



张宇丹,罗越坚,李琬婷,李若琪,张陇利,丁国春,魏雨泉,许艇,李季. 翻堆频率对餐厨废弃物生物干化-好氧发酵细菌群落结构的影响[J]. 中国农业大学学报, 2025,30(11):207-219.

ZHANG Yudan, LUO Yuejian, LI Wanting, LI Ruoyi, ZHANG Longli, DING Guochun, WEI Yuquan, XU Ting, LI Ji. Effect of turning frequency on bacterial community structure of kitchen waste during biodrying-aerobic fermentation[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2025, 30(11):207-219.

DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2025.11.17

翻堆频率对餐厨废弃物生物干化-好氧发酵细菌群落结构的影响

张宇丹¹ 罗越坚² 李琬婷^{1,3} 李若琪^{1,3} 张陇利⁴ 丁国春^{1,3} 魏雨泉^{1,3*}
许艇^{1,3} 李季^{1,3}

(1. 中国农业大学 资源与环境学院, 北京 100193;
2. 宁夏顺宝新型肥料科技有限公司, 宁夏 青铜峡 751600;
3. 中国农业大学 有机循环研究院(苏州), 江苏 苏州 215100;
4. 北京沃土天地生物科技股份有限公司, 北京 100194)

摘要 为探究餐厨废弃物生物干化-好氧发酵高效处理的适宜翻堆频率,以餐厨废弃物和锯末为研究对象,设置不翻堆(CK)、3 d/次(B1)和7 d/次(B2)3种翻堆频率处理,采用16S *r*RNA扩增子测序和PICRUSt2功能预测分析,检测和对比不同翻堆频率对发酵过程中升温脱水、有机质降解和细菌群落结构演替等的影响。结果表明:1)B1处理促进堆体升温效果最快、温度最高,比CK提前1 d至高温期,最高温度比CK和B2分别高9.98%和27.11%,并能延长高温期时长,比CK和B2分别长4 d和1 d;2)B1处理在整个生物干化过程中的种子发芽指数(GI)、干化结束时水分去除率(68.99%)、有机质降解率(24.91%)最高;3)B1和B2细菌群落结构的丰富度和均匀度均高于CK,且B1的细菌群落之间的网络连接更紧密,高温期尤其第9天细菌群落的活跃度更高;4)细菌群落结构与环境因子的相关性分析发现 *Symbiobacterium*、*Bacillus*、*Thermobifida* 和 *Pusillimonas* 等菌属对升温脱水和促腐具有重要意义,可以选择作为加速生物干化-好氧发酵定向筛选菌株和复配菌剂的研发对象。综上,3 d/次的翻堆频率是最优选择,不仅可以提高餐厨废弃物生物干化-好氧发酵产品的腐熟效果,而且可以改善细菌群落结构。

关键词 餐厨废弃物; 辅热强化; 生物干化-好氧发酵; 翻堆频率; 细菌群落结构; 共现网络分析; 功能预测

中图分类号 X799.3

文章编号 1007-4333(2025)11-0207-13

文献标志码 A

Effect of turning frequency on bacterial community structure of kitchen waste during biodrying-aerobic fermentation

ZHANG Yudan¹, LUO Yuejian², LI Wanting^{1,3}, LI Ruoyi^{1,3}, ZHANG Longli⁴,
DING Guochun^{1,3}, WEI Yuquan^{1,3*}, XU Ting^{1,3}, LI Ji^{1,3}

(1. College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China;
2. Ningxia Shunbao New Type Fertilizer Technology Co., Ltd., Qingtongxia 751600, China;
3. Organic Recycling Research Institute (Suzhou), China Agricultural University, Suzhou 215100, China;
4. Beijing VOTO Biotech Co., Ltd., Beijing 100194, China)

Abstract To investigate the optimal turning frequency for efficient biodrying-aerobic fermentation of kitchen waste, this study established three treatments using kitchen waste and sawdust as substrates, which were no turning (CK), turning every 3 d (B1), and turning every 7 d (B2). The effects of different turning frequencies on

收稿日期: 2025-02-10

基金项目: 国家重点研发计划(2023YFD1702200); 国家自然科学基金项目(42307436)

第一作者: 张宇丹(ORCID:0009-0003-6470-2837), 硕士研究生, E-mail: zhangyudan@cau.edu.cn

通讯作者: 魏雨泉(ORCID:0000-0002-1309-5139), 副教授, 主要从事微生物生态与有机废弃物资源化研究, E-mail: weiyq2019@cau.edu.cn

temperature increase, moisture reduction, organic matter degradation, and bacterial community structure succession during fermentation were systematically investigated by 16S *rRNA* amplicon sequencing and PICRUSt2 functional prediction analysis. The results indicated that: 1) B1 achieved the fastest temperature rise and highest peak temperature (The time to reach the mesophilic stage of B1 was one day earlier than that of CK, and its maximum temperature is 9.98% and 27.11% higher than that of CK and B2, respectively). The thermophilic stage duration of B1 was longer, which was 4 d and 1 d longer than that of CK and B2, respectively). 2) Throughout the biodrying process, the seed germination index (GI), and at the end of biodrying, water removal rate (68.99%) and organic matter degradation rate (24.91%) were the highest in the B1 treatment. 3) The diversity and evenness of both the bacterial community structures in treatments B1 and B2 were higher than those in CK. Moreover, the bacterial network in B1 was more closely connected, and the bacterial community activity was higher during the mesophilic stage, especially on the 9th day. 4) Correlation analysis between bacterial community structure and environmental factors identified *Symbiobacterium*, *Bacillus*, *Thermobifida* and *Pusillimonas* as key taxa significantly correlated with temperature increase, moisture removal and maturation efficiency enhancement. These genera are potential candidates for developing directionally screened strains and compound microbial agents to enhance biodrying-aerobic fermentation. In conclusion, a turning frequency of once every 3 d is the optimal choice, which can not only improve the maturity of the products from the biodrying-aerobic fermentation of kitchen waste, but also optimize the structure of the bacterial community.

Keywords kitchen waste; auxiliary heat strengthening; biodrying-aerobic fermentation; turning frequency; bacterial community structure; co-occurrence network analysis; function prediction

随着人民生活水平的不断提高,餐厨废弃物的产生量呈急剧上升的趋势,给城市环境和公共卫生带来了巨大的压力。据统计,我国餐厨废弃物每年可达1亿t以上^[1-2]。为了实现餐厨废弃物的妥善处理 and 资源转化,各种处理技术不断涌现。目前国内常用的处理工艺主要是焚烧、填埋、生物转化、好氧堆肥和厌氧消化^[3-5],此外,由好氧发酵处理技术衍生而来的辅热生物干化-好氧发酵技术,因其相较传统生物干化技术能够在降低能耗的同时,加速废弃物的升温脱水和有机物降解,促进腐熟,展现出了良好的应用前景^[6-7]。

与通风效果类似,在堆肥过程中,翻堆频率这一操作对于提高堆体的氧气含量具有重要意义^[8-10]。合理的翻堆频率不仅能够改善物料的孔隙结构,提高堆肥材料的均匀性,促进水分蒸发,还有助于微生物的活动和代谢,使微生物与底物充分接触,从而提高干化效率和质量^[11-12]。在粪污堆肥中,3 d/次的翻堆频率能够在较短时间内实现病原体的有效灭活、有机物的充分降解^[13]。类似的,在果蔬堆肥的研究中,Soto-Paz等^[14]发现2次/周的翻堆频率在保证堆肥过程快速启动和高温维持的同时,能够有效促进有机物的降解和养分的保留,最终生产出腐熟度高、稳定性好的堆肥产品。

有研究发现,翻堆频率是调控堆肥微生物群落

结构与功能的关键因素。Cai等^[9]发现2 d/次的频率可提高Proteobacteria、Bacteroidetes和Firmicutes等好氧微生物的相对丰度,增强微生物互作网络的复杂性,形成促进腐熟的菌群结构,同时提升碳水化合物代谢、能量代谢等功能基因的表达,加速木质纤维素降解和腐殖质合成。而Chen等^[15]证实该频率通过提高氮同化酶活性11.80%和硝化酶活性39.35%,有效调控氮循环功能菌群,抑制反硝化菌丰度达35.20%。此外,郜道玉等^[16]研究表明2 d/次翻堆可特异性富集耐高温的Firmicutes,同时抑制Shigella等致病菌,并且抑制环境中的抗生素抗性基因的传播。然而,现有关于翻堆频率的研究多聚焦于畜禽粪便堆肥体系,针对餐厨废弃物高含水率、易酸化特性下的最佳翻堆频率选择及其对微生物群落结构的调控机制仍缺乏系统解析,这限制了高效堆肥工艺的精准调控。

因此,本研究拟以餐厨废弃物和锯末为研究对象,采用16S *rRNA*扩增子测序和PICRUSt2功能预测分析,设置3种翻堆频率(不翻堆,CK;3 d/次,B1;7 d/次,B2),旨在通过系统的试验和分析,揭示不同翻堆频率与餐厨废弃物辅热生物干化-好氧发酵效果及细菌群落结构之间的内在关系,以期准确把握翻堆频率与获得理想的干化、腐熟效果之间的平衡提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本研究用到的主要仪器、试剂和耗材等详见表 1。

1.2 试验方法

1.2.1 试验设计

本试验在 55 L 的生物干化反应器中进行,将餐厨废弃物和锯末以 7:1 的湿重比混合均匀^[17],基本

性质见表 2。根据 Manga 等^[13]和 Soto-Paz 等^[14]的研究,共设置 3 个翻堆频率作为不同的处理:不翻堆(CK)、3 d/次(B1)、7 d/次(B2)。根据课题组前期的研究结果^[18-19],所有处理均采用跟随辅热和间歇通风(每 60 min 通风 30 min),通风速率为 0.5 L/kg (DM)/min。干化周期为 15 d,在第 0、3、6、9、12 和 15 天,每天都多点采集,每点采集 3 份样品(1 份风干;1 份 4 ℃冷藏;1 份-20 ℃下冷冻储存)。

表 1 主要的仪器和试剂
Table 1 Main instruments and reagents

材料 Material	型号 Model	来源 Source
餐厨废弃物 Kitchen waste		中国农业大学有机循环研究院(苏州)
锯末 Sawdust		韩博厨房电器科技有限公司
分析天平 Analytical balance	BSA2202S	德国赛多利斯集团
pH 计 pH meter	PB-10	德国赛多利斯集团
元素分析仪 Element analyzer	Vario EL	德国 Elementar 公司
高压蒸汽灭菌锅 Electric sterilizer	LDZH-150L	上海申安医疗器械厂
超净工作台 Ultra-clean workbench	SW-CJ-2FD	苏州苏信环境科技有限公司
高速离心机 High-speed programmable universal centrifuges	Eppendorf centrifuge 5424R	德国 eppendorf/艾本德
基因扩增仪 Polymerase chain reaction	T100	伯乐生命医学产品(上海)有限公司
恒温鼓风干燥箱 Air blowing thermostatic dryer	DHG-9240A	上海捷呈实验仪器有限公司
土壤基因组 DNA 提取试剂盒 Soil genomic DNA extraction kit	50 preps	MP Biomedicals
引物 Primers	515F、806R	生工生物工程(上海)股份有限公司
E. Z. N. A. ® Gel Extraction Kit	D2500-01	Omega Bio-Tek

表 2 试验材料的基本理化性质
Table 2 Basic physical and chemical properties of the test materials

基本属性 Basic property	餐厨废弃物 Kitchen waste	锯末 Sawdust	混合物 Mixture
水分含量/% Moisture content	77.89	10.24	68.12
pH	4.02	8.33	4.81
电导率/(mS/cm) Electric conductivity	0.72	1.39	0.54
m(C):m(N)	10.11	98.27	12.01

1.2.2 测定指标

温度(Temperature, *T*)、水分含量(Moisture content, MC)、电导率(Electric conductivity, EC)、挥发性固体含量(Volatile solids content, VS)、种子发

芽指数(Seed germination index, GI)和 16S *rRNA* 测序试验是根据农业行业标准 NY525—2021《有机肥料》^[20]和本课题组前期研究提出的方法进行测定^[21-22]。

1.3 数据分析

理化数据主要使用 Origin 2025 完成作图,微生物数据主要使用 Galaxy 平台(<http://www.freebioinfo.org>)、图图云平台(<http://cloudtutu.com.cn/>)、微科盟生科云^[23](<https://www.bioincloud.tech>)、Canoco 5 和 Gephi(0.10.1)等进行分析。

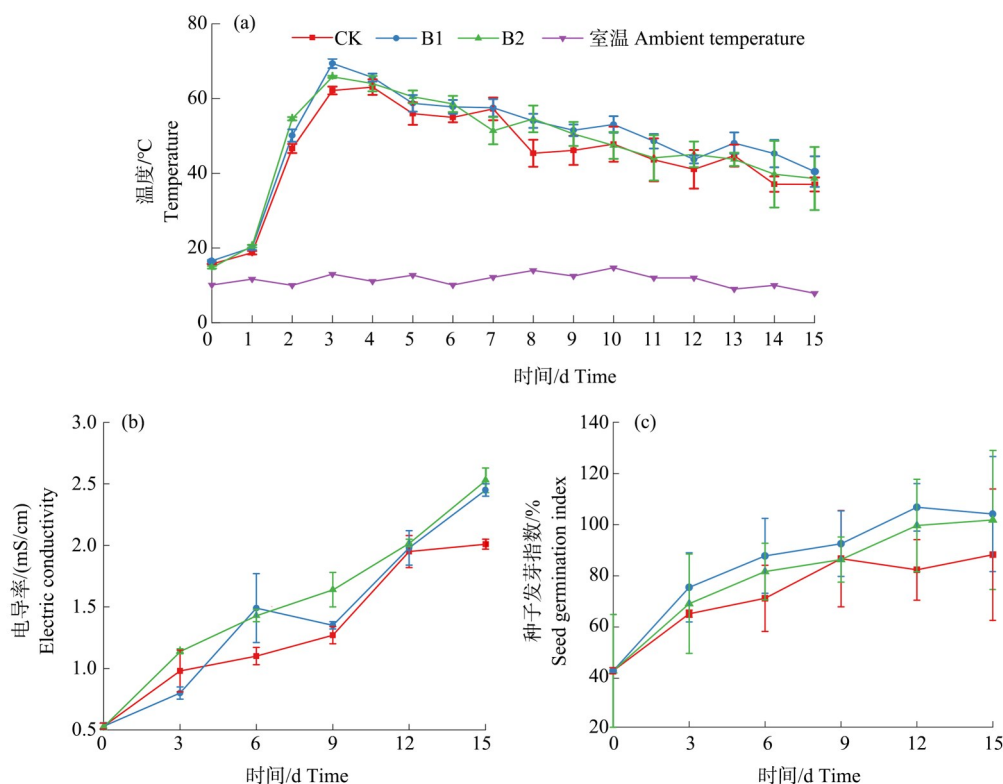
2 结果与分析

2.1 不同翻堆频率下的理化指标特征

不同翻堆频率下堆体的温度的随生物干化-好氧发酵的时间变化见图 1。由图 1(a)可见:CK 第 3 天达到高温期,最高温度峰值为 63.1 °C,高温期持续时间为 5 d;B2 第 2 天达到高温期,升温速度

最快(第 2 天温度达到 54.6 °C),高温期持续时间为 8 d;B1 第 2 天达到高温期,最高温度峰值最大(69.4 °C,比 CK 和 B2 分别高 9.98%、27.11%)、高温期持续时间最长(9 d,比 CK 和 B2 分别长 4 和 1 d)。结果表明,3 d/次的翻堆频率对于堆体温度的升高和维持效果最优。

由图 1(b)和 1(c)可见,3 个处理的 EC 和 GI 值均呈现上升趋势且最终满足腐熟标准($EC < 4 \text{ mS/cm}$, $GI > 70\%$),但翻堆处理 B1 和 B2 的 EC 和 GI 值升高幅度大于不翻堆处理 CK。2 种翻堆频率处理的 EC 和 GI 值的差异不显著,这表明适宜的翻堆频率均可能增强堆体中有机物的降解效率,提升可溶性物质的含量,进而加速堆体的腐熟。



CK、B1 和 B2 分别代表不翻堆、每 3 d 翻堆一次和每 7 d 翻堆一次。下同。

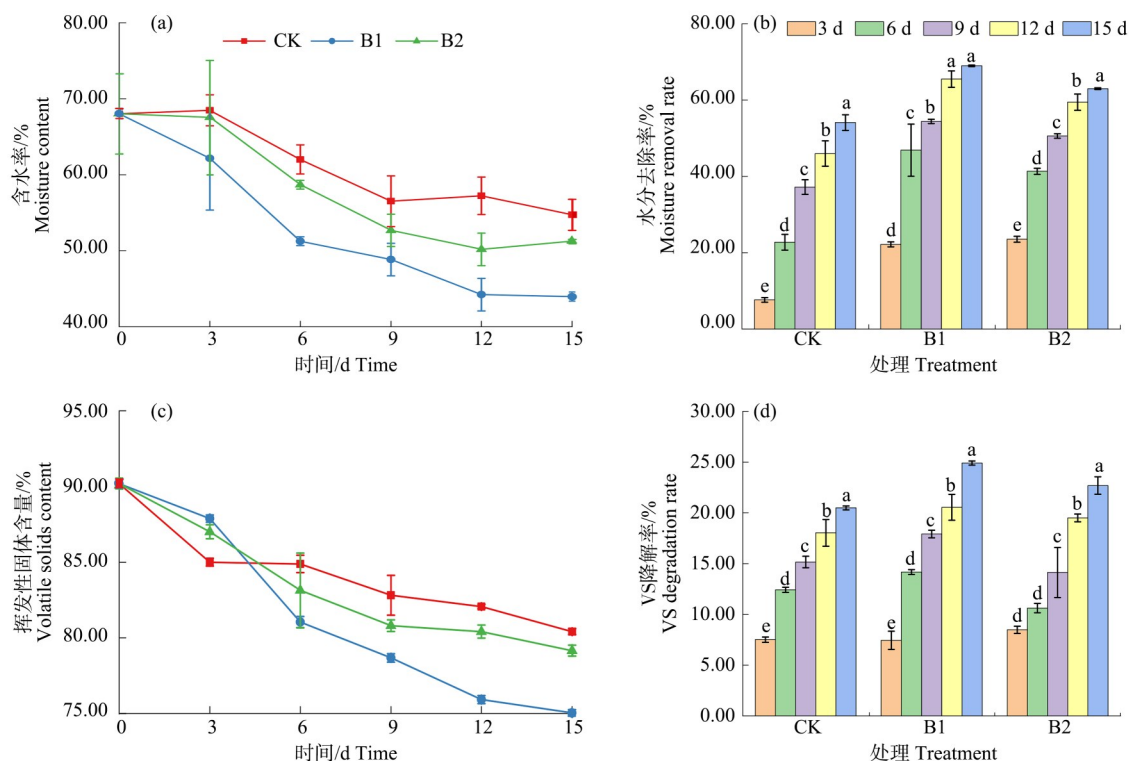
CK, B1, and B2 represent no turning, turning every 3 days, and turning every 7 days, respectively. The same below.

图 1 不同翻堆频率下生物干化-好氧发酵过程中的温度(a)、电导率(b)和种子发芽指数(c)变化

Fig. 1 Changes in temperature (a), EC (b) and GI (c) of biodrying-aerobic fermentation at different turning frequencies

不同翻堆频率下,堆体的含水率,水分去除率,挥发性固体含量以及挥发性固体降解率随生物干化-好氧发酵过程的时间变化见图 2。由图 2(a)和(b)可知:在初始水分含量一致的情况下,生物干化-好氧发酵结束时 B1 的水分含量最低(43.97%),水分去除率最

高(68.99%)。由图 2(c)和(d)可知:随着生物干化-好氧发酵的进行,各处理挥发性固体含量均呈现下降的趋势,B1 的挥发性固体含量下降得最多(从 90.19% 下降到 75.05%),降解率最高(24.91%),各处理最终的挥发性固体含量都比较高。



不同字母代表在 0.05 水平上的差异显著。下同。

Different letters represent differences at the 0.05 significance level. The same below.

图 2 不同翻堆频率下生物干化-好氧发酵过程中的水分和挥发性固体含量变化

Fig. 2 Moisture content and volatile solids content of biodrying-aerobic fermentation at different turning frequencies

2.2 不同翻堆频率下的细菌群落结构变化

不同翻堆频率下生物干化-好氧发酵过程中细菌群落的 α 多样性如图 3(a) 和 (b) 所示。随着生物干化-好氧发酵的进行, 翻堆处理 B1、B2 的 Chao1 和 Pielous Evenness 指数均大于不翻堆处理 CK, 这表

明翻堆有助于提高堆体细菌群落的丰富度和均匀度。 β 多样性如图 4 所示, PCoA1 和 PCoA2 2 个主坐标轴共解释了 78.91% 的方差, 各处理之间差异不显著, 尤其是到生物干化-好氧发酵后期 (第 9—15 天) 样本之间的距离更近。

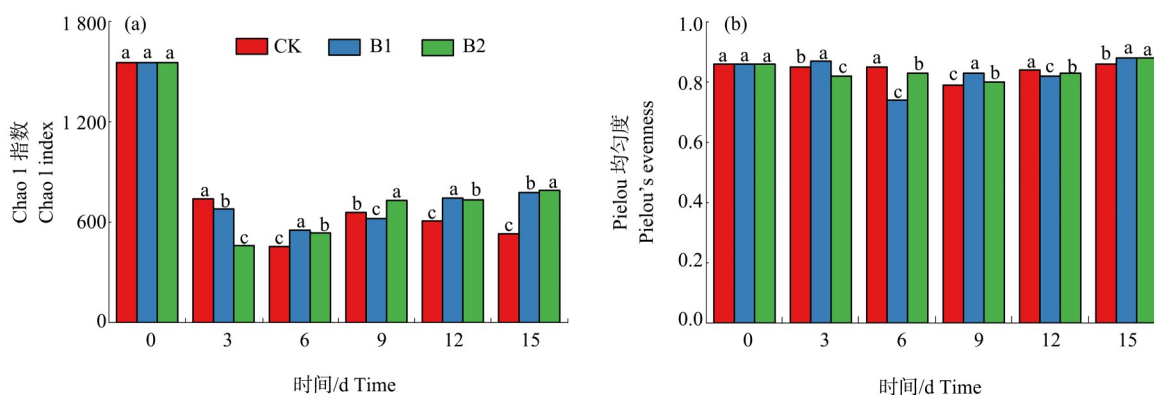


图 3 不同翻堆频率下生物干化-好氧发酵过程中的细菌群落的 α 多样性分析

Fig. 3 Analysis of the α diversity of bacterial communities during biodrying-aerobic fermentation under different turning frequencies

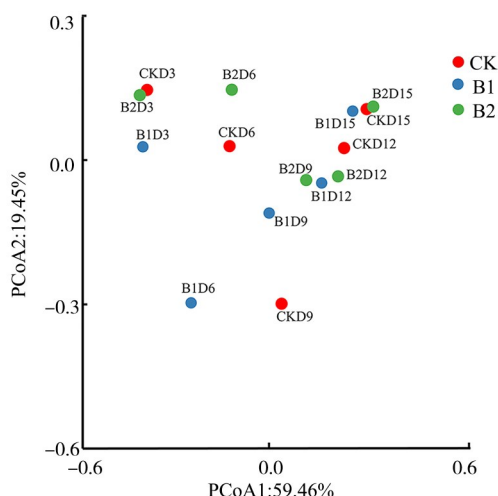


图4 不同翻堆频率下生物干化-好氧发酵过程中的细菌群落的 β 多样性分析

Fig. 4 Analysis of the β diversity of bacterial communities during biodrying-aerobic fermentation under different turning frequencies

不同翻堆频率下,细菌群落门属水平上的相对丰度变化见图5。由图5(a)可知:在门水平上,相对丰度由高到低分别为Firmicutes、Proteobacteria、Actinobacteria、Bacteroidetes和Deinococcus-Thermus等;不同处理中细菌群落演替的整体情况基本一致,Firmicutes可以适应高温,是整个生物干化-好氧发酵阶段主要优势门。干化初期随着温度的升高,优势菌门主要为Firmicutes和Proteobacteria;随着干化的进行,Proteobacteria丰度迅速下降,从第6天开始,各处理中Firmicutes逐渐减少,Proteobacteria和Actinobacteria逐渐增多;且第9天时,不翻堆的CK处理Firmicutes下降速度、Proteobacteria上升速度显著低于翻堆处理;第12天开始,Actinobacteria相对丰度开始下降,Proteobacteria反之;干化结束时翻堆的B1、B2处理Bacteroidetes相对丰度增加,而不翻堆的CK处理反之,这表明翻堆处理和不翻堆处理之间优势菌门相对丰度变化差异较大。

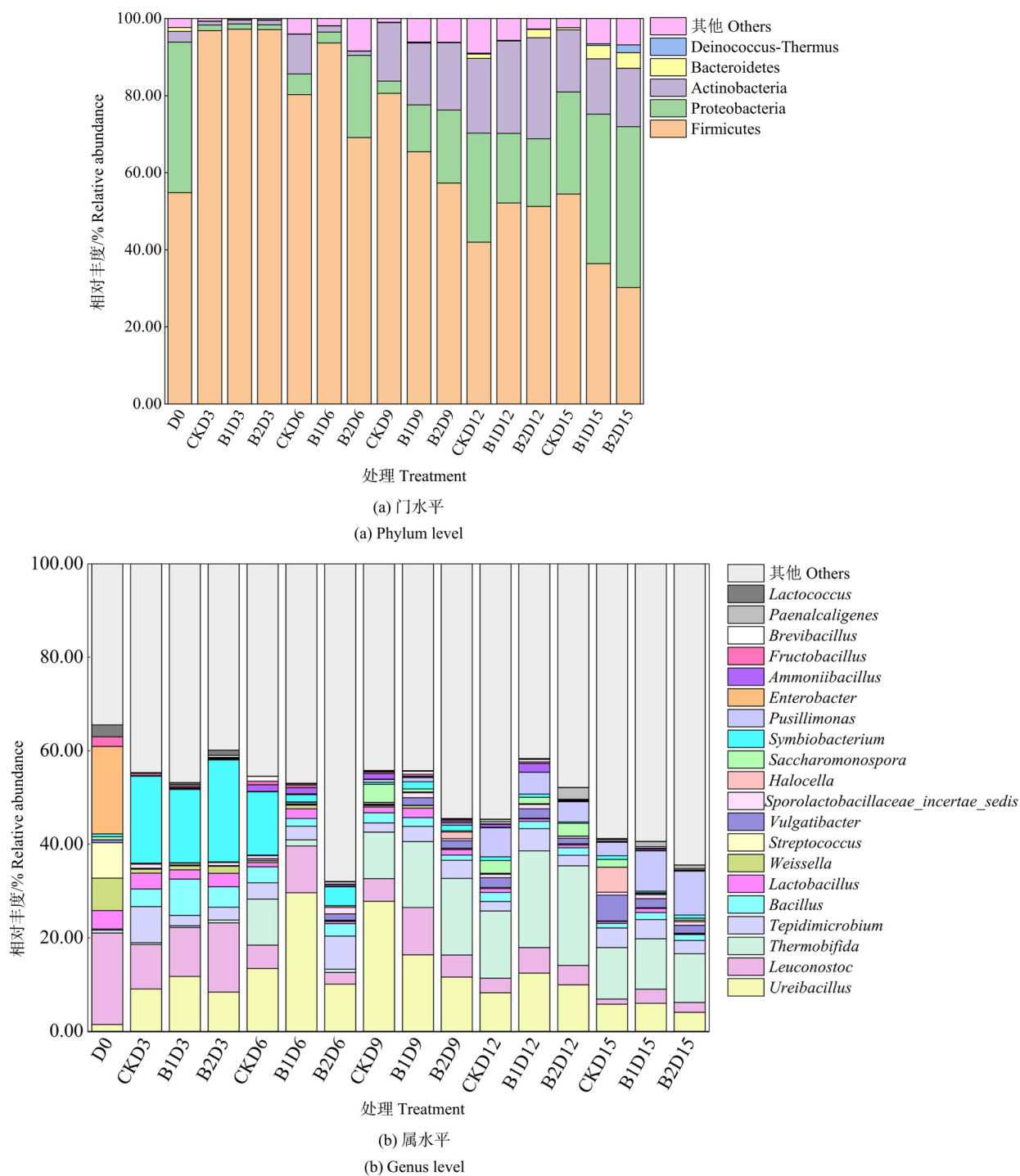
由图5(b)可知:在属水平上,相对丰度前20的属分别属于厚壁菌门(14种,70%)、放线菌门(2种,10%)、变形菌门(4种,20%)。在干化初期物料中优势菌属主要是*Leuconostoc*、*Streptococcus*、*Weissella*、*Lactococcus*、*Lactobacillus*和*Enterobacter*;随着干化的进行,干化初期的6种优势菌属开始大幅下降,*Ureibacillus*、*Tepidimicrobium*、*Bacillus*、*Symbiobacterium*和*Thermobifida*丰度开始

增加,其中*Ureibacillus*和*Thermobifida*是高温期的优势菌属,B1处理的*Ureibacillus*(29.63%)相对丰度显著高于其他处理,*Symbiobacterium*低于其他处理;在降温期(第9—12天),*Pusillimonas*和*Thermobifida*相对丰度持续上升,且在第12天*Thermobifida*的相对丰度达到峰值(14.37%、20.71%、21.33%),表明翻堆能够有效提高*Thermobifida*的相对丰度;在干化结束时,*Thermobifida*相对丰度下降,*Pusillimonas*丰度持续上升,各处理菌群的相对丰度分布逐渐均匀,说明其细菌种群结构和多样性已逐渐趋于稳定,不翻堆处理CK的*Halocella*和*Vulgatibacter*等厌氧菌属相对丰度显著高于翻堆处理,表明不翻堆处理与翻堆处理相比优势菌属有一定差异性。

2.3 不同翻堆频率下细菌群落变化与环境因子的相关性分析

不同翻堆频率下生物干化-好氧发酵过程中细菌群落变化与环境因子的相关性关系见图6。由图6(a)可知:RDA1和RDA2轴的解解释率分别为78.59%和3.29%。Firmicutes对于干化升温期 and 高温期(第3—6天)样本影响较大,主要与温度、水分和挥发性固体含量呈正相关,与种子发芽指数、电导率呈负相关;Actinobacteria、Proteobacteria、Bacteroidetes和Deinococcus-Thermus对高温期之后(第9—15天)样本影响较大,主要与电导率和种子发芽率指数呈正相关,与温度、水分和挥发性固体含量呈负相关,可能是导致含水率的降低以及有机质降解的主要菌门。

图6(b)中选取相对丰度前10的属,做属水平上细菌群落与环境因子的Pearson相关性分析,发现堆体温度与*Symbiobacterium*、*Bacillus*显著正相关($P<0.05$),与*Enterobacter*显著负相关($P<0.05$),表明堆体温度可以促进与*Symbiobacterium*、*Bacillus*的繁殖,而抑制*Enterobacter*的繁殖,对提高堆体升温效率和分离筛选耐高温菌株具有重要意义;*Thermobifida*、*Pusillimonas*与种子发芽指数显著正相关($P<0.05$),与水分和挥发性固体含量显著负相关($P<0.05$),表明这2种菌属能够有效促进有机质降解、降低堆体含水率、促进堆体腐熟,其可能为推进生物干化-好氧发酵进程的主要优势菌属,为后续干化过程中定向筛选、培养功能微生物提供理论依据。



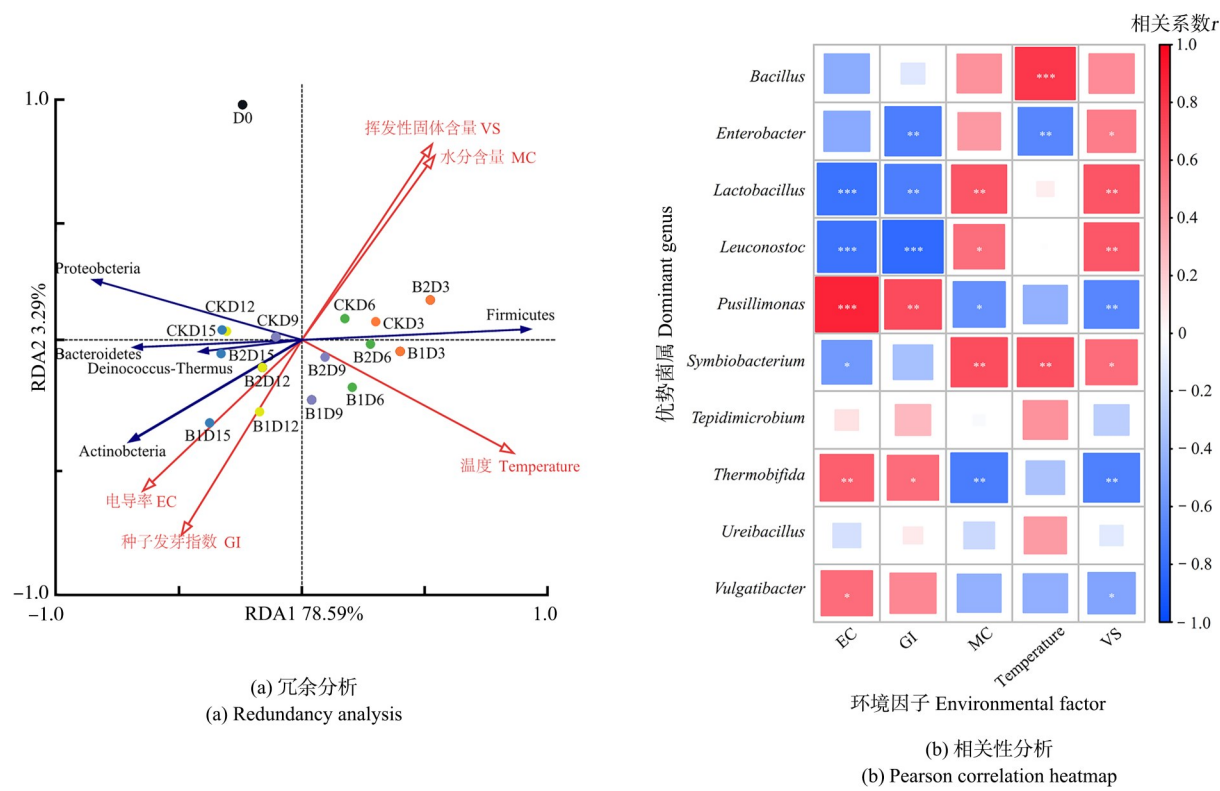
2.4 不同翻堆频率下核心细菌群落的共现网络分析

基于 OTUs 共现网络分析了 CK、B1、B2 3 种翻堆频率下核心细菌群落的关系和相互作用, 分别见图 7。可见: CK 由 245 个节点和 2 156 个边缘组成

(图密度为 0.072, 模块化指数为 0.643, 平均路径长度为 3.256); B1 由 208 个节点和 1 762 个边缘组成 (图密度为 0.082, 模块化指数为 0.669, 平均路径长度为 3.149); B2 由 268 个节点和 2 375 个边缘组成 (图密度为 0.066, 模块化指数为 0.817, 平均路径长

度为3.475)。与CK相比,B1各节点的负相关连接比例上升(16.66%),而B2的正相关连接比例上升(90.49%),2个处理的Firmicutes的占比均较高。

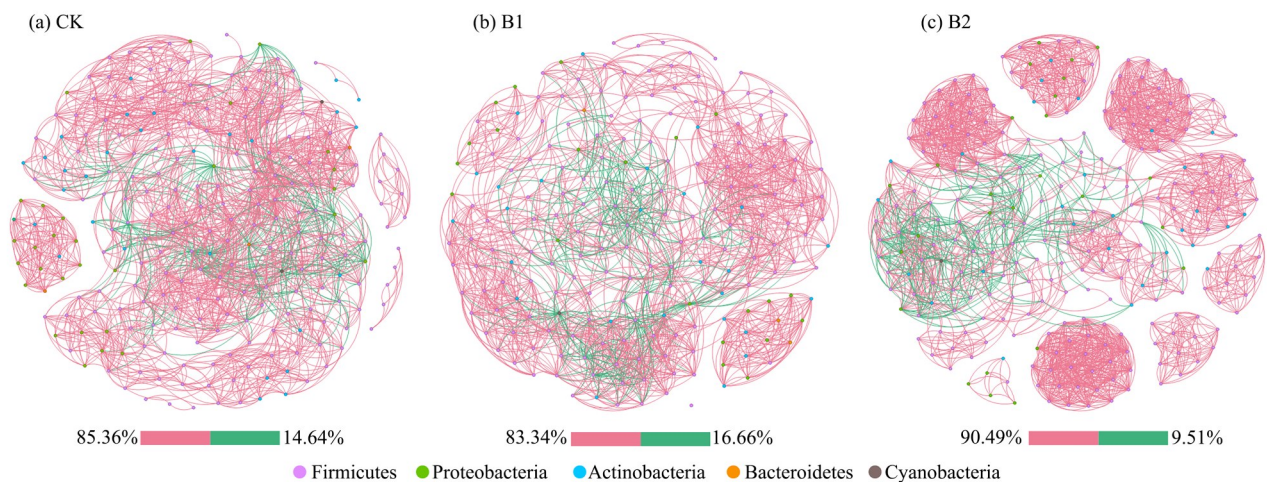
除此之外,每个处理的网络图都达到了一定的模块化程度(>0.44),但B1处理的网络连接更紧密,各节点的连接度更大,这说明相较于不翻堆处理和



*, **和***分别表示 $P<0.05$ 、 $P<0.01$ 和 $P<0.001$ 。
*, **, and ***, represent significant at $P<0.05$, $P<0.01$, and $P<0.001$, respectively.

图6 生物干化-好氧发酵过程中的细菌群落结构与环境因子的相关性分析

Fig. 6 Correlation analysis of bacterial community structure and environmental factors during biodrying-aerobic fermentation



百分数表示正负相互作用的比例。粉色表示正相关;绿色表示负相关。
The percentage represents the proportion of positive and negative interactions, with pink indicating positive correlation and green denoting negative correlation.

图7 不同处理属水平上细菌群落相互作用的网络分析

Fig. 7 Network analysis of bacterial interaction at the genus level

7 d/次的翻堆处理,3 d/次的处理提高了核心微生物之间的互作,进而促进了堆体中有机质的降解效率。

2.5 PICRUST2 功能预测分析

图 8 基于 PICRUST2 扩增子功能预测和相关性热图工具,得到生物干化-好氧发酵过程中不同处理的细菌功能预测信息。与 KEGG 数据库进行比对,

对 3 级功能层级分类通路数据进行分析,发现生物干化-好氧发酵过程中代谢、遗传信息处理和细胞过程是主要功能,主要代谢途径包括氨基酸代谢、辅因子和维生素代谢、全局和总览图等,结果发现 B1 处理第 3—9 天尤其是第 9 天细菌群落的活跃度显著高于其他处理。这表明,3 d/次的翻堆频率可能是维持高温期细菌高效分解代谢的关键条件。

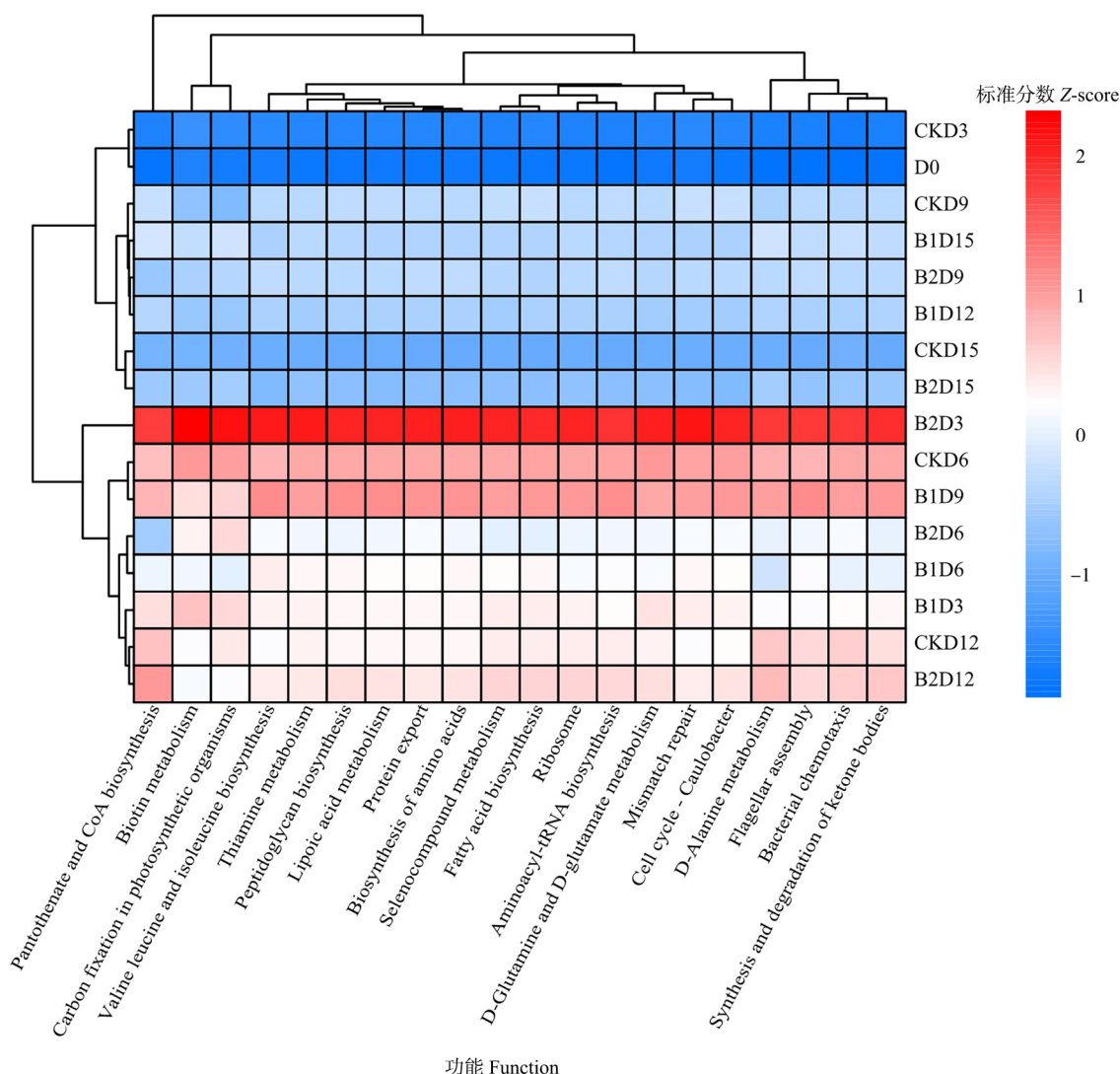


图 8 生物干化-好氧发酵过程中的 PICRUST2 功能预测热图(三级功能层)

Fig. 8 Heatmap of PICRUST2-based predicted function during biodrying-aerobic fermentation (hierarchy level 3)

3 讨论

生物干化-好氧发酵过程中,适宜的温度能维持高效的降解性能^[24]。本研究结果表明,B1 处理下,堆体第 2 天就达到了高温期,其最高温峰值最大且高温期持续时间最长,这可能是由于 3 d/次的翻堆

频率能有效促进堆体热量的积累。此外,翻堆处理的电导率和种子发芽率均高于空白对照,表明适宜的翻堆频率可以提高参与干化反应的总物质量,有效促进了堆体的腐解^[25]。

已有研究表明适宜的翻堆频率引起的物理扰动动能改善堆体物料的孔隙结构,增加氧气供应,从

而促进水汽蒸发和有机质降解^[26]。本研究结果显示,干化结束时,B1处理水分去除率最高,这与Ma等^[27]研究翻堆频率对鸡粪和大豆秸秆堆肥过程中水分含量变化的结果类似,并不是翻堆频率越快水分去除率越高。

α 多样性分析的结果表明,翻堆有助于提高堆体细菌群落的丰富度和均匀度,这与Cai等^[9]的研究结果一致,这可能是因为翻堆提高了堆体中好氧微生物的生物活性。同时,较高的微生物多样性,能促进不同类型有机质的分解^[28],从而维持堆体中较高的有机质含量,这进一步证实了理化分析的结果。PCoA的结果显示出,生物干化后期各样本之间的距离更近,这表明随着生物干化-好氧发酵的进行,更多微生物适应了环境后使得细菌群落结构趋于稳定^[29-30]。优势菌门的种类与以前的堆肥研究基本一致^[31-32],Firmicutes数量决定了对堆体中大分子有机物的降解能力^[33-34],*Weissella*可以将乳糖发酵成乳酸^[35],*Bacillus*对纤维素、蛋白质和碳水化合物降解具有重要意义,*Thermobifida*有助于木质纤维素的降解^[36-37],为高温期主要优势菌属。与Bello等^[38]的结果相似,本研究发现作为通材类的厚壁菌门在3个处理中均占主要地位,而其他4个菌门在不同处理中的分布比例存在显著差异。此外,本研究结果表明,干化后期,对照组中的厌氧菌属丰度高于翻堆处理,这是因为翻堆增加了堆体中氧气含量^[39],从而降低了厌氧菌属的丰度。

微生物的演替影响有机质的降解速率和堆肥产品的腐熟度,其结构受温度、pH和氧气等多种生物、非生物因素的影响^[40]。Zhao等^[41]监测了自然堆肥系统中微生物群落的变化,发现温度变化(20~70℃)是主要的非生物胁迫。堆肥温度的升高会显著影响细菌群落,驱动有机物降解的微生物群落的组成随着堆肥温度而动态变化^[42]。与本研究结果一致,温度是导致干化过程中不同处理间细菌群落差异的主要驱动因子,通过影响微生物的组成和功能,进一步调控有机物的降解效率和堆肥产品的质量。

共现网络分析结果显示,B1处理具有更紧密的网络连接、更大的连接度。与Wang等^[43]和Su等^[44]接种菌剂或翻堆处理的研究结果类似,这表明适宜的翻堆频率能够提高微生物之间的相互作用,尤其是核心菌门Firmicutes在网络中与其他微生物的正

相互作用得到加强,而翻堆时间间隔长会导致微生物之间的负相互作用增强。B1处理第3—9天尤其是第9天细菌群落的活跃度显著高于其他处理,这可能是由于适宜的翻堆频率提高了堆体内的氧气含量使得物料更加均匀^[45],从而促进了高温期相关细菌进行分解代谢反应。

4 结 论

为探究餐厨废弃物生物干化-好氧发酵高效处理的适宜翻堆频率,本研究以餐厨废弃物和锯末为研究对象,采用16S *rRNA*扩增子测序和PICRUSt2功能预测分析,设置不翻堆3种翻堆频率,探讨翻堆频率对升温脱水、有机质降解和细菌群落演替等的影响。主要结论如下:

1)3 d/次的翻堆频率,可以有效促进微生物呼吸作用,提升有机物降解率,有效提升生物干化-好氧发酵过程细菌的丰富度和多样性,促进生物干化-好氧发酵进行,达到脱水减容的效果。

2)温度是导致干化过程中不同处理间细菌群落差异主要驱动因子,随着干化的进行,细菌群落发生了明显的演替,但各处理之间群落结构差异性不大。

3)*Symbiobacterium*、*Bacillus*、*Thermobifida*和*Pusillimonas* 4个菌属对提高堆体升温脱水和促腐效率具有重要意义,建议作为促进生物干化-好氧发酵进程的主要优势菌属进行后续菌剂研发。

4)翻堆频率为3 d/次,堆体中的细菌群落的网络连接更紧密,各节点的连接度更大,复杂的细菌网络有利于促进有机物的降解。

5)在生物干化-好氧发酵过程中,代谢、遗传信息处理和细胞过程是主要功能表现。通过优化翻堆频率,可以显著促进高温期(第3—9天)相关细菌群落的分解代谢活性。

此外,本研究未对不同翻堆频率的能耗、人工成本及经济可行性进行分析,限制了其工业化应用的指导价值。此外,虽然运用高通量测序分析了细菌群落结构,但缺乏对关键菌属(如*Symbiobacterium*、*Bacillus*)的分离培养和功能验证,其具体作用机制尚不明确。未来需要结合多组学技术解析微生物机制,进一步验证其规模化应用的可行性,从而为餐厨废弃物快速处理提供更完善的技术支撑。

参考文献 References

- [1] 常远, 陈睿, 詹亚斌, 刘勇迪, 张利萍, 李若琪, 许艇, 魏雨泉, 李季. 通风条件对餐厨废弃物辅助生物干化过程硫素转化影响[J]. 农业工程学报, 2022, 38(S1): 283-291
- Chang Y, Chen R, Zhan Y B, Liu Y D, Zhang L P, Li R Q, Xu T, Wei Y Q, Li J. Effects of ventilation conditions on sulfur transformation in auxiliary heat bio-drying of kitchen waste[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022, 38(S1): 283-291 (in Chinese)
- [2] 靳晨曦, 孙士强, 盛维杰, 杨殿海, 马亚东, 贺文智, 李光明. 中国厨余垃圾处理技术及资源化方案选择[J]. 中国环境科学, 2022, 42(3): 1240-1251
- Jin C X, Sun S Q, Sheng W J, Yang D H, Ma Y D, He W Z, Li G M. Food waste treatment technology and resource solution options in China[J]. *China Environmental Science*, 2022, 42(3): 1240-1251 (in Chinese)
- [3] 邓俊. 餐厨垃圾无害化处理与资源化利用现状及发展趋势[J]. 环境工程技术学报, 2019, 9(6): 637-642
- Deng J. Harmless treatment and resource utilization of kitchen waste: Development status and trend[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2019, 9(6): 637-642 (in Chinese)
- [4] Xu F Q, Li Y Y, Ge X M, Yang L C, Li Y B. Anaerobic digestion of food waste - Challenges and opportunities[J]. *Bioresource Technology*, 2018, 247: 1047-1058
- [5] Pérez T, Vergara S E, Silver W L. Assessing the climate change mitigation potential from food waste composting[J]. *Scientific Reports*, 2023, 13(1): 7608
- [6] Xu M Y, Sun H S, Yang M, Xie D, Sun X H, Meng J, Wang Q H, Wu C F. Biodrying of biogas residue through a thermophilic bacterial agent inoculation: Insights into dewatering contribution and microbial mechanism [J]. *Bioresource Technology*, 2022, 355: 127256
- [7] Hao Z D, Yang B Q, Jahng D. Combustion characteristics of biodried sewage sludge[J]. *Waste Management*, 2018, 72: 296-305
- [8] Nguyen V T, Le T H, Bui X T, Nguyen T N, Vo T D H, Lin C, Vu T M H, Nguyen H H, Nguyen D D, Senoro D B, Dang B T. Effects of C/N ratios and turning frequencies on the composting process of food waste and dry leaves[J]. *Bioresource Technology Reports*, 2020, 11: 100527
- [9] Cai R, Zuo S S, Cao X H, Jiang X, Xu C C. Effects of turning frequency on fermentation efficiency and microbial community metabolic function of sheep manure composting on the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Bioresources and Bioprocessing*, 2023, 10(1): 53
- [10] Zhang J P, Ying Y, Yao X H. Effects of turning frequency on the nutrients of *Camellia oleifera* shell co-compost with goat dung and evaluation of co-compost maturity[J]. *PLoS One*, 2019, 14(9): e0222841
- [11] 路一鸣, 李军, 代雨, 莫锦韬, 张军, 席北斗. 翻堆对好氧堆肥腐殖质电子转移能力的影响[J]. 中国环境科学, 2022, 42(12): 5748-5757
- Lu Y M, Li J, Dai Y, Mo J T, Zhang J, Xi B D. Effects of turning on the electron transfer capacity of humic substances in aerobic composting[J]. *China Environmental Science*, 2022, 42(12): 5748-5757 (in Chinese)
- [12] Zhou J M. Effect of turning frequency on co-composting pig manure and fungus residue[J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2017, 67(3): 313-321
- [13] Manga M S, Muoghalu C, Camargo-Valero M A, Evans B E. Effect of turning frequency on the survival of fecal indicator microorganisms during aerobic composting of fecal sludge with sawdust[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2023, 20(3): 2668.
- [14] Soto-Paz J, Oviedo-Ocaña E R, Manyoma P C, Marmolejo-Rebellón L F, Torres-Lozada P, Barrena R, Sánchez A, Komilis D. Influence of mixing ratio and turning frequency on the co-composting of biowaste with sugarcane filter cake: A mixture experimental design [J]. *Waste and Biomass Valorization*, 2020, 11(6): 2475-2489.
- [15] Chen P Z, Cheng W M, Li S P. Optimization strategies for mitigating nitrogen loss in the aerobic composting of pig manure and microbial changes revealed by metagenomic analysis[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2023, 169: 270-284
- [16] 邵道玉, 崔华威, 周源, 龚萍, 陈洁, 万平民, 邵志勇, 华娟, 李鹏, 金尔光. 翻堆频次对奶牛粪污异位发酵床中抗生素抗性基因及细菌群落的影响[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(8): 1841-1851
- Gao D Y, Cui H W, Zhou Y, Gong P, Chen J, Wan P M, Shao Z Y, Hua J, Li P, Jin E G. Effects of turnover frequency on antibiotic resistance genes and bacterial community in ectopic fermentation bed of dairy cow manure[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2023, 42(8): 1841-1851 (in Chinese)
- [17] 刘英杰, 李琬婷, 王海候, 陶玥玥, 常远, 周凯云, 丁晓艳, 魏雨泉, 李季. 锯末添加量对餐厨废弃物生物干化效率和细菌群落的影响[J]. 农业工程学报, 2023, 39(15): 208-216
- Liu Y J, Li W T, Wang H H, Tao Y Y, Chang Y, Zhou K Y, Ding X Y, Wei Y Q, Li J. Effects of sawdust addition on bio-drying efficiency and bacterial community of food waste [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2023, 39(15): 208-216 (in Chinese)
- [18] Wei Y Q, Wu D, Wei D, Zhao Y, Wu J Q, Xie X Y, Zhang R J, Wei Z M. Improved lignocellulose-degrading performance during straw composting from diverse sources with actinomycetes inoculation by regulating the key enzyme activities[J]. *Bioresource Technology*, 2019, 271: 66-74
- [19] 范鑫祺, 陈睿, 李琬婷, 詹亚斌, 孙宝茹, 魏雨泉, 李季. 不同辅助策略对餐厨垃圾快速生物干化的影响[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(36): 15688-15694
- Fan X Q, Chen R, Li W T, Zhan Y B, Sun B R, Wei Y Q, Li J. Influence of different thermal assist strategies on the rapid bio-drying of food waste[J]. *Science Technology and Engineering*, 2021, 21(36): 15688-15694 (in Chinese)
- [20] NY525—2021. 有机肥料[S]. 北京: 中华人民共和国农业农村部, 2021
- NY525—2021. Organic fertilizer[S]. Beijing: Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China, 2021 (in Chinese)
- [21] Zhan Y B, Chang Y, Tao Y Y, Zhang H, Lin Y F, Deng J, Ma T T, Ding G C, Wei Y Q, Li J. Insight into the dynamic microbial community and core bacteria in composting from different sources by advanced bioinformatics methods[J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2023, 30(4): 8956-8966
- [22] Chang Y, Zhou K Y, Yang T X, Zhao X Y, Li R Q, Li J, Xu S Q, Feng Z W, Ding X Y, Zhang L L, Shi X, Su J, Li J, Wei Y Q. *Bacillus licheniformis* inoculation promoted humification process for kitchen waste composting;

- Organic components transformation and bacterial metabolic mechanism[J]. *Environmental Research*, 2023, 237: 117016
- [23] Gao Y Y, Zhang G X, Jiang S Y, Liu Y X. Wekemo Bioincloud: A user-friendly platform for meta-omics data analyses[J]. *iMeta*, 2024, 3(1): e175
- [24] Adani F, Baido D, Calcaterra E, Genevini P. The influence of biomass temperature on biostabilization-biodrying of municipal solid waste [J]. *Bioresource Technology*, 2002, 83(3): 173-179
- [25] 牛明芬, 刘振民, 马建, 秦美玲, 赵明会. 不同调理剂对尾菜低C/N堆肥腐殖化效果的影响[J]. 土壤与作物, 2023, 12(3): 314-325
- Niu M F, Liu Z M, Ma J, Qin M L, Zhao M H. Effects of different conditioners on humification of low C/N compost with vegetable waste [J]. *Soils and Crops*, 2023, 12(3): 314-325 (in Chinese)
- [26] 李春燕, 张曦, 沈玉君, 孟海波, 文宏达, 郑圣尉, 周海宾, 程红胜. 翻堆策略对猪粪沼渣好氧发酵特性的影响[J]. 环境工程, 2021, 39(1): 130-135
- Li C Y, Zhang X, Shen Y J, Meng H B, Wen H D, Zheng S W, Zhou H B, Cheng H S. Effects of turning strategy on aerobic fermentation property of pig biogas residue[J]. *Environmental Engineering*, 2021, 39(1): 130-135 (in Chinese)
- [27] Ma Q Q, Li Y L, Xue J M, Cheng D M, Li Z J. Effects of turning frequency on ammonia emission during the composting of chicken manure and soybean straw[J]. *Molecules*, 2022, 27(2): 472
- [28] Meng X Y, Yan J, Zuo B, Wang Y H, Yuan X F, Cui Z J. Full-scale of composting process of biogas residues from corn stover anaerobic digestion: Physical-chemical, biology parameters and maturity indexes during whole process[J]. *Bioresource Technology*, 2020, 302: 122742
- [29] Zhang Z G, Jin B C, Zhang Y R, Huang Z L, Li C Z, Tan M J, Huang J, Lei T Z, Qi Y X, Li H. The synergistic regulation of sewage sludge biodrying and greenhouse gas reduction by additives[J]. *Bioresource Technology*, 2024, 394: 130180
- [30] Yu B, Chen T B, Wang X K, Yang J X, Zheng G D, Fu L L, Huang X, Wang Y G. Insights into the effect mechanism of back-mixing inoculation on sewage sludge biodrying process: Biodrying characteristics and microbial community succession[J]. *Science of The Total Environment*, 2023, 857: 159460
- [31] Zhou H, Gu W J, Sun W, Hay A G. A microbial community snapshot of windrows from a commercial composting facility[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2018, 102(18): 8069-8077
- [32] Tortosa G, Castellano-Hinojosa A, Correa-Galeote D, Bedmar E J. Evolution of bacterial diversity during two-phase olive mill waste ("alperujo") composting by 16S rRNA gene pyrosequencing[J]. *Bioresource Technology*, 2017, 224: 101-111
- [33] Zhang L L, Zhang H Q, Wang Z H, Chen G J, Wang L S. Dynamic changes of the dominant functioning microbial community in the compost of a 90-m³ aerobic solid state fermentor revealed by integrated meta-omics [J]. *Bioresource Technology*, 2016, 203: 1-10
- [34] Meng Q X, Yang W, Men M Q, Bello A, Xu X H, Xu B S, Deng L T, Jiang X, Sheng S Y, Wu X T, Han Y, Zhu H F. Microbial community succession and response to environmental variables during cow manure and corn straw composting[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2019, 10: 529
- [35] Tran Q N M, Mimoto H, Koyama M, Nakasaki K. Lactic acid bacteria modulate organic acid production during early stages of food waste composting [J]. *Science of The Total Environment*, 2019, 687: 341-347
- [36] Wang J, Gu J, Wang X J, Song Z L, Dai X X, Guo H H, Yu J, Zhao W Y, Lei L S. Enhanced removal of antibiotic resistance genes and mobile genetic elements during swine manure composting inoculated with mature compost [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 411: 125135
- [37] Zainudin M H M, Singam J T, Sazili A Q, Shirai Y, Hassan M A. Indigenous cellulolytic aerobic and facultative anaerobic bacterial community enhanced the composting of rice straw and chicken manure with biochar addition[J]. *Scientific Reports*, 2022, 12(1): 5930
- [38] Bello A, Han Y, Zhu H F, Deng L T, Yang W, Meng Q X, Sun Y, Egbeagu U U, Sheng S Y, Wu X T, Jiang X, Xu X H. 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
- [39] 吕育财, 王俊刚, 李宁, 龚大春, 王伟东, 崔宗均. 间歇式曝气与人工翻堆对堆肥化进程的影响[J]. 中国农业大学学报, 2013, 18(1): 69-75
- Lv Y C, Wang J G, Li N, Gong D C, Wang W D, Cui Z J. Effects of intermittent aeration and manual turning on composting process[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2013, 18(1): 69-75 (in Chinese)
- [40] Yang Y, Wang J N, Yin J, Cui Z L, LI G X, LIU G, JIANG J H, Yuan J. Risk level and removal performance of antibiotic resistance genes and bacterial pathogens in static composting with different temperatures[J]. *Bioresource Technology*, 2024, 412: 131420
- [41] Zhao Y X, Liu Z S, Zhang B F, Cai J J, Yao X W, Zhang M, Deng Y, Hu B L. Inter-bacterial mutualism promoted by public goods in a system characterized by deterministic temperature variation [J]. *Nature Communications*, 2023, 14(1): 5394
- [42] Liao H P, Liu C, Ai C F, Gao T, Yang Q E, Yu Z, Gao S M, Zhou S G, Friman V P. Mesophilic and thermophilic viruses are associated with nutrient cycling during hyperthermophilic composting[J]. *The ISME Journal*, 2023, 17(6): 916-930
- [43] Wang B, Wang Y, Wei Y Q, Chen W J, Ding G C, Zhan Y B, Liu Y D, Xu T, Xiao J J, Li J. Impact of inoculation and turning for full-scale composting on core bacterial community and their co-occurrence compared by network analysis[J]. *Bioresource Technology*, 2022, 345: 126417
- [44] Su J, Zhou K Y, Chen W J, Xu S Q, Feng Z W, Chang Y, Ding X Y, Zheng Y, Tao X L, Zhang A, Wang Y, Li J, Ding G C, Wei Y Q. Enhanced organic degradation and microbial community cooperation by inoculating *Bacillus licheniformis* in low temperature composting [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2024, 143: 189-200
- [45] Peng L J, Tang R L, Wang G Y, Ma R N, Li Y M, Li G X, Yuan J. Effect of aeration rate, aeration pattern, and turning frequency on maturity and gaseous emissions during kitchen waste composting [J]. *Environmental Technology & Innovation*, 2023, 29: 102997

责任编辑: 杨爱东



第一作者简介：张宇丹，中国农业大学资源与环境学院生态学专业硕士研究生。2020—2024年本科就读于西南大学农学专业，获西南大学优秀毕业生以及校级优秀学生干部、三好学生等荣誉称号，获得校级一等、二等、三等学业奖学金。以第二作者身份发表SCI论文1篇，参与国家重点研发项目（2023YFD1702200）。



通讯作者简介：魏雨泉，博士，中国农业大学资源与环境学院副教授，博士生导师。北京市青年托举人才（2024—2026年），2019年以优秀人才引进中国农业大学。主要研究领域为微生物生态、有机废弃物资源化，发表论文140余篇，以第一作者或通讯作者发表文章70余篇，Web of Science数据库高被引论文3篇，授权专利11项，参编出版书籍4部，曾获中国循环经济协会科技进步奖一等奖等科研奖励5项。