

腐解菌剂促进有机物料堆沤腐解及腐熟产品的田间应用效果研究

李阳阳¹, 马巍¹, 迟畅¹, 徐铭鸿¹, 王胤平¹, 路杨², 陈帅民¹,
姚凡云^{1,3}, 于洋⁴, 冯健⁴, 侯云鹏¹, 范作伟¹, 吴海燕¹

(1. 吉林省农业科学院农业资源与环境研究所, 长春 130033; 2. 吉林省农业科学院植物保护研究所, 长春 130033;
3. 中农微生物科技(吉林)有限公司, 长春 130605; 4. 吉林省农投土地资源开发有限公司, 长春 130117)

摘要: 为明确冷凉条件下腐解菌剂对有机物料堆沤的促腐作用及腐熟产品的应用效果, 以牛粪和玉米秸秆为原料, 添加腐解菌剂进行堆腐效果对比试验, 对腐熟产品进行应用效果验证。结果表明, 牛粪与玉米秸秆堆腐并添加腐解菌剂的处理(CSM)能加速堆体升温并延长高温期, 在第6天时堆体温度达到62.3℃, 高温(>50℃)持续时间为19 d, 同时可提高腐熟产品总腐殖酸含量和种子发芽指数。与原始牛粪(CK)相比, CSM处理的全氮、全磷和全钾含量分别增加24.9%、42.6%和25.0%。腐熟产品应用后, CSM处理的土壤有机质、碱解氮、速效磷和速效钾含量与未施用腐熟产品处理相比分别增加8.9%、2.4%、3.8%和20.6%。腐解菌剂能够促进有机物料快速腐解并提高堆肥质量。

关键词: 玉米; 腐解菌剂; 有机物料; 低温; 堆腐

中图分类号: S513.062

文献标识码: A

Effect of Microbial Agent on Accelerating Organic Materials Composting and Field Application of Composted Products

LI Yang-yang¹, MA Wei¹, CHI Chang¹, XU Ming-hong¹, WANG Yin-ping¹, LU Yang², CHEN Shuai-min¹,
YAO Fan-yun^{1,3}, YU Yang⁴, FENG Jian⁴, HOU Yun-peng¹, FAN Zuo-wei¹, WU Hai-yan¹

(1. Institute of Agricultural Environment and Resources Research, Jilin Academy of Agricultural Sciences, Changchun 130033; 2. Institute of Plant Protection, Jilin Academy of Agricultural Sciences, Changchun 130033; 3. Zhongnong Microbiology Technology(Jilin) Co., Ltd., Changchun 130605; 4. Jilin Agricultural Investment Land Resources Development Co., Ltd., Changchun 130117, China)

Abstract: In order to clarify the promoting effect of microbial agent on organic materials composting and field application effect in cold conditions, this study took cattle manure and maize straw as raw materials with the addition of microbial agent, and studied effects of composting and application. The results showed that the composting of cattle manure and straw with addition of microbial agent(CSM) accelerated the temperature rise and extend the high-temperature period, the temperature reached 62.3℃ on the 6th day, and the high-temperature period(>50℃) lasted 19 days, which increased the total humic acid content and seed germination index. Compared with the original cattle manure, the content of total nitrogen, total phosphorus, and total potassium in CSM increased by 24.9%, 42.6%, and 25.0%, respectively. When the composted products were applied to maize field, CSM treatment increased the content of soil organic matter, alkali-hydrolyzable nitrogen, available phosphorus, and available potassium by 8.9%, 2.4%, 3.8%, and 20.6%, respectively, compared with the treatment without composted products. Therefore, the microbial agent can promote the rapid decomposition of organic materials and improve the quality of compost.

Key words: Maize; Microbial agent; Organic materials; Low temperature; Composting

录用日期: 2025-02-21

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFD1701604)、吉林省重大科技专项(20240203001NC)、吉林省科技发展计划项目(20220203104SF)

作者简介: 李阳阳(1993-), 女, 硕士, 主要从事农业微生物基础与应用研究。E-mail: 542094644@qq.com

马巍为并列第一作者。

吴海燕和范作伟为本文通信作者。

随着畜禽业规模化和集约化的迅速发展,粪便排放量逐渐增加。目前,粪便的处理方式主要有直接还田、生产沼气、生产饲料和肥料化,资源化利用率仅有20%左右,其余部分则直接向环境中排放^[1]。畜禽粪便含有多种病原微生物、寄生虫卵等有害物质,未经处理而随意排放会造成土壤、大气、地表水和地下水污染,严重威胁人畜健康^[2]。另外,我国每年产生约7亿t的农作物秸秆,大多数农作物秸秆被焚烧或弃置堆积,只有少部分被用为饲料等用途,造成了严重的环境污染和资源浪费^[3-4]。

堆腐是对这些农牧业废弃物进行资源化利用的主要方式之一,具有成本低且操作方便等特点^[5]。我国东北地区秋冬季节温度较低,牛粪属于冷性堆肥材料,牛粪秸秆堆腐存在堆腐反应启动困难、堆腐周期长、腐熟效率低等问题,影响其肥料化利用。大量研究表明,在牛粪与秸秆堆腐过程中,加入微生物菌剂能加速高温堆腐进程和提高堆肥质量。李牧等^[6]研究发现,在北方寒冷地区,牛粪秸秆堆肥中添加自制低温微生物菌剂,能够缩短堆体腐熟时间,并提高堆肥腐熟度,进而提高种子发芽率。张书敏等^[7]将筛选并研制出的低温复合菌剂,接种到玉米秸秆与牛粪堆肥发酵中,能有效促进低温环境下堆体的快速升温,使碳氮比、有机质含量符合有机肥要求。李鑫等^[8]研究表明,在牛粪与玉米秸秆及水稻秸秆堆肥过程中,添加发酵菌剂能加快堆肥腐熟进程,提高种子发芽指数。

本研究针对东北地区秋冬季畜禽粪便堆腐发酵迟缓、不易起温等问题,将自行研制的腐解菌剂接种到牛粪与玉米秸秆堆腐试验中,在不同阶段测定堆体的温度、pH值、 E_4/E_6 、总腐殖酸含量和小白菜种子发芽指数;堆腐结束后,测定堆体的全氮、全磷、全钾含量,并将腐熟后的产品应用到玉米田,收获后测定土壤的有机质、碱解氮、速效磷和速效钾含量,以明确低温腐解菌剂促进有机物料腐熟后对玉米田土壤养分的改善作用。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验所用新鲜牛粪来源于长春市宽城区合隆镇的养牛场,玉米秸秆来源于长春市宽城区合隆镇附近农田。腐解菌剂为本实验室自行筛选研制的液体菌剂,包括长枝木霉(*Trichoderma longibrachiatum*)、嗜热毁丝霉(*Myceliophthora thermophila*)和枯草芽孢杆菌(*Bacillus subtilis*),3株菌株单独培养,按体积比1:1:1混合而成,总有效活菌数 ≥ 1.0 亿cfu/mL。

1.2 试验设计

试验于2023年冬季至2024年秋季在长春市宽城区合隆镇进行。堆腐试验共设置3个处理,包括牛粪(CK)、牛粪+玉米秸秆(CS)、牛粪+玉米秸秆+腐解菌剂(CSM)。玉米秸秆粉碎成5~10 cm小段,秸秆与牛粪按照体积比1:1进行堆腐,腐解菌剂的添加量为秸秆重量的0.2%,所有处理添加0.5%(秸秆重量)的尿素,并调节含水量至50%~60%。

堆腐时间共40 d,第7天和第15天翻堆1次,每个堆体插入3个表头式热敏温度计(25 cm)监测温度。在堆腐的第3天、第9天、第19天和第40天,于堆体的上部、中部、下部,按五点取样法进行取样,混合均匀后测定不同堆腐天数各处理的理化性质^[9]。

堆腐完成后,于2024年4月设置与其对应的田间应用效果试验,共4个处理,包括未施用腐熟产品(OS)、施用腐熟牛粪(CK)、施用腐熟“牛粪+玉米秸秆”(CS)、施用腐熟“牛粪+玉米秸秆+腐解菌剂”(CSM)。每个处理面积为120 m²,供试玉米品种为迪卡159,播种前将所有肥料一次性撒施(15 t/hm²),其他与当地常规管理措施一致。

1.3 测定指标与方法

每天9:00记录堆体温度和环境温度,pH值利用pH计测定^[10],胡敏酸 E_4/E_6 的测定参照谷洁等方法进行^[11],总腐殖酸含量采用焦磷酸钠($\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$)浸提-重铬酸钾($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$)容量法测定^[12]。全氮测定采用凯氏定氮法,全磷测定采用钒钼黄比色法,全钾测定采用火焰光度法,具体操作按《NY/T 525-2021 有机肥料》中的方法进行^[13]。种子发芽指数测定参照标准进行,所选择的种子为小白菜种子。土壤有机质、碱解氮、速效磷和速效钾含量分别采用重铬酸钾容量法、碱解扩散法、钼锑抗比色法和火焰光度法测定^[14]。

1.4 数据处理与分析

采用SPSS 22.0对试验数据进行统计分析,采用Sigma plot 12.5制图。

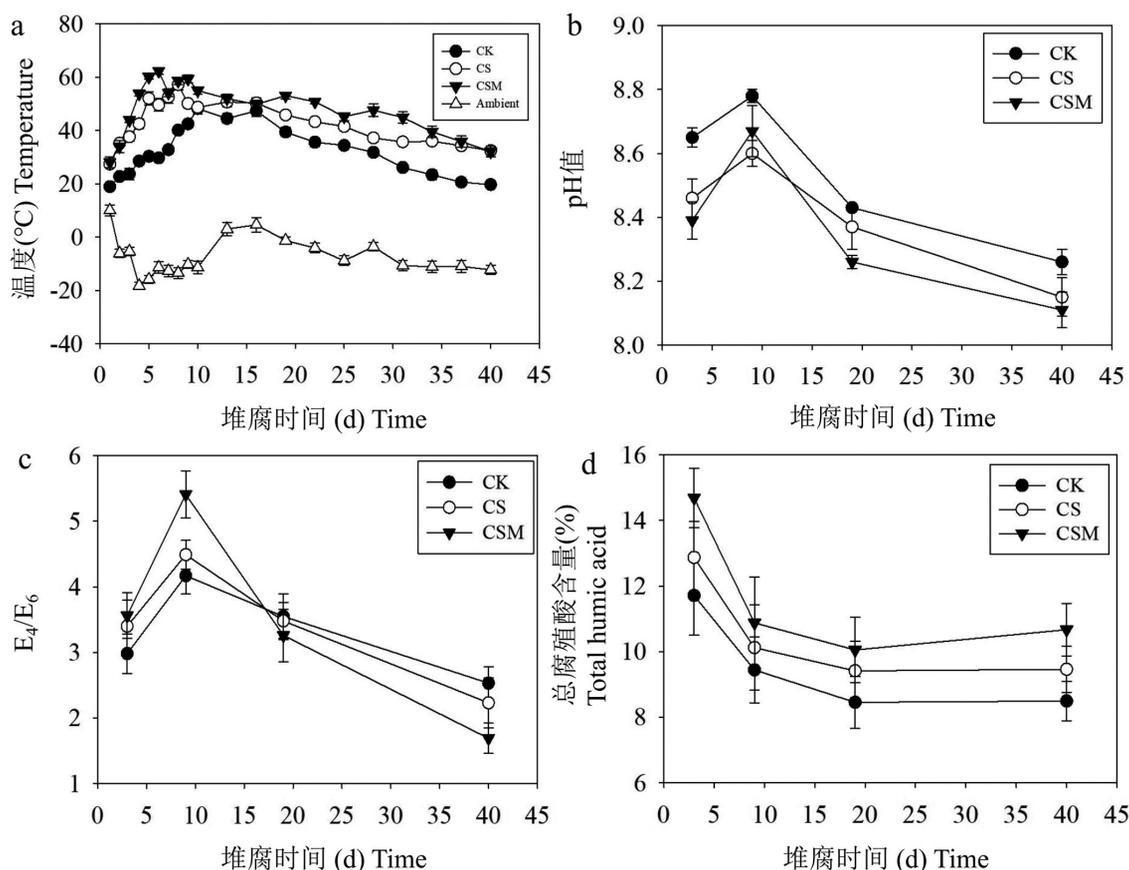
2 结果与分析

2.1 堆腐过程中温度、pH值、 E_4/E_6 和总腐殖酸含量的变化

牛粪与玉米秸秆堆腐并添加腐解菌剂的处理能够快速达到高温期,高温期持续时间也有所延长,堆体达到的最高温度值也最大(图1)。堆腐过程中的环境温度均在5℃以下,最低温度达到-18℃。堆腐开始后,各处理的堆体温度先升高后降低,CK处理经过8 d温度达到40℃以上,最高温度为48.2℃;CS

和CSM处理分别经过5 d和4 d温度达到50℃以上,持续高温时间(>50℃)分别为10 d和19 d,其中最高温度分别为57.2℃和62.3℃。在整个堆腐期间,各处理pH值均表现出先上升再下降的趋势,pH值为8.11~8.78,在第9 d时各处理组的pH达到峰值,此后逐渐下降;堆腐结束时CK、CS和CSM处理的pH值分别为8.26、8.15和8.11。堆腐过程中 E_4/E_6 值呈先升高后降低的总体变化趋势,在堆腐第9 d时各处理 E_4/E_6 值达到最大,其中CSM处理的 E_4/E_6 的峰值最

高;在堆腐结束时,CK、CS和CSM处理的 E_4/E_6 值分别为2.53、2.23和1.69,CSM处理的 E_4/E_6 值最低,下降幅度最大。堆腐过程中总腐殖酸含量总体呈下降趋势,在堆腐第19 d时各处理总腐殖酸含量较低,CSM处理的下降幅度最大,CK和CS处理的总腐殖酸含量处于较平稳的状态,CSM处理的总腐殖酸含量略有升高;堆腐结束时CK、CS和CSM处理的总腐殖酸含量分别为8.49%、9.46%和10.67%。



注:a表示堆腐过程中温度的变化;b表示堆腐过程中pH值的变化;c表示堆腐过程中 E_4/E_6 值的变化;d表示堆腐过程中总腐殖酸含量的变化。

CK表示牛粪;CS表示牛粪+玉米秸秆;CSM表示牛粪+玉米秸秆+腐解菌剂;Ambient表示环境温度。下图、下表同。

Note: a: The change of temperature during composting process; b: The change of pH during composting process; c: The change of E_4/E_6 during composting process; d: The change of total humic acid during composting process. CK: cattle manure; CS: cattle manure + maize straw; CSM: cattle manure + maize straw + microbial agent; Ambient: ambient temperature. The same below.

图1 堆腐过程中温度、pH值、 E_4/E_6 值和总腐殖酸含量的变化

Fig.1 Changes of temperature, pH, E_4/E_6 and total humic acid during composting process

2.2 堆腐过程中种子发芽指数的变化

随着堆腐时间的延长,各处理的种子发芽指数(GI)逐渐提高(图2)。堆腐结束后,CK、CS和CSM处理的发芽指数分别为73.5%、80.1%和91.1%。与CK相比,CS和CSM处理发芽指数分别提高6.6和17.6个百分点。结果表明,添加腐解菌剂有利于促进堆肥腐熟程度,提高种子发芽指数。

2.3 腐熟产品中全氮、全磷、全钾含量的变化

腐熟产品中各处理的全氮、全磷、全钾含量均有所增加(表1)。与原始牛粪相比,CK、CS和CSM处理的全氮含量分别增加12.7%、15.2%和24.9%,全磷含量分别增加18.0%、37.7%和42.6%;全钾含量分别增加13.4%、17.9%和25.0%,CSM处理的养分含量增幅最大。

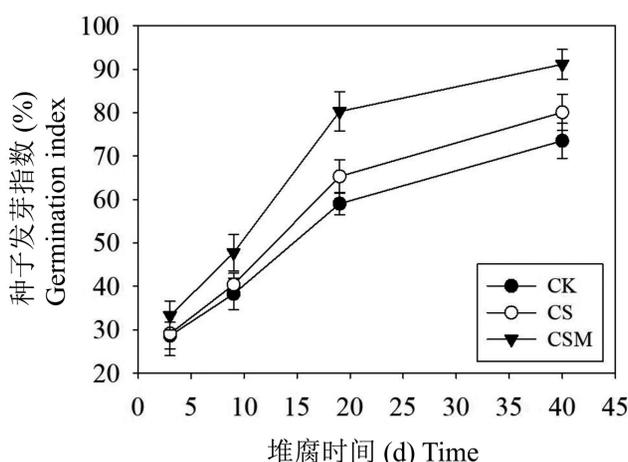


图2 堆腐过程中种子发芽指数的变化

Fig.2 Changes of GI during composting process

表1 原始牛粪和腐熟产品中全氮、全磷、全钾的含量

Table 1 Contents of total nitrogen, total phosphorus and total potassium in raw cattle manure and composted products %

处理 Treatment	全氮 Total nitrogen	全磷 Total phosphorus	全钾 Total potassium
OM	1.65±0.08 C	0.61±0.04 C	1.12±0.05 B
CK	1.86±0.10 B	0.72±0.05 B	1.27±0.07 A
CS	1.90±0.10 AB	0.84±0.04 A	1.32±0.06 A
CSM	2.06±0.06 A	0.87±0.03 A	1.40±0.08 A

注:OM表示原始牛粪。同列数据后不同字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。下表同。

Note: OM, raw cattle manure. Values followed by different letters in the same column indicate significant difference among different treatments($P<0.05$). The same below.

2.4 腐熟产品应用到田间对土壤养分的影响

腐熟产品应用到田间,各处理的土壤养分含量如表2所示。与未施用腐熟产品处理(OS)相比,CK、CS和CSM处理的有机质含量分别增加5.5%、8.1%

和8.9%;碱解氮分别增加1.7%、2.9%和2.4%;速效磷分别增加0.7%、3.3%和3.8%;速效钾分别增加3.8%、17.2%和20.6%,CSM处理的增加幅度最大。

表2 未施用腐熟产品和施用腐熟产品的土壤养分含量

Table 2 Soil nutrient contents of without and with the application of composted products

处理 Treatment	有机质(g/kg) Organic matter	碱解氮(mg/kg) Alkali-hydrolyzable nitrogen	速效磷(mg/kg) Available phosphorus	速效钾(mg/kg) Available potassium
OS	27.2±0.4 B	139±4 A	25.4±0.6 A	306±6 C
CK	28.7±0.6 AB	141±3 A	25.6±0.6 A	318±8 C
CS	29.4±0.9 A	143±4 A	26.2±0.5 A	359±4 B
CSM	29.6±0.9 A	142±3 A	26.4±0.7 A	369±2 A

注:OS表示未施用腐熟产品。

Note: OS, No application of composted products.

3 结论与讨论

在堆腐过程中,温度的变化反映了堆体内微生物活性变化,也是判断堆肥腐熟度的重要指标^[15]。

大量研究表明,堆腐过程中,添加外源微生物菌剂能够有效促进堆体快速升温加快堆腐进程^[16]。本研究中,“秸秆+牛粪”处理可改善堆体通气状况,促进微生物分解活性,同时分解秸秆能产生更多的热量;加

入腐熟菌剂后,促进秸秆分解,从而进一步提高堆腐温度并延长高温持续时间。高温有利于物料的氧化分解和杀死病原菌,提高腐熟质量。

pH值的变化能够反映出堆腐过程中微生物活动的剧烈程度,进而体现出堆体发酵速度的快慢^[17]。杨森^[18]、杨明珠等^[19]研究表明,堆腐过程中的pH值呈先升高后降低趋势。本研究中,各堆体在第9天时pH值达最大值,然后开始逐渐降低,这可能是因为在堆腐前期微生物氨化作用较强,有机氮大量转变为NH₃导致pH值上升。添加腐解菌剂的处理堆体pH值上升速度较快,可能与菌剂加速堆体升温导致的氨化作用强烈有关^[20]。堆腐后期有机物分解减少、蛋白质等含氮物质减少、氨气的挥发及有机酸产生等原因导致各处理堆体的pH值下降^[21]。

E_d/E₆通常反应堆腐过程中腐殖质的缩合度和芳构化程度,其值越低,腐殖质的缩合度和芳构化程度越高,即更稳定^[22]。本研究中,牛粪与玉米秸秆堆腐过程中添加腐解菌剂处理的E_d/E₆值呈先升高后降低的变化趋势^[23-24]。其中,添加菌剂处理中的E_d/E₆变化幅度最大,这可能是因为在堆腐前期,由于高温条件促进了有机物的矿化,从而释放更多的小分子腐殖质,而这些底物又促进了堆腐后期腐殖质的缩合和芳构化作用。

种子发芽指数可以判断堆肥的植物生理毒性,也是衡量腐熟度的重要指标^[25]。周万海等^[26]研究表明,堆腐结束时,接种复合菌剂处理的GI值达到89%,CK处理为81%,接种菌剂后提高8个百分点。刘东海等发现,堆腐30d后,添加菌剂的GI值最高达87.3%,未加菌剂处理为68.5%,添加菌剂后提高18.8个百分点。本研究堆腐结束时,牛粪与玉米秸秆堆腐并添加菌剂的处理GI值为91.1%,CK和CS处理的GI值分别为73.5%和80.1%,添加菌剂后的GI值最高,与CK相比提高17.6个百分点。当GI值达到80%时,可认为堆腐产品已没有植物毒性或已经腐熟,未腐熟产品的植物毒性主要来自于小分子有机酸、大量的NH₃和多酚等物质,本研究中的腐解菌剂表现出了很好的促腐效果。

堆腐过程中氮素有很多损失途径,包括NH₃挥发、硝化作用和反硝化作用过程中产生的含氮气体挥发等^[27]。其中,NH₃的流失是氮素耗损最严重的方式。有研究表明,NH₃挥发主要发生在升温期和高温期,堆腐后,NH₃的硝化固定作用成为主要的反应,并且在堆腐过程中有机物减少、干物质质量降低导致堆体大小和质量缩减,由于养分的“浓缩效应”,所以,在堆腐结束后全氮含量有所增加。在堆

腐过程中,由于P、K两种元素不会以挥发形式损失,其含量相对比较稳定,其绝对含量在发酵过程中通常不会随着发酵的进行出现明显的变化,因此,全磷和全钾的含量增加是指相对含量的增加。物料经腐熟后,有机物质通过微生物的活动以CO₂和H₂O的形式散失或者消耗,堆体的体积和质量都将减少,所以造成全磷和全钾含量在堆腐结束后其含量相对增加。同时,秸秆中富含大量P、K元素,秸秆分解后会释放到堆体中,因此,牛粪与秸秆处理的腐熟产品(CS和CSM)的全氮、全磷和全钾含量要高于牛粪单独腐熟的产品。而且,应用到田间以后,添加腐解菌剂的牛粪与秸秆腐熟产品具有较高的腐熟度和养分含量,因此,对田间土壤养分含量的促进效果最为明显。

本研究表明,在东北地区秋冬季节较低温度下,本实验室研制的腐解菌剂能够促进有机物料快速腐解,延长高温持续时间,并提高堆体养分含量和种子发芽指数,进而提高堆肥质量。堆沤腐熟产品对于玉米田土壤养分状况也有较好的改善和促进作用。

参考文献:

- [1] 李昌宁,苏明,姚拓,等.微生物菌剂对猪粪堆肥过程中堆肥理化性质和优势细菌群落的影响[J].植物营养与肥料学报,2020,26(9):1600-1611.
LI C N, SU M, YAO T, et al. Effects of microbial inoculation on compost physical and chemical properties and dominant bacterial communities during composting of pig manure[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2020, 26(9): 1600-1611. (in Chinese)
- [2] 王晓娟,李博文,刘微,等.不同微生物促腐剂在鸡粪好氧堆肥中的应用研究[J].水土保持学报,2011,25(1):238-241.
WANG X J, LI B W, LIU W, et al. Effects of different microorganisms on chicken manure compost[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2011, 25(1): 238-241. (in Chinese)
- [3] 陈亮,赵兰坡,赵兴敏.秸秆焚烧对不同耕层土壤酶活性、微生物数量以及土壤理化性状的影响[J].水土保持学报,2012,26(4):118-122.
CHEN L, ZHAO L P, ZHAO X M. Effects of straw burning on soil enzyme activity, soil microbial quantity and physical and chemical properties of soil in different plough layer[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2012, 26(4): 118-122. (in Chinese)
- [4] 李阳阳,陈帅民,范作伟,等.水稻秸秆降解复合菌系的筛选构建及其田间应用效果[J].植物营养与肥料学报,2021,27(12):2083-2093.
LI Y Y, CHEN S M, FAN Z W, et al. Construction and screening of complex microbial system for efficient degradation of rice straw and their application effects under field condition[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2021, 27(12): 2083-2093. (in Chinese)
- [5] 赵秀玲,朱新萍,罗艳丽,等.温度与秸秆比例对牛粪好氧堆肥的影响[J].环境工程学报,2014,8(1):334-340.
ZHAO X L, ZHU X P, LUO Y L, et al. Effects of temperature and

- straw ratio on aerobic composting of cow manure[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2014, 8(1): 334-340. (in Chinese)
- [6] 李牧,徐国忠,崔雪霞,等. 低温微生物菌剂在牛粪秸秆堆肥中的应用研究[J]. 黑龙江畜牧兽医, 2020(22):41-49.
LI M, XU G Z, CUI X X, et al. Study on the application of low temperature microbial agents in cow manure and straw composting[J]. Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine, 2020(22): 41-49. (in Chinese)
- [7] 张书敏,徐凤花,代欢,等. 低温复合菌系对玉米秸秆与牛粪堆肥的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2017(2):136-140.
ZHANG S M, XU F H, DAI H, et al. Effects of hypothermia strains on corn straw and cow dung compost[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2017(2): 136-140. (in Chinese)
- [8] 李鑫,马存录,刘吉利. 添加辅料和菌剂对牛粪堆肥腐熟效果的影响[J]. 现代农业科技, 2024(4):96-101.
LI X, MA C L, LIU J L. Effects of adding subsidiary materials and microorganism agents on decomposition of cow manure compost[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2024(4): 96-101. (in Chinese)
- [9] 刘东海,李双来,乔艳,等. 不同菌剂在鸡粪堆肥中的应用效果[J]. 中国土壤与肥料, 2015(2):111-116.
LIU D H, LI S L, QIAO Y, et al. Effects of inoculating different microorganism agents on composting of chicken manure[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2015(2): 111-116. (in Chinese)
- [10] NY 525-2012, 有机肥料[S]. 北京:中国农业出版社, 2012.
- [11] 谷洁,李生秀,秦清军,等. 微生物及胡敏酸 E₄/E₆ 值在农业废弃物静态高温腐解中的变化[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2005, 33(12):98-102.
GU J, LI S X, QIN Q J, et al. Changes of microorganisms and E₄/E₆ in agricultural waste materials during composting in static state with high temperature[J]. Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition, 2005, 33(12): 98-102. (in Chinese)
- [12] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社, 2000.
- [13] NY/T 525-2021, 有机肥料[S]. 北京:中国农业出版社, 2021.
- [14] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业科技出版社, 2000.
- [15] 张晶,孙照勇,钟小忠,等. 奶牛粪条垛式模拟堆肥腐熟度及微生物群落结构变化[J]. 应用与环境生物学报, 2016, 22(3):423-429.
ZHANG J, SUN Z Y, ZHONG X Z, et al. Maturity and microbial community structure dynamics during simulated windrow composting of soil fraction of dairy manure[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2016, 22(3): 423-429. (in Chinese)
- [16] 张蕴琦,徐凤花,张晴,等. 低温环境下水稻秸秆与牛粪混合堆肥效果研究[J]. 安徽农业科学, 2016, 44(29):112-114, 126.
ZHANG Y Q, XU F H, ZHANG Q, et al. Effects of mix compost with rice straw and cow dung under low environment[J]. Anhui Agricultural Sciences, 2016, 44(29): 112-114, 126. (in Chinese)
- [17] 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.
HU Y T, SHI L H, LIU D M, et al. Effects of adding sulphuric acid on composting process of cattle manure and changes of main nutrients[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2014, 20(3): 718-725. (in Chinese)
- [18] 杨森,佟敏,崔亚茹,等. 牛粪与玉米秸秆沼渣混合堆肥及其对环境的影响研究[J]. 中国农机化学报, 2023, 44 (12):168-173.
YANG S, TONG M, CUI Y R, et al. Study on mixed compost of cow dung and corn stalk biogas residue and its impact on environment [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2023, 44 (12): 168 - 173. (in Chinese)
- [19] 杨明珠,许欢欢,郭传旭,等. 堆肥低温启动菌剂的研制与效果评价[J]. 生态与农村环境学报, 2024, 40(1):138-146.
YANG M Z, XU H H, GUO C X, et al. Development of the low-temperature composting initiating bacterial agent and the efficiency evaluation[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2024, 40 (1): 138-146. (in Chinese)
- [20] NAKASAKI K, YAGUCHI H, SASAKI Y, et al. Effect of pH control on composting of garbage[J]. Waste Management and Research, 1993, 11(2): 117-125.
- [21] 张晓倩,许修宏,王晶. 添加木质素降解菌对堆肥中酶活性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(4):843-847.
ZHANG X Q, XU X H, WANG J. Effect of inoculating lignin degradation strains on enzymic activities in composting[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2012, 31(4): 843-847. (in Chinese)
- [22] 孙干,宗平,涂永成,等. 复合微生物菌剂在有机堆肥中的应用研究[J]. 北方园艺, 2015(15):166-170.
SUN G, ZONG P, TU Y C, et al. Application of complex microbial agents on organic composting process[J]. Northern Horticulture, 2015(15): 166-170. (in Chinese)
- [23] 李杰. 不同微生物菌剂对牛粪和玉米秸秆高温腐熟的影响[D]. 兰州:甘肃农业大学, 2013.
- [24] 王凌英. 纤维素降解菌强化牛粪小麦秸秆堆肥效果及促生作用研究[D]. 兰州:兰州理工大学, 2023.
- [25] WANG P, CHANGA C M, WATSON M E, et al. Maturity indices for composted dairy and pig manures[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2004, 36(5): 767-776.
- [26] 周万海,魏琴,王涛,等. 微生物菌剂在醋渣堆肥中的应用[J]. 食品与发酵工业, 2014, 40(10):11-15.
ZHOU W H, WEI Q, WANG T, et al. Effect of inoculating microbes on composting of vinegar dregs[J]. Food and Fermentation Industries, 2014, 40(10): 11-15. (in Chinese)
- [27] 施宠,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.
SHI C, ZHANG X E, SHAYIFUJIAMALI, et al. Dynamic changes of total N P K and organic matter by different treatments on cattle manure composting[J]. China Cattle Science, 2010, 36(4): 26-29. (in Chinese)

(责任编辑:姜媛媛)