白铁根,黄 魁,秦 学,等.污泥型与牛粪型蚯蚓粪的溶解性有机质特征与微生物生态功能的研究 [J]. 中国环境科学, 2025,45(11):6199-6207.
Bai T G, Huang K, Qin X, et al. Study on the characteristics of dissolved organic matter and microbial ecological functions of sludge and cow manure vermicompost [J]. China Environmental Science, 2025,45(11):6199-6207.

污泥型与牛粪型蚯蚓粪的溶解性有机质特征与微生物生态功能的研究

白铁根[1],黄 魁[1,2*],秦 学[1,3**],夏 慧[1],朱阳春[4] (1.兰州交通大学环境与市政工程学院,甘肃 兰州 730070；2.寒旱地区水资源综合利用教育部工程研究中心,甘肃 兰州 730070；3.河北科技大学环境科学与工程学院,河北 石家庄 050018；4.丽水学院生态学院,浙江 丽水 323000)

摘要：为评估有机废弃物蚯蚓堆肥产物蚯蚓粪的高值特性,探明其作为生物有机肥料的潜力.收集了 8 份污泥型蚯蚓粪和 16 份牛粪型蚯蚓粪样品,对比分析其养分含量、溶解性有机物(DOM)特征、微生物群落结构及生态功能.结果表明,尽管两种蚯蚓粪富含水溶性氮磷,但仅有一半蚯蚓粪样品的有机质含量符合《有机肥料》(NY/T525)标准.牛粪型蚯蚓粪呈弱碱性,污泥型蚯蚓粪偏酸性.污泥型蚯蚓粪 DOM 中腐殖质类物质含量比牛粪型蚯蚓粪显著高 40.3%(P<0.01),并且其生化指数和新鲜度指数均显著高于牛粪型蚯蚓粪(P<0.001).此外,牛粪型蚯蚓粪中 Chao 1 指数、Shannon 指数分别是污泥型蚯蚓粪的 1.31 倍和 1.10 倍(P<0.001),且两种蚯蚓粪的 β 多样性存在显著性差异(P<0.01),特别是优势菌属方面差异明显.变形菌门(Proteobacteria)、拟杆菌门(Bacteroidetes)和放线菌门(Actinobacteria)为两种蚯蚓粪的优势菌门.功能预测表明,污泥型蚯蚓粪中微生物的碳、氮循环功能丰度均高于牛粪型蚯蚓粪.综上所述,蚯蚓粪的有机物和微生物特征与来源类型密切相关,污泥型的养分和腐殖质含量均优于牛粪型.

关键词：蚯蚓；有机肥；土壤改良；污泥；牛粪
中图分类号：X705 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-6923(2025)11-6199-09

Study on the characteristics of dissolved organic matter and microbial ecological functions of sludge and cow manure vermicompost. BAI Tie-gen[1], HUANG Kui[1,2*], QIN Xue[1,3**], XIA Hui[1], ZHU Yang-chun[4] (1.School of Environmental and Municipal Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China；2.School of Environmental Science and Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, China；3.Ministry of Education Engineering Research Center of Water Resource Comprehensive Utilization in Cold and Arid Regions, Lanzhou 730070, China；4.College of Ecology,Lishui University, Lishui 323000, China). *China Environmental Science*, 2025,45(11)：6199~6207

Abstract：The aims of this study are to assess the high-value characteristics of vermicompost products derived from organic wastes and to explore their potential as bio-organic fertilizers. For this purpose, 8 samples of sludge-based vermicompost and 16 samples of cow manure-based vermicompost were collected to compare their nutrient content, dissolved organic matter (DOM) characteristics, microbial community structure, and ecological functions. The results showed that both types of vermicompost were rich in water-soluble nitrogen and phosphorus, however, only half of the samples met the organic matter content standard specified in the “Organic Fertilizers” (NY/T525). Cow manure-based vermicompost was weakly alkaline, while sludge-based vermicompost was acidic. The content of humic substances in sludge-based vermicompost was 40.3% significantly higher than that in cow manure-based vermicompost (P<0.01), and the biochemical index and freshness index of DOM in sludge-based vermicompost were significantly higher than those in cow manure-based vermicompost (P<0.001). Additionally, the Chao1index and Shannon index in cow manure-based vermicompost were 1.31 times and 1.10 times higherthan those in sludge-based vermicompost (P<0.001), respectively. Moreover, significant differences in β-diversity of microbial community were observed between two types of vermicompost (P<0.01), particularly in the dominant bacterial genera. The dominant bacterial phyla in both types of vermicompost were Proteobacteria, Bacteroidetes, and Actinobacteria.Functional prediction indicated that the carbon and nitrogen cycling functions of microorganisms in sludge-based vermicompost were more abundant than in cow manure-based vermicompost. In conclusion, the DOM characteristics and microbial community structure in vermicomposts are closely related to theirsource type, with sludge-based vermicompost showing superior nutrient and humic substance content, relative to cow manure-based vermicompost.

Key words：earthworm；organic fertilizer；soil improvement；sludge；cow dung

收稿日期：2025-03-28
基金项目：国家自然科学基金资助项目(52100016);甘肃省高校研究生“创新之星”项目(2025CXZX-644);浙江省科技厅项目(LSSY24C150022)
* 责任作者, 教授, huangk1199@hotmail.com; ** 实验师, 2058867352@qq.com

污水污泥和畜禽粪便等有机废弃物具有高含水率和丰富的有机质、极易腐败发臭,处理不当易产生一系列环境问题[1].据统计,我国污水污泥和畜禽粪便的年产量分别达 6000 万 t 和 30 亿 t[2-3],因此,如何有效实现有机废弃物的资源化,已成为我国生态文明建设过程中亟待解决的关键课题.在“双碳”背景下,有机废弃物的生物高值转化作为生物制造的新质生产力,是一种极具潜力的绿色低碳处理方法.

蚯蚓堆肥作为一种简单经济的生物转化技术,对污水污泥和畜禽粪便具有良好的处理效果.蚯蚓粪是蚯蚓和蚓触圈微生物协同加工的产物,富含氮、磷、钾等养分,同时包含固氮菌、硝化菌和溶磷菌等根际促生菌,被誉为优质的生物有机肥[4-7].研究表明,蚯蚓粪施入土壤后可提高土壤养分,调节土壤微生物菌群并抑制作物土传病害,进而促进作物生长[8-9].已有研究证实,蚯蚓粪中溶解性有机质(DOM)和功能微生物对土壤改良起到至关重要的作用[10].因此,蚯蚓粪 DOM 的组成与微生物群落功能是评估蚯蚓粪高值特性的关键依据.与此同时,蚯蚓粪的成分受原料的影响较大[11].这意味着不同原料的蚯蚓粪可能会导致其在土壤改良中的作用存在差异.因此,探索不同原料对蚯蚓粪 DOM 与微生物群落结构及生态功能的影响,对于全面理解蚯蚓粪的性质至关重要.然而,这一方面研究鲜有报道.

本文以我国最常见的牛粪型(CV)和污泥型(SV)蚯蚓粪为研究对象[12-13],采用三维荧光激发-发射矩阵光谱(3D-EEM)和平行因子分析探讨蚯蚓粪 DOM 的特性[14],利用高通量测序和原核生物分类单元功能注释(FAPROTAX)分析微生物群落结构和碳氮循环功能[15].本研究拟为蚯蚓粪在农业与生态修复中的应用提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 样品收集与保存

8 个污泥型蚯蚓粪和 16 个牛粪型蚯蚓粪样品采自我国典型的蚯蚓养殖场.优先选择运营时间长且蚯蚓粪产量稳定的养殖场进行采集.污泥型蚯蚓粪分别采自兰州、成都、济宁、仙桃、璧山;牛粪型蚯蚓粪分别取自天水、安顺、红河、唐山、张掖、亳州、烟台、商丘、晋州、沧州、铁岭、红河、孝感.所有采集的样品置于室温风干保存.

1.2 测定方法

1.2.1 理化性质分析 新鲜样品采用灼烧减量法测定有机质(HJ 761-2015).风干样品研磨后与去离子水混匀(干样:水=1:50;质量浓度),300r/min 磁力搅拌 30min,测定 pH 值(雷磁 PHS-3C,上海).同时将溶液用去离子水稀释 3 倍,经 0.45μm 薄滤膜抽滤,采用碳氮分析仪(耶拿,MULTI N/C2100,德国)测定溶解性有机碳.硝氮、水溶性氮、水溶性磷采用紫外分光光度法(HJ/T 346-2007)测定.氨氮采用纳氏试剂分光光度法(HJ 535-2009)测量.

1.2.2 三维荧光激发-发射矩阵光谱(3D-EEM) 调整剩余滤液 DOC 浓度一致后,采用荧光分光光度计(日立 F-7100,日本)测定可溶性有机物的三维荧光.测定参数具体如下:激发波长(E_x)为 220~450nm,发射波长(E_m)为 220~500nm,狭缝宽度为 5nm,扫描速度为 12000nm/min,PMT 电压 700V.

1.2.3 PCR 扩增和高通量测序 对细菌 16SrDNAV3-V4 区进行扩增,引物为 341F(5'-CCTAYGGGRBGCASCAG-3')和 806R(5'-GGACT-ACNNGGGTATCTAAT-3').所有 PCR 扩增均使用 Phusion 高保真 PCR Master Mix(M0532S, New England Biolabs,北京)的高保真酶进行反应.PCR 扩增循环为 30 个,包括 98°C 变性 10s,50°C 退火 30s,72°C 延伸 30s, 72°C 最后延伸 5min.PCR 产物用 2%琼脂糖凝胶检测,并利用 Thermo Scientific 公司 GeneJET 胶回收试剂盒对其进行纯化.使用 Illumina 公司 TruSeq DNA PCR-Free Library Preparation Kit 建库试剂盒进行文库构建.检测合格后,在 NovaSeq 6000 平台上机测序.使用 Flash 软件(版本 1.2.7)连接读取数据,以识别原始标签数据.然后利用 QIIME 2(version 2021.11)将碱基和序列的低质量部分切掉,得到有效 Clean reads.最后,通过与 Silva 132 数据库的比对,获得有效的测序数据.

1.3 统计方法和数据可视化

采用 GraphPad Prism 9.5.0 软件分析两种蚯蚓粪样本间的差异,采用 T 检验分析,显著性水平设定为 $P<0.05$.箱线图和 Mantel test 图由 R Studio(version 4.3.1)生成.使用 MATLAB R2019b 软件对 3D-EEMs 数据进行体积积分(FRI)和平行因子分析,并基于半分裂法检验和残差分析确保平行因子建模的有效

性.荧光区域积分法将EEM图划分为五个区域,荧光光谱图由 Origin 2022 绘制.对处理后的原始数据序列与 FAPROTAX 数据库进行匹配,进而对特征序列进行功能注释.

2　结果与讨论

2.1　蚯蚓粪养分特征

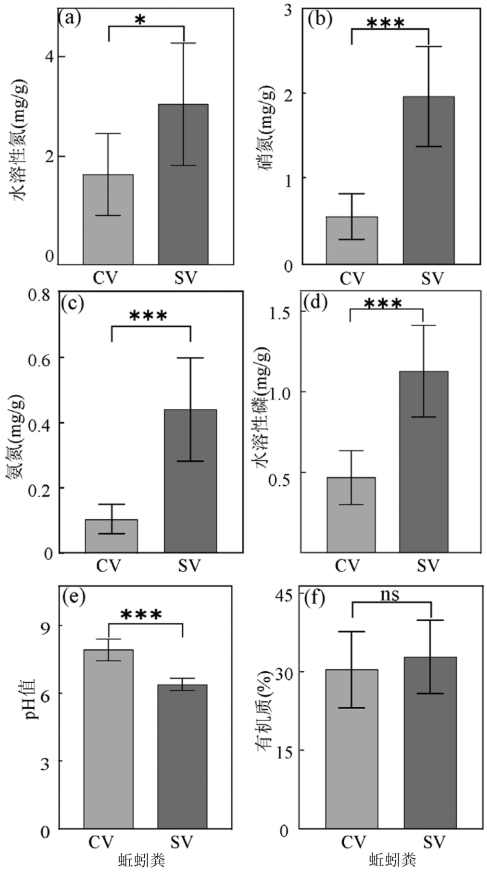


图 1　蚯蚓粪养分含量

Fig.1　Nutrient content of vermicompost

图中 CV 代表牛粪型蚯蚓粪,SV 代表污泥型蚯蚓粪

*表示由 *T* 检验得出的 *P*.* *P*<0.05, ***P*<0.001

如图 1(a)(c)所示,两种蚯蚓粪的水溶性氮与硝酸盐氮含量均较高,且水溶性氮以硝酸盐氮为主.研究发现,蚯蚓堆肥能够显著提升产物硝氮含量,而硝酸盐氮含量同时也是判定蚯蚓堆肥产物腐熟的关键指标[16-17].相比而言,污泥型蚯蚓粪的水溶性氮、硝酸盐氮与氨氮含量分别比牛粪型蚯蚓粪显著高73.1%(P<0.05)、279% (P<0.001)和 322%(P<0.001).这可能与初始污泥中的氮含量显著高于牛粪有关[18].如图 1(d)所见,水溶性磷的结果与水溶性氮结果相近.这表明蚯蚓粪富含氮和磷,能够有效地提高土壤养分的可用性.此外,牛粪型蚯蚓粪呈弱碱性,污泥型蚯蚓粪偏酸性(图 1(e)).因此,Liu 等[19]与 Ai 等[20]应用牛粪型蚯蚓粪和污泥型蚯蚓粪改良酸化土壤和盐碱土壤都取得了良好的效果.

有机质是土壤固相部分的重要成分,是植物营养的主要来源之一.本研究中有机质的含量在两种蚯蚓粪之间的差异并不显著,污泥型蚯蚓粪略高于牛粪型蚯蚓粪 7.92%(P>0.05)(图 1(f)).然而参照《有机肥料》(NY/T 525)标准[21],本研究中仅有 50%的污泥型蚯蚓粪与 43.75%的牛粪型蚯蚓粪有机质含量符合标准.原因一方面与蚯蚓堆肥原料性质密切相关,另一方面堆肥工艺、时间以及温度等条件的差异也可能影响有机质的降解与保留[22-23].因此,在实际应用中,蚯蚓堆肥原料选择与工艺仍存在较大的改进空间.

2.2　溶解性有机物结构

蚯蚓粪中富含的 DOM 为土壤微生物提供了重要的能量和碳源,对于作物生长和土壤改良具有重要的作用.根据荧光区域积分法将 EEM 图划分为五个区域[24].如图 2(a)所示,污泥型蚯蚓粪中 $P_{\mathrm{I},n}$ 和 $P_{\mathrm{II},n}$($P_{i,n}$ 表示第 i 区域的积分面积)之和的平均值为 26.39%;而牛粪型蚯蚓粪中 $P_{\mathrm{I},n}$ 和 $P_{\mathrm{II},n}$ 之和的平均值为 38.05%.区域 I 与区域 II 的积分面积之和主要代表蛋白质类物质,表明牛粪型蚯蚓粪中蛋白质类物质含量较高.此外,污泥型蚯蚓粪与牛粪型蚯蚓粪中 $P_{\mathrm{III},n}$ 和 $P_{\mathrm{V},n}$ 之和的平均值分别为 69.50%和 55.48%.区域 III 和区域 V 主要代表腐殖质类物质,表明污泥型蚯蚓粪中的腐殖质含量较高.与牛粪型蚯蚓粪相比,污泥型蚯蚓粪表现出更强的蛋白质降解能力和腐殖质形成能力.这可能是因为污泥中富含的营养物质促进了微生物的代谢作用,最终导致了腐殖质类物质的增加[25].平行因子分析拟合了两个荧光成分(图 3(a),(b)),组分 Ⅰ 荧光峰位于 E_x/E_m 为 250/430nm 处,代表胡敏酸和富里酸等腐殖质类物质.这类腐殖质通常是成熟堆肥中的关键成分,表明污泥型蚯蚓粪具有较高的成熟度.组分 II 位于 E_x/E_m 为 230/330nm 处,存在两个较弱的荧光峰,代表酪氨酸和色氨酸物质.各组分最大荧光强度(F_{max})表明污泥型蚯蚓粪中腐殖质类物质含量比牛粪型蚯蚓粪显著高 40.3%(P<0.01),牛粪型蚯蚓粪中氨酸类物质含量高于污泥型蚯蚓粪 35.08%(P>0.05)(图 3(c),(d)).这可能归因于牛粪中的有机质成分主要来自草料

和植物,这些物质较为稳定,难以转化为腐殖质.因此,污泥型蚯蚓粪表现出较强的腐殖质生成能力,使其在土壤改良过程能更有效地促进土壤微生物活性与土壤颗粒的团聚.

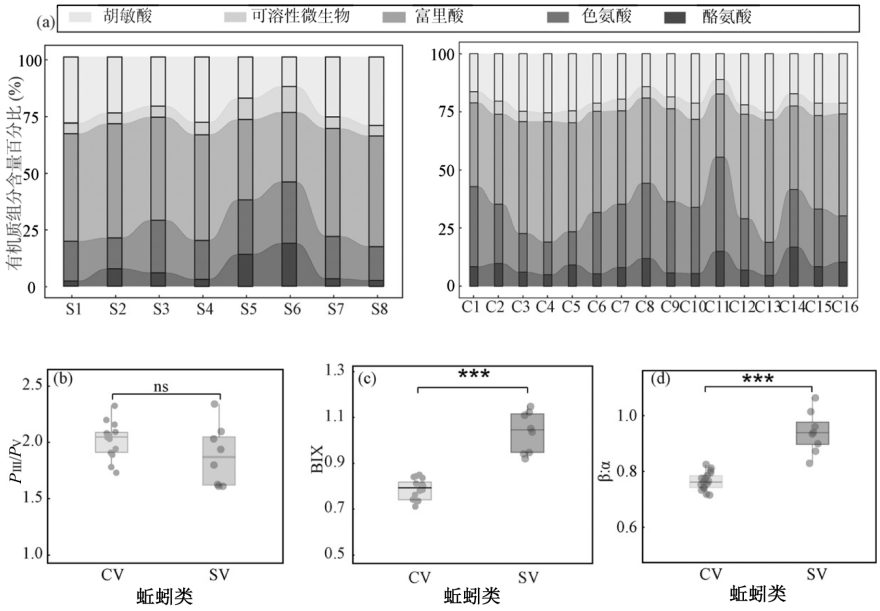


图 2 基于 3D-EEM 的蚯蚓粪中有机成分和特征参数

Fig.2 Organic components and characteristic parameters of vermicompost based on 3D-EEM

*表示由 *T* 检验得出的 *P*.***P<0.001

胡富比($P_{III,n}/P_{V,n}$)是评估样品 DOM 结构稳定性的关键指标[26].由图 2(b)可得,牛粪型蚯蚓粪胡富比高于污泥型蚯蚓粪 6.75%(P>0.05),说明牛粪型蚯蚓粪中富里酸和胡敏酸类物质含量高于污泥型.生化指数(BIX)反映 DOM 中自生源成分的相对贡献及其生物可利用性的高低.在本研究中,所有蚯蚓粪样品生化指数均在0.6以上,说明所有的蚯蚓粪DOM均具有一定的自生源性特征[27](图 2(c)).具体而言,污泥型蚯蚓粪与牛粪型蚯蚓粪生化指数的平均值分别为 1.06 与 0.81,污泥型显著高于牛粪型 31.52%(P<0.001).这表明污泥型蚯蚓粪中的 DOM 具有更高的生物可利用性,有机成分更适宜微生物的分解和利用[28].新鲜度指数(β:α)用于反映新生溶解性有机物在整体 DOM 中的比例[29].如图 2(d)所示,污泥型蚯蚓粪新鲜度指数显著高于牛粪型蚯蚓粪 22.95%(P<0.001).这可能与污泥型蚯蚓粪中有机物的复杂性密切相关[30].污泥型蚯蚓粪包含丰富的蛋白质、多糖、脂类等有机物,这些成分为微生物提供了多种营养来源,促进了其活性.相比之下,牛粪型蚯蚓粪成分较为单一,可能限制了微生物的活性,因此其新鲜度指数较低.综上所述,本研究表明污泥型蚯蚓粪 DOM 的生物可利用性、新鲜度方面均优于牛粪型蚯蚓粪.因此,污泥型蚯蚓粪在土壤中具有缓释作用,其稳定的 DOM 能够促进土壤微生物的生长和活动[29].而牛粪型蚯蚓粪富含氨酸类物质,其作为生长素吲哚乙酸合成的前体,可以提高植物对环境压力的耐受性[31].

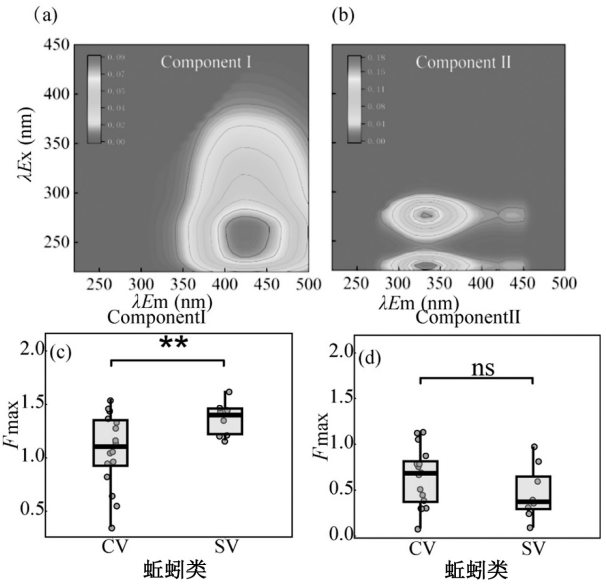


图 3 平行因子分析确定两种荧光成分

Fig.3 Parallel factor analysis identifies two fluorescent components

*表示由 *T* 检验得出的 *P*.**P<0.01

2.3　蚯蚓粪中细菌群落特征

Chao1 指数和 Shannon 指数常用于分别表征细菌群落 α 多样性的物种丰富度和多样性.由图 4(a,b)可知,牛粪型蚯蚓粪中 Chao 1 指数、Shannon 指数分别是污泥型蚯蚓粪的 1.31 倍和 1.10 倍(P<0.001).这表明牛粪型蚯蚓粪微生物群落具有更高的丰富度和多样性.污泥型蚯蚓粪和牛粪型蚯蚓粪的 Shannon 指数平均值分别为 8.27 和 9.06,说明蚯蚓粪本身具有较高的微生物多样性,因此蚯蚓粪的施用能显著调节土壤微生物群落的结构与多样性[32-33].非度量多维尺度分析(NMDS)揭示了两种蚯蚓粪微生物群落结构的差异(图 4(c)).Adonis 和 Anosim 检验的结果显示,两种蚯蚓粪的微生物群落结构存在显著差异(P<0.01).α 与 β 多样性集中表明了污泥型蚯蚓粪菌群功能具有较高的集中性.图 4(d)中的 Procrustes 分析表明,两种蚯蚓粪微生物群落与理化性质之间存在显著相关性(P<0.001).这表明蚯蚓粪微生物群落的主要差异可能受到环境因子的驱动.蔺玉红等[34]的研究也指出,基质中的有机质含量和全氮水平等因素是细菌群落结构和多样性变化的重要驱动因素.

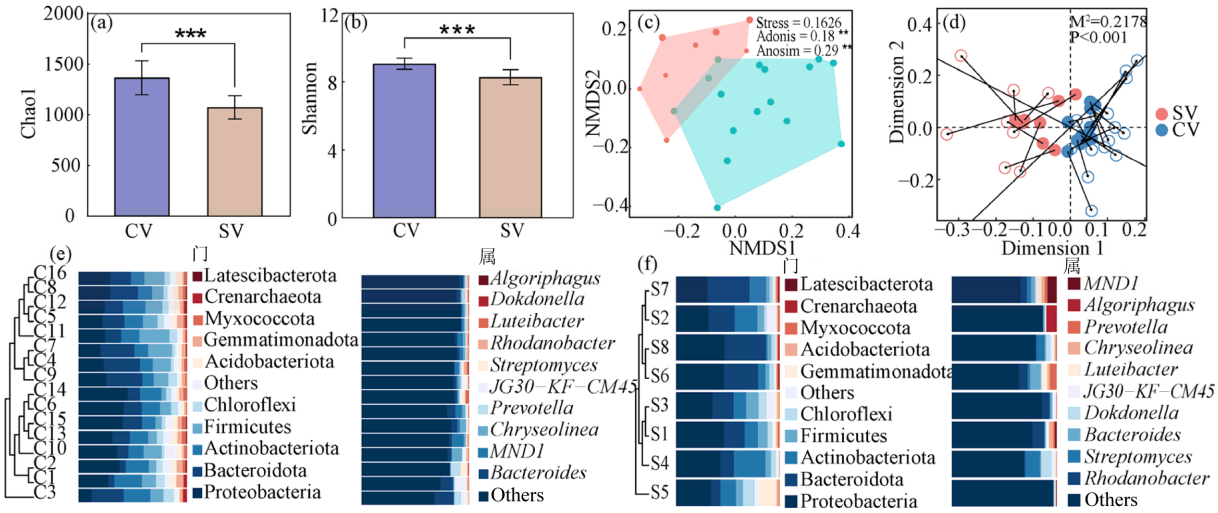


图 4　蚯蚓粪微生物 α、β 多样性和群落结构

Fig.4　Microbial α and β diversity and community structure of vermicompost

图 a,b 中*表示由 T 检验得出的 P.***P<0.001;图 c 中*表示 Adonis 和 Anosim 检验得出的 P.**P<0.01

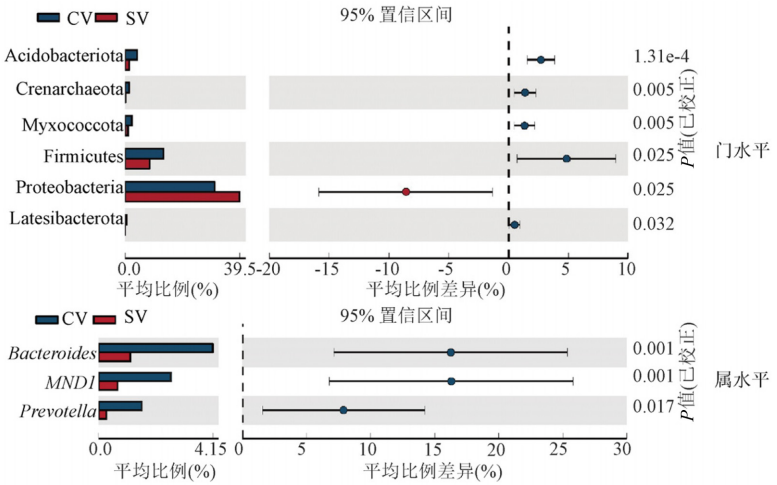


图 5　前十门水平和属水平差异

Fig.5　Differences at the top ten phylum and genus levels

由图 4(e),(f)可得,两种蚯蚓粪的优势菌门都是变形菌门(Proteobacteria)、拟杆菌门(Bacteroidetes)和放线菌门(Actinobacteria).污泥型蚯蚓粪中变形菌门的丰度为 38%,其次是拟杆菌门(18%)、放线菌门

(19%);牛粪型蚯蚓粪变形菌门、拟杆菌门和放线菌门分别占 29%、18%和 17%.与牛粪型蚯蚓粪相比,污泥型蚯蚓粪中变形菌门丰度更高,其能够降解大分子有机物,例如蛋白类、脂肪类,从而加速污泥中有机物的腐殖质化过程[28].这进一步解释了荧光特征参数和平行因子的分析结果.由图 5 可知,丰度最高的前十个门类微生物中有六个门类存在明显差异(P<0.05),包括变形菌门(Proteobacteria)、厚壁菌门(Firmicutes)、酸杆菌门(Acidobacteriota)、泉古菌门(Crenarchaeota)、黏球菌门(Myxococcota)和迟杆菌门(Latesibacterota).污泥型蚯蚓粪的优势菌属分别为 *Rhodanobacter*(4.31%)、*Streptomyces*(3.19%)、*Dokdonella*(2.25%)和 *Algoriphagus*(2.08%);牛粪型蚯蚓粪中的优势菌属为 *Bacteroides*(4.06%)、*MND1*(2.62%)、*Chryseolinea*(2.00%)和 *Prevotella*(1.94%)(图 4e,f).两种蚯蚓粪优势菌属差异较大,可能是导致两种蚯蚓粪性质差异的重要原因[35].污泥型蚯蚓粪中的优势菌属表现出较强的污染物降解能力和环境适应性.这与污泥处理过程中微生物具有较强的污染物降解能力密切相关.例如 *Streptomyces* 属具有很强的代谢能力,可以分解复杂的有机物,帮助土壤中有机物的降解[36].这些菌属有助于提高土壤的有机质含量和肥力,并改善土壤的结构稳定性.相比之下,牛粪型蚯蚓粪中的优势菌属主要参与纤维素、半纤维素等残余物的分解.例如 *Prevotella* 属参与蛋白质和纤维的降解.这与牛粪型蚯蚓粪含有大量植物纤维有关[37],其也能够促进土壤中养分的释放,进一步支持作物的生长[38].

表 1 蚯蚓粪中碳、氮循环功能丰度(%)

Table 1 Abundance of carbon and nitrogen cycling functions in vermicompost(%)

循环	种类	污泥型	牛粪型
碳循环	化能异养	37.50±3.46	30.87±1.99
	好氧化能异养	25.86±4.45	20.87±2.66
	厌氧化能异养	9.27±1.28	9.56±2.60
	发酵	5.18±1.30	6.78±3.03
	芳香化合物降解	1.02±0.23	0.78±0.41
	甲基营养	0.95±0.248	0.40±0.193
氮循环	硝酸盐还原	1.696±0.418	1.618±0.382
	氮呼吸	1.123±0.415	0.461±0.232
	氮固定	0.47±0.136	0.35±0.197
	亚硝酸盐反硝化	0.19±0.142	0.06±0.064

2.4 蚯蚓粪中细菌群落功能预测

微生物群落在生态系统碳、氮循环过程中起着重要的作用,对维持土壤生态平衡至关重要[39-40].由表 1 可知,在污泥型蚯蚓粪微生物中,参与碳、氮循环功能的丰度分别为 83.26%、6.84%,牛粪型蚯蚓粪中参与碳、氮循环功能的丰度分别为 71.42%、4.28%.污泥型蚯蚓粪微生物的碳、氮循环功能的丰度均高于牛粪型蚯蚓粪.这可能与污泥中丰富的有机物质和营养元素密切相关[41].其中碳循环功能在两种蚯蚓粪中占主导地位,而氮循环功能丰度相对较低.这是因为碳循环是生态系统的基础性过程,直接影响到生命的维持和生态系统的稳定,因此在元素循环中占据主导地位,是维持生态平衡的核心[42-43].进一步分析发现,碳循环相关功能中,化学异养、好氧化学异养、厌氧化学异养、发酵作用、芳香化合物降解和甲基营养等功能占主导,表明蚯蚓粪中的微生物具有广泛的代谢能力.这可能是 DOM 中的多样化有机物,尤其是腐殖质类和芳香化合物,提供了丰富的营养来源,促进了微生物的代谢活动[44].通过这些功能,蚯蚓粪中的功能微生物能够促进有机物的降解和营养物质的释放,提高土壤的营养供应能力.在氮循环相关的功能中,污泥型蚯蚓粪中微生物的硝酸盐还原、氮呼吸、固氮作用和亚硝酸盐反硝化的功能丰度均高于牛粪型蚯蚓粪[45].因此这也导致了污泥型蚯蚓粪水溶性氮、硝态氮和氨态氮含量均显著高于牛粪型蚯蚓粪.Wang 等[46]的研究表明,蚯蚓肠道中富含碳和氮代谢微生物,这些微生物在促进有机质降解的同时,也加速了碳氮营养的矿化过程.综上所述,两种蚯蚓粪中微生物的碳、氮循环相关功能种类多样性相似.这可能与蚯蚓肠道对功能微生物的筛选作用有关,导致不同来源的功能微生物在经过蚯蚓肠道后趋于一致[47].由于污泥型蚯蚓粪微生物在碳、氮循环功能上都表现出较强的能力,其在长期施用后可能对土壤肥力的提升和土壤生态功能的改善具有更大的潜力.

2.5 微生物生态功能、理化因子与 DOM 性质相关性

如图 6 所示,污泥型蚯蚓粪中 Fmax2 与水溶性氮呈现显著的正相关(P<0.05),牛粪型蚯蚓粪中 Fmax1 与水溶性氮表现出显著的负相关(P<0.05).这表明蚯蚓粪中水溶性氮含量在其腐殖化过程中可能起到了关键作用,且在两种蚯蚓粪中作用机理可

能不同.此外,污泥型蚯蚓粪 chao1 指数与水溶性磷、氨氮呈现负相关.shannon 指数与氨氮呈现显著负相关(P<0.05),与有机质、pH 值出现正相关.这表明污泥型蚯蚓粪微生物群落与环境条件、氮磷等营养物质的循环过程密切相关.相比之下,牛粪型蚯蚓粪 chao1 指数仅与水溶性氮呈现正相关,表明其微生物群落可能较为稳定,受环境因子的影响较小.此外,污泥型蚯蚓粪和牛粪型蚯蚓粪在促进碳、氮循环的作用上,受到不同环境因子的影响,说明两者在促进功能微生物活性和改善土壤生态功能方面的机制可能存在差异.Zeng 等[45]研究表明来自不同原料的蚯蚓粪会对土壤微生物群落和功能基因的表达产生不同的影响.因此,后续基于蚯蚓粪的大田实验探讨蚯蚓粪对于土壤改良的作用机理,尤其是两种蚯蚓粪在不同环境下的表现,将是值得关注的重点.

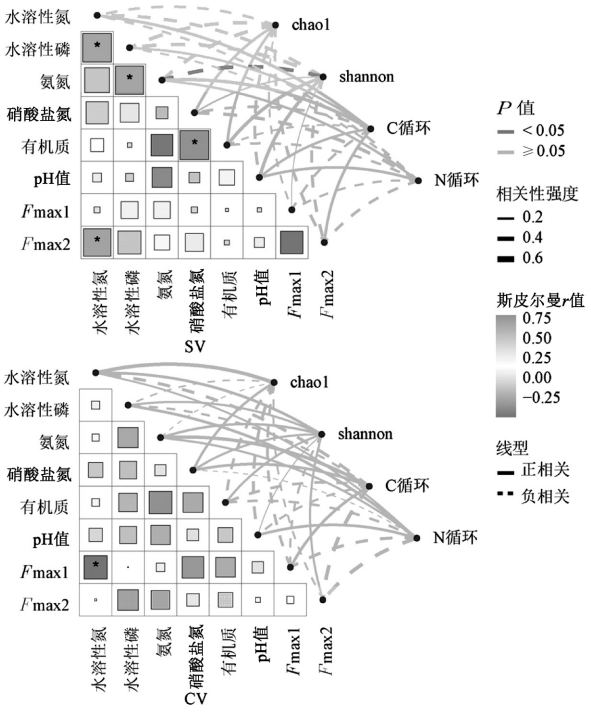


图 6　微生物生态功能、理化因子与 DOM 性质的相关性

Fig.6　Correlation between microbial ecological functions, physicochemical factors and DOM properties

表示由 Spearman 相关性得出的 P, P<0.05

3　结论

3.1　两种蚯蚓粪均富含水溶性氮磷等养分,污泥型养分含量较高.然而,超过半数的蚯蚓粪样品有机质含量不符合《有机肥料》(NY/T525)标准.污泥型适宜于盐碱土壤,牛粪型适用于酸化土壤.

3.2　污泥型蚯蚓粪的腐殖质含量较高,而牛粪型含有较高的蛋白质类物质.污泥型蚯蚓粪的 DOM 在生物可利用性和新鲜度方面均优于牛粪型蚯蚓粪.

3.3　两种蚯蚓粪微生物的碳氮循环功能相近,但群落结构存在显著差异,其中污泥型功能菌群表现出更为聚集的特征.

参考文献：

[1] Pramanik S K, Suja F B, Zain S M, et al. The anaerobic digestion process of biogas production from food waste: prospects and constraints [J]. Bioresource Technology Reports, 2019,8:100310.

[2] 戴晓虎,张　辰,章林伟,等.碳中和背景下污泥处理处置与资源化发展方向思考 [J]. 给水排水, 2021,57(3):1−5.
Dai X H, Zhang C, Zhang L W, et al. Thoughts on the development direction of sludge treatment and resource recovery under the background of carbon neutrality [J]. Water & Wastewater Engineering, 2021,57(3):1−5.

[3] 汪益峰,周维仁.微生物发酵技术在畜禽粪便无害化处理中的应用 [J]. 饲料研究, 2008,31(10):69−71.
Wang Y F, Zhou W R.Application of microbial fermentation technology in harmless treatment of livestock and poultry manure [J]. Feed Research, 2008,31(10):69−71.

[4] Lin J, Wang D, Kong L, et al. Oriented regulation of earthworm production and vermicompost quality by carbon bioavailability management [J]. Science of the Total Environment, 2024,954:176238.

[5] Usta A N, Guven H. Vermicomposting organic waste with *Eisenia fetida* using a continuous flow−through reactor: Investigating five distinct waste mixtures [J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2024,12(6):114384.

[6] Tammam A A, Rabei Abdel Moez Shehata M, Pessarakli M, et al. Vermicompost and its role in alleviation of salt stress in plants–I. Impact of vermicompost on growth and nutrient uptake of salt−stressed plants [J]. Journal of Plant Nutrition, 2023,46(7):1446−1457.

[7] 李建辉,张莹莹,黄　魁,等.宏基因组学解析蚯蚓粪中微生物种群及耐药基因的组成 [J]. 中国环境科学, 2020,40(12):5375−5382.
Li J H, Zhang Y Y, Huang K, et al. Composition of microbial community and antibiotic resistance genes in vermicomposts revealed by metagenomic analysis [J]. China Environmental Science, 2020, 40(12):5375−5382.

[8] Wang F, Wang X, Song N. Biochar and vermicompost improve the soil properties and the yield and quality of cucumber (*Cucumis sativus L.*) grown in plastic shed soil continuously cropped for different years [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2021,315:107425.

[9] 刘一凡,杨丽娟,王　红,等.蚯蚓粪肥在农业生产中的应用效果及研究进展 [J]. 土壤通报, 2021,52(2):474−484.
Liu Y F, Yang L J, Wang H, et al. Application effect and research progress of vermicompost in agricultural production [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2021,52(2):474−484.

[10] Zhou L, Zhou Y, Tang X, et al. Resource aromaticity affects bacterial community successions in response to different sources of dissolved

organic matter [J]. Water Research, 2021,190:116776.

[11] Aira M, Olcina J, Pérez-Losada M, et al. Characterization of the bacterial communities of casts from *Eisenia andrei* fed with different substrates [J]. Applied Soil Ecology, 2016,98:103-111.

[12] Duan Z, Huang K, Huang W, et al. Bacterial dispersal enhances the elimination of active *fecal coliforms* during vermicomposting of fruit and vegetable wastes: The overlooked role of earthworm mucus [J]. Journal of Hazardous Materials, 2024,471:134280.

[13] Xia H, Zhu L, Ding J, et al. Earthworm gut digestion drives the transfer behavior of antibiotic resistance genes in layers of extracellular polymeric substances during vermicomposting of dewatered sludge [J]. Environmental Research, 2024,259:119489.

[14] 王华梓,胡思文,左腾腾,等.南京市中、富营养化城市湖泊溶解性有机质的组成特征及来源分析 [J]. 中国环境科学, 2025,45(5):2520-2529.
Wang H Z, Hu S W, Zuo T T, et al. Composition characteristics and source identification of dissolved organic matter in medium and eutrophic urban lakes in Nanjing [J]. China Environmental Science, 2025,45(5):2520-2529.

[15] 张 浩,孙 洁,杨慧颖,等.高密度聚乙烯微塑料胁迫对棉花生长、枯萎病发生和根际细菌群落的影响 [J]. 环境科学, 2023,44(5):2955-2964.
Zhang H, Sun J, Yang H Y, et al. Effects of microplastic high-density polyethylene on cotton growth,occurrence of fusarium wilt,and rhizosphere soil bacterial community [J]. Environmental Science, 2023,44(5):2955-2964.

[16] Duan Z, Zhu Y, Xia H, et al. A novel strategy for eliminating antibiotic resistance genes during fertilization of dewatered sludge by earthworms: Vermicomposting practice using Chinese herbal residues derived from Lianhua Qingwen as a bulking material [J]. Journal of Environmental Management, 2024,349:119444.

[17] 常长越,贾俊超,李朝栋.蚯蚓堆肥特征及其在农业中的应用研究进展 [J]. 中国农学通报, 2024,40(26):58-65.
Chang C Y, Jia J C, Li C D.Characteristics of vermicomposting and research progress of its application in agriculture [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2024,40(26):58-65.

[18] Xing M, Li X, Yang J, et al. Changes in the chemical characteristics of water-extracted organic matter from vermicomposting of sewage sludge and cow dung [J]. Journal of Hazardous Materials, 2012,205:24-31.

[19] Liu B, Wu C, Pan P, et al. Remediation effectiveness of vermicompost for a potentially toxic metal-contaminated tropical acidic soil in China [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2019,182:109394.

[20] Ai F, He L, Li Q, et al. Vermicompost combined with soil conditioner improves the ecosystem multifunctionality in saline-alkali land [J]. Water, 2023,15(17):3075.

[21] 孟远夺,赵英杰,黄耀蓉,等.我国商品有机肥料质量状况分析与思考 [J]. 中国土壤与肥料, 2024,(8):251-259.
Meng Y D, Zhao Y J, Huang Y R, et al. Analysis and thinking of the commercial organic fertilizer quality in China [J]. Soil and Fertilizer Sciencesin China, 2024,(8):251-259.

[22] Ramos R F, Santana N A, de Andrade N, et al. Vermicomposting of cow manure: Effect of time on earthworm biomass and chemical, physical, and biological properties of vermicompost [J]. Bioresource Technology, 2022,345:126572.

[23] 戴启鹏,向明灯,常兆峰,等.农林废物对畜粪堆肥有机质转化和酶活性的影响 [J]. 环境工程技术学报, 2024,14(5):1541-1549.
Dai Q P, Xiang M D, Chang Z F, et al. Effects of agricultural and forestry wastes on organic matter conversion andenzyme activity in livestock manure composting [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2024,14(5):1541-1549.

[24] Che J, Lin W, Ye J, et al. Insights into compositional changes of dissolved organic matter during a full-scale vermicomposting of cow dung by combined spectroscopic and electrochemical techniques [J]. Bioresource Technology, 2020,301:122757.

[25] Wang D, Mai L, Yu Z, et al. Deciphering the bioavailability of dissolved organic matter in thermophilic compost and vermicompost at the molecular level [J]. Bioresource Technology, 2024,391:129947.

[26] 王青清,蒋珍茂,王 俊,等.腐殖酸活性组分及其比例对紫色潮土中铅形态转化和有效性演变动态的影响 [J]. 环境科学, 2017,38(5):2136-2145.
Wang Q Q, Jiang Z M, Wang J, et al. Effects of the active components of humic acids and their proportions on the dynamics of lead transformation and availability in purple alluvial soil [J]. Environmental Science, 2017,38(5):2136-2145.

[27] Yang Y, Wang X, Wu S, et al. Insight into the application of micro-nano bubbles combined with heat-activated persulfate oxidation for removing dissolved organic matter from printing and dying wastewater [J]. Journal of Water Process Engineering, 2023,56:104463.

[28] 黄 魁,夏 慧,陈景阳,等.蚯蚓对城市污泥蚯蚓堆肥过程中微生物特征变化的影响 [J]. 环境科学学报, 2018,38(8):3146-3152.
Huang K, Xia H, Chen J Y, et al. Effect of earthworm on changes in microbial characteristics during composting of earthworms in urban sludge [J]. Journal of Environmental Science, 2018,38(8):3146-3152.

[29] Wen Z, Shang Y, Song K, et al. Composition of dissolved organic matter (DOM) in lakes responds to the trophic state and phytoplankton community succession [J]. Water Research, 2022,224:119073.

[30] Yang J, Lv B, Zhang J, et al. Insight into the roles of earthworm in vermicomposting of sewage sludge by determining the water-extracts through chemical and spectroscopic methods [J]. Bioresource Technology, 2014,154:94-100.

[31] 王宝驹,王洪旭,曲明山,等.十种常见氨基酸对蔬菜生长及品质影响的研究进展 [J]. 中国瓜菜, 2025,38(3):12-17.
Wang B J, Wang H X, Qu M S, et al. Research progress on the effects of ten common amino acids on vegetablegrowth and quality [J/OL]. China Cucurbits and Vegetables, 2025,38(3):12-17.

[32] Bastida F, Eldridge D J, García C, et al. Soil microbial diversity–biomass relationships are driven by soil carbon content across global biomes [J]. The ISME Journal, 2021,15(7):2081-2091.

[33] Mu J, Li X, Jiao J, et al. Biocontrol potential of vermicompost through antifungal volatiles produced by indigenous bacteria [J]. Biological Control, 2017,112:49-54.

[34] 蔺玉红,马嘉伟,张雪艳.蚯蚓粪、草炭与生物炭混合对基质理化性质和细菌群落组成代谢的影响 [J]. 中国农业大学学报, 2022,27(7):84-94.

Lin Y H, Ma J W, Zhang X Y.Effects of peat or vermicompost mixed with biochar on the physical and chemical properties of the substrate and composition and metabolism of bacterial communities [J]. Journal of China Agricultural University, 2022,27(7):84−94.

[35] 陈景阳,夏　慧,黄　魁,等.四环素对污泥蚯蚓粪中微生物种群和抗性基因的影响 [J]. 环境科学, 2019,40(7):3263−3269.
Chen J Y, Xia H, Huang K, et al. Effects of tetracycline on microbial populations and resistance genes in sludge vermicompost [J]. Environmental Science, 2019,40(7):3263−3269.

[36] Verschoor J A, Croese M R J, Lakemeier S E, et al. Polyester degradation by soil bacteria: identification of conserved BHETase enzymes in *Streptomyces* [J]. Communications Biology, 2024,7(1): 725.

[37] 史雅静,徐　明,王振宇,等.蚯蚓对菇渣中纤维素和木质素生物转化的研究 [J]. 环境科学学报, 2020,40(5):1779−1785.
Shi Y J, Xu M, Wang Z Y, et al. Study on the biotransformation of cellulose and lignin in mushroom pomace by earthworms [J]. Journal of Environmental Science, 2020,40(5):1779−1785.

[38] 赵欣雅,田雨佳,陈星星.普雷沃氏菌在瘤胃内的作用与代谢机制研究进展 [J]. 饲料研究, 2023,29(14):151−153.
Zhao X Y, Tian Y J, Chen X X. Research progress on the role and metabolic mechanism of *Prewalella* in rumen [J]. Feed Research, 2023,29(14):151−153.

[39] 李传虹,张　林,刘四义,等.青藏高原灌丛土壤碳氮含量及其相关功能基因分布特征 [J]. 生态学报, 2024,44(1):392−404.
Li C H, Zhang L, Liu S Y, et al. Distribution characteristics of soil carbon and nitrogen content and related functional genes in shrubland over the Tibetan Plateau [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024,44(1):392−404.

[40] Liang S, Deng J, Jiang Y, et al. Functional distribution of bacterial community under different land use patterns based on FAPROTAX function prediction [J]. Polish Journalof Environmental Studies, 2020, 29(2):1245−1261.

[41] 丁　洪,余居华,郑祥洲,等.中国城市污泥应用对作物产量、品质和土壤质量的影响 [J]. 生态环境学报, 2021,30(9):1933.
Ding H, Yu J H, Zheng X Z, et al. Review on effect of municipal sewage sludge application on yield and quality of crops and soil quality in China [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2021,30(9): 1933.

[42] Liu X, Rong X, Jiang P, et al. Biodiversity and core microbiota of key−stone ecological clusters regulate compost maturity during cow−dung−driven composting [J]. Environmental Research, 2024,245: 118034.

[43] Wang L, Chang R, Ren Z, et al. Mature compost promotes biodegradable plastic degradation and reduces greenhouse gas emission during food waste composting [J]. Science of the Total Environment, 2024,926:172081.

[44] Wang J, Qu L, Osterholz H, et al. Effects of DOM chemodiversity on microbial diversity in forest soils on a continental scale [J]. Global Change Biology, 2025,31(3):e70131.

[45] Zeng J, Hu H, He X, et al. N_2O emissions, microbial community composition and genes expressions in soil amended with vermicomposts derived from different feedstocks [J]. European Journal of Soil Biology, 2023,115:103473.

[46] Wang N, Wang W, Jiang Y, et al. Variations in bacterial taxonomic profiles and potential functions in response to the gut transit of earthworms (*Eisenia fetida*) feeding on cow manure [J]. Science of the Total Environment, 2021,787:147392.

[47] Kliszcz A, Kuźniar A, Wolińska A, et al. Future frontiers of agroecosystem management: Shifts in microbial community after passage through the gut of earthworms reveals enhanced abundance of cereal endophytes [J]. Applied Soil Ecology, 2024,203:105666.

作者简介：白铁根(2001−),男,河南南阳人,兰州交通大学硕士研究生,主要研究方向为有机肥与土壤改良.发表论文 1 篇.2145687784@qq.com.