

基于知识图谱分析的沼液还田利用研究现状与发展趋势

刘银秀¹, 聂新军¹, 叶波¹, 董越勇¹, 金娟¹, 范志斌¹, 邢佳佳^{2, 3*}

(1. 浙江省农业农村生态与能源总站, 浙江 杭州 310012; 2. 浙江省土壤污染生物修复重点实验室, 浙江 杭州 311300; 3. 浙江农林大学环境与资源学院, 浙江 杭州 311300)

摘要: 畜禽养殖业的集约化和规模化发展, 造成畜禽粪污产生量急剧增加。畜禽粪污处理不当可对周遭的土壤、水体、大气等造成污染, 成为我国农业面源污染的主要来源之一。基于 Web of Science 核心合集数据库, 采用文献计量学方法对此研究领域的相关文献进行分析整合。结果表明: ① 全球对粪肥污染研究的重视程度越来越高, 沼液作为畜禽粪污厌氧消化的主要产物, 其在还田领域的发文主要集中于土壤科学、环境科学、农学 3 个学科; ② 美国、中国、德国、澳大利亚、法国等国家在沼液还田利用研究领域发文量较多, 相互合作密切; ③ 沼液还田利用领域的发文章期刊主要有 *Agriculture Ecosystems & Environment*、*Geoderma*、*Science of the Total Environment*, 其中 2021 年的 SCI 影响因子较高的主要期刊有 *Science of the Total Environment*、*Geoderma*、*Agriculture Ecosystems & Environment*、*Catena* 等。沼液还田利用的未来研究趋势主要集中于沼液所携带的活性物质与菌群对土壤肥力的促进机制, 以及对土传病原微生物的抑病机理等方面。

关键词: 沼液; 土壤肥力; Web of Science; CiteSpace; VOSviewer; HistCite

中图分类号: S15 **文献标识码:** A **文章编号:** 0564-3945(2023)01-0192-10

DOI: [10.19336/j.cnki.trtb.2021113004](https://doi.org/10.19336/j.cnki.trtb.2021113004)

刘银秀, 聂新军, 叶波, 董越勇, 金娟, 范志斌, 邢佳佳. 基于知识图谱分析的沼液还田利用研究现状与发展趋势 [J]. 土壤通报, 2023, 54(1): 192-201

LIU Yin-xiu, NIE Xin-jun, YE Bo, DONG Yue-yong, JIN Juan, FAN Zhi-bin, XING Jia-jia. Research of Returning Biogas Slurry to Cropland Based on Knowledge Graph Analysis and Its Development Trend [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2023, 54(1): 192-201

近年来, 随着我国农业产业结构的调整与升级, 畜禽养殖业的生产规模与产值不断增加, 目前畜禽粪便污染物年产生量约为 38 亿 t, 已成为我国农业面源污染的主要源头之一^[1]。调查结果显示同时种植粮食作物与养殖畜禽的农村家庭数量从 1986 年的 71% 锐减至 2017 年的 12%, 畜禽养殖方式逐渐从家庭散养向规模化养殖转变, 总产值显著提高了 13.3%, 但养殖密度过高造成了畜禽废弃物超负荷的产生, 大大增加环境污染风险^[2-3]。此外, 畜禽养殖业排放的污水逐年增加, 对生态环境造成了极大的威胁, 主要表现为大气污染、水体污染、生物多样性降低、土壤酸化板结以及全球变暖等方面^[3-4]。Park 等^[5-6]指出畜牧业是农业领域第一大甲烷排放源, 造成温室气体的激增, 且畜禽养殖工厂所排放的硫醇类、氨、

硫化氢、粪臭素以及硫化氢等大量有毒有害气体, 对空气质量和人体健康造成了严重威胁; 畜禽养殖场废水中的高浓度有机物、氮、磷等物质进入天然水体可造成水体富营养化, 溶解氧含量下降, 使得水生生物大量死亡; 此外, 畜禽养殖业的粪污排放量逐年增加, 对土壤承载能力的挑战日益增大, 导致土壤结构失衡, 肥力因子含量超标, 抑制农作物的生长^[7]。因此, 畜禽养殖废弃物的科学化处理应与畜禽养殖业的发展同步推进。

目前, 沼气技术是我国畜禽粪污资源化利用的主要手段之一, 但沼液处理成为沼气行业可持续发展的瓶颈问题。沼液中富含氮、磷、钾等大量元素以及钙、铜、铁、锌等微量元素, 既是丰富的营养物质, 也是高浓度的污染废液, 其利用方式由此成

收稿日期: 2021-11-30; 修订日期: 2022-04-18

基金项目: 2021 年度浙江省重点研发计划项目 (2021C03191) 和 2022 年浙江省“三农九方”科技协作计划项目 (2022SNJF005) 资助

作者简介: 刘银秀 (1977-), 女, 浙江江山人, 硕士研究生, 高级工程师, 主要从事农村能源技术推广工作。E-mail: 151429677@qq.com

*通讯作者: E-mail: j.xing@zafu.edu.cn

为一把双刃剑^[8]。沼液作为畜禽养殖废水的厌氧发酵残留物, 不仅含有可溶性无机盐类产物, 还含有植物生长所需的氨基酸、维生素、蛋白质等产物, 具有良好的抑菌、抗逆等功效^[9]。然而, 农业上施用未经处理的原沼液作为肥料, 大大增加了农田土壤的有机物、重金属以及病原微生物污染的可能性, 且沼液还田利用的运输成本高、管网输送易爆炸, 造成了沼液的利用效率低下^[10]。因此沼液的还田利用方式对提高土壤生产力、农作物产量等具有重要的研究意义和实际价值。鉴于我国目前对沼液的科学安全高效利用体系尚未建立, 沼液的肥料化利用尚处于粗放阶段, 沼液的绿色可持续利用已然成为热门的研究方向。

目前, 沼液废弃物的研究主要集中于宏观指标的特征, 尤其是如何科学利用其中的营养物质, 营造健康的土壤体系, 提高农作物的产量与品质。然而, 关于沼液还田利用的微生物干扰关注度较低, 已有研究表明病原菌可显著提高农作物发病率, 破坏土壤生态平衡, 降低土壤肥力, 最终降低农产品质量^[11]。Tyrrel 等^[12]在英国境内畜禽粪污、人类生活污水还田利用研究中指出, 粪肥施用大大增加了农田土壤中病毒、病原菌以及原生动物等的传播风险, 主要包括李斯特菌 (*Listeria*)、沙门氏菌 (*Salmonella*)、大肠杆菌 O157 (*Escherichia coli* O157)、弯曲杆菌 (*Campylobacter*)、隐孢子虫 (*Cryptosporidium*)、梨形鞭毛虫 (*Giardia*) 等。Beattie 等^[13]从牛养殖场排放的污水流域中检测发现了硫杆菌 (*Thiobacillus*)、嗜甲基菌 (*Methylothermobacter*)、原铁细菌 (*Crenothrix*)、硝化螺菌 (*Nitrospira*) 以及红育菌 (*Rhodospirillum rubrum*) 等优势菌群, 证明了畜禽养殖废液中含有大量可促进硝化作用的功能微生物。随着现代科技手段的发展, 开展土壤微生态健康已成为新的趋势, 由此可为畜禽废弃物安全利用、提高土壤肥力、防控作物病害提供科学理论指导。

现阶段关于沼液还田利用相关内容的计量整合分析还十分有限, 且相关研究主要关注沼液还田过程中营养物质的利用方式、农作物产量变化等, 尚缺乏对土壤微生物健康相关研究的整合分析。因此本文基于 Web of Science (WOS) 核心合集数据库, 结合 VOSviewer、CiteSpace 等工具, 对国际上近 20 年内沼液还田利用研究领域的发文数量、学科门类、

主要国家及研究机构合作关系、主要研究学者、重要文献、关键词聚类以及变化趋势等内容进行了计量分析与讨论, 并重点关注沼液还田利用领域的土壤健康, 土壤微生物健康的研究热点及其发展趋势, 旨在为未来畜禽废弃物的科学化处理与资源化利用提供借鉴与参考。

1 材料与方法

1.1 数据来源

本文数据来源为美国汤森路透公司 (Thomson Reuters) WOS 核心合集数据库, 检索的主题词设置为 (“biogas slurry”) and (“soil microbe”) and (“soil fertility” or “organic fertility”)。设置检索时间为 2000 年至 2021 年, 所有文献的检索日期为 2021 年 10 月 28 日, 选定参考文献类型为 Article。通过检索, 得到的文献数量为 6360 篇。

1.2 研究方法

本文从 WOS 核心合集数据库中下载此 6360 篇文献, 利用 Web of Science 的分析检索功能, 对下载的文献进行发文地区及学科的计量分析; 利用 CiteSpace 分析数据源文献得到关键词实现信息 (Burstness) 并计算关键文献中心度; 利用 VOSviewer 软件对发文国家、机构之间合作的紧密程度进行分析; 对所有关键词 (All keywords) 进行共现分析 (Co-occurrence), 以反映该领域的研究热点; 利用 Co-citation 分析近二十年来被引频次最高、影响最大的文献; HistCite 进行本地被引及总引用的运算。

2 结果与讨论

2.1 发文数量及学科分布

发文数量可反映某个研究领域被学者关注的程度以及发展水平, Web of Science 核心合集数据库的检索结果表明, 随着科技手段的不断进步, 关于沼液还田利用的关注度显著提高。如图 1a 所示, 沼液还田利用的研究涉及多个学科和领域, 2000 年至 2021 年期间发文量排名前十的学科有土壤科学 (27.55%)、环境科学 (23.85%)、农学 (11.34%)、植物科学 (8.87%)、农业多学科 (8.57%)、生态学 (7.03%)、林学 (6.26%)、绿色可持续技术 (3.16%)、分析化学 (2.01%)、环境工程 (1.10%)。其中土壤科学和环境学科是近 20 年发文量占比最高的两个学科, 表明沼液还田利用一直是土壤科学和环境科学所重

点关注的问题。发文量最大的国家为美国（780 篇），其次为中国（757 篇）、德国（566 篇）、澳大利亚（388 篇）、法国（341 篇）等，从 2015 年开始，中国超越美国成为发文数量最大的国家。沼液还田利用研究领域的发文量主要从 2005~2009 年开始出现显著增加，在 2015~2019 年达到最高值。此外，

根据该五国 2020~2021 的单年增加率，对 2020~2024 年的发文量进行了预估，结果显示近二十年来沼液还田利用领域的研究热度持续增加。土壤作为沼液利用的重要环境介质，关于沼液还田利用的安全问题，一直是土壤科学所关注的重要内容，目前该领域的研究占比最高。

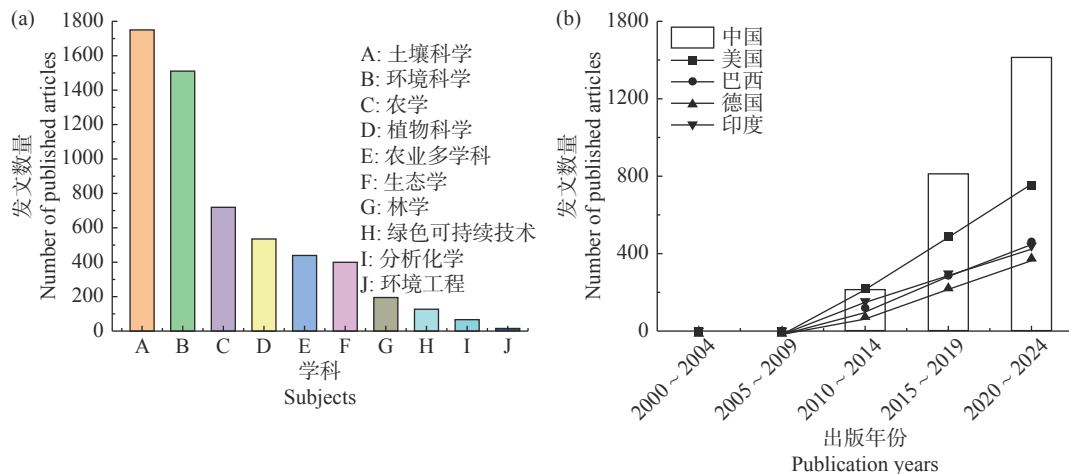


图 1 近二十年前十大发文学科占比(a)及文献发表趋势(b)图

Fig. 1 The proportion of (a) the top 10 published disciplines in the past 20 years and (b) the trend chart of literature publication

2.2 国家与机构间的合作

利用 VOSviewer 合作 (Co-authorship) 网络对沼液还田利用研究领域的国家/地区与机构之间的合作进行网络构建。如图 2 所示，图中圆圈大小表征国家/地区与机构的文章发表数量，距离表示合作的密切程度，距离越近表明科研合作越密切。由表 1 的国家/地区发文的总联系强度 (TLS) 值可知，发文量高于 200 篇且合作密切的国家有美国 (780 篇)、中国 (757 篇)、德国 (566 篇)、澳大利亚 (388 篇)、法国 (341 篇) 等，与中国在该领域合作密切的国家有美国、巴基斯坦、新西兰、日本等 (图 2a)。此外，发文数量高于 40 篇且合作密切的机构有中国科学院 (340 篇)、中国科学院大学 (215 篇)、中国农业科学院 (157 篇)、西北农林科技大学 (84 篇)、中国农业大学 (60 篇) 等 (表 1)，与中国科学院合作密切的机构主要有中国科学院大学、浙江大学、南京农业大学等 (图 2b)。

2.3 重要文献分析

本文通过沼液还田利用相关文献共被引结果的分析，得到该研究领域的关键文献，如图 3 所示。主要有 Rietz 等^[14]发表在 *Soil Biology & Biochemistry*

上的“Effects of irrigation-induced salinity and sodicity on soil microbial activity”，表明外源性液灌增加了土壤盐碱度，降低土壤微生物群落的多样性及新陈代谢效率。Pimental 等^[15]发表在 *BioScience* 上的“Environmental, energetic, and economic comparisons of organic and conventional farming systems”，阐述了化学合成肥料以及药品施用的弊端，应通过推行绿色农肥、有机投入品以促进农业的可持续发展。以及 Jones 等^[16]在 *Soil Biology & Biochemistry* 上发表的“Biochar-mediated changes in soil quality and plant growth in a three year field trial”，指出高有机质含量的农废还田可提高土壤呼吸值、真菌以及细菌的生长速率。此外，近年来该研究领域本地引用次数较高的文献主要集中于沼液还田后的土壤生物学指标变化及其与肥力的相关程度。主要有 Du 等^[17]发表在 *Scientific Reports* 上的“Peanut-shell biochar and biogas slurry improve soil properties in the North China Plain: a four-year field study”，结果显示沼液相比生物质炭而言，具有更丰富的生物活性物质以及营养物质，可显著提高农作物的产量；然而，Liu 等^[18]指出沼液还田利用过程中要提高对抗生素抗性基因的

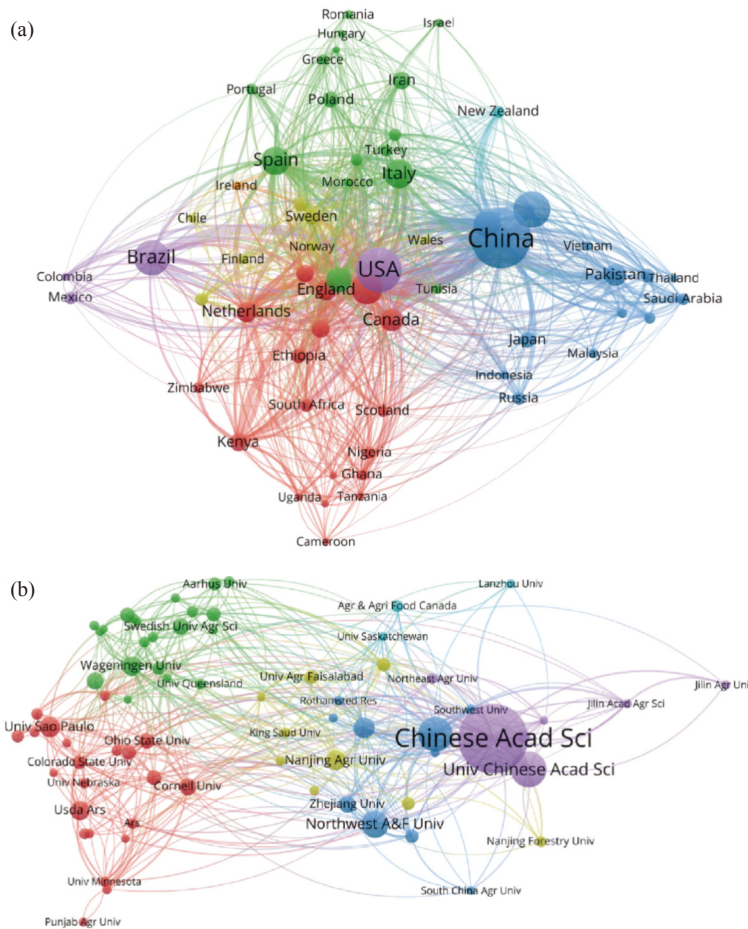


图 2 论文产出国(a)、机构(b)之间的合作
Fig.2 Cooperation between paper contributing countries (a) and contributing institutions (b)

表 1 国家与机构的总联系强度排名前十
Table 1 Top 10 countries and institutions in total link strength

| 排名 Rank | 国家 Country | 总联系强度 Total link strength | 机构名称 Institution | 总联系强度 Total link strength |
|------------|---------------|------------------------------|---------------------|------------------------------|
| 1 | 美国 | 780 | 中国科学院 | 340 |
| 2 | 中国 | 757 | 中国科学院大学 | 215 |
| 3 | 德国 | 566 | 中国农业科学院 | 157 |
| 4 | 澳大利亚 | 388 | 西北农林科技大学 | 84 |
| 5 | 法国 | 341 | 中国农业大学 | 60 |
| 6 | 西班牙 | 330 | 西澳大学 | 59 |
| 7 | 荷兰 | 324 | 中国农业部 | 56 |
| 8 | 英国 | 312 | 美国农业部 | 47 |
| 9 | 意大利 | 277 | 康奈尔大学 | 46 |
| 10 | 瑞士 | 243 | 吉林农业科学院 | 44 |

监测；且长期大量施用沼液可造成水稻表层土壤中胶体磷的淋失^[9]。由此可知，近 20 年来关于有机肥还田的作用及方式的研究较为广泛，沼液还田领域的研究内容逐渐从早期的肥力效果表征到微生物生态层面的土壤健康，表明可持续农业的发展已成为当下的研究热点。

由 HistCite 软件分析可知，发文数量 TOP10 的期刊如表 2 所示，主要包括 *Agriculture Ecosystems &*

Environment (178 篇)、*Geoderma* (178 篇)、*Science of the Total Environment* (165 篇)。本地引用次数 (TLCS)、总引用 (TGCS) 次数较高的期刊分别有 *Soil & Tillage Research*、*Agriculture Ecosystems & Environment*、*Geoderma* 等，其中大部分期刊归类于土壤科学学科 (Soil Science)。沼液还田利用研究领域发文期刊中影响因子较高的有：*Science of the Total Environment* (7.963)、*Geoderma* (6.114)、

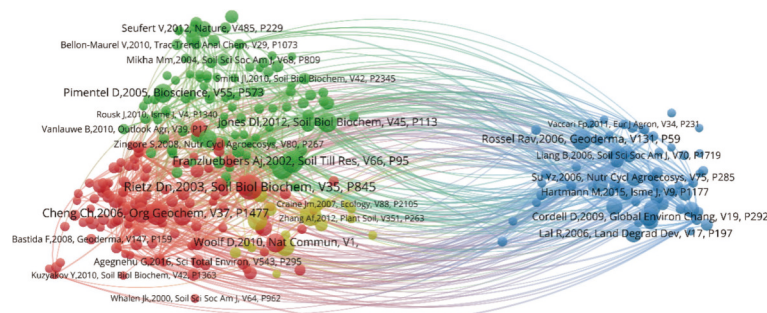


图 3 文献共被引聚类视图
Fig.3 View of clusters of co-cited literature

Agriculture Ecosystems & Environment (5.567) 、*Catena* (5.198) 等。相关文献在时间梯度上显示出沼液还田领域的历史研究脉络：早期高引用频次文献重点关注内容为土壤有机质、土壤氮、土壤微生物碳等指标表征^[20-21]；其次，随着科技手段与现代农业技术的发展，学者逐渐增加了对有机肥、畜禽粪肥及其发酵产物（沼液）等绿色农肥的肥力效果、

安全有效性等方面的研究^[22-24]；近年来沼液还田领域的高引用文献主要集中于沼液还田利用对生态环境造成的影响、肥力因子的驱使因子、土壤微生物群落的响应等方面^[25-26]。因此，关于沼液还田利用领域的研究重点逐渐从肥效表征、安全有效性到宏观及微观环境体系的响应，凸显了该领域研究逐渐深入的层次性。

表 2 2000 ~ 2021 年沼液还田利用研究领域研究发文章量排名 TOP10 期刊

Table 2 Top10 journals in terms of number of papers published addressing returning biogas slurry to cropland during the 2000 - 2021

| 期刊名称 Journal | 本地引用 TLCS | 总引用 TGCS | 发文章量 Number of Papers | 影响因子（2021年） Impact Factor (In 2021) |
|--|--------------|-------------|--------------------------|--|
| <i>Soil & Tillage Research</i> | 476 | 4023 | 162 | 5.374 |
| <i>Agriculture Ecosystems & Environment</i> | 415 | 4000 | 178 | 5.567 |
| <i>Geoderma</i> | 414 | 4594 | 178 | 6.114 |
| <i>Science of the Total Environment</i> | 380 | 3798 | 165 | 7.963 |
| <i>Applied Soil Ecology</i> | 201 | 1809 | 129 | 4.046 |
| <i>Catena</i> | 167 | 2021 | 108 | 5.198 |
| <i>Communications in Soil Science And Plant Analysis</i> | 110 | 683 | 163 | 1.327 |
| <i>Archives of Agronomy And Soil Science</i> | 71 | 665 | 101 | 3.092 |
| <i>Sustainability</i> | 44 | 1020 | 106 | 3.251 |
| <i>Agronomy-Basel</i> | 6 | 518 | 110 | 2.473 |

2.4 沼液还田利用研究关键词聚类

文章关键词起着概括表达全文主要研究内容的作用，是对文章主旨的高度概括，一个关键词出现的频率越高，则表明该研究主体受到学者的关注度越高，因此对关键词的分析可以反映沼液还田利用研究领域的研究热点与方向。基于 VOSviewer 软件，选取 2000 年至 2021 年沼液还田利用研究领域的高频关键词，构建关键词共现网络（图 4）。如表 3 所示，关键词出现频率较高的主要有 nitrogen（氮，1168 次）、organic-matter（有机质，992 次）、carbon（碳，886 次）、management（管理，885 次）、yield（产量，677 次）、fertility（肥力，667 次）、quality（质量，620 次）、dynamics（动力学，544 次）、soil（土壤，519 次）等。

根据关键词共现网络，该研究领域可划分为 4 个聚类（图 4），图中不同颜色表征不同的热点内容和聚类。关键词聚类 1（Cluster 1）主要是关于沼液还田利用对农田肥力因子以及沼液肥效研究的相关内容，包括的关键词有：nitrogen（氮，1168 次）、dynamics（动力学，544 次）、organic-carbon（有机碳，441 次）、matter（物质，412 次）、soil organic carbon（土壤有机碳，290 次）、sequestration（分离，268 次）、land-use（土地利用，243 次）、forest（森林，208 次）、soil organic matter（土壤有机质，195 次）。土壤微生物群落以及土壤肥力因子影响的相关内容表明，沼液的还田利用可显著提高土壤肥力、微生物群落多样性以及稻米品质^[27]。相关研究指出沼液还田可迅速提高农田系统的碳氮磷等肥力因子的含量；

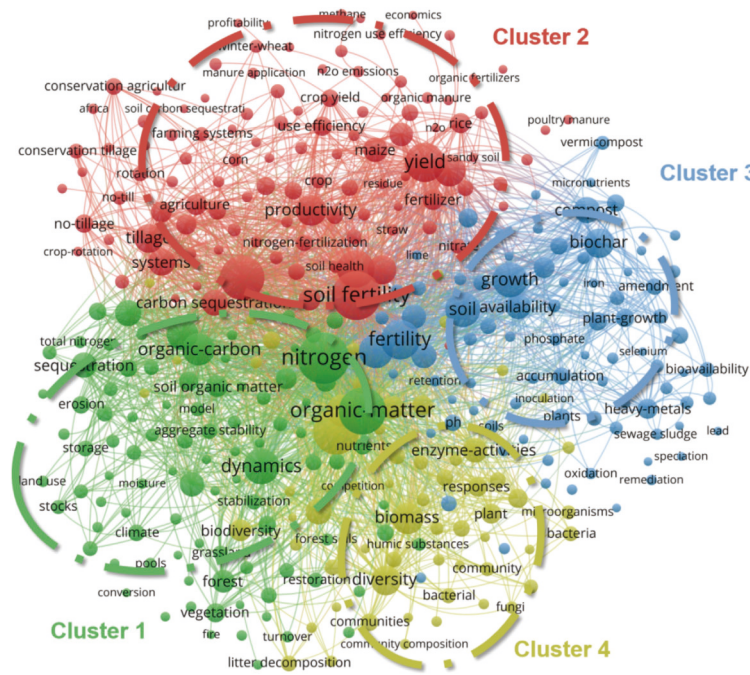


图4 关键词共现网络
Fig.4 Keywords co-occurrence network

并增加碳、氮的矿化效率；降低温室气体的排放；提高农作物产量及品质等^[28-31]。

关键词聚类 2 (Cluster 2) 主要是关于沼液还田利用对农作物产量及土壤健康研究的相关内容, 包括的关键词有: management (管理, 885 次)、yield (产量, 677 次)、quality (质量, 620 次)、manure (粪肥, 406 次)、productivity (生产力, 393 次)、tillage (耕作, 354 次)、fertilization (施肥, 337 次)、systems (系统, 307 次)、carbon sequestration (碳分解, 292 次)。可再生能源的开发与利用是当今社会经济发展的根本保证之一, 沼液中所富含的大量与微量营养元素可显著提升土壤物理、化学以及生物层面的营养水平, 进而提高农作物产量^[32]。此外, 沼液多以液肥方式还田, 可快速渗透进入土壤, 有

效降低氮肥的氨挥发^[33]。

关键词聚类 3 (Cluster 3) 主要是关于沼液还田利用对农作物生长及环境修复研究的相关内容, 包括的关键词有: fertility (肥力, 667 次)、soil (土壤, 519 次)、growth (生长, 509 次)、phosphorus (磷, 489 次)、biochar (生物碳, 365 次)、compost (堆肥, 281 次)、availability (有效性, 264 次)、impact (作用, 257 次)、water (水, 238 次)、amendments (修复, 179 次)。沼液还田可显著增加小麦的叶面积指数、根长以及籽粒产量^[34], 还可提高农业经济作物对氮磷钾的吸收^[35]。相关研究指出厌氧消化结合热解的集成化处理可显著改善沼液还田利用过程中的能源损耗现象, 可将沼液用于电力、热力、天然气等清洁能源的开发^[36-37]。

表 3 2000 ~ 2021 年沼液还田利用研究领域研究发文量排名 TOP20 关键词
Table 3 Top 20 keywords in the field of returning biogas slurry to cropland research published articles during 2000 - 2021

| 序号 No. | 关键词 Keyword | 频次 Frequency | 序号 No. | 关键词 Keyword | 频次 Frequency |
|-----------|----------------|-----------------|-----------|-------------------|-----------------|
| 1 | Nitrogen | 1168 | 11 | Growth | 509 |
| 2 | Soil fertility | 1047 | 12 | Phosphorus | 489 |
| 3 | Organic-matter | 992 | 13 | Microbial biomass | 445 |
| 4 | Carbon | 886 | 14 | Organic-carbon | 441 |
| 5 | Management | 885 | 15 | Matter | 412 |
| 6 | Yield | 677 | 16 | Manure | 406 |
| 7 | Fertility | 667 | 17 | Biomass | 405 |
| 8 | Quality | 620 | 18 | Productivity | 393 |
| 9 | Dynamics | 544 | 19 | Diversity | 374 |
| 10 | Soil | 519 | 20 | Biochar | 365 |

关键词聚类 4 (Cluster 4) 主要是关于沼液还田利用对土壤微生物群落及微生态健康的相关内容, 包括的关键词有: carbon (碳, 886 次)、microbial biomass (微生物量, 445 次)、biomass (生物量, 405 次)、diversity (多样性, 374 次)、decomposition (分解, 285 次)、enzyme-activities (酶活, 255 次)、mineralization (矿化, 203 次)、biodiversity (生物多样性, 198 次)、microbial community (微生物群落, 164 次)、plant (植物, 162 次)。Wang 等^[38]指出, 沼液的微生物组成主要是厚壁菌门、拟杆菌门、变形菌门以及放线菌门, 可溶性的微生物代谢产物与沼液的有机质含量以及肥力的释放具有显著作用。然而沼液中携带的外源微生物进入农田生态系统是否会对土壤微生态健康产生影响尚未建立完善的研究体系。

2.5 沼液还田利用研究重点与发展趋势

结合本文对沼液还田利用领域的重要文献 (图 3), 热点聚类 (图 4、表 3) 以及关键词突现指标 (表 4), 对近 20 年沼液还田利用研究的重点及未来发展趋势进行以下归纳总结。

表 4 突现至 2021 年关键词(即当下研究热点)

Table 4 Keywords bursting to 2021 (current research hotspots)

| 关键词 Keyword | 突现强度 Strength | 开始 Begin | 结束 End |
|------------------------|------------------|-------------|-----------|
| Charcoal | 8.56 | 2010 | 2014 |
| Exchange | 7.56 | 2010 | 2014 |
| Leaf area | 7.5 | 2010 | 2019 |
| Cotton | 6.98 | 2010 | 2014 |
| Biochar | 6.86 | 2015 | 2021 |
| PCR | 6.67 | 2010 | 2014 |
| Fruit quality | 6.64 | 2015 | 2021 |
| Bacillus thuringiensis | 6.47 | 2010 | 2019 |
| Fungal community | 6.35 | 2015 | 2021 |
| Saturation | 5.54 | 2010 | 2014 |

2.5.1 氮元素、土壤肥力以及有机质是沼液还田利用领域的当下热点 关键词共现网络中, nitrogen (氮)、soil fertility (土壤肥力)、organic-matter (有机质)、carbon (碳) 是出现频次最高的四个关键词 (表 3), 反映出关于土壤肥力因子与营养元素的研究在沼液还田利用领域占据主导地位。氮作为农作物生长的关键因子, 不仅对作物的产量具有重要影响, 对土壤有机质含量也具有显著作用^[39]。农田施用沼液可显著降低土壤氮淋溶, 并促进反硝化作用以及氮的固持, 进而提高土壤肥力^[40]。此外, 沼液还田后可显著提高土壤有机质、有效态氮磷钾的含量以

及电导率等, 从而提高农作物的产量与品质^[41]。相关研究指出, 沼液还田利用可显著提高表层土与底层土的有机碳含量^[42]。有机土壤改良是增加土壤肥力与土壤有机质含量的有效途径, 沼液还田作为有机土壤改良的方式之一, 施用范围逐渐扩大^[43]。然而, 沼液与传统液态粪肥的显著区别在于发酵过程中的沼液具有更高的 NH_4^+ 含量以及更高的 pH 值^[44], 关于沼液中有有机质的高效利用方式有待探索。目前, 沼液还田的相关研究多集中于水稻、小麦、玉米等粮食作物^[1, 44], 针对其他作物的研究相对较少, 沼液施用于不同作物土壤的浓度、频率等将成为当下的研究热点。沼液对病原菌的抑制作用也是当下研究热点之一, 相关研究指出沼液对西瓜镰刀菌、辣椒疫霉菌、根结线虫等具有显著的抑制作用^[45-47]。土传病原菌与其他微生物的互作是决定作物健康生长的关键因子, 研究沼液中的特异性抑病因子将加深对土传病害的认识, 为土传病害防治提供理论支撑。综上可知, 沼液还田利用提高土壤肥力的原因不仅是沼液自身所携带的大量营养物质, 还包括沼液中活性微生物与土壤肥力因子的相互作用, 进而提高土壤肥力, 增加作物产量, 但目前关于该相互作用的机制与调控的相关研究尚未深入。

2.5.2 沼液自身携带的外源微生物对土壤微生物群落以及农作物的影响值得探究 相关研究指出, 经过厌氧消化的沼液还田后可显著降低大肠杆菌、沙门氏菌、李斯特菌等病原菌的数量, 有效期可达 90 天^[48]。然而, 厌氧消化并不能灭活粪肥中的所有病原菌, 该施肥方式依旧存在将病原菌传播至农田生态系统中的潜在风险。鉴于病原菌种类繁多, 检测方法复杂, 研究者多采用测定指示微生物的浓度来表征灭菌消毒效果, 然而病原微生物的芽孢在厌氧消化、巴氏灭菌后依旧保持良好活性^[49], 因此发展沼液中病原菌的检测与消毒技术对粪肥资源回收利用具有很高的价值。此外, 外源微生物进入土壤生态系统可对土著微生物群落造成扰动, 进而对生态系统的群落结构与功能产生影响^[50]。Lourenço 等^[51]将用于乙醇生产的酒糟残渣用于还田利用, 并进行了为期 389 天的追踪调查, 结果发现酒糟还田可显著提高土壤肥力与土壤有机质含量, 酒糟中携带的活性菌群在 31 天左右陆续凋亡, 证实了土著微生物群落对酒糟具有较低的抵抗性, 但具有很高的恢复性。需要指出的是, 自 2020 年“十四五”规划提出以来,

关于土壤健康的研究逐渐引起重视, 研究有机粪肥还田的方式与途径可“转废为宝”, 提高能源利用率, 但同时不能忽视土壤微生态的健康研究, 绿色高效且安全长效的粪肥还田技术的开发与应用, 将是该领域未来的研究重点。

3 结论

(1) 全球范围内对畜禽养殖沼液的还田利用相关研究重视程度越来越高。沼液还田利用的发文主要集中在土壤科学和环境科学、农学等学科, 发期刊主要有 *Agriculture Ecosystems & Environment*、*Geoderma*、*Science of the Total Environment* 等。美国、中国、德国、澳大利亚、法国等国家在该研究领域发文量较多, 相互合作密切。

(2) 沼液还田的施用环境为土壤生态系统, 土壤学工作者的研究内容不仅仅是土壤健康的宏观层面, 还逐渐深入到土壤微生态健康层面。在宏观的土壤肥力方面将畜禽养殖业的粪肥“转废为宝”, 在微观方面也可与土传病原微生物发生拮抗作用达到抑病效果。

(3) 随着高通量测序技术和多组学技术的不断发展, 研究学者对微生物群落结构的理解与摸索不断深入, 沼液还田利用的未来研究趋势主要集中于沼液所携带的活性物质与菌群促进土壤肥力的机制, 以及对土传病害的抑病机理, 为绿色高效的粪肥还田利用提供理论支撑。

参考文献:

- [1] 孙国峰, 王鑫, 盛婧, 等. 长期粪肥还田条件下稻米品质及氮肥利用率[J]. *农业环境科学学报*, 2021, 40(11): 2521–2527.
- [2] 王明利. 改革开放四十年我国畜牧业发展: 成就、经验及未来趋势[J]. *农业经济问题*, 2018, 08(11): 60–70.
- [3] Jin S, Zhang B, Wu B, et al. Decoupling livestock and crop production at the household level in China[J]. *Nature Sustainability*, 2021, 4(1): 48–55.
- [4] Bai Z, Ma W, Ma L, et al. China's livestock transition: Driving forces, impacts, and consequences[J]. *Science Advances*, 2018, 4(7): 8534.
- [5] Park J, Kang T, Heo Y, et al. Evaluation of short-term exposure levels on ammonia and hydrogen sulfide during manure-handling processes at livestock farms[J]. *Safety and Health at Work*, 2020, 11(1): 109–117.
- [6] 吴浩玮, 孙小淇, 梁博文, 等. 我国畜禽粪便污染现状及处理与资源化利用分析[J]. *农业环境科学学报*, 2020, 39(6): 1168–1176.
- [7] 吴根义, 廖新佛, 贺德春, 等. 我国畜禽养殖污染防治现状及对策[J]. *农业环境科学学报*, 2014, 33(7): 1261–1264.
- [8] Chen Y C, Yang Z M, Chen Q H, et al. An overview on disposal of anaerobic digestate for large scale biogas engineering[J]. *China Biogas*, 2010, 28(1): 14–20.
- [9] 张鹏娟, 曹运红. 浅谈沼液的综合利用技术[J]. *农业技术与装备*, 2011, 24(2): 79–80.
- [10] 张国治, 吴少斌, 王焕玲, 等. 大中型沼气工程沼渣沼液利用意愿现状调研及问题分析[J]. *中国沼气*, 2010, 28(1): 21–24.
- [11] 陈保冬, 赵方杰, 张莘, 等. 土壤生物与土壤污染研究前沿与展望[J]. *生态学报*, 2015, 35(20): 6604–6613.
- [12] Tyrrel S F, Quinton J N. Overland flow transport of pathogens from agricultural land receiving faecal wastes[J]. *Journal of Applied Microbiology*, 2003, 94: 87–93.
- [13] Beattie R E, Bantla A, Swarup S, et al. Freshwater sediment microbial communities are not resilient to disturbance from agricultural land runoff[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2020, 15(11): 539921.
- [14] Rietz D N, Haynes R J. Effects of irrigation-induced salinity and sodicity on soil microbial activity[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2003, 35(6): 845–854.
- [15] Pimentel D, Hepperly P, Hanson J, et al. Environmental, energetic, and economic comparisons of organic and conventional farming systems[J]. *Bioscience*, 2005, 55(7): 573–582.
- [16] Jones D L, Rousk J, Edwards J G, et al. Biochar-mediated changes in soil quality and plant growth in a three year field trial[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2012, 45: 113–124.
- [17] Du Z, Xiao Y, Qi X, et al. Peanut-shell biochar and biogas slurry improve soil properties in the North China Plain: a four-year field study[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 1–9.
- [18] Liu C, Chen Y, Li X, et al. Temporal effects of repeated application of biogas slurry on soil antibiotic resistance genes and their potential bacterial hosts[J]. *Environmental Pollution*, 2020, 258: 113652.
- [19] Niyungeko C, Liang X, Liu C, et al. Effect of biogas slurry application rate on colloidal phosphorus leaching in paddy soil: a column study[J]. *Geoderma*, 2018, 325(1): 117–124.
- [20] Brookes P C, Landman A, Pruden G, et al. Chloroform fumigation and the release of soil nitrogen: A rapid direct extraction method to measure microbial biomass nitrogen in soil[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1985, 17(6): 837–842.
- [21] Bradford M M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding[J]. *Analytical Biochemistry*, 1976, 72(1–2): 248–254.
- [22] Mäder P, Fließbach A, Dubois D, et al. Soil fertility and biodiversity in organic farming[J]. *Science*, 2002, 296(5573): 1694–1697.
- [23] Lehmann J, Steiner C, Nehls T, et al. Nutrient availability and leaching in an archaeological anthrosol and a ferralsol of the central Amazon basin: fertilizer, manure and charcoal

- amendments[J]. *Plant and Soil*, 2003, 249(2): 343 – 357.
- [24] Garg R N, Pathak H, Das D K, et al. Use of flyash and biogas slurry for improving wheat yield and physical properties of soil[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2005, 107(1): 1 – 9.
- [25] Sanger A, Geisseler D, Ludwig B. Effects of moisture and temperature on greenhouse gas emissions and C and N leaching losses in soil treated with biogas slurry[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2011, 47(3): 249 – 259.
- [26] Tang Y, Luo L, Carswell A, et al. Changes in soil organic carbon status and microbial community structure following biogas slurry application in a wheat-rice rotation[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 757(25): 143786.
- [27] Xu M, Xian Y, Wu J, et al. Effect of biogas slurry addition on soil properties, yields, and bacterial composition in the rice-rape rotation ecosystem over 3 years[J]. *Journal of Soil and Sediments*, 2019, 19(5): 2534 – 2542.
- [28] Zirkler D, Peters A, Kaupenjohann M. Elemental composition of biogas residues: Variability and alteration during anaerobic digestion[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2014, 67: 89 – 98.
- [29] Galvez A, Sinicco T, Cayuela M L, et al. Short term effects of bioenergy by-products on soil C and N dynamics, nutrient availability and biochemical properties[J]. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2012, 160(1): 3 – 4.
- [30] Terhoeven U T, Scheller E, Raubuch M, et al. CO₂ evolution and N mineralization after biogas slurry application in the field and its yield effects on spring barley[J]. *Applied Soil Ecology*, 2009, 42(3): 297 – 302.
- [31] Abubaker J, Risberg K, Pell M. Biogas residues as fertilizers—Effects on wheat growth and soil microbial activities[J]. *Applied Energy*, 2012, 99: 126 – 134.
- [32] Surendra K C, Takara D, Hashimoto A, et al. Biogas as a sustainable energy source for developing countries: Opportunities and challenges[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, 31: 846 – 859.
- [33] Weiland P. Biogas production: Current state and perspectives[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2010, 85(4): 849 – 860.
- [34] Garg R N, Pathak D S, Das D, et al. Use of flyash and biogas slurry for improving wheat yield and physical properties of soil[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2005, 107: 1 – 9.
- [35] Singh K, Suman A, Singh P, et al. Improving quality of sugarcane-growing soils by organic amendments under subtropical climatic conditions of India[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2007, 44(2): 367 – 376.
- [36] Li H, Feng K. Life cycle assessment of the environmental impacts and energy efficiency of an integration of sludge anaerobic digestion and pyrolysis[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 195(10): 476 – 485.
- [37] Mills N, Pearce P, Farrow J, et al. Environmental & economic life cycle assessment of current & future sewage sludge to energy technologies[J]. *Waste Management*, 2014, 34(1): 185 – 195.
- [38] Wang S N, Yuan R F, Chen H L, et al. Effect of sulfonamides on the dissolved organic matter fluorescence in biogas slurry during anaerobic fermentation according to the PARAFAC analysis[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2020, 144: 253 – 262.
- [39] Islam S, Rahman M, Islam M S, et al. Effect of nitrogen level on aromatic rice varieties and soil fertility status[J]. *International Journal of Sustainable Crop production*, 2008, 3(3): 49 – 54.
- [40] Cheng J B, Chen Y C, He T B, et al. Soil nitrogen leaching decreases as biogas slurry DOC/N ratio increases[J]. *Applied Soil Ecology*, 2016, 111: 105 – 113.
- [41] Yu F B, Luo X P, Song C F, et al. Concentrated biogas slurry enhanced soil fertility and tomato quality[J]. *Soil and Plant Science*, 2010, 60(3): 262 – 268.
- [42] Tang Y F, Luo L M, Carswell A, et al. Changes in soil organic carbon status and microbial community structure following biogas slurry application in a wheat-rice rotation[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 757(25): 143786.
- [43] Stumpe B, Werner S, Jung R, et al. Organic carbon dynamics and enzyme activities in agricultural soils amended with biogas slurry, liquid manure and sewage sludge[J]. *Agricultural Sciences*, 2012, 3(1): 104 – 113.
- [44] Du H Y, Gao W X, Li J J, et al. Effects of digested biogas slurry application mixed with irrigation water on nitrate leaching during wheat-maize rotation in the North China Plain[J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 213(1): 882 – 893.
- [45] Cao Y, Wang J D, Chang Z Z, et al. The fate of antagonistic microorganisms and antimicrobial substances during anaerobic digestion of pig and dairy manure[J]. *Bioresource Technology*, 2013, 136: 664 – 671.
- [46] Jothi G, Pugalendhi S, Poornima K, et al. Management of root-knot nematode in tomato *Lycopersicon esculentum*, Mill., with biogas slurry[J]. *Bioresource Technology*, 2003, 89(2): 169 – 170.
- [47] Cao Y, Wang J D, Wu H S, et al. Soil chemical and microbial responses to biogas slurry amendment and its effect on *Fusarium* wilt suppression[J]. *Applied Soil Ecology*, 2016, 107: 116 – 123.
- [48] Goberna M, Podmirseg S M, Waldhuber S, et al. Pathogenic bacteria and mineral N in soils following the land spreading of biogas digestates and fresh manure[J]. *Applied Soil Ecology*, 2011, 49: 18 – 25.
- [49] Bagge E, Sahlstroem L, Albihn A. The effect of hygienic treatment on the microbial flora of biowaste at biogas plants[J]. *Water Research*, 2005, 39(20): 4879 – 4886.
- [50] Xing J J, Xiu J, Wang H Z, et al. The legacy of bacterial invasions on soil native communities[J]. *Environmental Microbiology*, 2021, 23(2): 669 – 681.
- [51] Lourenço K S, Suleiman A K A, Pijl A, et al. Resilience of the resident soil microbiome to organic and inorganic amendment disturbances and to temporary bacterial invasion[J]. *Microbiome*, 2018, 6(1): 1 – 12.

Research of Returning Biogas Slurry to Cropland Based on Knowledge Graph Analysis and Its Development Trend

LIU Yin-xiu¹, NIE Xin-jun¹, YE Bo¹, DONG Yue-yong¹, JIN Juan¹, FAN Zhi-bin¹, XING Jia-jia^{2,3*}

(1. Zhejiang Agricultural and Rural Ecology and Energy Station, Hangzhou 310012, China; 2. Key Laboratory of Soil Contamination Bioremediation of Zhejiang Province, Zhejiang A & F University, Hangzhou 311300, China; 3. College of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang A & F University, Hangzhou, 311300, China)

Abstract: The intensive and large-scale development of livestock and poultry breeding industry has resulted in a sharp increase of livestock manure. Meanwhile, improper treatment of livestock manure could pollute the surrounding soil, water and air, which is one of the main sources of agriculture non-point source pollution in China. We conducted a bibliometric analysis based on the core collection database of the Web of Science, using the CiteSpace knowledge map analysis tool, VOSviewer visual analysis software and HistCite citation analysis tool to count the number of publications and their distributions in disciplines, contributor countries (regions) and institutions, publish journals and hotspots and trends in the field of returning biogas slurry to cropland. ① Research in this field has attracted increasing attention worldwide between 2000 to 2021, and the top 3 categories of the publications are soil science, environmental sciences and agronomy. ② The United States, China, Germany, Australia and France are the major contributors of academic articles in this field, and have established close cooperation relationships with each other. ③ “Agriculture Ecosystems & Environment”, “Geoderma” and “Science of the Total Environment” are the top 3 publishing journals in the field of returning biogas slurry to cropland. Besides, “Science of the Total Environment”, “Geoderma”, “Agriculture Ecosystems & Environment”, and “Catena” are the main journals that have high impacts (one year). ④ The future research trend in this field will focus mainly on the mechanism of biogas slurry microbes to promote soil fertility, and exploration of suppression mechanism to prevent and control soil-borne diseases. This paper is based on bibliometric data of the researches in the field of returning biogas slurry to cropland between 2000-2021. Soil fertility, organic matter, crop yield, inhibition of pathogenic microorganism become the current hotspots of biogas slurry utilization. With the continuous development of the high-throughput sequencing technology, the knowledge of soil microbial communities has been greatly expanded. Returning biogas slurry to cropland can not only turn the manure waste into treasure macroscopically, but also can antagonize soil-borne pathogens to protect soil microecological health microscopically. These results are useful for returning biogas slurry to develop a greener and effective agriculture in the future.

Key words: Biogas slurry; Soil fertility; Web of Science; CiteSpace; VOSviewer; HistCite

[责任编辑: 张玉玲]