



生物炭作为好氧堆肥添加剂的研究进展

胡一, 周建伟, 李娟, 戚智勇, 刘爽, 杨睿

引用本文:

胡一, 周建伟, 李娟, 等. 生物炭作为好氧堆肥添加剂的研究进展[J]. *农业资源与环境学报*, 2026, 43(1): 14–27.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2024.0877>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

堆肥工艺钝化粪肥中重金属及其形态变化的研究进展

郑丁瑀, 王珏, 常瑞雪, 陈清

农业资源与环境学报. 2021, 38(5): 778–786 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0548>

不同原料生物炭理化性质的对比分析

孙涛, 朱新萍, 李典鹏, 顾祝禹, 张佳喜, 贾宏涛

农业资源与环境学报. 2017, 34(6): 543–549 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2017.0158>

生物质炭对土壤硝态氮淋洗的影响

沈晨, 颜鹏, 魏吉鹏, 张兰, 张丽平, 李鑫, 韩文炎

农业资源与环境学报. 2018, 35(4): 292–300 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2017.0320>

秸秆生物炭对水稻生长及滩涂土壤化学性质的影响

张继宁, 周胜, 李广南, 孙会峰

农业资源与环境学报. 2018, 35(6): 492–499 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2017.0332>

基于CNKI的我国生物炭研究趋势文献计量学分析

安显金, 李维

农业资源与环境学报. 2018, 35(6): 483–491 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0159>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

胡一, 周建伟, 李娟, 等. 生物炭作为好氧堆肥添加剂的研究进展[J]. 农业资源与环境学报, 2026, 43(1): 14–27.

HU Y, ZHOU J W, LI J, et al. Research progress on biochar as an additive for organic waste composting[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2026, 43(1): 14–27.



开放科学 OSID

生物炭作为好氧堆肥添加剂的研究进展

胡一^{1,2,3}, 周建伟^{4,5}, 李娟^{1,3}, 戚智勇⁵, 刘爽^{5*}, 杨睿^{5*}

(1. 自然资源部退化及未利用土地整治工程重点实验室, 西安 710021; 2. 西安交通大学人居环境与建筑工程学院, 西安 710075; 3. 陕西地建土地工程技术研究院有限责任公司, 西安 710021; 4. 成都大学机械工程学院, 成都 610106; 5. 中国农业科学院都市农业研究所, 成都 610213)

摘要:堆肥和热化学转化均是实现有机废弃物资源化利用的有效途径。生物炭是热化学转化产生的富碳材料, 具有独特的理化性状。近年来, 将生物炭用作堆肥添加剂成为了一个热点研究领域。众多学者讨论了生物炭对堆肥过程的影响和调控机理以及生物炭共堆肥用作土壤调理剂的潜力。本文旨在评估生物炭用作堆肥添加剂的效果, 明确当前研究的不足, 提出未来的研究方向。现有研究表明, 生物炭作为堆肥添加剂可以改善堆肥物料的理化性状, 增强微生物活性, 促进有机质降解和腐殖化, 减少温室气体和其他气体污染物排放, 钝化重金属, 降低有机污染物残留。改性生物炭的效果优于未改性生物炭。未来仍需要在微观层面深入解析生物炭的特定理化性质(例如粒径、孔隙结构等)对堆肥过程的调控机制。生物炭共堆肥用作土壤改良材料可以提高土壤质量, 但是其对作物产量和品质的影响取决于作物种类和生物炭的施用量。将生物炭共堆肥、生物炭、堆肥以及生物炭+堆肥的效果进行比较的研究仍然极为有限, 并且现有研究多为短期研究, 生物炭共堆肥对土壤健康和作物生产的中长期影响也需要进一步评估。

关键词:堆肥过程; 气体排放; 微生物; 污染物; 土壤健康; 作物生产

doi: 10.13254/j.jare.2024.0877

Research progress on biochar as an additive for organic waste composting

HU Yi^{1,2,3}, ZHOU Jianwei^{4,5}, LI Juan^{1,3}, QI Zhiyong⁵, LIU Shuang^{5*}, YANG Rui^{5*}

(1. Key Laboratory of Degraded and Unused Land Consolidation Engineering, Ministry of Natural Resources, Xi'an 710021, China; 2. School of Human Settlements and Civil Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710075, China; 3. Institute of Land Engineering and Technology, Shaanxi Land Engineering Construction Group, Xi'an 710021, China; 4. School of Mechanical Engineering, Chengdu University, Chengdu 610106, China; 5. Institute of Urban Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Chengdu 610213, China)

Abstract: Composting and thermochemical conversion are effective ways to revalorize organic waste. Biochar is a carbon-rich material produced by thermochemical conversion with unique physicochemical properties. In recent years, the use of biochar as an additive for composting has become a hot research topic. Numerous scholars have discussed the effects of biochar on the composting process and the underlying mechanisms as well as the potential of co-composted biochar as soil amendment. The aim of this work is to evaluate the effectiveness of biochar as an additive for composting, to clarify the shortcomings of the current studies, and to propose future research directions. Current studies have shown that biochar as an additive for composting could improve the physicochemical properties of compost, enhance microbial activity, promote organic matter degradation and humification, reduce the emission of greenhouse gases and other gaseous pollutants, passivate heavy metals, and reduce the residual of organic pollutants. The performance of modified biochar is superior to pristine biochar. In the future, it is still necessary to analyze how the specific physicochemical properties of biochar (e.g., particle size, pore structure, etc.) regulate the composting process at the micro-level. Co-composted biochar as soil amendment could improve soil

收稿日期: 2024-11-05 录用日期: 2025-01-13

作者简介: 胡一(1986—), 女, 陕西西安人, 博士研究生, 研究方向为有机废弃物资源化利用。E-mail: huyi1120@stu.xjtu.edu.cn

*通信作者: 刘爽 E-mail: liushuang@caas.cn; 杨睿 E-mail: yangrui01@caas.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目(32101843); 四川省国际科技创新合作项目(2023YFH0039); 自然资源部退化及未利用土地整治工程重点实验室开放基金项目(SXDJ2024-18); 中国农业科学院科技创新工程项目(ASTIP-CAAS, 34-IUA-04)

health, but its effects on crop yield and quality are contingent on crop species and biochar rate. A direct comparison of co-composted biochar with biochar, compost, and biochar and compost co-application is still scarce. In addition, current studies are mostly short-term, therefore, the medium-term and long-term effects of co-composted biochar on soil health and crop production need to be further evaluated.

Keywords: composting process; gas emission; microorganism; pollutant; soil health; crop production

我国是农业和人口大国。据估计,我国每年产生的作物秸秆、畜禽粪污、城市污泥等有机废弃物超过15亿t^[1],并且将随着社会经济的发展而持续增加。有机废弃物生物稳定性通常较差,同时还可能带有病虫害以及重金属、有机污染物和放射性元素等有毒有害物质^[2],若不经妥善处理,将会造成生态环境的二次污染^[3]。因此,寻求长期、高效、绿色的有机废弃物处置和资源化利用方式成为当下的紧迫任务。

好氧堆肥是一个由微生物主导的生化反应过程,可以通过高温发酵使有机废弃物腐殖化和无害化^[4],是一种有效的有机废弃物的资源化利用方式。然而由于有机废弃物来源广泛、种类繁多、成分和性质差异较大^[5],在传统的堆肥过程中,会存在物料升温时间长、有机质降解缓慢、腐殖化不充分、易产生有害气体、营养元素损失以及污染物残留等缺点^[6-7]。为了缓解这些问题,往往需要在堆肥过程中加入调理剂。

生物炭是生物质在无氧或限氧条件下通过热化学转化获得的富碳固体材料,具有独特的孔隙结构、丰富的表面官能团以及较高的比表面积、阳离子交换量和稳定性等特征,因而被广泛地应用于农业和环境领域(图1)。近年来,国内外学者对生物炭用作堆肥添加剂的效果进行了大量的研究,发现在堆肥过程中添加生物炭能够有效改善堆体理化性状,改变微生物活性和群落,促进有机质降解和腐殖化过程,减少气体排放,降低堆肥中污染物的生态毒性,从而提高堆

肥的品质和安全性^[8],因此,生物炭是一种应用前景极佳的堆肥添加剂。本文在简要阐述生物炭制备工艺和影响生物炭性质的主要因素的基础上,详细综述了生物炭及改性生物炭作为添加剂对堆肥过程的影响及潜在调控机理,总结了生物炭共堆肥产品用作土壤调理剂对土壤健康和作物生长的影响,分析了生物炭共堆肥应用中存在问题,提出了未来的研究方向,旨在为生物炭在堆肥中的高效应用提供参考。

1 制备生物炭的热化学转化技术

目前,用于制备生物炭的热化学技术主要有热裂解、气化、烘焙和水热炭化等。

热裂解通过无氧或限氧的环境下对生物质进行外源高温加热,最终生成生物油、生物气以及生物炭^[8]。根据反应温度和加热速率的不同可以将传统热裂解分为快速热裂解和慢速热裂解。快速热裂解的加热速率可达 $10\sim 100\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$,反应温度较高($750\sim 1\,000\text{ }^{\circ}\text{C}$),保温时间很短($\leq 10\text{ s}$),主要产物为生物油,生物炭的产率较低($10\%\sim 15\%$)。慢速热裂解的反应温度($300\sim 550\text{ }^{\circ}\text{C}$)和加热速率($< 10\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$)低于快速热裂解,保温时间长达数分钟到数小时,因此生物炭的产率高于快速热裂解($30\%\sim 35\%$)。微波辅助热裂解是一种近年来新兴的热裂解技术,在制备生物炭时具有加热均匀、能量利用率高、反应时间短等优点。有研究表明相同的反应温度下,微波辅助热裂

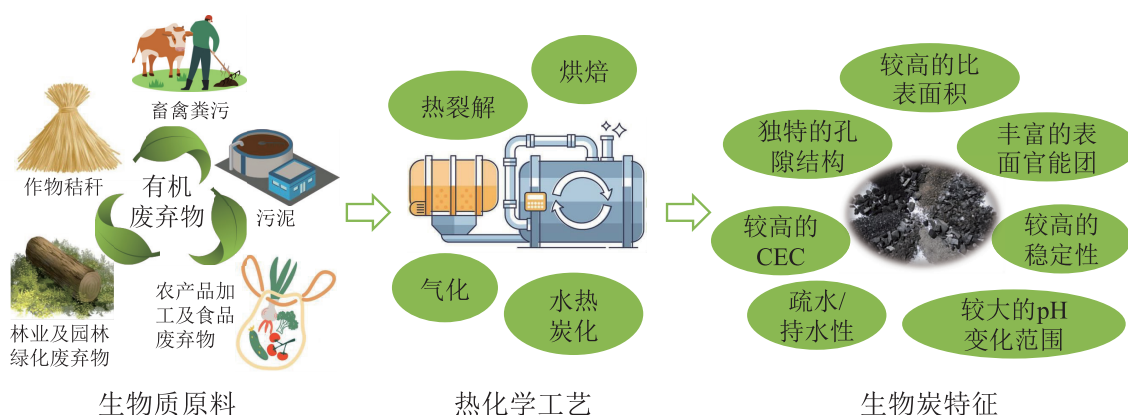


图1 制备生物炭的常见原料和热化学转化技术以及生物炭特征

Figure 1 Common feedstocks and thermochemical conversion technologies for biochar preparation and characteristics of biochar

解的生物炭产率低于传统热裂解,这可能是因为微波辅助热裂解具有更高的加热效率^[9]。

气化采用高温(600~1 000 ℃)和氧化性载气(例如空气、氧气和水蒸气等)对生物质进行处理,主产物为生物气,生物炭产量极低(<10%),因此一般使用较少^[10]。烘焙是一种较为温和的热化学转化工艺,反应温度低于传统热裂解(200~300 ℃),加热速率通常小于 50 ℃·min⁻¹,生物炭产率较高(35%~60%)。近年来,Zhang 等^[11-12]开发了以过热蒸汽作为载气和热源的生物质烘焙方法,进一步提高了效率,降低了成本。水热炭化是以水为反应媒介,在较低的温度(180~250 ℃)和较高的(1~5 MPa)自压力下将生物质原料转化成生物炭的过程(一般称为水热炭),产率通常高于热裂解^[13]。

2 影响生物炭性质的主要因素

原料类型和热化学工艺参数是决定生物炭理化性质的主要因素。

用于制备生物炭的原料通常为各种有机固体废弃物(图1),不同原料的有机质含量及组分等性质差异巨大且存在一定的时空变异,进而影响生物炭的特征。例如相对于畜禽粪便制备的生物炭,作物秸秆等植物源材料制备的生物炭通常具有更高的比表面积以及更低的灰分和养分^[14]。芦苇的纤维素含量高于竹子和花生壳,因此在相同的制备条件下,芦苇生物炭具有更多的微孔,比表面积也更高^[15]。

除了原料本身的理化性状,热化学转化工艺及关键参数对生物炭性质的影响也十分关键。例如热裂解温度与生物炭的产量和CEC呈强负相关,与pH、碳氮比、比表面积、孔隙度和稳定性则呈强正相关,而加

热速率和保温时间对生物炭性质的影响则不如温度的影响明显^[16]。与传统热裂解相比,微波辅助热裂解技术制备的生物炭具有更高比表面积和更大的孔隙结构^[17],而水热炭则保留有更多的含氧官能团,但芳香化程度低且生物稳定性较差^[9]。

3 生物炭对堆肥过程的影响

堆肥是有机质由不稳定转化为稳定状态的过程。作为一个固态、液态和气态的混合系统,堆肥过程受到多种因素共同调控(pH、碳氮比、孔隙度、温度和含水率等),其中一项参数的变化就可以显著影响堆肥过程和堆肥产品的品质。生物炭具有独特的理化性质,将其作为堆肥添加剂使用,可以显著改变堆肥过程。

3.1 堆肥参数

3.1.1 pH

pH是影响堆肥过程中微生物活性的关键因素^[18]。一般而言,堆肥物料的初始pH在6.5~8.5之间效果最佳^[9]。生物炭对堆肥物料pH的影响不尽相同(图2)。由于生物炭中通常含有可溶性碱性物质(如碳酸盐),作为堆肥添加剂时会短期提高堆肥的pH^[20-21]。然而,也有研究发现在堆肥中添加生物炭可以降低其pH,这可能是因为生物炭可以促进微生物活动,而微生物在降解有机质时产生了有机酸和无机酸^[22]。此外,生物炭还会吸附堆肥过程中产生的NH₃,抑制NH₃在堆肥溶液中的水解,降低OH⁻的生成,从而使堆肥的pH降低^[23-24]。

3.1.2 碳氮比

碳氮比也是决定堆肥过程中微生物活性的重要因素之一,初始碳氮比控制在25左右较为适宜^[25-26]。

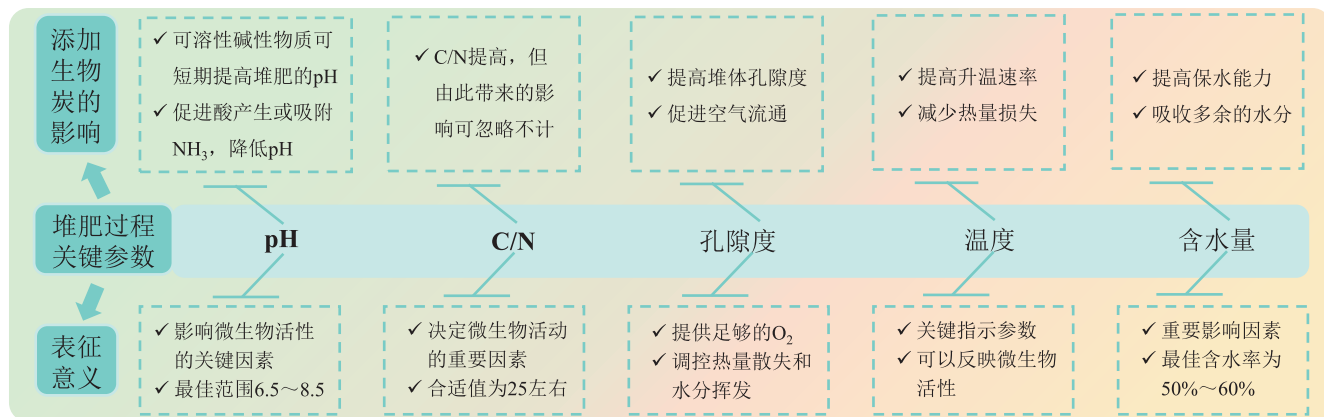


图2 生物炭对堆肥过程关键参数的影响

Figure 2 Impacts of biochar on key parameters of composting process

生物炭是一种富碳材料,在堆肥中添加生物炭可以显著提高堆肥初始阶段和成熟阶段的碳氮比^[27]。然而由于生物炭中大部分的C较为稳定,有一定抵抗生物和非生物降解的能力,有学者认为由其导致的碳氮比变化对堆肥过程的影响可以忽略不计^[6,28]。除了影响含碳量以外,生物炭还会影响堆肥过程中的氮素迁移转化。例如在堆肥中添加生物炭可以促进氮素的矿化和硝化,降低堆肥过程中总的氮素损失^[7],这也可能潜在影响堆肥过程中碳氮比的动态变化。

3.1.3 孔隙度

堆肥是一个好氧的过程,合适的孔隙度能够提供足够的O₂,并带走热量和多余的水分^[29]。添加生物炭可以较好地提高堆肥物料的孔隙度并降低堆积密度。例如在鸡粪堆肥中添加10%的竹子生物炭可以使堆体堆积密度降低25.7%^[30]。堆肥中添加生物炭还可以调控物料的颗粒分布,避免形成较大的团块,进而促进堆体内部的空气流通,减少厌氧区域的产生^[31-32]。例如在污泥堆肥中添加6%~18%的生物炭后,堆肥首日的摄氧速率提高了21%~37%,表明生物炭提高了堆体的氧气供应。需要注意的是,生物炭的粒径不能太小,否则会堵塞堆体中的孔隙,形成厌氧区域^[33]。

3.1.4 温度

温度决定了有机质降解和病原菌灭活的程度,是堆肥过程的关键指示参数。通常,堆肥有升温期、高温期、降温期和成熟期四个阶段^[29]。有研究表明在堆肥中添加生物炭可以加速堆体温度的上升,使堆肥过程更早地到达高温期,并且可以提高高温期的温度,延长高温期的持续时间^[22-23,31]。究其原因,一是添加生物炭有利于曝气,增强微生物的活性,产生更多的热量;二是生物炭能够填充物料颗粒之间的孔隙,减

少热损失。然而也有研究发现在堆肥中添加较高剂量的生物炭(≥10%)会缩短高温期的持续时间,这可能是因为添加生物炭可以加速有机质的降解,降低微生物可直接利用的有机质含量,从而降低高温期的微生物活性^[34-35]。

3.1.5 含水率

水分是影响堆肥过程的另一个关键因素,一般堆肥物料的最佳含水率在50%~60%之间^[23,29]。生物炭具有很好的持水性能,因此,添加生物炭可以有效提高堆肥物料的保水能力,延长堆肥过程中最佳含水量的维持时间^[19]。此外,对于含水量过高的物料,生物炭还能够吸收多余的水分,防止产生过多的渗滤液,避免高温期水分蒸发导致的堆体过度干燥^[23]。但是添加过量的生物炭(≥20%)尤其是大颗粒生物炭(3~5 cm)则会过度提高堆体的孔隙度,加速水分流失,导致堆体干燥、微生物活性降低^[32]。

3.2 微生物活性和群落

微生物(主要是细菌、真菌和放线菌)及其分泌的酶是堆肥过程的关键驱动因素^[33]。相对于传统堆肥,添加生物炭可以增强堆肥过程中的微生物代谢活性,主要表现为较高的CO₂呼吸速率和酶活^[36-39](表1)。生物炭提高堆肥过程微生物活性的主要原因在于:一是生物炭具有发达的孔隙结构和较高的比表面积,可以为细菌等微生物提供合适的栖息环境。Liu等^[40]在堆肥中添加的生物炭表面上观察到附着的细菌,并且相对于泥炭和沸石等其他堆肥添加剂,堆肥中的微生物更容易在生物炭的表面定殖^[40-41];二是生物炭可以为微生物生长代谢提供部分碳源和无机养分。Sun等^[41]发现在升温期,生物炭上的可溶性有机碳从2.1 mg·kg⁻¹提高到26 mg·kg⁻¹;三是生物炭可以缓解NH₃、H₂S等堆肥产物对微生物生长的抑制作用^[21];四

表1 生物炭对堆肥过程微生物活性和群落的影响

Table 1 Impacts of biochar on microbial activity and community during composting

堆肥原料 Feedstock of compost	生物炭原料 Feedstock of biochar	生物炭添加量 Biochar rate	效果 Performance	文献 Reference
鸡粪	松木屑	5%和20%堆肥干质量	整个堆肥周期的CO ₂ 呼吸速率提高了28%	[36]
鸡粪+苹果渣+稻壳+橡树皮	小槽木	2%堆肥体积	脲酶、磷酸酶和多酚氧化酶的活性提高了30%~40%	[37]
污泥+松木屑	荔枝木	10%堆肥鲜质量	磷酸酶、过氧化物酶、芳基硫酸酯酶、β-葡萄糖苷酶和脱氢酶的活性提高	[38]
猪粪+小麦秸秆	油菜秸秆和玉米秸秆	10%堆肥干质量	油菜秸秆生物炭提高了纤维素酶的活性	[39]
污泥+油菜籽渣	竹子	7%堆肥干质量	细菌、真菌和放线菌的数量分别比对照组高出1.1~17.2、3.4~46.1倍和1.4~29.5倍	[44]
污泥+小麦秸秆	小麦秸秆	2%、4%、6%、8%、12%和18%污泥干质量	随着堆肥中生物炭的添加量从2%增加到18%,细菌的丰度和多样性均有所下降	[45]
鸡粪+水稻秸秆	油橄榄空果串	20%堆肥干质量	降低了堆肥中细菌的α多样性	[46]

是生物炭可以调控堆肥过程关键参数,为堆体中的微生物提供更适宜的生活环境。

除了提高自身表面的微生物丰度和代谢能力^[41-43],生物炭还会影响堆肥中微生物群落的动态变化。大部分研究中堆肥的添加量都在1%~20%(质量比或体积比)之间^[19]。较低剂量的生物炭可以提高堆肥中细菌、真菌和放线菌的丰度,但是过高的生物炭添加量(>10%)则会降低堆肥中细菌的丰度和多样性^[44-46](表1)。生物炭还可以改变堆肥中的微生物群落结构。例如添加生物炭以后,堆肥中可以降解木质纤维素、芳香化合物以及碳氢化合物等生物炭组分的微生物种群(如 *Flavobacterium*、*Rhizobiales*、*Acinetobacter* 等)通常会得到富集^[40]。添加生物炭可以提高堆肥温度,因此不耐高温的细菌(如 *Bacteroidetes* 和 *Proteobacteria*)的丰度会降低^[47]。Yin 等^[39]发现在猪粪+小麦秸秆堆肥中添加10%的油菜秸秆和玉米秸秆生物炭均可以提高堆肥中真菌的多样性,但油菜秸秆生物炭主要提高了 *Fusarium*、*Acremonium* 以及 *Melanocarpus* 的丰度,而玉米秸秆则主要提高了 *Aspergillus* 的丰度,这表明不同原料制备的生物炭对堆肥中的微生物群落影响并不一致。

3.3 气体排放

好氧堆肥是一个复杂的生化反应过程,伴随着堆肥反应的进行,有机质的强烈分解和微生物的新陈代

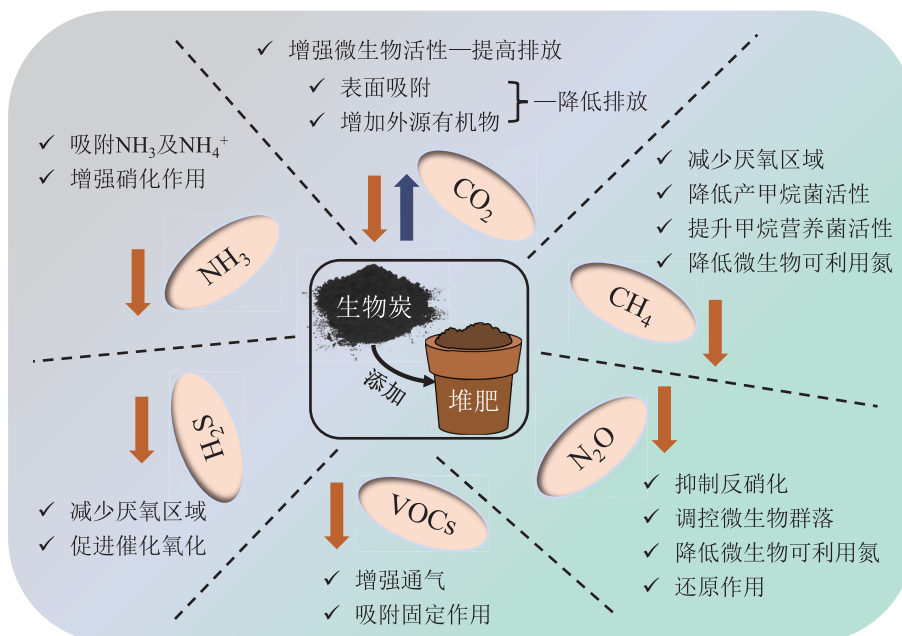
谢会产生许多气体,包括 N_2O 、 CH_4 、 CO_2 等温室气体以及 NH_3 、 H_2S 和挥发性有机物(VOCs)等其他气体^[5],这不仅会造成堆肥物料中营养元素损失,影响最终堆肥产品的品质,同时也会带来一些环境污染问题。在堆肥中添加生物炭可以调控堆肥过程中的气体排放(图3)。

3.3.1 NH_3

堆肥过程中产生的 NH_3 来源于含 N 有机物的降解。生物炭多呈碱性,并且添加生物炭可以提高堆体内部的温度,这些因素有利于 NH_3 的排放^[6],但是大量研究表明堆肥中添加生物炭可以显著降低 NH_3 排放,并且 NH_3 排放的降低程度与生物炭的添加量呈显著正相关^[6,38]。这可能是因为生物炭不仅能够直接吸附 NH_3 ,还可以从堆肥物料中吸附 NH_4^+ 和尿素、尿酸等其他含氮化合物,减少 N 矿化,从而降低 NH_3 的排放^[32]。此外,添加生物炭可以改善堆体的通气情况,为硝化细菌提供更好的生存环境,增强硝化作用^[6,19]。Agyarko-Mintah 等^[48]还发现添加生物炭的堆肥酶活更高,会产生更多的 DOC,在微生物利用这些 DOC 时会同时利用 NH_4^+ 作为 N 源,进而减少 NH_3 排放^[7]。

3.3.2 H_2S

堆肥过程中产生的 H_2S 主要来源于含 S 物质的降解。Steiner 等^[49]发现,当堆肥中生物炭添加量为 5% 和 20% 时, H_2S 排放量分别降低 58% 和 71%,这主要是因为生物炭改善了堆体的通气效果,减少了厌氧区



向下和向上的箭头分别代表排放量降低和增加。

图3 生物炭对堆肥过程中气体排放的影响

Figure 3 Impacts of biochar on gas emission during composting

域。Li等^[50]则发现生物炭通常呈碱性,并且生物炭的孔隙中分散分布着具有较高催化活性的点位,从而有利于H₂S的氧化,因此在堆肥中添加10%的木材生物炭使H₂S排放量减少了16.2%。然而也有研究表明在堆肥中添加3%的生物炭并没有对H₂S排放产生显著影响^[20]。

3.3.3 VOCs

VOCs可以在堆肥过程的不同阶段产生和释放,而VOCs的浓度和种类通常在高温期最高,主要可以归纳为含氮化合物、含氧化合物以及其他化合物^[51]。生物炭可以通过增强通气和吸附固定等机制,减少堆肥过程中的总VOCs排放^[52-53]。Sanchez-Monedero等^[51]在鸡粪堆肥中添加低剂量(3%)的生物炭,发现高温期含氮及含氧VOCs的排放降低了50%,但是生物炭添加对其他VOCs的减排效果不明显。

3.3.4 温室气体(CO₂、CH₄、N₂O)

CO₂是堆肥过程中产生的主要温室气体之一,可以直观反映微生物的代谢速率并间接指示微生物的活性^[54]。生物炭对堆肥过程中CO₂排放量的影响不尽相同。部分研究发现生物炭的添加会导致堆肥过程中CO₂的排放量增加,这可能是因为添加的生物炭改善了堆体环境,增强了微生物的代谢活性,因而在分解有机质过程中产生了更多的CO₂^[55-56]。也有研究表明生物炭可以减少CO₂排放^[57]。Wang等^[54]发现,与对照组相比,虽然生物炭处理的初始CO₂排放量更高,但最终整体排放量仍然减少了26.1%。

CH₄的产生需要严格的厌氧环境和较低的氧化还原电位(-150 mV)。然而即便在管理良好的堆肥系统中也不可避免地存在有微小的厌氧点位,进而产生一定量的CH₄^[32,38]。现有研究表明,在堆肥中添加生物炭可以显著降低CH₄排放,生物炭添加量较高(>8%)时降幅更为明显^[58]。生物炭降低堆肥过程中CH₄排放的机理主要有三个:一是添加的生物炭促进了堆体中的气体流通,减少了厌氧区域,提高了碳稳定性^[19],为甲烷营养菌创造了更合适的生存条件,从而可以消耗更多的CH₄;二是生物炭可以改变氧化还原电位,从而降低产甲烷菌的活性,增强甲烷营养菌的活性;三是生物炭能够吸附NH₄⁺,减少了产甲烷菌可利用的N源,从而减少CH₄的产生^[55]。

堆肥过程中N₂O的产生涉及复杂的微生物过程^[23],主要包括不完全的硝化和反硝化过程^[6,59]。在堆肥中添加生物炭能够改善堆体的理化性状,为硝化细菌提供充足的O₂,增强硝化反应,同时有效降低厌

氧微点位的形成,抑制反硝化作用,从而降低N₂O的产生^[7]。此外,在堆肥中添加生物炭可以吸附NH₄⁺和NO₃⁻,减少硝化和反硝化微生物可利用的N,从而抑制N₂O的产生^[22,55,60]。生物炭还可以通过调控参与N₂O产生的微生物活性以及群落来降低N₂O的排放。反硝化作用可分为NO₃⁻还原成N₂O以及N₂O还原成N₂两步,这两个过程分别由*nirS/nirK*和*nosZ*编码的还原酶来催化。研究发现在堆肥中添加生物炭可以抑制*nirK*的表达,同时提高*nosZ*的表达,从而降低N₂O的排放^[30,61]。除了通过以上途径调控N₂O的产生,生物炭本身也可以吸附N₂O^[62],并通过后续的生物^[63]和非生物作用^[64]还原为N₂。

3.4 污染物

3.4.1 重金属

生物炭中残留的重金属形态相对稳定,直接毒性、生物有效性比炭化前降低,因此具有较低的环境风险^[65]。堆肥中添加生物炭可以降低重金属的可移动性和生物有效性,其效果受到生物炭自身性质、添加量以及重金属类别的影响^[18]。例如Li等^[66]研究了在不同温度(250~900℃)下制备的玉米秸秆生物炭对猪粪堆肥中Zn和Cu生物有效性的影响,结果表明450~500℃下制备的生物炭对Cu和Zn的钝化效果最好。Chen等^[67]发现,在猪粪堆肥中添加竹子生物炭,Cu和Zn的迁移率会随着生物炭添加量的增加而降低,当生物炭添加量为9%时,Cu和Zn的迁移率分别降低了35%和39%。然而Liu等^[52]发现在污泥堆肥中添加1%的小麦秸秆生物炭对重金属的钝化效果优于更高的添加量(3%~7%),并且堆肥结束后有效Pb含量降幅最大,其次是As、Cu、Cr和Ni,但有效Zn和Cd含量增加。

生物炭对堆肥中重金属的钝化机制较为复杂。Yan等^[68]认为生物炭通过功能基团结合、静电吸引和离子交换等方式进行的吸附作用是生物炭钝化堆肥中重金属的主要途径,而Chen等^[69]则持相反的观点,他们认为腐殖质和酶才是降低堆肥中重金属生物有效性的关键。生物炭可以提高堆肥中的细菌丰度和多样性,尤其是重金属抗性微生物的活性(如*Firmicutes*、*Actinobacteria*以及*Proteobacteria*等),从而可以产生更多的腐殖质、DOC以及相关的酶等代谢产物,这些代谢产物的络合作用在重金属的钝化中起主导作用^[70-71]。Song等^[72]则发现生物炭提高了堆肥中耐受Cu和Zn胁迫的细菌多样性,并促进了这些细菌对低腐殖化程度有机组分(如DOC和富里酸)的利用

和对高腐殖化程度有机组分(如胡敏酸)的合成,这一细菌和有机质的交互作用是堆肥中重金属生物有效性降低的主要途径。

3.4.2 有机污染物

除了重金属以外,畜禽粪污、城市污泥等常见的堆肥原料中往往还含有多环芳烃(PAHs)、多氯联苯(PCBs)、抗生素等有机污染物。生物炭对堆肥中抗生素及抗生素抗性基因(ARGs)的迁移转化的调控是当前的研究热点。现有研究表明,相对于不添加生物炭,在堆肥中添加生物炭(通常为5%~10%)可以进一步降低总的抗生素含量,其主要原因是生物炭可以提高堆肥温度,进而促进抗生素的降解,但是生物炭对不同种类抗生素的含量的影响并不一致^[73-74](表2)。此外,生物炭发达的孔隙结构和丰度的表面官能团可以有效吸附抗生素,并通过生物炭表面富集的微生物将其生物降解,从而降低堆肥中的抗生素含量^[74]。

除直接影响抗生素的含量以外,生物炭还可以影响堆肥中ARGs的含量。堆肥中添加生物炭后,单个ARGs的丰度随着堆肥进程的发展存在波动,但是堆肥结束后总ARGs的丰度往往是降低的^[73-77](表2)。*Firmicutes*和*Actinobacteria*是堆肥中的主要ARGs宿主^[73-75],Zhou等^[75]发现生物炭降低了这些ARGs宿主在堆肥中的丰度,进而降低了ARGs的含量。ARGs可以通过可移动遗传元件(MGEs)在*Firmicutes*和*Actinobacteria*之间进行水平基因转移^[73],而生物炭可以显著降低堆肥中MGEs的数量,抑制ARGs的扩散。例如一类和二类整合子整合酶基因(*intI1*和*intI2*)是表征水平基因转移的常用指标,有证据表明堆肥中添加生物炭可以显著降低*intI1*和*intI2*基因的丰度^[74,76,78]。Wang等^[79]则发现堆肥中添加生物炭可以显著抑制携带ARGs质粒的接合转移。生物炭降低堆肥中MGEs的主要机理有两个:一是生物炭可以吸附MGEs,干扰其对其他宿主的再侵染;二是生物炭表面存在的活氧自由基可以消除MGEs^[16]。

生物炭调控堆肥中抗生素和ARGs的效果受到堆肥物料种类以及生物炭制备原料和粒径的影响。在鸡粪堆肥中,大颗粒的生物炭(2 mm)可以将总ARGs的丰度降低50%,而小颗粒生物炭(0.85 mm)则不影响总ARGs的丰度。在猪粪堆肥中,低温制备(400 °C)的大颗粒生物炭去除ARGs的效率比高温制备(750 °C)的更高,相反地,高温制备的小颗粒生物炭效率更高^[77]。然而,Zhou等^[80]发现小颗粒的生物炭($\leq 75 \mu\text{m}$)去除ARGs

和MGEs的效果要优于大颗粒的生物炭($\geq 2 \text{mm}$),这可能是因为小颗粒的生物炭具有更多的介孔,可以更有效地降低MGEs的丰度。此外,小颗粒的生物炭还可以促进不同微生物之间的竞争,抑制ARGs宿主的生长,而大颗粒生物炭则能够为ARGs宿主提供更稳定的生长环境,这也是导致不同粒径生物炭不同效果的原因之一^[81]。Zhou等^[80]还发现相对于猪粪生物炭,水稻秸秆生物炭可以更有效地降低堆肥中的ARGs和MGEs,这可能是因为猪粪生物炭具有更高的氮含量,促进了ARGs的宿主微生物的繁殖。

生物炭如何影响堆肥中其他有机污染物的研究仍然比较有限。例如生物炭制备过程中也会产生PAHs,但是PAHs与生物炭的结合能力远高于其与土壤、堆肥的结合能力,因此生物炭自身含有的PAHs的生物有效性比堆肥原料中的PAHs的生物有效性低两个数量级以上。即便是生物炭中的PAHs含量较高,其应用可能也不会造成严重的环境风险^[82]。在堆肥中添加生物炭可以促进堆肥中可利用态PAHs的去除,但是总的PAHs含量与不添加生物炭的处理没有显著差异^[83](表2)。生物炭与污泥的共同培养试验发现,芳香化程度高的生物炭(O/C低)对堆肥中游离态PAHs的吸附效果更好^[83-85]。生物炭可以用于修复PCBs污染的土壤^[86],但是尚未有研究评估其对堆肥中PCBs的影响。

微塑料是一种近年来受到广泛关注的新污染物。研究发现堆肥中添加生物炭可以促进微塑料的降解^[87](表2),其主要原因在于:一是添加生物炭加速了微塑料上C—H键的断裂和氧化;二是生物炭提高了堆肥中可降解微塑料的微生物的丰度(如*Bacillus*等),加强了这些微生物与微塑料颗粒的互利共栖作用,从而加速了微塑料的降解。

4 改性生物炭对堆肥过程的影响

为进一步改善生物炭的性质,提高生物炭吸附性能,很多研究对生物炭进行改性处理。例如酸碱改性和氧化剂改性可以提高生物炭的比表面积和其表面官能团的种类和数量,金属盐或金属氧化物的改性可以改善生物炭的磁性、吸附、催化性能^[88]。目前,改性生物炭的研究多集中于环境中重金属、有机物等污染物的吸附,仅少量研究探讨改性生物炭在堆肥过程中的添加效果和影响(表3)。

Qi等^[89]发现添加5%的MnO₂改性生物炭可以将堆肥中腐殖质和腐植酸的含量分别提高29.1%和

37.2%,提升堆肥的稳定性(表3)。其主要原因在于MnO₂改性生物炭改变了腐殖质组分的形成机理,增强了胡敏酸的腐殖化程度,并且提高了*Microbacterium*、*Bacteroides*、*Kroppenstedtia*、*Gracilibacillus*以及*Lentibacillus*等微生物的丰度,这些微生物与腐殖质形成直接相关,可以通过次生代谢合成芳香化合物,并将有机组分转换成大分子的腐殖质结构,促进堆肥腐殖化程度。

改性生物炭可以进一步降低堆肥过程中的气体排放(表3)。在粪便与秸秆堆肥中添加10%经H₂O₂改性、HNO₃改性以及H₂O₂-HNO₃双重改性的生物炭可以显著增加堆肥中氨氧化细菌(AOB)的丰度,降低脲酶活性以及*narG*和*nirS*基因的丰度,从而降低堆肥过程中的NH₃排放,其中H₂O₂改性的效果优于其他改性方法^[90]。Gu等^[91]则发现Mg改性生物炭可以通过吸附和生成磷酸铵镁(MgNH₄PO₄·6H₂O)沉淀来降低NH₃

表2 生物炭对堆肥中有机污染物的影响

Table 2 Impacts of biochar on organic pollutants during composting

堆肥原料 Feedstock of compost	生物炭原料 Feedstock of biochar	生物炭添加量 Biochar rate	效果 Performance	文献 Reference
牛粪+小麦秸秆	小麦秸秆	10%堆肥湿质量	促进了堆肥中土霉素、金霉素和四环素的降解;总的ARGs丰度降低了16.8%,其中 <i>tetB</i> 、 <i>tetL</i> 等ARGs的丰度降低,而 <i>macB</i> 、 <i>bcrA</i> 等ARGs的丰度不受影响	[73]
牛粪+玉米秸秆	玉米秸秆	10%堆肥湿质量	降低了堆肥中四环素类、磺胺类、大环内酯类以及林可酰胺类抗生素的含量,但单诺沙星和恩诺沙星等氟喹诺酮类抗生素含量有所增加;降低了堆肥结束时总的ARGs丰度,其中 <i>tetM</i> 、 <i>tetO</i> 等ARGs丰度降低, <i>tetA</i> 、 <i>tetC</i> 等ARGs丰度升高	[74]
鸡粪+蘑菇残渣	玉米秸秆	5%堆肥质量	降低了堆肥中总的ARGs丰度,其中 <i>tetW</i> 、 <i>tetO</i> 、 <i>tetC</i> 、 <i>tetG</i> 、 <i>ermB</i> 、 <i>ermC</i> 、 <i>sul1</i> 、 <i>sul2</i> 等ARGs的丰度降低	[75]
污泥+玉米秸秆	玉米秸秆	5%干质量	降低了堆肥中总的ARGs丰度	[76]
鸡粪+牛粪+小麦秸秆	茶树枝	10%堆肥质量	降低了堆肥中总的ARGs丰度,其中肽类、氯霉素类以及二氨基嘧啶类等ARGs的降幅>30%	[77]
秸秆+麦麸+腐烂蔬菜+受污染的土壤	玉米芯	7%堆肥质量	堆肥中总的PAHs含量不变,可利用态PAHs的含量降低了40%	[83]
牛粪+锯末	家畜粪便	10%堆肥质量	堆肥中微塑料颗粒的残留降低了29.2%	[87]

注:部分文献中未描述生物炭添加量是基于堆肥物料干质量或湿质量,因此表中表述为堆肥质量。

表3 添加改性生物炭对堆肥过程的影响

Table 3 Impacts of modified biochar on composting process

生物炭原料 Feedstock of biochar	生物炭制备条件 Biochar preparation	生物炭改性方法 Biochar modification	生物炭添加量 Biochar rate	堆肥原料 Feedstock of compost	效果 Performance	文献 Reference
玉米秸秆	20℃+2h热裂解	将生物炭和KMnO ₄ 在水中超声分散,再加入0.3 mol·L ⁻¹ 的Mn(CH ₃ COO) ₂ ·4H ₂ O溶液搅拌均匀成悬浊液,过滤后干燥	5%堆肥干质量	鸡粪+玉米秸秆	提高堆肥的腐殖化程度和稳定性	[89]
玉米秸秆	—	6 mol·L ⁻¹ HNO ₃ 浸渍,搅拌后干燥;25% H ₂ O ₂ 浸渍,搅拌后干燥;6 mol·L ⁻¹ HNO ₃ 改性生物炭再进行25% H ₂ O ₂ 浸渍,搅拌后干燥	10%堆肥干质量	鸡粪+锯末	降低NH ₃ 排放,其中H ₂ O ₂ 改性效果最好	[90]
玉米秸秆	400℃热裂解	MgCl ₂ 溶液浸渍,搅拌后烘干,400℃+2h继续热裂解	3%堆肥湿质量	猪粪+玉米秸秆	降低CH ₄ 、N ₂ O和NH ₃ 排放,其中Mg与生物炭浸渍比为0.5时的效果最好	[91]
玉米秸秆	—	15% NaOH浸渍,搅拌后干燥	10%堆肥干质量	鸡粪+锯末	降低NH ₃ 和H ₂ S的排放	[92]
花生壳	500℃+30min热裂解	2 mol·L ⁻¹ NaOH浸渍,搅拌后干燥 FeCl ₃ 溶液浸渍,搅拌后干燥	24%猪粪干质量	猪粪+玉米秸秆	钝化堆肥中Cu、Zn、Pb,其中FeCl ₃ 改性效果最好	[93]
小麦秸秆	500℃+4h热裂解	20% H ₃ PO ₄ 浸渍,搅拌后干燥	10%堆肥干质量	鸡粪+锯末	钝化堆肥中的Cu和Zn,降低MRGs的丰度	[94]
稻壳	—	0.42 mol·L ⁻¹ MgCl ₂ 溶液浸渍,搅拌后烘干,300℃+1h继续热裂解	2%和5%堆肥干质量	鸡粪+锯末	降低ARGs的丰度,其中2%的添加量效果更好	[95]

的排放,并通过抑制反硝化细菌(如*Pseudoxanthomonas*和*norank-f-Methylococcaceae*)和厌氧产甲烷菌(*Jeotgalibaca*和*Lactobacillus*)的繁殖来降低 N_2O 和 CH_4 的排放。Cao等^[92]发现添加10%的NaOH改性生物炭后,堆肥中 NH_3 和 H_2S 的排放分别降低了40.63%和77.78%。这是因为NaOH改性生物炭具有更高的比表面积、孔隙结构以及更丰富的碱性和含氧官能团,因而促进了 NH_3 的吸附。*Limnochordaceae*、*Savagea*、以及*IMCC26207*等微生物可以将 H_2S 转化成稳定的硫酸盐,NaOH改性生物炭提高了这些微生物在堆肥中的丰度,同时改变了硫代谢基因的丰度,抑制了半胱氨酸的合成以及硫酸盐向亚硫酸盐的转化,从而降低了 H_2S 的排放。

改性生物炭可以促进堆肥中重金属的钝化(表3)。李冉等^[93]比较了未改性生物炭、NaOH改性和 $FeCl_3$ 改性生物炭对猪粪堆肥中Cu、Zn、Pb等重金属的钝化效果,结果表明改性生物炭效果优于未改性生物炭, $FeCl_3$ 改性生物炭效果最好,其原因可能是 $FeCl_3$ 改性生物炭具有更高的比表面积和孔隙度,且沉积在 $FeCl_3$ 改性生物炭表面的无定形态铁可以通过络合作用钝化重金属。 H_3PO_4 改性生物炭则可以通过形成磷酸盐沉淀进一步钝化堆肥中的Cu和Zn,并通过改变堆肥中的微生物群落降低重金属抗性基因以及相应MGEs的丰度^[94]。

Liu等^[95]发现,添加2%和5%的Mg改性生物炭可以降低堆肥中ARGs以及MGEs的丰度(表3),其中添加2%的Mg改性生物炭效果更好。其主要机理在于Mg改性生物炭降低了堆肥中*Proteobacteria*和*Firmicutes*等ARGs宿主的丰度。

5 生物炭共堆肥用作土壤调理剂的效果

英文中通常将添加生物炭的堆肥产品称之为co-composted biochar,直译过来为“共堆肥生物炭”。然而堆肥中生物炭的添加量往往较低,主要成分仍为堆肥物料,所以笔者认为将其称之为“生物炭共堆肥”更为合理。成熟的堆肥产品通常被用作土壤有机改良材料,以提高土壤健康^[96]。作为堆肥添加剂,生物炭可以有效提高堆肥品质。与此同时,生物炭会吸收/吸附堆肥渗滤液中的水分、有机质和矿质营养,生物炭自身的养分水平、CEC、含氧官能团、持水能力和芳香化程度等性质均会显著提高^[53,97],这表明生物炭共堆肥既可以克服生物炭养分不足的缺点,又可以调控堆肥中养分的释放,降低堆肥中养分和污染物的淋

溶,因此是一个很有前景的土壤调理剂^[18,98]。

许多学者都研究了生物炭和堆肥单独施用或者混合施用对土壤理化性状以及作物生产的影响,然而将生物炭共堆肥作为土壤调理剂的研究仍然有限。生物炭共堆肥可以影响土壤健康。物理性状方面,生物炭共堆肥可以提高土壤中植物可利用水分的含量和土壤团聚体的稳定性^[98-100]。化学性状方面,生物炭共堆肥可以提高土壤有机碳/有机质的含量^[89]以及土壤有机碳的稳定性^[101],因此可以作为土壤固碳的有效手段^[102]。此外,生物炭共堆肥还可以提高土壤中 NH_4^+ 、 NO_3^- 、P、K、Ca、Mg等养分的含量以及土壤CEC,从而提高土壤肥力。Sanchez-Monedero等^[103]的研究表明,生物炭共堆肥可以在不影响作物产量和品质的前提下部分替代化肥。生物炭共堆肥可以通过其丰富的孔隙和表面官能团吸附硝酸盐,从而降低土壤中硝酸盐的淋溶^[104]。同时,生物炭共堆肥还可以降低土壤中 N_2O 的排放^[100-101,105]。Pandit等^[106]等还发现生物炭共堆肥还可以改变土壤的EC、pH以及Eh等化学性状。生物学性状方面,生物炭共堆肥可以提高土壤微生物群落的多样性和活性(如土壤呼吸速率),尤其是反硝化微生物的活性^[103,107]。

生物炭共堆肥对土壤健康的改变可以影响作物生产,其效果取决于施用量、作物类型、土壤性质、生物炭类型等多方面因素的影响(图4)。有研究表明在土壤中施用生物炭协同堆肥以后,玉米、大麦、燕麦、小麦、藜麦、花生、椰子、西瓜、葡萄以及白菜等作物的产量均有不同程度的提升^[98,105,107-108],但也有研究发现施用生物炭共堆肥后,香蕉的产量比对照降低了24%,而木瓜的产量则不受影响^[100]。生物炭共堆肥对作物产量的提升作用在逆境条件下更为明显,如在贫瘠土壤中以及当作物遭受干旱、高盐、重金属等非生物胁迫时^[60,109-111]。Wang等^[111]通过Meta分析表明,当生物炭共堆肥的施用量 $<20 t \cdot hm^{-2}$ 或者 $>30 t \cdot hm^{-2}$ 时可以显著提高作物产量,而施用量在 $20 \sim 30 t \cdot hm^{-2}$ 之间时则效果不明显。

目前将生物炭共堆肥与生物炭、堆肥以及生物炭+堆肥共同施用效果进行直接比较的研究鲜有报道。Kammann等^[60]发现在土壤中添加2%的生物炭共堆肥可以将藜麦的产量提高305%,而单独施用生物炭藜麦的产量则降低了60%,这一现象在贫瘠的土壤中更为明显。这可能是因为生物炭共堆肥中含有更丰富的养分,尤其是硝酸盐和磷酸盐。Mikajlo等^[112]采用盆栽实验发现,施用生物炭共堆肥不影响土壤

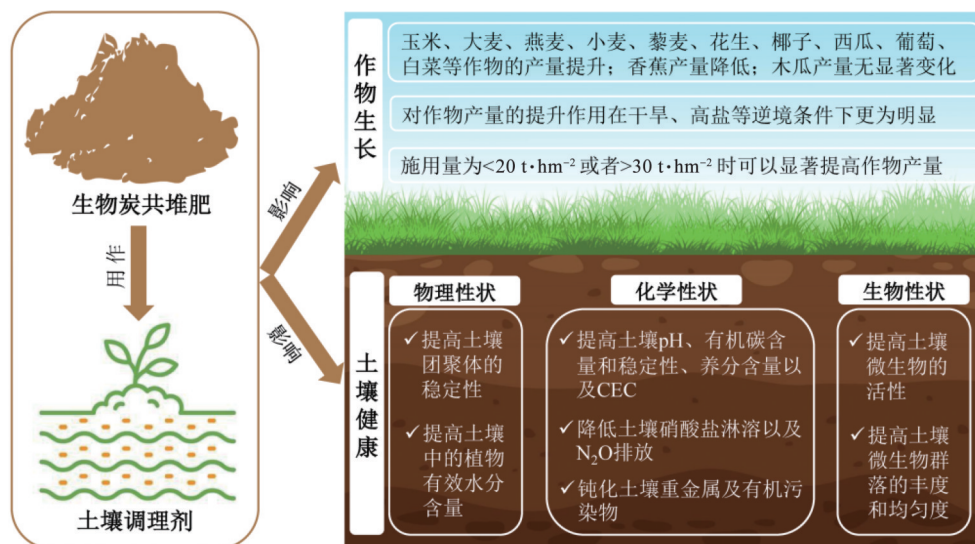


图4 生物炭共堆肥对土壤健康和作物生产的影响

Figure 4 Impacts of co-composted biochar on soil health and crop production

pH,而单独施用生物炭或生物炭+堆肥则显著提高了土壤pH。此外,生物炭共堆肥还比其他处理更有效地提高了土壤有机质含量和稳定性、土壤全氮含量以及土壤微生物活性,这一趋势也在贫瘠的土壤上更为明显。相对于不添加土壤调理剂的对照处理,单独施用生物炭不影响生菜产量,生物炭+堆肥将生菜产量提高了3倍,而生物炭共堆肥则将生菜产量提高了6倍。上述研究表明生物炭共堆肥可能是比生物炭和堆肥更好的土壤调理剂。

6 结论与展望

生物炭独特的理化性质使其在农业和环境领域有着良好的应用前景。大量研究表明,生物炭用作堆肥添加剂时可以多方面改善堆肥过程并显著影响堆肥产品的理化性状。然而有机废弃物的堆肥过程较为复杂,目前在将生物炭作为堆肥添加剂时仍然存在以下问题并需要进一步的研究:

(1)不同的制炭原料和制炭条件会导致生物炭的理化性状差异较大,如何量化这一差异对堆肥的影响进而确定最佳的生物炭种类、粒径和添加量等参数,需要进一步的研究。开展对现有文献的Meta分析也将为未来研究的开展提供有用的信息。

(2)将改性生物炭作为堆肥添加剂的研究仍然有限,未来仍需要明确不同改性技术对生物炭功能以及堆肥过程的影响,以期实现根据堆肥过程的特定调控目标选择不同的生物炭改性技术,同时需要考虑不同改性技术的成本问题。

(3)堆肥是由微生物驱动的过程,未来仍需要采用新的技术(如宏基因组分析和多组学联合分析)深入解析生物炭调控堆肥过程的微观机理,尤其是不同微生物群落之间的交互作用。

(4)目前生物炭对堆肥中有机污染物的调控研究主要集中在抗生素和抗生素抗性基因方面,对多环芳烃、多氯联苯等其他污染物的关注不够。此外,持久性有机污染物、内分泌干扰物、微塑料等新污染物具有危害比较严重、风险比较隐蔽、来源广泛性、治理复杂性等特征,添加生物炭如何影响这些新污染物在堆肥中的迁移转化仍然是一个空白,未来也值得进一步探索。

(5)到目前为止,利用生物炭改善堆肥过程大多都是在实验室级别实现的。受到实验室研究的局限性,尚不清楚在大规模的堆肥工艺中添加生物炭是否具有多种益处。此外,添加生物炭的大规模堆肥产品在实际应用中的效果如何,尤其是中长期效果如何,目前也缺乏充分的研究。现阶段限制生物炭发展的主要问题是制炭成本高,低成本制炭技术的开发和优化(如过热蒸汽烘焙)将是促进生物炭技术推广的关键。

参考文献:

- [1] CUI X H, GUO L Y, LI C H, et al. The total biomass nitrogen reservoir and its potential of replacing chemical fertilizers in China[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, 135: 110215.
- [2] 李萍萍, 胡永光, 朱忠贵. 工业废渣芦苇末的农用资源化技术[J]. *城市环境与城市生态*, 2001, 14(4): 57-59.
- [3] 曾海燕, 杨钊. 污泥秸秆动态容器好氧发酵堆肥热量平衡实验[J].

- 四川环境, 2019, 38(2):20-23. ZENG H Y, YANG Z. Heat balance experiment of aerobic fermentation compost with sludge and straw in dynamic container[J]. *Sichuan Environment*, 2019, 38(2):20-23.
- [4] 赵彬涵, 孙宪响, 黄俊, 等. 微生物在有机固废堆肥中的作用与应用[J]. 微生物学通报, 2021, 48(1):223-240. ZHAO B H, SUN X Y, HUANG J, et al. Application and effects of microbial additives in aerobic composting of organic solid wastes: a review[J]. *Microbiology China*, 2021, 48(1):223-240.
- [5] 黄霞, 何莹莹, 张艺蝶, 等. 基于生物炭强化有机固废好氧堆肥资源化研究进展[J]. 化工进展, 2022, 41(8):4544-4554. HUANG X, HE Y Y, ZHANG Y D, et al. Research progress on enhancing resource utilization of organic solid waste aerobic composting based on biochar[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2022, 41(8):4544-4554.
- [6] XIAO R, AWASTHI M K, LI R H, et al. Recent developments in biochar utilization as an additive in organic solid waste composting: a review[J]. *Bioresource Technology*, 2017, 246:203-213.
- [7] GUO X X, LIU H T, ZHANG J. The role of biochar in organic waste composting and soil improvement: a review[J]. *Waste Management*, 2020, 102:884-899.
- [8] CHA J S, PARK S H, JUNG S C, et al. Production and utilization of biochar: a review[J]. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2016, 40:1-15.
- [9] YANG C Y, LI R, ZHANG B, et al. Pyrolysis of microalgae: a critical review[J]. *Fuel Processing Technology*, 2019, 186:53-72.
- [10] YOU S M, OK Y S, CHEN S S, et al. A critical review on sustainable biochar system through gasification: energy and environmental applications[J]. *Bioresource Technology*, 2017, 246:242-253.
- [11] ZHANG D D, CHEN X J, QI Z Y, et al. Superheated steam as carrier gas and the sole heat source to enhance biomass torrefaction[J]. *Bioresource Technology*, 2021, 331:124955.
- [12] ZHANG D D, HAN P L, YANG R, et al. Fuel properties and combustion behaviors of fast torrefied pinewood in a heavily loaded fixed-bed reactor by superheated steam[J]. *Bioresource Technology*, 2021, 342:125929.
- [13] SUNDBERG C, SMÅRS S, JÖNSSON H. Low pH as an inhibiting factor in the transition from mesophilic to thermophilic phase in composting[J]. *Bioresource Technology*, 2004, 95(2):145-150.
- [14] WIJITKOSUM S. Biochar derived from agricultural wastes and wood residues for sustainable agricultural and environmental applications[J]. *International Soil and Water Conservation Research*, 2022, 10(2):335-341.
- [15] LIU Y Q, LIU S L, YANG Z C, et al. Synergetic effects of biochars and denitrifier on nitrate removal[J]. *Bioresource Technology*, 2021, 335:125245.
- [16] LI Y, KUMAR AWASTHI M, SINDHU R, et al. Biochar preparation and evaluation of its effect in composting mechanism: a review[J]. *Bioresource Technology*, 2023, 384:129329.
- [17] ETHAIB S, OMAR R, KAMAL S M M, et al. Microwave-assisted pyrolysis of biomass waste: a mini review[J]. *Processes*, 2020, 8(9):1190.
- [18] GODLEWSKA P, SCHMIDT H P, OK Y S, et al. Biochar for composting improvement and contaminants reduction: a review[J]. *Bioresource Technology*, 2017, 246:193-202.
- [19] NGUYEN M K, LIN C, HOANG H G, et al. Evaluate the role of biochar during the organic waste composting process: a critical review[J]. *Chemosphere*, 2022, 299:134488.
- [20] SÁNCHEZ-GARCÍA M, ALBURQUERQUE J A, SÁNCHEZ-MONEDERO M A, et al. Biochar accelerates organic matter degradation and enhances N mineralisation during composting of poultry manure without a relevant impact on gas emissions[J]. *Bioresource Technology*, 2015, 192:272-279.
- [21] VANDECASTEELE B, SINICCO T, D'HOSE T, et al. Biochar amendment before or after composting affects compost quality and N losses, but not P plant uptake[J]. *Journal of Environmental Management*, 2016, 168:200-209.
- [22] ZHANG J N, CHEN G F, SUN H F, et al. Straw biochar hastens organic matter degradation and produces nutrient-rich compost[J]. *Bioresource Technology*, 2016, 200:876-883.
- [23] AKDENIZ N. A systematic review of biochar use in animal waste composting[J]. *Waste Management*, 2019, 88:291-300.
- [24] HE X Q, CHEN L J, HAN L J, et al. Evaluation of biochar powder on oxygen supply efficiency and global warming potential during mainstream large-scale aerobic composting[J]. *Bioresource Technology*, 2017, 245:309-317.
- [25] HILKIAH IGONI A, AYOTAMUNO M J, EZE C L, et al. Designs of anaerobic digesters for producing biogas from municipal solid-waste[J]. *Applied Energy*, 2008, 85(6):430-438.
- [26] WU S H, SHEN Z Q, YANG C P, et al. Effects of C/N ratio and bulking agent on speciation of Zn and Cu and enzymatic activity during pig manure composting[J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2017, 119:429-436.
- [27] JINDO K, SONOKI T, MATSUMOTO K, et al. Influence of biochar addition on the humic substances of composting manures[J]. *Waste Management*, 2016, 49:545-552.
- [28] KHAN N, CLARK I, SÁNCHEZ-MONEDERO M A, et al. Physical and chemical properties of biochars co-composted with biowastes and incubated with a chicken litter compost[J]. *Chemosphere*, 2016, 142:14-23.
- [29] ONWOSI C O, IGBOKWE V C, ODIMBA J N, et al. Composting technology in waste stabilization: on the methods, challenges and future prospects[J]. *Journal of Environmental Management*, 2017, 190:140-157.
- [30] LIU N, ZHOU J L, HAN L J, et al. Role and multi-scale characterization of bamboo biochar during poultry manure aerobic composting[J]. *Bioresource Technology*, 2017, 241:190-199.
- [31] BEHERA S, SAMAL K. Sustainable approach to manage solid waste through biochar assisted composting[J]. *Energy Nexus*, 2022, 7:100121.
- [32] SANCHEZ-MONEDERO M A, CAYUELA M L, ROIG A, et al. Role of biochar as an additive in organic waste composting[J]. *Bioresource Technology*, 2018, 247:1155-1164.

- [33] LIU Q M, HE X Y, WANG K L, et al. Biochar drives humus formation during composting by regulating the specialized metabolic features of microbiome[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 458:141380.
- [34] CZEKAŁA W, MALIŃSKA K, CÁCERES R, et al. Co-composting of poultry manure mixtures amended with biochar: the effect of biochar on temperature and C-CO₂ emission[J]. *Bioresource Technology*, 2016, 200:921-927.
- [35] JINDO K, SÁNCHEZ-MONEDERO M A, HERNÁNDEZ T, et al. Biochar influences the microbial community structure during manure composting with agricultural wastes[J]. *Science of the Total Environment*, 2012, 416:476-481.
- [36] STEINER C, MELEAR N, HARRIS K, et al. Biochar as bulking agent for poultry litter composting[J]. *Carbon Management*, 2011, 2(3):227-230.
- [37] JINDO K, SUTO K, MATSUMOTO K, et al. Chemical and biochemical characterisation of biochar-blended composts prepared from poultry manure[J]. *Bioresource Technology*, 2012, 110:396-404.
- [38] DU J J, ZHANG Y Y, HU B, et al. Insight into the potentiality of big biochar particle as an amendment in aerobic composting of sewage sludge[J]. *Bioresource Technology*, 2019, 288:121469.
- [39] YIN Y N, LI M T, TAO X H, et al. Biochar enhanced organic matter transformation during pig manure composting: roles of the cellulase activity and fungal community[J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, 333:117464.
- [40] LIU W, WANG S T, ZHANG J, et al. Biochar influences the microbial community structure during tomato stalk composting with chicken manure[J]. *Bioresource Technology*, 2014, 154:148-154.
- [41] SUN D Q, LAN Y, XU E G, et al. Biochar as a novel niche for culturing microbial communities in composting[J]. *Waste Management*, 2016, 54:93-100.
- [42] PROST K, BORCHARD N, SIEMENS J, et al. Biochar affected by composting with farmyard manure[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2013, 42(1):164-172.
- [43] STEINER C, BAYODE A O, RALEBITSO-SENIOR T K. Feedstock and production parameters[M]//Biochar application. Amsterdam: Elsevier, 2016:41-54.
- [44] HUA L, CHEN Y X, WU W X, et al. Microorganism communities and chemical characteristics in sludge-bamboo charcoal composting system[J]. *Environmental Technology*, 2011, 32(5/6):663-672.
- [45] AWASTHI M K, ZHANG Z Q, WANG Q, et al. New insight with the effects of biochar amendment on bacterial diversity as indicators of biomarkers support the thermophilic phase during sewage sludge composting[J]. *Bioresource Technology*, 2017, 238:589-601.
- [46] ZAINUDIN M H, MUSTAPHA N A, MAEDA T, et al. Biochar enhanced the nitrifying and denitrifying bacterial communities during the composting of poultry manure and rice straw[J]. *Waste Management*, 2020, 106:240-249.
- [47] BELLO A, HAN Y, ZHU H F, et al. Microbial community composition, co-occurrence network pattern and nitrogen transformation Genera response to biochar addition in cattle manure-maize straw composting[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 721:137759.
- [48] AGYARKO-MINTAH E, COWIE A, SINGH B P, et al. Biochar increases nitrogen retention and lowers greenhouse gas emissions when added to composting poultry litter[J]. *Waste Management*, 2017, 61:138-149.
- [49] STEINER C, DAS K C, MELEAR N, et al. Reducing nitrogen loss during poultry litter composting using biochar[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2010, 39(4):1236-1242.
- [50] LI Y C, MA J, YONG X Y, et al. Effect of biochar combined with a biotrickling filter on deodorization, nitrogen retention, and microbial community succession during chicken manure composting[J]. *Bioresource Technology*, 2022, 343:126137.
- [51] SÁNCHEZ-MONEDERO M A, SÁNCHEZ-GARCÍA M, ALBURQUERQUE J A, et al. Biochar reduces volatile organic compounds generated during chicken manure composting[J]. *Bioresource Technology*, 2019, 288:121584.
- [52] LIU W, HUO R, XU J X, et al. Effects of biochar on nitrogen transformation and heavy metals in sludge composting[J]. *Bioresource Technology*, 2017, 235:43-49.
- [53] JANCZAK D, MALIŃSKA K, CZEKAŁA W, et al. Biochar to reduce ammonia emissions in gaseous and liquid phase during composting of poultry manure with wheat straw[J]. *Waste Management*, 2017, 66:36-45.
- [54] WANG Q, AWASTHI M K, REN X N, et al. Combining biochar, zeolite and wood vinegar for composting of pig manure: the effect on greenhouse gas emission and nitrogen conservation[J]. *Waste Management*, 2018, 74:221-230.
- [55] YIN Y N, YANG C, LI M T, et al. Research progress and prospects for using biochar to mitigate greenhouse gas emissions during composting: a review[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 798:149294.
- [56] MAO H, LV Z Y, SUN H D, et al. Improvement of biochar and bacterial powder addition on gaseous emission and bacterial community in pig manure compost[J]. *Bioresource Technology*, 2018, 258:195-202.
- [57] HE X Q, YIN H J, HAN L J, et al. Effects of biochar size and type on gaseous emissions during pig manure / wheat straw aerobic composting: insights into multivariate-microscale characterization and microbial mechanism[J]. *Bioresource Technology*, 2019, 271:375-382.
- [58] CHOWDHURY M A, DE NEERGAARD A, JENSEN L S. Potential of aeration flow rate and bio-char addition to reduce greenhouse gas and ammonia emissions during manure composting[J]. *Chemosphere*, 2014, 97:16-25.
- [59] SÁNCHEZ-MONEDERO M A, SERRAMIÁ N, CIVANTOS C G, et al. Greenhouse gas emissions during composting of two-phase olive mill wastes with different agroindustrial by-products[J]. *Chemosphere*, 2010, 81(1):18-25.
- [60] KAMMANN C I, SCHMIDT H P, MESSERSCHMIDT N, et al. Plant growth improvement mediated by nitrate capture in co-composted biochar[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5:11080.

- [61] LI S Q, SONG L N, JIN Y G, et al. Linking N₂O emission from biochar-amended composting process to the abundance of denitrify (*nirK* and *nosZ*) bacteria community[J]. *AMB Express*, 2016, 6(1): 37.
- [62] CORNELISSEN G, RUTHERFORD D W, ARP H P H, et al. Sorption of pure N₂O to biochars and other organic and inorganic materials under anhydrous conditions[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(14):7704–7712.
- [63] HARTER J, GUZMAN-BUSTAMANTE I, KUEHFUSS S, et al. Gas entrapment and microbial N₂O reduction reduce N₂O emissions from a biochar-amended sandy clay loam soil[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 39574.
- [64] QUIN P, JOSEPH S, HUSSON O, et al. Lowering N₂O emissions from soils using eucalypt biochar: the importance of redox reactions[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5:16773.
- [65] 张伟明, 修立群, 吴迪, 等. 生物炭的结构及其理化特性研究回顾与展望[J]. *作物学报*, 2021, 47(1): 1–18. ZHANG W M, XIU L Q, WU D, et al. Review of biochar structure and physicochemical properties[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2021, 47(1): 1–18.
- [66] LI R H, WANG Q, ZHANG Z Q, et al. Nutrient transformation during aerobic composting of pig manure with biochar prepared at different temperatures[J]. *Environmental Technology*, 2015, 36(5/6/7/8): 815–826.
- [67] CHEN Y X, HUANG X D, HAN Z Y, et al. Effects of bamboo charcoal and bamboo vinegar on nitrogen conservation and heavy metals immobility during pig manure composting[J]. *Chemosphere*, 2010, 78(9): 1177–1181.
- [68] YAN W C, QU J B, QU Y P, et al. Effect of biochar addition on mechanism of heavy metal migration and transformation in biogas residue aerobic compost[J]. *Fermentation*, 2022, 8(10): 523.
- [69] CHEN X M, DU Z, LIU D, et al. Biochar mitigates the biotoxicity of heavy metals in livestock manure during composting[J]. *Biochar*, 2022, 4(1): 48.
- [70] ZHOU L, XUE J, XU Y, et al. Effect of biochar addition on copper and zinc passivation pathways mediated by humification and microbial community evolution during pig manure composting[J]. *Bioresource Technology*, 2023, 370: 128575.
- [71] AWASTHI M K, DUAN Y M, AWASTHI S K, et al. Emerging applications of biochar: improving pig manure composting and attenuation of heavy metal mobility in mature compost[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 389: 122116.
- [72] SONG C H, ZHAO Y, PAN D L, et al. Heavy metals passivation driven by the interaction of organic fractions and functional bacteria during biochar/montmorillonite-amended composting[J]. *Bioresource Technology*, 2021, 329: 124923.
- [73] HE X Q, XIONG J P, YANG Z L, et al. Exploring the impact of biochar on antibiotics and antibiotics resistance genes in pig manure aerobic composting through untargeted metabolomics and metagenomics[J]. *Bioresource Technology*, 2022, 352: 127118.
- [74] TONG Z Y, LIU F W, TIAN Y, et al. Effect of biochar on antibiotics and antibiotic resistance genes variations during co-composting of pig manure and corn straw[J]. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 2022, 10: 960476.
- [75] ZHOU G X, QIU X W, WU X Y, et al. Horizontal gene transfer is a key determinant of antibiotic resistance genes profiles during chicken manure composting with the addition of biochar and zeolite[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 408: 124883.
- [76] 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: 112190.
- [77] MA J W, YANG W Y, LI S, et al. Comprehensive effects of tea branch biochar on antibiotic resistance profiles and C/N/S cycling in the compost microbiota of animal manure[J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 957: 177457.
- [78] TONG Z Y, LIU F W, SUN B, et al. Effect of biochars with different particle sizes on fates of antibiotics and antibiotic resistance genes during composting of swine manure[J]. *Bioresource Technology*, 2023, 370: 128542.
- [79] WANG M M, WANG C H, YANG J, et al. Biochar induces different responses of intracellular and extracellular antibiotic resistance genes and suppresses horizontal transfer during lincomycin fermentation dregs composting[J]. *Bioresource Technology*, 2024, 394: 130227.
- [80] ZHOU Z P, SONG Z L, GU J, et al. Dynamics and key drivers of antibiotic resistance genes during aerobic composting amended with plant-derived and animal manure-derived biochars[J]. *Bioresource Technology*, 2022, 355: 127236.
- [81] FU Q Q, CHEN Z Q, ZHU C W, et al. Size matters: powder biochar promotes the elimination of antibiotics resistance genes and potential hosts during swine manure composting[J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 906: 167384.
- [82] CLARKE L J. Constraining bioavailable polyaromatic hydrocarbons effectively during the production and application of biochar[J]. *Environmental Technology & Innovation*, 2021, 24: 101838.
- [83] YE S J, ZENG G M, WU H P, et al. The effects of activated biochar addition on remediation efficiency of co-composting with contaminated wetland soil[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2019, 140: 278–285.
- [84] OLESZCZUK P, HALE S E, LEHMANN J, et al. Activated carbon and biochar amendments decrease pore-water concentrations of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in sewage sludge[J]. *Bioresource Technology*, 2012, 111: 84–91.
- [85] OLESZCZUK P, ZIELIŃSKA A, CORNELISSEN G. Stabilization of sewage sludge by different biochars towards reducing freely dissolved polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) content[J]. *Bioresource Technology*, 2014, 156: 139–145.
- [86] VALIZADEH S, LEE S S, BAEK K, et al. Bioremediation strategies with biochar for polychlorinated biphenyls (PCBs) – contaminated soils: a review[J]. *Environmental Research*, 2021, 200: 111757.
- [87] SUN Y, SHAHEEN S M, ALI E F, et al. Enhancing microplastics biodegradation during composting using livestock manure biochar[J]. *Environmental Pollution*, 2022, 306: 119339.

- [88] 王申宛, 郑晓燕, 校导, 等. 生物炭的制备、改性及其在环境修复中应用的研究进展[J]. 化工进展, 2020, 39(增刊2): 352–361. WANG S W, ZHENG X Y, XIAO D, et al. Research progress of production, modification and application in environment remediation of biochar[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2020, 39(Suppl 2): 352–361.
- [89] QI H S, GAO W F, XIE L N, et al. Effect of MnO₂-biochar composites on promoting humification during chicken manure composting[J]. *Biochar*, 2024, 6(1): 32.
- [90] ZHOU S Z, WEN X, CAO Z, et al. Modified cornstalk biochar can reduce ammonia emissions from compost by increasing the number of ammonia-oxidizing bacteria and decreasing urease activity[J]. *Bioresource Technology*, 2021, 319: 124120.
- [91] GU X H, LI H, SHI Y X, et al. Regulating bacterial dynamics by Mg-modified biochar addition to mitigate gaseous emissions during pig manure composting[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2024, 465: 142839.
- [92] CAO Z, ZHU R, LI Y, et al. Mitigation of ammonia and hydrogen sulfide emissions during aerobic composting of laying hen waste through NaOH-modified biochar[J]. *Journal of Environmental Management*, 2024, 365: 121634.
- [93] 李冉, 孟海波, 沈玉君, 等. 改性生物炭对猪粪堆肥过程重金属钝化效果研究[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(10): 2304–2311. LI R, MENG H B, SHEN Y J, et al. Immobilization of heavy metals by modified biochar during composting of pig manure[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(10): 2304–2311.
- [94] CHEN Z Q, BAO H Y, WEN Q X, et al. Effects of H₃PO₄ modified biochar on heavy metal mobility and resistance genes removal during swine manure composting[J]. *Bioresource Technology*, 2022, 346: 126632.
- [95] LIU H N, SHI B H, LIU W W, et al. Effects of magnesium-modified biochar on antibiotic resistance genes and microbial communities in chicken manure composting[J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2023, 30(50): 108553–108564.
- [96] TRAN H T, BOLAN N S, LIN C, et al. Succession of biochar addition for soil amendment and contaminants remediation during co-composting: a state of art review[J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, 342: 118191.
- [97] 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]. *Science of the Total Environment*, 2023, 870: 162024.
- [98] ANTONANGELO J A, SUN X, ZHANG H L. The roles of co-composted biochar (COMBI) in improving soil quality, crop productivity, and toxic metal amelioration[J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 277: 111443.
- [99] GŁĄB T, ANDRZEJ Ż, SADOWSKA U, et al. Effects of co-composted maize, sewage sludge, and biochar mixtures on hydrological and physical qualities of sandy soil[J]. *Geoderma*, 2018, 315: 27–35.
- [100] BASS A M, BIRD M I, KAY G, et al. Soil properties, greenhouse gas emissions and crop yield under compost, biochar and co-composted biochar in two tropical agronomic systems[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 550: 459–470.
- [101] YUAN Y H, CHEN H H, YUAN W Q, et al. Is biochar-manure co-compost a better solution for soil health improvement and N₂O emissions mitigation?[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2017, 113: 14–25.
- [102] BUSCH D, GLASER B. Stability of co-composted hydrochar and biochar under field conditions in a temperate soil[J]. *Soil Use and Management*, 2015, 31(2): 251–258.
- [103] SÁNCHEZ-MONEDERO M A, CAYUELA M L, SÁNCHEZ-GARCÍA M, et al. Agronomic evaluation of biochar, compost and biochar-blended compost across different cropping systems: perspective from the European project FERTIPLUS[J]. *Agronomy*, 2019, 9(5): 225.
- [104] HAGEMANN N, KAMMANN C I, SCHMIDT H P, et al. Nitrate capture and slow release in biochar amended compost and soil[J]. *PLoS One*, 2017, 12(2): e0171214.
- [105] AGEGNEHU G, BASS A M, NELSON P N, et al. Biochar and biochar-compost as soil amendments: effects on peanut yield, soil properties and greenhouse gas emissions in tropical north Queensland, Australia[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2015, 213: 72–85.
- [106] PANDIT N R, SCHMIDT H P, MULDER J, et al. Nutrient effect of various composting methods with and without biochar on soil fertility and maize growth[J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2020, 66(2): 250–265.
- [107] CAO Y, MA Y, GUO D J, et al. Chemical properties and microbial responses to biochar and compost amendments in the soil under continuous watermelon cropping[J]. *Plant, Soil and Environment*, 2017, 63(1): 1–7.
- [108] AGBEDE T M, ADEKIYA A O, ODOJA A S, et al. Effects of biochar and poultry manure on soil properties, growth, quality, and yield of cocoyam (*Xanthosoma sagittifolium* Schott) in degraded tropical sandy soil[J]. *Experimental Agriculture*, 2020, 56(4): 528–543.
- [109] MEKURIA W, NOBLE A, SENGTAHEUANGHOUNG O, et al. Organic and clay-based soil amendments increase maize yield, total nutrient uptake, and soil properties in Lao PDR[J]. *Agroecology and Sustainable Food Systems*, 2014, 38(8): 936–961.
- [110] NADEEM S M, IMRAN M, NAVEED M, et al. Synergistic use of biochar, compost and plant growth-promoting rhizobacteria for enhancing cucumber growth under water deficit conditions[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2017, 97(15): 5139–5145.
- [111] WANG Y C, VILLAMIL M B, DAVIDSON P C, et al. A quantitative understanding of the role of co-composted biochar in plant growth using meta-analysis[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 685: 741–752.
- [112] MIKAJLO I, LERCH T Z, LOUVEL B, et al. Composted biochar versus compost with biochar: effects on soil properties and plant growth[J]. *Biochar*, 2024, 6(1): 85.