

基于知识图谱的岩土体注浆材料研究热点及发展趋势研究

张方^{1*}, 赵轲¹, 夏银勇¹, 韩延伟¹, 李言昂², 王罗喜², 李鹏^{2#}, 韩培锋², 陈代果²

¹山东省公路桥梁建设集团有限公司第四公司, 四川 成都

²西南科技大学土木工程与建筑学院, 四川 绵阳

收稿日期: 2023年9月14日; 录用日期: 2024年2月19日; 发布日期: 2024年2月28日

摘要

为解决占地与特殊工程的加固, 岩土注浆材料的研究变得尤为重要, 为探索其演化脉络, 可为后续学者提供思路和启发。基于CiteSpace文献分析软件以“岩土注浆”为主题对2001~2022年中国知网的208篇样本文献进行可视化分析。结果表明: 历年来文献发表数量逐年增加且趋势未减; 研究此领域的作者团体较少, 大多数学者发文较少且缺乏横向交流, 但文献质量越来越高; 研究机构数量较少, 机构之间学术合作较少; “注浆”“加固”“注浆工艺”“微裂隙”是当前研究热点, 也是当前最需要解决的问题。最后在文献研读和分析的基础上, 就岩土注浆领域的以后研究做出了预测并提出了几点建议, 以供后续学者参考。

关键词

岩土注浆, CiteSpace, 知识图谱, 发展预测

Research on Hotspots and Development Trends of Grouting Materials for Rock and Soil Mass Based on Knowledge Graph

Fang Zhang^{1*}, Ke Zhao¹, Yinyong Xia¹, Yanwei Han¹, Yan'ang Li², Luoxi Wang², Peng Li^{2#}, Peifeng Han², Daiguo Chen²

¹The Fourth Company of Shandong Highway and Bridge Construction Group Co., LTD., Chengdu Sichuan

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

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 张方, 赵轲, 夏银勇, 韩延伟, 李言昂, 王罗喜, 李鹏, 韩培锋, 陈代果. 基于知识图谱的岩土体注浆材料研究热点及发展趋势研究[J]. 地球科学前沿, 2024, 14(2): 130-142. DOI: 10.12677/ag.2024.142013

Abstract

In order to solve the problem of land occupation and special engineering reinforcement, the study of rock and soil grouting materials has become particularly important, which can provide ideas and inspiration for subsequent scholars in order to explore its evolution. Based on CiteSpace literature analysis software, 208 samples of CNKI from 2001 to 2022 were visualized and analyzed with the theme of "rock and soil grouting". The results showed that the number of published literature increased year by year and the trend did not decrease. There are few author groups in this field, and most scholars have published few papers and lack horizontal communication, but the literature quality is getting higher and higher. The number of research institutions is small and there is less academic collaboration between them; "Grouting", "reinforcement", "grouting technology" and "micro fracture" are the current research hotspots, and also the most important problems to be solved. Finally, on the basis of literature reading and analysis, future research in the field of rock and soil grouting is predicted and some suggestions are put forward for the reference of subsequent scholars.

Keywords

Rock and Soil Grouting, CiteSpace, Knowledge Graph, Development of Prediction

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

随着时代的发展及城镇化步伐的加快，基础设施的建设变得尤为重要，为解决用地面积空间紧张问题，地下空间或其他地质较差区域将会被大规模利用。大量工程实践表明，岩土体的失稳破坏与内部结构的构造有关，例如节理、裂隙的扩展与贯通。且随着时代进一步发展，上部荷载的高应力与特殊岩土体的低承载力矛盾日益突出。将注浆材料采用一定配比制成浆液，通过注浆设备将其注入到岩体的节理、裂隙中，待浆液固化从而达到充填、胶结、加固以及堵水的目的[1]。注浆施工技术是岩土工程中较为常见的一种施工技术，能够对软弱岩土体进行加固，提高其稳定性，在工程中能够保证基础的牢固，有效防范地基渗漏问题，在西南地区还可以通过此技术提高基础的抗震能力。

广东省湛江市海康县某一现浇钢筋混凝土框架结构的宾馆在 2007 年 4 月基本完工，但在 2007 年 5 月，上述建筑在无风无雨的情况下突然全部倒塌；某珠江三角洲地区有一块海滩沼泽地，多年前填土成地在其上方修建工厂，竣工两个月后，发现墙体开裂严重，有明显裂缝。上面两起事故都是由于岩土强度不够引起地基承载力降低，导致上部荷载的不均匀沉降。我国注浆技术最早开始于 1961 年，发展到今天我国以及有了较为成熟的应用成果，已经广泛应用于堤坝、矿山开采、铁路隧道、高层建筑等中。虽然我国注浆技术使用时间早，但大多是借鉴于国外，发展其技术时间较晚，相对于国外而言，国内技术还存在许多需要完善的地方。

为了深入研究，国内学者对注浆技术的研究发展趋势做了一部分探讨，戴选锋[2]对岩土项目中对注浆技术的应用前景进行讨论；曲少臣[3]对几种常见的注浆技术的发展进行分析；胡少银等人[1]对裂隙岩体

领域的研究进行了全面的归纳和总结。这些学者大多都是侧重岩土注浆技术的研究，并未对岩土注浆材料与注浆技术结合进行深入探讨，因此加大对岩土注浆材料的研究是必要的。本文将新的角度，利用 CiteSpace 可视化图谱分析，对我国岩土注浆材料研究方向进行探讨分析，为研究此领域的学者提供参考。

2. 数据来源与分析方法

2.1. 数据来源

本文文献数据来源于清华大学、清华同方发起的检索平台中国学术期刊网络出版总库(CNKI)，检索表达式为“TI = 注浆材料 AND (SU = 土 OR SU = 岩土 OR SU = 岩石)”，文献类型选择为期刊，检索时间为 2022 年 7 月 19 日。本文主要针对岩土注浆材料领域进行研究，则通过知网与人工进行筛选，剔除除期刊以外所有文章，最终在 482 篇文献中筛选出 208 篇数据样本。

2.2. 分析方法

本次分析，使用由美国德雷塞尔大学陈超美教授基于 Java 语言开发的 CiteSpace 可视化分析软件。该软件软件基于共引分析理论(Co-Ciation)和寻径网络算法(Path Finder) [4]等，通过所筛选出来的数据样本导出的 Refork 文件对样本库内文献的关键词、作者、机构等一系列数据进行分析处理并生成可视化图谱。利用 CiteSpace 对岩土注浆材料领域的研究热点、研究前沿、关键文献有较好的探究作用，同时也可以预测研究领域的未来发展走向。软件的具体操作过程为：将筛选的 208 篇数据样本文献以 Refork 格式导出并根据软件可识别的文件进行命名并进行数据转化，将转化后的 TXT 文本复制到 CiteSpace 目录下的 Data 文件夹中，再新建项目并一一对应文件路径，设置时间跨度为“2001~2022 年”，时间切片为一年，分别选择板块为分析对象，分别生成知识图谱，最后根据使用者的具体情况对可视化图谱进行编辑。

2.3. 软件算法

CiteSpace 关键词 LLR 算法主要基于 Ochia 相似系数对文本共现率进行计算[5]。通过 Ochia 相似技术得出相似矩阵，可以更好表示关键词之间相关性的强度，并依据其强度进行关键词聚类。其公式如下：

$$\text{Cos}(A, B) = \frac{|A \cap B|}{\sqrt{|A||B|}} \quad (1)$$

其中 A, B 分别代表关键词出现的频次， $A \cap B$ 代表关键词的共同出现的频次。明显其取值范围为[0, 1]，数值越大表明关键词越相似。

关键词的中介中心性是指在共现网络中具有较大影响力，或是关键词中的关键节点，节点中介中心性的计算公式如下[6]：

$$C_M = \sum_{s \neq v \neq t \in V} \frac{\sigma_{st}(V)}{\sigma_{st}} \quad (2)$$

其中 $\sigma_{st}(V)$ 表示经过节点 v 的 s 到 t 的最短路径条数， σ_{st} 表示节点 s 到节点 t 的所有最短路径条数。

3. 结果与分析

3.1. 文献历年发文量分析

我国最早对于注浆技术的研究是 1961 年，是由长沙矿山研究院发起的，主要为解决矿山生产的实际问题，我国第一篇岩土注浆文献是由波兰格旦斯克工业大学米尔库什克[7]所写，收录于 1986 年《国外采矿技术快报》，旨在为控制地下矿山突发自然灾害，也拉开了岩土注浆研究的序幕。为了更深入分析此

领域在各个阶段的发展动向,利用 CiteSpace 软件对“岩土注浆”的 208 篇样本文献进行分析,历年来文献发表统计如图 1 所示。

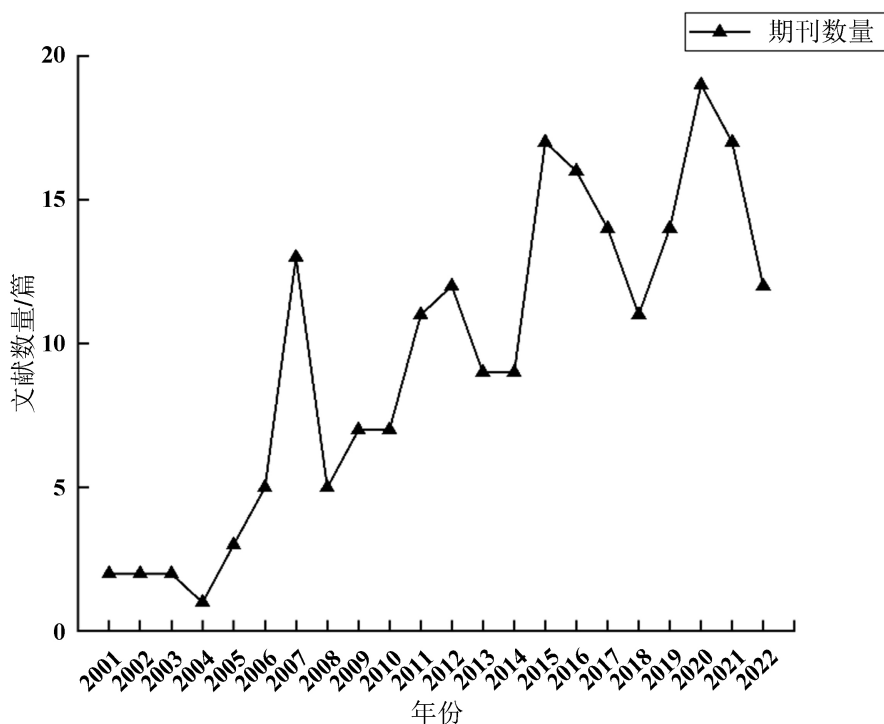


Figure 1. Statistical chart of the number of publications on “geotechnical grouting” in China from 2001 to 2022

图 1. 2001~2022 年中国“岩土注浆”历年发文数量统计图

从上图 1 可知,国内学者对岩土注浆领域的研究从 2001~2022 年文献数量发表整体呈发展趋势,其中 2020 年发文量最多达到 19 篇。从图中可明显看出岩土注浆领域的发展大致可以分为三个阶段:2001~2006 年为发展停滞期,阶段内每年的文献发表数量较少,其平均发文量仅维持在 3 篇左右,说明在此阶段内从事领域相关研究的学者还是研究本身都处于起步阶段,其原因可能是我国处于经济发展的萌芽期,基础建设和开发很少涉及到岩土注浆等技术难题,所以对此领域的研究不重视。2007~2014 年为快速增长期,该领域文献数量稳定增长,从每年平均 3 篇增长到 10 篇,其主要原因为 2008 年发生汶川大地震,在地震的作用下岩质边坡内部裂隙可能开裂扩展,也可能对软化土层降低岩土体强度,加大地质灾害发生的概率,由此诸多学者开始加强对其领域的研究。2015~2022 年为稳定增长期,每年平均发文量为 15 篇左右,在此期间国内为加快经济发展,将建设的重心转移到西南区域,但西南区域地质条件恶劣,若要建设隧道公路需要对岩土体进行特殊处理,因此该学科领域的发展逐渐被重视起来。根据此趋势,今后对此领域研究的学者将会稳步增加且研究重点紧跟国家政策,发文量稳定增加。

3.2. 文献作者分析

发文数量分析。利用 CiteSpace 软件对 208 篇样本文献进行统计分析,相关学者的累计发表文献量如表 1 所示,经统计各学者在 CNKI 中公开发表岩土注浆的相关文献共 399 人,其中发文量在 3 篇或 3 篇以上的有 6 人占作者总数的 1.5%,大部分作者发表相关学术作品在 4 篇以下,其中发表 1 篇文献的作者占据总数量的 94.49%。

Table 1. Statistical table of the number of articles published by the authors**表 1.** 作者发文数量统计表

累计发文数量(篇)	作者数量统计(个)	比例	累计比例
3 篇及以上	6	1.5%	1.5%
2 篇	16	4.01%	5.51%
1 篇	349	94.49%	100%

Table 2. Statistical ranking of articles published by authors of “geotechnical grouting” in China from 2001 to 2022**表 2.** 国内 2001~2022 年 “岩土注浆” 作者发文统计排名

序号	发文数量	作者
1	7	李术才
2	6	刘人太
3	6	张庆松
4	4	刘泉声
5	3	李国富
6	3	姜振泉

**Figure 2.** Map of authors' publications on “geotechnical grouting” in China from 2001 to 2022**图 2.** 国内 2001~2022 年 “岩土注浆” 作者发文图谱

CiteSpace 通过生成作者共现图谱可以反应出作者之间的学术交流程度，每个节点代表一个作者，若

作者发文量相差过大其节点越大，反之节点越小，节点之间的连线代表学者之间的合作联系，即共同发文，线条颜色则代表首次合作的年份颜色越深则代表合作时间越早。判断一个作者研究水平的重要指标或是否有影响力就是看文献发表的数量。根据著名情报学家普赖斯提出的高产量作者计算公式[8] (核心作者的最低发文量 = $0.749 * \sqrt{\text{最高作者发文量}}$)。将软件分析对象设置为 Author (作者)，得到图 2 可视化图谱并输出表 2 作者文献统计排名，结果显示中 Node (节点) 共有 399 个，Link (连线) 465 条，Density (密度) 为 0.0059。可以从图谱中看出，在岩土注浆领域学者之间的合作关系大部分呈整体 - 分散的局面，“整体部分”以刘人太、李术才、张庆松、刘泉声等学者为中心发表了较多的学科文献，根据上述核心作者计算公式可以得到发文超过 2 篇才能被称为核心作者，而这“整体部分”的学者大多数发文量在两篇以上；那么可以得出其他学者众多但发文量较少，相关研究还未形成体系，呈现分散的局面，且团队之间各自为政没有出现跨团队的合作方式。通过共现图谱中的连线颜色可以发现早期合作的学者较少，且团体人数较少，最早大型团队是以李术才学者为核心并以每年一篇文献稳定产出直到 2020 年，且发表文献质量较高都在核心以上。2020 年开始，以刘全声为核心的团队开始专研此领域，每年平均发表两篇核心文献，综合图表可以观察到，相关学者及其团队发表的文献质量在逐年提高，由此可以推测，岩土注浆领域内的合作关系网络在未来将趋于紧密，相互之间合作会更加频繁，学科发展走向成熟。

3.3. 科研机构合作分析

基于 208 篇样本文献利用 CiteSpace 进行可视化分析，节点类型为“Node Types = Institution”，时区选择为 2001~2022 年，时间切片定为 1 年，阈值选择为 50，即每一年的文章排名前五十的机构。将阈值设置为 50，筛选出发文较多得机构得到岩土注浆机构图谱如图 3 所示，并整理排名得出表 3。

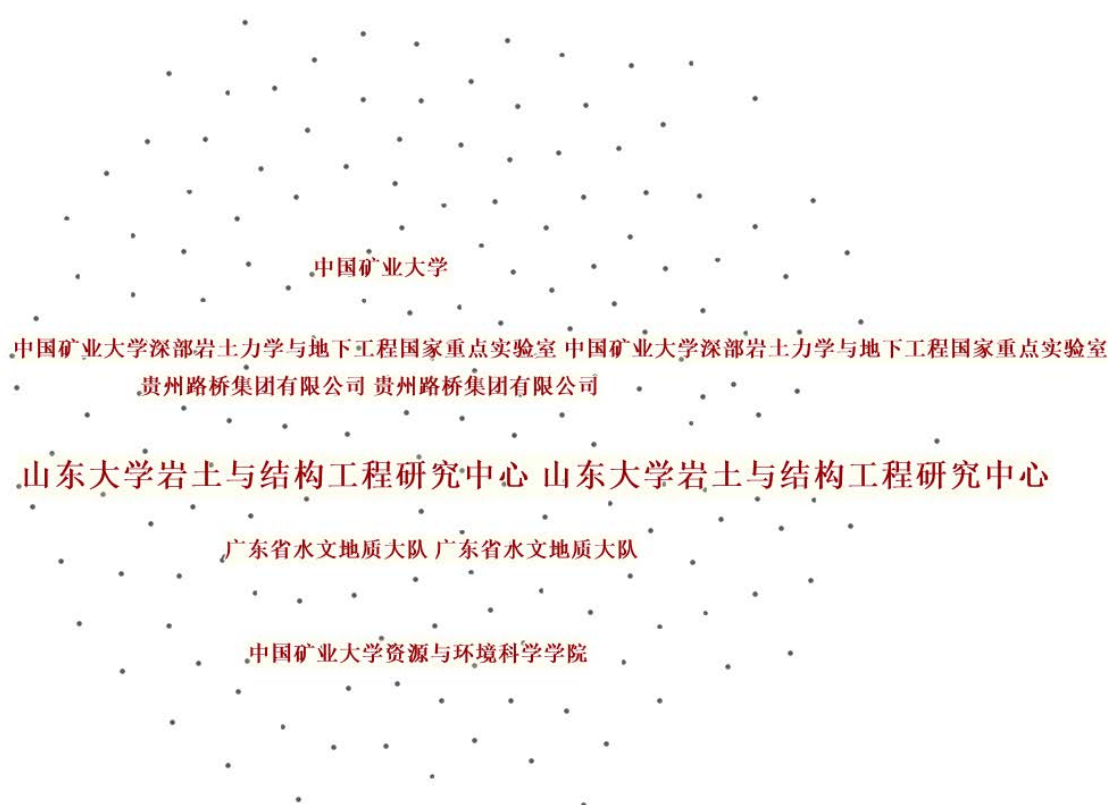


Figure 3. Atlas of China's geotechnical grouting issuing agencies from 2001 to 2022

图 3. 2001~2022 年中国岩土注浆发文机构图谱

Table 3. Ranking of China's geotechnical grouting publications from 2001 to 2022
表 3. 2001~2022 年中国岩土注浆发文机构排名

序号	频次	科研机构
1	4	山东大学岩土与结构工程研究中心
2	2	中国矿业大学深部岩土力学与地下工程国家重点实验室
3	2	中国矿业大学
4	2	贵州路桥集团有限公司
5	2	中国矿业大学资源与环境科学学院
6	2	广东省水文地质大队

由机构图谱可知,其中 Node (节点) 206 个,节点大小反映本领域内该机构发文数量,节点越大则机构发文数量越多。Link (连线) 0 条, Density (紧密度) 0, 其中不同机构之间的合作发文由连线代表,连线颜色说明了机构之间的首次合作发文时间,连接的数量多也直观反映机构的协作关系的紧密度和广度,二者之间为正相关关系。从发文数量上看山东大学岩土与结构工程研究中心发文数量最多,但也仅有 4 篇文献发表,中国矿业大学发文机构较多但每个机构发文数量较少。发文越多代表对此领域研究较深入,在研究领域有着核心地位,对研究发展起着带头作用,但目前每个机构发文量都较少,且没有出现机构之间的合作关系,代表各个机构都未对岩土注浆材料进行深入研究,没有形成体系。从上图表还可以看出,诸多机构发文数量仅仅只有一篇,且大多数机构都为企业,研究此领域的高校寥寥无几,说明大多数机构都只是个别学者在开展相关研究工作,此领域的研究还有待提升。在未来的发展中,各个机构还应该加强团队之间的交流合作。

3.4. 关键词分析

3.4.1. 关键词图谱共现

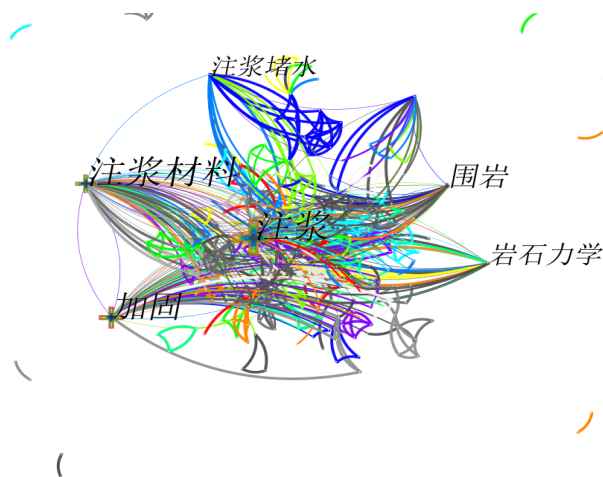


Figure 4. Co-occurrence map of "rock and soil grouting" keywords
图 4. “岩土注浆”关键词共现图谱

CiteSpace 共现词分析法利用文献中名词词汇和短语集中共同出现的情况,来确定该所搜集的文献集内部各主题之间的关系。而在 citespace 中则表示了这种关系,以关键词为节点,线表示与关键字间的共现关联。关键词出现次数大小由节点大小反映出来。在主界面选择“Keyword”选项,即对文献库关键

词进行分析,为精简图谱及简化路径使图谱有唯一解,在主界面下方勾选“Pathfinder”与“Purning Sliced Network”选项,同时图谱内的相似词或得到组合,之后获得岩土注浆研究关键词图谱,即所示图4其中N(节点)数量362个,L(连线)数量为765条,Density(密度)为0.0117。图中冷暖色变化代表了时间,由冷至暖即由远及近,带颜色外环的关键词节点代表高中性度节点即关键字的中重要性,其取值范围0到-1,由关键字中心度导出得到的图4。

Table 4. Word frequency and centrality of “rock and soil grouting” keywords in China from 2001 to 2022
表 4. 2001~2022 年国内“岩土注浆”关键词词频和中心度

序号	关键词	频次	中心度
1	注浆	57	0.64
2	注浆材料	38	0.57
3	加固	35	0.37
4	围岩	17	0.17
5	岩土工程	12	0.04
6	隧道	10	0.08
7	岩石力学	10	0.11

中心度一列,可以将不同关键词之间的共现频次展现出来。结合时区图谱(见图5)及表4不难看出,“注浆”“注浆材料”“加固”这些关键词词频和中心度较高。通过文献阅读可知,随着时代发展,越来越多工程需要岩土注浆这一方面的知识基础,导致研究领域扩展到了这方面,从整体上看都围绕着岩石岩土加固等具体工程这方面,且这些词频低,也说明现阶段研究处于初级阶段,相关研究还较少没有形成体系,未衍生出新的中心关键词,特别注意的是,“隧道”与“岩石力学”频次一样但中心度有所差距,这是因为根据上文“岩石力学”此关键词与其他关键词共现频次较多且连线较短导致中心度较大。

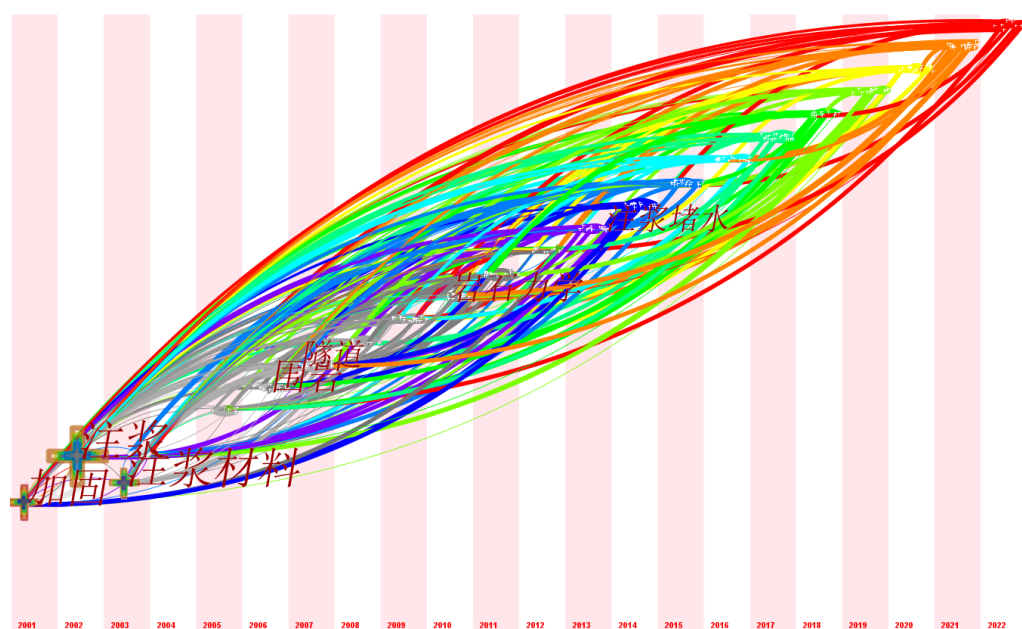


Figure 5. Map of time zone for hotspot research of “rock and soil grouting”
图 5. “岩土注浆”热点研究时区图谱

岩土注浆研究热点的演化趋势如图 6 所示, 研究者最开始为解决巷道支护问题, 提出应用壁后充填注浆和深部锚共同作用进行加固[9], 这一文献的面世揭开了岩土注浆研究的序幕, 第二年陈耕野[10]学者总结了岩土加固技术的发展历程, 首次提出了岩土注浆材料和化学联合发展的前景, 介绍了各种加固技术的发展和运用。2003 年岩土注浆材料还停留在理论阶段, 左如松[11]为解决兴隆庄煤矿井筒裂隙渗透, 基于现场进行试验发现化学浆液具有较好的渗透性, 能够有效封闭微小缝隙。接着在 2006 年岩土注浆领域应用在围岩方面, 2007 年延伸到隧道实际应用, 以及后来的岩石力学和岩土工程, 2013 年由于地质灾害频发, 富水地区的弱围岩地区地质灾害突发性较高, 学者们将目光转移到利用注浆材料进行堵水方面的研究, 直到今天大多学者的研究都围绕着这些关键词, 且大多数都为解决工程实际, 并未对这一领域的研究进行加深, 由此可以推测此领域研究还有待加深不能只局部于现实工程的实际应用。

基于对关键词的背后热点进行的分析, 选择 Burst detection, 即进行突显分析, 可以检测出某个时间段内突然大量出现的关键词, 借此来反映领域内各个时期的热门研究方向及热点, 同时观察领域未来发展方向。选取 2001~2022 年的文献进行突显关键词分析, 将最小突显年份设置为 2, 共获得 1 各突显关键词如图 6。



Figure 6. Keyword saliency map

图 6. 关键词突显图谱

可以看出“注浆”关键词在 2015~2016 年热度最高, 说明此领域每年研究人数较少, 发文量较少, 且从文献可看出这两年文献较多都为企业科研发表文献, 猜测诸多高校未有试验条件进行研究, 研究者数量和机构还有待增加。

3.4.2. 关键词聚类 LLR 算法分析

聚类分析是一种定量与定性相结合的分析方法, 该术语最早在 1939 年被首次引用, 聚类简单来说用不同算法将海量的文献信息变成易于处理的、有意义的“山”, 用合适的算法, 将学科结构研究前沿和发展趋势用可视化的手段呈现出来。其中为清晰快速找到热点提供了巨大便利的是 CiteSpace 软件的关键词聚类功能, 分析过程中, 借助于 LLR (Log-Likelihood Rational) 聚类算法的使用, 挖掘出特征词, 也是对共现词图谱深入研究的必要手段。聚类后的编号显示为 Cluster ID, 聚类规模与编号数值发小呈反比[12]。

使用软件, 利用软件的 LLR 类型聚类功能对所得的关键词共现图谱进行聚类分析操作, 所获得的关键词聚类图谱, 即图 7, 图谱中 Modularity Q (模块值) = 0.6931 > 0.3, 意味着获得了清晰的聚类结果, Mean (平均轮廓值) S = 0.8931 > 0.5, 代表此次聚类具有较高可信度[4]。从图中不难发现, 图中的 10 大类模块即为 2001~2022 年岩土注浆领域所主要开展进行的内容及方向。其前十聚类排名顺序依次为注浆、加固、注浆材料、注浆工艺、微裂隙、抗压强度、围岩、岩土工程、膨润土、隧道。聚类数字最小的数字为#0 注浆, 意味着在土注浆领域的大量学者的研究, 频繁与土壤注浆方面的基本问题有关, 它也是研究范畴的核心问题。在已有的关键词聚类分析法图谱的基础上, 使用 Timeline View 功能, 可以获得关键字聚类分析法的时线图如#8, 将同一聚类分析法的节点按年的时间先后, 按顺序排列在同一时线上。我们可以从关键词注浆材料辐射至每大类并贯穿研究中。#2 主要是对注浆材料的性质进行分析主要强调的是理论阶段, 而#3 聚类是对#2 领域的进一步深化研究, #1、#5 是研究此领域的根本目的, 也是检验前两类的领域研究的关键与否, #4、#5、#6、#7、#8、#9 是此领域的具体实践。

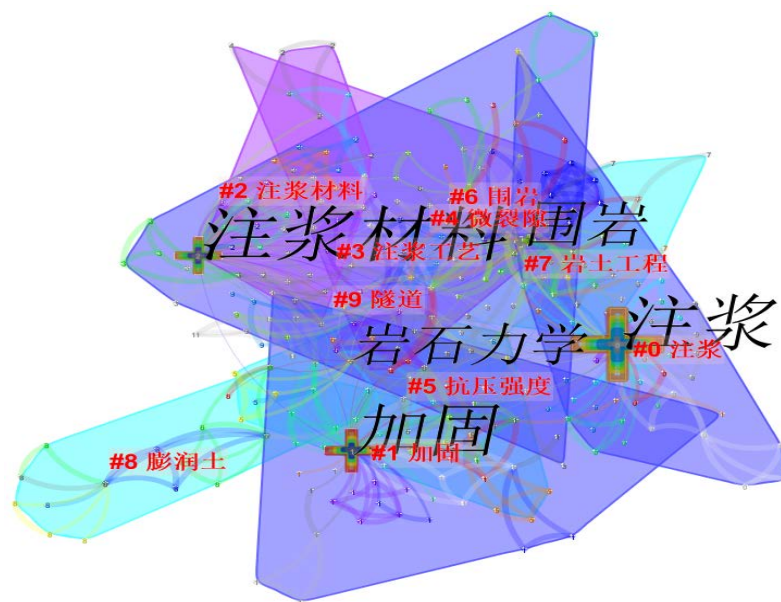


Figure 7. Keyword clustering map
图 7. 关键词聚类图谱

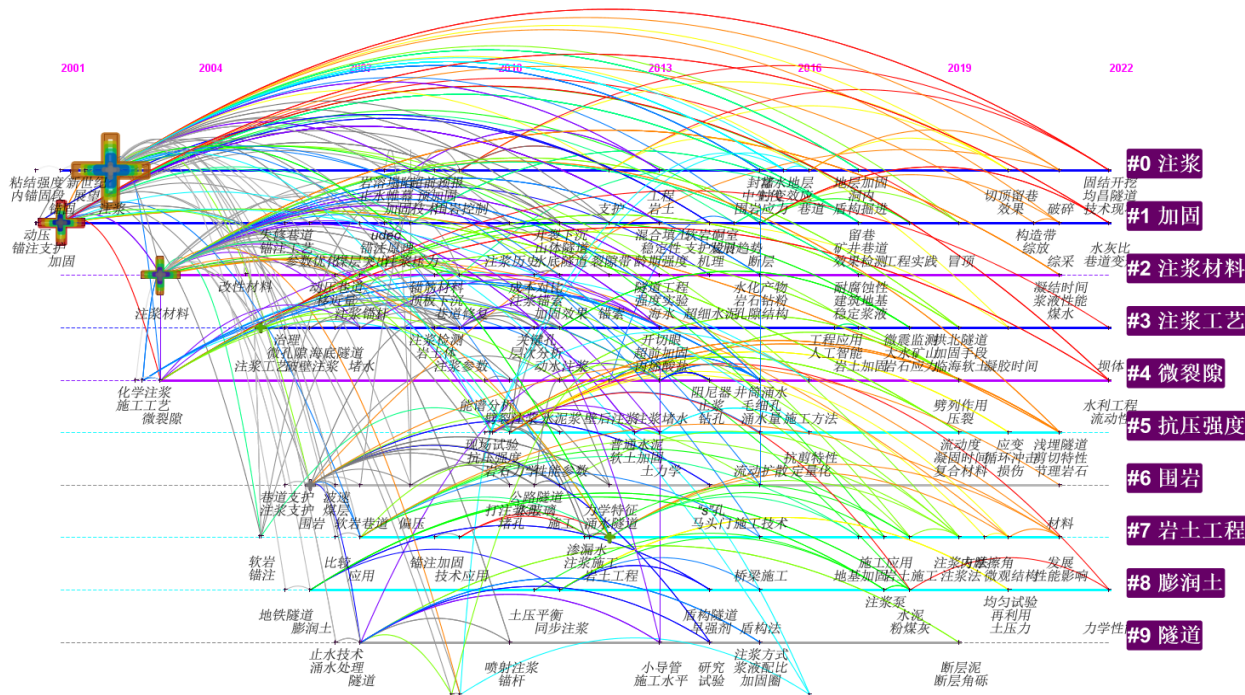


Figure 8. Keyword time line clustering map
图 8. 关键词时间线聚类图谱

从时间线图(见图 8)可以看出，#2 及#3 聚类及其内容在岩土注浆领域内研究时间长，热点多。#2 结合#9 聚类在时间线图谱中可以看出，注浆材料 2003 年开始，其内部与注浆材料本身有关的关键词如改性材料，超细水泥，岩石钻粉等几乎分布于整个时间段。原有的两大类注浆材料分别为粒状浆材与化学浆材。前者主要为水泥浆，但受限于水泥粒径，一般只能注入到直径或宽度大于 0.2 mm 的孔径或裂隙

中,使用上受到一定限制。后者一般为水玻璃或环氧树脂,但多数化学浆液都具有毒性且价格较贵且结实体强度比水泥结实体强度低[13]。因此,领域内及相关学科研究人员对新型注浆材料进行不断改进及研发,在原有两大类材料基础上研制出注浆性能优良且无毒害的新型注浆材料。#4 结合#3 可以看出,近些年岩土注浆领域热点也包括注浆施工的新工艺及施工方法研究、施工完成后的注浆岩土监测,说明随着国家近些年开展的大型建设工程,例如隧道工程或城市地铁建设,岩土注浆更多在新型施工方法及工艺研究,以满足复杂地质条件或特殊环境条件下的施工需要,同时利用信息化技术进行施工前中后期的全面检测以确定施工效果。

3.4.3. 核心关键词分析

CiteSpace 中常见有 LSI、LLR、MI 三种算法,本文选用 LLR 算法对关键词进行聚类分析并导出聚类分析表如表 5,轮廓值列中,数值越大的词越能代表此聚类的核心特点。结合表中数据可分析出前四个类别获得了最高热度,分别是“注浆”“加固”“注浆材料”“注浆工艺”。

Table 5. Details of cluster analysis of “rock and soil grouting”

表 5. “岩土注浆”聚类分析详表

聚类号	轮廓值	平均年份	Top Term (重要关键词)
#0 注浆	0.904	2013	注浆(19.25); 帷幕注浆(12.53)
#1 加固	0.84	2012	注浆加固(12.6); 断层(8.19)
#2 注浆材料	0.967	2012	注浆材料(15.7); 加固效果(7.84)
#3 注浆工艺	0.716	2009	围岩(27.61); 锚注(13.56)
#4 微裂隙	0.844	2012	注浆工艺(10.61); 注浆参数(10.61)
#5 抗压强度	0.946	2012	微裂隙(15.1); 注浆堵水(15.1)

从上可看出所有聚类都离不开注浆此中心关键词,从 2001 年开始为解决矿井的支护问题,以中国矿业大学[9]为首的科研团队就提出利用充填注浆和深部锚注联合支护进行加固,随后河海大学[14]相关学者指出工程上的注浆材料主要为纯水泥浆和水泥砂浆,且水泥砂浆对岩体的粘结强度较高;2005 年姜振泉[15]发现在工作面水泥预注浆封水效果不理想的情况下选择改性脲醛树脂 II 型化学浆并尝试采取了新工艺封水率达到 98%。徐华[16]对岩土注浆技术和材料的关键问题结合工程实例进行分析归纳了此研究领域的不足提出若干意见;刘人太[17]等人通过实验研究出一种新型注浆材料(VCH),并通过现场动水注浆治理的材料与工艺要求,验证了材料的可泵性与操作性;随着数值模拟软件的兴起,张志强[18]学者利用 FLAC3D 数值模拟手段,基于流固耦合的力学模型研究注浆加固圈厚度及对围岩稳定性、渗流规律的影响。由于现场情况的多样性,岩土注浆材料不能一味固定不变,越来越多学者在现有成果的基础上,针对不同工况改进岩土注浆材料,例如冯啸[19]改进了酸性水玻璃-碳酸氢钙注浆材料体系来适用于碱土稳定性问题;谌文武等人[20]根据土遗址原生土与生石灰拌合成为 SH-(C + F + CaO)浆体来适用于西北地区特有的碱性环境。直到 2020 年陆根龙等人[21]针对普通水泥浆-岩黏结界面结构缺陷,探究基于超细水泥与纳米 SiO₂ 等新型注浆材料的浆-岩黏结界面结构改性与优化机制,表面了从改善注浆岩土材料过渡到岩土注浆材料的微观试验。通过文献可以看出岩土注浆领域的研究一直在不断推进,注浆材料与注浆工艺相关的研究同时促进发展,但也可以看出研究方向比较单一,没有发展出分支学科,随着时代的发展,如何在保证解决实际问题的同时减小对环境的影响将会是未来研究热点[22]。

4. 发展趋势

从上文的不同板块的聚类图谱分析可以看出, 岩土注浆材料由原来普通的纯水泥注浆和水泥砂浆注浆发展到现在各种化学注浆以及各种注浆后微观试验和数值模拟, 虽然一直在发展, 但其一直处于初级阶段, 但可以预料到随着科学技术的发展以及地下空间的飞速发展, 此领域的研究将会更加深入主要集中在以下几方面: 1) 不单单局限于岩土注浆材料的适用性, 更应该注重不同材料浆液扩散运移的理论研究, 浆液在裂隙网络中的流动规律和注浆速度都是影响工程的重要因素, 因此多相流作用下的应力-渗流耦合动态响应与反馈将会被重点注意。2) 建立岩土注浆材料的联合作用理论, 早期施工所采用的技术就运用了注浆与其他技术联合运用达到加固的目的, 近年随着环保政策的实施, 此方向也应成为重点。3) 建立岩土注浆材料的理论体系, 现阶段主要难题为深部岩层问题, 深部岩层经历了长期的地质运动, 地质条件差、破碎岩体较多, 这些因素都使得深部岩层表现出不同于浅部岩层的各种特性, 建立适用于深部岩层的理论体系是非常必要的。

5. 结论与展望

本文通过运用 citepace 软件, 对 2001~2022 年知网收藏的 208 篇岩土注浆资料论文进行了数据分析研究, 并对历年论文的发表总量、论文作者、发文单位、关键字等进行了可视化图谱研究, 得到了如下结果: 1) 文章历年发文量总体上呈上升增长趋势。在快速增长期(2007~2014), 发文量从每年平均 3 篇增长到每年平均 10 篇。稳定增长期(2015~2022)内, 每年发文数量存在波动, 但仍保持了发文量每年平均 15 篇, 预测领域内发文数量会伴随国家政策发展继续处于增长态势。2) 核心作者群已基本形成, 同时涌现出众多研究团体。早期代表为李树才为核心作者的研究团队, 其团队每年稳定发出相关论文一篇, 并发表在核心期刊。2020 开始, 刘为核心的研究团队每年发出的核心期刊论文数为两篇并保持至今。可以看出论文质量逐步提高, 学术水平上趋于成熟。3) 该研究没有受到重视, 研究机构较少, 由于此原因导致核心作者群并未有跨团队机构合作现象, 各个机构的合作关系应该加强。4) 领域内部研究依旧以“注浆”为核心深入研究, 近年研究热点主要集中于新型注浆材料的开发, 及结合具体施工条件进行的新施工工艺与施工方法的研究, 同时伴随着利用信息化新技术对施工前后进行监测观察, 进行评估。但领域内尚未发展出以其他学科为核心的方向, 带动其他学科发展, 岩土注浆材料的改善与岩土注浆工艺还将是此领域的研究热点。

基于文献的分析, 就岩土注浆材料此领域的发展提出以下建议: 由政府牵头作为纽带, 协调组织科研机构、企业、高校等各方, 联合建立岩土注浆材料的研究平台以推动深入研究与创新研究, 各方相互合作, 加强相互交流与推动成果深入转化, 让岩土注浆材料研究平台助力领域快速稳定发展[8]; 开拓研究视野, 不能局限于研究岩土注浆材料这一领域的研究, 要加大跨领域的合作力度, 例如可以向生物、化学等领域发展; 建立数值模拟技术研究平台, 数值模拟具有速率高、误差小、精细化等特点, 能在短时间内处理大量数据, 实现全过程模拟, 为岩土注浆材料的各种特性进行分析。

本文主要是根据国内外专家学者的研究结果加以可视化分析, 所以存在着一定的局限, 此外由于 CiteSpace 软件的参数设置也有相对的调性[5], 且版本更新速度也比较快, 因此不排除某些没有统计而具有重要研究价值的内容的可能性。

资助项目

山东省公路桥梁建设集团有限公司国道 212 线苍溪回水至阆中双龙段公路 2021 年科技项目经费资助。

参考文献

- [1] 胡少银, 刘泉声, 李世辉, 等. 裂隙岩体注浆理论研究进展及展望[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(1): 112-126.
- [2] 戴选锋. 注浆施工技术在岩土工程项目中的应用[J]. 工程建设与设计, 2022(1): 132-134.
- [3] 曲少臣. 岩土注浆技术的应用发展趋势研究[J]. 粘接, 2021, 45(3): 112-116.
- [4] 陈悦, 陈超美, 刘则渊, 等. CiteSpace 知识图谱的方法论功能[J]. 科学学研究, 2015, 33(2): 242-253.
- [5] 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.
- [6] 陈雅茜, 邢雪枫, 程大雷, 等. 基于 CiteSpace 和中介中心性算法的全国农业信息化知识图谱构建[J]. 西南民族大学学报(自然科学版), 2022, 48(1): 75-81.
- [7] W. 米尔库什克, 肖焕杰. 松散岩层的注浆加固[J]. 国外采矿技术快报, 1986(16): 20-22.
- [8] 伍国勇, 李浩鑫, 杨丽莎, 等. 基于 CiteSpace 的中国流域生态补偿研究知识图谱分析[J]. 生态经济, 2021, 37(10): 164-172+184.
- [9] 韩立军, 付厚利, 林登阁. 动压下集中交岔点加固技术研究[J]. 矿山压力与顶板管理, 2001(3): 34-36.
- [10] 陈耕野, 杜嘉鸿, 陈兰云. 新世纪岩土加固技术的展望[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2002(S1): 1-6.
- [11] 左如松, 朱岩华, 姜振泉. 化学注浆在兴隆庄煤矿西风井深井井筒微裂隙防渗中的应用[J]. 华东地质学院学报, 2003(4): 371-375.
- [12] Smith, A.N., Fischer, E. and Chen, Y. (2012) How Does Brand-Related User-Generated Content Differ across YouTube, Facebook, and Twitter? *Journal of Interactive Marketing*, **26**, 102-113.
<https://doi.org/10.1016/j.intmar.2012.01.002>
- [13] 田利民. 浅析注浆技术在岩土工程中的应用[J]. 山西建筑, 2010, 36(34): 96-97.
<https://doi.org/10.3969/j.issn.1009-6825.2010.34.058>
- [14] 张发明, 陈祖煜, 刘宁. 岩体与锚固体间粘结强度的确定[J]. 岩土力学, 2001(4): 470-473.
- [15] 姜振泉, 吴圣林, 李冬林, 等. 赵庄矿斜井微裂隙围岩防渗化学预注浆治理[J]. 煤炭科学技术, 2005(4): 11-13+17.
- [16] 徐华, 李天斌. 岩土体注浆技术初探及展望[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2009, 36(1): 38-42.
- [17] 刘人太, 李术才, 张庆松, 等. 一种新型动水注浆材料的试验与应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(7): 1454-1459.
- [18] 张志强, 李化云, 何川. 基于流固耦合的水底隧道全断面注浆力学分析[J]. 铁道学报, 2011, 33(2): 86-90.
- [19] 冯啸, 张乐文, 刘人太, 等. 碱土加固注浆材料试验及其工程应用[J]. 山东大学学报(工学版), 2013, 43(6): 65-71.
- [20] 谌文武, 刘建, 龚书亚, 等. 土遗址裂隙注浆用 SH-(C+F+CaO)浆液耐久性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(S2): 4310-4317.
- [21] 陆银龙, 贺梦奇, 李文帅, 等. 岩石结构面注浆加固微观力学机制与浆-岩黏结界面的结构优化[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(9): 1808-1818.
- [22] 康永水, 耿志, 刘泉声, 等. 我国软岩大变形灾害控制技术与方法研究进展[J]. 岩土力学, 2022(8): 1-25.