

穆智贤,刘成丰,林皓,等. 电场辅助好氧堆肥过程中微生物群落演替及其影响因素研究进展[J]. 江苏农业科学,2025,53(19):8-15.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2025.19.002

电场辅助好氧堆肥过程中微生物群落演替及其影响因素研究进展

穆智贤^{1,2}, 刘成丰^{1,2}, 林皓^{1,2,3}, 唐家桓^{2,3}, 赵辛⁴

(1. 福州大学环境与安全工程学院,福建福州 350108; 2. 武夷学院生态与资源工程学院/福建省生态产业绿色技术重点实验室,福建武夷山 354300;
3. 福建农林大学资源与环境学院/福建省土壤环境健康与调控重点实验室,福建福州 350002;
4. 陕西双龙煤业开发有限责任公司,陕西延安 727306)

摘要:电场辅助好氧堆肥(EAC)是实现畜禽粪污处理与资源化利用的重要方法。传统好氧堆肥技术存在堆肥温度不足、发酵不完全、周期延长和温室气体排放等问题。电场辅助好氧堆肥技术作为一种新兴的粪污处理方法,已在许多研究中被证实能够克服传统好氧堆肥的诸多问题,通过分析电场辅助机制,揭示电场如何通过影响微生物群落来提高氧气利用率、加速有机物分解、减少温室气体排放和钝化重金属。电场辅助能够有效调控微生物群落结构,提高有益微生物的活性,缩短堆肥周期,提高堆肥产品的腐熟度和安全性。本文还探讨了电场参数、外源添加物、曝气方式等关键因素对微生物演替和堆肥效率的影响,为优化电场辅助好氧堆肥工艺提供理论依据。通过对 EAC 技术的深入分析,旨在为畜禽粪污资源化利用和环境保护提供科学依据和技术支持。

关键词:电场辅助好氧堆肥(EAC);微生物演替;堆肥效率;温室气体减排;重金属钝化

中图分类号:S141.4;X713 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2025)19-0008-08

随着全球人口增长和食品需求增加,养殖业规模不断扩大,畜禽数量呈现快速增长趋势,同时也伴随着巨大的环境问题。目前,我国每年畜禽粪污

产量约为 38 亿 t,综合利用率不到 60%^[1-2]。全年畜禽养殖行业所排出的水体污染物中,总氮含量达到 59.63 万 t,化学需氧量高达 1 000.53 万 t,已成为我国最大的农业污染来源,对环境造成严重影响,限制了畜牧业进一步发展^[2-3]。

好氧堆肥作为一种能够经济高效地利用好氧微生物对有机固废进行吸收、氧化以及分解的处理和资源回收方法,在全球范围内得到广泛应用,这

收稿日期:2024-08-19

基金项目:福建省科技厅“校校企”合作项目(编号:2022N5007)。

作者简介:穆智贤(1999—),男,福建南平人,硕士研究生,从事农业废弃物资源化利用研究。E-mail:2537314637@qq.com。

通信作者:林皓,硕士,教授,主要研究方向为固体废弃物污染治理及资源化利用。E-mail:linhaosg@wuyiu.edu.cn。

[64] Melgar A E, Palacios M B, Tosar L J M, et al. A novel and efficient Apple latent spherical virus - based gene silencing method for functional genomic studies in *Chenopodium quinoa* [J]. *Scientia Horticulturae*, 2024, 333: 113258.

[65] Xiao X L, Meng F X, Satheesh V, et al. An *Agrobacterium* - mediated transient expression method contributes to functional analysis of a transcription factor and potential application of gene editing in *Chenopodium quinoa* [J]. *Plant Cell Reports*, 2022, 41(10): 1975 - 1985.

[66] Hesami M, Daneshvar M H. Development of a regeneration protocol through indirect organogenesis in *Chenopodium quinoa* Willd [J]. *Indo - American Journal of Agricultural and Veterinary Sciences*, 2016, 4(1): 25 - 32.

[67] Regalado J J, Tossi V E, Burrieza H P, et al. Micropropagation protocol for coastal quinoa [J]. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 2020, 142(1): 213 - 219.

[68] Hesami M, Naderi R, Yoosefzadeh - Najafabadi M. Optimizing sterilization conditions and growth regulator effects on *in vitro* shoot regeneration through direct organogenesis in *Chenopodium quinoa* [J]. *BioTechnologia*, 2018, 99(1): 49 - 57.

[69] Gong Y, Guo S L, Wu X L, et al. Direct organogenesis protocol for *in vitro* propagation of *Chenopodium quinoa* [J/OL]. *Research Square*, 2022(2022-09-12) [2025-03-01]. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1935859/v1>.

[70] 王宇. 藜麦不同 U6 启动子的克隆与功能分析及靶向 *CqASMT12* 基因 CRISPR/Cas9 编辑载体的构建[D]. 烟台:烟台大学, 2020.

[71] 高爱红, 张侠, 曹萌, 等. 藜麦 ANT 基因家族的鉴定及其在愈伤组织中的表达分析[J]. *山东农业科学*, 2025, 57(4): 22 - 31.

[72] Sidorov V, Maughan P, Yang P Z. The development of an *in vitro* floral culture transformation system for quinoa [J]. *In Vitro Cellular & Developmental Biology - Plant*, 2024, 60: 742 - 750.

种方法以其较低的投资需求、操作成本以及无害化程度高等特点而著称,成为可持续农业实践中的重要组成部分^[4]。但受微生物群落演替的影响,传统好氧堆肥普遍面临着堆肥温度不足、发酵不完全、周期延长和温室气体排放等问题,这可能影响最终产品的完全腐熟^[4-5]。

近年来,传统好氧堆肥工艺不断优化,外场耦合技术在堆肥领域得到广泛探索和应用。其中,电场技术因其能够有效调控微生物活性、影响微生物群落演替等优点,而受到研究者的广泛关注。电场辅助好氧堆肥能够通过增强氧气利用率来加快堆肥腐殖化程度,提高电活性细菌的相对丰度,抑制温室气体的产生^[6-7]。因此,本研究主要基于电场辅助好氧堆肥相关的研究成果,对该技术的原理及工艺优势进行梳理,着重对电场辅助好氧堆肥过程中的微生物群落的演替进行综述,并详细介绍了影响微生物群落演替的因素,包括电场强度、电极板形式,电场中的曝气方式以及外源添加物等,以期作为电场辅助好氧堆肥新工艺应用于畜禽粪便资源化利用过程提供理论依据。

1 电场辅助好氧堆肥的原理

在传统的好氧堆肥过程中,由于微生物对氧气的利用率较低,往往会产生一些局部“厌氧区域”,造成 CO₂ 和 CH₄ 等温室气体的产生,加大堆体碳损失。同时,还会产生一氧化二氮(N₂O)气体,这种气

体不仅会对臭氧层造成破坏,加剧全球温室效应,还会导致氮素流失,进而影响堆肥腐熟产品的商业价值^[8]。为提高“厌氧区域”内微生物对氧气的利用率,提高堆肥过程的整体反应速率,需要对传统好氧堆肥体系进行优化。

针对传统好氧堆肥存在的问题,Tang 等在传统的好氧堆肥的基础上施加 2 V 直流电压,构建电场辅助好氧堆肥(electric-field-assisted aerobic composting, EAC)技术^[6]。在堆肥系统中引入直流电场的技术,本质上与电动修复技术相仿^[9-10]。电动修复技术的核心在于电动现象,这一现象主要通过电迁移、电渗析和电解反应等过程发挥作用^[11]。电场的影响导致土壤内污染物及其代谢产物发生迁移,有效降低了它们的毒性,为电活性微生物的代谢活动创造更加有利的环境。

EAC 技术中电场的主要作用是触发氧化还原产物的快速平衡。由图 1 可知,在电场作用下,电活性细菌的活性增强,更多的电活性细菌以氧分子作为呼吸链的最终电子受体,进行有氧的分解代谢。同时,电场让更多的电子在堆肥物料颗粒外流动,与电子受体 O₂ 发生结合,生成最终电子受体,提高好氧微生物对 O₂ 的利用率,产生更多的 CO₂ 和热量^[6],从而提高堆肥的温度和缩短堆肥的成熟时间。EAC 可以更高效地促进生物氧化还原过程。在该过程中微生物群落的变化关系到堆肥过程中物质的转化,影响堆肥的腐熟效果^[12]。

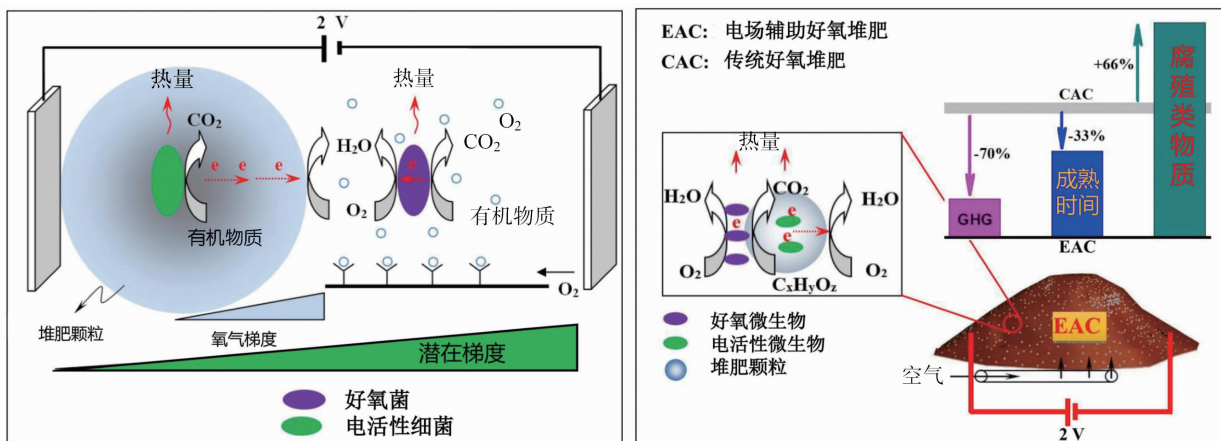


图1 电场辅助好氧堆肥的工艺效果及原理^[6]

2 参与堆肥过程的主要微生物群落组成和功能

2.1 堆肥过程中的优势微生物群落

堆肥过程中微生物群落的演替受物料和试验

设计等影响,在鸡粪堆肥过程中的主要细菌门包括厚壁菌门、放线菌门、变形菌门、拟杆菌门和绿弯菌门^[13]。厚壁菌门能够在不同的 pH 值、温度和湿度条件下生存,具有极强的环境适应能力,在木质纤

2.2.2 减排温室气体 在好氧堆肥过程中,微生物通过多种途径减少温室气体的排放,主要微生物为甲烷氧化菌,如甲基孢囊菌属和甲基球菌属^[38]。它们能够将堆肥过程中产生的甲烷(CH₄)氧化为二氧化碳(CO₂),从而减少甲烷这种强效温室气体的排放,甲烷氧化菌通过其特有的甲烷单加氧酶,将甲烷转化为甲醇,然后进一步氧化为甲醛和甲酸,最终生成 CO₂^[39]。硝化细菌包括亚硝酸盐氧化细菌和硝酸盐氧化细菌,它们通过将氨氧化为亚硝酸盐,再将亚硝酸盐氧化为硝酸盐,减少 N₂O 的排放^[40]。芽孢杆菌属通过快速分解有机物质,如纤维素和蛋白质,减少有机物在厌氧条件下分解产生的甲烷^[41]。微杆菌属通过分解复杂有机物,如纤维素和木质素,提高有机物的分解效率,从而减少温室气体的排放。固氮菌(如根瘤菌属和固氮菌属等)能够将大气中的氮气固定为可被植物利用的氮化合物,减少因氮肥施用而导致的温室气体排放^[42]。

电场辅助好氧堆肥工艺能够通过增强好氧微生物的活性和效率,加速有机物的降解过程,从而减少堆肥过程中 N₂O 和 CH₄ 气体排放,这对于环境保护和可持续农业发展具有积极意义^[12-13]。电场辅助好氧堆肥(EAC)过程中,氨氧化细菌的活性受到抑制,这与 N₂O 排放的减少有关。研究表明,电场的应用增强了氧气的利用效率,并增加了电活性细菌的相对丰度,大约是常规好氧堆肥(CAC)的 3.4 倍。这些细菌能够更有效地将电子传递给氧气,加速有机物的氧化过程,从而减少温室气体的排放^[6]。电场可能通过影响氨氧化细菌的功能基因表达,减少氨氧化过程,从而降低 N₂O 的生成^[43-45]。在生物电化学辅助的堆肥系统中,异养细菌与氨氧化细菌竞争氧气,从而抑制氨氧化细菌的活动。这种竞争导致氨氧化细菌的相对丰度降低,进而减少 N₂O 的产生^[45]。电场的应用可能通过改变环境条件(如 pH 值、湿度等)来影响反硝化细菌的活性,这些细菌在将 N₂O 还原为 N₂ 的过程中发挥作用,有助于减少 N₂O 的排放^[6]。电场辅助堆肥中,与硝化作用和反硝化作用相关的功能基因表达水平发生变化。硝化作用的功能基因表达降低,而反硝化作用中将 N₂O 还原为 N₂ 的基因表达可能增加^[44]。Li 等的研究表明,导电生物炭的引入,增加了电活性细菌的相对丰度,包括芽孢杆菌、温暖微杆菌属和棒状杆菌^[46]。相比之下,假单胞菌属、棒状杆菌属、放线菌和芽孢杆菌的潜在硝化和反硝化细

菌种类的丰度在生物炭辅助 EAC 系统中显著降低 11.35%。由于这些细菌与 N₂O 的产生有关,它们的减少有助于降低 N₂O 的排放。

2.2.3 钝化重金属 在好氧堆肥过程中,微生物通过多种机制对重金属进行钝化,从而降低其生物有效性和环境风险,主要有放线菌门(如葡萄球菌属和微杆菌属),能够通过代谢活动影响重金属的溶解度和吸附,从而降低重金属的生物可利用性^[47]。厚壁菌门(如芽孢杆菌属和梭菌属)通过分泌有机酸和其他代谢产物与重金属形成稳定的复合物,减少重金属的迁移和毒性^[48]。变形菌门中的微生物(如假单胞菌属)能够通过其分泌的侧孢素与重金属离子形成复合物,降低重金属的生物可利用性^[49]。某些真菌,如曲霉属和青霉菌属,能够通过其菌丝体吸附重金属,并通过细胞壁的多糖和蛋白质与重金属形成稳定的复合物,从而减少重金属的溶解性和毒性。Shen 等研究发现,电场辅助共堆肥通过降低堆肥原料的 pH 值,改变了细菌菌群结构,提高了放线菌门的丰度^[50]。这些微生物通过加速有机物的降解,促进腐殖质的形成,有助于重金属的钝化。在电场辅助堆肥中,电活性细菌通过促进电子从电极转移到氧气,增加活性氧(ROS)的产生,特别是羟基自由基(·OH),这些活性氧物质能够加速有机物的腐殖化,进而促进重金属与腐殖质的结合,实现钝化^[51]。

3 电场辅助好氧堆肥中微生物演替的影响因素

在堆体中施加直流电压,这一技术类似于电动修复技术,在动电效应下,土壤中的污染物及代谢产物发生迁移,毒害降低,从而有利于电活性微生物代谢^[12]。电场的应用增加了微生物群放线菌门和厚壁菌门在有机物降解中的丰度,这在重金属的固定中起着至关重要的作用^[7,52]。Li 等的研究表明,在电场辅助堆肥过程中,假单胞菌和芽孢杆菌等抗金属细菌的丰度有所增加,它们的相对丰度分别增加到 2.66% 和 15.63%,而在传统堆肥的相对丰度分别为 1.88% 和 4.36%^[53]。Cao 等的研究表明,在电场辅助堆肥作用下,添加酸性电解质(氯化铁)会导致氨氧化细菌亚硝化单胞菌科的丰度和比例增加,亚硝酸盐氧化细菌生长延迟^[13]。

电场辅助好氧堆肥技术会受包括电场强度、电极板形式、电场中的曝气方式以及外源添加剂等参数的影响,而这些因素均会对微生物的分布和演替

产生影响。

3.1 电场强度

电活性微生物数量与电场强度有关,在电场(1.0 V/cm)作用下,电活性微生物活性可被激活,微生物数量大幅增长,从而加快对有机物的氧化、降解。Du 等的研究表明,当电场强度为 1.08 V/cm 时,电活性微生物数量达到 25%,当电场强度达到 6.0 V/cm 时,能达到 76%^[54]。因此,适宜的电场强度可促进电活性微生物生长,而电活性微生物可以利用阳极将有机物氧化为 CO₂,不受氧气限制。较低电压(例如 1~2 V)对微生物群落的影响相对较小。在这个电压范围内,微生物的生长和代谢可能会受到一定程度的刺激,从而促进有益微生物的繁殖,如芽孢杆菌和假单胞菌等,这些微生物有助于有机物的分解和堆肥的腐熟过程^[55]。适中电压(例如 3~5 V)对微生物群落的影响更为明显。较高的电场强度可能会改变微生物细胞的通透性,影响其物质交换和能量代谢。一些对电场较为敏感的微生物,如某些放线菌和真菌的生长可能会受到抑制,而另一些适应能力较强的微生物,如特定的芽孢杆菌,可能会成为优势菌群,从而加速有机物的降解和堆肥的腐熟进程^[56]。较高电压(例如 6 V 及以上)会对微生物群落产生较大的抑制甚至杀伤作用^[57]。微生物的生长和繁殖会受到严重阻碍,导致微生物群落的多样性显著下降,这可能会减缓甚至中断堆肥过程中的有机物分解和腐熟过程。

3.2 电极板形式和种类

电极板材料的选择在 EAC 技术中至关重要,不同材料的电极板对微生物群落的影响机制和效果存在差异。阵列电极的使用在电场辅助好氧堆肥中表现出提高食物垃圾堆肥质量的潜力。研究表明,使用基于阵列的电场辅助好氧堆肥(Pin-EAC)工艺可以显著提高堆肥温度、发芽指数,并缩短达到标准堆肥成熟度的时间。此外,该工艺还增加了腐殖酸和黄腐酸的含量,并提高了嗜热细菌的多样性^[58]。石墨电极因其导电性良好且化学性质稳定,常用于电化学处理。在 EAC 中,石墨电极的使用可能对微生物群落产生积极影响,通过提供稳定的电场,促进特定微生物的生长,如嗜热细菌和真菌,这些微生物对有机物的分解至关重要。石墨电极因其导电性良好且化学性质稳定,常用于电化学处理^[34,53]。不锈钢电极板因其耐腐蚀性和导电性而被广泛使用。在电场辅助堆肥中,不锈钢电极板通

过促进电子转移,影响微生物代谢,从而改变微生物群落的组成。不锈钢电极板的存在会促进某些微生物(如产电菌)的生长,进而提高有机物分解效率^[51,59]。钛电极板具有优异的耐腐蚀性和导电性能,适用于电化学处理过程。在 EAC 中,钛电极板可能通过其独特的电化学性质影响微生物活性,促进有益微生物的增殖,如分解难降解有机物的微生物,同时抑制病原体的生长,从而优化微生物群落结构,提高堆肥质量和安全性,然而,其成本较高,可能限制了在大规模堆肥中的应用。

3.3 电场中的曝气方式

曝气速率对微生物活性和降解速率有重要影响。通气量与氧气浓度直接相关,是堆肥过程中影响最大的因素之一。在堆肥过程中,适当的曝气可以提供充足的氧气,促进好氧微生物的活动,加速有机物的分解,提高堆肥的热值和成熟度。充足的 O₂ 不仅能促进有机废物的分解,还能减少 CH₄ 等温室气体的排放^[60-61]。与连续曝气系统相比,间歇曝气可提高 O₂ 的供应效率^[62]。当曝气过度时,通风导致冷却和减少嗜热条件。此外,通气还会造成水分损失,妨碍水分控制^[63],增加 NH₃ 和 N₂O 损失,但它能更有效地减少 CH₄ 排放^[64],影响某些微生物的生长。在电场辅助好氧堆肥中,原位电解氧的产生是一种创新的曝气方式,它利用电化学反应直接在堆肥环境中产生氧气,以提高堆肥过程中的氧气供应效率。原位电解氧的产生可以提高堆肥堆体内部的氧化还原电位,有助于创造不利于病原体 and 有害微生物生存的环境。原位电解氧能促进微生物之间的电子转移过程,增强微生物间的相互作用和合作,如在某些产电微生物和分解微生物之间的电子传递,这有助于提高堆肥过程的效率和微生物的协同作用^[36,45]。

3.4 外源添加物

在电场辅助好氧堆肥过程中,外源添加物的使用旨在改善堆肥条件,促进微生物活性,加速有机物的分解,提高堆肥质量和效率。导电生物炭的添加可以显著提高堆体的电导率,从而增强电场的渗透性和效果,促进微生物的电子传递和代谢活动^[37];生物炭具有较高的比表面积和吸附能力,可以吸附重金属、有机污染物和异味,为微生物提供更清洁的生长环境^[65];生物炭能够缓冲 pH 值变化,维持堆肥过程中的酸碱平衡,同时,它还可以缓慢释放养分,为微生物提供稳定的营养源;生物炭

的添加可以改善堆体的孔隙度和结构,提高通气性和水分管理能力,有利于微生物的生长和有机物的分解^[66]。稻壳的添加可以增加堆体的孔隙度,改善堆体结构,促进氧气的扩散,有利于好氧微生物的活动^[67];稻壳是一种富含碳的有机材料,可以调节堆体的碳氮比,促进微生物的代谢活动和有机物的分解^[68]。成熟的堆肥产品中含有丰富的微生物菌群,可以作为接种剂,引入堆体中,加速微生物的启动和有机物的分解^[69];成熟的堆肥产品富含养分,可以为微生物提供额外的营养,促进其生长和代谢活动^[63];成熟的堆肥产品可以改善堆体的物理性质,如增加孔隙度和水分保持能力,且具有一定的 pH 值调节和缓冲能力,能够为微生物提供稳定的生长环境^[70]。

4 结论与展望

电场辅助好氧堆肥(EAC)技术作为一种创新的畜禽粪污处理方法,通过引入电场作用,有效克服了传统好氧堆肥过程中的诸多问题,如堆肥温度不足、发酵不完全、周期延长和温室气体排放等。电场辅助机制通过影响微生物群落,能够显著提高氧气利用率,加速有机物分解,减少温室气体排放,并有助于重金属的钝化。电场参数、电极板材料、外源添加物、曝气方式等关键因素对微生物演替和堆肥效率具有重要影响,合理调控这些因素可以优化堆肥工艺,提高堆肥产品的腐熟度和安全性。

尽管 EAC 技术在理论和实践层面都取得了显著进展,但仍存在一些挑战和改进空间。未来的研究可以从以下几个方面展开:深入研究电场与微生物群落之间的相互作用机制,特别是电场如何影响微生物的代谢途径和功能基因表达,以更精确地调控微生物群落结构和活性;探索更多高效、环保的外源添加物,如新型生物炭、微生物菌剂等,以进一步提高堆肥效率和产品质量;优化电场辅助好氧堆肥的工艺参数,包括电场强度、电极板形式、曝气方式等,以实现更高效、节能的堆肥过程。总之,电场辅助好氧堆肥技术作为一种新兴的粪污处理方法,具有广阔的应用前景和发展潜力。通过不断的研究和创新,有望为畜禽粪污处理和资源化利用提供更加有效、可持续的解决方案。

参考文献:

[1]付涛,李翔,上官华媛,等. 电场促进畜禽粪便好氧堆肥中

DOM 演化的光谱学研究[J]. 环境科学学报,2021,41(4): 1465-1477.

- [2]李莉,杨昕洞,何家俊,等. 我国畜禽粪便资源化利用的现状与展望[J]. 中国奶牛,2020(11):55-60.
- [3]王孝芳,王金鑫,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.
- [4]Pergola M, Persiani A, Palese A M, et al. Composting; the way for a sustainable agriculture[J]. Applied Soil Ecology, 2018, 123:744-750.
- [5]Yu Z, Tang J, Liao H P, et al. The distinctive microbial community improves composting efficiency in a full-scale hyperthermophilic composting plant[J]. Bioresource Technology, 2018, 265:146-154.
- [6]Tang J H, Li X, Zhao W Q, et al. Electric field induces electron flow to simultaneously enhance the maturity of aerobic composting and mitigate greenhouse gas emissions[J]. Bioresource Technology, 2019, 279:234-242.
- [7]Cao Y B, Wang X, Zhang X Y, et al. An electric field immobilizes heavy metals through promoting combination with humic substances during composting[J]. Bioresource Technology, 2021, 330:124996.
- [8]Cerdeira A, Artola A, Font X, et al. Composting of food wastes: status and challenges[J]. Bioresource Technology, 2018, 248:57-67.
- [9]Li F M, Guo S H, Hartog N. Electrokinetics - enhanced biodegradation of heavy polycyclic aromatic hydrocarbons in soil around iron and steel industries[J]. Electrochim Acta, 2012, 85: 228-234.
- [10]Mena E, Villaseñor J, Rodrigo M A, et al. Electrokinetic remediation of soil polluted with insoluble organics using biological permeable reactive barriers; effect of periodic polarity reversal and voltage gradient[J]. Chemical Engineering Journal, 2016, 299:30-36.
- [11]Cheng F L, Guo S H, Li G, et al. The loss of mobile ions and the aggregation of soil colloid: results of the electrokinetic effect and the cause of process termination[J]. Electrochimica Acta, 2017, 258: 1016-1024.
- [12]嵇婷婷,郭书海,李凤梅,等. 电动-微生物修复过程中石油胶质结构和毒性变化[J]. 环境工程学报,2017,11(6):3846-3852.
- [13]Li X, Shi X S, Lu M Y, et al. Succession of the bacterial community and functional characteristics during continuous thermophilic composting of dairy manure amended with recycled ceramsite[J]. Bioresource Technology, 2019, 294:122044.
- [14]Pankratov T A, Ivanova A O, Dedysh S N, et al. Bacterial populations and environmental factors controlling cellulose degradation in an acidic *Sphagnum* peat[J]. Environmental Microbiology, 2011, 13(7):1800-1814.
- [15]McKee L S, La Rosa S L, Westereng B, et al. Polysaccharide degradation by the bacteroidetes: mechanisms and nomenclature[J]. Environmental Microbiology Reports, 2021, 13(5):559-581.
- [16]Zhao Y, Lu Q, Wei Y Q, et al. Effect of Actinobacteria agent inoculation methods on cellulose degradation during composting

- based on redundancy analysis [J]. *Bioresource Technology*, 2016, 219:196–203.
- [17] Wang X Q, Cui H Y, Shi J H, et al. Relationship between bacterial diversity and environmental parameters during composting of different raw materials [J]. *Bioresource Technology*, 2015, 198:395–402.
- [18] Yang Y J, Awasthi M K, Bao H Y, et al. Exploring the microbial mechanisms of organic matter transformation during pig manure composting amended with bean dregs and biochar [J]. *Bioresource Technology*, 2020, 313:123647.
- [19] Ngaimat M S, Mohd Hata E, Zulperi D, et al. Plant growth – promoting bacteria as an emerging tool to manage bacterial rice pathogens [J]. *Microorganisms*, 2021, 9(4):682.
- [20] Boubekri K, Soumare A, Mardad I, et al. Multifunctional role of Actinobacteria in agricultural production sustainability: a review [J]. *Microbiological Research*, 2022, 261:127059.
- [21] Zhu N, Zhu Y Y, Kan Z X, et al. Effects of two – stage microbial inoculation on organic carbon turnover and fungal community succession during co – composting of cattle manure and rice straw [J]. *Bioresource Technology*, 2021, 341:125842.
- [22] Vandecasteele B, Reubens B, Willekens K, et al. Composting for increasing the fertilizer value of chicken manure: effects of feedstock on P availability [J]. *Waste and Biomass Valorization*, 2014, 5(3):491–503.
- [23] Chen X M, Song X Y, Liang Y, et al. Evaluation of the potential horizontal gene transfer ability during chicken manure and pig manure composting [J]. *Environmental Pollution*, 2024, 360:124621.
- [24] Zhong X Z, Li X X, Zeng Y, et al. Dynamic change of bacterial community during dairy manure composting process revealed by high – throughput sequencing and advanced bioinformatics tools [J]. *Bioresource Technology*, 2020, 306:123091.
- [25] Meng Q X, Yang W, Men M Q, et al. Microbial community succession and response to environmental variables during cow manure and corn straw composting [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2019, 10:529.
- [26] Ma S S, Fang C, Sun X X, et al. Bacterial community succession during pig manure and wheat straw aerobic composting covered with a semi – permeable membrane under slight positive pressure [J]. *Bioresource Technology*, 2018, 259:221–227.
- [27] Wang C N, Wang Y X, Ru H, et al. Study on microbial community succession and functional analysis during biodegradation of mushroom residue [J]. *BioMed Research International*, 2021:6620574.
- [28] Soong W S, Chew J, Gew L T. Insights of bacterial communities in kitchen and agricultural waste composts for environmental sustainability: a systematic review [J]. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2025, 22(3):2073–2094.
- [29] Rizzatti G, Lopetuso L R, Gibiino G, et al. Proteobacteria: a common factor in human diseases [J]. *BioMed Research International*, 2017:9351507.
- [30] Wei H W, Wang L H, Hassan M, et al. Succession of the functional microbial communities and the metabolic functions in maize straw composting process [J]. *Bioresource Technology*, 2018, 256:333–341.
- [31] Chen Y, Zhang J, Ruan L. Identification and degradation ability of lignin degradation isoaltes from landscaping waste compost [J]. *Journal of South China Agricultural University*, 2014, 35(6):94–98.
- [32] Mili C, Tayung K. Application of compatible lignocellulolytic fungal consortia for quality composting of leaf litter and assessment of the end products [J]. *Bioresource Technology Reports*, 2024, 25:101800.
- [33] Li B X, Sardar M F, Zhang X, et al. Electrokinetic technology enhanced the control of antibiotic resistance and the quality of swine manure composting [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 484:149581.
- [34] Zhang L, Wang X, Wang H G, et al. Microbial electrochemical composting: a sustainable strategy to enhance lignocellulose conversion into humus [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 481:148496.
- [35] Shangguan H Y, Fu T, Shen C, et al. *In situ* generated oxygen distribution causes maturity differentiation during electrolytic oxygen aerobic composting [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 850:157939.
- [36] Fu T, Shangguan H Y, Wei J R, et al. *In – situ* electrolytic oxygen is a feasible replacement for conventional aeration during aerobic composting [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 426:127846.
- [37] Fu T, Shangguan H Y, Wu J X, et al. Insight into the synergistic effects of conductive biochar for accelerating maturation during electric field – assisted aerobic composting [J]. *Bioresource Technology*, 2021, 337:125359.
- [38] Wen P, Tang J, Wang Y Q, et al. Hyperthermophilic composting significantly decreases methane emissions: Insights into the microbial mechanism [J]. *The Science of the Total Environment*, 2021, 784:147179.
- [39] Chang C H, Chen I C, Yang S S. Methane and carbon dioxide emissions from different composting periods [J]. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 2009, 20(3):511–520.
- [40] Cáceres R, Coromina N, Malínska K, et al. Nitrification during extended co – composting of extreme mixtures of green waste and solid fraction of cattle slurry to obtain growing media [J]. *Waste Management*, 2016, 58:118–125.
- [41] Al – Heetimi O T, van De ven C J C, van Geel P J, et al. Impact of temperature on the performance of compost – based landfill biocovers [J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, 344:118780.
- [42] Chungopast S, Yodying P, Nomura M. Effects of cellulolytic bacteria on nitrogen – fixing bacteria, 16S rRNA, nifH gene abundance, and chemical properties of water hyacinth compost [J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2021, 21(1):768–779.
- [43] Cao Y B, Wang X, Zhang X Y, et al. Nitrifier denitrification

- dominates nitrous oxide production in composting and can be inhibited by a bioelectrochemical nitrification inhibitor [J]. *Bioresource Technology*, 2021, 341:125851.
- [44] Tang J H, Li X, Cui P, et al. Nitrification plays a key role in N₂O emission in electric – field assisted aerobic composting [J]. *Bioresource Technology*, 2020, 297:122470.
- [45] Cao Y B, Wang X, Zhang X Y, et al. The effects of electric field assisted composting on ammonia and nitrous oxide emissions varied with different electrolytes [J]. *Bioresource Technology*, 2022, 344:126194.
- [46] Li X, Zhao Y, Xu A K, et al. Conductive biochar promotes oxygen utilization to inhibit greenhouse gas emissions during electric field – assisted aerobic composting[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 842:156929.
- [47] Guo H N, Liu H T, Wu S B. Immobilization pathways of heavy metals in composting; interactions of microbial community and functional gene under varying C/N ratios and bulking agents[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 426:128103.
- [48] Zhou J, Yu Y W, Jiang Y, et al. Effect of biochar on available heavy metals during sewage sludge composting and land application of compost[J]. *Huan Jing Ke Xue*, 2019, 40(2):987–993.
- [49] Zheng D, Wang J, Chang R, et al. Advances in the form changes of heavy metals in manure passivated by composting process [J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2021, 38(5):778–786.
- [50] Shen C, Shangguan H Y, Fu T, et al. Electric field – assisted aerobic co – composting of chicken manure and kitchen waste; Ammonia mitigation and maturation enhancement [J]. *Bioresource Technology*, 2024, 391:129931.
- [51] Xing R Z, Yin K K, Du X, et al. Enhanced organic matter humification by hydroxyl radical generation during electric field – assisted aerobic composting [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 482:148910.
- [52] Chen Y N, Yuan Y, Li Y P, et al. The effects of different electrode materials on the electric field – assisted co – composting system for the soil remediation of heavy metal pollution [J]. *The Science of the Total Environment*, 2024, 924:171600.
- [53] Li X, Wang S W, Zhao S L, et al. Effects of an assistive electric field on heavy metal passivation during manure composting [J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 901:165909.
- [54] Du Q, Mu Q H, Cheng T, et al. Real – time imaging revealed that exoelectrogens from wastewater are selected at the center of a gradient electric field [J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 52(15):8939–8946.
- [55] Liu G R, Zhou W, Zhang X, et al. Electrokinetic bioremediation of electric field on sediment microbial activity [J]. *Fresenius Environ Bull*, 2013, 22(5):1458–1462.
- [56] He Y Y, Lin R J, Yu X M, et al. Simultaneous enhancement on lignocellulose degradation and humic acid formation using the electric field coupled with an iron anode in the co – composting of food waste and agricultural waste [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 475:145846.
- [57] Azhar A S, Nabila A A, Nurshuhaila M S, et al. Electromigration of contaminated soil by electro – bioremediation technique [J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016, 136:012023.
- [58] Mi H, Shen C, Ding T T, et al. Identifying the role of array electrodes in improving the compost quality of food waste during electric field – assisted aerobic composting [J]. *Bioresource Technology*, 2023, 388:129763.
- [59] Shangguan H Y, Fu T, Wu J X, et al. Use of an in situ thermoelectric generator for electric field – assisted aerobic composting [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 742:140618.
- [60] Mejias L, Komilis D, Gea T, et al. The effect of airflow rates and aeration mode on the respiration activity of four organic wastes: implications on the composting process [J]. *Waste Management*, 2017, 65:22–28.
- [61] Qasim W, Moon B E, Okyere F G, et al. Influence of aeration rate and reactor shape on the composting of poultry manure and sawdust [J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2019, 69(5):633–645.
- [62] Jiang T, Li G X, Tang Q, et al. Effects of aeration method and aeration rate on greenhouse gas emissions during composting of pig feces in pilot scale [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2015, 31:124–132.
- [63] Su J Q, Wei B, Ou yang W Y, et al. Antibiotic resistome and its association with bacterial communities during sewage sludge composting [J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, 49(12):7356–7363.
- [64] Qian S X, Zhou X R, Fu Y K, et al. Biochar – compost as a new option for soil improvement; application in various problem soils [J]. *The Science of the Total Environment*, 2023, 870:162024.
- [65] Darby I, Xu C Y, Wallace H M, et al. Short – term dynamics of carbon and nitrogen using compost, compost – biochar mixture and organo – mineral biochar [J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2016, 23(11):11267–11278.
- [66] Parthasarathy P, Gupta N K, Narayanan K S. Effect of composting on products of slow pyrolysis [J]. *Biofuels*, 2015, 6(5/6):313–321.
- [67] Aydın Temel F. Evaluation of the influence of rice husk amendment on compost quality in the composting of sewage sludge [J]. *Bioresource Technology*, 2023, 373:128748.
- [68] Yang F, Li Y, Han Y H, et al. Performance of mature compost to control gaseous emissions in kitchen waste composting [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 657:262–269.
- [69] Yeh C K, Lin C, Shen H C, et al. Optimizing food waste composting parameters and evaluating heat generation [J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(7):2284.
- [70] Yang W, Zhang L. Addition of mature compost improves the composting of green waste [J]. *Bioresource Technology*, 2022, 350:126927.