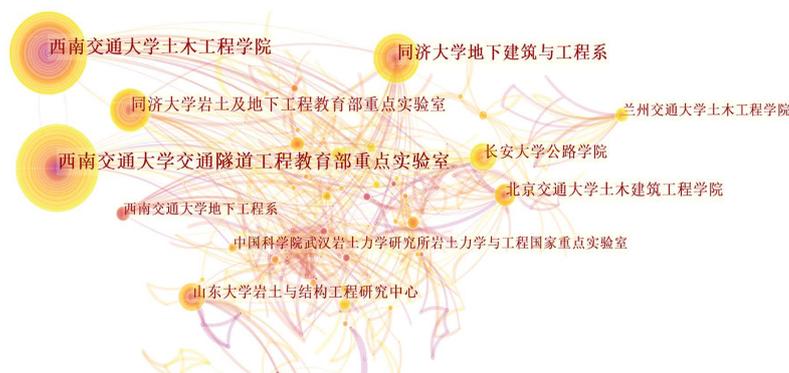
3.3. 机构合作分析

首先从检索得到的 2102 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 2001~2021 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 ≥ 34 以上的机构, 得到隧道模型试验发文机构图谱如图 3 所示, 并整理排名得出表 3。

Table 1. Statistics of published papers by authors of “tunnel model test” in China, 2001~2021**表 1.** 2001~2021 年中国“隧道模型试验”作者发文统计

| 序号 | 发文数量/篇 | 作者 |
|----|--------|-----|
| 1 | 58 | 何川 |
| 2 | 42 | 李术才 |
| 3 | 31 | 高波 |
| 4 | 18 | 方勇 |
| 5 | 18 | 崔光耀 |
| 6 | 18 | 朱合华 |
| 7 | 18 | 仇文革 |
| 8 | 18 | 王明年 |
| 9 | 17 | 谢永利 |
| 10 | 17 | 刘新荣 |

CiteSpace v. 5.8.R3 (64-bit)
 April 8, 2022 9:29:21 AM CST
 WoS: C:\Users\85223\data for citespace\隧道模型试验\data
 Timespan: 2001-2021 (Slice Length=1)
 Selection Criteria: g-index (k=25), LRF=3.0, LN=10, LBY=5, e=1.0
 Network: N=614, E=789 (Density=0.0042)
 Largest CC: 346 (56%)
 Nodes Labeled: 1.0%
 Pruning: Pathfinder

**Figure 3.** The institution of “tunnel model test” in China, 2001~2021**图 3.** 2001~2021 年中国“隧道模型试验”发文机构图谱**Table 2.** Ranking of “tunnel model test” publishing agencies in China, 2001~2021**表 2.** 2001~2021 年中国“隧道模型试验”发文机构排名

| 序号 | 频次 | 机构 |
|----|-----|----------------------|
| 1 | 188 | 西南交通大学交通隧道工程教育部重点实验室 |
| 2 | 136 | 西南交通大学土木工程学院 |
| 3 | 105 | 同济大学地下建筑与工程系 |
| 4 | 84 | 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室 |
| 5 | 60 | 长安大学公路学院 |
| 6 | 56 | 北京交通大学土木建筑工程学院 |
| 7 | 51 | 山东大学岩土与结构工程研究中心 |
| 8 | 36 | 兰州交通大学土木工程学院 |
| 9 | 36 | 中国科学院武汉岩土力学研究所 |
| 10 | 34 | 西南交通大学地下工程系 |

由图 3 可知, 节点 $N = 614$, 连接线 $E = 789$, 网络密度 $density = 0.0042$, 综合表 2, 图 3 分析得出, 目前国内隧道模型试验研究机构合作网络较紧密, 西南交通大学形成了一家独大的局面, 其次是同济大学和长安大学的发文量紧跟其后, 可以看出不论是理论研究层面还是设计实践层面, 国内对隧道模型试验的研究呈现出一个百花齐放的态势, 但各个机构之间还需加强团队之间的合作, 这样才能让我国在有关隧道难题上取得突破性的发展。

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[15]。首先, 在 CiteSpace 中将时间切片定为 1 a, 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 2001~2021 年隧道模型试验关键词图谱图。

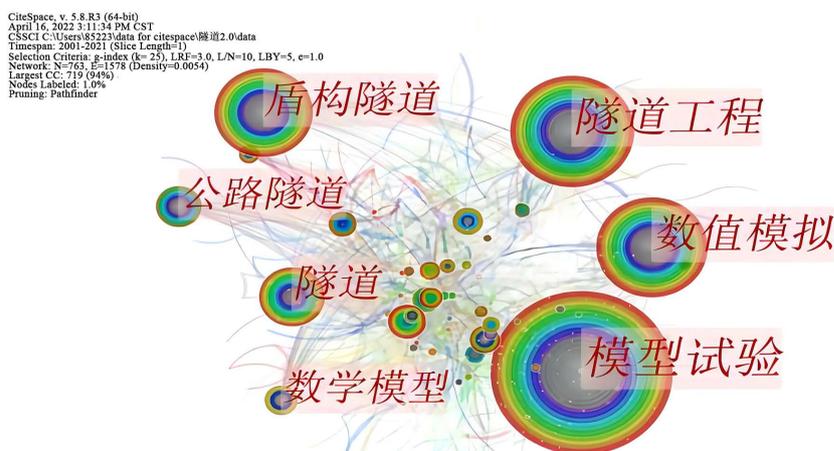


Figure 4. Keywords of “tunnel model test” in China, 2001~2021

图 4. 2001~2021 年“隧道模型试验”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中心性最强的节点, 结合图 4 共现关系连接线可知, 如“模型试验”、“隧道工程”、“盾构隧道”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。

结合表 3 可知, “模型试验”、“隧道工程”、“数值模拟”、“盾构隧道”分别为中心度较高的前 4 位关键词, 说明在隧道模型试验中, 涉及到此 4 类的关键词的研究较多。

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), 可以研究高隧道模型试验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

Table 3. Key word centrality of “tunnel model test” in China from 2001 to 2021
表 3. 2001~2021 年中国“隧道模型试验”关键词中心度

| 序号 | 关键词 | 频次 | 中心度 |
|----|------|------|------|
| 1 | 模型试验 | 1289 | 0.32 |
| 2 | 隧道工程 | 432 | 0.20 |
| 3 | 数值模拟 | 346 | 0.30 |
| 4 | 盾构隧道 | 245 | 0.35 |
| 5 | 隧道 | 162 | 0.26 |
| 6 | 地铁隧道 | 85 | 0.16 |
| 7 | 公路隧道 | 83 | 0.12 |
| 8 | 铁路隧道 | 69 | 0.02 |
| 9 | 数值分析 | 62 | 0.09 |
| 10 | 数学模型 | 61 | 0.11 |

调整,得到图 5 所示的知识图谱。该图中,该图中,模块值(Modularity)为 $Q = 0.6103 > 0.3$ 说明聚类结果显著,平均轮廓值(Mean)为 $S = 0.7129 > 0.7$,说明聚类结果的可信度是很高的。由此可得,2001~2021 年隧道模型试验领域研究,主要以图 5 中 8 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 2009 年左右,原因在于 2009 年之前,学术文献较少,说明该阶段隧道模型试验还没有引起学术界的足够重视,而 09 年之后的我国大力发展高速公路和高速铁路,随之伴随着一系列的有关隧道问题,国内学者开始对隧道模型试验开始逐渐加大研究力度。

在研究初期(2001~2009 年),国内学者开始初步探讨隧道模型试验的有关实体研究,即聚类#1、#2; 研究中期(2009~2011 年)主要研究隧道模型试验的应用研究,国内学者提出了很多关键技术与理论原理,分析隧道的特征以及治理的新型技术,即聚类#4、#5、#6、#7、#8; 研究近期(2011 年~2021 年)主要是在对隧道模型试验的技术进行研究,即聚类#3、#9、#10。整体研究发现,大部分聚类词平均年份较早,说明隧模型试验领域研究主要集中在 2009 年后几年内,随着时间推移,公路和铁路的建设量不断积累,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模型试验,相似材料,隧道,针对数值模拟,针对隧道工程的模型建立和分析方法的研究众多,研究深入且广泛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。但是在我国有关隧道模型试验中聚类紧密程度小于 0.9,说明聚类效果不够好,同质性不强,关键词之间联系不够紧密。望有关学者能在日后的研究过程之中能将隧道模型试验的各个分类有机联系起来做整体性,多角度分析。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 更加可以清晰直观地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模型试验的演进。如图 6 所示, #1 长度最短,从 2005 年才开始出现, #2 次之,出现时间为 2004 年; #0、#3、#4、#5、#7 聚类代表的研究时间跨度最长; #2、#6 聚类在 2019 年后就没有出现,由此可预测该两类聚类现在已经发展得比较完善,而#0、#1、#3、#4、#5、#7 等聚类都将持续作为研究热点进行探讨和研究。

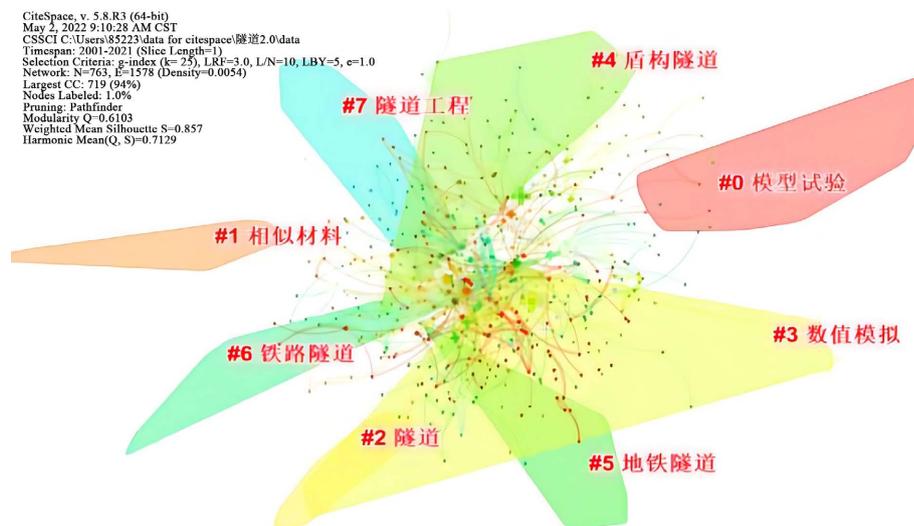


Figure 5. “Tunnel model test” cluster knowledge map in China, 2001~2021

图 5. 2001~2021 中国“隧道模型试验”聚类知识图谱

Table 4. Cluster analysis table of “tunnel model test” in China, 2001~2021

表 4. 2001~2021 中国“隧道模型试验”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 模型试验 | 83 | 0.848 | 2011 | 模型试验(167.59); 数值计算(57.9); 隧道衬砌(32.1); 滑坡(29.51, 1.0E-4); 火灾(22.07, 1.0E-4) |
| #1 相似材料 | 63 | 0.855 | 2012 | 相似材料(67.12); 数值分析(44.04); 水压力(39.18); 海底隧道(38.51, 1.0E-4); 力学特性(27.33, 1.0E-4) |
| #2 隧道 | 61 | 0.891 | 2012 | 隧道(75.77); 振动台模型试验(70.94); 动力响应(68.68); 减震层(46.2, 1.0E-4); 黄土隧道(44.33, 1.0E-4) |
| #3 数值模拟 | 60 | 0.862 | 2010 | 数值模拟(141); 临界风速(101.83); 隧道火灾(69.91); 高海拔(66.98, 1.0E-4); 现场模型试验(58, 1.0E-4) |
| #4 盾构隧道 | 59 | 0.845 | 2012 | 盾构隧道(168.87); 应力路径(69.59); 剪胀性(64.68); 相对密实度(64.68, 1.0E-4); 沉降(40.07, 1.0E-4) |
| #5 地铁隧道 | 54 | 0.878 | 2012 | 地铁隧道(121.59); 地裂缝(84.03); 地表沉降(33.64); 土压力(33.09, 1.0E-4); 列车荷载(22.24, 1.0E-4) |
| #6 铁路隧道 | 51 | 0.874 | 2011 | 铁路隧道(66.98); 衬砌结构(40.47); 软岩隧道(35.61); 逆断层(33.15) |
| #7 隧道工程 | 48 | 0.785 | 2011 | 隧道工程(171.33); 土与结构相互作用(28.83); 框架建筑(28.83) |

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 3 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 可以看出连拱隧道, 数学模型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隧道实体和模型建立方面, 例如汪洋、何川等[16]利用室内相似模型试验和三维有限元数值计算相结合的手段, 引入横向和纵向等效刚度折减系数, 对盾构隧道正交下穿施工所引起的既有隧道纵向变位、纵向附加轴力和弯矩、横向变形、横向附加轴力和弯矩进行深入研究。郭亚丽[17]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[18]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。说明在近几年时间内盾构隧道与数值模拟是研究的热点方向。究其原因，我国早年盾构隧道技术不够完善，依赖国外先进设备，在近年来我国大力发展隧道工程，这就不得不需要我们攻克盾构隧道的难题，所以有关盾构隧道的模型试验应运而生[19]。而沉管隧道的突现强度最强，说明在近几年是国内的研究热点方向。



Figure 6. Cluster map of time-line of tunnel model test in China from 2001~2021
图 6. 2001~2021 年中国隧道模型试验时间聚类图谱

Table 5. Emergent key word of “tunnel model test” in China from 2001 to 2021

表 5. 2001~2021 年中国“隧道模型试验”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 | 铁路隧道 | 6.44 | 2001 | 2005 | 5 年 |
| 2 | 数学模型 | 6.62 | 2003 | 2008 | 6 年 |
| 3 | 公路隧道 | 6.21 | 2003 | 2007 | 5 年 |
| 4 | 连拱隧道 | 7.32 | 2004 | 2012 | 9 年 |
| 5 | 地铁车站 | 6.18 | 2006 | 2010 | 5 年 |
| 6 | 地裂缝 | 7.73 | 2008 | 2011 | 4 年 |
| 7 | 海底隧道 | 7.05 | 2010 | 2013 | 4 年 |
| 8 | 沉管隧道 | 11.25 | 2012 | 2015 | 4 年 |
| 9 | 隧道锚 | 5.15 | 2015 | 2018 | 4 年 |
| 10 | 动力响应 | 5.68 | 2017 | 2019 | 3 年 |
| 11 | 黄土隧道 | 5.11 | 2019 | 2021 | 4 年 |

4. 结论与展望

本文基于 CNKI 数据库，对 2001~2021 年隧道模型试验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) 目前国内关于隧道模型试验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，并且形成了以何川、李术才、高波、朱合华和王明年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，09 年以后出现了大量的聚类方向，

进一步推动隧道模型试验的发展与完善。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) 在隧道模型试验研究领域,西南交通大学、同济大学、长安大学、山东大学岩土与结构工程研究中心、重庆交通大学,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。

3) 通过关键词共现图谱,结合词频、中心度、聚类分析,“盾构隧道”、“数值模拟”等为近几年的研究热点;地裂缝和沉管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) 在未来研究隧道模型试验学科领域中,各个学者和机构之间应该加强合作联系。隧道模型试验的理论项目的研究取决于对隧道地质情况的认知深度和对模型建立的精准度。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 年项目资助。

参考文献

- [1] 李术才,宋曙光,李利平,张乾青,王凯,周毅,张骞,王庆瀚.海底隧道流固耦合模型试验系统的研制及应用[J].岩石力学与工程学报,2013,32(5):883-890.
- [2] 王明年,崔光耀.高烈度地震区隧道减震模型的建立及其减震效果模型试验研究[J].岩土力学,2010,31(6):1884-1890.
- [3] 黄宏伟,徐凌,严佳梁,余占奎.盾构隧道横向刚度有效率研究[J].岩土工程学报,2006(1):11-18.
- [4] 余健,何川,汪波,汪洋.衬砌背后空洞对隧道结构承载力影响的模型试验研究[J].公路交通科技,2008(1):104-110.
- [5] 李围,何川.盾构隧道近接下穿地下大型结构施工影响研究[J].岩土工程学报,2006(10):1277-1282.
- [6] 周晓军,高杨,李泽龙,杨昌宇.地质顺层偏压隧道围岩压力及其分布特点的试验研究[J].现代隧道技术,2006(1):12-21.
- [7] 周小文,濮家骝.砂土中隧洞开挖引起的地面沉降试验研究[J].岩土力学,2002(5):559-563.
- [8] 邱长林,刘彬,何林生,冯守中.整体式中隔墙连拱隧道模型试验及现场监测[J].岩土力学,2012,33(9):2625-2631.
- [9] 何本国,张志强,马腾飞.大断面隧道模型试验水压模拟加载方法[J].工程力学,2015,32(1):128-136.
- [10] 关振长,罗志彬,徐道,陈仁春,耿萍.基于振动台模型试验的特大断面隧道地震动态响应研究[J].工程地质学报,2017,25(3):648-656.
- [11] 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.
- [12] 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,2016,47(2):27-28.
- [13] 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,2021,10(4):45-51.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 汪洋,何川,曾东洋,苏宗贤.盾构隧道正交下穿施工对既有隧道影响的模型试验与数值模拟[J].铁道学报,2010,32(2):79-85.
- [17] 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.

[18] 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.

[19] 马险峰, 王俊淞, 李削云, 余龙. 盾构隧道引起地层损失和地表沉降的离心模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(5): 942-947.