

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2024.02.006

字晓, 侯红阳, 沈宗专, 等. 基于文献计量的近 30 年堆肥氮排放和转化研究分析. 土壤, 2024, 56(2): 281–290.

基于文献计量的近 30 年堆肥氮排放和转化研究分析^①

字晓^{1,3}, 侯红阳^{2,3}, 沈宗专^{2,3}, 李荣^{2,3*}

(1 大理州农业科学推广研究院, 云南大理 671005; 2 南京农业大学三亚研究院, 海南三亚 572025; 3 南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095)

摘要: 堆肥过程中氨气挥发和氮素损失等严重威胁环境质量、影响堆肥成品质量, 是制约堆肥工艺发展的重要因素。利用 Web of Science(WOS)核心合集英文数据库和 CNKI 数据库, 通过对 1993—2022 年间在堆肥领域对氮排放和转化的相关文献进行计量分析并统计归类, 了解近 30 年国内外堆肥领域有关氮排放和转化研究的趋向及特点, 为今后相关研究提供思路。研究发现, 我国是该领域发文量最高的国家, 有较好的研究基础和研究成果, 但存在国内作者之间研究合作团体不多、研究机构之间联系薄弱、核心研究机构之间缺乏交流合作的问题; 该领域目前处于研究热门期, 近十年发文量和引文量都大幅提升; 该领域今后的发展预计会聚焦于微生物群落结构解析、由微生物驱动的反硝化作用和反硝化作用过程、堆肥重金属富集以及堆肥成熟度等方面。

关键词: 堆肥, 氮排放, 氮素转化, 文献计量分析

中图分类号: G353.1; S141.4 **文献标志码:** A

Analysis of Research on Nitrogen Emissions and Conversion from Composting in Past 30 Years Based on Bibliometrics

ZI Xiao^{1,3}, HOU Hongyang^{2,3}, SHEN Zongzhuan^{2,3}, LI Rong^{2,3*}

(1 Dali Academy of Agricultural Sciences, Dali, Yunnan 671005, China; 2 Sanya Institute of Nanjing Agricultural University, Sanya, Hainan 572025, China; 3 College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: Ammonia volatilization and nitrogen loss during composting process seriously threaten the environmental quality and affect the quality of composting products, which are the crucial factors restricting the development of composting technology. Based on the Web of Science (WOS) core collection English database and CNKI database, the literatures on nitrogen emission and conversion during composting published from 1993 to 2022 were quantitatively analyzed and statistically classified to understand the trend and characteristics of the research on nitrogen emission and conversion during composting at home and abroad in the past 30 years, which could provide ideas for future research. It was found that China published the largest number of documents in this field, indicating that China has accumulated a solid research foundation and obtained great research achievements. However, there are problems with limited research cooperation groups among domestic authors, weak connections between research institutions, and a lack of communication and cooperation among core research institutions. Currently, the field is in a hot research period with a significant increase in the number of publications and citations in the last decade, and the future developments in this field are expected to focus on microbial community structure analysis, nitrification and denitrification processes driven by microbes, heavy metal enrichment in compost, and compost maturity.

Key words: Composting; Nitrogen emissions; Nitrogen transformation; Bibliometric analysis

国内畜禽粪污年产量约 38 亿吨, 农作物秸秆理论年产量约 9.0 亿吨, 超过 60% 的废弃物得不到妥善处理, 造成了严重的环境污染和资源浪费^[1-3], 而农业废弃物资源化利用是解决以上废弃物的最有效

^①基金项目: 南京农业大学三亚研究院引导资金面上类项目(NAUSY-MS10)、中央高校基本科研业务费专项资金项目(QTPY2023003)和江苏省农业科技自主创新资金项目(CX(22)2043)资助。

* 通讯作者(lirong@njau.edu.cn)

作者简介: 字晓(1987—), 女, 云南巍山人, 硕士, 农艺师, 主要从事农业环境保护研究。E-mail: 651552504@qq.com

措施。我国有机固体废弃物资源化利用方式有基质化、饲料化、材料化、肥料化以及能源化等,其中资源利用率最高的为肥料化^[4]。堆肥操作简单,能提高农业废弃物中有机质、氮、磷和钾等养分的利用率,是一种绿色高效的资源化途径,其是在控制条件下,依靠微生物作用于有机废弃物,促进废弃物降解为稳定腐殖质的一种发酵过程^[5-6]。因此,和发酵一样,堆肥也因供氧情况不同而存在着好氧堆肥和厌氧堆肥两种过程。由于好氧堆肥堆温可达 70 ℃ 以上^[7],能杀灭虫卵、杂草种子和病菌等,使产物无害化,且堆制周期短,因而现代堆肥多使用好氧堆肥。目前,常用的好氧堆肥方法包括静态好氧堆肥、条垛式堆肥和反应器堆肥等,几种方法各有优劣,其中静态好氧堆肥一般无需翻堆,但占地面积大;条垛式堆肥通风好,但不利于堆体温度的保持;反应器堆肥能很好地控制反应条件,然而固定投资及运行成本较高^[8-9]。堆肥过程中关于氧气供应、温度控制、C/N、菌种选择等各种参数都对堆肥效率、成本有较大影响,氨气挥发和氮素损失、转化等情况影响着堆肥成品的质量,是制约堆肥工艺发展的重要因素^[4,10-11]。

文献计量学是对信息载体用统计学和数学方法进行定量分析的一门交叉学科,可以系统地分析某一研究领域的整体发展状况,有效总结该领域研究成果并揭示其未来的发展方向^[12-13]。文献计量学从 1917 年出现萌芽到现在经历了百余年发展过程,如今借助各种可视化软件已经发展得较为成熟,确定了文献计量学研究的若干热点领域,如文献计量学、科学、指标、文献计量分析法、引文分析、影响因子、科学引文索引等,这些研究热点大多是针对文献计量学理论、方法和应用的研究,文献计量学研究日益呈现应用化、综合化和网络化的态势^[14]。

为了解堆肥领域氮排放控制的研究历史情况及最新动向,对该领域研究现状及未来热点进行梳理和把握,本文以堆肥氮排放、氮素转化为主题,运用文献计量的分析方法,对从 Web of Science(WOS)核心合集英文数据库和 CNKI 数据库检索的相关文献进行计量分析,拟从年度发文量的变化、主要分布学科、发文机构、发文期刊分布和发文关键词等角度,系统性地对近 30 年来堆肥氮排放控制领域进行解析,以期为今后该领域研究提供方向性指引。

1 材料与方法

1.1 数据来源

本研究主要采用的文献检索数据库为 Web of

Science(以下简称 WOS)核心合集数据库,该数据库是大型综合性、多学科、核心期刊引文索引数据库,内容涵盖了自然科学、工程技术、社会科学、艺术与人文等领域^[15]。辅助使用 CNKI 数据库,以进一步解析中文期刊发文情况。WOS 核心合集数据库检索时间设置为 1993—2022 年,文献类型限定为 Article 和 Review 两种。以“堆肥氮排放和氮素转化”为主题,其布尔运算式为:(TS = (compos*)) AND TS = (“Nitrogen emission” or “Nitrogen transformation”),检索后获得文献 367 篇;CNKI 数据库检索文献发表时间同样为 1993—2022 年,检索关键主题为“堆肥”并“氮”或“氮素”或“氮元素”,共得到相关文献 1 378 篇,再以此为基础利用“氮排放”“氮转化”等主题词继续检索,得到相关文献 386 篇,剔除会议论文 2 篇、成果 3 个,手动选择“学术期刊”类别,最后汇总出符合的中文期刊论文共 128 篇。

1.2 研究方法

将在 WOS 检索出的 367 篇文献的结果导出,导入 Histcite 软件并选择按文献发表国家、文献发布日期进行排序提取数据,主要注意的指标是本地引用次数(Total local citation score, TLCS)和总引用次数(Total global citation score, TGCS),TLCS 指的是某一文献在导入数据中的总被引次数,而 TGCS 则是指在整个 WOS 数据库中的总被引次数。由于导入 Histcite 的文章均是与检索词有关的该领域文章,TLCS 更能反映文献对某一领域的影响程度,TLCS 值越高,关注度越高,说明文献越重要^[16]。利用 Excel 数据处理软件对 WOS 检索结果分析数据及 Histcite 中提取的数据进行整理作图,可以直观了解国内外年度发文量、文献来源情况。将检索结果导入 CiteSpace 和 VOSviewer 软件,对关键词进行可视化分析,获得近 30 年(1993 年 1 月—2022 年 12 月)的关键词共现图和关键词突现情况,可以了解各时间段该研究领域的研究热点和发展趋势。

由于 CNKI 数据库检索出的数据不兼容使用 Histcite、VOSviewer 等软件的诸多功能,因此直接使用 CNKI 网站自分析结果,并利用 Excel 对检索出的中文文献进行整理统计。

2 结果与分析

2.1 年度及各国发文量分析

WOS 自带引文报告,可以下载检索结果按年份的被引频次和发文量分布图。结果如图 1 所示,在检索范围内前 10 年(1993—2002 年),在堆肥氮排放和

控制领域的发文量和被引频次都非常低,年发文量均低于 5 篇,被引频次最高的 2000 年也只有 18 次;进入第 2 个 10 年(2003—2012 年),该领域的发文量和被引频次逐渐有了较大提升,2009 年和 2012 年发文量分别为 13 和 12 篇,被引频次也达到了 155 和 156 次;到最近 10 年(2013—2022 年),该领域的发文量和被引频次都突飞猛进,最近的 2022 年发文量高达 59 篇,被引频次高达 1 971 次。说明近 20 年该领域研究热度持续升高,到最近 10 年达到了历史较高水平,属于高关注度的热点领域。

各国家/地区发文量分析可以一定程度上看出该

国家/地区对某科学领域的研究重视程度。由表 1 可知,在堆肥氮排放和控制这一领域,中国的发文量遥遥领先,是第 2 名(美国)的 3.7 倍,占发文量前 10 位国家发文总量的 56.35%,表明我国对该领域研究的重视程度较高。从被引次数可以反映出该国家/地区在该领域研究成果的水平以及影响力^[17],中国发文量的本地引用次数(TLCS)和总引用次数(TGCS)均为第一,达到了 170 次和 4 600 次,表明我国对该领域的研究贡献非常大。另外,西班牙作为榜内第 8 名的发文量,却达到了第 2 高的 TLCS 和 TGCS,可以看出西班牙在该领域有较强的国际学术影响力。

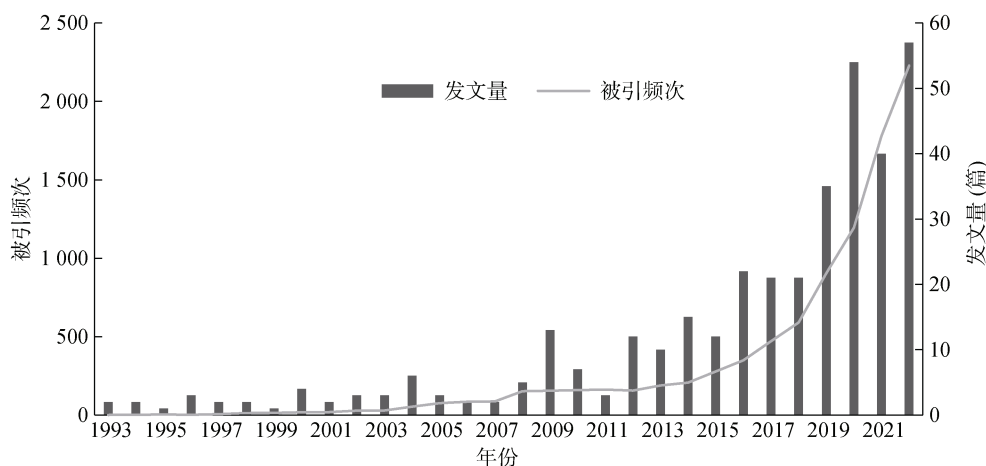


图 1 按年份的被引频次和发文量分布

Fig. 1 Citation frequency and publication distribution by year

表 1 1993—2022 年堆肥氮排放和控制领域发文量前 10 位的国家/地区

Table 1 Top 10 countries/regions in field of nitrogen emissions and control in composting from 1993 to 2022

序号	国家	发文量(篇)	本地引用次数 TLCS	篇均本地引用次数	总引用次数 TGCS	篇均总引用次数
1	中国	213	170	0.80	4 600	21.60
2	美国	45	12	0.27	1 354	30.09
3	日本	21	9	0.43	353	16.81
4	印度	20	12	0.60	560	28.00
5	澳大利亚	18	8	0.44	620	34.44
6	加拿大	16	3	0.19	313	19.56
7	德国	14	3	0.21	370	26.43
8	西班牙	14	45	3.21	1 713	122.36
9	意大利	9	1	0.11	300	33.33
10	瑞士	8	1	0.13	189	23.63

2.2 文献发表学科分布及研究机构分布

通过 WOS 自带的数据分析系统进行分析,发现堆肥氮排放和控制领域的研究涵盖多个学科(图 2),发表文章数量排名前 5 位的学科为环境科学、生物技术和应用微生物学、能源燃料学科、农业工程学科、土壤学。堆肥不仅可实现畜禽粪污、农业废弃物、污泥的减量化和无害化,其产物还可作为有机肥料改良

土壤,循环利用,具有良好的环境效益^[9]。环境科学是该领域最重要的学科分布可以说是在意料之中,发文量分布第 2、第 3 的学科表明,目前对堆肥氮排放和控制领域的研究方向主要集中在使用生物技术的方法筛选有用微生物以提高堆肥效率,从而减少氮元素的排放,同时降低能源消耗,或产出能源收获环境效益。

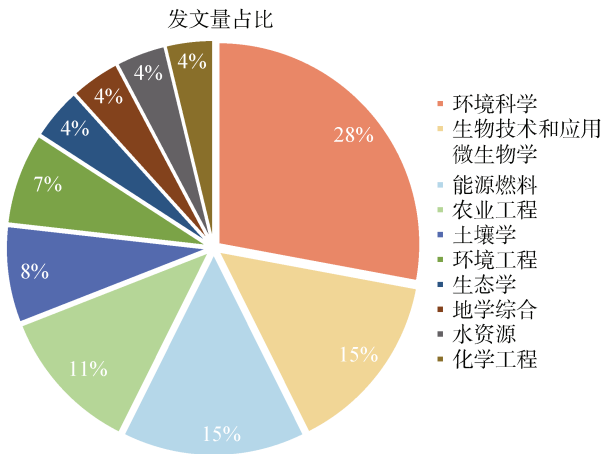


图 2 1993—2022 年堆肥氮排放和控制领域发文量排名前 10 位的学科
Fig. 2 Top 10 disciplines in field of nitrogen emissions and control in composting from 1993 to 2022

使用 VOSviewer 软件得到发文作者研究机构共现图(图 3)，筛选出共作次数至少 2 次的研究机构，共 116 个，其中有一部分机构存在两两连线但与其他机构间均无相互连接，说明这些机构对外合作过少，剔除后实际出点 88 个。圆点越大代表共现作者越多，可以看到中国科学院共现点最大，且与周围多个学校、科研机构有联系，表明其在中国学界的领衔地位。

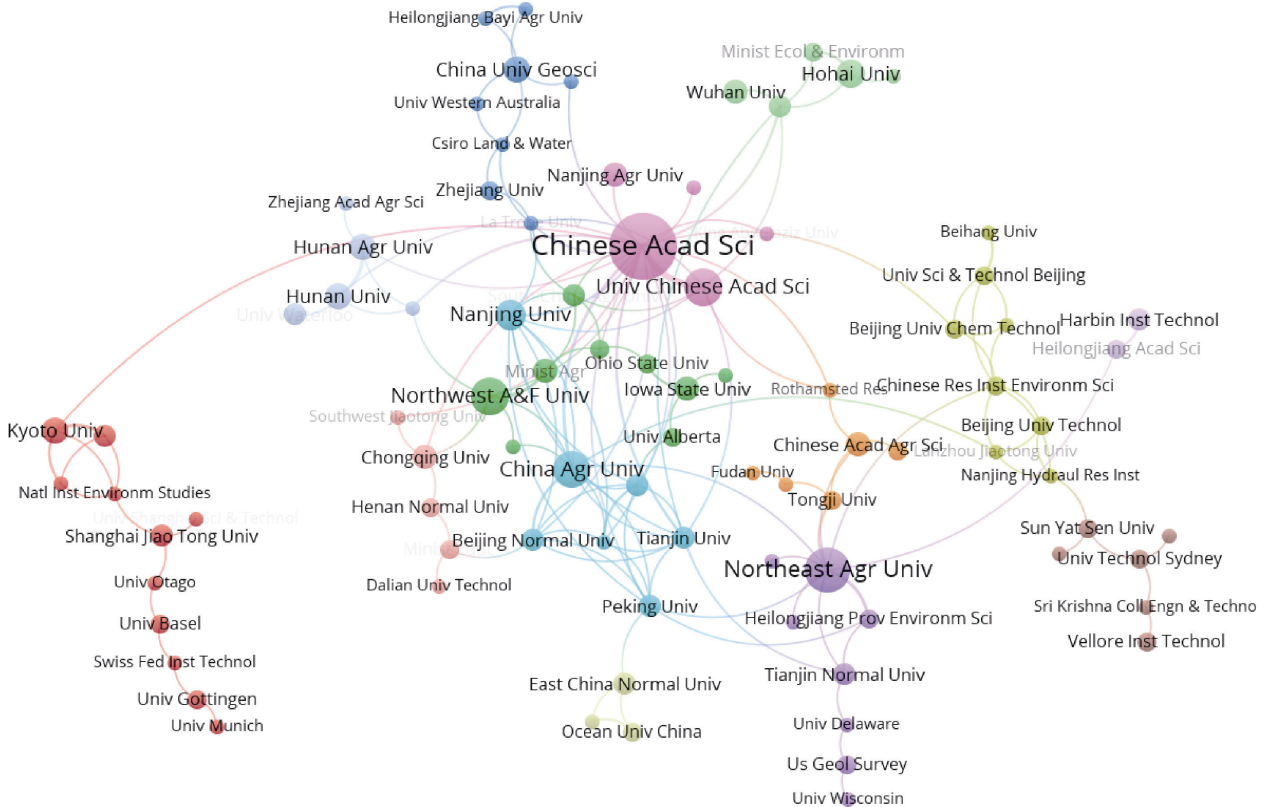


图 3 1993—2022 年堆肥氮排放和控制领域发文作者研究机构共现图
Fig. 3 Co-occurrence chart of authors and research institutions in field of nitrogen emissions and control in composting from 1993 to 2022

其他几个较大的共观点为中国科学院大学、东北农业大学、西北农林科技大学、中国农业大学、南京农业大学，外国机构较少，比较显眼的只有京都大学。

2.3 期刊来源分析

对文献期刊来源进行分析，可为快速查找该领域的研究文献提供依据^[18]。如表 2 所示，发文量居前三位的是 *Bioresource Technology*，*Science of The Total Environment* 和 *Environmental Science and Pollution Research*，发文量分别为 58、22 和 17 篇。其中，*Bioresource Technology* 不仅发文量高，其近 5 年影响因子也高达 11.139，是堆肥氮排放和控制领域具有重要影响地位的期刊。JCR 是一个多学科期刊评价工具，它通过评价期刊之间互相引用的关系，使用总引文数 (total cites)、论文数 (articles)、即时指标 (immediacy index)、影响因子 (impact factor) 和被引半衰期 (cited half-life) 五大指标定量分析，提供了一种基于引文数据的统计信息的期刊评价资源，其收录的期刊有较高水平^[19]，堆肥氮排放和控制领域发文量前 10 位的期刊学科类别分区 (JCR) 均处于 Q1、Q2 分区，且 Q1 占比更大，进一步印证对图 1 的分析，该领域处于研究热度上升期。

表 2 1993—2022 年堆肥氮排放和控制领域发文量前 10 位的英文期刊
Table 2 Top 10 English journals in field of nitrogen emissions and control in composting from 1993 to 2022

序号	期刊	发文量(篇)	本地引用 次数 TLCS	总引用次数 TGCS	近 5 年影响因子	学科类别 分区 JCR
1	<i>Bioresource Technology</i>	58	103	3 455	11.139	Q1
2	<i>Science of The Total Environment</i>	22	10	552	10.237	Q1
3	<i>Environmental Science and Pollution Research</i>	17	5	196	5.053	Q2
4	<i>Journal of Environmental Management</i>	10	7	185	8.549	Q1
5	<i>Waste Environment</i>	10	34	356	9.410	Q1
6	<i>Biogeochemistry</i>	6	0	101	5.709	Q2
7	<i>Biology and Fertility of Soils</i>	6	27	247	7.116	Q1
8	<i>Fuel</i>	6	1	165	7.621	Q1
9	<i>Scientific Reports</i>	6	0	176	5.516	Q2
10	<i>Water Research</i>	6	0	140	13.847	Q1

如表 3 所示,在该领域中文期刊发文量前 3 位的是《农业环境科学学报》《环境科学学报》和《农业工程学报》,发文量分别是 15、7、5 篇,其他期刊发文量较为平均,除《中国生态农业学报》和《农业机械学报》是 2 篇,其他都是 3 篇。影响因子是评估期刊在某一领域的重要程度的指标,该领域中英文发期刊的影响因子都很高,英文期刊最高有 13.847,最低 5.053,中文期刊最高 5.590,最低也有 2.147,

证明该领域研究处于重要地位。针对 1993—2022 年堆肥氮排放和控制领域,国内研究机构位列前位的均为高等院校,西北农林科技大学居首位,发文 12 篇,占 9.38%,其次为中国农业大学、东北农业大学、重庆交通大学和中国科学院大学。另外,图 4、图 5 是在该领域作者和机构合作网络情况,作者之间的合作研究团体不多,核心研究机构间的交流合作较少。

表 3 1993—2022 年堆肥氮排放和控制领域发文量前 10 位的中文期刊
Table 3 Top 10 Chinese journals in field of nitrogen emissions and control in composting from 1993 to 2022

序号	期刊	发文量(篇)	占期刊发文总量比例(%)	复合影响因子
1	农业环境科学学报	15	11.72	4.011
2	环境科学学报	7	5.47	3.139
3	农业工程学报	5	3.91	3.760
4	植物营养与肥料学报	3	2.34	4.446
5	应用生态学报	3	2.34	4.941
6	环境科学	3	2.34	5.590
7	中国农业大学学报	3	2.34	2.753
8	干旱地区农业研究	3	2.34	2.147
9	中国生态农业学报	2	1.56	4.478
10	农业机械学报	2	1.56	4.325

2.4 研究热点分析

2.4.1 关键词突现 使用 CiteSpace 软件可以查看不同时间段关键词的引用突现情况,以此了解堆肥氮排放和控制领域研究热点的演变过程。如表 4 所示,强度最高的词是微生物群落,同时,前 15 个词里,微生物群落、群落、群落结构均有出现,他们的突现时间也在近些年(2017—2022 年, 2020—2022 年,

2013—2016 年),证明在堆肥氮排放和控制领域微生物群落研究是一个特别热门的研究方向。表 4 中出现了硝化作用、反硝化作用以及氧化细菌 3 个词,相关研究也发现微生物驱动的硝化和反硝化作用产生了约占全球 70% 的 N_2O ^[20],可见,对微生物驱动的硝化和反硝化作用的过程研究在堆肥氮排放和控制领域可能有较为重要的作用。

CiteSpace, v. 5.1.R6 (64-bit) Basic
 July 5, 2023 at 3:52:27 PM CST
 C:\S\1: D:\j\bin\k\d\date
 Timespan: 1995-2022 (Slice Length=1)
 Selection Criteria: g-index (k=25), LRF=3.0, L/N=10, LBY=5, e=1.0
 Network: N=315, E=573 (Density=0.0702)
 Largest CC: 18 (6%)
 Nodes Labeled: 1.0%
 Pruning: None

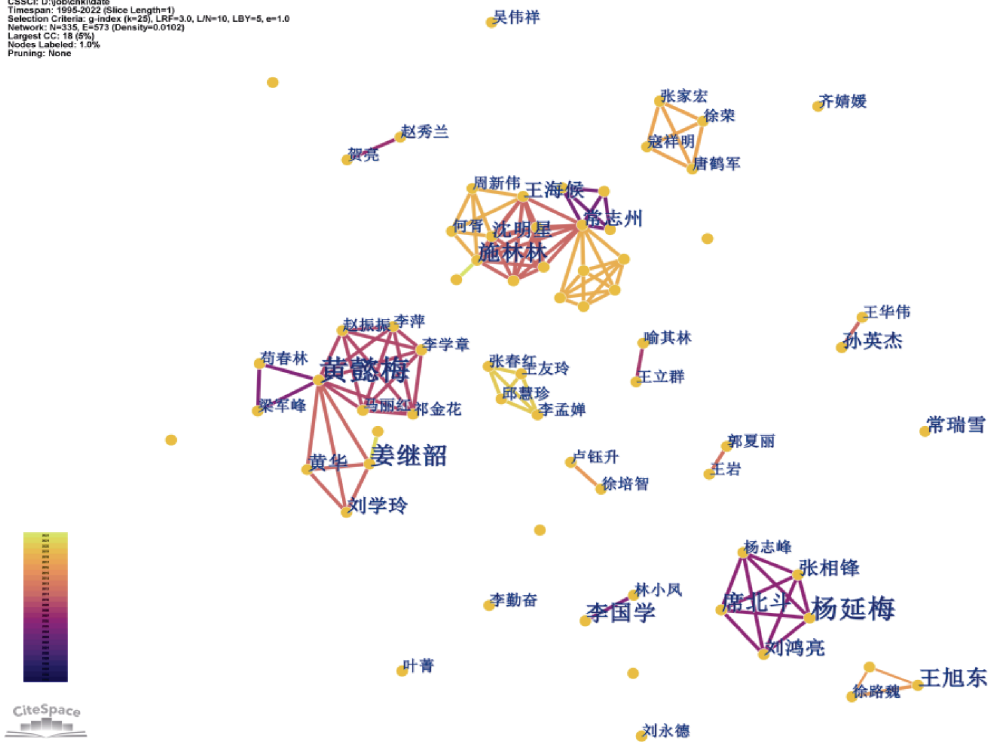


图 4 1993—2022 年堆肥氮排放和控制领域作者合作网络可视化图

Fig. 4 Visualization of author collaboration network in field of nitrogen emissions and control in composting from 1993 to 2022

CiteSpace, v. 5.1.R6 (64-bit) Basic
 July 5, 2023 at 3:34:21 PM CST
 C:\S\1: D:\j\bin\k\d\date
 Timespan: 1995-2022 (Slice Length=1)
 Selection Criteria: g-index (k=25), LRF=3.0, L/N=10, LBY=5, e=1.0
 Network: N=175, E=138 (Density=0.0091)
 Largest CC: 6 (3%)
 Nodes Labeled: 1.0%
 Pruning: None
 Modularity Q=0.9734
 Weighted Mean Silhouette S=1
 Harmonic Mean(Q, S)=0.9865

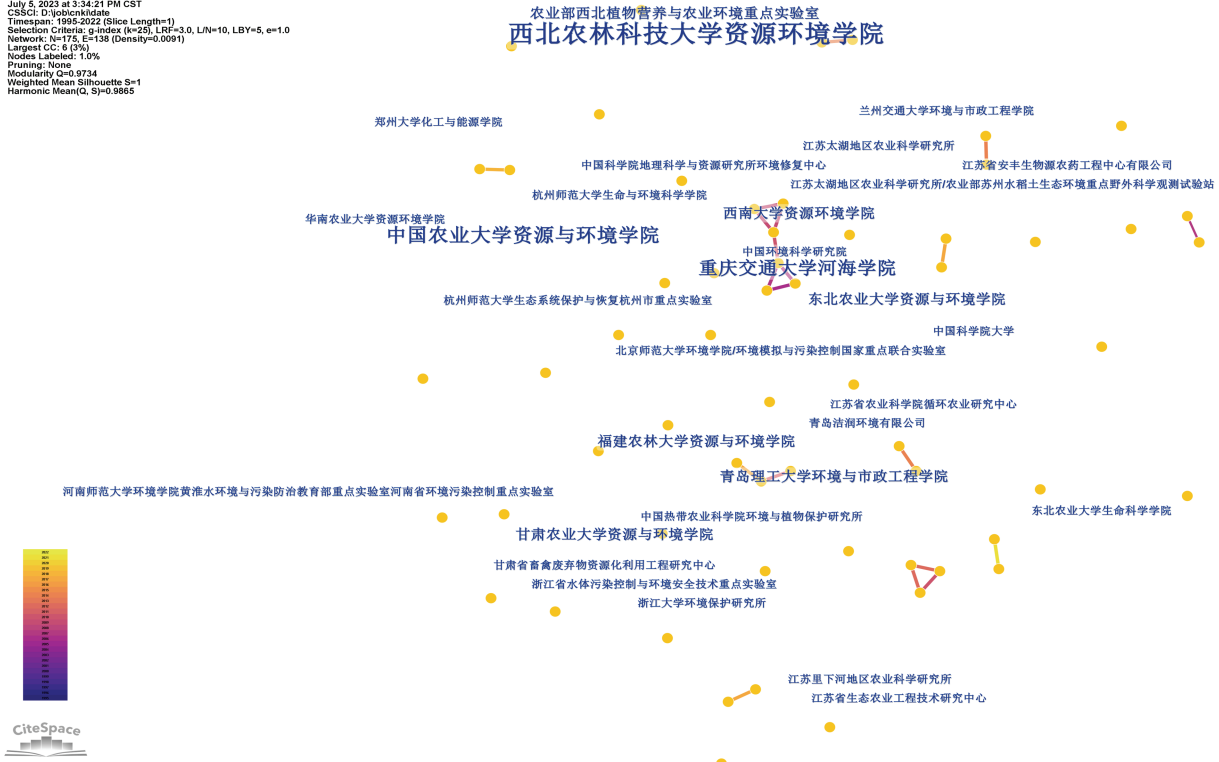


图 5 1993—2022 年堆肥氮排放和控制领域机构合作网络可视化图

Fig. 5 Visualization of institution collaboration network in field of nitrogen emissions and control in composting from 1993 to 2022

表 4 1993—2022 年堆肥氮排放和控制领域突现强度前 15 位的关键词
Table 4 Top 15 keywords with strongest citation bursts in field of nitrogen emissions and control in composting from 1993 to 2022

关键词	年份	突现强度	起始年份	结束年份	突现时段(1993—2022)
微生物群落 microbial community	2017	5.26	2017	2022	-----██████████
重金属 heavy metal	2001	4.35	2018	2019	-----██████-----
成熟度 maturity	2000	4.02	2008	2013	-----██████████-----
硝化作用 nitrification	2011	3.74	2013	2016	-----██████████-----
群落 community	2013	3.63	2020	2022	-----██████████
降解 degradation	2014	3.51	2020	2022	-----██████████
氧化细菌 oxidizing bacteria	2020	3.46	2020	2022	-----██████████
稳定同位素 stable isotope	2014	3.4	2014	2019	-----██████████-----
填充剂 bulking agent	2015	3.08	2015	2018	-----██████████-----
净化湿地 constructed wetland	2011	3.01	2011	2016	-----██████████-----
功能基因 functional gene	2020	3	2020	2022	-----██████████
清除 removal	2011	2.85	2011	2019	-----██████████-----
反硝化作用 denitrification	2010	2.81	2014	2017	-----██████████-----
特性表现 performance	2016	2.81	2016	2022	-----██████████
群落结构 community structure	2013	2.7	2013	2016	-----██████████-----

2.4.2 高频关键词 文献可视化分析软件 VOSviewer 可以绘制导入文献数据的关键词共现网络,反映该领域的研究热点和方向^[21]。用 VOSviewer 软件筛选出现次数为至少 5 次的关键词,共筛出 160 个词。由于数据来源本身就是以“堆肥的氮排放和氮素转化”为主题检索的,因此在前 15 个高频关键词中将“氮转化(nitrogen transformation)”“堆肥(composting)”2 个词去除了,最后得到 158 个高频关键词图,如图 6 和图 7。图 6 为关键词网络可视化,可以看到,出现频率最高的关键词有硝化作用(nitrification)、反硝化作用(denitrification)、多样性(diversity)、污水污泥(sewage-sludge)、成熟度(maturity)、生物质炭(biochar)等等。而在 VOSviewer 软件的叠加可视化(图 7)里会发现,近 10 年来的研究方向中,“细菌群落(bacterial community)”与硝化作用、反硝化作用、多样性、污水污泥、成熟度、生物质炭均有相关,表现出研究的延伸发展状态,2.4.1 的高强度突现关键词分析也有相同结论——现在最新热门研究是微生物方向。

3 讨论与结论

化肥是重要的农业生产资料,但过量施用会使农产品品质下降、徒增生产成本,并造成相应的环境危

害^[22]。如今,我国农业向着“节本增效”的方向发展,走“减用量、调结构、转方式”的可持续发展之路^[23],一方面是降低化肥使用量、调整施肥种类,另一方面就是化肥有机肥配合施用的“化肥+”模式。有机肥能够提高土壤养分、改善土壤理化性质、增加微生物群落多样性、提高土壤酶活性^[24],堆肥在处理有机废弃物的同时生产有机肥,具有较高的环保效益;加之堆肥发酵效率高、稳定化时间相对较短、无二次污染、设备投资少、管理方便,对绿色农业发展具有举足轻重的地位。有研究表明,堆肥过程中约有 16.1% ~ 22.6% 的氮素以 NH_3 的形式损失^[25],还有 0.2% ~ 9.9% 的氮素以 N_2O 的形式损失^[26]。堆肥过程中 NH_3 与 N_2O 的排放造成了大量的氮素损失, NH_3 与 N_2O 的协同减排对堆肥过程的固氮具有重要意义。

本文使用 Histcite、CiteSpace 和 VOSviewer 软件对 WOS 数据库中堆肥氮排放和控制领域近 30 年的相关文献进行了可视化分析,并对 CNKI 数据库中的中文期刊也进行了相应的辅助分析。研究发现,在堆肥氮排放和控制领域,发文和引文量逐渐上升,前 20 年发文引文均较少,近 10 年有较高频次的发文和引用,说明该领域已进入研究热门期。中国的发文量、本地引用次数(TLCS)和总引用次数(TGCS)均为第一,作者共现图也展现出主要机构是我国院校,说明

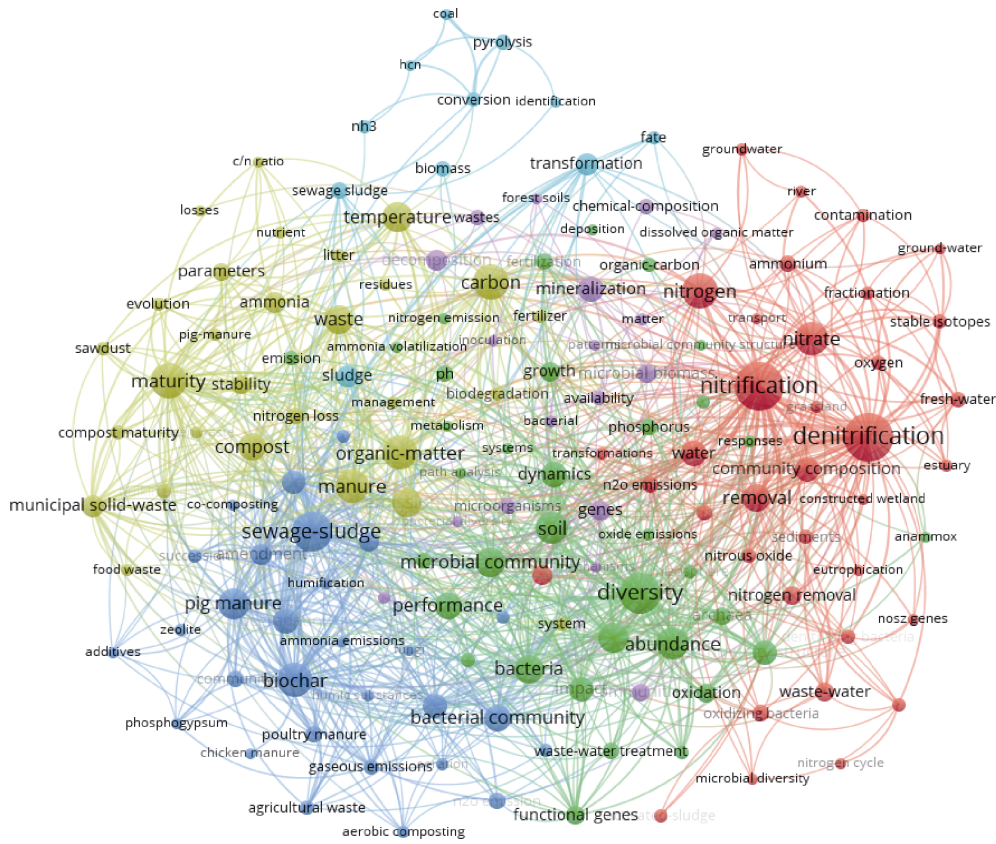


图 6 1993—2022 年堆肥氮排放和控制领域高频关键词网络可视化图

Fig. 6 Network visualization of high-frequency keywords in field of nitrogen emissions and control of composting from 1993 to 2022

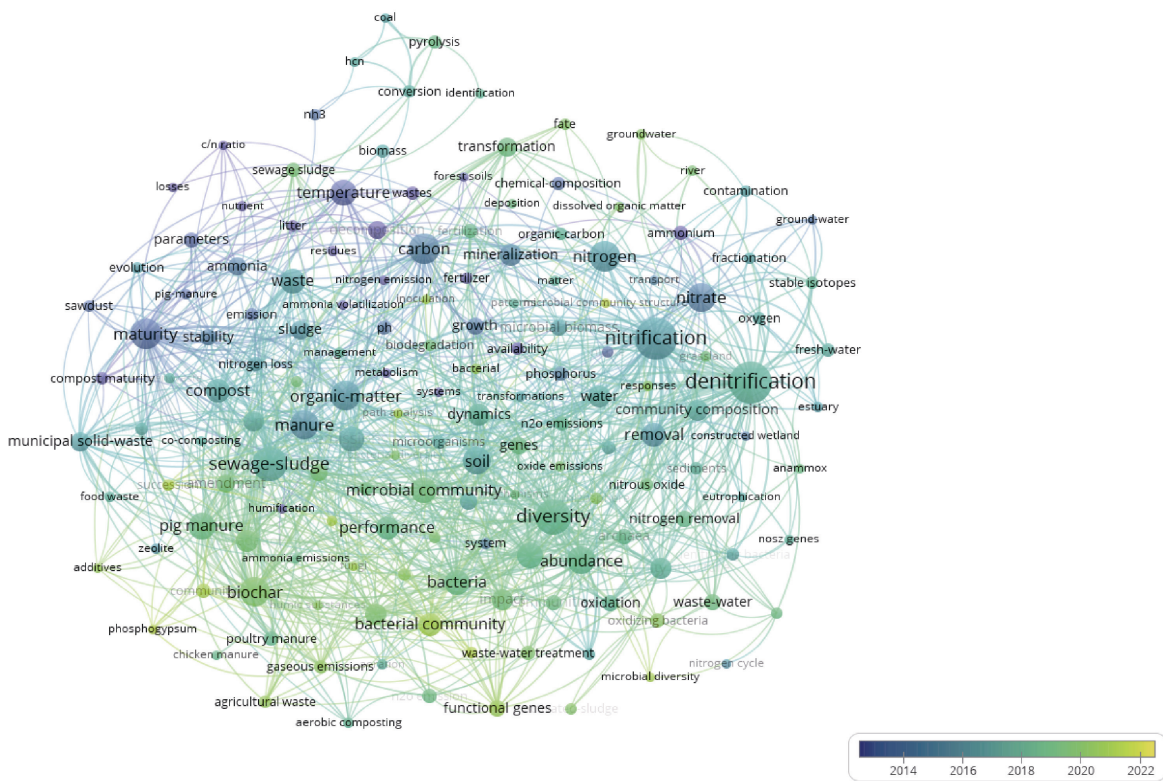


图 7 2013—2022 年堆肥氮排放和控制领域高频关键词叠加可视化图

Fig. 7 Visualization of high-frequency keyword overlay in field of nitrogen emissions and control in composting from 2013 to 2022

我国很早就参与堆肥氮排放和控制领域的研究且持续为该领域提供较大贡献。在发文期刊分析中可以看到，堆肥氮排放和控制领域发文量前 10 位的英文期刊均处于 JCR 的 Q1、Q2 分区，加上该领域发文量和被引频次近 10 年均迅速升高，可以判断该领域处于热门研究领域，且处于研究上升期。但是，从中文期刊发表的作者和机构关系中可以看到，目前国内该领域存在作者之间合作团体不多、缺乏核心研究机构相互间的交流合作的问题。关键词是论文研究内容的高度概括与集中描述^[27]，分析高频关键词可以大致了解该领域的研究集中在哪个方向。通过关键词突现表和高频关键词图可以发现，微生物群落、重金属、成熟度、硝化作用、群落几个词突现强度最高；硝化作用、反硝化作用、多样性、污水污泥、成熟度几个词出现频率最高。综合可见，微生物介导堆肥过程及氮素迁移转化方式和粪污堆肥利用的食品安全风险问题是两个特别热门的研究方向，研究热点可能集中在：①应用现代分子生物学的技术方法，深入研究堆肥过程硝化与反硝化微生物的群落变化及其与 N₂O 排放的关系，并重视堆肥中特异性微生物(如耐高温微生物和异养硝化菌等)对氮素形态转化的影响^[28]；②综合考虑腐熟进程、氮素持留和温室气体减排等方面，确定各类堆肥物料和工艺的最优控制参数^[29-31]；③污泥、畜粪等堆肥存在重金属累积风险的监测评估^[32]。

综上所述，我国在堆肥氮排放和控制领域已有良好而广泛的研究基础，为该领域研究提供了较大贡献，但存在国内作者之间研究合作团体不多、研究机构之间联系不紧密、核心研究机构之间缺乏交流合作的问题，应再加强该领域合作的深度和广度。另外，该领域未来的研究方向可能会聚焦于微生物群落结构解析、由微生物驱动的硝化作用和反硝化作用过程、堆肥重金属富集以及堆肥成熟度等方面。

参考文献：

- [1] 王孝芳, 万金鑫, 韦中, 等. 畜禽粪便堆肥过程中微生物群落演替[J]. 生物技术通报, 2022, 38(5): 13-21.
- [2] 聂晓瑀, 于春静, 卢倩, 等. 微生物在农作物秸秆好氧堆肥过程中的研究进展[J]. 中国农学通报, 2022, 38(26): 76-81.
- [3] 霍丽丽, 赵立欣, 孟海波, 等. 中国农作物秸秆综合利用潜力研究[J]. 农业工程学报, 2019, 35(13): 218-224.
- [4] 王大伟. 有机固体废物好氧堆肥化处理过程中的酶解活性变化状况研究[J]. 现代化农业, 2021(10): 19-21.
- [5] 刘涛. 黑水虻联合好氧堆肥对畜禽粪便无害化及资源化的研究[D]. 西安: 西北农林科技大学, 2022.
- [6] 牛佳钰. 秸秆源木质纤维素在好氧堆肥化中的降解研究[D]. 无锡: 江南大学, 2022.
- [7] 刘盛萍. 生物垃圾快速好氧堆肥的研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2006.
- [8] 李思雨. 市政污泥好氧堆肥氮素转化及氨气控制研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2022.
- [9] 张云龙, 宋明淦, 李秀芬, 等. 磷酸盐添加对快速好氧堆肥过程 pH 及腐熟效果的影响[J]. 环境化学, 2020, 39(7): 1996-2004.
- [10] 王雅雅, 陈高攀, 孙浩, 等. 基于 EDEM 的分仓立式好氧堆肥反应器设计与试验[J]. 农业工程学报, 2023, 39(3): 171-179.
- [11] 周海瑛, 邱慧珍, 杨慧珍, 等. C/N 比对好氧堆肥中 NH₃ 挥发损失和含氮有机物转化的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2020, 38(2): 69-77.
- [12] 林湘岷, 沈宗专, 李荣, 等. 基于 Web of Science 的抑病型土壤文献计量分析[J]. 江苏农业学报, 2022, 38(3): 821-829.
- [13] 史方颖, 张风宝, 杨明义. 基于文献计量分析的土壤有机碳矿化研究进展与热点[J]. 土壤学报, 2022, 59(2): 381-392.
- [14] 赵蓉英, 许丽敏. 文献计量学发展演进与研究前沿的知识图谱探析[J]. 中国图书馆学报, 2010, 36(5): 60-68.
- [15] 王会梅. 数字图书馆中 Web of science 数据库的解读与应用[J]. 农业图书情报学刊, 2010, 22(11): 100-103.
- [16] 王娟, 苏德纯. 基于文献计量的小麦玉米重金属污染农田修复治理技术及效果分析[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(3): 493-500.
- [17] 金碧辉, 汪寿阳, 任胜利, 等. 论期刊影响力因子与论文学术质量的关系[J]. 中国科技期刊研究, 2000, 11(4): 202-205.
- [18] 吕凯, 张彩丽. 中国土壤重金属污染修复研究的文献计量分析[J]. 农学学报, 2017, 7(5): 56-59, 95.
- [19] 余以胜, 周朴雄. JCR 指标的期刊计量与评价研究——以图书与情报科学为例[J]. 华南理工大学学报(社会科学版), 2008, 10(6): 84-87.
- [20] Butterbach-Bahl K, Baggs E M, Dannenmann M, et al. Nitrous oxide emissions from soils: How well do we understand the processes and their controls?[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B, Biological Sciences, 2013, 368(1621): 20130122.
- [21] 胡鹏杰, 杜彦镔, 夏冰, 等. 基于 Web of Science 对土壤胶体影响重金属行为研究的计量分析[J]. 土壤学报, 2024, 61(2): 445-455.
- [22] 傅国海, 杜森, 钟永红, 等. 持续推进化肥减量增效助力农业绿色高质量发展——“十三五”化肥减量增效工作成效及思考[J]. 中国农技推广, 2021, 37(6): 5-7.
- [23] 马常宝. 我国农业肥料施用发展趋势与展望[J]. 中国农技推广, 2016, 32(6): 6-10.
- [24] 王金林, 武广云, 刘友林, 等. 云南省化肥施用现状及减量增效的途径研究[J]. 中国农学通报, 2018, 34(3): 26-36.
- [25] Cao Y B, Wang X, Bai Z H, et al. Mitigation of ammonia, nitrous oxide and methane emissions during solid waste composting with different additives: A meta-analysis[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 235: 626-635.

- [26] Lu Y S, Gu W J, Xu P Z, et al. Effects of sulphur and *Thiobacillus thioparus* 1904 on nitrogen cycle genes during chicken manure aerobic composting[J]. Waste Management, 2018, 80: 10–16.
- [27] 赵碧, 潘联云, 马玉青, 等. 基于 CiteSpace 和 VOSviewer 的茶代谢组学研究现状可视化分析[J/OL]. 茶叶通讯, 2023: 1–7. (2023-03-06). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1106.S.20230303.1348.014.html>.
- [28] 吴伟祥, 李丽劫, 吕豪豪, 等. 畜禽粪便好氧堆肥过程氧化亚氮排放机制[J]. 应用生态学报, 2012, 23(6): 1704–1712.
- [29] 李玮琳, 张昕, 马军伟, 等. 抗生素降解菌剂对猪粪堆肥腐熟和细菌群落演替的影响[J]. 环境科学, 2022, 43(10): 4789–4800.
- [30] 何宙阳, 徐谓, 刘超, 等. 木质纤维降解复合菌剂促进堆肥腐熟研究[J]. 土壤, 2020, 52(4): 728–735.
- [31] 王友玲, 邱慧珍, 李孟婵, 等. 不同通风方式下牛粪堆肥过程中微生物群落演替及其对环境因子的响应[J]. 环境科学学报, 2023, 43(8): 189–201.
- [32] 史亚平, 于海洋, 宋开付, 等. 城市污泥堆肥与氮肥配施对稻田 CH₄ 和 N₂O 排放及水稻重金属含量的影响[J]. 土壤, 2020, 52(1): 113–118.