

基于文献计量的污泥堆肥研究发展态势分析

李秋实^{1,2,3}, 张嘉莹^{1,2,3}

(1. 中交天津港湾工程研究院有限公司; 2. 中交第一航务工程局有限公司;
3. 天津市水下隧道建设与运维技术企业重点实验室)

摘 要: 污泥堆肥是实现污泥稳定化、无害化及资源化处理处置的有效途径。为掌握污泥堆肥领域发展趋势, 采用文献计量分析结合 S 型曲线及可视化工具, 对 2001—2023 年 Web of Science 核心数据库中“sludge composting”主题的 5 623 篇研究论文进行了定量分析。结果表明: 污泥堆肥主题的研究论文以稳定的年增长率从 2001 年的 101 篇增加到 2023 年的 328 篇; 中国的累计论文发表数量最多, 共 1 342 篇, 占全球总发文量的 23.87%, 且中国的高被引论文数量表现突出。污泥堆肥技术在未来的 20 a 仍有很大的创新空间及发展潜力, 面向环保、高效且安全目标的共堆肥及病原体、重金属各类有害物质的有效控制成为污泥堆肥技术领域研究重点与热点。

关键词: 污泥堆肥; 文献计量; 研究趋势; VOSviewer

0 引言

随着城市化进程的加快, 污泥的产生量迅速增加^[1]。污泥特性复杂, 无害化处理率低, 污泥的安全高效处置和利用是固体废物处理和环境保护中亟待解决的重大问题^[2]。目前, 污泥的主流处理方式有填埋、土地利用、干化焚烧、堆肥、建筑材料回收等^[3]。其中, 土地利用是一种很有前途的污泥处理方法。然而, 污水污泥中含有病原体、无机(如重金属)和有机有毒污染物, 限制了其直接土地应用^[4]。

堆肥是在微生物的作用下, 将有机物分解, 将低分子有机酸转化为高分子腐殖质物质的过程。在污泥堆肥过程中, 将发生一系列物理、化学和生物变化, 可以有效地杀灭病原体, 减少持久性有机污染物的含量, 钝化重金属^[5]。该技术具有成本效益高、操作方便、全生命周期管理优势、温室气体排放低等特点, 越来越受到人们的关注^[6]。污泥堆肥是当前和未来清洁生产系统中一项很有前途的技术。对污泥堆肥技术的开发和应用已成为各国不断探索的重要内容。

2007 年, 洛阳瀍东污水处理厂建成中国第一座 200 吨级污泥堆肥项目, 标志着我国规模化污泥堆肥技术的起步^[7]。2010 年后, 国内开始重视污泥处理处置问题, 《水污染防治行动计划》(简称“水十条”), 明确要求到 2020 年底前, 地级及以上城市污泥无害化处理处置率达到 90% 以上^[8],

推动了污泥堆肥技术的快速发展。2015 年后, 污泥堆肥技术不断创新, 我国开展了氮素保留^[9]研究及覆膜堆肥^[10]工艺的开发, 有效减少了恶臭和温室气体的排放。

国外污泥堆肥技术的发展历程可以从 20 世纪中后期开始追溯。20 世纪 60 年代后期, 全球范围内堆肥化技术开始迅速发展, 污泥堆肥作为处理城市污水处理副产品的手段之一, 开始受到关注。在 20 世纪 70—80 年代, 欧美国家开始较为系统地研究和应用污泥堆肥技术, 如美国费城污泥制配中心在 20 世纪 80 年代初开发了较为完善的贝尔茨维尔好氧堆肥法, 利用条形堆底穿孔管通入空气, 有效杀灭病原菌、昆虫和杂草种子, 提高了堆肥的安全性和稳定性, 日处理规模达到 20 t 脱水污泥。20 世纪 90 年代—21 世纪初, 欧洲国家如德国、英国、法国等在污泥堆肥技术上取得显著进展, 主要采用好氧堆肥和厌氧堆肥 2 种方法。欧洲的堆肥技术因其良好的处理效果得到了广泛应用。同时, 美国在此期间除了好氧堆肥外, 还发展了高温堆肥技术, 利用高温微生物在高温条件下快速分解有机废弃物, 提高了堆肥效率。进入 21 世纪后, 随着环境标准的提高和资源回收意识的增强, 国外对污泥堆肥技术的研究进一步深入, 不仅关注堆肥过程的优化, 还包括重金属形态变化^[11]、恶臭处理^[12]、能源回收^[13]等方面。例如, 开发出微生物燃料电池型厌氧堆肥技

术,利用生物产电加速有机物降解。此外,堆肥设备和工艺的智能化、自动化水平不断提高,如自动控制堆肥系统^[13]等。近年来,随着全球对环境友好和可持续发展的重视,污泥堆肥技术向高效化、高值化、智能化方向发展。

污泥堆肥技术从古代的农业堆肥实践中汲取灵感,经过 20 世纪的技术初步应用,到 21 世纪特别是近十几年的快速发展与优化,形成了现今包含多种先进技术和策略的综合处理体系。随着技术的不断进步和社会需求的提高,污泥堆肥技术将持续演进,以实现更高效、更环保的资源化利用。未来,污泥堆肥技术将继续向更高效、更环保的路径发展,解决重金属去除、臭气控制、产品质量提升等核心问题,以适应社会经济和环境保护的更高要求。研究人员对污泥堆肥技术进行了大量有价值的研究和综述,研究重点包括工艺优化^[14]、调理剂的创新^[15-16]、智能化设备研发^[13,17]、生物强化技术^[18]等,旨在提高堆肥质量和处理效率,同时减少环境污染^[19]。然而,目前还缺乏定量的研究来系统地分析污泥堆肥技术的相关文献,很难从宏观角度把握污泥堆肥的研究热点及未来发展趋势。

文献计量学是对科学活动进行定量分析最有效的工具之一^[20],基于对文献特征数量的统计分析,形成研究主题的定量评价模式。具体来说,通过文献计量学分析可以得出文献出版类型和发文趋势、各国发文数量和合作情况、热点研究主题和未来的研究方向等结果。近年来,文献计量学方法因其系统性、客观性与准确性被广泛应用于许多领域。因此,基于文献计量学对污泥堆肥研究趋势及热点演进开展可视化分析,对全面了解污泥堆肥研究领域的发展脉络,聚焦研究热点和局部问题,对后续研究提供量化信息支持具有重要意义。综上,为填补污泥堆肥领域文献定量分析的空白,本研究将基于 Web of Science 核心数据库及智慧芽全球专利数据库,通过文献计量学的方法对 2001—2023 年的污泥堆肥主题的研究文献及专利进行定量分析,以期对污泥堆肥技术的发展提供理论依据及参考。

1 数据来源及分析方法

1.1 数据来源

所有数据来源于 Web of Science 核心合集,以主题(sludge composting)、时间范围 2001—2023 年

进行检索,共得到 6 150 条记录。所有数据均保存为“纯文本”记录,记录内容选定“全记录与引用的参考文献”。以此为基础进行下一步的文献计量分析。

相较于研究论文,专利能够更好反映某项技术的实际应用情况与科研成果转化度^[21]。在“智慧芽全球专利数据库”以关键词“sludge composting”检索了 2001—2023 年的专利,共查询到 16 997 条专利数据。

1.2 文献计量分析

在 Web of Science 检索结果界面,分别获取精炼主题为“Web of Science 类别、出版年、国家/地区、领域中的高被引论文”的数据结果,可采用 origin 8.1 及 Microsoft Excel 2016 对文献类型及发文趋势、不同国家发文贡献、主要发文期刊与文章被引频次等进行统计分析。采用 h 指数定量评估发文国家的生产力及学术影响力,明晰不同国家发文贡献^[22]。h 指数是由 Hirsch 提出的用于衡量不同学者、机构或国家产出文献的生产力与影响力的指数,本研究中的 h 指数来源于 Web of Science 核心合集。此外,影响因子也是衡量期刊质量的有效指标,本研究中各期刊的相关数值来源于期刊官方网站。

文献计量分析凭借网络理论和图形表现手法,将文献资料转化为直观的视觉元素与结构化信息,成为审视某一学术领域全貌的强有力工具。它通过构建以“国家、研究机构、关键词”等为核心的知识网络图谱,以视觉形式展现,从而量化描绘出各要素间的紧密联系与分布特点^[23]。VOSviewer 是由莱顿大学研发的文献计量分析软件,擅长揭示知识领域内的结构特性、发展脉络及合作模式。它利用先进的可视化技术,不仅能够生动展现一个研究领域的当前状况,还能精准捕捉并评估其研究热点^[24]。本文采用 VOSviewer 1.6.15 版进行文献计量分析。

1.3 S 型曲线分析

技术演进通常遵循从萌芽期、成长期、成熟期至衰落期的 S 型发展模式^[21]。本研究运用 Logistic 随机模型描绘污泥堆肥技术沿 S 型曲线的成长轨迹,并通过 Fisher-Pry 变换对此曲线进行线性处理,旨在通过综合分析 S 型曲线与线性变化后的 Fisher-Pry 曲线,评估判断污泥堆肥技术的当前发展阶段及未来增长潜力。

2 结果与讨论

2.1 文献类型及发文趋势分析

2.1.1 文献类型分析

在 Web of Science 检索系统,共获得 6 150 条符合要求的文献记录。如图 1 所示,所有文献可归为 4 类: 研究论文(5 623 篇, 91.43%)、会议论文(165 篇, 2.68%)、综述文章(324 篇, 5.27%)、其他(38 篇, 0.62%, 包括修订、会议摘要、社论材料、信函、新闻)。因研究论文可以更可靠地反映研究趋势^[20], 故本文仅考虑研究论文的相关数据, 并进行相应的文献计量分析。

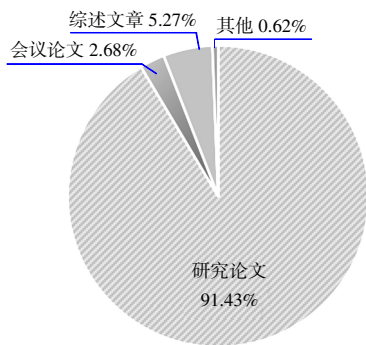


图 1 文献类型统计数饼图

2.1.2 研究论文发文数量及趋势分析

随着污泥产量的持续增加及污泥处置需求的不断增大, 污泥堆肥主题的研究论文从 2001 年的 101 篇增加到 2022 年的 423 篇及 2023 年的 328 篇(如图 2 所示)。累计发文量曲线斜率呈上涨趋势, 这体现出近年污泥堆肥技术仍是研究的热点。污泥堆肥技术的发展历程与政策导向、技术进步、市场需求以及环境意识的演变紧密相关。如发文趋势所示, 2010 年前该技术快速发展, 这与城市化进程的加速及污泥处置需求的急剧上升有关, 此阶段, 寻找可持续的污泥处理方式尤为重要。但是 2011—2014 年, 发文稍有滞缓, 这可能与经济增速调整及环境治理投资的阶段性调整有关。此外, 市场对于堆肥产品的接受度和应用范围也是影响因素之一, 初期可能存在市场开拓难度, 影响了堆肥技术的商业化进程及科研发展。2015 年后, 以我国为例, 随着《水污染防治行动计划》(简称“水十条”)的发布, 对污泥处理处置提出了更高要求, 明确指出污泥应进行稳定化、无害化和资源化处理^[8], 这为污泥堆肥技术带来了新的发展机遇。

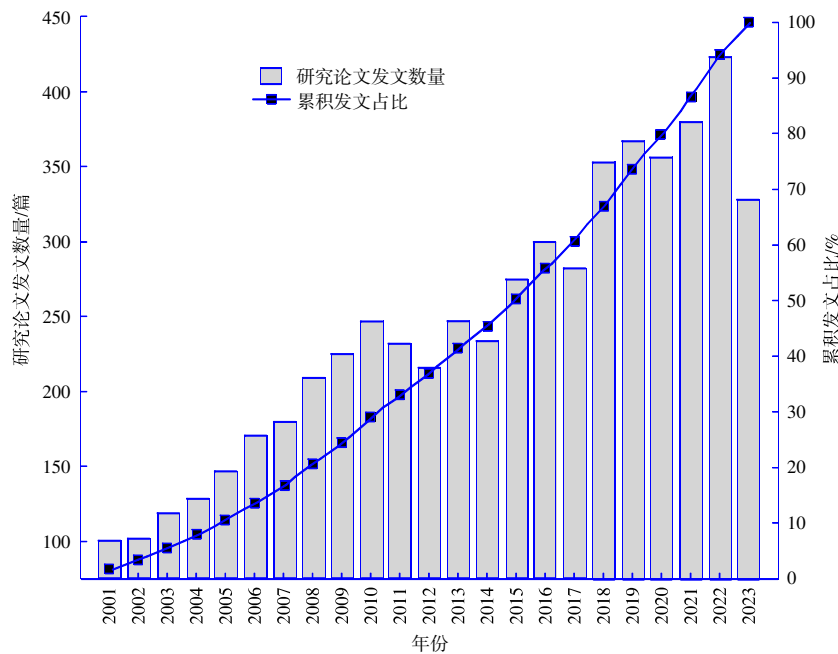


图 2 污泥堆肥技术的年度研究论文发文数量及累积发文占比

2.1.3 技术成熟度分析

根据研究论文历年发表数量, 模拟出污泥堆肥的技术成熟度分析 S 型曲线及 Fisher-Pry 曲线。S 型曲线如图 3(a)所示, 污泥堆肥技术相关研究

在 2010 年左右进入高速增长阶段, 目前仍保持快速发展态势。Fisher-Pry 曲线如图 3(b)所示, 污泥堆肥技术成熟度在 2012 年达到 50%, 在 2023 年达到 78%, 2050 年约达到 98%, 2052 年左右

将达到成熟，预示着污泥堆肥技术在未来近 20 a 具有巨大的创新及发展潜力。由于技术发展等因

素影响，具体成熟度还需要经过相关专家论证和行业实际验证。

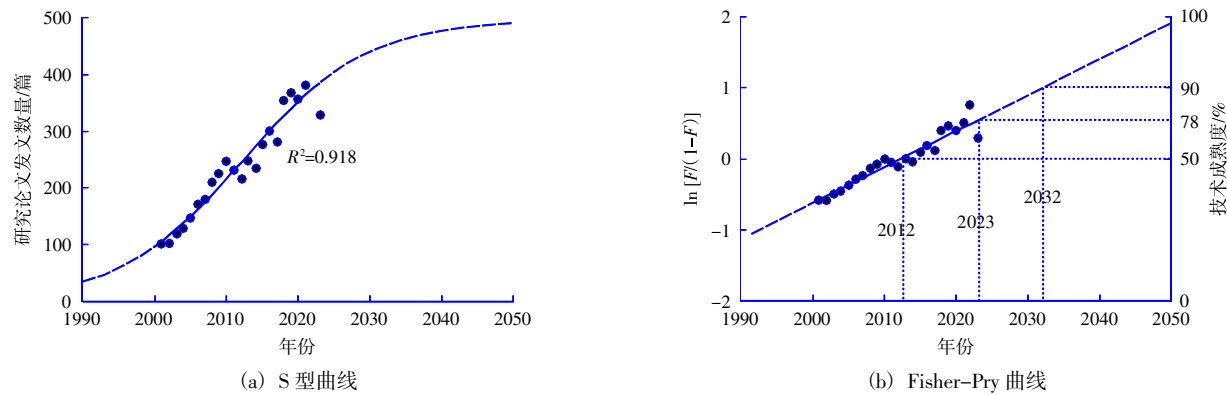


图 3 污泥堆肥的技术成熟度分析 S 型曲线及 Fisher-Pry 曲线

2.2 发文国家贡献分析

在 Web of Science 检索系统精炼作者地址信息，发现关于污泥堆肥技术的研究论文主要来自于 113 个国家/地区。表 1 所列为总发文量排名前 10 的国家，并列出了各国的发文占比、平均单篇被引和 h 指数及其排名。

中国的累积发文、平均单篇被引次数、国际合作发文量及 h 指数均排名较好，体现出我国学者在污泥堆肥领域的较高学术贡献及影响。这主要得益于我国高度重视环境保护和资源循环利用，相关政策如《水污染防治行动计划》(简称“水十

条”)明确要求提高污泥处理处置水平，确保污泥稳定化、无害化和资源化处理^[8]。这些政策的出台为污泥堆肥技术的发展提供了强大的推动力，并促使行业向规范化、标准化方向发展。西班牙作为代表性的欧盟成员国，在污泥堆肥技术领域表现突出。欧盟对污泥处置有着明确的指导原则和限制，鼓励采用环境友好的处理方式，如堆肥化，以减少填埋和焚烧的比例。西班牙拥有诸多在环境科学与工程领域具有国际影响力的大学和研究机构，助力污泥处理领域的学术发展，它们在污泥处理技术的研发上扮演着重要角色。

表 1 发文贡献排名前 10 的国家

国家	总发文量(排名)	发文占比/%	平均单篇被引次数(排名)	国际合作发文量(排名)	h 指数(排名)
中国	1 342(1)	23.87	36.38(3)	329(1)	107(1)
西班牙	737(2)	13.11	40.31(1)	210(3)	84(2)
美国	453(3)	8.06	34.33(6)	212(2)	66(3)
波兰	368(4)	6.54	18.34(9)	49(10)	44(7)
印度	324(5)	5.76	34.40(5)	107(6)	57(5)
法国	319(6)	5.67	38.96(2)	144(4)	62(4)
意大利	313(7)	5.57	34.88(4)	128(5)	56(6)
巴西	244(8)	4.34	15.68(10)	51(9)	30(9)
日本	208(9)	3.70	27.21(8)	90(7)	41(8)
加拿大	195(10)	3.47	27.22(7)	89(8)	41(8)

2.3 发文期刊分析

在 Web of Science 检索结果窗口，以出版物标题进行精炼，得到关于污泥堆肥技术堆肥发文明期刊共计 205 个。其中，刊文数量在 100 篇以上的有 9 个。表 2 所列为污泥堆肥领域刊发论文排名前 10 的期刊，均属于环境领域的经典期刊。其中

刊文量最多的 Bioresource Technology 共刊发论文 532 篇，占到总发文量的 9.46%，表明其在污泥处理领域的高认可度。值得注意的是，所列期刊的影响因子基本呈逐年增长的趋势，表明环境治理相关研究影响力的逐步提升，尤其是固体废物的处置及利用。

表 2 污泥堆肥领域刊发论文排名前 10 的期刊

排名	期刊	发文量/篇	h 指数	IF (2023)	所属国家
1	Bioresource Technology	532	98	11.4	荷兰
2	Waste Management	295	62	8.1	美国
3	Science of the Total Environment	206	50	9.8	荷兰
4	Environmental Science and Pollution Research	183	33	5.8	德国
5	Journal of Environmental Management	172	37	8.7	英国
6	Chemosphere	145	51	8.8	英国
7	Journal of Hazardous Materials	130	53	13.6	荷兰
8	Compost Science Utilization	129	26	0.969	美国
9	Journal of Cleaner Production	114	42	11.1	美国
10	Communications in Soil Science and Plant Analysis	97	18	1.8	美国

2.4 高被引论文分析

高被引论文(Highly Cited Paper)是指在特定学科领域中, 其被引用次数在 ESI(Essential Science Indicators, 基本科学指标)学科分类中排进了全球前 1%的论文, 可较为客观地体现该学科领域的关注热点。根据在 Web of Science 中结果, 污泥堆肥领域的高被引论文共有 30 篇。表 3 所列污泥堆肥主题被引频次排名前 10 的论文, 发表年份集中于 2014—2020 年。值得注意的是, 排名前 10 的高被引论文, 中国学者占据 6 篇。中国在污泥堆肥领域中具有高质量产出, 并且在国际学术界享有声誉, 得益于其在技术创新、政策支持、广泛应用、环境适应性以及国际合作等方面的综合优势。我国学者于 2015 年发表在 Environmental

Science & Technology 期刊的《Antibiotic resistome and its association with bacterial communities during sewage sludge composting》^[25]以 680 的被引频次位居首位。该文指出, 堆肥被广泛用于城市污水污泥的循环利用, 以改善土壤的性质, 是一种向土壤中传播抗生素耐药细菌和基因潜在途径。研究采用高通量定量 PCR 和基于 16S rRNA 基因的 illumina 测序明晰了实验室规模的污水污泥容器堆肥过程中 ARGs 和细菌群落的动态, 揭示了污泥堆肥过程中抗生素耐药基因(ARGs)的动态变化及其机制。排名第 2 的高被引论文聚焦嗜嗜热堆肥在污水污泥中抗生素抗性基因及可移动遗传因子去除中作用^[26], 为污泥堆肥质量的提升提供理论参考。从高被引论文列表可得, 近年来污泥堆肥技术的关注重点主要为污泥堆肥的高质量发展及对土地利用的安全性研究。许多国家和地区制定了严格的环保法规管理污泥的处理和处置, 如欧盟的《城市污水处理指令》(Urban Waste Water Treatment Directive, UWWTD)和美国的《清洁水法》(Clean Water Act), 这些法规不仅限定了污泥排放标准, 还鼓励或要求采用如堆肥等资源回收技术。另一方面, 随着世界范围内对公共卫生意识的提高, 确保堆肥产品中病原体、重金属和其他有害物质含量低于安全阈值成为关键考虑因素, 推动了更为严格的质量控制和后处理技术的发展。以上原因均促进了污泥堆肥技术在全球范围内的高质量发展。

表 3 排名前 10 的污泥堆肥技术主题高被引论文

排名	文章题目	第一单位国别	年份	发表期刊	被引次数/次
1	Antibiotic resistome and its association with bacterial communities during sewage sludge composting	中国	2015	Environmental Science & Technology	680
2	Hyperthermophilic composting accelerates the removal of antibiotic resistance genes and mobile genetic elements in sewage sludge	中国	2018	Environmental Science & Technology	313
3	Sewage sludge, compost and other representative organic wastes as agricultural soil amendments: Benefits versus limiting factors	葡萄牙	2015	Waste Management	312
4	Identification and quantification of macro- and microplastics on an agricultural farmland	德国	2018	Scientific Reports	429
5	Assessing the influence of compost and biochar amendments on the mobility and toxicity of metals and arsenic in a naturally contaminated mine soil	苏格兰	2014	Environmental Pollution	330
6	Hyperthermophilic composting accelerates the removal of antibiotic resistance genes and mobile genetic elements in sewage sludge	中国	2018	Environmental Science & Technology	313
7	Sewage sludge, compost and other representative organic wastes as agricultural soil amendments: Benefits versus limiting factors	葡萄牙	2015	Waste Management	312
8	Changes in physical, chemical, and microbiological properties during the two-stage co-composting of green waste with spent mushroom compost and biochar	中国	2014	Bioresource Technology	302
9	Effect of precursors combined with bacteria communities on the formation of humic substances during different materials composting	中国	2017	Bioresource Technology	228
10	Development, current state and future trends of sludge management in China: Based on exploratory data and CO ₂ -equivalent emissions analysis	中国	2020	Environment International	215

2.5 关键词及研究热点演进分析

从 Web of Science 获取的数据按 5 个时间跨度分类并导出：2001—2005 年、2006—2010 年、2011—2015 年、2016—2020 年以及 2021—2023 年。随后，运用 VOSviewer 工具对每一时间段的作者关键词进行分析，研究热点随时间的演变趋势在一定程度上能通过关键词的出现年代体现。在检索年限中，污泥堆肥研究的关键词由“降解”、“pH”、“微生物活性”、“C/N 比”、“成熟度”转向“腐殖化”、“重金属”、“酶活性”、“生物炭”、“抗性基因”、“氮流失^[9]”、“微塑料”、“宏基因组学”、“可移动遗传因子”等。污泥堆肥研究经历了从基础理论建立到工程应用推广的过程，并逐步提高环境效益并注重公众健康与安全考量。面对逐步提升的公共卫生意识，污泥堆肥技术要确保堆肥中的病原体、重金属及各类有害物质^[26]水平低于既定的安全标准，并且已经成为了一个核心关注点。

“重金属”贯穿于污泥堆肥技术发展的全过程，相信在公共卫生意识的引领下，该主题将得到持续关注。“共堆肥(2022.29)”、“可移动遗传因子(2022.36)”、“微塑料(2022.37)”、“氮流失(2022.38)”、“宏基因组学(2022.38)”、“重金属(2022.50)”等共同构成了污泥堆肥研究的新热点。面对当今环境与健康领域的挑战，污泥堆肥技术正展现出重要进展，尤其在资源循环利用意识增强的背景下，共堆肥策略成为了研究的核心。该策略涉及将污泥与农业废弃物、食品废料等有机物混合堆肥，旨在提升堆肥的营养价值与整体品质，同时有效减轻单一污泥堆肥的弊端，包括减少病原体载量和控制恶臭排放。此外，随着宏基因组学的深入应用，科研重点正转向监控污泥内的可移动遗传因子，如耐药基因，力求在堆肥过程中限制这些因子的传播，守护土壤与食物链的安全。微塑料作为新出现的全球性环境威胁，在污泥堆肥中的残留引发了广泛担忧^[27]。因此，技术创新聚焦于开发高效策略以减少微塑料释放至环境，包括改进预处理技术和采用高级过滤材料。另一方面，宏基因组学工具的运用使科学家能精确追踪堆肥过程中微生物群落的变化，从而实现堆肥过程的精细化管理，加速成熟过程，确保产品的无害性。这一进展凸显了数据科学与生物信息学在推动堆肥技术进步，优化配方设计及预测产品质量方面的关键作用。

总而言之，污泥堆肥技术正不断演进，趋向于更加环保、高效且安全的解决方案，旨在通过科技的力量应对复杂的环境保护需求，推动可持续发展的实践。

2.6 污泥堆肥技术专利分析

专利申请趋势如图 4 所示，在 2009—2010 年专利申请数量出现爆发式增长，在 2011 年之后申请数量趋于稳定，在“十一五”与“十二五”期间，我国污泥处置技术实现了从无到有、从点到面的突破，取得了阶段性成果^[28]。其中，CJ/T 309—2009《城镇污水处理厂污泥处置农用泥质》、CJ/T 362—2011《城镇污水处理厂污泥处置林地用泥质》与 GB/T 24600—2009《城镇污水处理厂污泥处置土地改良用泥质》为污泥堆肥的标准化作出了规定，对污泥堆肥的方法提出了明确的要求。从专利授权比例来看，从 2014 年开始专利授权比例逐年下降，这与专利审查标准的提高息息相关，质量和技术创新将成为未来竞争的关键。未来的研究应更加注重提高污泥堆肥技术的核心竞争力，比如通过技术创新降低成本、提高效率和产品质量，以及加强环境风险评估和控制，以适应日益严格的环保法规和社会期望。

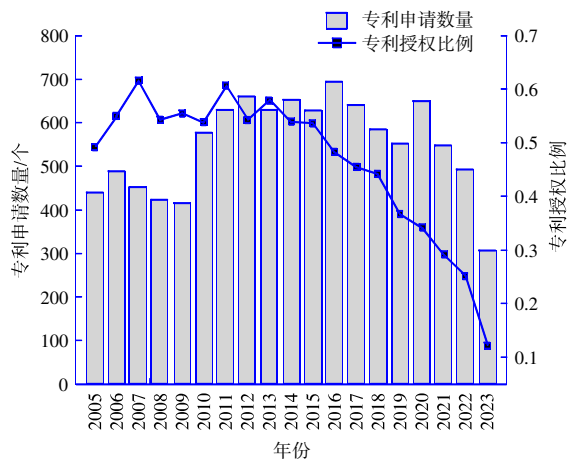


图 4 污泥堆肥专利申请与授权趋势

由图 5 可知，美国是污泥堆肥领域专利申请数量最多的国家，共发表 2 622 篇。中国专利申请数量仅次于美国，共有 1 493 篇。美国在污泥堆肥领域的专利申请数量领先，反映出其在该领域的技术创新和研发投入。而中国紧随其后，表明了中国在这一领域的发展潜力和市场前景。随着中国的污泥堆肥相关政策支持和投资增加，污泥处置技术得到了快速发展。

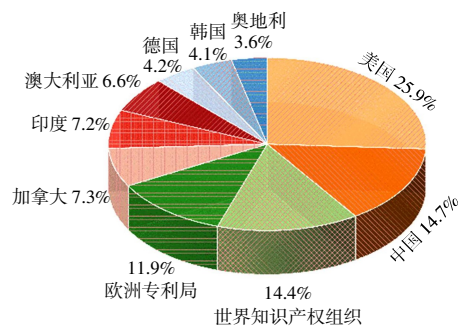


图5 污泥堆肥专利申请的地区分布

从图6可知,出现的“污泥”、“堆肥”、“发酵”等关键词指向“成本低”的次数最多,这说明了专利的申请者对如何降本增效关注度较高。污泥堆肥的研究重点包括优化堆肥过程的工艺参数,如通风率、水分含量和温度控制,以及探索新型添加剂以提高堆肥效率和产品质量^[29]。此外,“减少污染”也受到了广泛关注,研究者着重研究堆肥过程中污染物的转化和去除机制,特别是重金属和病原体的稳定性,以确保堆肥产品的安全性^[30]。

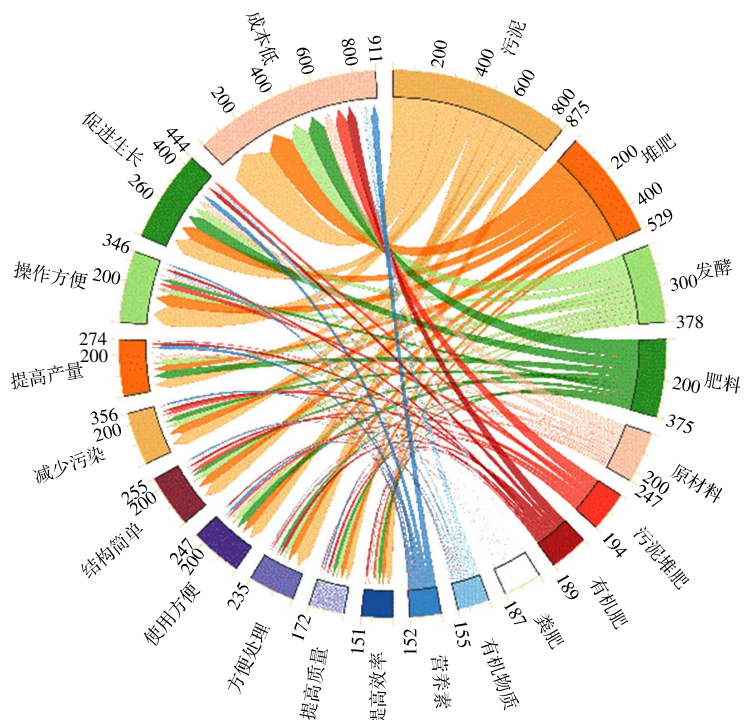


图6 污泥堆肥专利重点关注热力图

3 结语

基于 Web of Science 核心数据库,对 2001—2023 年出版的有关污泥堆肥研究的 5 623 篇研究论文进行了文献计量分析。在过去的 20 a 间,污泥堆肥主题的研究论文数量稳步增长,目前仍处于快速增长阶段,该技术在未来的 20 a 仍有很大的创新及发展潜力。我国的发文数量及发文质量均较高,体现出我国较高的学术贡献及声誉。鉴于污泥堆肥技术服务于清洁生产系统建设及循环经济的巨大潜力,面对逐步提升的公共卫生意识,病原体、重金属及各类有害物质的安全控制将成为污泥堆肥技术领域研究重点与热点。

参考文献:

[1] 赵莹莹,赵青玲. 污泥资源化利用技术的研究进展[J]. 能源研究与利用,2023(5):40-44.

[2] XIONG R,GAO X,TU X,et al. Heavy metal remediation in sludge compost:Recent progress[J]. Journal of Renewable Materials,2022,10(2):469-486.

[3] MENG L Q,LI W G,ZHAO Y,et al. Insights into influences of sucrose amendment on nitrification and denitrification in sewage sludge composting[J]. Chemosphere,2021,276(14):130245.

[4] ZENG G M,ZHANG L H,DONG H R,et al. Pathway and mechanism of nitrogen transformation during composting:Functional enzymes and genes under different concentrations of PVP-AgNPs[J]. Bioresource Technology,2018(253):112-120.

[5] QIU X W,ZHOU G X,WANG H J,et al. The behavior of antibiotic-resistance genes and their relationships with the bacterial community and heavy metals during sewage sludge composting[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety,2021,216(1):112190.

[6] LIU L,YE Q Y,WU Q,et al. Effect of biochar addition on sludge aerobic composting and greenbelt utilization[J]. Environmental Technology & Innovation,2021,21(10):101279.

- [7] 王涛,马芳,修玉凤,等. 洛阳瀍东污水处理厂污泥无害化处理工程设计[J]. 中国给水排水,2013,29(6):51-54.
- [8] 郑秀亮. “水十条”开启环保产业盛宴[J]. 环境,2015(6):56-58.
- [9] ZHAO Y,LI W G,CHEN L,et al. Effect of enriched thermotolerant nitrifying bacteria inoculation on reducing nitrogen loss during sewage sludge composting[J]. Bioresource Technology,2020,311:123461.
- [10] 王岩松. 城镇污水污泥好氧覆膜堆肥与资源化利用研究[D]. 西安:长安大学,2023.
- [11] MORSINK-GEORGALI P Z,KYLILI A,FOKAIDES P A,et al. Compost versus biogas treatment of sewage sludge dilemma assessment using life cycle analysis[J]. Journal of Cleaner Production,2022,350:131490.
- [12] DANIEL G,JOAN C,ANTONI S,et al. A systematic study on the VOCs characterization and odour emissions in a full-scale sewage sludge composting plant[J]. Journal of Hazardous Materials,2019,373(5):733-740.
- [13] ZHENG G,WANG Y W,WANG X K,et al. Oxygen monitoring equipment for sewage-sludge composting and its application to aeration optimization[J]. Sensors,2018,18(11):4017.
- [14] NASERIAN E S,CHERAGHI M,LORESTANI B,et al. Qualitative investigation of sewage sludge composting:effect of aerobic/anaerobic pretreatments[J]. Arabian Journal of Geosciences,2021,14(10).
- [15] ZHENG G O,WANG X K,CHEN T B,et al. Passivation of lead and cadmium and increase of the nutrient content during sewage sludge composting by phosphate amendments[J]. Environmental Research,2020,185:109431.
- [16] LU W J,YE R,YANG Z,et al. Performance evaluation in composting of sewage sludge with different bulking agents[J]. Journal of environmental engineering,2020,146(6):05020002.
- [17] SHEN Y J,CHEN T B,GAO D,et al. Online monitoring of volatile organic compound production and emission during sewage sludge composting[J]. Bioresource Technology,2012,123:463-470.
- [18] PAZ G A,LEON-MORCILLO R,GUZMAN S,et al. Pharmaceutical active compounds in sewage sludge:Degradation improvement and conversion into an organic amendment by bioaugmentation-composting processes[J]. Waste Management,2023,168:167-178.
- [19] CUI P,BAI Y D,LI X,et al. Enhanced removal of antibiotic resistance genes and mobile genetic elements during sewage sludge composting covered with a semi-permeable membrane[J]. Journal of Hazardous Materials,2020,396:122738.
- [20] 郭祥,李瑞祎,张蕊,等. 基于文献计量的生物质气化研究发展态势分析[J]. 环境工程,2022,40(7):232-239,131.
- [21] MAO G Z,HU H Q,LIU X,et al. A bibliometric analysis of industrial wastewater treatments from 1998 to 2019[J]. Environmental Pollution,2021,275(12):115785.
- [22] HIRSCH J E. An index to quantify an individual's scientific research output that takes into account the effect of multiple coauthorship[J]. Scientometrics,2010,85(3):741-754.
- [23] ELLEGAARD O. The application of bibliometric analysis:disciplinary and user aspects[J]. Scientometrics,2018,116(1):181-202.
- [24] VAN ECK N J,WALTMAN L. Software survey:VOSviewer,a computer program for bibliometric mapping[J]. Scientometrics,2010,84(2):523-538.
- [25] SU J Q,OUANG W Y,WEI B,et al. Antibiotic resistome and its association with bacterial communities during sewage sludge composting[J]. Environmental Science & Technology,2015,49(12):7356-7363.
- [26] LIAO H P,LU X M,RENSING C,et al. Hyperthermophilic composting accelerates the removal of antibiotic resistance genes and mobile genetic elements in sewage sludge[J]. Environmental Science & Technology,2018,52(1):266-276.
- [27] CHEN Z,ZHAO W Q,XING R Z,et al. Enhanced in situ biodegradation of microplastics in sewage sludge using hyperthermophilic composting technology[J]. Journal of Hazardous Materials,2020,384(1):121271.
- [28] 车悦驰,颜蓓蓓,王旭彤,等. 污泥堆肥技术及工艺优化研究进展[J]. 环境工程,2021,39(4):164-173.
- [29] 孟国欣,查同刚,巩潇,等. 污泥添加园林废弃物堆肥过程参数变化及腐熟度综合评价[J]. 生态环境学报,2018,27(8):1538-1546.
- [30] 洪磊,周娇. 好氧堆肥对污泥重金属的影响分析[J]. 价值工程,2016,35(21):210-212.