

引用格式: 韩艺杰, 丁昊, 孙向阳, 等. 牛粪添加比例对蘑菇渣蚯蚓堆肥质量的影响[J]. 浙江农林大学学报, 2025, 42(6): 1255–1263. HAN Yijie, DING Hao, SUN Xiangyang, *et al.* Effects of cattle manure proportion on vermicomposting of spent mushroom substrate[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2025, 42(6): 1255–1263.

牛粪添加比例对蘑菇渣蚯蚓堆肥质量的影响

韩艺杰, 丁昊, 孙向阳, 李素艳

(北京林业大学 林学院, 北京 100083)

摘要: 【目的】探究添加不同比例牛粪对蘑菇渣蚯蚓堆肥的影响, 以提高蘑菇渣资源化处理与利用效率。【方法】设置 5 个处理 [蘑菇渣:牛粪 (干质量比)]: T0 (100:0), T1 (100:5), T2 (100:10), T3 (100:15) 和 T4 (100:20), 以不加蚯蚓的纯蘑菇渣堆肥为对照 (ck)。混合堆置处理 14 d 后, 在 T0~T4 中加入 20 条赤子爱胜蚯蚓 *Eisenia foetida* 进行 60 d 蚯蚓堆肥, 测定各处理最终堆肥中蚯蚓生长和繁殖指标、堆肥产物理化性质和发芽指数 (germination index, GI)。【结果】蚯蚓堆肥在促进有机质分解、降低产物碳氮比及提高堆肥的腐熟度方面优于自然堆肥。随着牛粪添加比例增加, 蚯蚓的平均质量、存活率、幼年蚯蚓和蚯蚓卵数量也随之增加。添加牛粪不仅可以促进堆体中有机质的分解, 降低堆体 pH 并提高腐熟程度, 还能增加堆肥产物中的氮、磷、钾等营养元素质量分数。堆肥 60 d, ck 发芽指数为 76.04%, 未达到腐熟标准, 而 T0~T4 处理发芽指数均大于 80%, 其中 T3 处理最高 (98.27%), 继续提高牛粪的添加量会增加堆肥对种子产生毒害的风险。【结论】添加牛粪改良的蘑菇渣蚯蚓堆肥更适宜蚯蚓生长和繁殖, 对废弃物的分解能力及其产物的各项指标均优于普通堆肥。生产中建议添加蘑菇渣:牛粪干质量比为 100:15。图 1 表 6 参 33

关键词: 蘑菇渣; 牛粪; 蚯蚓堆肥; 添加比例; 腐熟度; 发芽指数

中图分类号: S14 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2025)06-1255-09

Effects of cattle manure proportion on vermicomposting of spent mushroom substrate

HAN Yijie, DING Hao, SUN Xiangyang, LI Suyan

(College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: [Objective] To enhance the resource utilization efficiency of spent mushroom substrate, this study investigated the effects of varying cattle manure ratios on vermicomposting performance and compost quality. [Method] Five treatments were established with dry mass ratios of spent mushroom substrate to cattle manure: T0 (100:0), T1 (100:5), T2 (100:10), T3 (100:15), and T4 (100:20), alongside a control group (ck) without earthworms. After 14 days of pre-composting, 20 individuals of *Eisenia foetida* (earthworms) were introduced into T0–T4 treatment for 60 days of vermicomposting. Key parameters including earthworm biomass, survival rate, juvenile/egg counts, physicochemical properties, and germination index (GI) were analyzed. [Result] Vermicomposting significantly outperformed natural composting (ck) in terms of organic matter decomposition, C/N ratio reduction, and compost maturity. The average weight, survival rate, cocoon number, hatching number, and daily reproductive rate of earthworms increased with higher proportions of cattle manure. The addition of cattle manure not only accelerated organic matter decomposition, reduced pH, and enhanced compost maturity, but also significantly increased nutrient contents. After 60 days of composting, the germination index (GI) of ck reached 76.04%, lower than the maturity threshold, whereas T0–T4 treatments exhibited GI values exceeding

收稿日期: 2025-01-19; 修回日期: 2025-06-15

基金项目: 北京市大兴区六合庄林场单位委托项目 (2023HXFWLXY020)

作者简介: 韩艺杰 (ORCID: 0009-0002-2813-2438), 从事土壤生态研究。E-mail: 1486981811@qq.com。通信作者: 孙向阳 (ORCID: 0000-0001-6813-1291), 教授, 博士, 从事土壤生态研究。E-mail: sunxy@bjfu.edu.cn

80%, notably, T3 exhibited optimal GI (98.27%), while further increasing the amount of cattle manure in compost will enhance the risk of phytotoxicity to seeds. [Conclusion] Vermicomposting of spent mushroom substrate amended with cattle manure significantly increases suitability for earthworm growth and reproduction, improves waste decomposition efficiency, and yields products with superior quality indicators compared to conventional composting. The recommended addition ratio in production is 100:15 (spent mushroom substrate : cattle manure, m/m). [Ch, 1 fig. 6 tab. 33 ref.]

Key words: spent mushroom substrate; cattle manure; vermicomposting; addition ratio; compost maturity; germination index

中国是食用菌生产和出口大国, 食用菌产量占世界总产量的 75% 以上, 同时, 蘑菇栽培后的废料蘑菇渣产量巨大, 每年超过 5 800 万 t。大量蘑菇渣若不能妥善处置, 极易造成环境污染和资源浪费^[1]。已有研究将蘑菇渣应用于家畜饲料、食用菌二次栽培和生物质能源领域, 但技术要求较高、处理量低且极易造成二次污染^[2]。堆肥法是目前处理蘑菇渣最常用的方法, 其处理产物可以用作有机肥料、栽培基质、土壤改良剂等^[3]。但传统的自然堆肥方式存在堆肥时间长, 腐熟度低等问题。

蚯蚓堆肥是利用蚯蚓的生态学功能与微生物的协同作用将有机物降解与腐熟的生物处理工艺^[4], 与自然堆肥相比, 蚯蚓堆肥对有机废弃物具有更大的分解潜力。当前, 蚯蚓堆肥已在多种废弃物处理中发挥作用, 如在城市污泥中可有效降低污泥重金属有效性, 在餐厨垃圾中可有效降解油脂和盐分, 在畜禽粪便中可有效减少有害细菌, 在园林废弃物中可加速木质素和纤维素的分解^[5]。但该技术处理效率受环境条件制约, 需严格控制温度、湿度和 pH 等参数, 因此更适用于中小规模分散式处理场景。

蘑菇渣蚯蚓堆肥是蚯蚓通过摄食、排泄活动将蘑菇渣转化为养分丰富的蚯蚓粪的过程, 可显著改善堆肥理化性质, 实现废弃物的高效资源化利用。蘑菇渣富含难降解的木质素和纤维素, 直接用于蚯蚓堆肥可能对蚯蚓生长和繁殖产生不利影响。已有研究表明: 蚯蚓堆肥处理有机废弃物时, 添加牛粪等改良剂能够显著改善堆肥理化性质, 为蚯蚓创造更适宜的生长环境^[6-7], 同时促进畜禽粪便的资源化利用。张婷婷等^[8]研究表明: 蘑菇渣与牛粪的体积配比为 6:2 或 7:1 时, 可代替草炭作为作物育苗的理想复合基质。龚小强等^[9]研究表明: 把牛粪添加到园林绿化废弃物蚯蚓堆肥中的最佳质量配比为 15:85, 其堆肥产品可用于低敏度植物的栽培基质。本研究利用赤子爱胜蚯蚓 *Eisenia foetida* 对蘑菇渣废弃物进行堆肥处理, 探究添加牛粪对蚯蚓堆肥质量的影响, 并对最终产物的理化性质进行分析, 筛选出牛粪在蘑菇渣蚯蚓堆肥中的最佳添加比例, 评估堆肥产品用作农业生产的可能性, 为蘑菇渣的资源化循环利用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

赤子爱胜蚯蚓购自北京大环顺鑫有机肥料厂。挑选生长状况良好, 体型相近的成年蚯蚓。蘑菇渣取自北京市海淀区上庄蘑菇园, 蘑菇栽培料配方(质量分数)为: 玉米芯 48%, 棉籽壳 38%, 麦麸 12%, 石灰 2%; 蘑菇渣风干后粉碎至 1~2 cm 备用。风干牛粪取自北京市通州区潮县镇吉祥养牛场。蘑菇渣与牛粪基本化学性质见表 1。西葫芦 ‘翠玉一号’ *Cucurbita pepo* ‘Cuiyu No.1’ 种子购自北京顺禾源种子销售有限公司, 用于堆肥产物植物毒性测试。

1.2 试验方法

试验于 2024 年在北京林业大学科技股份有限公司的温室大棚进行。共设 5 个处理, 每个处理中,

表 1 蘑菇渣与牛粪的化学性质

Table 1 Chemical properties of spent mushroom substrate and cattle manure

材料	pH	电导率/(mS·cm ⁻¹)	总有机碳/(g·kg ⁻¹)	总氮/(g·kg ⁻¹)	总磷/(g·kg ⁻¹)	总钾/(g·kg ⁻¹)	碳氮比
蘑菇渣	8.47	2.14	412.08	14.61	6.20	10.51	28.21
牛粪	8.22	3.06	281.77	24.34	10.36	7.80	11.58

蘑菇渣干质量为 1 kg, 牛粪按以下不同质量比加入蘑菇渣(干蘑菇渣:牛粪): T0 (100:0)、T1 (100:5)、T2 (100:10)、T3 (100:15) 和 T4 (100:20) 并混匀。不同处理分别取 1 kg (干质量) 混合材料置于长方形塑料容器内(长 38 cm, 宽 28 cm, 高 14 cm)。每组处理重复 3 次; 并设置不含蚯蚓的纯蘑菇渣堆肥处理作为对照(ck)。混合材料预堆肥 14 d 以消除前期材料中有毒物质(如氨气等)对蚯蚓生长的影响^[10]。试验过程中, 控制大棚温度在 25.4~28.7 °C, 控制堆料平均含水率为 60%~70%, 材料每周人工翻动 1 次, 以提高材料透气性和促进其均匀降解。预堆肥结束后每个容器加入 20 条大小均一且带有生殖环的赤子爱胜蚯蚓。在每个容器底部设 4 个直径 1 cm 的小孔用以排除多余水分, 在底部和上方安放 1 mm 孔径的塑料网, 并用橡皮条固定防止蚯蚓逃逸。堆肥试验继续持续 60 d, 定期监测调整温度、湿度, 并记录数据。

1.3 测试指标及方法

1.3.1 蚯蚓生长繁殖的统计 在堆肥试验前后, 分别用称量法对蚯蚓质量进行测定并记录; 堆肥 60 d 后, 人工计数成年蚯蚓数量; 使用塑料网分离出蚯蚓卵和幼蚯蚓, 将分离出的蚯蚓卵和幼蚯蚓分别置于培养皿中, 用放大镜或显微镜观察并计数。蚯蚓的平均质量、存活率和日增殖倍数按照以下公式计算: 蚯蚓平均质量=测定时成蚓总质量/成蚓数; 蚯蚓存活率=测定时成蚓数/初始时成蚓数 $\times 100\%$; 日增殖倍数=测定时蚯蚓总数/(初始时成蚓数 $\times$ 堆肥天数)。其中蚯蚓总数为成蚓数、幼蚓数和蚓茧数之和。

1.3.2 堆肥理化性质的测定 堆肥 pH、电导率(electrical conductance, EC)、总有机碳(total organic carbon, TOC)、全氮(total nitrogen, TN)、全磷(total phosphorus, TP)、全钾(total potassium, TK)、碳氮比(carbon-nitrogen ratio, C/N)、钙(Ca)、镁(Mg)、铁(Fe)、锰(Mn)的测定参照鲍士旦^[11]的方法。将烘干样和去离子水按质量比 1:5 混合后在震荡机上以 150 r $\cdot$ min⁻¹ 震荡 30 min, 静置后取上清液用 pH 计和电导率仪分别测定 pH 和电导率; 总有机碳用重铬酸钾容量法测定; 全氮用半微量开氏法测定; 全磷用钼锑抗比色法测定; 全钾用火焰光度法测定; 钙、镁用原子吸收分光光度法测定; 铁用原子吸收光谱法测定; 锰使用高锰酸钾比色法测定; 重金属铅(Pb)和镉(Cd)采用石墨炉原子吸收分光光度法测定; 铬(Cr)采用火焰原子吸收分光光度法测定; 砷(As)采用二乙基二硫代氨基甲酸银分光光度法测定。

堆肥产物容重、总孔隙度、通气孔隙度和持水力的测定参照龚小强等^[12]方法: 将风干基质加入 200 cm³ 环刀(W_0)中, 记录质量(W_1); 以蒸馏水浸泡 24 h, 记录质量(W_2); 水分自然下沥 4 h 后记录质量(W_3); 之后在 75 °C 条件下烘至恒量, 记录为 W_4 。按下列公式计算: 容重= $(W_4 - W_0) / 200$, g $\cdot$ cm⁻³; 总孔隙度= $(W_2 - W_4) / 200 \times 100\%$; 通气孔隙度= $(W_2 - W_3) / 200 \times 100\%$; 持水力= $(W_3 - W_4) / (W_1 - W_0)$, g $\cdot$ g⁻¹。

1.3.3 发芽指数的测定 在堆肥的第 0、3、6、11、18、25、32、39、46、53、60 天取样。堆肥样品与蒸馏水以质量比 1:10 混合振荡 2 h, 滤出上清液备用, 在 9 cm 培养皿中放入滤纸, 将 20 粒饱满的西葫芦种子整齐摆放在滤纸上, 吸取 5 mL 滤液于培养皿中, 在 25 °C 黑暗条件下的培养箱中培养 48 h。每处理重复 3 次, 以去离子水做空白对照。统计各处理种子的发芽个数和根长。按以下公式计算种子发芽指数(germination rate, GI) = (处理的平均发芽率 $\times$ 处理的平均根长)/(空白的平均发芽率 $\times$ 空白的平均根长) $\times 100\%$ ^[13]。

1.4 数据处理

数据采用 Excel 和 SPSS 18.0 处理。处理间差异用单因素方差分析, 平均值多重比较采用最小显著极差法(LSD 法), 数值为平均值 $\pm$ 标准差。

2 结果与分析

2.1 不同处理对蚯蚓生长繁殖的影响

由表 2 可知: 堆肥 60 d 后, 蚯蚓平均质量随牛粪添加量的增加呈上升趋势, T3 和 T4 处理蚯蚓平均质量差异不显著, T4 处理显著高于其他处理($P < 0.05$); 而蚯蚓存活率、蚓卵数、幼蚓数及日增殖倍数 T0 均显著低于 T1~T4 处理($P < 0.05$)。这表明尽管未添加牛粪的处理(T0)能够维持蚯蚓的生存, 但蚯蚓的生长和繁殖状况远不及添加牛粪的处理(T1~T4)。

2.2 不同处理对蚯蚓堆肥理化性质的影响

2.2.1 不同处理对蚯蚓堆肥化学性质的影响 从表 3 可知: 60 d 堆肥结束后, 各处理 pH 均降低, 均位于 7.05~7.80。其中 T4 处理的 pH 降率最大, ck 降率最小, 分别降低 1.30 和 0.67 个单位。各处理的

表 2 不同处理蚯蚓的生长繁殖

Table 2 Growth and reproduction of earthworms in different treatments

处理	平均质量/g		存活率/%	蚓卵数/个	幼蚓数/条	日增殖倍数
	0 d	60 d				
T0	0.160±0.019 a	0.533±0.048 b	75.6±0.017 c	28.1±0.57 e	7.65±0.33 c	0.042±0.005 e
T1	0.171±0.024 a	0.601±0.074 b	90.0±0.017 b	52.3±0.73 d	16.33±0.85 b	0.074±0.011 d
T2	0.168±0.012 a	0.642±0.039 b	91.7±0.009 b	63.2±0.62 c	17.30±0.61 b	0.084±0.004 c
T3	0.174±0.032 a	0.784±0.051 ab	93.3±0.014 ab	75.5±0.35 b	19.67±0.66 a	0.096±0.005 b
T4	0.154±0.015 a	0.822±0.063 a	96.8±0.021 a	80.3±0.84 a	21.00±0.47 a	0.101±0.007 a

说明：同列不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。

EC 在堆肥结束后均升高，其中 T0 处理 EC 大于 ck，随着牛粪添加量的增加，EC 增率从 T0 的 15.89% 提高到 T4 的 34.32%。各处理 TOC 质量分数在堆肥结束时均下降，降率为 10.57%~23.67%。T0 的 TOC 降率显著高于 ck ($P<0.05$)，TOC 降率随牛粪添加比例增大而提高，T4 处理显著高于 T0 和 T1 处理 ($P<0.05$)。C/N 随牛粪添加量的增加逐渐降低，经过 60 d 堆肥后，所有处理的 C/N 均显著下降，其中 T4 处理的 C/N 降率最大，显著高于 ck ($P<0.05$)，说明蚯蚓堆肥降解效果优于普通堆肥。

表 3 添加牛粪对蚯蚓堆肥效率的影响

Table 3 Effects of cattle manure addition on efficiency of vermicomposting

处理	pH			电导率(EC)/(mS·cm ⁻¹)		
	0 d	60 d	降率/%	0 d	60 d	增率/%
ck	8.47±0.01 a	7.80±0.02 a	7.91±0.53 d	2.14±0.03 a	2.44±0.06 d	14.02±0.62 c
T0	8.47±0.01 a	7.76±0.01 a	8.38±0.49 cd	2.14±0.03 a	2.48±0.03 d	15.89±0.81 c
T1	8.45±0.02 a	7.62±0.03 b	9.82±0.34 c	2.19±0.14 a	2.65±0.12 cd	21.00±0.59 bc
T2	8.42±0.02 a	7.46±0.03 c	11.40±0.38 b	2.24±0.08 a	2.77±0.04 bc	23.66±0.42 bc
T3	8.39±0.03 b	7.27±0.02 d	13.35±0.87 a	2.30±0.05 a	2.96±0.08 b	28.70±0.23 ab
T4	8.35±0.02 c	7.05±0.02 e	15.57±0.75 a	2.36±0.11 a	3.17±0.24 a	34.32±0.48 a

处理	总有机碳(TOC)/(g·kg ⁻¹)			碳氮比(C/N)		
	0 d	60 d	降率/%	0 d	60 d	降率/%
ck	412.08±4.87 a	368.51±21.30 a	10.57±0.32 d	28.21±0.15 a	17.52±0.42 a	37.89±0.23 d
T0	412.08±4.87 a	344.42±17.50 ab	16.42±0.46 c	28.21±0.15 a	15.61±0.31 b	44.67±0.34 c
T1	395.58±11.34 b	323.89±8.75 bc	18.12±0.54 bc	26.75±0.26 b	13.9±0.28 c	48.04±0.26 bc
T2	380.48±5.78 c	305.79±31.60 bcd	19.63±0.33 abc	25.43±0.07 c	12.35±0.19 d	51.44±0.52 bc
T3	366.48±3.87 d	287.81±14.10 cd	21.47±0.41 ab	24.25±0.35 d	10.74±0.14 e	55.71±0.45 ab
T4	353.58±9.24 e	269.90±5.52 d	23.67±0.29 a	23.17±0.24 e	9.32±0.07 f	59.78±0.61 a

说明：同列不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。

由表 4 可知：TN、TP 初始值随牛粪的添加量呈梯度上升，TK 初始值因牛粪略微降低。堆肥结束时，TN、TP 和 TK 质量分数均有所增加，与初始值相比，分别提高了 43.94%~89.78%、78.87%~92.42%、37.90%~45.30%。不同蚯蚓堆肥处理之间，TN、TP、TK 质量分数增率均以 T4 处理最高，且显著高于 ck 和 T0 处理 ($P<0.05$)。

由表 5 可知：各处理堆肥产物 Ca 质量分数无显著差异；Mg、Fe 和 Mn 随着牛粪添加量增加而升高，T4 处理中 Mg、Fe 和 Mn 质量分数分别为 11.25、2910.17、229.74 mg·kg⁻¹，显著高于 T0 和 ck ($P<0.05$)。Cr、Cd 和 As 随着牛粪添加量增加而降低，T4 处理中 Cr、Cd、As 质量分数分别为 5.87、0.22、0.029 mg·kg⁻¹，显著低于 ck ($P<0.05$)。Pb 随着牛粪添加量的增加而显著升高 ($P<0.05$)。

2.2.2 不同处理对蚯蚓堆肥物理性质的影响 由表 6 可知：T2~T4 处理容重显著高于 ck ($P<0.05$)，各处理最终堆肥之间总孔隙度无显著差异，随着牛粪添加量的增加，通气孔隙逐渐减小。T2~T4 处理最终

表 4 添加牛粪对蚯蚓堆肥氮、磷、钾的影响

Table 4 Effects of cattle manure addition on TN, TP and TK of vermicomposting									
处理	总氮(TN)/(g·kg ⁻¹)			总磷(TP)/(g·kg ⁻¹)			总钾(TK)/(g·kg ⁻¹)		
	0 d	60 d	增率/%	0 d	60 d	增率/%	0 d	60 d	增率/%
ck	14.61±0.25 a	21.03±0.44 f	43.94±0.38 d	6.20±0.07 c	11.09±0.11 d	78.87±0.15 c	10.51±0.06 a	14.49±0.31 a	37.90±0.25 b
T0	14.61±0.25 a	22.06±0.18 e	50.99±0.56 d	6.20±0.07 c	11.58±0.24 c	86.77±0.45 b	10.51±0.06 a	14.51±0.25 a	38.10±0.38 b
T1	14.79±0.12 a	23.31±0.26 d	57.61±0.62 cd	6.39±0.24 c	12.05±0.33 c	88.63±0.52 ab	10.36±0.12 ab	14.33±0.29 a	38.35±0.17 b
T2	14.96±0.37 a	24.77±0.14 c	65.57±0.86 bc	6.63±0.13 b	12.66±0.41 b	90.92±0.32 ab	10.23±0.15 abc	14.35±0.28 a	40.25±0.46 ab
T3	15.11±0.49 a	26.80±0.36 b	77.37±0.27 ab	6.81±0.09 b	13.06±0.15 b	91.78±0.29 ab	10.11±0.23 bc	14.47±0.19 a	43.11±0.53 ab
T4	15.26±0.71 a	28.96±0.23 a	89.78±0.77 a	7.05±0.11 a	13.57±0.28 a	92.42±0.38 a	9.98±0.09 c	14.50±0.15 a	45.30±61.00 a

说明：同列不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。

表 5 不同处理堆肥产物的营养元素和重金属质量分数

Table 5 Concentration of nutrient elements and heavy metal of different treatments								
处理	元素质量分数/(mg·kg ⁻¹)							
	Ca	Mg	Fe	Mn	Cr	Pb	Cd	As
ck	134.97±3.74 a	10.85±0.04 b	2565.73±25.30 b	207.41±5.25 b	8.03±0.03 a	3.06±0.02 e	0.29±0.004 a	0.052±0.0007 a
T0	136.85±2.46 a	10.93±0.07 b	2660.23±44.10 b	209.34±7.32 b	7.23±0.05 b	3.74±0.01 e	0.24±0.006 b	0.049±0.0010 a
T1	137.08±0.59 a	11.11±0.09 ab	2672.13±110.20 b	221.78±5.19 ab	7.04±0.02 b	5.50±0.01 d	0.23±0.005 b	0.042±0.0009 b
T2	138.89±0.66 a	11.13±0.05ab	2768.39±73.10 ab	223.37±4.17 ab	6.65±0.04 c	8.15±0.07 c	0.23±0.003 b	0.038±0.0004 bc
T3	140.07±0.75 a	11.16±0.05 ab	2898.05±28.90 a	225.72±6.64 ab	6.13±0.03 d	9.79±0.04 b	0.22±0.005 b	0.032±0.0003 cd
T4	144.49±1.95 a	11.25±0.07 a	2910.17±35.50 a	229.74±6.05 a	5.87±0.03 e	11.41±0.09 a	0.22±0.002 b	0.029±0.0003 d

说明：同列不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。

表 6 不同处理产物的物理性质

Table 6 Physical properties of different treatments				
处理	容重/(g·cm ⁻³)	总孔隙度/%	通气孔隙度/%	持水力/(g·g ⁻¹)
ck	0.194±0.004 b	89.05±0.45 a	17.22±1.27 b	3.15±0.09 c
T0	0.221±0.010 ab	90.24±1.18 a	22.10±2.25 a	3.24±0.12 bc
T1	0.225±0.015 ab	89.74±0.73 a	20.22±1.01 ab	3.51±0.15 bc
T2	0.247±0.009 a	88.62±0.77 a	19.91±2.33 ab	4.35±0.31 ab
T3	0.252±0.012 a	87.55±0.66 a	18.85±2.61 ab	5.12±0.22 a
T4	0.255±0.013 a	87.46±0.58 a	18.34±1.84 ab	5.34±0.24 a

说明：同列不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。

堆肥产物持水力显著高于 ck ($P<0.05$)，说明 T2~T4 处理作为栽培基质可以减轻水分管理工作量，节约水资源。

2.3 不同处理对西葫芦种子发芽指数的影响

从图 1 可以看出：各处理西葫芦种子 GI 随堆肥时间增加均表现为先下降后上升最后趋于稳定，初始 GI 为 21.01%~23.98%，T0~T4 的 GI 在堆肥第 6 天就表现出上升趋势，与 ck 相比提前 1 周左右。堆肥 39 d 后，T2、T3 和 T4 最先达到腐熟，60 d 后，除 ck 外，所有处理 GI 达 80% 以上；添加牛粪各处理的 GI 均高于 ck，其中 T3 处理的最终

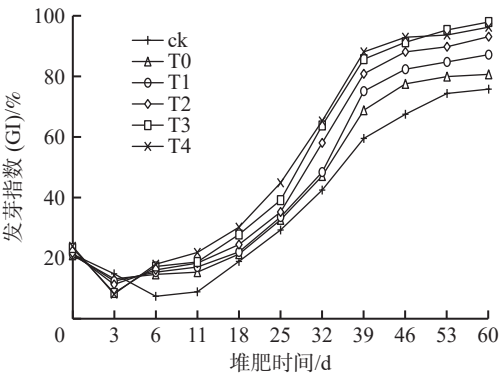


图 1 堆肥过程中种子发芽指数的变化
Figure 1 Changes of germination index during composting

GI 最高。可见适当添加牛粪可提高蘑菇渣堆肥的腐熟程度。

3 讨论

3.1 添加牛粪对蚯蚓生长与繁殖的影响

蚯蚓生长和繁殖与其摄食、消化及环境条件密切相关。在蚯蚓堆肥中,蚯蚓平均质量、存活率、蚯蚓卵数量、幼蚯蚓数量及日增殖倍数等指标能有效反映蚯蚓的生长繁殖状况。有研究表明:只要原料能被蚯蚓采食,蚯蚓就能从中获取生物量,支持个体生长和种群繁殖,但其生物量增加的程度取决于原料质量及环境适宜性^[14]。本研究结果表明:添加牛粪能够显著提高蚯蚓生长和繁殖能力,牛粪中的氮素(如蛋白质、尿素)在微生物作用下转化为可被蚯蚓吸收的铵盐和硝酸盐,促进蚯蚓的生理活动。然而,过高铵盐可能导致蚯蚓逃逸甚至中毒死亡^[15],牛粪高含水量、低通透性等特点,也容易引发蚯蚓死亡。因此,在蚯蚓养殖中,牛粪通常需与秸秆等植物残体混合以调节水分和碳氮比。

3.2 添加牛粪对堆肥理化性质的影响

蚯蚓堆肥的过程也是有机质矿化和腐殖化过程。各处理初始 pH 为 8.35~8.47,符合蚯蚓适生 pH^[16],堆肥结束后,所有处理堆肥 pH 均下降。有学者认为 pH 下降可能与 N 和 P 分别转化为硝酸盐和正磷酸盐有关,同时新形成的腐植酸也会降低堆体 pH^[17]。也有学者认为堆肥过程中产生的铵根离子会增加堆体 pH,当堆体 pH 较低时,铵根离子更容易被保存在堆肥中。因此在两者共同作用下,堆体 pH 向中性转变^[18]。TOC 降低主要源于微生物和蚯蚓对有机质的分解作用。这一过程不仅提高了堆体 EC,还通过腐殖酸形成和 CO₂ 释放降低了堆体的 pH,有助于氮素的保存。EC 高于 4 mS·cm⁻¹ 时会对植物种子萌发及幼苗生长产生不良影响^[19]。本研究所有处理的 EC 均低于 4 mS·cm⁻¹,可安全应用于农业生产栽培。

一般堆肥产物 C/N≤20 时则代表堆肥基本腐熟;堆肥产物 C/N≤15 时,说明产物不仅腐熟度较高,且施用于土壤后不会引起短期固氮问题。本研究中,除 T0 和 ck 外,其余各处理的 C/N 均小于 15,表明其腐熟度较高,可直接用于作物种植。随着牛粪添加量的增加,有机质分解越充分,pH 越低,EC 越高,C/N 也更低。这结果进一步表明牛粪添加显著促进了堆肥矿化和腐殖化过程。

堆肥结束后,TN、TP 和 TK 质量分数均有所上升,这主要归因于有机质在蚯蚓和微生物的作用下发生矿化与降解,导致堆体质量和体积显著下降,从而使这些元素的相对含量增加^[20]。本研究中,随着牛粪添加量增加,堆肥养分的增率也呈上升趋势,这与牛粪促进有机质分解的结论一致。有研究表明,蚯蚓能够改善堆料微环境,提高固氮菌的数量,促进氨态氮转化为硝态氮,从而减少 N 损失并提高堆肥产物中的 N 含量^[21]。微生物活动产生酸导致不溶性磷和钾的溶解,而蚯蚓肠道中的微生物群落在提高 P、K 有效性方面也发挥了重要作用^[22]。在堆肥过程中,TN 和 TP 增率高于 TK,这可能与 K 在堆肥过程中更易转化为有效态并随水流失有关,而 N 则通过与腐殖酸根离子结合得以保存。

本研究中,随着牛粪添加量增加,Mg、Fe、Mn、Pb 质量分数显著升高,主要归因于堆体的浓缩效应^[23]。而 Cr、Cd 和 As 质量分数随牛粪添加量增加而降低,则可能与蚯蚓和微生物的活动密切相关。研究表明:蚯蚓在堆肥过程中能够通过摄食和排泄积累重金属^[24-25],从而降低其在堆体中的有效性和迁移性,减少通过食物链积累的风险。LÜ等^[26]发现:Pb 增加也可能是因为 Pb 与腐殖酸结合形成稳定的有机络合物,或与硫化物、磷酸盐结合生成沉淀;总量虽然增加,但有效态铅的可利用性反而降低,环境风险可控。堆肥后,堆体的重金属离子总量远低于花木栽培基质的限值^[27],表明堆肥产物在应用中具有一定的环境安全性。

本研究各处理堆肥产物容重、总孔隙度、通气孔隙和持水力随着牛粪添加量增加而增加,且蚯蚓堆肥大于普通堆肥。这表明蚯蚓在堆体中的活动可以改善堆体通透性,但由于本研究每周进行人工翻堆以促进有机物均匀降解,因而堆肥产物容重、总孔隙度和通气孔隙差异不显著。各处理最终堆肥容重与通气孔隙度均在育苗基质容重理想范围(0.1~0.8)和大部分作物适宜通气孔隙度范围(15%~20%)内^[28-29];除 T0 总孔隙度略高于理想水平,其余处理均满足无土栽培基质总孔隙度 70%~90% 的要求^[30]。蚯蚓在堆肥过程中会采食有机物并排出蚯蚓粪,其中含有大量植物生长所需的营养物质,其本身也具有良好保水保肥能力,蚯蚓粪特有的类团粒结构增强了堆体持水力。

3.3 添加牛粪对西葫芦种子的影响

GI 是评估堆肥腐熟度和检测植物毒性的重要指标。当 $GI \geq 80\%$ 时, 表明堆肥产物达到腐熟标准^[31]。试验前期 GI 下降的原因可能是蘑菇渣和牛粪在堆肥前期释放较多的酚、酸等小分子有机物, 对种子产生毒害, 这些物质随着堆肥进程的推进挥发或重新结合成无害的大分子^[32], 促使 GI 回升。研究结果显示 T3 处理对种子毒害作用最小。当牛粪比例继续增至 T4 时, GI 下降至 96.57%。这是由于堆肥中低分子有机酸与铵根离子均阻碍了种子萌发及根系生长^[33]。当牛粪添加量较低时, 腐殖化程度对堆肥 GI 影响较大, 随着牛粪添加量增加, 腐殖化程度提高, 小分子有机物聚合成腐殖质, 堆肥产物 GI 升高; 但当牛粪添加量过高时, 含氮有机物分解释放的铵根离子限制了堆肥产物 GI。为了平衡堆肥的腐殖化程度和养分释放, 牛粪添加量需控制在适宜范围内。基于本研究结果, 将蘑菇渣和牛粪混合干质量比控制在 100:15, 既可以促进蘑菇渣的资源化利用, 又能降低其对种子产生毒害的风险。

4 结论

与传统的蘑菇渣堆肥相比, 蚯蚓堆肥可以促进有机质分解, 降低堆肥产物的 C/N, 提高堆肥的腐熟程度, 提高堆肥产物中的 TN、TP、TK 质量分数。添加牛粪可改善蚯蚓的生长环境, 显著提高蚯蚓平均质量和存活率, 并加快蚯蚓繁殖速度。随着牛粪添加量增加, 堆肥有机质分解量增加, EC、TN、TP 及养分有效性提高, pH、C/N 降低。堆肥产物品质从高到低总体依次为添加牛粪的蘑菇渣蚯蚓堆肥、蘑菇渣蚯蚓堆肥、传统蘑菇渣堆肥。

在蘑菇渣蚯蚓堆肥中, 蘑菇渣和牛粪混合干质量比为 100:15 时, 堆肥的养分含量高、物理性质优, 且对植物无毒害作用, 可直接用于土壤改良和作物栽培。同时, 该技术为蘑菇渣和牛粪的资源化利用提供了高效可行的解决方案, 能够减少废弃物污染, 推动农业循环经济的发展, 具有显著的环境和经济效益。

5 参考文献

- [1] 李贺, 许修宏, 王相刚. 我国食用菌技术标准的现状、问题及对策研究[J]. 中国食用菌, 2015, 34(3): 1-6.
LI He, XU Xiuhong, WANG Xianggang. Present situation, problems and countermeasures of technical standards of edible fungi in China [J]. *Edible Fungi of China*, 2015, 34(3): 1-6.
- [2] 赵晓丽, 陈智毅, 刘学铭. 菌糠的高效利用研究进展[J]. 中国食用菌, 2012, 31(2): 1-3.
ZHAO Xiaoli, CHEN Zhiyi, LIU Xueming. Research process on the efficient utilization of edible fungi substrates [J]. *Edible Fungi of China*, 2012, 31(2): 1-3.
- [3] 赵海亮, 王玉萍, 邹志荣, 等. 牛粪与菇渣配合施用对番茄沙化栽培基质的改良效果[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2013, 41(7): 189-194, 200.
ZHAO Hailiang, WANG Yuping, ZOU Zhirong, et al. Effects of combined application of cow manure and mushroom residue on the improvement of substrate for tomato sandy cultured [J]. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 2013, 41(7): 189-194, 200.
- [4] 姜继韶, 侯睿, 崔慧林, 等. 基于 Meta 分析的蚯蚓堆肥对堆肥质量和重金属的影响效应[J]. 环境科学, 2024, 45(5): 3047-3058.
JIANG Jishao, HOU Rui, CUI Huilin, et al. Effects of vermicomposting on compost quality and heavy metals: a meta-analysis [J]. *Environmental Science*, 2024, 45(5): 3047-3058.
- [5] 李仲瀚, 杨凤霞, 杨铭, 等. 蚯蚓堆肥及其温室气体排放研究进展[J]. 农业资源与环境学报, 2025, 42(5): 1148-1158.
LI Zhonghan, YANG Fengxia, YANG Ming, et al. Research progress in vermicomposting and its greenhouse gas emissions [J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2025, 42(5): 1148-1158.
- [6] 王琳, 李素艳, 孙向阳, 等. 不同配比园林绿化废弃物和蘑菇渣混合蚯蚓堆肥的效果[J]. 浙江农林大学学报, 2019, 36(2): 326-334.
WANG Lin, LI Suyan, SUN Xiangyang, et al. Mixing garden wastes and spent mushroom compost of different ratios for vermicomposting [J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2019, 36(2): 326-334.
- [7] YU Xiaolan, LI Xiaoliang, REN Changqi, et al. Co-composting with cow dung and subsequent vermicomposting improve

- compost quality of spent mushroom [J/OL]. *Bioresource Technology*, 2022, **358**: 127386 [2025-01-10]. DOI: 10.1016/j.biortech.2022.127386.
- [8] 张婷婷, 李娟, 刘娜, 等. 牛粪和菇渣配比的复合基质对黄瓜幼苗生长的影响 [J]. 西南农业学报, 2022, **35**(9): 2154–2160.
- ZHANG Tingting, LI Juan, LIU Na, *et al.* Effects of mixed matrix with different ratio of cattle manure and mushroom residue on growth of cucumber seedlings [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2022, **35**(9): 2154–2160.
- [9] 龚小强, 李素艳, 魏乐, 等. 牛粪添加对园林绿化废弃物蚯蚓堆肥的影响研究 [J]. 应用基础与工程科学学报, 2018, **26**(2): 285–294.
- GONG Xiaoqiang, LI Suyan, WEI Le, *et al.* Vermicomposting of green waste using *Eisenia fetida* and as affected by addition of cow dung [J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2018, **26**(2): 285–294.
- [10] WANG Feng, ZHANG Yuchen, SU Yinglong, *et al.* Pollutant control and nutrient recovery of organic solid waste by earthworms: mechanism and agricultural benefits of vermicomposting [J/OL]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2024, **12**(3): 112610 [2025-01-10]. DOI: 10.1016/j.jece.2024.112610.
- [11] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- BAO Shidan. *Soil and Agricultural Chemistry Analysis* [M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [12] 龚小强. 园林绿化废弃物堆肥产品改良及用作花卉栽培代用基质研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2013.
- GONG Xiaoqiang. *Study on the Improvement of Green Waste Compost Products and the Products as the Peat Substitutes for the Planting of Flowers* [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2013.
- [13] 龚小强, 孙向阳, 田赟, 等. 复合型有机改良剂对园林废弃物堆肥基质改良研究 [J]. 西北林学院学报, 2013, **28**(2): 196–201.
- GONG Xiaoqiang, SUN Xiangyang, TIAN Yun, *et al.* Application of organic composite ameliorants on the green wastes compost substrate [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2013, **28**(2): 196–201.
- [14] SHARMA K, GARG V K. Comparative analysis of vermicompost quality produced from rice straw and paper waste employing earthworm *Eisenia fetida* (Sav.) [J]. *Bioresource Technology*, 2018, **250**: 708–715.
- [15] ZHAO Qi, ZHANG Manrui, WU Zexuan, *et al.* Dynamics of bacterial community in the foregut and hindgut of earthworms with the nutrition supplied by kitchen waste during vermicomposting [J/OL]. *Bioresource Technology*, 2023, **374**: 128777 [2025-01-10]. DOI: 10.1016/j.biortech.2023.128777.
- [16] 蔡琳琳, 李素艳, 龚小强, 等. 好氧堆肥-蚯蚓堆肥结合法处理绿化废弃物与牛粪 [J]. 浙江农林大学学报, 2018, **35**(2): 261–267.
- CAI Linlin, LI Suyan, GONG Xiaoqiang, *et al.* Composting-vermicomposting of green waste processing spiked with cow dung [J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2018, **35**(2): 261–267.
- [17] ALMEIDA SANTANA N, JACQUES R J S, *et al.* Changes in the chemical and biological characteristics of grape Marc vermicompost during a two-year production period [J/OL]. *Applied Soil Ecology*, 2020, **154**: 103587 [2025-01-10]. DOI: 10.1016/j.apsoil.2020.103587.
- [18] EL BOUDIHI H, KIFANI-SAHBAN F, WAHBY I, *et al.* Study of temperature dynamics and influencing factors during composting process [J]. *International Journal of Chemical Reactor Engineering*, 2024, **22**(10): 1183–1198.
- [19] CHUNG W J, CHANG S W, CHAUDHARY D K, *et al.* Effect of biochar amendment on compost quality, gaseous emissions and pathogen reduction during in-vessel composting of chicken manure [J/OL]. *Chemosphere*, 2021, **283**: 131129 [2025-01-10]. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2021.131129.
- [20] AZIS F A, CHOO M, SUHAIMI H, *et al.* The effect of initial carbon to nitrogen ratio on kitchen waste composting maturity [J/OL]. *Sustainability*, 2023, **15**(7): 6191 [2025-01-10]. DOI: 10.3390/su15076191.
- [21] 王洁洁, 杨金艳, 陈步涨, 等. 优化好氧发酵木屑添加量提升污泥再利用潜力 [J]. 浙江农林大学学报, 2022, **39**(3): 662–670.
- WANG Jiejie, YANG Jinyan, CHEN Buzhang, *et al.* Optimal addition of aerobic fermentation sawdust in landfill sludge reuse [J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2022, **39**(3): 662–670.
- [22] 罗梦琴, 龚崇艳, 方婷, 等. 生物炭对牛粪-酒糟-园林废弃物联合蚯蚓堆肥进程及重金属钝化的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2024, **43**(6): 1400–1410.

- LUO Mengqin, GONG Chongyan, FANG Ting, *et al.* Biochar influence on the composting process and heavy metal passivation during cow manure, wine lees, and garden waste co-vermicomposting [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2024, **43**(6): 1400–1410.
- [23] FLEGEL M, SCHRADER S. Importance of food quality on selected enzyme activities in earthworm casts (*Dendrobaena octaedra*, Lumbricidae) [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, **32**(8/9): 1191–1196.
- [24] ZHOU Yong, LI Huankai, GUO Wenwei, *et al.* The synergistic effect between biofertility properties and biological activities in vermicomposting: a comparable study of pig manure [J/OL]. *Journal of Environmental Management*, 2022, **324**: 116280[2025-01-10]. DOI: 10.1016/j.jenvman.2022.116280.
- [25] ZHANG Qingmiao, GUO Xiaoming, ZHANG Qiang, *et al.* Fate of heavy metals and importance of influencing factors during vermicomposting [J/OL]. *Journal of Cleaner Production*, 2025, **486**: 144499[2025-01-10]. DOI: 10.1016/j.jclepro.2024.144499.
- [26] LÜ Baoyi, XING Meiyan, YANG Jian. Speciation and transformation of heavy metals during vermicomposting of animal manure [J]. *Bioresource Technology*, 2016, **209**: 397–401.
- [27] 国家林业局. 花木栽培基质: LY/T 2700—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
State Forestry Administration of the People's Republic of China. *Growing Medium for Flowering Trees and Shrubs*: LY/T 2700—2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.
- [28] 李燕, 孙向阳, 龚小强, 等. 蚯蚓堆肥替代草炭作为甘蓝和西葫芦育苗基质研究[J]. 吉林农业大学学报, 2015, **37**(5): 549–554.
LI Yan, SUN Xiangyang, GONG Xiaoqiang, *et al.* Substitution of vermicompost for peat as *Brassica oleracea* L. and *Cucurbita pepo* L. seedling substrates [J]. *Journal of Jilin Agricultural University*, 2015, **37**(5): 549–554.
- [29] 李谦盛, 裴晓宝, 郭世荣, 等. 复配对芦苇末基质物理性状的影响[J]. 南京农业大学学报, 2003, **26**(3): 23–26.
LI Qiansheng, PEI Xiaobao, GUO Shirong, *et al.* Effect of mixing on the physical properties of reed residue substrate [J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2003, **26**(3): 23–26.
- [30] ADRIANO D C. *Trace Elements in Terrestrial Environment. Biogeochemistry, Bioavailability, and Risk of Metals* [M]. New York: Springer, 2001: 190–222.
- [31] LONČARIĆ Z, GALIĆ V, NEMET F, *et al.* The evaluation of compost maturity and ammonium toxicity using different plant species in a germination test[J/OL]. *Agronomy*, 2024, **14**(11): 2636[2025-01-10]. DOI: 10.3390/agronomy14112636.
- [32] 周波, 唐晶磊, 代金君, 等. 蚯蚓作用下污泥重金属形态变化及其与化学生物学性质变化的关系[J]. 生态学报, 2015, **35**(19): 6269–6279.
ZHOU Bo, TANG Jinglei, DAI Jinjun, *et al.* Remediating effluent sludge with earthworms: changes in heavy metal speciation and associated chemical and biological properties [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, **35**(19): 6269–6279.
- [33] MAZUMDER P, KHWAIRAKPAM M, KALAMDHAD A S. Bio-inherent attributes of water hyacinth procured from contaminated water body—effect of its compost on seed germination and radicle growth [J/OL]. *Journal of Environmental Management*, 2020, **257**: 109990[2025-01-10]. DOI: 10.1016/j.jenvman.2019.109990.