

土石坝渗流领域基于图谱可视化分析研究

黄庄志^{1*}, 张迎庆¹, 樊荣华¹, 杨国成^{2#}, 李兴凯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12日; 录用日期: 2022年6月21日; 发布日期: 2022年6月28日

摘要

为了分析当今土石坝渗流领域的发展趋势及目前研究热点问题, 以“土石坝渗流”为主题词, 通过citespacV分析软件对2001~2021年CNKI中国知网的搜集到的737条文献数据进行可视化分析。研究结果表明: 1) 目前国内关于土石坝渗流的研究方向相较于较早年份有较大进展, 虽然总体发文量数量较早出现增长, 但是在最近几年发文数量有所下降。2) 以刘贤鹏, 余正源, 包腾飞, 丁倩, 刘得俊, 岑威钧等为中心发表了大量的学科文献, 而紧随其后的作者发文量为7~19次, 除此之外, 大部分作者都是发文量仅在1~4次, 说明研究土石坝渗流领域的作者众多, 但就研究作者和机构之间联系密度还不够。3) 通过关键词共现图谱, 结合词频, 中心度, 聚类等分析, “渗流稳定”、“坝坡稳定”、“浸润线”、“稳定分析”、“稳定性”等为近几年的研究热点; 就此观察可以得出目前前沿的关于土石坝渗流的领域是关于“渗流稳定”方向的学习。本文研究结果可以为读者清晰梳理土石坝渗流研究近年来的研究成果及研究热点, 并追溯土石坝渗流演化进程, 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, 土石坝渗流, 知识图谱, 可视化

Study on Visualization Analysis Based on Atlas in Seepage Field of Earth Rock Dam

Zhuangzhi Huang^{1*}, Yingqing Zhang¹, Ronghua Fan¹, Guocheng Yang^{2#}, Xingkai Li², Peifeng Han², Daiguo Chen²

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

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

Received: May 12th, 2022; accepted: Jun. 21st, 2022; published: Jun. 28th, 2022

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 黄庄志, 张迎庆, 樊荣华, 杨国成, 李兴凯, 韩培锋, 陈代果. 土石坝渗流领域基于图谱可视化分析研究[J]. 地球科学前沿, 2022, 12(6): 888-899. DOI: 10.12677/ag.2022.126085

Abstract

In order to analyze the development trend and current research status of seepage field of earth-rock dam, this paper uses “seepage of earth-rock dam” as the main topic and uses CiteSpaceV analysis software to carry out visual analysis of 737 literature data collected by CNKI from 2001 to 2021. The results show that: 1) The current research direction of seepage flow of earth-rock DAMS in China has made great progress compared with that in the early years. Although the overall number of published papers has increased compared with that in the early years, the number of published papers has decreased in recent years. 2) With Liu Xianpeng, are the source, take-off, minny, liu jun, as the center, published a lot of subjects such as wei-jun cen literature, and followed by the author is identified 7~19 times, in addition, most of the authors are identified only in 1~4 times, author shows that the research in the field of earth dam seepage is numerous, but the study authors and institutions link between density is not enough. 3) Based on keywords co-occurrence atlas, word frequency, centrality and clustering analysis, “seepage stability”, “dam slope stability”, “intrusion line”, “stability analysis” and “stability” have become research hotspots in recent years. From this observation, it can be concluded that the current frontier field about seepage of earth-rock dam is about the study of “seepage stability” direction. The research results of this paper can clearly sort out the research achievements and hot spots of seepage research on earth-rock DAMS in recent years, and trace the seepage evolution process of earth-rock DAMS, so as to provide reference for relevant scholars to track the recent hot spots and future development trend of this field.

Keywords

Citespace, Seepage of Earth-Rock Dam, 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

“土石坝渗流”是指在坝体及坝基中的渗流作用下，由于其机械或化学作用，使土体颗粒流失、产生局部破坏的变形(如管涌或流土等) [1] [2] [3]。沿海城市河堤多由土石混合体堆积而成堤坝，其在水力作用下易变性失稳。土石坝渗透变形的形式与土料性质、土粒级配、水流条件以及防渗、排渗措施等多个因素有关；管涌和流土的发生与散粒土渗透变形破坏坡降的大小有关。研究土石坝渗透变形的的方法，大都是基于连续介质力学理论，采用有限单元法进行模拟计算，可求解分析均质或非均质、各向同性或各向异性以及复杂边界条件的土石坝渗流场和渗透变形的稳定性[4] [5] [6]。土石坝失稳灾变危害极大，尤其是城市河道，例如 1967 年竣工的夹河子水库，当水库蓄水 396.7 m 的高程时，大坝坝脚出现严重管涌，致使大坝决口，宽度达 181 m，给国家造成巨大损失。为此开展土石坝渗流研究，分析其研究现状及未来发展趋势对于土石坝稳定性研究及治理工作十分必要。

目前，国内相关学者在“土石坝渗流”领域发表了一系列的相关性文章，如丁树云，蔡正根等[7]从渗流量计算、渗透变形、渗透控制、渗流的数值模拟和渗透变形试验几个方面总结了国内外的研究现状和成果。梁国钱，郑敏生，孙伯永等[8]以对青山和对河口水库等工程的实际应用为例，结合工程实际，考虑了水位、降雨量、坝基排水以及时效等因素对渗流的影响，建立了土石坝坝体和坝基测压管以及通

过大坝渗流量等观测资料的统计分析模型和方法。吴志伟, 孙汉周等[9]建立了土石坝饱和-非饱和瞬态渗流场与温度场耦合模型(流-热耦合), 模型考虑了热对流、热传导和热扩散效应, 温度边界按周期性气温考虑, 且相关参数按非线性考虑, 如流体黏度的热效应、导热系数受含水率影响等, 反映了渗流场的时空分布特征。

可视化分析是指通过挖掘数据文本信息, 分析领域热点, 科学计量, 绘制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。如刘则渊等[11]基于 citespace 软件进行可视化分析, 研究生态经济学论文地区和机构分布等, 反应经济学不同时期的研究前沿。再例如陈丽萍等[12]利用可视化分析软件 citespace, 绘制储热技术国家, 机构, 研究人员之间的合作图谱, 通过共现分析得到储热技术的热点科学领域, 进而指出储热技术的研究热点和发展趋势。为分析土石坝渗流领域的研究热点及发展趋势, 本文基于 citespace 可视化分析, 对我国土石坝渗流研究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, 为后期该领域的研究提供参考。

2. 数据来源和分析方法

2.1. 数据来源

为了深入了解“土石坝渗流”热点问题, 分析该领域机构, 作者及其之间合作关系和发展状况, 进而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“土石坝渗流”为主题, 检索区间为 2001 年~2021 年, 共检索出 737 条相关文献检索时间为 2022 年 3 月 6 日下午, 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 727 条相关文献。

2.2. 分析方法

2.2.1. 分析方向

基于检索得 727 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

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

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[13]。

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土石坝渗流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“土石坝渗流”为关键检索词开展文献检索, 最终选取 2001 年 1 月到 2021 年 12 月之间的共计 727 篇文章开展本文的研究工作。下图 1 给出了 2001 年~2021 年有关土石坝渗流相关的文献, 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。

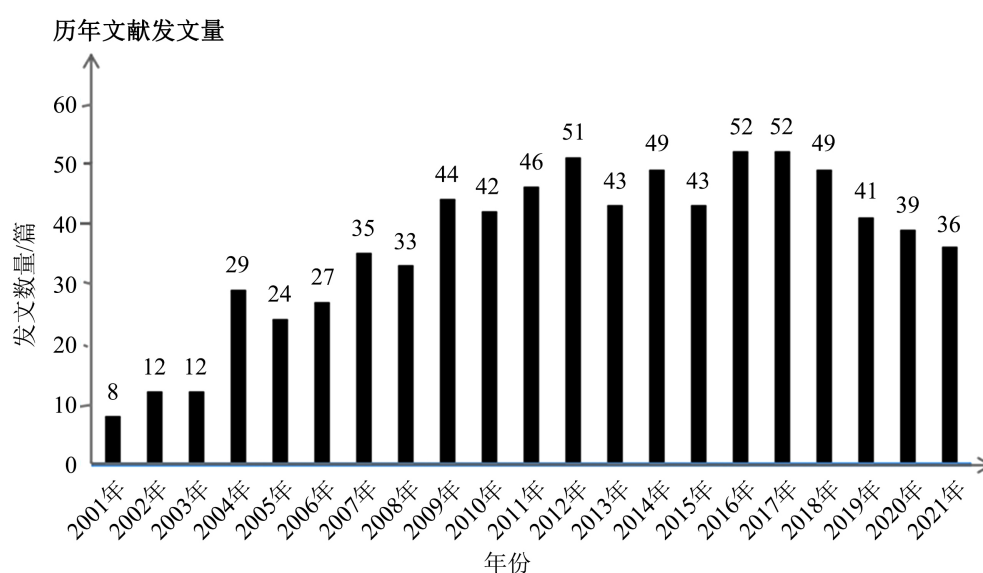


Figure 1. The number of “seepage of earth-rock dam” in China, 2001~2021

图 1. 2001~2021 年中国“土石坝渗流”发文数量分析图

经图 1 可知我国自 2001~2021 年, 发文数量呈现先快速增长, 后缓慢回落的趋势。其中以 2016 年和 2017 年发文量最多, 达到了 52 篇, 究其原因是因为近年来中国多次发生强降雨, 导致土石坝溃决险情增加。从 2005 年至 2008 年有关土石坝渗流的发文数量都在 20~30 篇以内, 2009 年至 2021 年持续稳定在 30 篇以上, 这说明在近些年以来, 我国有关学者一直密切关注有关土石坝渗流方面的研究。

3.2. 文献作者群体分析

文献发表量越多, 经 *citespaceV* 可视化分析后, 则其节点越大, 其中的连线是作者群体之间的合作关系。由图 2 可知, 共有节点 425 个, 连接 236 个, 网络密度为 0.0026。在土石坝渗流学科领域中, 作者之间的合作围绕着几个主要学者展开, 见表 1 中如刘贤鹏, 余正源, 包腾飞, 丁倩, 刘得俊, 岑威钧等学者发文量较大, 且与其他作者之间形成较多的合作关系, 发文量较多的学者大多与上述学者之间存在一定额合作关系。但部分学者发文量较少, 发文量仅在 1~4 篇, 且相互之间的合作较少, 说明研究土石坝渗流领域的作者较聚集, 主要集中在少数学者中。在土石坝渗流研究领域中, 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, 形成四足鼎立的局面。经图 2 分析可知, 就作者合作关系而言, 目前我国土石坝渗流研究之中, 学者针对该领域的研究较集中且关注度大, 说明该领域的研究较系统, 作者之间的合作较丰富。

CiteSpace, v. 5.8.R3 (64-bit)
 March 10, 2022 8:17:37 PM CST
 C:\Users\85223\data for citespace\土石坝渗流\data
 Timespan: 2002-2022 (Slice Length=1)
 Selection Criteria: g-index (k=25), LRF=3.0, L/N=10, LBY=5, e=1.0
 Network: N=425, E=236 (Density=0.0026)
 Largest CC: 13 (3%)
 Nodes Labeled: 1.0%
 Pruning: Pathfinder

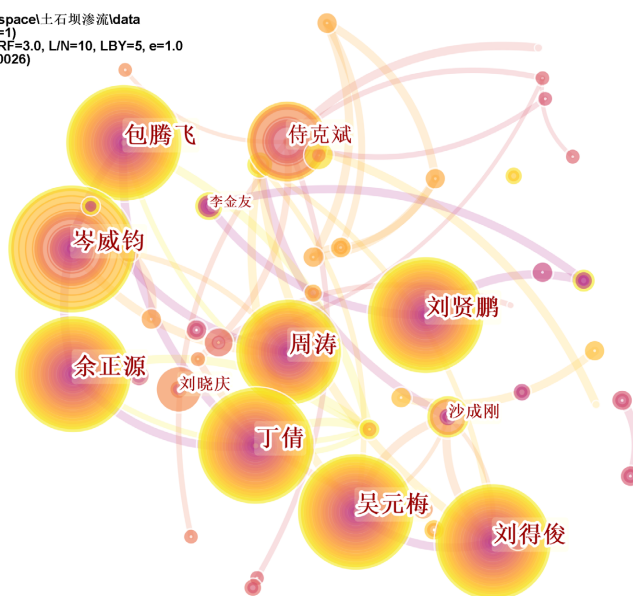


Figure 2. Authors of “seepage of earth-rock dam” in China, 2001~2021

图 2. 中国 2001~2021 年 “土石坝渗流” 作者发文量

Table 1. Statistics of published papers by authors of “seepage of earth-rock dam” in china 2001~2021

表 1. 2001~2021 年中国 “土石坝渗流” 作者发文统计

序号	发文数量/篇	作者
1	21	刘贤鹏
2	21	余正源
3	21	包腾飞
4	21	丁倩
5	21	刘得俊
6	21	吴元梅
7	19	周涛
8	13	侍克斌
9	7	刘晓庆
10	7	沙成刚

3.3. 机构合作分析

首先从检索得到的 727 条文献中进行可视化机构网络分析, 选取的节点类“NodeTypes = 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 ≥ 10 以上的机构, 得到土石坝渗流发文机构图谱如图 3 所示, 并整理排名得出表 2。

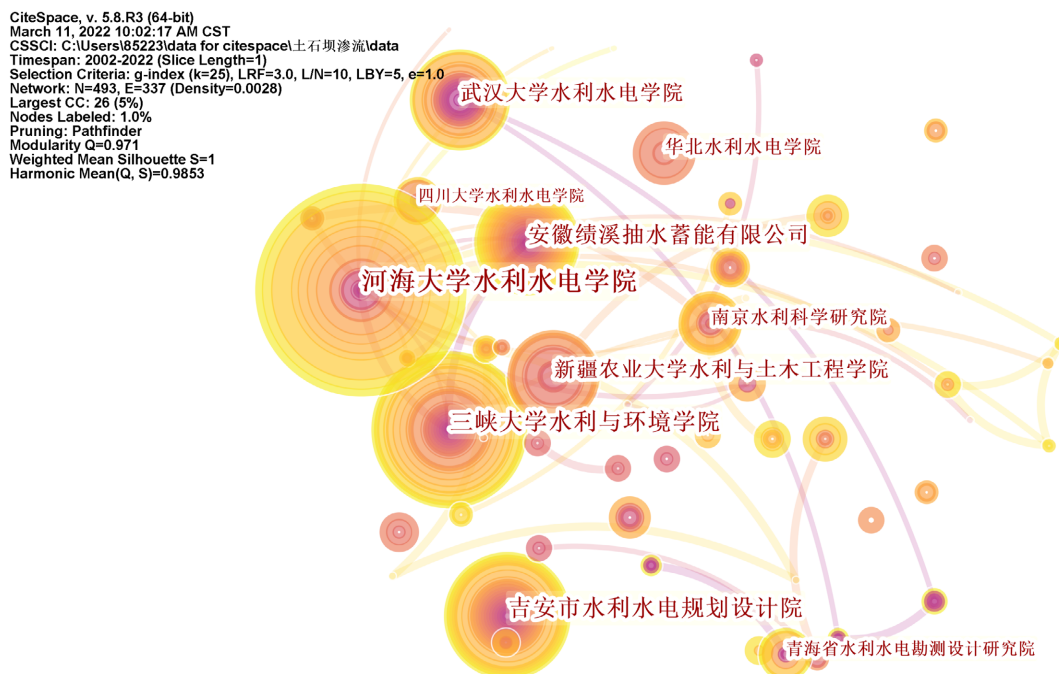


Figure 3. The institution of “seepage of earth-rock dam” in China, 2001~2021

图 3. 2001~2021 年中国“土石坝渗流”发文机构图谱

Table 2. Ranking of “seepage of earth-rock dam” publishing agencies in China, 2001~2021

表 2. 2001~2021 年中国“土石坝渗流”发文机构排名

序号	频次	机构
1	34	河海大学水利水电学院
2	27	三峡大学水利与环境学院
3	23	吉安市水利水电规划设计院
4	20	安徽绩溪抽水蓄能有限公司
5	17	武汉大学水利水电学院
6	15	新疆农业大学水利与土木工程学院
7	11	南京水利科学研究院
8	10	华北水利水电学院

由图 3 可知，识图谱中共有 493 个节点，337 条连接，网络密度为 0.0028，从总体上来看，研究土石坝渗流领域的机构众多，各机构之间的联系较多，说明各机构之间的交流合作关系还是比较紧密，有利于土石坝渗流相关领域的长久发展。具体来看图中出现了以河海大学水利水电学院为核心，包含三峡大学水利与环境学院，武汉大学水利水电学院等高校。其中也不乏水利研究院和各大高校之间进行合作，将研究资源进行共享，共同攻克有关土石坝渗流难关。望在后续的发展研究过程中，各机构能保持密切交流合作。

如表 2 分析，河海大学水利水电学院发文次数最多(34 次)，其次三峡大学水利与环境学院(27 次)，

吉安市水利水电规划设计院(23 次), 安徽绩溪抽水蓄能有限公司(20 次)等为发文数量较多的研究机构。这些发文机构及主要作者都为土石坝渗流领域的研究做出了重要贡献。

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 2001~2021 年土石坝渗流关键词图谱图。

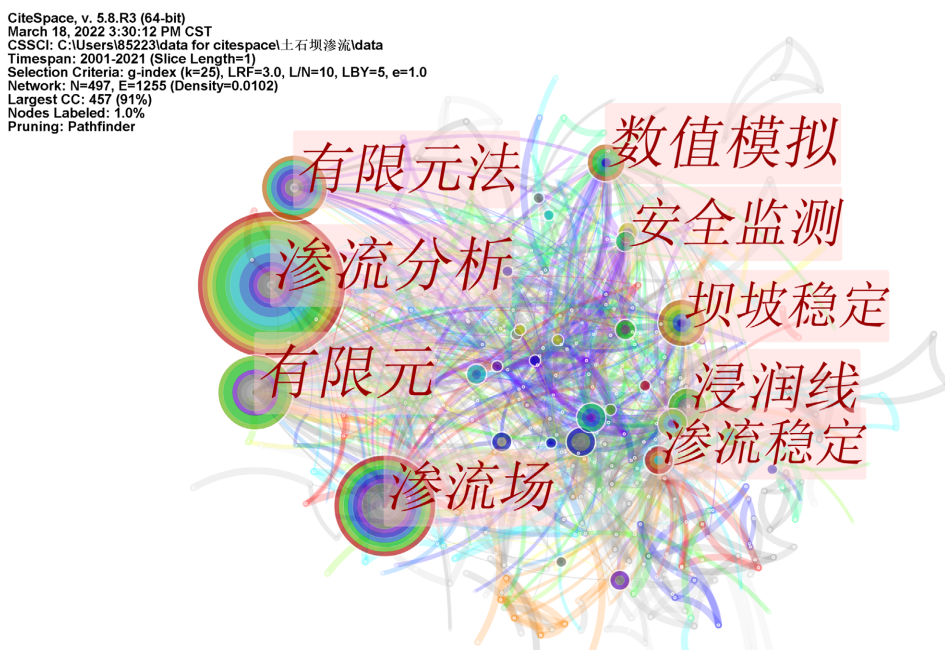


Figure 4. Keywords of “seepage of earth-rock dam” in China, 2001~2021

图 4. 2001~2021 年土石坝渗流关键词知识图谱

结合图 4 共现关系连接线可知, 2001~2021 年土石坝渗流领域研究, 出现次数最多的是渗流分析, 渗流场, 有限元, 有限元法都高达 46 次及以上, 据此可以分析前 20 年国内关于“土石坝渗流”的研究方向很多都围绕着上图 4 中的 10 个方向进行研究。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。

依照表 3 可看出关键词“渗流分析”出现频次最高, 达 91 次, 其次“渗流场”(59 次), “有限元”(48 次), “有限元场”(46 次), “浸润线”(34 次), “数值模拟”(29 次)等, 以上关键词说明了土石坝渗流领域的重要研究热点。可以发现, 近年来我国对土石坝渗流的研究更为注重结合有限元领域进行数值模拟和模型建立分析研究, 例如张乾飞[15], 引入了库水位和降雨的滞后影响函数, 以考虑库水位、降雨等因素对大坝渗流的滞后效应, 并建立了考虑滞后效应的大坝渗流监控模型, 并计算实例, 验证了该模型能较好地反映库水位、降雨等因素对渗流的滞后效应, 且模型精度较高, 可预报大坝的渗流状态。

Table 3. Key word centrality of “seepage of earth-rock dam” in China, 2001 to 2021
表 3. 2001~2021 年中国 “土石坝渗流” 关键词中心度

序号	关键词	频次	中心度
1	渗流分析	91	1
2	渗流场	59	2
3	有限元	48	3
4	有限元法	46	4
5	浸润线	34	5
6	数值模拟	29	6
7	渗流计算	28	7
8	坝坡稳定	27	8
9	渗流稳定	22	9
10	应力场	20	10

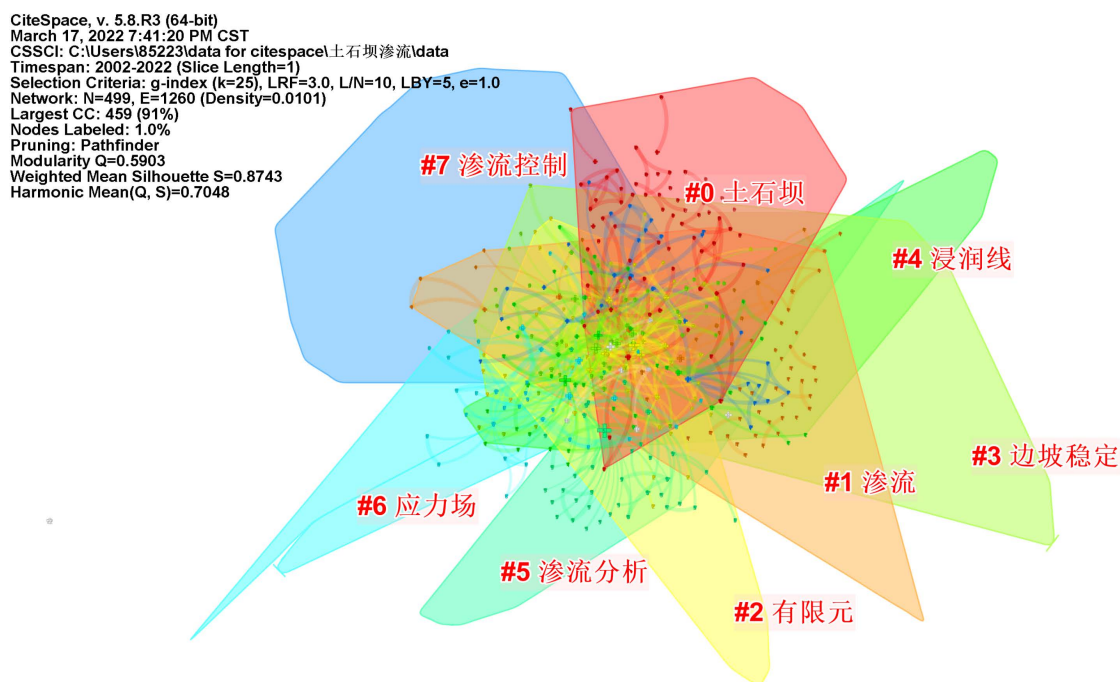


Figure 5. “Seepage of earth-rock dam” cluster knowledge map in China, 2001~2021

图 5. 2001~2021 中国 “土石坝渗流” 聚类知识图谱

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), 可以研究土石坝渗流热点研究结构紧密程度, 判断研究热点。采用 citespace V 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, 该图中, 模块值(Modularity)为 $Q = 0.5903 > 0.3$ 说明聚类结果显著,

平均轮廓值(Mean)为 $S = 0.7804 > 0.7$, 说明聚类结果的可信度是非常高的。由此可得, 2001~2021 年土石坝渗流领域研究, 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 2007 年左右, 而 07 年之后的土石坝渗流事故频发, 国内学者开始对土石坝渗流开始逐渐加大研究力度。在表 4 中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。其中除坝坡稳定紧密程度大于 0.9 以外, 其余聚类紧密程度均小于 0.9, 说明聚类效果不够好, 同质性不够强, 关键词之间联系不够紧密。如在渗流场聚类中, “渗流” “加固” “稳定” “分析” “坝坡” 是最紧密的五个关键词。

Table 4. 2001~2021 China “seepage of earth-rock dam” cluster analysis table

表 4. 2001~2021 “土石坝渗流” 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)
渗流分析	69	0.873	2011	渗流监测(20.49); 土石坝(19.9); 渗流压力(13.33); 集水廊道(6.65); 渗流作用(6.65)
渗流场	65	0.843	2009	渗流(67.49); 加固(22.55); 稳定(18.35); 分析(15.54); 坝坡(15.54)
有限元	56	0.789	2012	有限元(27.11); 坝坡稳定(18.99); 防渗墙(18.31); 应力变形(17.13); 安全系数(16.75)
有限元法	46	0.897	2008	边坡稳定(23.79); 数值模拟(16.41); 抗滑稳定(14.24); 防渗加固(9.94); 强度折减(9.48)
浸润线	43	0.885	2009	应力场(60.23); 渗流场(50.24); 耦合分析(35.82); 高土石坝(15.18); 应力(10.85)
数值模拟	33	0.811	2011	渗流分析(58.11); 监测反馈(19.3); 有限元法(12.17); 有限元计算(10.67); 渗流(8.18)
渗流计算	31	0.772	2009	渗流特性(28.74); 浸润线(25.37); 土工膜缺陷(12.41); 心墙防渗(12.41); 坝面防渗(12.41)
坝坡稳定	28	0.918	2007	渗流稳定(35); 大坝安全(23.86); 安全鉴定(19.4); 人工材料坝(7.89); 实测资料(7.89)

对于在图 6 (timeline)中, 这些节点展示了以上八个聚类的历史成果, 通过这些时间节点我们可以做以下分析: 1) 聚类#0: 将“渗流”与“数值”相结合, 利用数字化的数据来研究有关渗流的一些特性, 有利于解决有关渗流问题的模型建立, 例如安元, 唐雷彬等[16]采用有限元分析方法, 结合某一工程实例建立有限元渗流场计算模型, 对正常蓄水情况下渗流场进行数值模拟, 得到水头分布、浸润线及渗流速情况, 并对其防渗措施进行了分析与建议。2) 聚类#6: 将“渗流稳定”与“水力学”, “施工资料”相结合, 利用水力学在有关渗流方向的突出问题进行一定的分析如闫维衡等[17]在依托毛家沟水库除险加固工程, 运用水力学法和数值计算法, 对土坝进行渗流稳定分析。针对该水库淤积严重的问题, 通过数值模拟, 研究水库淤积物对坝体的影响。

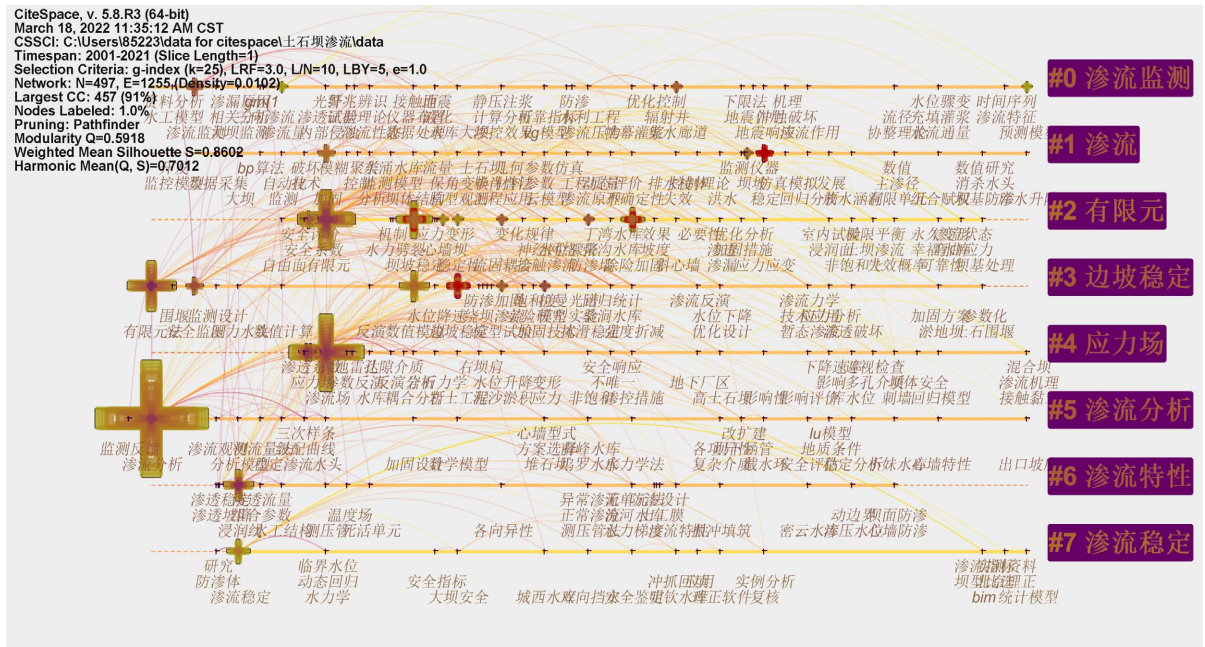


Figure 6. Cluster map of time-line of seepage of earth-rock dam in China from 2001~2021
图 6. 2001~2021 年中国土石坝渗流时间线聚类图谱

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 10 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 可以看出关于关键词“边坡稳定”，“稳定”以及“坝坡稳定”的强度较高。

Table 5. Emergent key word of “seepage of earth-rock dam” in China from 2001 to 2021

表 5. 2001~2021 年中国“土石坝渗流”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	滞后天数	3.22	2001	2007	7 年
2	监测反馈	3.07	2001	2007	7 年
3	渗流计算	3.18	2005	2010	6 年
4	渗流控制	2.81	2010	2013	4 年
5	防渗墙	2.91	2011	2013	3 年
6	边坡稳定	4.46	2012	2016	5 年
7	除险加固	3.13	2012	2015	4 年
8	稳定	4.02	2015	2018	4 年
9	稳定分析	3.03	2017	2019	3 年
10	坝坡稳定	3.65	2018	2021	4 年

强度最高的突现词为“边坡稳定”，起始于2012年，骤减于2016年。土石坝渗流影响边坡稳定，因此土石坝渗流经常伴随边坡的问题，例如高佳东等[18]在研究降雨过程会对土石坝坝坡内部渗流场和边坡稳定性产生影响的问题，在饱和-非饱和土理论的基础上，利用Geo-Studio有限元计算软件，通过体积含水量、孔隙水压力和渗透系数三个特征参数的计算结果来反映渗流场的完整变化规律，并在此基础上分析安全系数的变化规律；结合实际工程，分析不同坝坡坡度、降雨强度、降雨历时、降雨类型以及不同边界条件对土石坝渗流场和边坡稳定性的影响，为实际工程提供参考依据。倪沙沙[19]基于多孔介质饱和-非饱和非稳定渗流理论，以那板心墙土石坝为例，采用有限元法模拟正常蓄水位时不同降雨强度、降雨历时条件下的土石坝暂态渗流场，然后将暂态渗流场与极限平衡法相结合计算坝坡的稳定性，结果表明，降雨强度和降雨历时对土石坝暂态渗流场及坝坡稳定性有明显的影响。以上案例都是基于土石坝渗流问题而开展的有关边坡或坝体稳定的研究。

从时间序列来看，2008年以前的突现词为“滞后天数”，“渗透系数”，“边界元法”，“垂直防渗”等就防渗流的问题研究。2008年以后的突现词为“渗流计算”，“加固”，“防渗墙”，“边坡稳定”，“除险加固”，“渗流稳定”等趋于稳定方向的研究，说明有关土石坝渗流的研究趋于稳定。就目前而言，有关土石坝渗流研究发展前沿的领域是关于“坝坡稳定”的研究，“坝坡稳定”这一突现词于2018年开始出现，至今仍然是有关于土石坝渗流领域的热点方向。

4. 结论与展望

本文基于CNKI数据库，对2001~2021年土石坝渗流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的阐述，具体可得出以下三点结论。

1) 目前国内关于土石坝渗流的研究方向相较于较早年份有较大进展，不仅仅在发文量数量方面出现增长，学科相关研究人员在数量上也出现了增长。除此之外，相较于较早年份的单方面研究，08年以后出现了大量的聚类方向，进一步推动土石坝渗流学科的发展与完善，但目前学科整体发文量较前几年有下滑趋势，说明有关土石坝渗流领域的关注度在最近这几年有所下降。希望有关研究学者能加大对有关土石坝渗流领域的研究。

2) 在土石坝渗流研究领域，河海大学水利水电学院，三峡大学水利与环境学院，武汉大学水利水电学院，吉安市水利水电规划设计院，安徽绩溪抽水蓄能有限公司是研究此领域的核心机构，发文量远高于其他机构，彼此之间联系较多，但在机构发文量中，出现了严重的两级分化现象。望在后续的发展研究过程中，各机构能保持密切交流合作。希望作者之间能加大交流合作力度，携手攻克土石坝渗流的问题。

3) 通过关键词共现图谱，结合词频，中心度，聚类分析，“渗流稳定”、“坝坡稳定”、“浸润线”、“稳定分析”、“稳定性”等为近几年的研究热点；就此观察可以得出目前前沿的关于土石坝渗流的领域是关于“渗流稳定”方向的学习，在学习此学科的过程中，需要重点关注这几大方面，而通过关键词共现矩阵可以得出目前数值模拟是土石坝渗流研究的重要手段，而最近两年该领域的研究热度有所减弱，一方面说明土石坝渗流发生率变小，另一方面说明该领域需要进一步深入研究和探索。

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] 王天亮, 何亚梦, 吴镇, 李君君. 地下水渗流对砾石地层人工冻结过程的影响[J]. 中国铁道科学, 2022, 43(1):

1-8.

- [2] 师文豪, 杨天鸿. 渗流应力耦合作用下顺倾向层状边坡各向异性渗流特征数值模拟[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2021, 51(6): 1783-1788.
- [3] 戴前伟, 孔重阳, 雷轶, 张彬, 韩行进. 基于光滑有限单元法的土石坝无压渗流场数值模拟[J]. 水资源与水工程学报, 2021, 32(5): 194-201.
- [4] 杨敏. 某土石坝渗流稳定有限元分析研究[J]. 陕西水利, 2021(6): 31-33.
- [5] 刘远财, 林芝, 黄孙, 崔朋飞, 任哲, 卢林晶. 降雨条件下土石坝渗流量监控方法研究[J]. 水力发电, 2021, 47(6): 91-94+119.
- [6] 王光霞, 万书云, 马慧清. 土石坝渗流及其控制措施研究[J]. 四川水泥, 2021(1): 323-324.
- [7] 丁树云, 蔡正银. 土石坝渗流研究综述[J]. 人民长江, 2008(2): 33-36+108.
- [8] 梁国钱, 郑敏生, 孙伯永, 徐家海. 土石坝渗流观测资料分析模型及方法[J]. 水利学报, 2003(2): 83-87.
- [9] 吴志伟, 宋汉周. 基于流-热耦合模型的土石坝渗流热监测研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(2): 584-590.
- [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] 刘则渊, 王贤文. 生态经济学研究前沿及其演进的可视化分析[J]. 西南林学院学报, 2008(4): 3-11
- [12] 陈丽萍, 蔡亮, 李光华, 等. 基于 CiteSpace 的储热技术研究进展与趋势[J]. 材料导报, 2019, 33(9): 1505-1511.
- [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. 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.
- [15] 张乾飞, 顾冲时, 吴中如. 基于滞后效应的土石坝渗流监控模型[J]. 水利学报, 2001(2): 85-89.
- [16] 安元, 唐雷彬. 基于数值模拟的土石坝渗流计算及防渗措施分析[J]. 水利规划与设计, 2018(3): 91-93.
- [17] 闫维恒. 水力学法和数值算法在土坝渗流稳定分析中的应用[J]. 水利规划与设计, 2017(4): 61-64.
- [18] 高佳东. 降雨条件下土石坝渗流场和边坡稳定性影响分析[D]: [硕士学位论文]. 郑州: 华北水利水电大学, 2021.
- [19] 倪沙沙. 降雨入渗对土石坝渗流场及坝坡稳定性的影响[J]. 水电能源科学, 2016, 34(2): 49-52+40.