

接种外源微生物对堆肥中重金属铜锌铅形态变化的影响

郝丽娜 常瑞雪 李彦明* 汪杰 陈清 赵恒宇

(中国农业大学 资源与环境学院/农田土壤污染防控与修复北京市重点实验室,北京 100193)

摘要 为探明外源微生物对堆肥重金属有效性的影响,以猪粪和玉米秸秆为堆肥原料,在初始碳氮比为 25 与含水量 60%的条件下,利用自制密闭式堆肥反应器研究分别接种 5%长枝木霉 *Trichoderma longibrachiatum*(T1)、解淀粉芽孢杆菌 *Bacillus amylolyticus*(T2)和酿酒酵母 *Saccharomyces cerevisiae*(T3)的 3 种外源微生物菌剂对堆肥中重金属铜锌铅形态变化的影响。结果表明:接种外源微生物可分别提前 3、3 和 1 d 使堆肥温度升至 60 °C 并延长高温期,长枝木霉和解淀粉芽孢杆菌可有效缩短堆肥的腐熟过程;外源微生物可钝化堆肥产品中的重金属 Cu、Zn 和 Pb,解淀粉芽孢杆菌对 Cu、Zn 和 Pb 的钝化效果都较好,相对钝化率分别为 80.96%、5.02%和 41.00%;长枝木霉对 Cu 和 Pd 的钝化效果较好,相对钝化率分别为 67.09%和 5.01%;酿酒酵母对 Cu 和 Pb 的钝化效果较好,相对钝化率分别为 64.46%和 11.51%。选择适宜的外源微生物接种菌剂,可同步实现堆肥品质提升和重金属钝化。

关键词 微生物;堆肥;重金属;形态变化;钝化

中图分类号 X71

文章编号 1007-4333(2020)05-0122-08

文献标志码 A

Effects of exogenous inoculums on the fractions variation of heavy metals copper, zinc and lead in compost

HAO Lina, CHANG Ruixue, LI Yanming*, WANG Jie, CHEN Qing, ZHAO Hengyu

(Beijing Key Laboratory for Prevention and Control of Farmland Soil Pollution, College of Resources and Environment, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract To investigate the effects of exogenous microorganisms on the fractions variation of heavy metals during composting, this study carried out a composting experiment in a self-made closed composting reactor. The inoculums of *Trichoderma longibrachiatum* (T1), *Bacillus amylolyticus* (T2) and *Saccharomyces cerevisiae* (T3) were used in the raw materials pig manure and corn straw with the initial C/N ratio of 25 and water content of 60%. The results showed that, inoculums shortened the time by 3, 3 and 1 days to reach 60 °C, and prolonged the duration time of high temperature. *T. longibrachiatum* and *B. amylolyticus* shortened the maturity process by 14 days compared with the control. At the same time, the inoculums reduced the effectiveness of heavy metals Cu, Zn and Pb in compost products, among which *B. amylolyticus* had the best effectiveness on reduction of the availability of Cu, Zn and Pb, with the relative passivation rates 80.96%, 5.02% and 41.00%, respectively. *T. longibrachiatum* reduced the effectiveness of Cu and Pb, with the relative passivation rates 67.09% and 5.01%, respectively. While *S. cerevisiae* had the relative passivation rates of 64.46% and 11.51% respectively. Therefore, suitable inoculants could improve the quality of compost and passivate the heavy metal availability simultaneously.

Keywords microorganisms; composting; heavy metals; morphological change; passivation

堆肥化处理是有机固体废物在多种微生物作用下将原料中不稳定有机类物质转化为稳定腐殖质类

物质的过程,也是当前我国养殖粪污综合利用所采用的主要技术途径^[1-2],其中残留的重金属已成为限

收稿日期:2019-08-04

基金项目:国家大宗蔬菜产业技术体系岗位科学家(CARS-23-B16)

第一作者:郝丽娜,硕士研究生,E-mail:530975339@qq.com

通讯作者:李彦明,副教授,主要从事废弃物处理与资源化方向研究,E-mail:liyiming@cau.edu.cn

制畜禽粪便肥料化循环安全利用的主要因素^[3]。残留重金属有机固体废弃物经堆肥后,由于有机物质大量降解而导致重金属相对浓缩^[4-5],但作物对堆肥产品中重金属的吸收比例显著降低^[6-7]。为强化堆肥过程对重金属的钝化作用,利用外源物质降低堆肥重金属有效性是当前的研究热点,如生物炭和粉煤灰等^[8-9]。

堆肥接种剂和功能微生物肥料是我国当前发展迅速的一个领域。在堆肥过程中添加微生物菌剂多集中在促进有机物快速降解、加快堆肥进程和抗病方面,其中涉及到微生物种类主要由木霉属、芽孢杆菌属和酵母属^[10]。木霉属微生物通常被用作拮抗病原菌的功能菌,比如接种木霉可以有效延长牛粪堆肥的高温期和减少氮素损失,还可拮抗辣椒疫霉^[11-12]。用于堆肥的芽孢杆菌属微生物多属于嗜热菌,是高温好氧堆肥中的优势菌,比如解淀粉芽孢杆菌可高效分解堆肥原料中的难降解的乙基纤维素,促进堆肥升温,其堆肥产品还可防控草莓土传病害^[13-14]。酵母菌通常由于其发酵作用被添加在EM菌剂、VT菌剂等接种剂中,酵母菌群在堆肥中可以促进堆肥发酵,还可以合成生物活性物质,从而为其他的菌群提供养分^[15]。在污水体系中,Siddiquee等^[16]研究发现木霉对Cu和Pb具有很好的耐受性,

并且具有很好的吸收能力,Allievi等^[17]研究发现芽孢杆菌的表层蛋白可以对Zn产生吸附作用,Machado等^[18]研究发现酿酒酵母活细胞和死细胞的形态及表面官能团没有明显变化,死细胞仍然对Cu有很好的吸附效果。但是目前在堆肥体系中微生物对重金属作用的研究鲜见报道,此方向具有很好的研究价值。本研究依据前人的研究,采用室内模拟堆肥试验的方法,探究接种外源微生物长枝木霉(*Trichoderma longibrachiatum*)、解淀粉芽孢杆菌(*Bacillus amyloliquefaciens*)和酿酒酵母(*Saccharomyces cerevisiae*)对堆肥重金属铜锌铅形态的影响,旨在为优化堆肥工艺和畜禽粪便安全利用提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 材料

堆肥试验所用的猪粪取自北京市昌平区某规模化养猪场,玉米秸秆取自中国农业大学上庄试验站,经自然风干后粉碎至1 cm以下备用,供试猪粪与玉米秸秆的理化性状如表1所示;所用的微生物菌剂长枝木霉和解淀粉芽孢杆菌由山东金正大生态工程股份有限公司提供,酿酒酵母为市售食品级粉状菌剂(由安琪酵母股份有限公司生产)。

表1 供试猪粪与玉米秸秆的理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of swine manure and maize straw

物料 Material	含水率/% Moisture	$\omega(\text{N})/\%$ Nitrogen	pH	EC/ (mS/cm)	含量/(mg/kg) Content		
					Cu	Zn	Pb
猪粪	59.98	2.75	7.53	4.31	165.00	1 369.73	2.08
玉米秸秆	4.97	0.82	6.80	3.65	27.75	46.68	16.07

1.2 试验操作与样品采集

按照混合物料初始含水率60%左右和碳氮比25左右的要求,将6 kg猪粪和2 kg玉米秸秆和2.4 L水混合均匀后平均分4份,设置不接种外源微生物的对照处理(CK)和按照湿重比5%分别接种长枝木霉(T1)、解淀粉芽孢杆菌(T2)和酿酒酵母(T3)处理,同时采集混合物料的样品以备后续测定。将所有处理充分混合均匀等重加入8 L堆肥发酵罐,连接好堆肥反应器系统的传感器和管路,堆肥发酵罐底部和顶部分别置有进气口和出气口,均与硅胶管相连。进气口与气泵相连,对混合物料进行

曝气,以保证整个过程处于好氧反应,每个发酵罐曝气量由转子流量计控制,调节曝气量为200 mL/min。进气口连接NaOH和硼酸溶液的吸收瓶,出气口分别连接2%硼酸溶液和1 mol/L NaOH吸收瓶。整个堆肥反应器系统的构成如图1所示。

之后分别在第3、7、12、19和26 d进行翻堆取样,样品采集采用多点采样法收集样品,然后用四分法取样,每次采集2份样品,一份立即进行冷冻处理($< -18\text{ }^{\circ}\text{C}$),用于测定pH、发芽指数(GI值)等指标;另一份经自然风干后,粉碎至100目备用,用于测定物料全碳、重金属总量和形态等指标。

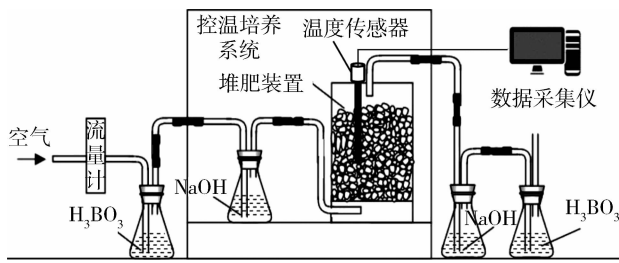


图1 堆肥装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of compost plant

1.3 分析方法

温度传感器为 Pt-100, 采集频率为每 1 h 记录 1 次数据; CO₂ 累积量采用氢氧化钠吸收法, 吸收液由 0.1 mol/L 的稀硫酸溶液滴定; 物料有机质含量采用灼烧法测定^[19]; GI 值测定如下: 称取 10 g 鲜样于 250 mL 塑料瓶中, 按照固液比为 1:10, 加 100 mL 去离子水, 在恒温摇床上 (25 °C 和 200 r/min) 震荡 30 min, 过滤得到浸提液, 然后吸取 5 mL 于垫有定量滤纸的直径为 9 cm 的培养皿中, 均匀的撒 10 个水萝卜种子, 在避光和 25 °C 的条件下培养 48 h 后测定, 以加去离子水的培养为对照。GI (%) 参照如下计算公式计算:

$$GI = \frac{\text{浸提液发芽种子数} \times \text{浸提液种子总根长}}{\text{对照发芽种子数} \times \text{对照种子总根长}} \times 100\%$$

重金属总量采用王水提取法提取消解, 重金属形态采用改进的 BCR 连续提取法^[20], 主要包含可交换态、可还原态、可氧化态和残渣态。重金属含量使用电感耦合等离子体质谱法 (ICP-MS) 测定。重金属相关计算公式如下:

$$\text{重金属各形态分配率} = \frac{\text{重金属各形态含量}}{\text{重金属总量}} \times 100\%$$

$$\text{相对钝化率} =$$

$$\frac{\text{堆肥前重金属有效态分配率} - \text{堆肥后有效态分配率}}{\text{重金属前有效态分配率}} \times 100\%$$

2 结果与分析

2.1 不同处理对堆肥理化性质的影响

在堆肥过程中, 微生物降解有机物会伴随热量产生, 因此堆体温度的高低与微生物的新陈代谢作用密切相关^[10]。由图 2(a) 可知, 4 个处理温度达到 60 °C 以上的时间分别是第 4、1、1 和 3 天, 即接种外

源微生物有效缩短了堆体进入高温期的时间, 且接种长枝木霉或解淀粉芽孢杆菌缩短了 3 d, 接种酿酒酵母可缩短 1 d。《GB 7959—2012 粪便无害化卫生标准》^[21] 中规定畜禽粪便堆肥温度在 50~55 °C 以上持续 5~7 d 即可达到无害化, 本试验 4 个堆肥处理 55 °C 以上高温期分别为 12、13、13 和 18 d, 均已达到无害化标准, 且在堆肥中接种微生物延长了高温期。在微生物降解堆肥有机质的过程中会利用环境中的 O₂, 释放 CO₂ 和水。由图 2(b) 可知, 堆肥第 2~13 天为 CO₂ 释放的高峰期, 这也与堆肥温度变化趋势大致相同。由图 2(c) 可知, 各堆肥处理的有机质含量均随堆肥时间推移逐渐减少, CK、T1、T2 和 T3 处理的有机质含量较各自初始值分别减少了 11.16%、15.38%、18.23% 和 15.15%, 即 T2 中添加解淀粉芽孢杆菌后更利于有机质的降解。由图 2(d) 可知, 接种微生物的处理 GI 值均在堆肥 12 d 率先超过 80%, CK 处理在第 26 天超过 80%, 表明接种长枝木霉和解淀粉芽孢杆菌比对照提前 14 d 实现堆肥腐熟。在堆肥 26 d 结束时, 各处理的 GI 值为 92.11%~107.63%, 排序为 T3 > T2 ≈ T1 ≈ CK, 表明堆肥腐熟度极高。

2.2 铜 (Cu) 的形态变化

由图 3(a) 可知, 各处理的可还原态 Cu 分配率由堆肥前的 38.19% 分别降至 11.86%、10.00%、4.98% 和 11.04%; 相对应的 Cu 可氧化态分配率由堆肥前的 30.79% 增为 65.39%、59.05%、75.73% 和 60.17%, 这表明堆肥后 Cu 向更稳定的形态发生转变。将 Cu 可交换态和可还原态分配率加和为有效态来看, 由图 3(b) 可知, 有效态相对钝化率为 T2 (80.96%) > T1 (67.46%) > T3 (64.08%) > CK (63.61%), 这表明与对照相比, 接种微生物可以使得 Cu 的有效性进一步降低, 且解淀粉芽孢杆菌钝化效果 > 长枝木霉 > 酿酒酵母。

2.3 锌 (Zn) 的形态变化

由图 4(a) 可知, Zn 在堆肥前后均以可交换态和可还原态为主, 二者之和占比达 75.87%~81.51%, 而可氧化态和残渣态占比较低, 表明堆肥中 Zn 的有效性较高。经过堆肥后各处理 Zn 可交换态分配率变化较为明显, 从堆肥前的 25.30% 分别降至 11.27%、10.81%、9.26% 和 9.54%, 从 Zn 的可交换态相对钝化率来看, T2 (63.38%) > T3 (62.28%) > T1 (57.27%) > CK (55.45%)。由图 4(b) 可知, 将 Zn 可交换态和可还原态分配率之

和作为有效态来比较相对钝化率, T2(5.02%) > T3(0.10%) > T1(-0.30%) > CK(-2.05%), 这表

明较对照而言, 在堆肥中接种解淀粉芽孢杆菌和酿酒酵母可以进一步降低 Zn 的有效性。

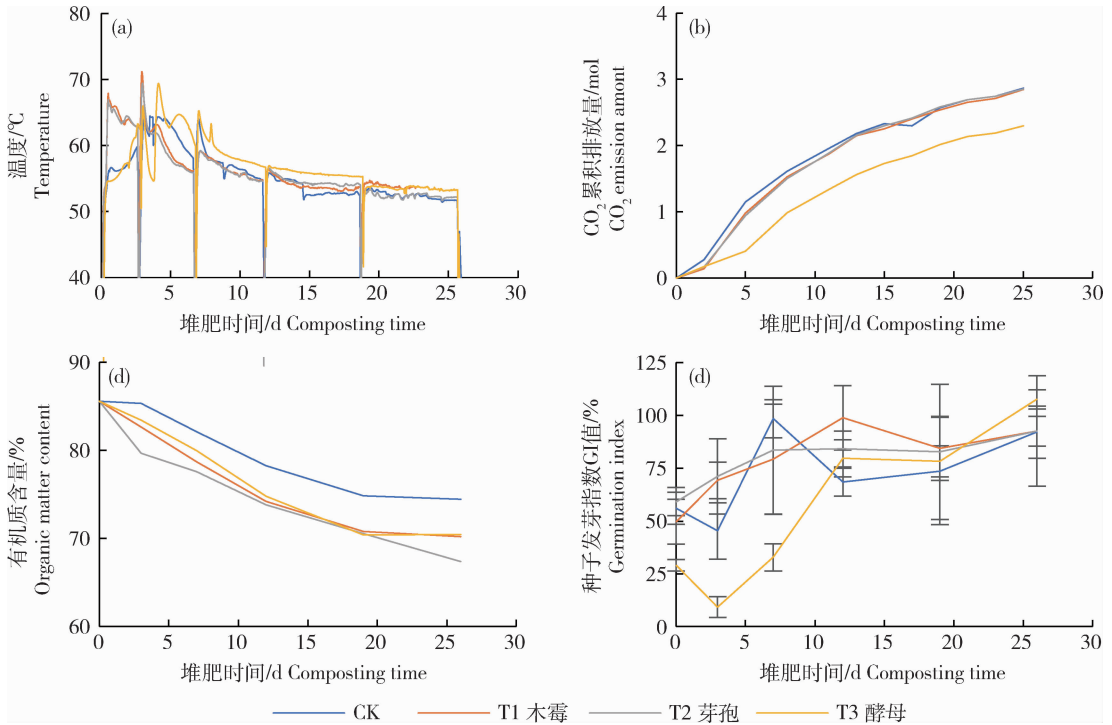


图 2 温度 (a)、CO₂ 累积排放量 (b)、有机质含量 (c)、GI (d) 变化

Fig. 2 Changes of composting temperature (a), cumulative CO₂ emissions (b), Organic matter (c) and GI (d)

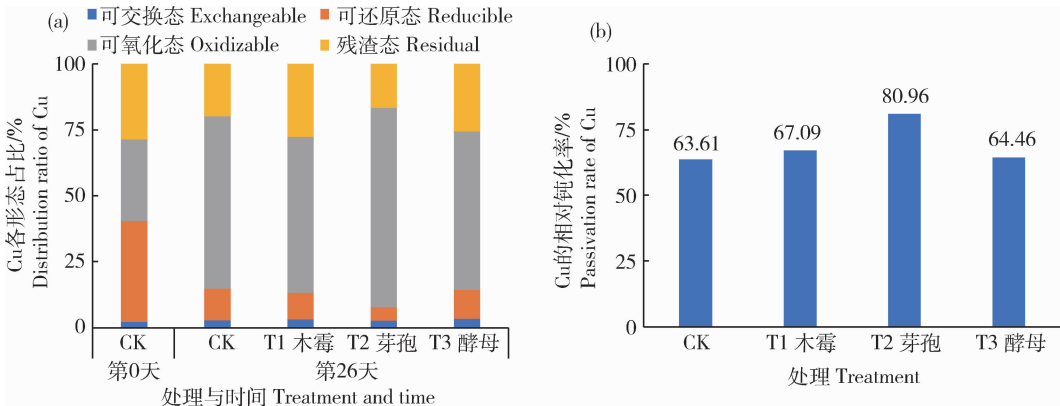


图 3 堆肥前后 Cu 各形态变化 (a) 及相对钝化率 (b)

Fig. 3 Cu morphology changes before and after compost (a), relative passivation rate of Cu after compost (b)

2.4 铅 (Pb) 的形态变化

由图 5(a) 可知, 与对照相比, 接种长枝木霉后可氧化态分配率提高了 30.49%, 接种解淀粉芽孢杆菌堆肥后可还原态 Pb 分配率降低了 40.89%, 接种酿酒酵母后 Pb 残渣态分配率提高了 56.00%。由图 5(b) 可知将 Pb 可交换态和可还原态分配率之和作为有效态来比较 Pb 的相对钝化率, 可以得出:

T2(41.00%) > T3(11.51%) > T1(5.01%) > CK(2.54%), 这表明与对照相比, 接种微生物可以进一步降低 Pb 的有效性, 并且接种解淀粉芽孢杆菌的效果最佳。

3 讨论

重金属的可交换态、可还原态、可氧化态和残渣

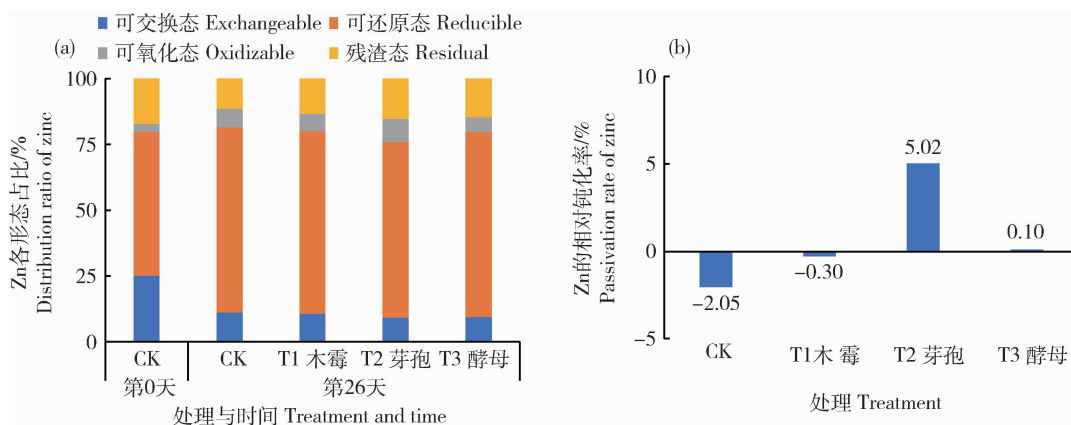


图4 堆肥前后 Zn 各形态变化(a)及相对钝化率(b)

Fig. 4 Zn morphology changes before and after compost (a) and relative passivation rate of Zn after compost (b)

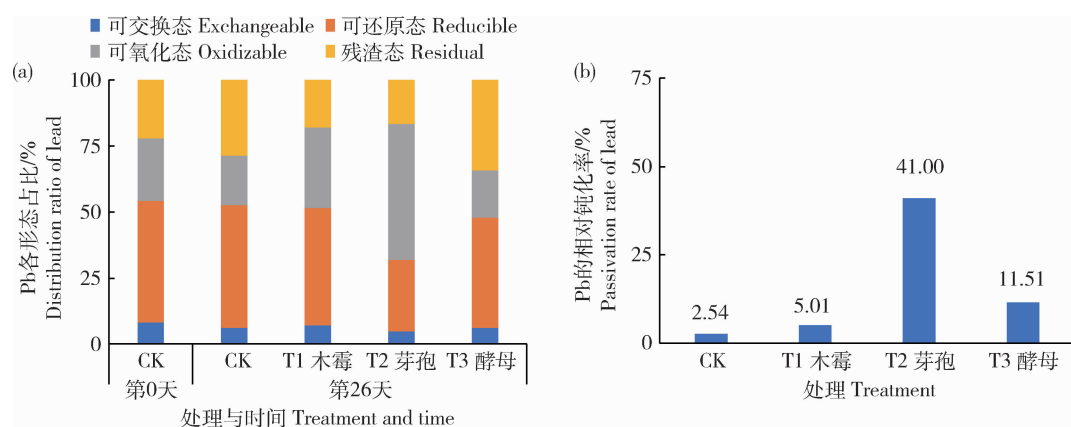


图5 堆肥前后 Pb 各形态变化(a)及相对钝化率(b)

Fig. 5 Pb morphology changes before and after compost (a) and relative passivation rate of Pb after compost (b)

态这四种形态的有效性依次降低,因此本研究主要通过对比堆肥前后可交换态和可还原态分配率变化来判断重金属钝化效果^[22]。由图2 温度、CO₂ 累积排放量、有机质含量和 GI 值数据可知,在猪粪和玉米秸秆的堆肥中分别接种长枝木霉、解淀粉芽孢杆菌、酿酒酵母后加速了堆体升温、促进了有机质的降解并且加快了堆肥腐熟,这是因为接种外源微生物后提高了堆肥体系中微生物的活性,优化了微生物的种群结构^[23],且综合作用效果解淀粉芽孢杆菌>长枝木霉>酿酒酵母,这也与重金属铜锌的钝化效果一致,加入解淀粉芽孢杆菌的处理对铜锌铅的形态变化均表现出明显效果,加入长枝木霉和酿酒酵母对铜锌铅的作用效果虽不及解淀粉芽孢杆菌,但也优于对照组。因此,堆肥体系中微生物的活性高低可能会与重金属的钝化有很大关联。

这是由于微生物细胞壁表面的脂多糖、肽聚糖、

膜蛋白、脂磷壁酸和磷壁酸等结构使得其具有了羧基、羟基、氨基、磷基和硫基等官能团^[24-25]。微生物细胞表面的羧基和羟基等活性官能团上的 N、O 和 S 等原子利用孤对电子与 Cu²⁺、Zn²⁺ 和 Pb²⁺ 发生配位发生络合和螯合反应^[26-28],另外细胞壁表面的硫基和磷酸基可以和重金属离子结合形成沉淀^[29],并且这种微生物产生的化学作用不会随着微生物的凋亡而结束,细胞凋亡后微生物细胞壁表面的官能团也不会被破坏。Carrie 等^[30]指出木霉可以利用氨基、硫基、羰基与 Cu 和 Pb 发生络合、螯合反应,Allievi 等^[17]研究发现芽孢杆菌表层蛋白对 Zn²⁺ 有很好的吸附作用,Machado 等^[18]指出酿酒酵母对 Cu 有很好的络合作用。这均与本研究结果一致,长枝木霉对 Cu 和 Pb 有较好的钝化作用,解淀粉芽孢杆菌对 Zn 表现出很好的钝化作用,酿酒酵母对 Cu 的钝化效果较好。另外,微生物生命活动过程中会

分泌胞外聚合物, 这些物质也是大分子的蛋白质多糖化合物, 可以和重金属离子发生络合、螯合反应^[31]。也有研究指出生防芽孢杆菌可以分泌铁螯合酶, 而这种铁螯合酶也可以结合 Zn^{2+} ^[32], 这也可能是本研究中解淀粉芽孢杆菌对 Zn 有较好钝化效果的原因。

但是由于微生物的生命活动和细胞的降解, 微生物对重金属产生的作用仅是相对的钝化, 并非绝对钝化, 待有机肥施用到土壤中, 经历漫长岁月后重金属是否依然被固定, 这值得进一步研究。

4 结 论

1) 在猪粪和玉米秸秆堆肥体系中在接种外源微生物对堆肥理化性质有了明显改善。首先接种外源微生物可提前 3、3、1 d 使堆肥温度上升至 60 °C 并延长高温期; 其次接种微生物后堆肥体系中有机质的降解量明显加大; 另外接种长枝木霉和解淀粉芽孢杆菌还明显缩短了腐熟过程。

2) 添加外源微生物后明显降低了重金属 Cu、Zn 和 Pb 的有效性。3 种微生物中, 解淀粉芽孢杆菌对 Cu、Zn 和 Pb 的有效性降低效果都较好。相对钝化率分别为 80.96%、5.02% 和 41.00%; 长枝木霉对 Cu 和 Pd 的有效性降低效果较好, 相对钝化率分别为 67.09% 和 5.01%; 酿酒酵母对 Cu 和 Pb 的有效性降低效果较好, 相对钝化率分别为 64.46% 和 11.51%。因此可以针对不同需求选择微生物。

参考文献 References

[1] 汪冬梅. 畜禽粪便资源及其利用[J]. 中国牛业科学, 2018, 44(5): 51-54
Wang D M. Utilization of livestock and poultry excrement resourc[J]. *China Cattle Science*, 2018, 44(5): 51-54 (in Chinese)

[2] 臧一天, 邴珊, 盛孝维, 唐夏军, 吴红翔, 舒邓群. 畜禽养殖粪便资源化常用技术[J]. 江西畜牧兽医杂志, 2019(1): 36-38
Zang Y T, Bing S, Sheng X W, Tang X J, Wu H Y, Shu D Q. Common technologies for recycling manure from livestock and poultry breeding[J]. *Jiangxi Journal of Animal Husbandry and Veterinary Science*, 2019(1): 36-38 (in Chinese)

[3] 严莲英, 刘桂华, 秦松, 胡岗, 范成五. 畜禽粪便堆肥中抗生素和重金属残留及控制研究进展[J]. 江西农业学报, 2016, 28

(9): 90-94

Yan L Y, Liu G H, Qin S, Hu G, Fan C W. Research progress in residue and control of antibiotics and heavy metals in animal manure [J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2016, 28(9): 90-94 (in Chinese)

[4] 张树清, 张夫道, 刘秀梅, 王玉军, 张建峰. 高温堆肥对畜禽粪中抗生素降解和重金属钝化的作用[J]. 中国农业科学, 2006, 39(2): 337-343
Zhang S Q, Zhang F D, Liu X M, Wang Y J, Zhang J F. Degradation of antibiotics and passivation of heavy metals during thermophilic composting process[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2006, 39(2): 337-343 (in Chinese)

[5] Zhou H B, Meng H B, Zhao L X, Shen Y J, Hou Y Q, Cheng H S, Song L Q. Effect of biochar and humic acid on the Copper, Lead, and Cadmium passivation during composting [J]. *Bioresource Technology*, 2018, 258: 279-286

[6] 李国学, 孟凡乔, 姜华, 史亚娟. 添加钝化剂对污泥堆肥处理中重金属 (Cu; Zn; Mn) 形态影响[J]. 中国农业大学学报, 2000, 5(1): 105-111
Li G X, Meng F Q, Jiang H, Shi Y J. Studies on the effect of stabilizing materials to the status of heavy metals (Cu, Zn, Mn) during composting of sewage sludge[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2000, 5(1): 105-111 (in Chinese)

[7] 李荣华, 张广杰, 秦睿, 李晓龙, 肖然, 沈锋, 张增强. 添加钝化剂对猪粪好氧堆肥过程中理化特性的影响[J]. 环境科学学报, 2012, 32(10): 2591-2599
Li R H, Zhang G J, Qin R, Li X L, Xiao R, Shen F, Zhang Z Q. Influence of heavy metal passive agents on the compost physicochemical properties during the swine manure composting[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, 32(10): 2591-2599 (in Chinese)

[8] 候月卿, 沈玉君, 刘树庆. 我国畜禽粪便重金属污染现状及其钝化措施研究进展[J]. 中国农业科技导报, 2014, 16(3): 112-118
Hou Y Q, Shen Y J, Liu S Q. Present Status of Heavy Metal Pollution from Livestock Waste and Progress on Passivation Measures[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2014, 16(3): 112-118 (in Chinese)

[9] 王建才, 朱荣生, 王怀中, 呼红梅, 齐波, 庞丽丽, 黄保华. 畜禽粪便重金属污染现状及生物钝化研究进展[J]. 山东农业科学, 2018, 50(10): 162-167
Wang J C, Zhu R S, Wang H Z, Hu H M, Qi B, Pang L L, Huang B H. Present status of heavy metal pollution from

- livestock manure and research progress of its biological passivation[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2018, 50(10): 162-167 (in Chinese)
- [10] 李季, 彭生平. 堆肥工程实用手册. 第2版[M]. 北京: 化学工业出版社, 2011: 91
- Li J, Peng S P. *Practical Manual for Composting Engineering. 2nd Edition* [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2011: 91 (in Chinese)
- [11] 马丽红, 黄懿梅, 李学章, 祁金花, 赵振振, 李萍. 两种添加剂对牛粪堆肥中氮转化及相关微生物的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28(1): 76-82
- Ma L H, Huang Y M, Li X Z, Qi J H, Zhao Z Z, Li P. Respon of the spectral reflectance to total N and NO_3^- -N of winter wheat[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2010, 28(1): 76-82 (in Chinese)
- [12] 刘青, 李升, 梁才康, 张红辉, 吴静, 王嘉福, 冉雪琴. 贵州地区木霉菌分离鉴定及对辣椒疫霉的拮抗作用[J]. 微生物学通报, 2019, 46(4): 741-751
- Liu Q, Li S, Liang C K, Zhang H H, Wu J, Wang J F, Ran X Q. Isolation and identification of *Trichoderma* spp against *Phytophthora capsici*[J]. *Microbiology China*, 2019, 46(4): 741-751 (in Chinese)
- [13] 张海滨, 孟海波, 沈玉君, 赵立欣. 好氧堆肥微生物研究进展[J]. 中国农业科技导报, 2017, 19(3): 1-8
- Zhang H B, Meng H B, Shen Y J, Zhao L X. Research progress on microbial aerobic composting [J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2017, 19(3): 1-8 (in Chinese)
- [14] 邱光, 张新风, 李建伟, 符泽, 陆凡. 解淀粉芽孢杆菌 B1619 对草莓保苗促生效果[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(4): 98-100
- Qiu G, Zhang X F, Li J W, Fu Z, Lu F. Effect of *Bacillus amylolytica* B1619 on strawberry seedling preservation[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2019, 47(4): 98-100 (in Chinese)
- [15] 何勤勤, 庾富文, 周俊辉. EM 菌在有机固体废物堆肥中的应用[J]. 仲恺农业工程学院学报, 2017, 30(1): 67-71
- He Q Q, Yu F W, Zhou J H. Application of effective microorganism on organic solid waste composting[J]. *Journal of Zhongkai University of Agriculture and Engineering*, 2017, 30(1): 67-71(in Chinese)
- [16] Siddiquee S, Aishah S N, Azad S A, Shafawatil S N, Naher L. Tolerance and biosorption capacity of Zn^{2+} , Pb^{2+} , Ni^{3+} and Cu^{2+} by filamentous fungi (*Trichoderma harzianum*, *T. aureoviride* and *T. virens*) [J]. *Advances in Bioscience & Biotechnology*, 2013, 4(4): 570-583
- [17] Allievi M, Florencia S, Mariano P A, Mercedes P M, Monica R S, Carmen S R. Metal biosorption by surface-layer proteins from *Bacillus* species[J]. *Journal of Microbiology & Biotechnology*, 2011, 21(2): 147
- [18] Machado M D, Janssens S, Soares H M, Soares E V. Removal of heavy metals using a brewer's yeast strain of *Saccharomyces cerevisiae*: Advantages of using dead biomass [J]. *Journal of Applied Microbiology*, 2009, 106(6): 13
- [19] 李林, 李捷, 陈俊英, 蔡耀辉. 灼烧法与化学法测定土壤有机质对比与拟合分析[J]. 安徽农业科学, 2015(26): 81-83
- Li L, Li J, Chen J Y, Cai Y H. Comparison and fitting analysis of soil organic matter by burning method and chemical method[J]. *Journal of Anhui Agricultural Science*, 2015(26): 81-83 (in Chinese)
- [20] Rauret G, López-Sánchez J F, Sahuquillo A, Rubio R, Davidson C, Ureb B, Quevauville P. Improvement of the BCR three step sequential extraction procedure prior to the certification of new sediment and soil reference materials[J]. *Journal of Environmental Monitoring*, 1999, 1(1): 57-61
- [21] GB 7959-2012. 粪便无害化卫生要求[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013
- GB 7959-2012. Hygienic requirements for harmless disposal of night soil [S]. Beijing: China Standards Press, 2013 (in Chinese)
- [22] 李冉, 孟海波, 赵立欣, 周海滨, 张曦, 沈玉君. 微生物和生物炭联用对猪粪堆肥后重金属 Pb 和 Cd 的钝化效果[J]. 农业工程学报, 2018, 34(23): 172-177
- Li R, Meng H B, Zhao L X, Zhou H B, Zhang X, Shen Y J. Immobilization effect of Pb and Cd during composting of pig manure by combination of biochar and microbial agent[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(23): 172-177 (in Chinese)
- [23] 李国平, 杨鹭生, 王宇晴, 赵林艳, 汤婉君. 不同微生物菌剂对芒萁秸秆腐熟过程中腐殖质构成的影响[J]. 热带作物学报, 2015, 36(4): 719-723
- Li G P, Yang L S, Wang Y Q, Zhao L Y, Tang W J. Effects of several microorganisms on humus formation in stalk decomposition of *dicanopteris dichotoma*[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2015, 36(4): 719-723 (in Chinese)
- [24] 尹华, 陈炼娜, 叶少锦, 彭辉, 唐少宇. 微生物吸附剂[M]. 北

- 京：科学出版社，2015：84-87
- Yin H, Chen S N, Ye S J, Peng H, Tang S Y. *Microbial Adsorbent* [M]. Beijing: Science Press, 2015: 84-87 (in Chinese)
- [25] 尹敬群, 田君. 微生物吸附金属离子研究与发展[J]. 生物化工, 2016(1): 65-68
- Yin J Q, Tian J. Research and development on biosorption of metal ions[J]. *Biological Chemical Engineering*, 2016(1): 65-68 (in Chinese)
- [26] 刘瑞霞, 潘建华, 汤鸿霄, 劳伟雄. Cu(II)离子在 *Micrococcus luteus* 细菌上的吸附机理[J]. 环境化学, 2002, 21(1): 50-55
- Liu R X, Pan J H, Tang H X, Lao W X. Biosorption mechanism of Cu(II) on *Micrococcus luteus* biomass[J]. *Environmental Chemistry*, 2002, 21(1): 50-55 (in Chinese)
- [27] 黄丹莲, 曾光明, 黄国和, 胡天觉, 蒋晓云, 冯冲凌, 陈耀宁. 接种白腐真菌堆肥处理含 Pb 垃圾[J]. 环境科学, 2006, 27(1): 175-180
- Huang D L, Zeng G M, Huang G H, Hu T J, Jiang X Y, Feng C L, Chen Y N. Application of white-rot fungi in composting lead-contaminated waste [J]. *Environmental Science*, 2006, 27(1): 175-180 (in Chinese)
- [28] Lu H, Zhang W, Yang Y, Huang X F, Wang S Z, Qiu R L. Relative distribution of Pb²⁺ sorption mechanisms by sludge-derived biochar[J]. *Water Research*, 2012, 46(3): 854-862
- [29] 刘磊, 宋文成. 微生物吸附重金属离子机理研究进展[J]. 安徽农业科学, 2018(5): 15-17
- Liu L, Song W C. Research advance in the mechanism of microbial absorption of heavy metal ions[J]. *Journal of Anhui Agricultural Science*, 2018(5): 15-17 (in Chinese)
- [30] Carrie S F S, Adeline S Y T. FTIR and kinetic modelling of fungal biosorbent *Trichoderma asperellum* for the removal of Pb(II), Cu(II), Zn(II) and Cd(II) from multi-metal solutions [J]. *Desalination and Water Treatment*, 2017, 63: 167-171
- [31] 陈志谊. 芽孢杆菌类生物杀菌剂的研发与应用[J]. 中国生物防治学报, 2015, 31(5): 723-732
- Chen Z Y. Research and Application of Bio-fungicide with *Bacillus* spp [J]. *Chinese Journal of Biological Control*, 2015, 31(5): 723-732 (in Chinese)
- [32] Lecerof D, Fodje M N, Román Alvarez León, Olsson U, Hansson A, Sigfridsson E, Ryde U, Hansson M, Al-Karadaghi S. Metal binding to *Bacillus subtilis* ferrochelatase and interaction between metal sites [J]. *JBIC Journal of Biological Inorganic Chemistry*, 2003, 8(4): 452-458

责任编辑：王燕华