

基于文献计量学的土壤固化剂 研究进展与热点分析

庞 帅^{1,2}, 刘宇芊^{1,2}, 樊恒辉^{1,2}, 张星宇^{1,2}, 霍江茹^{1,2}, 杨 成³, 朱开新⁴, 李佳泽³

(1. 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100;

2. 西北农林科技大学 岩土工程研究所/特殊岩土博物馆, 陕西 杨凌 712100;

3. 辽宁工程技术大学 土木工程学院, 辽宁 阜新 123000; 4. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045)

摘 要: 为了探索近40年来“土壤固化剂”研究领域的发展状况、热门观点及研究进展, 基于文献计量学, 检索和筛选中国知网数据库(CNKI)中从1983—2023年收录的关于“土壤固化剂”研究的文献数据, 协同VOS viewer可视化软件对文献数据进行统计分析。分析结果表明: 经过筛选共分析文献766篇, 40年来论文产出演化进程分为萌芽阶段、发展阶段、深化阶段; 主要研究机构为西北农林科技大学、长安大学等, 其中水利部水土保持生态工程技术研究中心的高建恩团队、中国地质大学的项伟团队、西北农林科技大学的樊恒辉团队发文量较高; 发文量较多的期刊分别为北方交通、交通世界, 而被引量较高的期刊为岩土力学; 国内该领域以土壤固化剂的研究为主, 衡量指标以无侧限抗压强度为主, 以“土壤固化剂”、“固化剂”、“无侧限抗压强度”为代表的关键词分别出现346次、126次、90次; 土壤固化剂领域内出现频次 ≥ 5 的热点关键词组有效聚类分为4个聚类群, 聚类标签分别为土壤固化剂、固化剂、无侧限抗压强度、固化机理; 主题演化分析显示, 生态友好、高效可行的土壤加固技术为当下最活跃的研究领域, 深入土木工程、土壤科学、土壤物理学以及材料科学等领域交叉融合是未来土壤固化剂研究发展的方向。未来在土壤机理深入研究及绿色环保固化技术、高效固化剂开发、一体化固化技术等方面将成为研究热点, 致力于不断寻找绿色高效的固化剂, 达到提高固化土壤的效果和速度。

关键词: 土壤固化剂; 文献计量学; 可视化探析; 研究进展

中图分类号: S156.2

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2024)02-0132-10

Research Progress and Hot Spot Analysis of Soil Stabilizer Based on Bibliometrics

PANG Shuai^{1,2}, LIU Yuqian^{1,2}, FAN Henghui^{1,2}, ZHANG Xingyu^{1,2}, HUO Jiangru^{1,2},
YANG Cheng³, ZHU Kaixin⁴, LI Jiaze³

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. Institute of Geotechnical Engineering/ Special Geotechnical Museum, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

3. School of Civil Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning 123000, China;

4. College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: To explore the development status, popular viewpoints and research situation of the research field of "soil stabilizer" in the past 40 years. Based on bibliometrics, the literature data on the study of "soil stabilizer" collected from 1983 to 2023 in China National Knowledge Infrastructure (CNKI) were retrieved and screened, and the literature data were statistically analyzed with VOS viewer visualization software. A total of 766 articles were analyzed after screening. In the past 40 years, the evolution process of paper output was divided into embryonic stage, development stage and deepening stage. The main research institutions are Northwest A&F University, Chang'an University, etc.

收稿日期: 2023-10-25

修稿日期: 2024-01-06

基金项目: 陕西省水利科技计划项目(2023slkj-6)

作者简介: 庞 帅(1996—), 男, 博士研究生, 研究方向为特殊性土的固化技术研究。E-mail: ps20907@163.com

通讯作者: 樊恒辉(1973—), 男, 研究员, 主要从事特殊性土的工程性质及改良技术研究工作。E-mail: yt07@nwsuaf.edu.cn

Among them, the Gao Jian'en team of the Soil and Water Conservation Ecological Engineering Technology Research Center of the Ministry of Water Resources, the Xiang Wei team of China University of Geosciences, and the Fan Henghui team of Northwest A&F University have published a large number of papers. The journals with the largest number of papers are Northern Transportation and Transportation World, while the journals with the largest number of citations are geotechnical mechanics. Domestic research in this field is mainly based on soil curing agent, and the measurement index is mainly based on unconfined compressive strength. The keywords represented by "soil curing agent", "curing agent" and "unconfined compressive strength" appear 346 times, 126 times and 90 times respectively; the effective clustering of hot key phrases with frequency ≥ 5 in the field of soil curing agent is divided into four clustering groups, and the clustering labels are soil curing agent, curing agent, unconfined compressive strength and curing mechanism. The theme evolution analysis shows that eco-friendly, efficient and feasible soil reinforcement technology is the most active research field at present. In-depth integration of civil engineering, soil science, soil physics and material science are the direction of future research and development of soil curing agent. In the future, the research on soil mechanism, green curing technology, high efficient curing agent development and integrated curing technology will become the hot spot, to improve the effect and speed of soil solidification.

Keywords: soil stabilizer; bibliometrics; visualization analysis; research progress

随着全球经济的快速发展,人类对土地资源的大量开发和利用导致了土地资源的短缺和土地的环境质量下降^[1-2],并且在全球工业化和人类活动的快速发展活动中,土壤固化问题不仅对土地资源的可持续利用构成了威胁,还对人类健康和生态环境造成了严重影响^[3-4]。土壤固化剂作为重要的土地修复技术^[5],在当今环境保护和可持续发展的背景下越来越受到关注。土壤固化剂通过改变土壤结构^[6-8]和化学性质^[9-10],修复受到污染或破坏的土壤^[11-14],从而恢复土壤的功能和生态系统^[15-17]。

土壤固化作为世界土地资源管理与可持续发展面临的重要挑战之一,对于农业生产、生态环境和可持续发展具有重要影响^[18-20]。作为一种新型建筑材料,土壤固化剂可将自然土壤进行固化改性之后,用作各类地基、路基以及工程填筑用料,就地取材,减少砂石用量和运输成本,避免环境污染^[21-25]。按照其作用机理可将土壤固化剂分为无机类、有机类、离子类和生物酶类四大类。无机类土壤固化剂发展较早,工程应用广泛,樊恒辉等^[7]通过扫描电镜与能谱测试手段对水泥基土壤固化剂固化土的微观结构和固化剂水化产物进行了研究,结果表明水泥基土壤固化剂的水化产物包括水化硅酸钙凝胶、氢氧化钙、碳酸钙和三硫型水化硫铝酸钙(Aft)等物质,其中水化硅酸钙凝胶和Aft是构成固化土强度的主体。有机类土壤固化剂通常由天然有机物质制成,不仅可以改善土壤的物理性质,还可以增加土壤的黏结力和抗侵蚀能力,有效减少土壤沉降。王银梅等^[26]使用自主合成的新型生态环境型高分子材料SH对兰州某地区的黄土进行加固,结果显示抗压强

度在一定范围内随着SH用量的增大而增强,试样长期浸水后不崩解,可抗冻融循环25次,从整体效果看,SH固化后黄土的性能优于水泥固化的黄土。离子类土壤固化剂通过离子吸附与交换,从根本上改变土体的性质,是一种新型、较为理想的建筑材料,郭柏林等^[27]利用ISS离子土壤固化剂加固土作为道路基层,开展了ISS加固含砂高液限粉土的室内和现场试验研究。结果表明离子土壤固化剂加固土的强度和水稳性相比素土有较明显的提高,收缩性显著降低,土的工程性能得到明显改善。生物酶类土壤固化剂是由有机质发酵而成的多酶基产品,其对土壤的固化主要是物理催化作用,孙振平等^[28]通过所设计的试验,对派酶土壤固化剂改善土壤密实性和强度的效果及其最佳掺量进行了研究,研究表明派酶能增强骨料与土之间结合界面的紧密程度。土壤固化技术已经逐渐发展成为一个综合性学科,它涉及到土壤化学、胶体化学、结构力学等多个学科的知识。在建筑地基处理、公路路基加固以及水利行业的渠道衬砌防渗等领域,土壤固化剂被广泛应用。这一技术的发展使得我们能够更好地处理土壤问题,保障工程的稳定性和环境的可持续性。

本文基于文献计量学,系统梳理土壤固化剂研究领域的发展动态,重点分析土壤固化剂的主要研究机构、主题及主题演变,为土壤固化剂研究者提供参考和指导,促进土壤固化剂领域的发展和应用。通过总结土壤固化剂研究的前沿进展和趋势,有助于相关领域研究者深入了解土壤固化剂领域的现状和未来发展方向。

1 数据来源与研究方法

1.1 数据来源

为了保证数据真实性与全面性,研究文献以中国知网(CNKI)学术期刊数据库为文献来源,中国知网(CNKI)学术期刊数据库是一个重要的学术文献资源平台,提供了大量的中文学术期刊文章和论文,CNKI 学术期刊数据库是中国学术界广泛使用的权威文献检索工具,对于研究者、学生以及从事学术研究的人员非常有价值。本次文献检索过程中以“土壤固化剂”为主题,检索时间跨度选定为 1983 年 5 月—2023 年 9 月。检索范围为公开发表的期刊论文、学位论文,获得有效高质量文献 766 篇。

1.2 研究方法

利用文献计量学方法对文献进行量化分析。文献计量学(bibliometrics)是一门研究文献及其信息的数量和质量特征的学科,并运用数学和统计方法对文献进行定量分析。本文使用 CNKI 学术期刊数据库平台中自带的分析功能和 Excel 软件对年度发文量、研究机构、学者的贡献度和影响力进行分析。借助 VOS viewer(版本 1.6.11)软件对有效数据进行可视化分析。VOS 是一种视觉化和分析科学合作网络和文献计量学数据的软件工具。它可以帮助使用者了解和分析研究领域中的互动和合作,显示公共主题,识别重要作者和机构等。使用过程中共分为五步,分别为获取数据、导入数据、数据筛选、可

视化分析与结果解释。第一步获取数据时,使用者从学术数据库(例如 CNKI 等)下载所需要的文献的源数据文件(citation data file),一般文献源数据至少应包括以下字段:标题,作者名称,作者单位,期刊名称,出版年份,关键词,引文次数等;第二步导入数据时,打开 VOS 软件,在导航栏选择 File>Create>Create a map based on bibliographic data,选择已下载的源数据文件导入;第三步数据筛选时,使用者可以使用 VOS 中的筛选功能,按照关键词、作者等条件进行筛选,以获取特定主题的文献样本;第四步可视化分析,VOS 支持多种分析方法,如共词分析,聚类分析,地图分析等,使用者可以通过调整不同的参数选择不同的可视化视图;第五步为结果解释。通过以上步骤,使用者可以获取到有价值的结果,如科学研究领域中不同作者/组织之间的合作网络,各主题词之间的相似性/差异性。使用者可以通过这些结果进行研究问题探索,理论检验,和政策决策等操作。

2 研究信息统计

2.1 论文产出比较分析

论文发文量可以用来表示一个研究领域的活跃度、发展速度和影响力。为了调查学者对土壤固化剂领域研究的活跃度,对中国知网(CNKI)数据库中的文献进行统计并获得了年度趋势,如图 1 所示,整体上累计发文量保持持续上升趋势,发文量的增加可以反映出该领域的研究兴趣和投入程度。

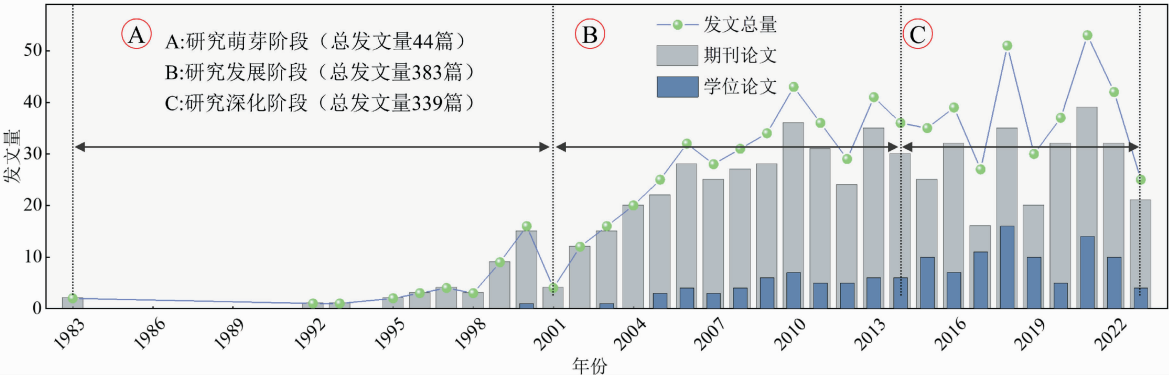


图 1 论文年产量

如图 1 所示,从 1983 年至 2023 年发表在中国知网上与土壤固化剂相关的文章演化趋势可以分为三个阶段。第一阶段,即 1983 年至 2001 年,18 年间共计发表研究文献 44 篇,其研究主要涉及土壤固化剂的分布特点、影响因素和发展趋势^[29-30],同时研究学者也开始探索土壤固化的治理方法,如水保

措施、草地恢复的应用等^[31-32],这一阶段称之为国内土壤固化剂研究萌芽阶段;第二阶段,即 2002 年至 2014 年,该阶段共计发表文献 383 篇,随着时间推移年发文量整体上呈现稳步上升趋势,研究学者更加关注土壤固化的机理和成因^[33-35],在土壤物理性质、化学性质、微生物活性等方面进行了广泛的实

验和野外观察,并提出了不同的治理策略和技术,这一阶段称之为国内土壤固化剂研究发展阶段;第三阶段,即 2015 年至 2023 年,该阶段共计发表文献 339 篇,发展过程中,总发文量出现波动变化趋势,在这一阶段过程中,研究学者对土壤固化剂的研究更加深入和系统化,涉及到的领域也更加广泛,包括土地利用变化、水资源管理、生态恢复等,他们通过多学科合作、技术创新和政策支持,不断探索和优化土壤固化治理的方法和途径^[36-38],这一阶段称之为国内土壤固化剂研究深化阶段。

总之,国内学者从上世纪 80 年代开始对土壤固化剂进行研究,并且在过去取得了丰富的研究成果。这些研究为土壤固化治理提供了理论支持和技术指导,对于保护土地资源、提高农业生产能力和实现可持续发展具有重要意义。

2.2 研究机构发文量分析

对主要发文机构进行统计,从 1983 年—2023 年,40 年来发文量前十的机构(见表 1)共计发表文献 161 篇,占总发文量的 21.02%,其中西北农林科技大学发文量排名第一,共计发表文献 53 篇,发文量占比达到 6.92%,总被引频次 1 239 次。高发文量反映了该机构拥有一支优秀的研究团队和学者群体,他们在各自的领域有着重要的研究贡献,并能够频繁发表高质量的论文。与此同时,说明该机构在土壤固化剂领域的研究具有一定的影响力,在创新、创造力及贡献方面远超其他机构,并且较高的发文数量意味着该机构在信息传递方面更加积极,提供了更多的参考和讨论机会,让其他研究学者更全面地了解 and 参与相关领域的研究热点。

表 1 发文数量前 10 的机构

机构	发文量 /篇	发文量 占比/%	总被引 频次	总下载 次数
西北农林科技大学	53	6.92	1239	26004
长安大学	15	1.96	215	725
中国科学院水利部 水土保持研究所	14	1.83	283	4743
中国地质大学	13	1.69	385	10938
中国地质大学(武汉)	12	1.57	213	4363
西南科技大学	11	1.44	31	3962
天津市市政工程设计研究院	11	1.44	53	1401
重庆交通大学	11	1.44	66	3372
武汉大学	11	1.44	172	3527
中国科学院教育部水土 保持与生态环境研究中心	10	1.31	522	8510

2.3 作者发文量分析

作者的发文数量可以反映出他们的学术水平和学术活跃度。发表更多的论文通常意味着他们在研究领域的工作量更大,参与的项目更多,以及他们在学术界的知名度和影响力可能更大。以 1983 年至 2023 年土壤固化剂研究学者为统计源,将所有作者按照发文量排序,笔者优先选取了发文量前 10 的作者(见表 2)。在发文量前 10 的作者中,有 3 位作者来自西北农林科技大学,由此可知西北农林科技大学在土壤固化剂方面做的研究较多。论文的数量可以反映出研究者对于知识的掌握程度和对领域的深入理解。公开发表更多的论文通常意味着研究者在其领域内做出了更多的学术贡献,也表明他们能够不断地进行独立的研究,并产生新的发现和见解。

表 2 发文数量前 10 作者

排名	作者	机构	发文 量/篇	总被引 频次	总下载 次数
1	高建恩	水利部水土保持生态 工程技术研究中心	15	572	9883
2	项 伟	中国地质大学(武汉)	14	357	6385
3	樊恒辉	西北农林科技大学	12	583	9905
4	吴普特	中国科学院水利部 水土保持研究所	10	530	8620
5	张兴昌	西北农林科技大学	10	259	3559
6	孙胜利	西北农林科技大学	8	176	2605
7	王新岐	天津市市政工程 设计研究院	8	46	1348
8	侯浩波	武汉大学	7	156	2683
9	崔德山	中国地质大学(武汉)	6	323	5675
10	邵玉芳	浙江大学	6	141	3442

2.4 期刊发文量分析

期刊扮演着学术交流和知识分享的重要角色,也为研究人员提供了一个发布和分享研究成果的平台。通过分析期刊发文量可以帮助研究人员快速准确地识别研究领域的权威期刊。本次研究过程选取的数据中有 630 篇文献源于期刊,根据对近 40 年期刊发文量的分析,发文量前 10 的期刊见表 3 所示,排名前十的期刊共计发表论文 104 篇,其中岩土力学期刊的影响因子大于 3,发文量仅占 7.69%,表明土壤固化剂领域的研究成果在高影响因子的期刊发表具有挑战性,且需要提高创新型和研究质量。虽然在发文数量前 10 的期刊中,岩土力学发文量较少,但总被引频次数与总下载次数相对较高,表明在该研究领域具有较高的影响力。

表 3 发文数量前 10 的期刊

排名	期刊	发文量/篇	总被引频次	总下载次数
1	北方交通	16	49	2006
2	交通世界	13	26	1571
3	水土保持通报	11	113	2233
4	路基工程	10	130	4052
5	黑龙江交通科技	10	59	1535
6	公路	10	72	2576
7	城市道桥与防洪	9	38	1259
8	山西建筑	9	21	1135
9	人民长江	8	96	2969
10	岩土力学	8	467	6119

2.5 高被引论文分析

高被引论文往往是该领域中具有重要影响力的研究成果,它们通常涉及当前领域中最前沿、最有价值的问题和方法,这些问题和方法是领域内研究者普遍关注和讨论的重点。通过跟踪高被引论文的引用和后续研究,可以了解该领域的研究方向、方法和

技术的发展趋势,同时,高被引论文的作者往往具有较高的学术声望和影响力,他们的研究成果对该领域的发展和进展有积极的作用。表 4 列出了 CNKI 核心数据库中 被引频次数最高的 10 篇文献,其中综述 3 篇、研究论文 7 篇。涉及到的学科分布主要有建筑科学与工程(5 篇),环境科学与资源利用(2 篇),地质学(1 篇),水利水电工程(1 篇),工业通用技术及设备(1 篇)。从高被引论文可以看出,学者们揭示的一些新的研究方向和方法,推动了土壤固化的理解和治理,这些高被引论文涉及土壤固化的成因、影响因素、预测模型、治理措施等方面,为相关领域的研究和实践提供了有价值的信息和指导。与此同时,笔者发现土壤固化是一个复杂的问题,需要多学科交叉合作来进行全面的研究和解决,高被引论文反映了不同学科领域的专家之间的合作,如土壤科学、地理学、生态学、农业科学等。这种跨学科合作有助于提供全面的视角和综合的解决方案。

表 4 被引频次数前 10 的论文

排名	论文题目	发表年份	第一作者	文章类型	期刊	期刊级别	复合影响因子(2022)	总被引频次
1	土壤固化剂研究现状与展望 ^[21]	2006	樊恒辉	综述	西北农林科技大学学报(自然科学版)	CSCD	2.244	242
2	土壤固化剂的性能及固化机理的研究 ^[29]	1995	梁文泉	研究论文	武汉水利电力大学学报	CSCD	1.695	169
3	GT 型土壤固化剂改良土的工程特性研究 ^[39]	2006	方祥位	研究论文	岩土力学	EI	3.610	146
4	TR 型土壤固化剂路用性能试验研究 ^[40]	2002	黄晓明	研究论文	公路交通科技	CSCD	1.781	134
5	国际以及国内土壤固化剂的研究现状和前景展望 ^[41]	2005	苏群	综述	黑龙江工程学院学报	CA	0.828	127
6	几种固化剂组配修复重金属污染土壤 ^[42]	2012	曾卉	研究论文	环境化学	CSCD	2.295	117
7	6 种固化剂对土壤 Pb Cd Cu Zn 的固化效果 ^[43]	2012	陈炳睿	研究论文	农业环境科学学报	CSCD	4.011	116
8	离子土壤固化剂改性膨胀土的试验研究 ^[44]	2009	刘清秉	研究论文	岩土力学	EI	3.610	110
9	土壤固化剂固化机理研究进展及应用 ^[35]	2011	李琴	综述	材料导报	EI	2.009	106
10	粉土固化稳定机理研究 ^[45]	2004	李迎春	研究论文	岩土工程学报	EI	3.133	91

3 土壤固化剂的研究进展与前沿热点

3.1 高频关键词分析

关键词通常反映了论文的主题和研究内容。通过分析关键词,我们可以了解论文所涉及的领域、问题或主题。同时,通过关键词的频率,我们可以了解某个特定主题或概念在文献中的关注度以及趋势和变化。频率的变化可以指示该主题的发展方向或研究热点的演变。频率较高的关键词往往与其他关键词或主题存在关联。运用文献计量软件 VOS viewer 软件对 766 篇土壤固化剂相关文献进行分析,共计

得到 1 494 个关键词,其中出现 2 次以上的关键词为 365 个,出现 100 次以上的关键词有 2 个。频率较高的关键词表示该主题在该领域的研究中非常重要或热门。出现频次排在前 10 的关键词见表 5 所示。

表 5 热点关键词数量(排名前 10)

排名	关键词	频次	排名	关键词	频次
1	土壤固化剂	346	6	抗压强度	34
2	固化剂	126	7	土壤	32
3	无侧限抗压强度	90	8	路用性能	31
4	固化机理	57	9	应用	30
5	固化土	38	10	道路工程	29

由表 5 可知,CNKI 中以“土壤固化剂”(346 次)、“固化剂”(126 次)、“无侧限抗压强度”(90 次)为代表的关键词表明该领域主要以土壤固化剂为主题,衡量指标以无侧限抗压强度为主。土壤固化剂是指添加到土壤中的物质,通过与土壤中的颗粒发生化学或物理反应,改变土壤颗粒间的结构和性质,从而提高土壤的强度和稳定性。土壤固化剂的选择、配比和使用方法对土壤固化效果至关重要,因此成为研究的重点之一。通过研究不同种类的土壤固化剂,可以评估其固化效果、适用性和经济性,为土壤固化工程提供理论依据和实际操作指导。其次,无侧限抗压强度是评价土壤固化效果的重要指标之一。无侧限抗压强度是指土壤在受到垂直加载时能够承受的最大应力,是衡量土壤固结、稳定性和承载能力的关键参数。通过研究不同土壤固化剂对土壤无侧限抗压强度的影响,可以评估土壤固化效果的好坏和稳定性的提高程度。与此同时,土壤固

化研究中关注土壤固化剂和无侧限抗压强度这两个因素对于土壤固化效果和稳定性具有重要的影响,研究这些因素可以揭示土壤固化剂作用机理,指导实际工程应用,并为改进土壤固化技术提供科学依据。

3.2 关键词聚类分析

运用文献计量软件 VOS viewer 绘制一个土壤固化剂相关的共生网络,即关键词共现图谱,土壤固化剂关键词可视化网络图谱如图 2 所示。图谱中字体和图标大小均代表关键词出现的频次高低,即每一个圆圈的大小代表这个关键字的权重,图标与图标之间连接线的粗细表示两个关键词之间的共现强度;两个图标之间的距离表示了两个图标之间的亲缘性,如果亲缘性越强则距离越短,亲缘性越弱则距离越远;图标的颜色代表了各自的簇类,即同一色系的关键词代表同属一个聚类。所获取的 766 篇文献共计 1494 个关键词,当阈值设置为 5 的情况下,共计有 94 个关键词被纳入研究,并被分为 5 个聚类。

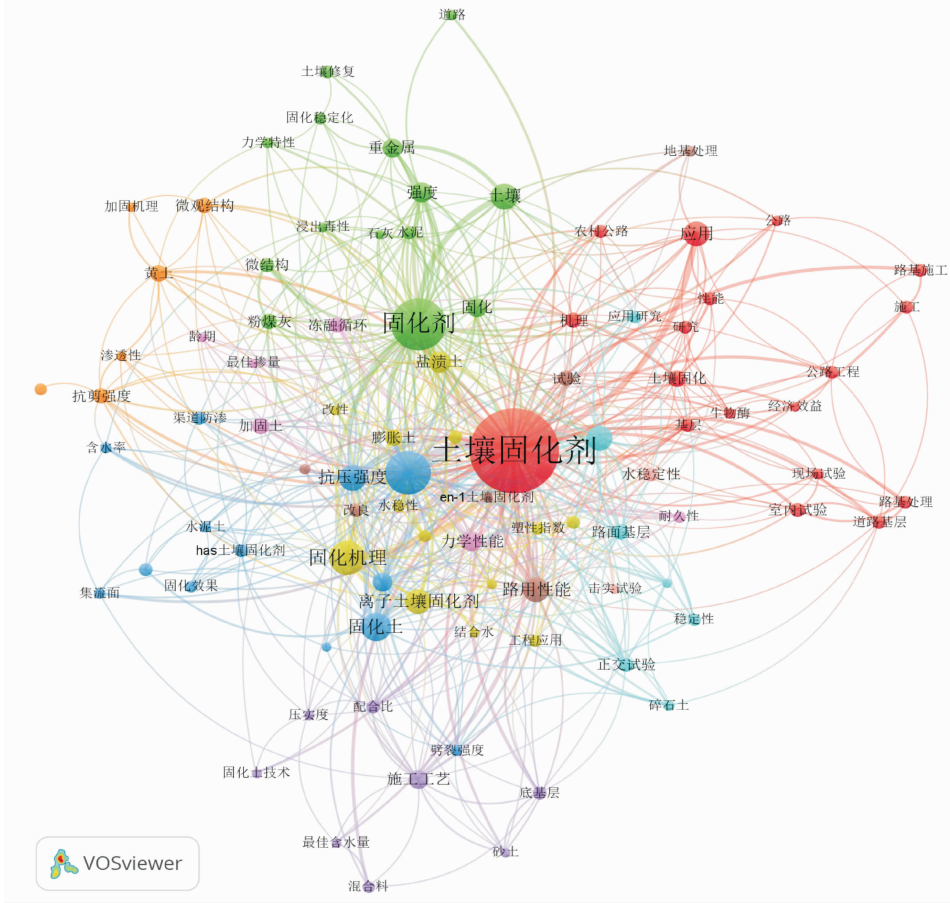


图 2 土壤固化剂研究关键词的共现网络可视化图谱

在图 2 中,对 CHKI 中土壤固化剂领域的 94 个主要研究的热点词组进行聚类分析,共得到 4 个聚

类群,且各聚类群之间存在紧密联系,多基于土壤固化剂、固化剂、无侧限抗压强度、固化机理等角度,

选取每个聚类群中较重要的关键词进行展示,见表 6 所示。

该结论与密度可视化图谱(见图 3)所反映的结果一致,密度视图同样作为一种可视化工具,用于快速观察某个领域的研究密度情况。在密度视图中,领域中的不同区域用不同的颜色表示,颜色浅深程度表示该区域的研究密度。密度越大的区域将显示为浅色,密度越小的区域将显示为深色。较高的研究密度区域表示该领域有更多的研究工作和关注,而较低的研究密度区域可能需要更多的关注和研究发展。

表 6 CNKI 中土壤固化剂领域关键词聚类信息

排名	聚类标签	颜色	关键词
1	土壤固化剂	红色	应用、路用性能、施工工艺、室内试验、路基处理
2	固化剂	绿色	土壤、强度、微结构、力学特性、机理
3	无侧限抗压强度	蓝色	应用研究、稳定性、正交试验、含水率、碎石土
4	固化机理	黄色	离子土壤固化剂、黄土、盐渍土、工程应用、结合水

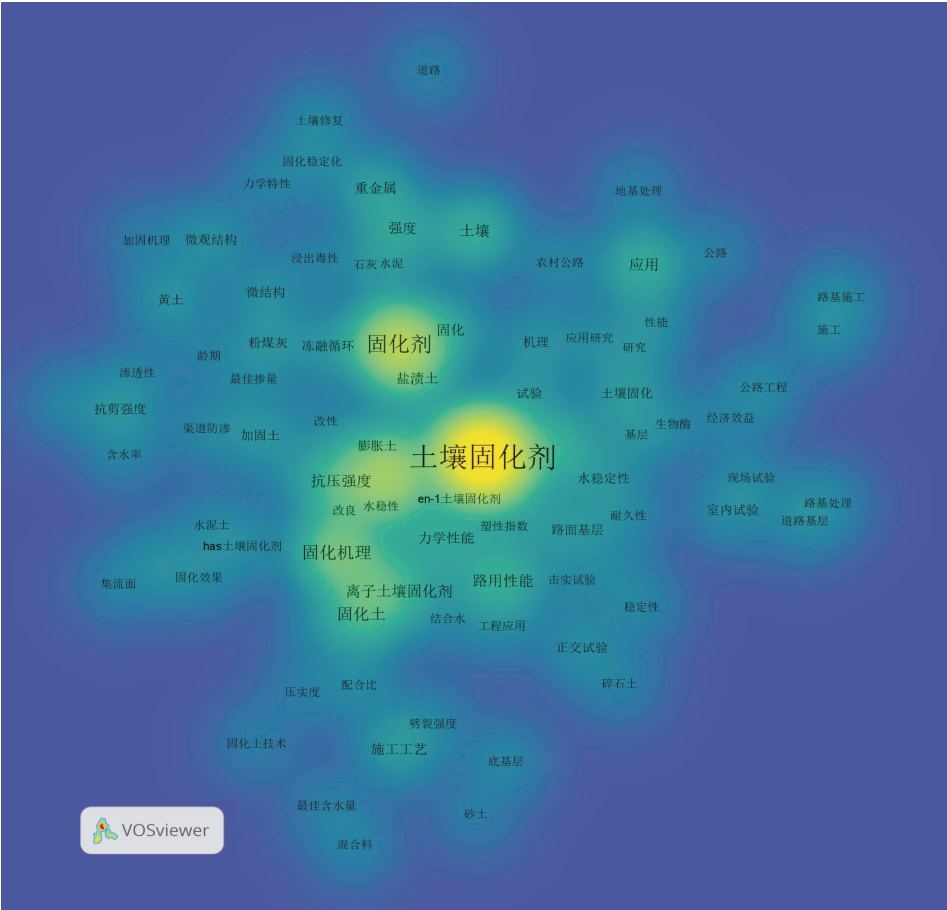


图 3 土壤固化剂研究关键词密度可视化图谱

由图 3 可知,目前研究人员对土壤固化剂领域中的土壤固化剂、固化剂、抗压强度、固化机理等较为关注。该图可为研究人员了解土壤固化剂领域的研究格局与发展趋势,同时也可以用于决策制定和资源分配。它提供了一个直观的方式来观察和比较不同区域的研究活动水平,为研究者和决策者提供了重要的参考信息。

3.3 主题演变分析

VOS viewer 中使用模块化方法对关键词的共现网络进行聚类,节点的颜色表示数据集中关键词的

平均发表年份,提示研究领域主题的时间演变。土壤固化剂研究关键词标签视图如图 4 所示。按关键词的平均年份取 score 值进行颜色映射,平均年表示集群内关键词的平均发表年份,用于判断与现在研究的时间距离。

在土壤固化剂研究初期(2001 年以前),学者们做出了许多重要贡献。学者们研究不同的材料,探索它们在土壤固化中的应用潜力,他们发现一些具有固化效果的化学物质和生物材料,并进行了初步的实验验证;学者们通过实验和理论分析,深入研究

了土壤固化的机理,揭示了固化剂与土壤颗粒之间的相互作用机制,以及固化过程中发生的物理、化学变化。与此同时,学者们开发了一系列评价土壤固化效果的方法和指标,如抗剪强度、液塑性指数等。他们还通过调整固化剂的配比、固化条件的控制等

手段,优化了土壤固化效果。最终学者们将土壤固化技术应用于实际工程中,如道路基础、填埋场、土坡防护等。他们积极与相关行业和工程师合作,不断改进固化技术,推动了土壤固化在工程实践中的应用。

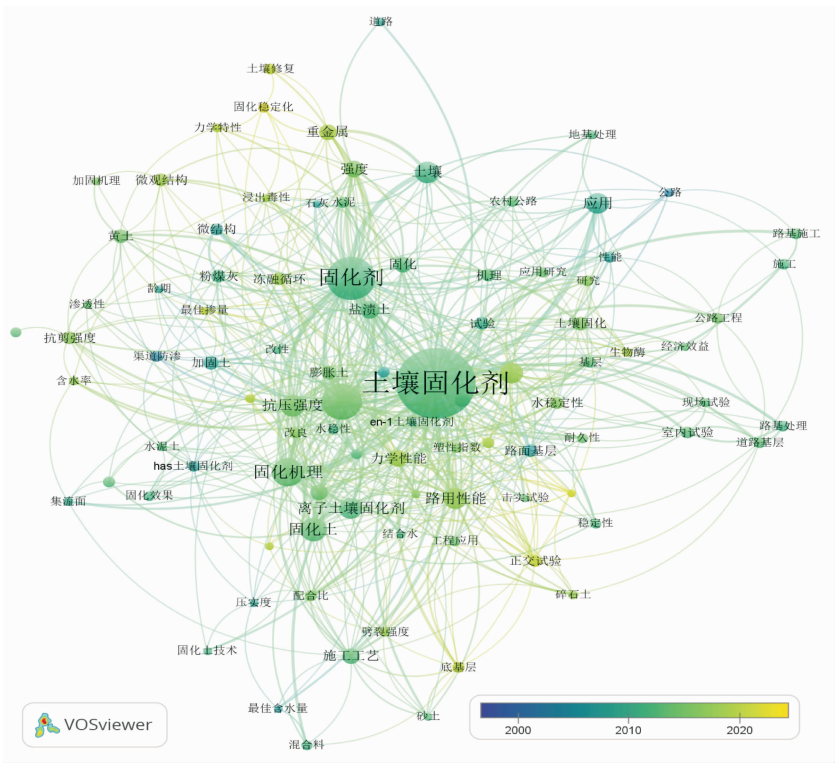


图 4 土壤固化剂研究关键词标签视图

在土壤固化剂研究中期(2002 年—2014 年),学者们继续努力探索和实践,取得了一系列重要成果。主要分为四点:第一,学者们不断寻找新的固化剂,并对已有固化剂进行改良和优化。他们开发出更多种类、更高效的固化剂,满足不同土壤类型、固化目标和工程要求。第二,在早期研究基础上,学者们对土壤固化的机理进行了更深入的研究,包括微观和宏观方面。他们使用先进的仪器和技术,揭示了固化剂与土壤颗粒之间的相互作用机制、固化过程中的物理、化学变化,以及固化后土壤的力学性能等。第三,学者们通过试验研究和数值模拟等手段,不断优化固化工艺和条件。他们研究了固化剂的配比、固化时间、固化温度等因素对固化效果的影响,以提高土壤固化的效果和可行性。第四,学者们进一步完善了土壤固化效果的评价方法和标准。他们开发了更多的测试方法,如固化剂渗透性测试、固化后土壤的抗渗性能测试等,用于客观、准确地评估固化效果。这一阶段中,学者们的研究为土壤固化剂的发展和应用做出了重要贡献。他们通过不断创新

和实践,推动了土壤固化剂研究的进一步深入,为解决土壤固化问题提供了有力支持。

自 2015 年以后,研究土壤固化剂的学者们继续努力推动领域的发展,做出了许多重要贡献。例如新型固化剂的发现和应用,学者们不断寻找和研发新型的固化剂,如化学固化剂、无机固化剂、生物固化剂等,并将其应用于实际工程中。这些新型固化剂具有更高的固化效果和环境友好性,为土壤固化技术提供了更多选择。党的十八大以来,学者们开始重点关注环境友好型固化技术的研究和开发。他们探索利用可再生材料、纳米材料、生物技术等绿色固化剂,以减少对环境的不良影响,并降低固化成本。部分学者们通过实验室研究和数值模拟相结合的手段,进一步深入探索土壤固化的机理。他们关注固化剂与土壤颗粒之间的微观相互作用,以及固化后土壤的结构、力学性能等方面的变化,为固化过程的优化和理解提供了更多的科学依据。在对多功能固化材料的研究中,学者们开始研究多功能固化材料,即具有固化和其他功能的材料。他们将多功

能固化材料应用于土壤固化工程中,如同时具备固化和污染物吸附功能的材料,以提高土壤修复效果。在数据驱动的土壤固化研究过程中,学者们开始使用大数据和机器学习等技术,对土壤固化进行建模和预测。他们利用数据分析和模型预测,优化固化剂配比、固化工艺和土壤固化效果评估等方面的工作,提高固化技术的效率和可行性。这些学者们通过不断的研究和创新,为土壤固化领域的发展做出了重要贡献。他们将环境保护、可持续发展和高效固化相结合,为解决土壤固化问题提供了新思路和方法。

3.4 研究前沿

通过上述对土壤固化剂研究文献的高频关键词分析、关键词聚类分析、主题演变分析,土壤固化剂目前的研究热点主要集中在这些方面。第一,绿色环保固化技术:研究者们致力于开发更环保、可持续的固化技术。这包括研究以可再生材料、生物固化剂、纳米材料等为基础的绿色固化剂,以减少对环境的不良影响。第二,高效固化剂的开发:学者们不断寻找高效的固化剂,以提高土壤固化的效果和速度,通过研究并优化固化剂的成分、配比和处理工艺,以增强固化作用、加快固化速度。第三,土壤固化剂作用机理的深入研究:学者们关注土壤固化的机理和过程。通过细观和宏观的实验研究、数值模拟和分子模拟等手段,探索固化剂与土壤颗粒之间的相互作用机制,以及固化后土壤的力学性能、水理性能和耐久性能等方面的变化。第四,固化土施工技术的研究:研究者致力于研究干硬性施工技术、硬塑性施工技术、流态施工技术等,同时掺入纤维等材料提升固化土整体性能。同时,将不同的固化技术和处理方法整合到一体,以提高土壤固化的效果和经济效益。这包括结合化学固化、物理固化和生物固化等多种技术,并探索其协同作用和优化组合方式。第五,应用领域的拓展:学者们将土壤固化技术拓展到更多应用领域。除了传统的土壤改良和修复领域,如道路基础、填埋场等,开始关注固化技术在土壤污染防治、建筑工程和农业领域中的应用。

这些研究热点反映了对环境友好、高效可行的土壤固化技术的追求。研究者们致力于推动固化技术的创新和发展,以应对土壤固化问题,并为实际应用提供更好的技术支持。

4 结 论

本文通过收集文献、建立文献数据库、文献可视化处理等研究方法对 CNKI 中 1983 年—2023 年内

土壤固化剂研究领域的期刊论文与学位论文进行文献计量学分析,得出以下结论:

(1) 国内学者从 20 世纪 80 年代开始对土壤固化剂进行研究,整体上发文量呈现逐渐增长趋势,即研究学者愈发关注该领域;发文量靠前的机构包括西北农林科技大学、长安大学等,其中水利部水土保持生态工程技术研究中心的高建恩团队、中国地质大学(武汉)项伟团队、西北农林科技大学的樊恒辉团队在 CNKI 数据库中发文量较高;发文量较多的期刊分别为北方交通、交通世界,而被引量较高的期刊为岩土力学。

(2) 高频关键词反映了当前土壤固化剂领域的研究热点和主题。CNKI 中土壤固化剂领域内的高频关键词主要包括“土壤固化剂”、“固化剂”、“无侧限抗压强度”、“固化机理”等;所获取的 766 篇文献共计 1 494 个关键词,在阈值设置为 5 的情况下,土壤固化剂研究关键词的共现网络可视化图谱中共有 94 个主要研究的热点词组,分为 4 个聚类群,各聚类群之间存在紧密联系,多集中于土壤固化剂、固化剂、无侧限抗压强度、固化机理等角度。

(3) 随着土壤固化剂研究领域的主题不断演化,在未来几年,学者们将研究热点主要集中在绿色环保固化技术、高效固化剂开发、土壤固化机理深入研究、一体化固化技术等方面,致力于不断寻找高效的固化剂,以提高土壤固化的效果和速度,重点关注环境友好型固化技术的研究和开发,以减少对环境的不良影响,实现可持续发展的重大战略。

参考文献:

- [1] 吕 蕾,王大鹏. 基于可持续发展的土地资源利用战略研究[J]. 黑龙江科技信息,2010(32):139.
- [2] 马玉玲,庾华鸣,张 英,等. 我国土地资源和水资源严重紧缺的原因及治理探析[J]. 理论与改革,2002(2):74-76.
- [3] 王 嘉,王来明. 污染土壤下的农产品安全与人体健康[J]. 山东科技大学学报(自然科学版),2005,24(3):117-120.
- [4] 张群丽,谢海云,陈家灵,等. 重金属污染土壤修复固化/稳定化技术研究现状及存在问题分析[J/OL]. 环境保护科学:1-9[2023-07-14]. DOI:10.16803/j.cnki.issn.1004-6216.202304026.
- [5] 刘泽权,李成明,朱湖地,等. 固化稳定化修复重金属污染土壤的研究进展[J]. 环境保护科学,2022,48(4):13-20.
- [6] 杨 青,罗小花,邱 欣,等. 离子土壤固化剂固化土的微观结构特征及固化机理研究[J]. 公路交通科技,2015,32(11):33-40.

- [7] 樊恒辉,吴普特,高建恩,等. 水泥基土壤固化剂固化土的微观结构特征[J]. 建筑材料学报,2010,13(5):669-674.
- [8] 董祎挈. 灰渣基地聚合物-纤维屏障的构建及其重金属固化机理研究[D]. 武汉:武汉大学,2020.
- [9] 贺智强. 生物基土壤固化剂加固土的影响因素及其作用机理研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2015.
- [10] 樊恒辉,高建恩,吴普特,等. 基于黄土物理化学性质变化的固化土强度影响因素分析[J]. 岩土力学,2011,32(7):1996-2000.
- [11] 朱方旭,程绍鹏,熊震宇,等. 异位固化/稳定化技术修复重金属污染土壤案例分析[J]. 有色金属(冶炼部分),2023(8):139-148.
- [12] 龙红明,武皓天,于先坤,等. 钢渣用于土壤修复与改良的研究进展[J]. 中国冶金,2023,33(2):1-7.
- [13] 刘泽权,李成明,朱湖地,等. 固化稳定化修复重金属污染土壤的研究进展[J]. 环境保护科学,2022,48(4):13-20.
- [14] 程 程. 土壤污染固化稳定化修复的评估方法研究[J]. 皮革制作与环保科技,2021,2(10):145-146.
- [15] 陈 洁. 生物炭固化剂修复农田土壤铅、镉污染的研究[D]. 郑州:华北水利水电大学,2020.
- [16] 夏 宇,李 益,孙御婷,等. 秸秆与粉煤灰共热解复合功能材料用于多金属污染土壤原位修复研究[J]. 环境卫生工程,2022,30(6):111.
- [17] 戴 娟. 矿区土壤重金属污染治理及生态修复技术研究[J]. 河南科技,2021,40(16):126-128.
- [18] 李青青,罗启仕,郑 伟,等. 土壤修复技术的可持续性评价——以原位稳定/固化技术和异位填埋技术为例[J]. 土壤,2009,41(2):308-314.
- [19] 李建东,张延杰,王 旭,等. 新型固化剂加固膨胀土研究现状及展望[J]. 材料导报,2023,37(5):90-100.
- [20] 邵玉芳. 土壤固化技术在农业工程中的应用[J]. 中国农机化,2005(3):60-61.
- [21] 樊恒辉,高建恩,吴普特. 土壤固化剂研究现状与展望[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2006,34(2):141-146,152.
- [22] 米吉福,汪 浩,刘晶冰,等. 土壤固化剂的研究及应用进展[J]. 材料导报,2017,31(S1):388-391,401.
- [23] 樊恒辉,高建恩,吴普特,等. 水泥基土壤固化剂固化土的物理化学作用[J]. 岩土力学,2010,31(12):3741-3745.
- [24] 张 丽,李志强,李斯文,等. 土壤固化剂在建筑渣土中的应用[J]. 建材世界,2023,44(2):34-36,43.
- [25] 季 节,梁 犇,韩秉烨,等. 中国道路工程中土壤固化技术综述[J]. 交通运输工程学报,2023,23(2):47-66.
- [26] 王银梅,韩文峰,湛文武. 新型高分子固化材料与水泥加固黄土力学性能对比研究[J]. 岩土力学,2004,25(11):1761-1765.
- [27] 郭柏林,汪益敏,陈页开,等. 离子土壤固化剂在低等级道路基层中的应用研究[J]. 中外公路,2007(2):120-123.
- [28] 孙振平,吕文斌,孙广花. 派酶改善土壤密实性和强度的效果及其机理研究[J]. 新型建筑材料,2010,37(10):87-90.
- [29] 梁文泉,何 真,李亚杰,等. 土壤固化剂的性能及固化机理的研究[J]. 武汉水利电力大学学报,1995(6):675-679.
- [30] 王鸣真. 土壤固化剂在水利工程中的应用[J]. 东北水利水电,1997(5):35-36,39.
- [31] 石成瑞,季仲涛,郭弟民,等. 路基、地基处理新材料TR型土壤固化剂的研制及效果[J]. 路基工程,1993(6):25-28.
- [32] 王 慧,朱步祥,朱步纲. 渠道防渗新材料-土壤固化剂及其应用[J]. 节水灌溉,2000(6):35-38.
- [33] 赵永巧. 浅谈土壤固化剂的发展与固化机理研究[J]. 水利科技与经济,2005,11(10):620-622.
- [34] 周永祥,阎培渝. 土壤加固技术及其发展[J]. 铁道科学与工程学报,2006,3(4):35-40.
- [35] 李 琴,孙可伟,徐 彬,等. 土壤固化剂固化机理研究进展及应用[J]. 材料导报,2011,25(9):64-67.
- [36] 张有斌,张文琮,李叶枢,等. 基于响应面法的高原红土固化性能试验研究[J]. 材料导报,2023,37(S1):259-264.
- [37] 郑 洁,李行祖,王菁菽. 离子型土壤固化剂改性淤泥排水固结试验研究[J]. 安全与环境工程,2023,30(1):56-63.
- [38] 黄占斌,赵 鹏,王颖南,等. 土壤重金属固化稳定化材料研发及其应用基础研究进展[J]. 农业资源与环境学报,2022,39(3):435-445.
- [39] 方祥位,孙树国,陈正汉,等. GT型土壤固化剂改良土的工程特性研究[J]. 岩土力学,2006,27(9):1545-1548.
- [40] 黄晓明,张书生,廖公云. TR型土壤固化剂路用性能试验研究[J]. 公路交通科技,2002(3):23-27.
- [41] 苏 群,徐渊博,张复实. 国际以及国内土壤固化剂的研究现状和前景展望[J]. 黑龙江工程学院学报,2005(3):1-4.
- [42] 曾 卉,徐 超,周 航,等. 几种固化剂组配修复重金属污染土壤[J]. 环境化学,2012,31(9):1368-1374.
- [43] 陈炳睿,徐 超,吕高明,等. 6种固化剂对土壤Pb Cd Cu Zn的固化效果[J]. 农业环境科学学报,2012,31(7):1330-1336.
- [44] 刘清秉,项 伟,张伟锋,等. 离子土壤固化剂改性膨胀土的试验研究[J]. 岩土力学,2009,30(8):2286-2290.
- [45] 李迎春,钱春香,刘松玉,等. 粉土固化稳定机理研究[J]. 岩土工程学报,2004,26(2):268-271.