

张金辉, 李银月, 张发文, 等. 物料碳氮比及微生物菌剂接种量对黄瓜秧-鸡粪堆肥过程的影响[J]. 江苏农业学报, 2024, 40(2): 260-269.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2024.02.008

## 物料碳氮比及微生物菌剂接种量对黄瓜秧-鸡粪堆肥过程的影响

张金辉<sup>1</sup>, 李银月<sup>1</sup>, 张发文<sup>1</sup>, 袁 远<sup>1</sup>, 郭占玲<sup>2</sup>

(1. 河南农业大学林学院, 河南 郑州 450002; 2. 河南省农业科学院植物营养与资源环境研究所, 河南 郑州 450002)

**摘要:** 为明确黄瓜秧与鸡粪堆肥的适宜碳氮比及微生物菌剂接种量, 本研究设计 3 个碳氮比 (17.5、22.5 和 27.5) 和 3 个微生物菌剂接种量 (0.1%、0.2%、0.3%) 共 9 个处理, 测定了不同处理对黄瓜秧与鸡粪好氧堆肥过程中温度、有机质降解率、pH 值、种子发芽指数 (*GI*)、养分含量及堆肥腐熟度的影响。结果表明, 高碳氮比和高微生物菌剂接种量处理堆体温度更快达到 50 ℃ 以上, 且堆肥过程中高温的峰值高于中、低碳氮比和中、低微生物菌剂接种量处理; 高碳氮比和高微生物菌剂接种量处理, 有机质降解率、堆肥的腐熟度 (*T*) 都显著提高; 但接种 0.3% 微生物菌剂处理对有效磷、速效钾的保留效果以及堆肥最终发芽指数 (*GI*) 的提升均不如接种量为 0.2% 与 0.1% 的处理。综合上述分析, 黄瓜秧与鸡粪进行堆肥无害化生产时, 适宜的碳氮比为 27.5, 微生物菌剂接种量为 0.1% ~ 0.2%。

**关键词:** 堆肥; 黄瓜秧; 鸡粪; 碳氮比; 微生物菌剂

中图分类号: S141.4 文献标识码: A 文章编号: 1000-4440(2024)02-0260-10

## Effects of carbon-nitrogen ratio of materials and inoculation amount of microbial inoculants on the composting process of cucumber seedlings-chicken manure

ZHANG Jin-hui<sup>1</sup>, LI Yin-yue<sup>1</sup>, ZHANG Fa-wen<sup>1</sup>, YUAN Yuan<sup>1</sup>, GUO Zhan-ling<sup>2</sup>

(1. College of Forestry of Henan Agriculture University, Zhengzhou 450002, China; 2. Institute of Plant Nutrition, Agricultural Resources and Environmental Sciences, Henan Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou 450002, China)

**Abstract:** In order to clarify the suitable carbon-nitrogen ratio and inoculation amount of microbial inoculants for cucumber seedlings and chicken manure composting, three carbon-nitrogen ratios (17.5, 22.5 and 27.5) and three microbial inoculation amounts (0.1%, 0.2% and 0.3%) were designed in this study. A total of nine treatments were used to determine the effects of different treatments on temperature, degradation rate of organic matter, pH value, seed germination index (*GI*), nutrient content and compost maturity during the aerobic composting of cucumber seedlings and chicken manure. The results showed that the pile temperature reached more than 50 ℃ faster under high carbon-nitrogen ratio and high inoculation amount of microbial inoculants, and the peak value of high temperature during composting was significantly higher than that of medium and low carbon-nitrogen ratio and medium and low inoculation amount of microbial inoculants. Under high carbon-nitrogen ratio and high inoculation amount of microbial inoculants, the degradation rate of

收稿日期: 2022-12-28

基金项目: 国家重点研发计划项目子课题 (2018YFD0800405-04)

作者简介: 张金辉 (1996-), 男, 河南周口人, 硕士研究生, 主要从事  
固体废物资源化利用研究。(E-mail) 418336656@qq.com

通讯作者: 袁 远, (E-mail) yuanylc@henau.edu.cn

ulation amount of microbial inoculants, and the peak value of high temperature during composting was significantly higher than that of medium and low carbon-nitrogen ratio and medium and low inoculation amount of microbial inoculants. Under high carbon-nitrogen ratio and high inoculation amount of microbial inoculants, the degradation rate of

organic matter and the maturity of compost ( $T$ ) were significantly improved. However, under the treatment of 0.3% microbial agent inoculation, the retention effect of available phosphorus and available potassium and the increase of final germination index ( $GI$ ) of composting were not as good as those of 0.2% and 0.1% inoculation. Based on the above analysis, the suitable carbon-nitrogen ratio was 27.5 and the inoculation amount of microbial agent was 0.1%–0.2% when cucumber seedlings and chicken manure were composted harmlessly.

**Key words:** compost; cucumber seedlings; chicken manure; carbon-nitrogen ratio; microbial agent

近年来,随着中国农业结构不断调整与优化,蔬菜产业与畜禽养殖业得到快速发展,产量在逐年上升的同时产业废弃物也大量增加<sup>[1-2]</sup>。目前,中国每年蔬菜废弃物总量达数千万吨<sup>[3]</sup>,畜禽粪便量达 $3.0\times 10^9$  t 以上<sup>[4]</sup>。这些废弃物大多被直接抛弃,严重威胁中国农村生态环境。同时,这些废弃物通常含有较高含量的有机质及养分,直接抛弃还造成了大量资源的浪费。因此,实现农业废弃物的资源化、无害化利用是目前农业生产面临的关键问题之一。

好氧堆肥是农业废弃物资源化、无害化利用的有效措施之一<sup>[5]</sup>。好氧堆肥处理时堆体碳氮比与微生物菌剂接种量是影响堆肥腐熟过程的两个重要因素。堆体碳氮比低会促进微生物对氮的分解,导致氮素挥发和流失比例较高,而碳氮比过高,会抑制微生物活动,降低有机物的降解速率<sup>[6-7]</sup>。张红玉<sup>[8]</sup>研究了碳氮比对厨余垃圾堆肥腐熟度的影响,认为厨余垃圾堆肥的最适碳氮比为 17;刘文杰等<sup>[9]</sup>建议叶菜类废弃物与猪粪堆肥的最适碳氮比为 20,黄晓凤等<sup>[10]</sup>指出碳氮比为 30 时鹅粪渣和玉米秸秆的堆肥效果最好,堆体养分损失少,有机物降解率最高。由于物料自身性质的差异,不同物料堆肥的最适碳氮比并没有统一的标准。接种功能微生物菌剂是影响堆体有机物质降解速率的另一条途径。适宜的微生物菌剂接种量能够提高堆肥腐熟效率<sup>[11-12]</sup>。在牛粪和小麦秸秆混合堆肥试验中,接种 0.5% 枯草芽孢杆菌制剂能够减少  $\text{CO}_2$  的产生,显著提高堆肥中总有机碳和腐殖质碳的含量及堆肥产品的质量;而接种量增加到 2.0% 后,则会导致  $\text{CO}_2$  排放量增加,堆肥效果变差<sup>[13]</sup>。李季等<sup>[14]</sup>指出,有机废弃物好氧堆肥初期菌剂的适接种量一般为 0.1%~1.0%,但不同物料堆肥时最优菌剂接种量亦没有统一的标准。

目前有关堆肥研究大多侧重于分析碳氮比或微生物菌剂接种量单一变量对不同物料堆肥过程的影响,而对碳氮比和菌剂接种量协同对蔬菜废弃物与

畜禽粪便堆肥过程的影响研究还缺乏研究。黄瓜秧与鸡粪是目前种植业、养殖业常见的废弃物,2020 年中国黄瓜秧产量高达 $2.788\times 10^6$  t<sup>[15]</sup>,鸡粪的年产量近 $1.7\times 10^9$  t<sup>[16]</sup>。由于黄瓜秧与鸡粪都含有较高的 N、P、K 养分和有机质<sup>[17-18]</sup>,因此,利用黄瓜秧与鸡粪进行堆肥处理生产有机肥不但能充分利用废弃物资源,还能带来经济效益,减少环境污染。针对目前黄瓜秧与鸡粪堆肥处理过程中适宜的碳氮比和微生物菌剂接种量还不明确的现状,本研究通过不同梯度的碳氮比与微生物菌剂接种量试验,探究二者协同对黄瓜秧与鸡粪堆肥过程的影响,以筛选适合黄瓜秧与鸡粪堆肥的碳氮比及微生物菌剂接种量,为后续蔬菜废弃物堆肥时的物料配比及微生物菌剂接种量的选择提供理论支撑。

## 1 材料和方法

### 1.1 供试材料

供试黄瓜秧与新鲜鸡粪分别取自河南省中牟县官渡镇设施菜地及菜地附近养殖厂,晾晒 2 d 后进行粉碎。小麦秸秆来自河南农业大学科教园区,粉碎后备用。微生物菌剂为粗纤维降解菌,有效活菌含量 $\geq 1.0\times 10^{10}$  CFU/g,购自江苏神微微生物科技有限公司。堆肥原料基础性质见表 1。

表 1 堆肥原料基础性质

Table 1 Basic properties of compost raw materials

物料	含水率 (%)	pH	干物质含碳量 (%)	干物质含氮量 (%)	碳氮比
黄瓜秧	75.95	8.72	34.51	2.31	14.94
小麦秸秆	8.60	6.97	41.93	1.05	39.93
鸡粪	21.25	7.35	33.76	4.58	7.37

### 1.2 试验设计

试验于 2021 年 8 月在河南农业大学科教园区大棚内进行,将黄瓜秧、鸡粪、小麦秸秆烘干后,按表 2 的物料量进行 3 个碳氮比 (17.5、22.5 和 27.5) 堆

肥物料的配制。物料混合均匀后,各处理取 4.2 kg,分别接种混合物料量 0.1%(4.2 g)、0.2%(8.4 g)、0.3%(12.6 g)的粗纤维降解菌剂,共 9 个处理(表 2)。接种方法是分别称取 4.2 g、8.4 g、12.6 g 的粗纤维降解菌剂干粉,经过红糖水激活后使用小型花卉喷雾剂喷洒至混合物料,并搅拌均匀。然后,喷洒清水将混合物料含水率调至 65%,再将混合物料放入规格 60 cm×50 cm×50 cm 自制堆肥箱中进行堆肥处理,每 3 d 人工翻堆 1 次。在堆肥后的 1 d、7 d、14 d、21 d、28 d、35 d 各处理取样 400 g,样品均分为两份,一份置于冰箱中 4 ℃ 条件下保存,用于 pH、种子发芽指数等指标测试;另一份烘干粉碎过筛保存,用于有机质、养分含量等指标的测定,堆肥处理周期设定为 35 d。每处理 3 个重复。

表 2 不同处理各种物料的添加量

Table 2 The addition amount of various materials under different treatments

处理	碳氮比	菌剂 接种量 (%)	黄瓜秧 (干质量) (g)	鸡粪 (干质量) (g)	小麦秸秆 (干质量) (g)
T1	17.5	0.1	2 000	1 000	2 470
T2	17.5	0.2	2 000	1 000	2 470
T3	17.5	0.3	2 000	1 000	2 470
T4	22.5	0.1	1 500	500	3 320
T5	22.5	0.2	1 500	500	3 320
T6	22.5	0.3	1 500	500	3 320
T7	27.5	0.1	1 000	200	3 632
T8	27.5	0.2	1 000	200	3 632
T9	27.5	0.3	1 000	200	3 632

### 1.3 测定项目及方法

1.3.1 温度 堆肥处理后每天 10:00 h 与 18:00 h 利用插入式数显温度计测定堆体中心温度,至显示数值稳定后读取,计算平均值,并记录环境温度。

1.3.2 含水率 准确称取 20 g 新鲜样品,在鼓风式干燥箱中 105 ℃ 烘至恒质量后称量计算得到。

1.3.3 pH 值 称取新鲜样品与无二氧化碳水以质量比 1:10 混合均匀,人工搅动 3 min,静置 30 min 后用 DZS-706F-A 型多参数分析仪(上海仪电科学仪器股份有限公司产品)测定样品 pH 值。

1.3.4 种子发芽指数(GI) 为明确堆肥的腐熟程度及毒性,进一步测定了不同处理时间的堆肥样品

对种子发芽指数的影响。测定方法如下:称取不同堆肥时间的新鲜样品 10 g,加入 100 ml 蒸馏水,25 ℃ 下利用复式水平振荡机以每 1 min 100 次的频率、40 mm 的振幅进行振荡浸提 1 h,静置 30 min 后过滤;取 10 ml 浸提液和 10 ml 蒸馏水,分别倒入铺有 2 层滤纸、直径 9 cm 的培养皿中,然后各放入 10 粒饱满黄瓜种子(品种为豫艺绿如意),在 25 ℃ 培养箱中避光培养 48 h 后统计浸提液和蒸馏水培养种子的发芽率和主根长。以公式(1)计算种子发芽指数(GI):

$$GI = \frac{A_1 \times A_2}{B_1 \times B_2} \times 100\% \quad (1)$$

式中, $A_1$ 、 $B_1$ 分别为样品浸提液和蒸馏水培养种子的发芽率(%); $A_2$ 、 $B_2$ 分别为样品浸提液和蒸馏水培养种子的平均根长(mm)。

1.3.5 养分含量 分别采用凯氏定氮法、火焰光度法、钼钒黄比色法、重铬酸钾容量法测定堆肥样品全氮含量、速效钾含量、有效磷含量和有机质含量。

1.3.6 腐熟度 根据  $T$  值法<sup>[19]</sup>进行堆肥腐熟度的计算。一般认为  $T$  值越低腐熟度越高, $T < 0.6$  表示堆肥腐熟度好。 $T$  值的计算方法如下:

$$T = \frac{(C/N)_1}{(C/N)_2} \quad (2)$$

式(2)中, $(C/N)_1$ 为堆肥结束时堆体的碳氮比; $(C/N)_2$ 为堆肥初始时堆体的碳氮比。

### 1.4 数据处理

利用 Excel 2021、SPSS 24、Origin 2018 等软件进行数据处理、差异显著性分析及图表绘制。

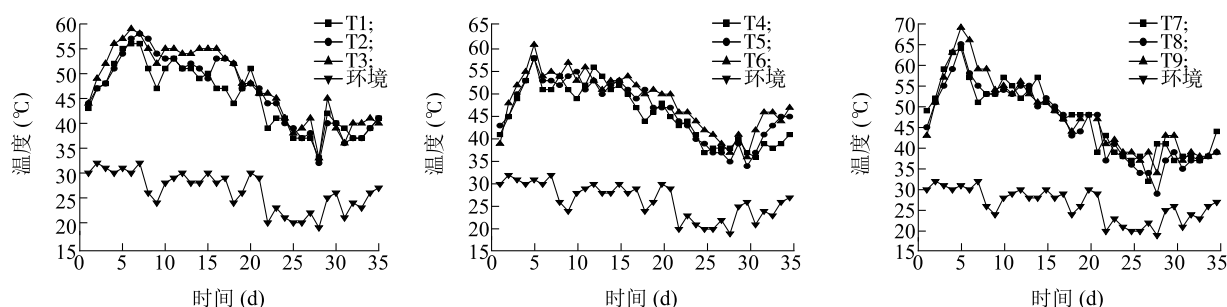
## 2 结果与分析

### 2.1 碳氮比和微生物菌剂接种量对堆体温度的影响

好氧堆肥过程中,堆体超过 50 ℃ 的持续时间和强度是堆体灭菌、堆肥无害化生产的重要指标。不同碳氮比和菌剂接种量对黄瓜秧-鸡粪堆肥过程中堆体温度的影响如图 1 所示。由图 1 可知,所有处理堆体温度均经历了升温期、高温期、降温期以及稳定期 4 个阶段,且各个处理的温度变化趋势相近。T1~T9 处理堆肥 1 d 后的温度分别为 43 ℃、44 ℃、44 ℃、41 ℃、43 ℃、39 ℃、49 ℃、45 ℃、43 ℃,高碳氮比(27.5)的 3 个处理在堆肥第 2 d 堆体温度就上升到 50 ℃ 以上,比中、低碳氮比处理,提前 1~2 d 进

入高温阶段。T1~T9 处理均在 7 d 内达到最高温度,分别为 56℃、58℃、59℃、58℃、58℃、61℃、64℃、65℃、69℃。其中,高碳氮比 3 个处理高温均值( $66.0\text{ }^{\circ}\text{C}\pm 2.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ )显著高于中、低碳氮比处理( $59.0\text{ }^{\circ}\text{C}\pm 1.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $57.70\text{ }^{\circ}\text{C}\pm 1.56\text{ }^{\circ}\text{C}$ )。不同碳氮比下,微生物菌剂接种量的增加有助于提高堆体温度。T1~T9 处理 $\geq 50\text{ }^{\circ}\text{C}$  高温持续时间分别为 10 d、14 d、17 d、11 d、13 d、16 d、14 d、13 d 和 14 d,参照《粪

便无害化卫生要求》<sup>[20]</sup>,上述处理均达到了堆肥无害化生产要求。堆肥处理 20 d 后堆体温度不再升高,变化趋势与环境温度变化趋近,表明堆体中微生物活动减弱,堆肥基本达到稳定。上述分析结果表明碳氮比和微生物菌剂接种量的增加能有效提升堆体的温度,缩短堆体进入高温的时间,有利于堆肥无害化生产。



T1~T9 见表 2。

图 1 堆肥过程中不同处理堆体温度的变化

Fig.1 Changes of compost temperature under different treatments during the composting process

## 2.2 碳氮比和微生物菌剂接种量对堆肥有机质含量的影响

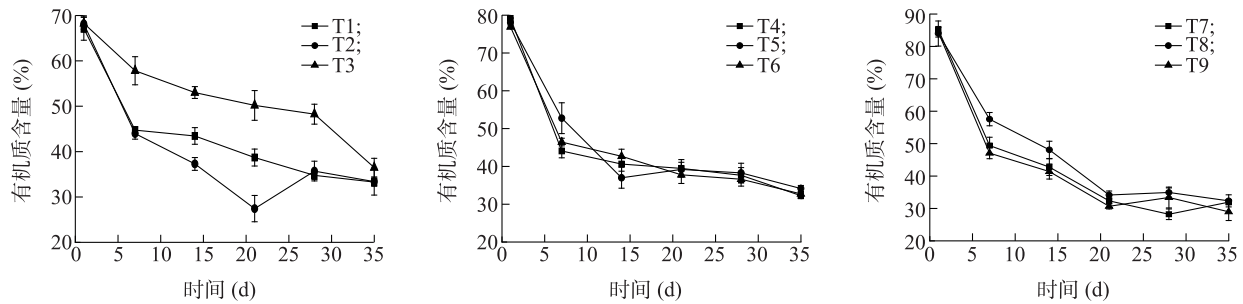
不同处理下,堆肥有机质含量随堆肥处理时间的变化如图 2 所示。从图 2 中可以看出,T1~T9 个处理有机质含量变化特征基本一致,即随堆肥处理时间的增加,堆肥有机质含量呈逐步减少趋势,且减少速率在下降。堆肥处理 1 d 时,T1~T9 处理有机质含量分别为 67.11%、68.13%、68.27%、79.14%、78.05%、76.90%、85.18%、83.98%和 84.36%,堆肥处理 1~7 d 各处理有机质含量迅速降低,此后随着堆肥的持续进行,堆肥有机质降解速率逐渐放缓,至堆肥处理结束时 T1~T9 处理的有机质含量分别下降到 33.27%、33.36%、36.46%、32.24%、34.14%、32.72%、31.92%、32.33%和 31.96%,有机质降解率分别为 50.42%、51.03%、45.67%、59.26%、56.27%、58.08%、62.74%、61.50%和 65.52%。在低碳氮比(17.5)条件下,堆肥处理 7~30 d,微生物菌剂接种量对堆肥有机质降解程度的影响较大,接种 0.3%菌剂的处理,有机质降解速度较慢,而接种 0.2%菌剂和 0.1%菌剂的处理在堆肥处理 14~21 d 存在差异,其他时间基本一致,而在中、高碳氮比(22.5、27.5)条件下,接种不同量菌剂后堆肥的有

机质含量虽然个别时间差异显著,但总体上差异不显著。上述结果说明,不同碳氮比下,接种 0.1%微生物菌剂即可实现有机质高效降解。此外,随碳氮比的增加,堆肥有机质降解率升高,T7、T8、T9 3 个处理降解率最高,说明碳氮比为 27.5 有利于堆肥过程中有机质降解。

## 2.3 碳氮比和微生物菌剂接种量对堆肥 pH 值的影响

不同碳氮比和菌剂接种量堆肥处理,堆肥 pH 值的变化如图 3 所示。从图 3 可知,各处理堆肥 pH 值总体呈现先快速上升,再缓慢下降,后期又缓慢上升的变化特征。堆肥处理开始时堆肥呈弱碱性(pH 值为 8.0~8.2),堆肥处理 7 d 内,各处理堆肥 pH 值快速上升到 9.0 以上。堆肥处理 7 d 后,各处理 pH 值缓慢下降;堆肥处理约 20 d 后,各处理 pH 值又再次上升,至堆肥处理结束时 T1~T9 处理的 pH 值分别达到了 9.40、9.53、9.57、9.73、9.64、9.62、9.24、9.58、9.44,均高于有机肥生产标准 5.5~8.5<sup>[21]</sup>,这对作物的生长会产生影响。不同碳氮比及微生物菌剂接种量处理,虽然个别取样时间,处理间存在显著差异,但总体看,碳氮比及微生物菌剂接种量对 pH 的影响不大。

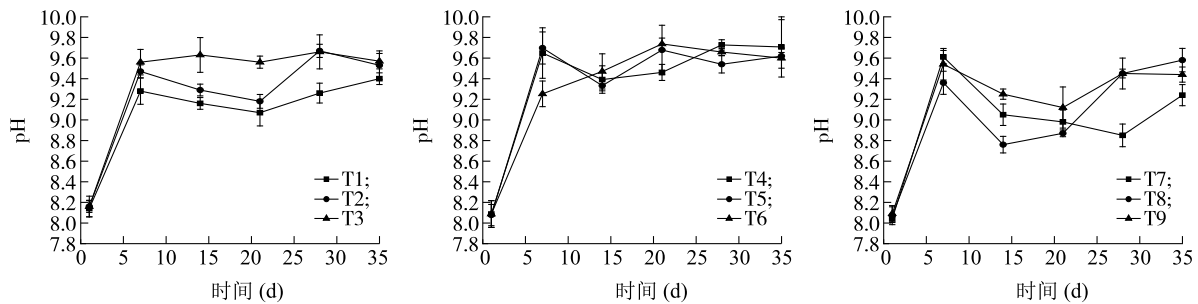




T1~T9 见表 2。

图 2 堆肥过程中不同处理有机质含量的变化

Fig.2 Changes of organic matter content in different treatments during the composting process



T1~T9 见表 2。

图 3 堆肥过程中不同处理堆体 pH 值的变化

Fig.3 Changes of pH value in different treatments during the composting process

## 2.4 碳氮比和微生物菌剂接种量对堆肥养分含量的影响

表 3 为堆肥处理前后堆肥养分含量的变化情况。堆肥处理始期(处理后 1 d) T1~T9 处理总氮含量分别为 24.69 g/kg、22.63 g/kg、26.83 g/kg、28.64 g/kg、28.92 g/kg、30.92 g/kg、23.71 g/kg、24.07 g/kg 和 25.93 g/kg。由于不同碳氮比处理物料组成比例存在一定差异,因此堆肥处理始期各处理总氮含量存在一定的差异。经过 35 d 的堆肥处理后, T1、T3、T4、T5、T6、T7 处理全氮含量分别下降到 21.50 g/kg、24.21 g/kg、25.16 g/kg、27.45 g/kg、29.44 g/kg 和 23.08 g/kg,降幅为 12.92%、9.77%、12.15%、5.08%、4.79% 和 2.66%,而 T2、T8、T9 3 个处理全氮含量升高,比堆肥处理始期分别增加 17.23%、8.89%、10.10%。总体来看,随着碳氮比和微生物菌剂接种量的增加,全氮损失呈减少趋势;高碳氮比的 T8、T9 处理全氮含量甚至增加。说明在高碳氮比条件下适当增加菌剂接种量有助于减少堆肥处理过程中的氮素损失,这与贺琪等<sup>[22]</sup>、魏晓强等<sup>[23]</sup>的研究结果相似。堆肥处理结束时 T1、T2、

T4、T5、T6、T7、T8 处理有效磷含量分别为 8.56 mg/g、9.44 mg/g、7.90 mg/g、8.82 mg/g、8.89 mg/g、9.76 mg/g、7.93 mg/g,相较于堆肥处理始期分别提高 2.88%、81.89%、14.33%、27.09%、1.83%、41.04% 和 51.05%,而 T3、T9 处理分别下降 11.17%、1.36%。随碳氮比增加,堆肥有效磷含量增幅呈增加趋势;碳氮比相同情况下,接种 0.2% 微生物菌剂处理有效磷含量增幅最高,0.1% 次之,0.3% 处理有效磷含量增幅不大,甚至 T3、T9 处理有效磷含量出现降低现象; T1~T9 处理堆肥处理后速效钾含量均有不同幅度的增加,增幅分别为 8.16%、4.40%、2.82%、9.54%、5.63%、3.29%、20.13%、16.03% 和 14.79%。高碳氮比处理速效钾含量增加更为明显。同样的碳氮比,随着菌剂接种量的增加,速效钾含量增幅水平呈降低趋势,碳氮比为 27.5 时接种 0.1% 的菌剂处理有利于黄瓜秧-鸡粪堆肥过程中速效钾的转化。

## 2.5 不同处理下堆肥对黄瓜种子发芽指数 (GI) 的影响

由图 4 可以看出,处理 T1~T9 分别在 28 d、21

d、21 d、7 d、14 d、14 d、14 d、14 d 时  $GI$  值达到 80.00% 以上,中、高碳氮比处理  $GI$  明显大于低碳氮比处理;此外,同样碳氮比下,堆肥处理时间越长, $GI$  越高。利用堆肥处理结束后的物料进行试验,T1~T9 处理的  $GI$  分别为 104.62%、118.59%、99.70%、117.14%、137.68%、106.93%、108.19%、154.90%、123.03%,均大于 80.00%,达到了无害化要求。相较于低碳氮比的处理,高、中碳氮比的 6 个处理  $GI$

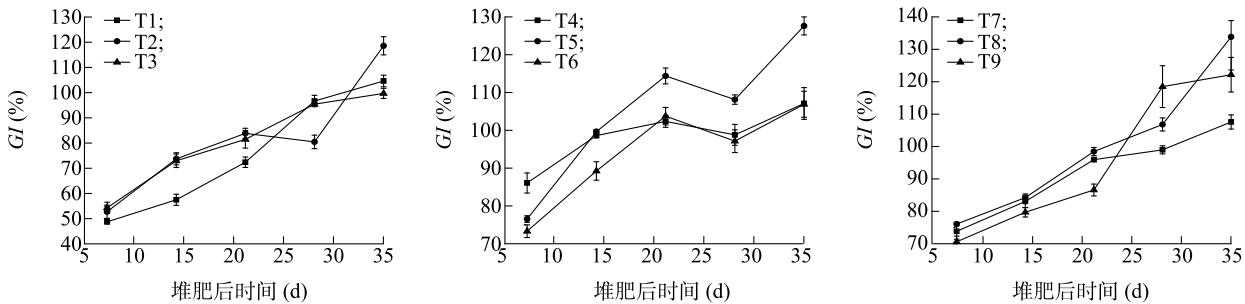
值更快达到 80.00% 以上,其中碳氮比为 22.5 的 T4 处理最快在第 7 d 达到腐熟条件。堆肥结束时  $GI$  均值随碳氮比的增加而升高,碳氮比为 27.5 的处理  $GI$  均值高于其他碳氮比处理,其中 T8 处理最高达到 134.90%,符合高建程等<sup>[24]</sup>给出的畜禽粪便与作物秸秆好氧堆肥腐熟度参考指标;另外,在堆肥结束时,接种 0.2% 菌剂处理的  $GI$  值高于接种 0.1%、0.3% 菌剂处理。

表 3 不同处理堆肥前后养分含量的变化

Table 3 Changes of nutrient content before and after composting in different treatments

项目	时间	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9
全氮(%)	堆肥处理始期	24.69±0.60d	22.63±1.87d	26.83±0.25c	28.64±0.13b	28.92±1.75b	30.92±0.08a	23.71±0.68d	24.07±0.40d	25.93±1.09c
	堆肥处理末期	21.50±3.96d	26.53±1.24ab	24.21±2.67c	25.16±1.68b	27.45±2.76ab	29.44±0.13a	23.08±0.66cd	26.21±0.59abc	28.55±2.55ab
有效磷(%)	堆肥处理始期	8.32±0.39b	5.19±0.04d	10.21±0.49a	6.91±0.76c	6.94±0.04c	8.73±0.19b	6.92±0.03c	5.25±0.98d	7.38±0.18c
	堆肥处理末期	8.56±0.45c	9.44±0.23ab	9.07±0.37abc	7.90±0.34cd	8.82±0.27bc	8.89±0.24bc	9.76±0.67a	7.93±0.26d	7.28±0.72d
速效钾(%)	堆肥处理始期	12.86±0.7cd	14.76±1.03b	14.88±0.19b	16.04±0.22a	12.26±0.89d	14.91±1.17ab	13.41±0.39c	13.91±0.21bc	12.37±0.49cd
	堆肥处理末期	13.91±0.34c	15.41±0.27b	15.30±1.17b	17.57±0.65a	12.95±0.26d	15.40±0.52b	16.11±0.45b	16.14±0.53b	14.20±0.24c

同一行不同小写字母表示不同处理间差异显著 ( $P<0.05$ )。



T1~T9 见表 2。

图 4 不同处理堆肥过程中  $GI$  的变化

Fig.4 Changes of germination indices ( $GI$ ) in composting process of different treatments

2.6 碳氮比与菌剂接种量对堆肥腐熟度 ( $T$ ) 的影响

由表 4 可知,堆肥处理结束时 T1~T9 处理  $T$  值分别为 0.51、0.42、0.49、0.39、0.31、0.29、0.28、0.26 和 0.21,说明 9 个处理均已达到腐熟要求,其中 T9 处理的  $T$  值低于其他处理,表明碳氮比为 27.5 并接种 0.3% 菌剂的处理腐熟效果最好。碳氮比与菌剂接种量对堆肥  $T$  值的影响可用方程  $T=0.855-0.0175x_1-0.054x_2$  ( $x_1$ 、 $x_2$  分别为碳氮比和菌

剂接种量)进行拟合,拟合方程的方差分析结果如表 5 所示。结果表明碳氮比×接种量的  $P$  值为 0.001,说明二者的交互作用对堆肥腐熟度影响显著。在同一接种水平下,随着碳氮比的增加,腐熟度整体显著上升;在同一碳氮比水平下,随着接种量的增加,腐熟度同样呈上升趋势。调整碳氮比到 27.5,并接种 0.3% 比例的微生物菌剂能够显著提高腐熟度,提升堆肥腐熟质量。

表 4 不同碳氮比与微生物菌剂接种量对堆肥腐熟度的影响

Table 4 Effects of different carbon-nitrogen ratios and inoculation amounts of microbial inoculants on compost maturity

处理	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9
腐熟度	0.51a	0.42b	0.49a	0.39b	0.31c	0.29c	0.28c	0.26cd	0.21d

T1~T9 见表 2。不同小写字母表示处理间  $T$  值差异显著 ( $P<0.05$ )。

表 5 不同处理下堆肥  $T$  值的多因素方差分析结果Table 5 Results of multi-factor variance analysis of  $T$  value of compost under different treatments

来源	平方和	自由度	均方	$F$ 值	$P$ 值
模型	0.257	8	0.032	62.871	0
碳氮比	0.214	2	0.107	208.820	0
菌剂接种量	0.027	2	0.013	26.106	0
碳氮比 $\times$ 菌剂接种量	0.017	4	0.004	8.279	0.001
误差	0.009	18	0.001		
总计	3.535	27			

### 3 讨论

温度是影响堆肥过程中微生物代谢活动强弱的重要因素。堆体温度 50 ℃ 以上高温的持续时间是堆肥无害化生产的重要指标,同时又影响到堆肥过程中物料有机质的降解与稳定,是堆肥腐熟程度的一项重要参数<sup>[25]</sup>。本研究中不同碳氮比和微生物菌剂接种量处理,堆体温度 $\geq 50$  ℃ 的持续时间均在 10 d 以上,达到了中国粪便无害化卫生要求<sup>[20]</sup>。其中,高碳氮比的 3 个处理比中、低碳氮比处理提前 1~2 d 进入高温阶段,且高温均值明显高于中、低碳氮比处理,这可能是由于添加较多的小麦秸秆提高堆体的通气性和碳源木质纤维素含量,促进微生物代谢活动<sup>[26]</sup>。同时,本研究还发现,随着微生物菌剂接种量的增加,堆体达到的最高温度呈上升趋势,这与劳德坤等<sup>[27]</sup>的研究结果一致。

好氧堆肥处理的本质就是微生物利用环境中的  $O_2$  降解物料中的有机质,释放  $CO_2$ 、水以及矿物质,同时降解产物又在微生物作用下生成腐殖酸的过程<sup>[28]</sup>。堆肥过程中有机质的减少量一定程度上可以体现堆肥处理腐熟进程,有机质含量下降越快,说明堆肥处理腐熟进程越快<sup>[29-30]</sup>。本试验中 9 个处理有机质均在堆肥处理后的 7 d 内快速降解,并释放大热量,这与堆体的温度变化特征相吻合。碳氮比低时,接种 0.1% 的菌剂处理有机质降解率最高,接种过多的菌剂有机质降解率下降,原因可能是在此条件下微生物活动受到碳源限制,接种过多的菌剂反而会增加对碳源的竞争,不利于有机质的降解。随着碳氮比的升高,有机质降解率显著提高,可能是高碳氮比处理中较多的小麦秸秆含量提高了堆体的通气性和碳源木质纤维素含量进而促进微生物

的生长繁殖。在高碳氮比条件下,增加微生物菌剂的接种量,能提高堆肥过程中微生物群落的丰富度,进而促进有机质的降解。即碳氮比为 27.5 时更适合微生物生长,提升堆肥过程中有机质降解率。

pH 值是堆肥过程中微生物活性的重要影响因素。有研究者指出,pH 值 6.70~9.00 最利于微生物的生长代谢活动,且随着堆肥物料的分解,堆肥 pH 值会发生动态变化<sup>[31-32]</sup>。本试验中,堆肥 pH 值总体呈现先上升后下降的趋势,堆肥处理始期 pH 为 8.04~8.16,7 d 内迅速上升,此后缓慢下降,堆制 35 d 后堆肥 pH 值为 9.24~9.73,均高于初始水平,原因在于堆肥发酵过程中,有机氮类物质被矿化与氨化导致  $NH_4^+-N$  的产生和积累,使堆肥的 pH 值迅速上升<sup>[33]</sup>,但随着堆肥处理时间的延长,氨气挥发以及硝化细菌的硝化作用释放出  $H^+$ ,会使 pH 值出现一定程度的下降<sup>[34]</sup>。本试验中,堆肥处理结束时 pH 值高于国家有机肥标准,与常瑞雪等<sup>[35]</sup>的研究结果相似。本试验所用黄瓜秧的初始 pH 值高达 8.25,是造成堆肥过程中堆肥 pH 值偏高的重要因素。胡雨彤等<sup>[36]</sup>利用硫酸来调节 pH 值较高的牛粪堆肥处理,发现添加稀硫酸能够有效降低堆肥 pH 值,缩短升温时间,促进有机质降解,提高堆肥中养分含量。有关低 pH 值调理剂对黄瓜秧等基础 pH 值较高原料堆肥处理的影响还有待进一步研究。

氮、磷、钾是植物生长所需的重要营养元素,尤其是速效养分,是植物根系养分吸收的重要来源,也是评价肥力的重要指标之一<sup>[37]</sup>。堆肥过程中总氮主要包括有机氮、铵态氮和硝态氮等,不同形式的氮在堆肥进程中可以相互转化。本试验堆肥处理结束时,T1、T3、T4、T5、T6、T7 等处理堆肥全氮含量明显下降,且随碳氮比升高全氮降幅缩小,这可能是由于

在堆肥过程中微生物要消耗氮素用于自身的生长和繁殖,低碳氮比条件下碳源限制了微生物的生长,富余的氮素会在高温及高 pH 值的环境下转化成氨气挥发导致总氮含量降低<sup>[22]</sup>。而 T2、T8、T9 3 个处理堆肥处理结束时全氮含量升高,可能是在堆肥过程中,微生物降解有机物释放出水分和二氧化碳,使堆肥干物质减小幅度大于氨气挥发幅度而出现“浓缩效应”<sup>[38]</sup>造成的。此外,有报道指出,固氮菌与粗纤维降解菌之间具有协同作用,接种粗纤维降解菌可促进固氮细菌的生长,提高堆肥氮素含量<sup>[31]</sup>。堆肥处理结束时,各处理有效磷和速效钾含量比堆肥初期增加,与张桥等<sup>[39]</sup>的研究结果一致,其原因可能是堆肥过程中磷素和钾素含量相对稳定,不会挥发损失,在堆肥过程中物料中固有 P、K 充分活化为速效养分,加上“浓缩效应”的影响,使有效磷和速效钾的含量增加<sup>[40-41]</sup>,然而 T3、T9 处理的有效磷含量下降,可能是这 2 个处理在堆肥过程中产生了渗滤液,部分有效磷随着渗滤液流失,同时在堆肥处理后期部分有效磷会转化为缓效磷,这也是导致堆肥处理后期有效磷含量降低的重要原因之一<sup>[39]</sup>。此外,本试验各处理速效钾含量随菌剂接种量的增加出现降低的现象,原因可能是微生物生长代谢过程中将速效钾分解转化<sup>[42]</sup>,且接种较多菌剂会加大有机氮的氨化速率,提高堆肥的 pH 值,进而导致堆肥中营养元素活化为速效养分的速率降低<sup>[36]</sup>。

种子发芽指数兼顾毒性物质对种子发芽与种子根系发育的影响,是目前评估堆肥性能最可靠的指标之一。一般认为,GI 大于 50%时,堆肥对植物基本无毒害;GI 大于 80%时,表示堆肥达到完全腐熟<sup>[43]</sup>。本试验中,堆肥结束时,各处理 GI 均大于 80%,达到了完全腐熟标准,但菌剂接种量 0.2%处理的 GI 高于菌剂接种量 0.1%及 0.3%处理,可能的原因是微生物在降解有机物质的同时会产生次级代谢产物( $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ,有机酸等),对种子的萌发产生不利影响<sup>[44-46]</sup>。接种 0.3%的菌剂会加速有机质降解,促进高温形成,但同时会增加次级产物生成,而过多的次级产物可能会抑制种子发芽;而接种 0.1%菌剂处理有毒物质的分解及次级产物的形成缓慢,致使其 GI 低于 0.2%接菌量处理。

堆肥处理是一个复杂的过程<sup>[47-49]</sup>,单一指标无法全面反映堆肥的腐熟特征。陈雪娇等<sup>[50]</sup>认为堆肥处理结束时,碳氮比小于 20 则可认为堆肥已经达

到腐熟。但是鉴于堆肥原料碳氮比的差异,不同物料堆肥结束时,碳氮比差异较大,因此单纯从碳氮比降到某个值作为堆肥腐熟指标不具有普适性<sup>[51]</sup>。因此,更多学者利用堆肥处理结束与开始时碳氮比比值( $T$ )作为堆肥腐熟程度的判断指标。与碳氮比相比,此方法受物料自身性质的影响较小<sup>[43]</sup>。本试验中,35 d 堆肥处理结束后,各处理  $T$  均小于 0.60,可以认为全部达到腐熟。且随着碳氮比和微生物菌剂接种量的增加, $T$  呈减少趋势,说明黄瓜秧与鸡粪进行堆肥时,较低的碳氮比与菌剂接种量不利于堆肥腐熟,这是因为碳是微生物生长繁殖的能源物质,碳氮比低,碳素不足,多余的氮素会以氨气和可溶性碱性盐的形式流失,造成氮素的损失并导致堆体产生恶臭<sup>[52-53]</sup>。

## 4 结论

高碳氮比(27.5)处理有利于增强微生物代谢活动,加快堆肥处理启动速度,提高堆体温度、有机质降解率、养分保留量及种子发芽指数。

接种 0.3%微生物菌剂处理能够缩短堆体进入高温时间,提高堆体温度,加速有机质降解,但堆肥有效磷、速效钾的保留效果以及堆肥最终种子发芽指数均不如接种量为 0.2%与 0.1%的处理。

本试验所有处理的腐熟指标( $T$ )均小于 0.60,可以认为所有处理堆肥全部腐熟,但碳氮比与菌剂接种量的增加,能显著提高堆肥的腐熟程度。

综上,本试验 9 个处理的堆肥均达到了腐熟要求,在以黄瓜秧与鸡粪为原料进行堆肥生产时,建议适宜的碳氮比为 27.5,微生物菌剂接种量为 0.1%~0.2%。

## 参考文献:

- [1] 吴中勇,李延荣,董中丹. 我国蔬菜行业高质量发展探析[J]. 长江蔬菜,2023(20):80-82.
- [2] 钟佳芸. 畜禽粪便资源化技术研究[D]. 成都:西南交通大学,2016.
- [3] 孙可欣,国冉冉,王子铭,等. 蔬菜废弃物资源化高效利用方式分析[J]. 中国农学通报,2023,39(5):92-99.
- [4] 黎运红. 畜禽粪便资源化利用潜力研究[D]. 武汉:华中农业大学,2015.
- [5] MOORE P A, DANIEL T C, EDWARDS D R, et al. Effect of chemical and microbial amendments on ammonia volatilization from composting poultry litter[J]. Journal of Environmental Quality,



- 2004,33(2):728-734.
- [6] WONG J W C, BUNDELA P S, SELVAM A, et al. Evaluation of thermophilic fungal consortium for organic municipal solid waste composting[J]. *Bioresource Technology*, 2014, 168:214-221.
- [7] 王若斐,刘超,操一凡,等. 不同碳氮比猪粪堆肥及其产品肥效[J]. *中国土壤与肥料*, 2017(6):127-134, 154.
- [8] 张红玉. 碳氮比对厨余垃圾堆肥腐熟度的影响[J]. *环境工程*, 2013,31(2):87-91.
- [9] 刘文杰,王黎明,沈玉君,等. 碳氮比对蔬菜废弃物好氧发酵腐熟度及臭气排放的影响[J]. *环境工程*, 2020,38(6):233-239.
- [10] 黄晓凤,杨旭生,王启贵,等. 碳氮比对鹅粪渣-玉米秸秆混合堆肥效果的影响[J]. *西南农业学报*, 2019,32(5):1127-1132.
- [11] YOGEV A, RAVIV M, HADAR Y, et al. Induced resistance as a putative component of compost suppressiveness[J]. *Biological Control*, 2010,54(1):46-51.
- [12] 赵彬涵,孙宪均,黄俊,等. 微生物在有机固废堆肥中的作用与应用[J]. *微生物学通报*, 2021,48(1):223-240.
- [13] DUAN M L, ZHANG Y H, ZHOU B B, et al. Effects of bacillus subtilis on carbon components and microbial functional metabolism during cow manure-straw composting[J]. *Bioresource Technology*, 2020,303:122868.
- [14] 李季,任莉,付博. 堆肥微生物及堆肥接种研究进展[C]//中国微生物学会农业微生物学术委员会. 第十一届全国土壤微生物学术讨论会暨第六次全国土壤生物与生物化学学术研讨会,第四届全国微生物肥料生产技术研发研讨会论文集(摘要)集. 北京:中国微生物学会农业微生物学术委员会,2010:44-52.
- [15] 樊斌,李明阳. 中国黄瓜种植收益影响因素贡献率的比较分析[J]. *北方园艺*, 2023(15):135-143.
- [16] 刘尚斌,郑祥洲,王煌平,等. 蝇蛆预处理及辅料添加对鸡粪堆肥氨挥发和温室气体排放的影响[J/OL]. *农业环境科学学报*. <https://link.cnki.net/urlid/12.1347.s.20231030.1521.004>.
- [17] 韩雪,常瑞雪,杜鹏祥,等. 不同蔬菜种类的产废比例及性状分析[J]. *农业资源与环境学报*, 2015,32(4):377-382.
- [18] 马若男,李丹阳,仝传仁,等. 碳氮比对鸡粪堆肥腐熟度和臭气排放的影响[J]. *农业工程学报*, 2020,36(24):194-202.
- [19] VUORINEN A H, SAHARINEN M H. Evolution of microbiological and chemical parameters during manure and straw co composting in a drum composting system[J]. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 1997, 66(1):19-29.
- [20] 中华人民共和国卫生部. 粪便无害化卫生要求:GB 7959-2012[S]. 北京:中国标准出版社,2012.
- [21] 中华人民共和国农业农村部. 有机肥料:NY/T 525-2021[S]. 北京:中国农业出版社,2021.
- [22] 贺琪,李国学,张亚宁,等. 高温堆肥过程中的氮素损失及其变化规律[J]. *农业环境科学学报*, 2005,24(1):169-173.
- [23] 魏晓强,钟启文,张广楠,等. 添加微生物菌剂对菊芋秸秆发酵的影响[J]. *江苏农业科学*, 2020,48(6):246-251.
- [24] 高建程,于金莲,石登荣,等. 不同预堆期对牛粪堆肥进程的影响研究[J]. *农业环境科学学报*, 2008,27(3):1214-1218.
- [25] 刘小鸿,李磊,郭小平,等. 翻堆和补水工艺对绿化废弃物堆肥腐熟度的影响[J]. *科学技术与工程*, 2018,18(7):281-287.
- [26] 嘎毕拉,罗维. 添加玉米秸秆对绿花菜尾菜堆肥植物毒性的影响[J]. *环境科学学报*, 2022,42(5):395-404.
- [27] 劳德坤,张陇利,李永斌,等. 不同接种量的微生物秸秆腐熟剂对蔬菜副产物堆肥效果的影响[J]. *环境工程学报*, 2015,9(6):2979-2985.
- [28] 张道利. 农业废物堆肥降低底泥重金属生物有效性及理化参数影响研究[D]. 长沙:湖南大学,2017.
- [29] 霍培书,陈雅娟,程旭艳,等. 添加VT菌剂和有机物料腐熟剂对堆肥的影响[J]. *环境工程学报*, 2013,7(6):2339-2343.
- [30] 陈雅娟,李季,杨耀峰. 鸡粪锯末好氧堆肥过程中主要指标及反硝化细菌动态变化[J]. *中国农业大学学报*, 2016,21(7):67-75.
- [31] 冯蓉,刘丽,杨胜竹,等. 好氧高温堆肥氮素损失及保氮技术研究进展[J]. *山地农业生物学报*, 2020,39(6):47-52.
- [32] ODIMBA N, ONWOSI C, IGBOKWE V, et al. Composting technology in waste stabilization: on the methods, challenges and future prospects[J]. *Journal of Environmental Management*, 2017, 190:140-157.
- [33] 次仁吉保,赵联芳,王成,等. 添加菌剂和不同C/N对葡萄枝条堆肥效果的影响[J]. *安徽农业科学*, 2019,47(2):71-74.
- [34] 金树权,周金波,徐志豪,等. 规模化畜禽养殖场沼渣好氧堆肥技术[J]. *浙江农业科学*, 2015,56(9):1491-1494.
- [35] 常瑞雪,王骞,甘晶晶,等. 易降解有机质含量对黄瓜秧堆肥腐熟和氮损失的影响[J]. *农业工程学报*, 2017,33(1):231-237.
- [36] 胡雨彤,时连辉,刘登民,等. 添加硫酸对牛粪堆肥过程及其养分变化的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2014,20(3):718-725.
- [37] 朱宣霖,朱长伟,陈琛,等. 轮耕对豫北潮土速效养分及可溶性有机碳结构特性的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2022,30(4):683-693.
- [38] LI Y X, LIU B, ZHANG X L, et al. Effects of Cu exposure on enzyme activities and selection for microbial tolerances during swine-manure composting[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2015, 238:512-518.
- [39] 张桥,吴启堂,黄焕忠,等. 未消化城市污泥与稻草堆肥过程中的养分变化研究[J]. *农业环境科学学报*, 2002,21(6):489-492.
- [40] 刘源,罗渊,刘家辉,等. 牛粪好氧堆肥过程中植物毒性来源解析[J]. *山西农业大学学报(自然科学版)*, 2022,42(5):

- 118-128.
- [41] 施 窈,张小娥,沙依甫加玛丽,等. 牛粪堆肥不同处理全 N、P、K 及有机质含量的动态变化[J]. 中国牛业科学,2010,36(4):26-29.
- [42] 杨 雪,连 宾,朱晓玲,等. 添加钾矿粉对鸡粪堆肥中 N、P 和 K 含量的影响[J]. 地球与环境,2012,40(2):286-292.
- [43] 王 砚,李念念,朱端卫,等. 水稻秸秆预处理对猪粪高温堆肥过程的影响[J]. 农业环境科学学报,2018,37(9):2021-2028.
- [44] 郭秋月,常瑞雪,孙 霞,等. 初始物料水溶性有机碳含量对番茄秧堆肥进程的影响[J]. 中国蔬菜,2018,38(5):42-47.
- [45] 聂文军,嘎毕拉,金忠民,等. 对比研究槽式堆肥处理不同畜禽粪便对植物毒性的影响[J]. 环境科学学报,2020,40(7):2557-2570.
- [46] 罗 渊,袁 京,李国学,等. 种子发芽试验在低碳氮比堆肥腐熟度评价方面的适用性[J]. 农业环境科学学报,2016,35(1):179-185.
- [47] 张 亚,师杨杰,姚均伟,等. 村镇有机生活垃圾处理产物对青菜品质及土壤性质的影响[J]. 江苏农业学报,2023,39(1):88-96.
- [48] 袁 远,张金辉,李银月,等. 蔬菜废弃物好氧堆肥处理研究进展[J]. 江苏农业科学,2022,50(19):29-35.
- [49] 赵欧亚,侯利敏,孙世友,等. 不同商品发酵菌剂对牛粪堆肥微生物群落的影响[J]. 江苏农业科学,2022,50(14):239-244.
- [50] 陈雪娇,王宇蕴,徐 智,等. 不同磷石膏添加比例对稻壳与油枯堆肥过程的影响及基质化利用的评价[J]. 农业环境科学学报,2018,37(5):1001-1008.
- [51] 颜 瑾,李 燕,熊 仁,等. 农村不同类型有机固体废弃物混合堆肥配比优化[J]. 环境工程学报,2018,12(7):2106-2113.
- [52] 董存明,张 曼,邓小垦,等. 不同碳氮比条件下鸡粪和椰糠高温堆肥腐熟过程研究[J]. 生态与农村环境学报,2015,31(3):420-424.
- [53] 游宏建,张美君,安明远,等. 不同堆肥材料及其碳氮比对餐厨废弃物堆肥进程中养分及微生物的影响[J]. 西南农业学报,2022,35(7):1631-1639.

(责任编辑:石春林)