

研究报告

玉米浆添加对堆肥过程中磷组分转化及微生物群落的影响

刘俊彩¹, 范博文^{1,2}, 赵立琴¹, 孙欣莹¹, 董子铭¹, 王萌萌¹, 孙宁¹, 杨凤军*¹

1 黑龙江八一农垦大学 园艺园林学院, 黑龙江 大庆 163000

2 农业农村部东北平原农业绿色低碳重点实验室, 黑龙江 大庆 163000

刘俊彩, 范博文, 赵立琴, 孙欣莹, 董子铭, 王萌萌, 孙宁, 杨凤军. 玉米浆添加对堆肥过程中磷组分转化及微生物群落的影响[J]. 微生物学通报, 2025, 52(1): 249-262.

LIU Juncai, FAN Bowen, ZHAO Liqin, SUN Xinying, DONG Ziming, WANG Mengmeng, SUN Ning, YANG Fengjun. Addition of corn steep liquor affects the transformation of phosphorus fractions and microbial community during composting process[J]. Microbiology China, 2025, 52(1): 249-262.

摘要:【背景】堆肥是处理农业废弃物的一种有效方式, 提高堆肥产品中磷的转化效率受到越来越多人的关注。【目的】研究玉米浆添加对双孢菇菌渣堆肥过程中磷组分转化和微生物群落的影响。

【方法】设置 CK (100%双孢菇菌渣)和 CP (双孢菇菌渣添加 0.5%玉米浆)这 2 个处理进行为期 36 d 的好氧堆肥。采用 Hedley 法进行磷组分测定, 高通量测序技术进行微生物测定, 并使用生物信息技术进行数据分析。【结果】添加玉米浆后显著提高了堆体温度, 延长嗜热期, 促进有机质分解, 改善堆体营养状况。提高活性磷含量, 促进磷的活化与积累。添加玉米浆能提高细菌和真菌的多样性和丰富度, 显著提高不动杆菌属(*Acinetobacter*)、假单胞菌属(*Pseudomonas*)、霉菌属(*Mycothermus*)和嗜热毁丝菌属(*Myceliophthora*)的相对丰度。降低微生物网络的复杂程度, 促进微生物之间的合作与共生。添加玉米浆改变了磷组分与部分菌属的相关性, CP 中不动杆菌属、鞘氨醇杆菌属(*Sphingobacterium*)极大地促进了磷的活化与积累。在真菌群落中, CK 的伞菌属(*Agaricus*)能促进磷的活化, 其余菌属促进磷的积累, 玉米浆添加后有更多真菌与活性磷呈正相关。【结论】添加玉米浆通过改变堆肥过程的营养方式和理化指标, 进一步影响微生物群落结构与磷的转化。本研究为缓解菌渣污染问题和提高堆肥磷的有效性提供了参考。

关键词: 双孢菇菌渣; 玉米浆; 堆肥; 磷组分; 微生物群落

资助项目: 黑龙江省蔬菜现代农业产业技术协同创新体系资助项目(HNWJZTX202301); 大庆市科技局成果转化项目(DQKJZH2023-2)

This work was supported by the Funding Program of Collaborative Innovation System for Vegetable Modern Agricultural Industry and Technology of Heilongjiang Province (HNWJZTX202301), and the Daqing Science and Technology Bureau Achievement Transfer and Transformation Project (DQKJZH2023-2).

*Corresponding author. E-mail: yangfengjun@126.com

Received: 2024-04-26; Accepted: 2024-05-14; Published online: 2024-06-06

Addition of corn steep liquor affects the transformation of phosphorus fractions and microbial community during composting process

LIU Juncai¹, FAN Bowen^{1,2}, ZHAO Liqin¹, SUN Xinying¹, DONG Ziming¹, WANG Mengmeng¹, SUN Ning¹, YANG Fengjun^{*1}

1 College of Horticulture and Landscape Architecture, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163000, Heilongjiang, China

2 Key Laboratory of Low-carbon Green Agriculture in Northeastern China, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Daqing 163000, Heilongjiang, China

Abstract: [Background] Composting is an effective way of treating agricultural waste, and improving the phosphorus conversion efficiency during the composting process is receiving increasing attention. [Objective] To study the effect of corn steep liquor addition on the transformation of phosphorus fractions and microbial community in the composting process of spent mushroom substrate. [Methods] Two treatments of CK (100% spent mushroom substrate) and CP (spent mushroom substrate added with 0.5% corn steep liquor) were designed for aerobic composting for 36 d. The Hedley method was used for phosphorus fractionation. High-throughput sequencing was performed to reveal the microbial community composition, and the data were analyzed by bioinformatics tools. [Results] The addition of corn steep liquor significantly increased the temperature of the heap, prolonged the thermophilic phase, promoted the decomposition of organic matter, and improved the nutrient status of the heap by increasing active phosphorus content and promoting phosphorus activation and accumulation. The addition of corn steep liquor increased the diversity and richness of bacteria and fungi. It significantly increased the relative abundance of *Acinetobacter*, *Pseudomonas*, *Mycothermus*, and *Myceliophthora*. The addition of corn steep liquor reduced the complexity of the microbial network and promoted the cooperation and symbiosis among microorganisms. In addition, it changed the correlations between phosphorus fractions and some microbial genera. *Acinetobacter* and *Sphingobacterium* in the CP treatment greatly promoted phosphorus activation and accumulation. In the CK treatment, *Agaricus* promoted phosphorus activation, and the rest fungal genera promoted phosphorus accumulation. More fungi were positively correlated with active phosphorus after the addition of corn steep liquor. [Conclusion] The addition of corn steep liquor affected the microbial community structure and phosphorus transformation by changing the trophic modes and physicochemical indexes during the composting process. This study provides a reference for improving the availability of compost phosphorus.

Keywords: spent mushroom substrate; corn steep liquor; compost; phosphorus fraction; microbial community

磷在农业生产系统中发挥重要作用,作为植物必需营养物质,满足作物生长发育需求^[1-2]。施用磷肥是提高土壤磷素有效性的主要手段,但磷通常容易被吸附和固定,导致大量的磷在

土壤中积累,利用率大大降低^[3]。根据溶解性磷通常可以分为活性磷、中等活性磷和非活性磷 3 种,植物可以直接利用活性磷 H₂O-P、NaHCO₃-Pi 和 NaHCO₃-Po,有机碳与磷酸盐的

反应可以提高活性磷含量^[2]。中等活性磷 NaOH-Pi 和 NaOH-Po 常常吸附于铁、铝化合物上或氢氧化物的表面,与土壤中的腐殖酸关系密切,可以作为活性磷的潜在来源^[4]。HCl-P 和 Res-P 作为难溶磷,很难转化为有效磷^[5]。

堆肥是一种处理固体废弃物的有效方式,能够将大分子有机化合物矿化,同时释放出大量的无机离子,供植物和微生物利用^[6]。有机残体是有机磷的主要来源,堆肥过程中 pH、C/N 等理化指标发生一系列变化,有机物可以通过占据吸附位抑制对磷酸盐的吸附,进而影响磷的有效性^[7]。施用有机肥能够改善土壤的理化性状,进而影响根系形态与分泌物的产生,促进磷的吸收与利用。

微生物在驱动堆肥磷转化过程中发挥重要作用^[8]。微生物可以固定无机磷、矿化有机磷和促进微生物磷的合成^[9]。在农业生产系统中,关键微生物促进有机磷的矿化是增加土壤有效磷的主要方式^[10]。堆肥中充足的碳源、氮源通过提高土壤微生物活性促进磷组分转化,适宜的水分促进微生物生长,有利于不同形态磷的积累。在厨余垃圾中接种溶磷菌(phosphate solubilizing bacteria, PSB)可以产生磷酸酶和植酸酶用于矿化有机磷^[11],丛枝菌根真菌(arbuscular mycorrhizal fungi, AMF)可以提高酸性和碱性磷酸酶活性^[12]。

黑龙江省玉米产量位居我国首位,促进了玉米加工产业的发展,玉米浆(corn steep liquor, CSL)是湿法加工玉米淀粉的副产物^[13]。玉米浆浓缩液中含有丰富的碳、氮、氨基酸和矿物质元素^[14],直接施用可以修复污染土壤,促进植物生长发育,添加到堆体中能提高堆肥有益菌的生产潜力和酶活性^[15]。2016 年以来,黑龙江省食用菌产量逐年上升,其中多家双孢菇生产基地已实现全年生产,同时产生大量菌渣废弃物造

成环境污染^[16]。双孢菇菌渣(spent mushroom substrate, SMS)主要由真菌菌丝体、木质纤维素、半纤维素和核酸、蛋白质等其他大分子物质组成^[14],这些大分子物质在腐解过程中会产生酚类、醌类、醛类等中间产物,所以双孢菇菌渣必须经过发酵处理后才能作为有机肥使用^[17]。本研究的目的是探索添加玉米浆对双孢菇菌渣堆肥过程中磷组分转化和微生物群落的影响,分析微生物在促进磷组分转化中的作用。

1 材料与方 法

1.1 试验设计与样品采集

堆肥于 2021 年 8 月在中国黑龙江八一农垦大学试验基地(125°16'E, 46°59'N)进行,为期 36 d。双孢菇菌渣取自黑龙江省大庆市大同区恒瑞食用菌合作社,玉米浆由黑龙江八一农垦大学食品学院提供,理化性质见表 1。以 100%双孢菇菌渣堆肥为对照组(CK),以双孢菇菌渣添加 0.5%玉米浆为试验组(CP),每组处理设置 3 个重复。堆肥的初始含水量约为 60%,将原材料混合均匀后堆成 2.5 m×1.5 m×1.5 m(长×宽×高)的锥形堆体。每天测量堆体温度和环境温度,当温度稳定趋于室温时,表明堆肥过程已经完成。

表 1 堆肥材料理化特征

Table 1 Physicochemical characteristics of compost materials

理化性质 Physicochemical characteristic	双孢菇菌渣 Spent mushroom substrate	玉米浆 Corn steep liquor
pH	8.01	
电导率 EC (mS/cm)	3.31	
土壤总有机碳 Total organic carbon (g/kg)	206.05	85.85
土壤总有机氮 Total organic nitrogen (g/kg)	15.34	238.00
全磷 Total phosphorus (g/kg)	9.35	12.53
全钾 Total potassium (g/kg)	10.21	1 029.00

分别于升温期(第1天)、嗜热期(第3天)、降温期(第17天)和完熟期(第36天)进行样品采集。在距离堆顶20、70、120 cm处采用五点采样法采集样品,采集的样品质量约0.5 kg,混匀后将样品分成2份,一部分保存于-80 °C用于高通量测序,另一部分风干粉碎后进行理化指标测定。CK和CP处理4个时期分别标记为CK1、CK3、CK17、CK36、CP1、CP3、CP17和CP36。

1.2 主要试剂和仪器

浓硫酸,天津市科密欧化学试剂有限公司;2,6-二硝基酚、酒石酸锶钾和钼酸铵,天津市大茂化学试剂厂;抗坏血酸和磷酸二氢钾,辽宁全瑞试剂有限公司。土壤基因组DNA提取试剂盒, Omega Bio-Tek公司; MiSeq Reagent Kit v3, Illumina公司。

压力蒸汽灭菌锅,黑龙江省韦恩科技发展有限公司;紫外分光光度计,上海菁华科技仪器有限公司; NanoDrop 2000, Thermo Fisher Scientific公司; PCR仪, Applied Biosystems公司; MiSeq PE300和Novaseq 6000 PE250, Illumina公司。

1.3 磷组分的测定

采用HedleyP连续提取法进行磷组分的测定^[18],提取液分别为去离子水、0.5 mol/L NaHCO₃、0.5 mol/L NaOH和1.0 mol/L HCl,用钼蓝比色法分别测定H₂O-P、NaHCO₃-Pi、NaHCO₃-Po、NaOH-Pi、NaOH-Po和HCl-P,其中Pi代表无机磷,Po代表有机磷。残余物利用HNO₃-HClO₄混合物消煮进行残余磷的测定(Res-P)。

1.4 高通量测序

使用土壤基因组DNA提取试剂盒提取堆肥样本的DNA,使用NanoDrop 2000检测DNA质量和纯度,高质量的DNA样品送到北京奥维

森平台进行16S rRNA基因和ITS基因测序,16S rRNA基因扩增区域为V3-V4区,引物为338F(5'-ACTCCTACGGGAGGCAGCAG-3')和806R(5'-GGACTACHVGGGTWTCTAAT-3'); ITS扩增引物为ITS1F(5'-CTTGGTCATTTAGAGGAAGTAA-3')和ITS2R(5'-TGCGTTCTTCATCGATGC-3')。PCR反应体系(25 μL):DNA模板2 μL,5×Forward Primer缓冲液1 μL,5×Reverse Primer缓冲液1 μL,BSA(2 ng/μL)3 μL,2×Taq Plus Master Mix 12.5 μL,无菌水5.5 μL。PCR反应条件:95 °C 5 min;95 °C 45 s,55 °C 50 s,72 °C 45 s,28个循环;72 °C 10 min;4 °C保存。通用引物在PCR仪上进行扩增,使用1%琼脂糖凝胶电泳检测扩增目的条带的大小。PCR产物使用核酸纯化试剂盒进行纯化,纯化后的扩增子进行高通量测序。

1.5 数据分析

使用GraphPad Prism 9分析温度及磷组分数据。利用IBM SPSS Statistics 26.0对不同样品理化性质进行单因素方差分析($P \leq 0.05$ 的Tukey检验)。使用R软件R包phyloseq进行微生物数据深度分析,ggplot用于绘图;使用QIIME(v1.8.0)对数据进行抽平处理分析群落多样性;采用基于Bray-Curtis距离的主成分分析(principal component analysis, PCA)评估细菌、真菌群落组成的差异^[19]。利用R的Hmisc包^[20]构建微生物网络,并通过Gephi软件进行了可视化分析。

2 结果与分析

2.1 添加玉米浆对堆肥磷组分的影响

由图1可知,2个处理组的TP含量总体均呈上升趋势(图1A),但CP的TP含量显著高于CK。CK和CP的H₂O-P(图1B)、NaHCO₃-Pi(图1C)、NaHCO₃-Po(图1D)均呈降低趋势,完

熟期分别比堆肥初期下降了 52.92%、49.72%、35.02%、42.10%、26.94%、24.74%；CP 的活性磷含量均显著高于 CK，说明玉米浆的添加能提高菌渣堆肥磷组分的活性。NaOH-P 属于中等活性磷，CK 和 CP 的 NaOH-Pi 和 NaOH-Po 总体均呈上升趋势(图 1E、1F)，但 CP 低于 CK；

完熟期 CP 的 NaOH-Pi 和 NaOH-Po 分别比 CK 降低了 16.00%和 17.45%。2 个处理 HCl-P 均随着堆肥进程上升，CP 的 HCl-P 比 CK 高 18.26% (图 1G)。Res-P 是很难被转化的磷，堆肥过程 Res-P 的含量升高可能是由“浓缩效应”引起的^[21] (图 1H)。

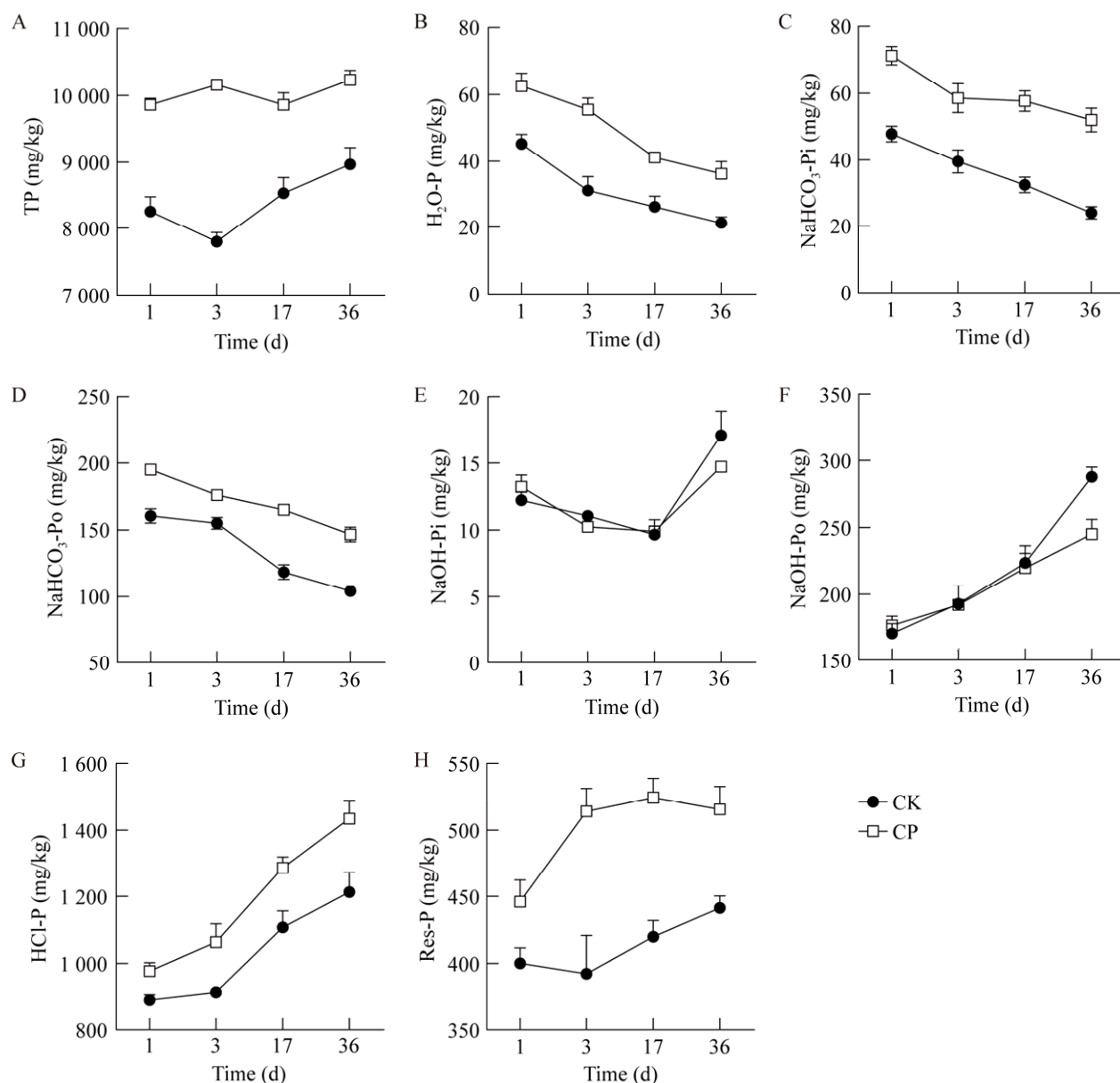


图 1 堆肥过程中磷组分的变化

Figure 1 Changes in phosphorus composition during the composting process. A: TP; B: H₂O-P; C: NaHCO₃-Pi; D: NaHCO₃-Po; E: NaOH-Pi; F: NaOH-Po; G: HCl-P; H: Res-P.

2.2 微生物群落演替

2.2.1 添加玉米浆对菌渣堆肥微生物群落多样性的影响

用 Chao1 和 Simpson 指数评价细菌群落的丰富度和多样性^[22]。CP 的 Chao1 指数与 CK 无显著差异,但 CP 的 Simpson 指数显著高于 CK,说明添加玉米浆为微生物提供了更加有利的生存环境条件(图 2A)。CP 真菌微生物群落的 Chao1 和 Simpson 指数与 CK 无显著差异(图 2B)。

用 PCA (ANOSIM, $r=0.704$, $P=0.001$)阐明

CP 和 CK 细菌群落组成的变化(图 2C), PCA1 和 PCA2 分别解释了总变异的 28.40%和 22.71%,并且 CP 的细菌群落分布比 CK 更紧密。这可能与两者处理的温度、养分含量和初始 C/N 有关^[23]。真菌 β 多样性(ANOSIM, $r=0.342$, $P=0.002$)结果显示(图 2D), PCA1 和 PCA2 分别解释了真菌微生物群落总变异的 52.15%和 17.68%。

2.2.2 添加玉米浆对微生物群落组成的影响

在门水平上(图 3A), 2 个堆肥处理的优势细菌门均为拟杆菌门(*Bacteroidota*)、变形菌

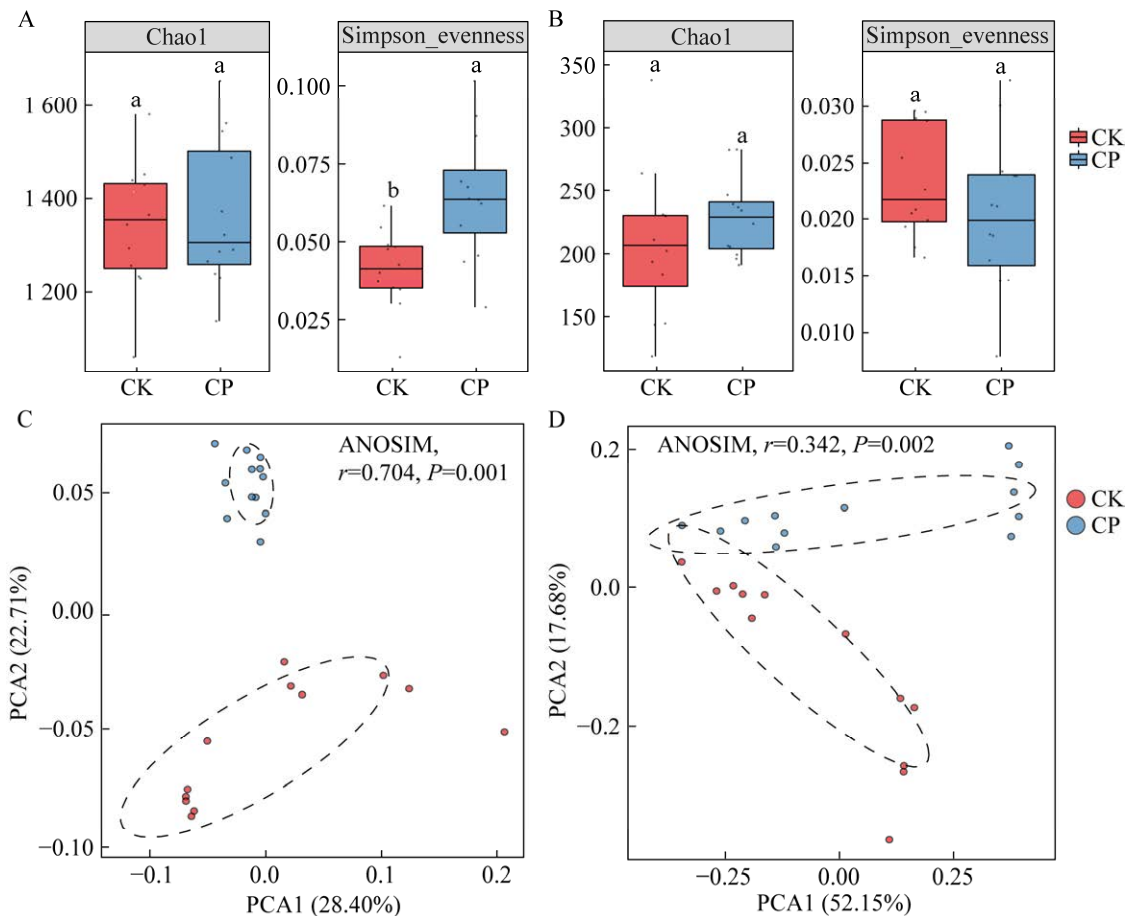


图 2 堆肥过程中不同堆体细菌和真菌群落多样性 A: 细菌的 α 多样性; B: 真菌的 α 多样性; C: 细菌的 β 多样性; D: 真菌的 β 多样性。

Figure 2 Diversity of bacterial and fungal communities in different compost bodies during the composting process. A: Alpha diversity of bacteria; B: Alpha diversity of fungi; C: Beta diversity of bacteria; D: Beta diversity of fungi.

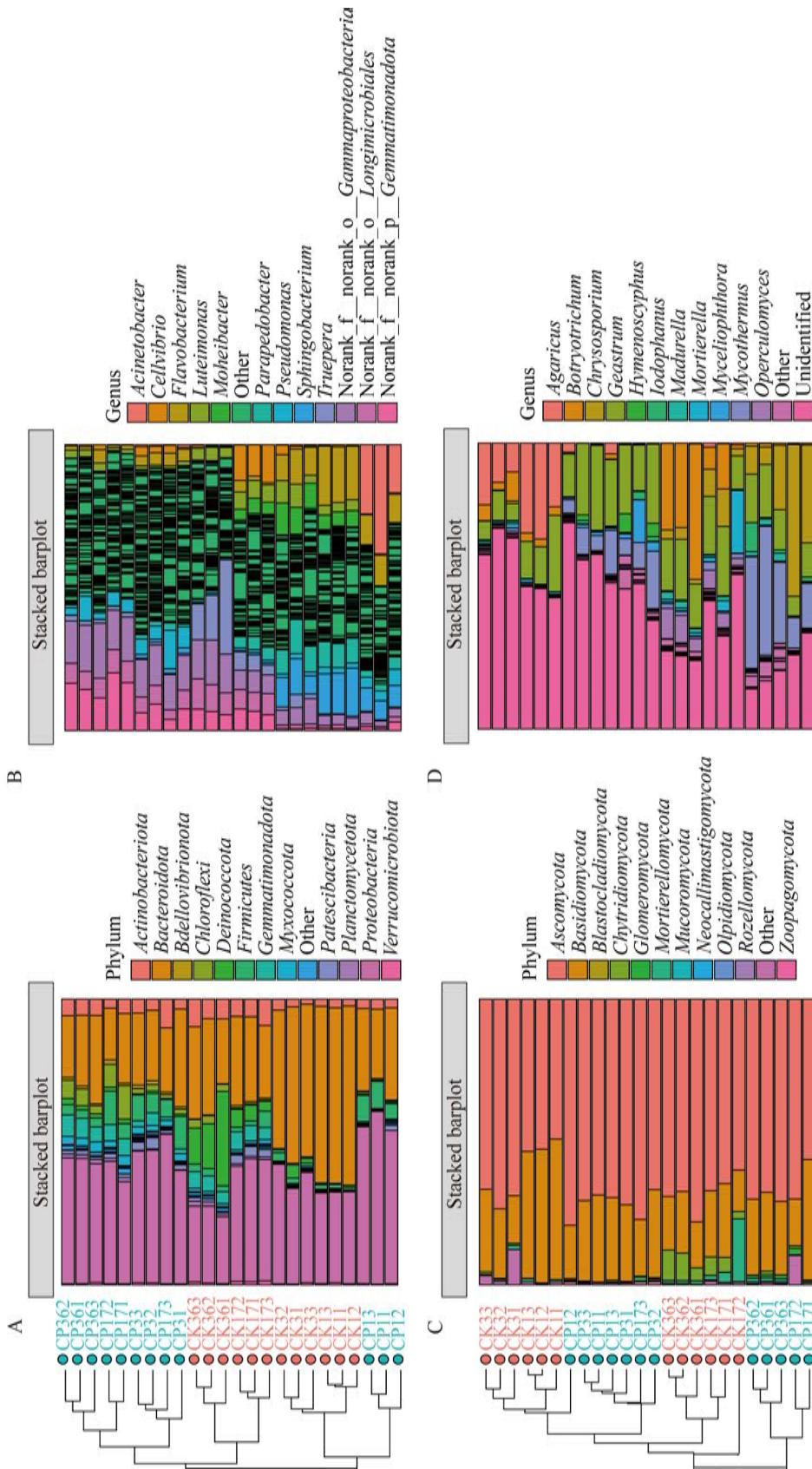


图3 堆肥过程中不同处理细菌和真菌群落组成在门、属水平上的聚类堆叠 A: 细菌门水平群落组成变化; B: 细菌属水平群落组成变化; C: 真菌门水平群落组成变化; D 真菌属水平群落组成变化。

Figure 3 Clustering stack of different bacterial and fungal communities at the phylum and genus levels during the composting process. A: Changes in community composition at the level of bacterial phylum; B: Changes in community composition at the level of bacterial genus; C: Changes in community composition at the level of fungal phylum; D: Changes in community composition at the level of fungal genus.

门 (*Proteobacteria*)、异常球菌-栖热菌门 (*Deinococcota*)、厚壁菌门 (*Firmicutes*) 和绿弯菌门 (*Chloroflexi*), 其相对丰度分别为 21.67%–61.96%、25.59%–56.30%、0.41%–20.45%、1.23%–9.044% 和 0.08%–7.06%。完熟期 CK 和 CP 的拟杆菌门的相对丰度较初始期分别下降了 52.33% 和 9.64%, 拟杆菌门在高温期可以促进有机质分解。堆肥结束时 CK 和 CP 的变形菌门相对丰度分别下降了 19.66% 和 23.46%。嗜热期 CP 厚壁菌门的相对丰度是 CK 的 4 倍, 这可能导致 CP 堆肥进程更快。异常球菌-栖热菌门具有极强的稳定性和抗性^[24], CP 中异常球菌-栖热菌门相对丰度始终低于 CK。

在真菌门水平上 (图 3B), 子囊菌门 (*Ascomycota*) 和担子菌门 (*Basidiomycota*) 是堆肥过程中的优势真菌门, 其相对丰度分别为 51.59%–71.41% 和 21.14%–46.76%。由于双孢菇属于担子菌门, 在堆肥初期 CK 组中担子菌门的相对丰度比 CP 高 20.78%, 但堆肥结束时 CP 中的相对丰度比 CK 高了 29.4%。被孢菌门 (*Mortierellomycota*) 在堆肥过程中相对丰度始终较低 (0.08%–9.02%)。

在细菌属水平上 (图 3C), 优势细菌属中不动杆菌属 (*Acinetobacter*) 相对丰度为 0.05%–26.39%、*Truepera* 相对丰度为 0.41%–20.45%、黄杆菌属 (*Flavobacterium*) 相对丰度为 0.19%–19.67%、鞘氨醇杆菌属 (*Sphingobacterium*) 相对丰度为 0.07%–15.02%、*Cellvibrio* 相对丰度为 0.44%–12.22%。

在真菌属水平上 (图 3D), 霉菌属 (*Mycothermus*)、嗜热毁丝菌属 (*Myceliophthora*) 属于子囊菌门, 在嗜热期 CP 霉菌属的相对丰度为 11.76% 高于 CK 的相对丰度 0.54%, CP 中嗜热毁丝菌属相对丰度始终高于 CK, 嗜热期的相对丰度为 1.98%。被毛枝葡萄孢属 (*Botryotrichum*) 少量存在于 CP 中, 在 CK 中大量积累, 堆肥结束时其相

对丰度为 35.72%。金孢子菌属 (*Chrysosporium*) 呈先增加后降低的趋势, 相对丰度均在嗜热期达到最高, 嗜热期 CK 和 CP 组的金孢子菌属相对丰度分别为 8.37% 和 29.22%。伞菌属 (*Agaricus*) 的相对丰度显著下降, 完熟期时 CK 组和 CP 组的相对丰度分别为 0.14% 和 0.06%。

2.3 微生物网络分析

基于 Pearson 相关分析 ($P < 0.05$) 构建微生物共现网络 (图 4), 探讨添加玉米浆对堆肥过程中微生物群落的影响。红线和绿线分别表示正相关边和负相关边, 在共现网络中正相关通常表示共生关系, 负相关表示竞争或掠夺关系。图 4A 和 4B 分别为 CK 和 CP 细菌网络, CP 的共现网络有 484 个节点, 5 905 条边, CK 的共现网络有 480 个节点, 15 723 条边; CK 网络图密度 (0.068) 和平均度 (32.756) 均高于 CP (0.051, 24.417)。说明添加玉米浆可以提高细菌共现网络的连接性, 降低复杂性。CP 网络中正相关的边有 5 575 条 (94.35%), 所占比例远高于 CK 网络 12 712 条 (80.88%)。

图 4C 和 4D 为真菌的共现网络, CK 和 CP 网络分别有 6 106、4 743 条边, 475、465 个节点。CK 网络的图密度 (0.054) 和平均度 (25.709) 均高于 CP (0.044, 20.4)。说明添加玉米浆降低了真菌网络的复杂性, 但网络的连通性更好。CK 网络中正相关边所占比例为 99.95%, CP 网络中正相关边所占比例为 99.98%, 无显著差异。

2.4 磷组分与细菌、真菌相关性分析

细菌属与磷组分相关性热图 (图 5A、5B) 表明, 在 CK 中 *Altererythrobacter*、黄杆菌属、*Moheibacter*、*Parapedobacter*、土地杆菌属 (*Pedobacter*)、假单胞菌属 (*Pseudomonas*)、鞘氨醇杆菌属 7 个属分别与活性磷呈不同程度的正相关 ($P < 0.001$), 与 NaOH-Po、HCl-P 和 Res-P 呈不同程度的负相关, 但这种相关性在 CP 中

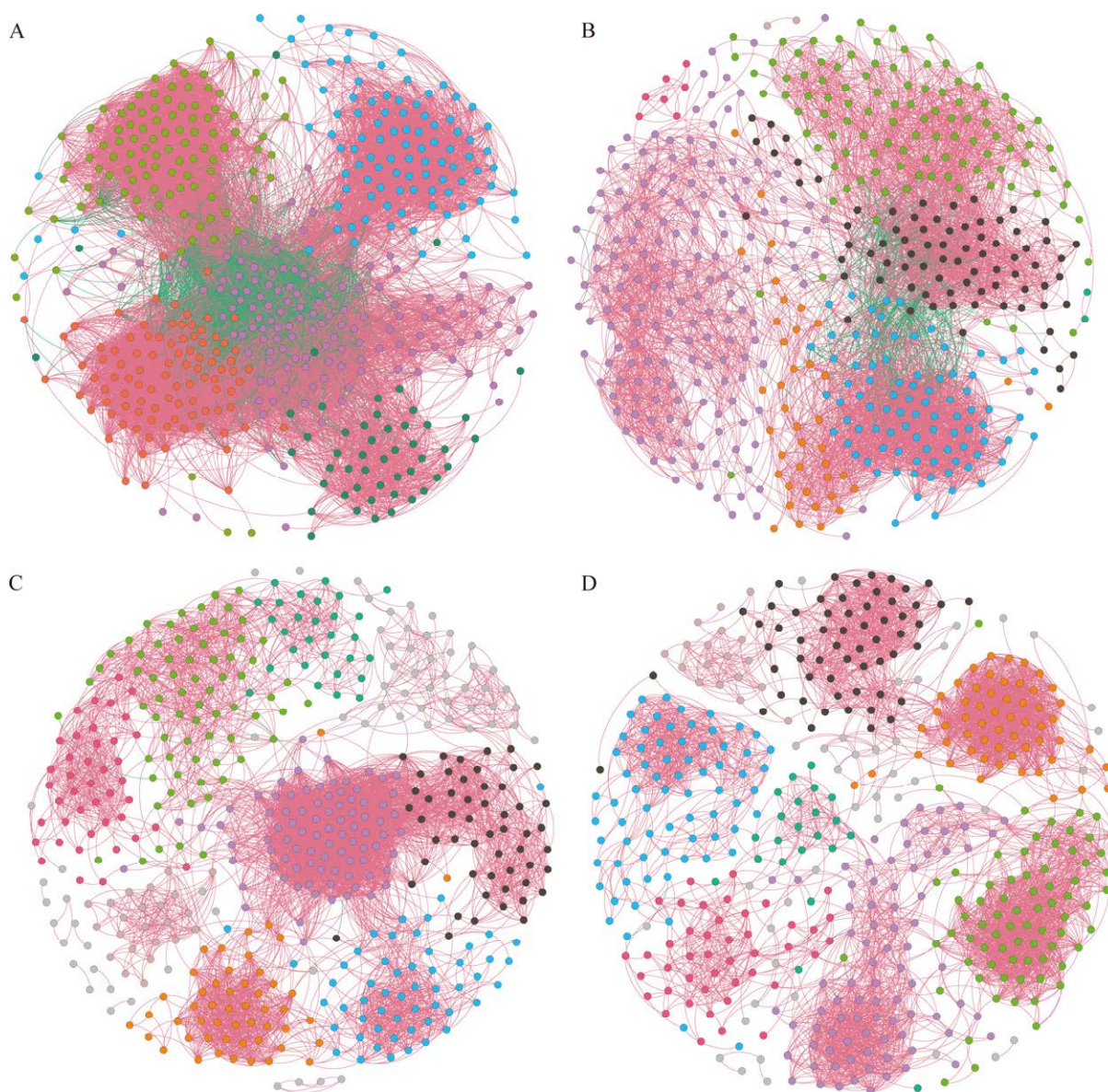


图 4 堆肥过程中不同堆体细菌和真菌群落组成在属水平的微生物网络 A: CK 细菌属水平微生物网络; B: CP 细菌属水平微生物网络; C: CK 真菌属水平微生物网络; D: CP 真菌属水平微生物网络。
Figure 4 Microbial network diagram of bacterial and fungal communities at the genus level in different compost communities during the composting process. A: CK bacterial genus level microbial network; B: CP bacterial genus level microbial network; C: CK fungal genus level microbial network; D: CP fungal genus level microbial network.

较弱。CP 中黄杆菌属细菌丰度下降，对磷组分影响减弱。不动杆菌属、*Altererythrobacter* 细菌在 CK 和 CP 中的表现相反，不动杆菌属细菌在 CP 中与 H_2O-P 、 $NaHCO_3-P$ 呈极显著正相关，

通过促进碳氮代谢改变磷的有效性。

图 5C、5D 为真菌群落与磷组分相关性热图。CK 中伞菌属(*Agaricus*)与活性磷呈极显著正相关，其他 11 个属均与活性磷呈不同程度负

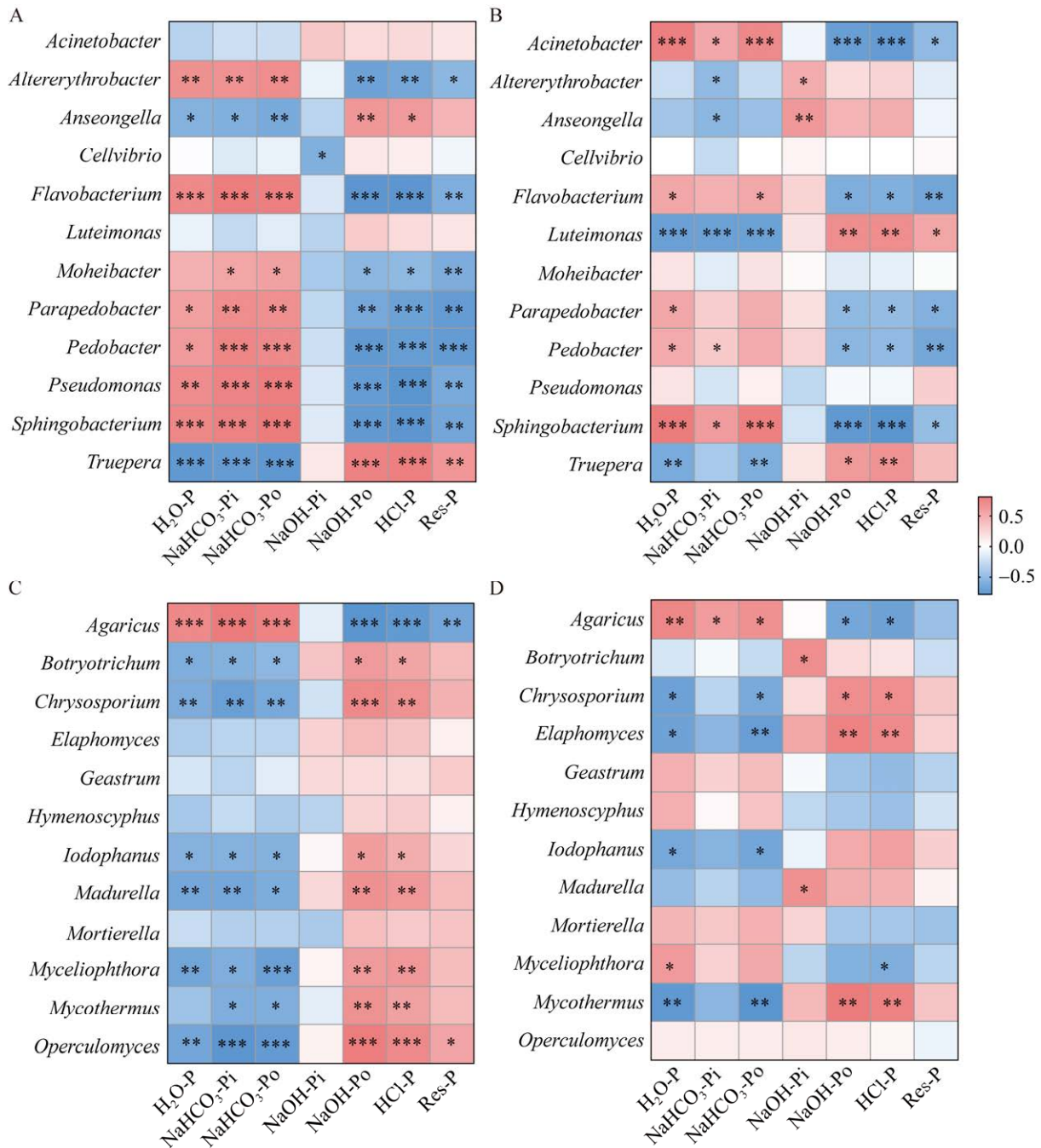


图 5 堆肥过程中属水平细菌和真菌与磷组分相关性热图 A: CK 中属水平细菌与磷组分相关性; B: CP 中属水平细菌与磷组分相关性; C: CK 中属水平真菌与磷组分相关性; D: CP 中属水平真菌与磷组分相关性。

Figure 5 Heat map of the correlation between bacteria and fungi and phosphorus components in the composting process. A: Genus level bacteria and phosphorus fraction correlation in CK; B: Genus level bacteria and phosphorus fraction correlation in CP; C: Genus level fungi and phosphorus fraction correlation in CK; D: Genus level fungi and phosphorus fraction correlation in CP. *: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$; ***: $P < 0.001$.

相关; *Operculomyces* 与 NaOH-P_o、HCl-P 呈极显著正相关, *Madurella*、嗜热毁丝菌属、霉菌属与中等活性磷和非活性磷也呈显著正相关。有机残体通过微生物分泌的磷酸酶、植酸酶和胞外酶矿化为有效磷的过程, 受到正磷酸盐浓度的影响^[25]。CP 中地星菌属(*Geastrum*)、膜盘菌属(*Hymenoscyphus*)、*Mortierella*、嗜热毁丝菌属对磷组分的影响与 CK 不同, 从促进磷的积累转变成促进磷活化。添加玉米浆减弱了 *Operculomyces* 真菌对活性磷的抑制作用。

3 讨论与结论

微生物通过碳代谢和合成水解酶(如磷酸酶)来产生有机酸的方式促使磷的矿化和溶解^[26]; 堆肥过程中含水量、温度、pH 值等环境因素的变化也会影响堆肥产品中磷的有效性。添加 CSL 后全磷含量的提高可能与玉米浆中带有部分磷营养有关。活性磷是最容易被植物和微生物利用的磷组分, H₂O-P、NaHCO₃-Pi、NaHCO₃-Po 属于活性磷, CP 组活性磷提高的原因可能是 CSL 增加了菌渣堆肥 C、N 等营养物质, 进而促进了微生物代谢, 使大量的有机磷化合物矿化而导致磷的活性提高^[27]。堆肥过程促进中等活性磷的溶解, 添加 CSL 促进 NaOH-Pi 与金属离子的结合, 形成的不溶性沉淀物可能被堆肥过程中产生的有机酸溶解, 导致中等活性磷含量的提高^[28]。随着反应的进行, HCl-P 的升高可能与堆肥过程中的有机质及其分解产物的吸附作用有关^[27], 此外, pH 的小幅度下降, 也可能造成 HCl-P 含量的变化。

堆肥过程中微生物群落的变化会改变堆体中 P 组分转化趋势和磷的有效性^[21]。磷以多种形式存在于堆体中, 微生物是堆肥反应的驱动因子, 堆肥过程中微生物多样性促进磷的积累^[29]。前人研究表明有机磷、无机磷和总磷的联合作

用影响微生物多样性^[30]。此外, 真菌群落演替可以衡量堆肥成熟度与产品质量^[31]。CSL 添加显著影响微生物群落分布, 通过提供碳源、氮源和维生素促进堆肥的进行, 影响微生物群落多样性。

细菌群落中, 变形菌门能促进有机酸的合成和抗生素的产生, 促进 P 的溶解^[32]。厚壁菌门是降解碳水化合物和纤维素的主要细菌^[33], 能促进堆肥过程中有机物的矿化。绿弯菌门在 CP 中为嗜热期的优势细菌门, 它与多种碳、氢化合物分解有关^[8]。堆肥过程中 CP 假单胞菌属的相对丰度始终高于 CK, 其通过分解蛋白质和糖类促进堆肥腐殖化过程^[31]。大多数假单胞菌具有解磷能力, 可以促进有机阴离子的释放^[34]。*Truepera* 属细菌与厌氧反硝化作用密切相关^[35], 由于低温条件下分解不彻底, 堆肥结束时 CK 中 *Truepera* 属细菌的相对丰度高于 CP。黄杆菌属是致病菌, 当温度高于 42 °C 时能够被杀死^[36]。鞘氨醇杆菌属为严格需氧菌, 参与木质纤维素的分解^[32]。随着堆肥的进行, CK 和 CP 的黄杆菌属和鞘氨醇杆菌属细菌的丰度均大幅下降。真菌群落中, 子囊菌门是碳氮循环的重要驱动因素, 能够分解纤维素或其他碳水化合物^[28]。担子菌门相对丰度仅次于子囊菌门, 参与木质素的分解和多糖聚合物的降解, 影响解磷效率^[29,37]。被孢菌门在植物残渣的快速分解过程中发挥重要作用^[38]。前人研究表明堆肥阶段对真菌群落组成的影响是由于堆肥环境如温度^[39]、氧化还原电位、pH^[40]和 C/N^[41]等引起的。霉菌属、嗜热毁丝菌属为嗜热菌属, 在 45 °C 以上的环境中可以长时间地存活^[42]。*Thermomyces*、霉菌属和 *Aspergillus* 真菌在冷却阶段发挥作用, 菌属为木材分解菌, 在牛粪、锯末、蘑菇渣为原料进行高温好氧堆肥试验中, 与动、植物病原菌呈显著负相关^[38]。高温是有机物快速分解的必要条

件,真菌是难降解有机物的主要分解者^[43]。堆肥过程中显示出不同的微生物群落组成,这可能与玉米浆的添加和堆肥过程的有效管理有关^[39]。

细菌和真菌的微生物网络中正相关边所占比例都增加,说明添加玉米浆加强微生物群落间共生与合作^[44]。原因可能是玉米浆的添加提供了额外的营养物质,通过改变代谢过程影响微生物群落结构和互作模式。表明碳、氮和磷的循环耦合,碳和氮含量影响磷的转化和生物有效性^[45]。玉米浆添加对微生物群落及磷组分影响显著,同时,细菌群落功能预测结果发生改变。

前人研究表明堆肥过程中理化因子的变化会影响溶磷菌的丰度和无机磷的分布,微生物能够利用游离态的磷酸盐,以维持代谢活动,并防止磷酸盐与钙离子结合^[10]。*Altererythrobacter*、黄杆菌属、*Moheibacter*、*Parapedobacter*、土地杆菌属(*Pedobacter*)、假单胞菌属、鞘氨醇杆菌属这些细菌可能通过分泌有机酸或者酸性磷酸酶的方式促进磷矿化为可溶性磷酸盐^[11]。中等活性磷中的 NaOH-Po 与细菌相关性更强, NaOH-Pi 与细菌的相关性较弱,说明有机磷含量的提高可以加快土壤中的 P 循环^[46]。微生物丰度及活性与磷组分转化有关,堆肥过程中微生物可以促进磷的活化与积累,添加玉米浆后形成的有机质对磷的吸附效果不同^[25]。溶磷菌可以促进 C/P 循环与合作,分泌能促进磷酸盐矿物质溶解的有机酸^[25],进而促进难溶磷的溶解。细菌和真菌作为生物因素参与 P 的循环,微生物代谢活性提高,能促进小分子有机物与磷之间的结合。磷酸盐溶解的量取决于微生物种类、碳源的可用性、分泌的有机酸和与 P 结合的阳离子^[47]。堆肥促进废弃物材料的分解与转化,CSL 作为生物刺激素促进固氮、溶磷菌的生长,提高了双孢菇菌渣的可利用性。CSL

和 SMS 都具有便宜、易获取的特点,好氧堆肥不仅可以产出优质有机肥料,还可以解决环境污染问题。CSL 添加提高堆肥产物中磷的活性,以期缓解农田系统中磷限制问题。CSL 可以用作微生物培养基、低成本动物饲料、生物表面活性剂和生物刺激素^[48],本研究表明,CSL 作为堆肥原料之一,通过影响理化指标与微生物群落,达到优化堆肥产品的目的。玉米加工过程中产生的 CSL 占玉米干重的 45%左右,堆肥是绿色、环保的回收利用玉米浆的生产方式。

在堆肥过程中,添加 CSL 影响磷组分的转化与微生物的群落结构。添加 CSL 提高了全磷和活性磷含量,中等活性磷含量降低,提高了磷的生物有效性,促进非活性磷的积累,提高了堆肥产品的持续供磷的能力。添加 CSL 提高了细菌和真菌群落的多样性和丰富度,降低了微生物网络的复杂度,促进了微生物之间的合作与共生。CSL 的添加改变了微生物群落与磷组分间的互作关系。不动杆菌属、*Altererythrobacter* 属细菌在 CK、CP 中对磷组分的影响完全相反;地星菌属、膜盘菌属、*Mortierella*、嗜热毁丝菌属真菌在 CP 中对磷的活化起到促进作用。微生物及其分泌物可以促进有机磷的矿化和无机磷的溶解。了解微生物群落结构变化对于通过利用特定微生物优化堆肥条件具有重要的参考意义。

REFERENCES

- [1] YANG M, YANG HM. Utilization of soil residual phosphorus and internal reuse of phosphorus by crops[J]. *PeerJ*, 2021, 9: e11704.
- [2] 朱正青, 满秀玲. 林下植被对寒温带兴安落叶松林土壤磷形态及有效性的影响[J]. *水土保持学报*, 2024, 38(2): 339-350, 363.
ZHU ZQ, MAN XL. Effects of understory vegetation on soil phosphorus morphological and availability in *Larix gmelinii* forest in the cold temperate zone[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024, 38(2): 339-350, 363 (in Chinese).
- [3] 彭正萍, 张家铜, 袁硕, 王艳群, 刘会玲, 薛世川. 不同供磷水平对玉米干物质和磷动态积累及分配的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2009, 15(4): 793-798.
PENG ZP, ZHANG JT, YUAN S, WANG YQ, LIU HL,

- XUE SC. Effects of different phosphorus application rates on the dynamic accumulation and distribution of dry matter and phosphorus in maize[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009, 15(4): 793-798 (in Chinese).
- [4] GAIND S. Effect of fungal consortium and animal manure amendments on phosphorus fractions of paddy-straw compost[J]. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 2014, 94: 90-97.
- [5] 曹升, 胡华英, 张虹, 周垂帆, 刘博. 我国南方人工林土壤有效磷匮乏原因及对策分析[J]. *世界林业研究*, 2019, 32(3): 78-84.
- CAO S, HU HY, ZHANG H, ZHOU CF, LIU B. Causes and countermeasures of plantation soil available phosphorus deficiency in southern China[J]. *World Forestry Research*, 2019, 32(3): 78-84 (in Chinese).
- [6] LIU GL, YANG Y, MA RN, JIANG JH, LI GX, WANG JN, WUYUN DL, YUAN J. Thermophilic compost inoculating promoted the maturity and mature compost inoculating reduced the gaseous emissions during co-composting of kitchen waste and pig manure[J]. *Environmental Technology and Innovation*, 2023, 32: 103427.
- [7] LI XN, WANG PL, CHU SQ, XU YL, SU YL, WU D, XIE B. Short-term biodrying achieves compost maturity and significantly reduces antibiotic resistance genes during semi-continuous food waste composting inoculated with mature compost[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 427: 127915.
- [8] MA C, HU B, WEI MB, ZHAO JH, ZHANG HZ. Influence of matured compost inoculation on sewage sludge composting: Enzyme activity, bacterial and fungal community succession[J]. *Bioresource Technology*, 2019, 294: 122165.
- [9] WU Q, ZHANG SB, ZHAO Y, XIE LN, ZHANG GG, WEI ZM, LI J, SONG CH. Effects of initial carbon-phosphorus ratio on phosphatase, and phosphorus availability in sludge composting[J]. *Bioresource Technology*, 2023, 382: 129192.
- [10] RICHARDSON AE, SIMPSON RJ. Soil microorganisms mediating phosphorus availability update on microbial phosphorus[J]. *Plant Physiology*, 2011, 156(3): 989-996.
- [11] MOHAMED TA, WU JQ, ZHAO Y, ELGIZAWY N, EL KHOLY M, YANG HY, ZHENG GR, MU DC, WEI ZM. Insights into enzyme activity and phosphorus conversion during kitchen waste composting utilizing phosphorus-solubilizing bacterial inoculation[J]. *Bioresource Technology*, 2022, 362: 127823.
- [12] LI Z, WANG Y, LIU Z, HAN F, CHEN SG, ZHOU WZ. Integrated application of phosphorus-accumulating bacteria and phosphorus-solubilizing bacteria to achieve sustainable phosphorus management in saline soils[J]. *The Science of the Total Environment*, 2023, 885: 163971.
- [13] ZHOU KM, YU J, MA YH, CAI L, ZHENG L, GONG WL, LIU QG. Corn steep liquor: green biological resources for bioindustry[J]. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 2022, 194(7): 2380-3295.
- [14] MA YS, LIU LY, ZHOU XY, TIAN T, XU S, LI D, LI CT, LI Y. Optimizing straw-rotting cultivation for sustainable edible mushroom production: composting spent mushroom substrate with straw additions[J]. *Journal of Fungi*, 2023, 9(9): 925.
- [15] HOFER A, HAUER S, KROLL P, FRICKE J, HERWIG C. In-depth characterization of the raw material corn steep liquor and its bioavailability in bioprocesses of *Penicillium chrysogenum*[J]. *Process Biochemistry*, 2018, 70: 20-28.
- [16] 赵建, 田丽莹, 周凡琦. 黑龙江省食用菌产业发展问题与对策研究[J]. *中国食用菌*, 2021, 40(4): 123-126.
- ZHAO J, TIAN LY, ZHOU FQ. Research on the development problems and countermeasures of edible fungi industry in Heilongjiang Province[J]. *Edible Fungi of China*, 2021, 40(4): 123-126 (in Chinese).
- [17] WANG RG, GUO JK, XU YM, DING YZ, SHEN Y, ZHENG XQ, FENG RW. Evaluation of silkworm excrement and mushroom dreg for the remediation of multiple heavy metal/metalloid contaminated soil using pakchoi[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2016, 124: 239-247.
- [18] AUDETTE Y, O' HALLORAN IP, EVANS LJ, VORONEY RP. Preliminary validation of a sequential fractionation method to study phosphorus chemistry in a calcareous soil[J]. *Chemosphere*, 2016, 152: 369-375.
- [19] ZHANG CS, LIN Y, TIAN XY, XU Q, CHEN ZH, LIN W. Tobacco bacterial wilt suppression with biochar soil addition associates to improved soil physiochemical properties and increased rhizosphere bacteria abundance[J]. *Applied Soil Ecology*, 2017, 112: 90-96.
- [20] PARTANEN P, HULTMAN J, PAULIN L, AUVINEN P, ROMANTSCHUK M. Bacterial diversity at different stages of the composting process[J]. *BMC Microbiology*, 2010, 10: 94.
- [21] CHEN W, ZHAN Y, ZHANG X, SHI X, WANG Z, XU S, CHANG Y, DING G, LI J, WEI Y. Influence of carbon to phosphorus ratios on phosphorus fractions transformation and bacterial community succession in phosphorus-enriched composting[J]. *Bioresource Technology*, 2022, 362: 127786.
- [22] SUN N, FAN BW, YANG FJ, ZHAO LQ, WANG MM. Effects of adding corn steep liquor on bacterial community composition and carbon and nitrogen transformation during spent mushroom substrate composting[J]. *BMC Microbiology*, 2023, 23(1): 156.
- [23] HE Y, LIU D, HE XH, WANG YL, LIU JW, SHI XF, CHATER CCC, YU FQ. Characteristics of bacterial and fungal communities and their impact during cow manure and agroforestry biowaste co-composting[J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 324: 116377.
- [24] WEI YH, LIANG ZW, ZHANG Y. Evolution of physicochemical properties and bacterial community in aerobic composting of swine manure based on a patent compost tray[J]. *Bioresource Technology*, 2022, 343: 126136.
- [25] JINDO K, AUDETTE Y, OLIVARES FL, CANELLAS LP, SMITH DS, VORONEY RP. Biotic and abiotic effects of soil organic matter on the phytoavailable phosphorus in soils: a review[J]. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 2023, 10(1): 29.
- [26] CUI H, OU Y, WANG LX, YAN BX, LI YX, BAO MW. Dissolved organic carbon, a critical factor to increase the bioavailability of phosphorus during biochar-amended aerobic composting[J]. *Journal of Environmental Sciences (China)*, 2022, 113: 356-364.

- [27] ZHANG J, WU ZR, HUANG YH, ZHAN XM, ZHANG YC, CAI C. Industrial-scale composting of swine manure with a novel additive-yellow phosphorus slag: variation in maturity indicators, compost quality and phosphorus speciation[J]. *Bioresource Technology*, 2023, 384: 129356.
- [28] WEI YQ, ZHAO Y, SHI MZ, CAO Z, LU Q, YANG TX, FAN YY, WEI ZM. Effect of organic acids production and bacterial community on the possible mechanism of phosphorus solubilization during composting with enriched phosphate-solubilizing bacteria inoculation[J]. *Bioresource Technology*, 2018, 247: 190-199.
- [29] WANG XF, WAN JX, JIANG GF, YANG TJ, BANERJEE S, WEI Z, MEI XL, FRIMAN VP, XU YC, SHEN QR. Compositional and functional succession of bacterial and fungal communities is associated with changes in abiotic properties during pig manure composting[J]. *Waste Management*, 2021, 131: 350-358.
- [30] COSTA M, GAMA RODRIGUES A, GONCALVES J, GAMA RODRIGUES E, SALES M, ALEIXO S. Labile and non-labile fractions of phosphorus and its transformations in soil under eucalyptus plantations, Brazil[J]. *Forests*, 2016, 7(12): 15.
- [31] LI HJ, YANG ZH, ZHANG CY, SHANG WW, ZHANG TL, CHANG XJ, WU ZS, HE YH. Effect of microbial inoculum on composting efficiency in the composting process of spent mushroom substrate and chicken manure[J]. *Journal of Environmental Management*, 2024, 353: 120145.
- [32] ZHANG MY, LIANG W, TU ZN, LI RH, ZHANG ZQ, ALI A, XIAO R. Succession of bacterial community during composting: dissimilarity between compost mixture and biochar additive[J]. *Biochar*, 2021, 3(2): 229-237.
- [33] YANG YR, GUO YX, WANG QY, HU BY, TIAN SY, YANG QZ, CHENG ZA, CHEN QJ, ZHANG GQ. Impacts of composting duration on physicochemical properties and microbial communities during short-term composting for the substrate for oyster mushrooms[J]. *The Science of the Total Environment*, 2022, 847: 157673.
- [34] CUI H, OU Y, WANG LX, YAN BX, BAO MW, GUAN FC. Tetracycline hydrochloride-stressed changes in phosphorus fractions during swine manure composting: emphasize on phosphorus functional genes[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2022, 168: 336-343.
- [35] LIU SP, LU H, WANG A, CHEN XJ, YANG HM, LIANG XL, SUN R, WEN XL, LI QL. Sulfur and nitrogen co-metabolism during composting: a role of sodium sulfide in regulating microbial communities and functional genes[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2024, 12(2): 112431.
- [36] AWASTHI MK, LIU H, LIU T, AWASTHI SK, ZHANG ZQ. Effect of biochar addition on the dynamics of antibiotic resistant bacteria during the pig manure composting[J]. *The Science of the Total Environment*, 2022, 814: 152688.
- [37] CUI H, OU Y, WANG LX, YAN BX, GUAN FC. Phosphorus functional microorganisms and genes: A novel perspective to ascertain phosphorus redistribution and bioavailability during copper and tetracycline-stressed composting[J]. *Bioresource Technology*, 2023, 371: 128610.
- [38] XIE GX, KONG XL, KANG J, SU N, FEI JC, LUO GW. Fungal community succession contributes to product maturity during the co-composting of chicken manure and crop residues[J]. *Bioresource Technology*, 2021, 328: 124845.
- [39] WANG J, JIAO M, ZHAN X, HU C, ZHANG Z. Humification and fungal community succession during pig manure composting: Membrane covering and mature compost addition[J]. *Bioresource Technology*, 2024, 393: 130030.
- [40] YU XL, LI XL, REN CQ, WANG JC, WANG CB, ZOU YK, WANG XF, LI GY, LI QF. Co-composting with cow dung and subsequent vermicomposting improve compost quality of spent mushroom[J]. *Bioresource Technology*, 2022, 358: 127386.
- [41] XIE YQ, ZHOU LY, DAI JP, CHEN J, YANG XP, WANG XW, WANG ZF, FENG L. Effects of the C/N ratio on the microbial community and lignocellulose degradation, during branch waste composting[J]. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 2022, 45(7): 1163-1174.
- [42] HERNÁNDEZ-LARA A, ROS M, CUARTERO J, BUSTAMANTE MÁ, MORAL R, ANDREU-RODRÍGUEZ FJ, FERNÁNDEZ JA, EGEGILABERT C, PASCUAL JA. Bacterial and fungal community dynamics during different stages of agro-industrial waste composting and its relationship with compost suppressiveness[J]. *Science of The Total Environment*, 2022, 805: 150330.
- [43] WEI YQ, ZHAO Y, LU Q, CAO ZY, WEI ZM. Organophosphorus-degrading bacterial community during composting from different sources and their roles in phosphorus transformation[J]. *Bioresource Technology*, 2018, 264: 277-284.
- [44] XU ZY, HU ZH, JIAO S, BELL SM, XU Q, MA LL, CHEN J. Depth-dependent effects of tree species identity on soil microbial community characteristics and multifunctionality[J]. *The Science of the Total Environment*, 2023, 878: 162972.
- [45] XU ZM, LI RH, LIU T, ZHANG GH, WU SH, XU KL, ZHANG YB, WANG Q, KANG J, ZHANG ZQ, QUAN FS, ZHANG Y. Effect of inoculation with newly isolated thermotolerant ammonia-oxidizing bacteria on nitrogen conversion and microbial community during cattle manure composting[J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 317: 115474.
- [46] GEORGE TS, HINSINGER P, TURNER BL. Phosphorus in soils and plants – facing phosphorus scarcity[J]. *Plant and Soil*, 2016, 401(1/2): 1-6.
- [47] MARRA LM, de OLIVEIRA-LONGATTI SM, SOARES CRFS, OLIVARES FL, de SOUZA MOREIRA FM. The amount of phosphate solubilization depends on the strain, C-source, organic acids and type of phosphate[J]. *Geomicrobiology Journal*, 2019, 36(3): 232-242.
- [48] AMADO IR, VÁZQUEZ JA, PASTRANA L, TEIXEIRA JA. Microbial production of hyaluronic acid from agro-industrial by-products: Molasses and corn steep liquor[J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2017, 117: 181-187.