

复合菌剂对兔粪堆肥碳氮转化与损失的影响

张国言 董元杰* 孙桂阳 于滨 徐珂

(山东农业大学 资源与环境学院/土肥高效利用国家工程研究中心, 山东 泰安 271018)

摘要 为开发促腐和保氮功能兼具的发酵菌剂,探究不同配比菌剂对兔粪和香油渣堆肥碳氮转化与损失的影响及其机理。本试验以纤维素降解复合菌剂和功能菌剂两类自制菌剂为研究对象,采用封闭式好氧堆肥试验,共设置6个处理:不添加菌剂(CK)、EM商品菌剂(EM)、自制纤维素降解复合菌剂(CR)、V(功能菌剂):V(自制复合菌剂)=1:1(CAR1)、V(功能菌剂):V(自制复合菌剂)=1:2(CAR2)、V(功能菌剂):V(自制复合菌剂)=1:3(CAR3)。研究各处理对堆体腐熟过程中发酵参数、碳氮损失、养分含量和腐熟度等相关指标的影响。结果表明:堆肥启动过程中,CAR3堆体升温迅速,酸碱度适宜,利于堆体好氧发酵;堆肥结束时,CAR3有机质降解率高达34.17%,CO₂排放量较排放量最高的CR低13.43%,总腐殖酸生成量达15.52%,较CR显著提升11.92%;堆体全氮含量显著提高,氨挥发量较CK降低10.28%;有机氮含量较CK显著提升19.74%,有利于氮素的固持。因此,V(功能菌剂):V(自制复合菌剂)=1:3时(CAR3),可显著提高堆肥腐熟程度,促进碳转化,减少氮损失。本研究可为兔粪堆肥高效促腐和养分减损发酵菌剂的研发提供依据。

关键词 兔粪堆肥; 碳排放; 氨挥发; 腐熟; 复合菌剂; 氮同化

中图分类号 X713

文章编号 1007-4333(2022)11-0153-13

文献标志码 A

Effects of compound bacterial inoculant on the conversion and loss of carbon and nitrogen during rabbit manure composting

ZHANG Guoyan, DONG Yuanjie*, SUN Guiyang, YU Bin, XU Ke

(College of Resources and Environment/National Engineering Research Center for Efficient Utilization of Soil and Fertilizer Resources, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China)

Abstract In order to develop fermenting agents with both decay promotion and nitrogen retention functions, the effects of different ratios of agents on the decay of rabbit manure and sesame oil cake compost and the conversion and loss of carbon and nitrogen were investigated. In this experiment, two kinds of self-made bacterial agents, cellulose degradation composite bacterial agent and functional bacterial agent, were used as the research objects. Closed aerobic composting experiment was carried out, and six treatments were set up: no bacterial agent (CK), EM commercial microbial agent (EM), only self-made cellulose degradation composite bacterial agent (CR), V (functional bacterial agent) : V (self-made composite bacterial agent) = 1 : 1 ratio (CAR1), V (functional bacterial agent) : V (self-made composite bacterial agent) = 1 : 2 ratio (CAR2) and V (functional bacterial agent) : V (self-made composite bacterial agent) = 1 : 3 ratio (CAR3). The effects of the treatments on the fermentation parameters, carbon and nitrogen losses, nutrient content, maturity and other related indicators of the piles were investigated during the decomposition process. The results showed that during the start-up of composting, the temperature of CAR3 pile heated up quickly and the pH level was suitable, which was beneficial to aerobic fermentation. At the end of composting, the degradation rate of organic matter of CAR3 was as high as 34.17%. However, the CO₂ emission of

收稿日期: 2022-04-06

基金项目: 山东省农业重大应用技术创新项目(SD2019ZZ021)

第一作者: 张国言, 硕士研究生, E-mail: 984811136@qq.com

通讯作者: 董元杰, 教授, 主要从事新型肥料研制与应用研究, E-mail: yuanjiedong@163.com

CAR3 was 13.43% lower than that of CR. In addition, the total humic acid production of CAR3 reached 15.52%, which was 11.92% higher than that of CR. The total nitrogen content in the pile was significantly increased, and the ammonia volatilization was 10.28% lower than that of CK. At the same time, the organic nitrogen content of CAR3 was significantly increased by 19.74% compared with CK, which was beneficial to nitrogen retention. In conclusion, when the ratio of V (functional bacterial agent) : V (self-made composite bacterial agent) = 1 : 3 (CAR3), it can significantly improve the maturity of compost, promote carbon conversion and reduce nitrogen loss. This study can provide a basis for the research and development of efficient spoilage and nutrient loss reduction fermentation agents for rabbit manure composting.

Keywords rabbit manure composting; carbon emission; ammonia emission; maturity; compound bacterium agent; ammonia assimilation

自1978年改革开放以来,我国畜禽养殖业快速发展,产生巨大经济效益的同时,也带来了严重的环境污染问题。我国每年产生38亿t的畜禽粪污,综合利用率仅为60%~80%^[1-2],既是一种肥料资源的浪费,也不利于我国畜禽养殖业的绿色发展。

高温好氧堆肥是目前处理农业有机废弃物的有效手段^[3]。传统的自然堆肥方法存在微生物数量级低,环境适应性差等问题。人工添加外源微生物,可调节堆体菌群结构、提高微生物活性,缩短腐熟周期,提升堆肥质量,是好氧堆肥的常用措施^[3]。然而,好氧堆肥过程中会产生大量气体逸出,造成碳氮元素的损失。已有研究表明仅氨挥发和二氧化碳释放总量就占到整个畜禽粪便堆肥过程总损失量的50%~70%^[4]。畜禽粪便堆肥过程中加入外源微生物可以减少氮素损失,促进有机质的分解转化,提高堆体腐熟效率^[5]。在堆肥发酵的不同时期,堆体内微生物的优势种群及丰度都存在很大的差异,各菌群通过协同互作共同推进堆体的氮素转化及腐熟进程^[6-7]。目前多数市售菌剂微生物组成大同小异,不能满足不同原料堆肥生产优质有机肥的需求。此外,有关外源微生物对有机肥发酵过程中碳氮转化、腐熟进程及影响机理的研究也鲜见报道,从而制约了高效复合菌剂的研发。

兔粪是家兔养殖业的主要副产物之一,具有养分丰富、重金属含量低和酸碱度适宜等优点。我国兔粪年产量可达1.4亿t,但缺乏有效的利用方式,这既是一种资源的浪费也会对环境造成污染^[8];香油渣是利用芝麻进行香油生产后的废弃残渣,据统计,我国2020年香油渣产量已达50万t以上。香油渣含有大量的粗蛋白、氨基酸等营养物质,是一种丰富的蛋白质资源^[9],但其目前主要利用途径为畜禽饲料,在有机肥生产方面的应用研究鲜有报道。前期研究发现,兔粪和香油渣混合发酵制备有机肥,

发酵效率高、产品品质好^[10]。这可能与其含有高效的土著降解菌种有关。

因此,本研究拟将前期试验筛选到的高效纤维素降解菌进行优化组合,得到自制纤维素降解复合菌剂,以免粪和香油渣为发酵材料,与商品菌剂和自然发酵处理堆肥进行对比,研究自制纤维素降解复合菌剂与功能菌不同配比的复合菌剂对堆肥氮素积累和堆体腐解进程的影响,探讨不同配比的复合菌剂对堆体不同发酵阶段碳氮动态变化的影响及微生物作用机制,以期为兔粪堆肥高效促腐和养分减损发酵菌剂的研发提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

堆肥原料兔粪取自山东省泰安市附近养殖场,香油渣取于泰安市某小磨香油厂,木屑购自于建材市场,粉碎后备用,基本理化性质见表1。

自制纤维素降解复合菌剂菌种来自兔粪与香油渣自然发酵不同时期堆体中筛选得到的优势高纤维素酶活菌种,本实验室前期研究中,将纤维素作为唯一碳源将可利用纤维素完成代谢活动的菌株进行富集、分离与纯化,利用刚果红染色与滤纸崩解试验进行产纤维素酶菌株的初筛,而后通过测定各菌株羧甲基纤维素酶(CMCase)、滤纸酶(FPA)和 β -葡萄糖苷酶(β -Gase)进行酶活复筛,筛选共得到7株高酶活纤维素降解菌株,各菌株相似性比对结果如表2所示。利用拮抗试验确定各菌株之间无拮抗作用,将菌株随机组合构建复合菌系(表3)并测定酶活。酶活测定结果如表4所示,表中各组合均为试验测定得到相同菌株数量下的酶活最高组合。当复合菌系中CMCase酶活为(141.89±1.41) U/mL, FPA酶活为(104.56±1.74) U/mL, β -Gase酶活为(131.18±1.26) U/mL, 7株菌共同使用酶活最高。因此,本复

合菌剂组成菌株确定为：里氏木霉、蕈状芽胞杆菌、费格森埃希菌、灰绿曲霉、普通变形杆菌、粘质沙雷氏菌和谷氨酸棒杆菌，试验菌种均为本实验室保存并传代

稳定的菌株。功能菌种为常见的酵母菌、固氮菌和乳酸菌，购自南昌科畅生物科技有限公司。市售菌剂选用常见 EM 微生物菌剂，购自普天试剂有限公司。

表 1 堆肥材料理化性质

Table 1 Physical and chemical characters of initial composting material

原料 Material	$w(\text{有机碳})/\%$ Organic carbon	$w(\text{全氮})/\%$ Total nitrogen	C/N	$w(\text{含水率})/\%$ Water content	pH
兔粪 Rabbit manure	36.31	2.16	16.81	68.82	6.95
香油渣 Sesame oil cake	62.07	6.92	8.97	11.62	—
木屑 Wood chip	60.71	0.43	141.19	12.74	—

表 2 菌株相似性比对结果

Table 2 Comparison results of strain similarity

菌株 Strain	相似菌株 Closest relative	相似度/ Similarity
A-2	<i>Trichoderma reesei</i> strain SP02PU (MG018728.1)	99.83
B-3	<i>Escherichia marmotae</i> strain HT073016 (NR_136472.1)	99.02
C-2	<i>Proteus alimenterum</i> strain 08MAS0041 (NR_163665.1)	99.64
C-4	<i>Aspergillus glaucus</i> strain CBS 529.65 (MH870342.1)	99.12
D-1	<i>Bacillus paramycoides</i> strain MCCC 1A04098 (NR_157734.1)	98.69
D-3	<i>Corynebacterium glutamicum</i> strain ATCC 13032 (NR_074663.1)	98.46
Z-1	<i>Serratia marcescens</i> subsp. Marcescens ATCC 13880 (NR_113236.1)	98.33

表 3 不同组合菌株组成

Table 3 Composition of strains in different combinations

编号 No.	菌株组合 Strains association	种子液体积比 Seed liquid volume ratio
I	A-2、D-1	1 : 1
II	A-2、B-3、D-3	1 : 1 : 1
III	A-2、D-1、D-3、Z-1	1 : 1 : 1 : 1
IV	A-2、C-2、C-4、D-1、D-3	1 : 1 : 1 : 1 : 1
V	A-2、B-3、C-4、D-1、D-3、Z-1	1 : 1 : 1 : 1 : 1 : 1
VI	A-2、B-3、C-2、C-4、D-1、D-3、Z-1	1 : 1 : 1 : 1 : 1 : 1 : 1

注：各组合均为相同菌株数量下酶活最高组合。

Note: Each combination in the figure is the highest enzyme activity combination under the same number of strains.

表4 不同菌株组合的复合菌系酶活性

Table 4 Enzyme activities of the consortia with different combinations of the strains U/mL

编号 No.	CMCase	FPA	β -Gase
I	28.35±0.79	23.09±2.36	22.16±1.25
II	47.74±0.94	49.41±0.79	51.49±1.12
III	68.78±1.47	69.82±0.65	72.01±1.47
IV	89.48±1.30	74.50±1.10	82.61±1.88
V	127.13±1.72	81.47±0.83	107.89±1.10
VI	141.89±1.41	104.56±1.74	131.18±1.26

1.2 试验设计

试验于2021-05-17—2021-06-12在山东农业大学资源与环境学院实验站进行,发酵周期为26 d。将 m (兔粪): m (香油渣)按1:1(干基)混匀,每桶发酵底料加入0.834 kg木屑(干基)为辅料调节碳氮比至25:1,并加水调节堆体含水率60%左右,pH 7.0~7.5。同时按0.5%接种量(鲜重)均匀喷洒液体菌剂(稀释于500 mL蒸馏水中)。试验共设6个处理,分别为不添加菌剂处理(CK)、EM菌剂处理(EM)、(纤维素降解)自制复合菌剂处理(CR)、 V (功能菌剂): V (自制复合菌剂)=1:1配比处理(CAR1)、 V (功能菌剂): V (自制复合菌剂)=1:2配比处理(CAR2)、 V (功能菌剂): V (自制复合菌剂)=1:3配比处理(CAR3),每个处理设3次重复。自制复合菌剂由7株优势纤维素降解菌株等体积比配制而成,各菌株体积分数均为14.3%,有效

活菌数 $\geq 2 \times 10^8$ cfu/mL。功能菌剂为3种常见功能菌种(酵母菌、固氮菌和乳酸菌)等体积组合所得,各菌种活菌数 $\geq 10^6$ cfu/mL。各堆体物料与添加菌剂(控制有效活菌数均保持在 $2.0 \sim 2.11 \times 10^8$ cfu/mL)混合均匀后(CK处理添加等体积的液体培养基)装入容积100 L的密闭聚氯乙烯发酵桶内,进行强制通风静态发酵,采用连续硼酸-氢氧化钠吸收法测定堆体 NH_3 和 CO_2 的挥发速率及累积量^[11],具体装置如图1,发酵桶顶端及底部开有直径2 cm的通气孔并连接软管,进气孔与空气压缩机(ACO-318型)相连,使用流量计控制进气量保持为120 mL/min,连续通风以保证堆体好氧发酵顺利,进气口前放置带胶塞的广口瓶,分别装入硫酸溶液和NaOH溶液以去除空气中的水分和氨气等气体影响,出气口放置装有1升2%硼酸溶液和1 mol/L的NaOH溶液的广口瓶,以用于测定堆肥过程中产生的 NH_3 及 CO_2 排放量。

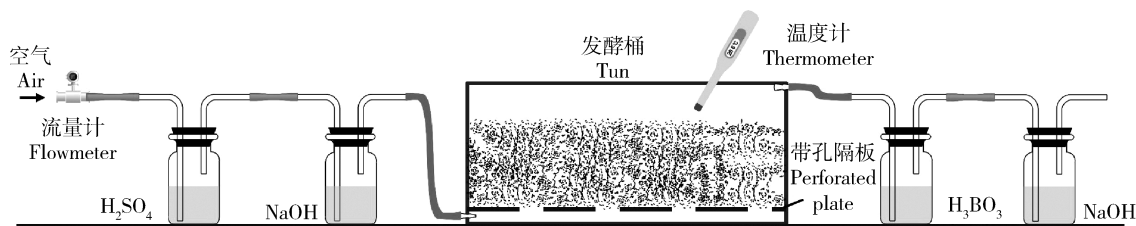


图1 堆肥发酵装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of composting equipment

1.3 样品采集及试验方法

分别于堆肥第0、2、6、12、20、26天取样后翻堆,每个处理沿对角线取5个点采取等量的样品,混匀后采用四分法取样,每次采集3个重复样品,以保证取样的代表性。将样品分为两份,一份进行风干、研

磨,另一份保存于一80℃冰箱待测。测定指标及方法如下:

每天14点采用便携式温度传感器检测堆体温度,随机挑取5个点进行测定,取平均值作为实际温度。含水率通过新鲜样品105℃烘干至恒重进行测

定,将新鲜样品与去离子水以 1 g : 10 mL ($m : V$) 混合后,水平摇床振荡 1 h,静置 30 min 后使用 pH 计 (PHS-3C 型) 和电导率仪 (DDS-11A 型) 进行测定。全氮采用硫酸-过氧化氢消煮,凯氏全自动定氮仪测定,碱解氮测定参照土壤碱解扩散法。硝铵态氮采用 1 mol/L 的 KCl 浸提,全自动连续流动分析仪 (AA3, 德国) 测定。氨气和二氧化碳采用硼酸和氢氧化钠吸收,吸收液由标准浓度稀硫酸滴定进行测定。有机质采用重铬酸钾容量法测定^[12],参照文献^[10]测定样品总腐殖酸含量。取新鲜堆肥样品 5 g 与蒸馏水按固液比 1 : 10 充分混匀,摇床振荡 2 h,过滤后取 10 mL 滤液 3 000 r/min 离心 10 min,吸取 5 mL 上清液于平铺滤纸的培养皿 (直径为 90 mm) 中,并放置 30 粒小白菜种子,同时设置蒸馏水处理为对照组,25 °C 条件下培养箱培养 48 h 后测定发芽率及根长,每个处理 3 次重复,计算公式

如下:

$$GI = (\text{浸提液种子发芽率} \times \text{种子根长}) / (\text{蒸馏水种子发芽率} \times \text{种子根长}) \times 100\%$$

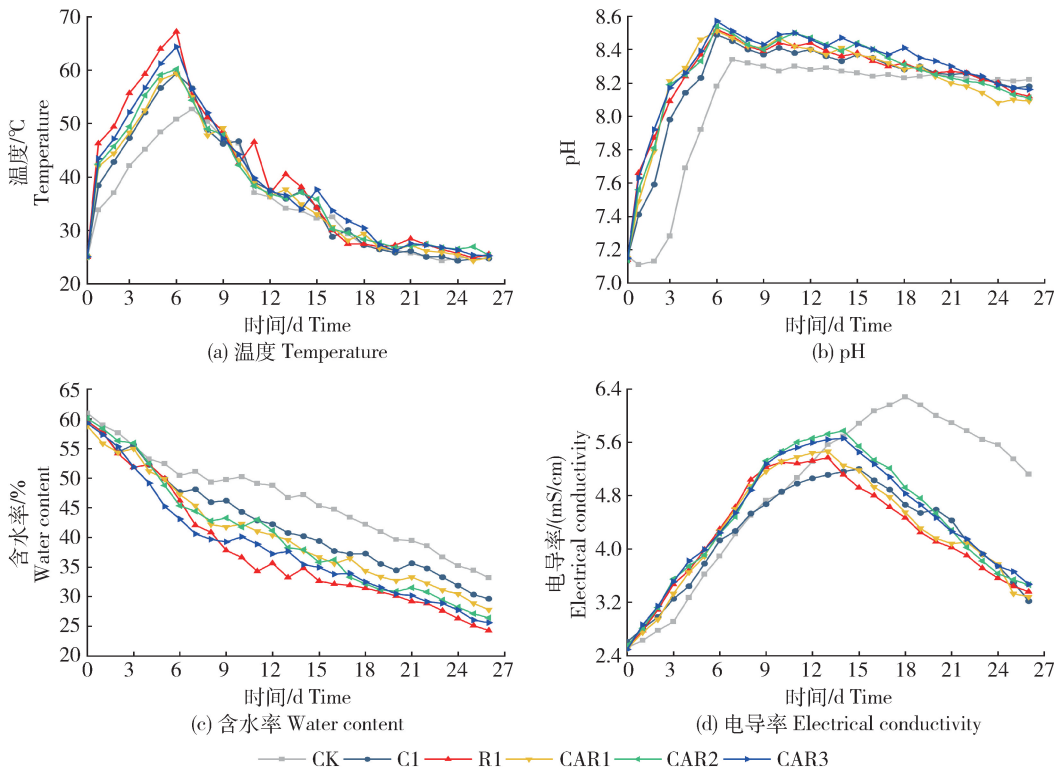
1.4 数据分析

试验数据采用 SPSS 21 软件进行统计分析,采用 Excel 2019 和 Origin 2021 进行处理与绘图,采用邓肯 (Duncan) 法进行差异显著性检验 ($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 不同复合菌剂对堆肥过程中温度、pH、含水率和电导率的影响

不同复合菌剂堆肥过程中主要发酵参数变化见图 2。可见:从堆肥第 1 天到第 26 天,各处理温度均呈现先急剧上升后下降的趋势。CR 和 CAR3 升温最快,在第 3 天均高于 50 °C,除 CK 外,各菌剂处



CK, 不添加菌剂; EM, EM 商品菌剂; CR, (纤维素降解) 自制复合菌剂; CAR1, $V(\text{功能菌剂}) : V(\text{自制复合菌剂}) = 1 : 1$; CAR2, $V(\text{功能菌剂}) : V(\text{自制复合菌剂}) = 1 : 2$; CAR3, $V(\text{功能菌剂}) : V(\text{自制复合菌剂}) = 1 : 3$ 。下同。

CK, no bacterial agent; EM, EM commercial microbial agent; CR, (cellulose degradation) self-made composite bacterial agent; CAR1, $V(\text{functional bacterial agent}) : V(\text{self-made composite bacterial agent}) = 1 : 1$; CAR2, $V(\text{functional bacterial agent}) : V(\text{self-made composite bacterial agent}) = 1 : 2$; CAR3, $V(\text{functional bacterial agent}) : V(\text{self-made composite bacterial agent}) = 1 : 3$. The same below.

图 2 不同复合菌剂堆肥过程中堆体理化性质的变化

Fig. 2 Changes of physicochemical properties of compost with different compound bacterial agents

理均在第6天到达最高温,CR温度最高,CAR3次之;各处理中自制复合菌剂比例越高,高温持续期越长,说明添加自制复合菌剂可加速堆体升温,延长高温时间。由图2(b)可见:除CK的pH在初期略微下降外,各菌剂处理pH值均迅速上升,并在第6~7天达到最大值,随后在一定范围内上下波动,并缓慢下降直到堆肥结束。CAR3的pH峰值最大,较初始提高了19.86%,说明其有机酸分解较快。由图2(c)可见:各处理含水率均呈下降趋势,前9天下降速率较为迅速,随后逐渐变缓。在堆肥结束时,各菌剂处理含水率均低于30%,CR含水率最低,较初始下降了59.19%,下降速率较CK提高了13.68%,与其微生物代谢最旺盛有关。由图2(d)可见:各堆体的EC值均呈先上升后下降的趋势,添加自制复合菌剂的堆体EC值上升更为迅速,其中CR的EC值最先到达峰值。以上结果表明自制复

合菌剂添加量越高,堆体发酵速度越快。

2.2 不同复合菌剂对堆肥过程中碳素转化的影响

2.2.1 有机质和总腐殖酸的变化

堆肥过程中有机质和总腐殖酸含量变化见表5。可知:各处理堆体有机质含量均呈下降趋势,至堆肥结束时,各堆体有机质降解率大小顺序为CR(36.10%)>CAR3(34.17%)>CAR2(32.63%)>CAR1(26.54%)>EM(23.34%)>CK(18.73%)。CR有机质含量较CK显著降低了24.49%($P<0.05$)且降解率最高,说明全自制复合菌处理降解高纤维材料迅速,有利于有机质的快速矿化。CAR3有机质降解率略低于CR,但总腐殖酸含量最高,与CR相比显著增加了11.92%($P<0.05$),说明添加适宜比例的功能菌剂更有利于腐殖酸的形成。因此,CAR3不仅促进有机质的较快降解,而且更利于总腐殖酸的合成,腐殖化效果最优。

表5 堆肥过程中有机质和腐殖酸含量的变化

Table 5 Changes of organic matter and humic acid content during composting %

处理 Treatment	有机质 Organic matter		总腐殖酸 Total humic acid
	0 d	26 d	26 d
	CK	89.70±3.12 a	72.90±1.59 a
EM	87.33±0.54 a	66.95±1.22 ab	12.31±0.76 d
CR	86.14±0.36 a	55.05±0.33 c	13.86±0.76 bc
CAR1	88.23±4.79 a	64.81±4.66 b	13.21±0.39 cd
CAR2	85.41±3.47 a	57.54±4.17 c	14.75±0.24 ab
CAR3	84.57±6.46 a	55.68±6.61 c	15.52±0.45 a

注:同列数据不同字母表示差异显著($P<0.05$),相同字母表示差异不显著($P>0.05$)。下表同。

Note: Within the same column, different letters represent significant differences ($P<0.05$), while the same letters represent no significant differences ($P>0.05$). The same below.

2.2.2 二氧化碳排放

堆肥过程中二氧化碳排放情况见图3。可见:堆肥初期,各堆体温度迅速升高,有机质大量降解,CO₂日排放量迅速上升至最大值。除CK和EM外,CR、CAR1~3均在第4天达到峰值,CR最高,较其他处理提高3.69%~29.80%。说明自制复合菌剂含量最高的CR好氧发酵剧烈,产生大量CO₂,

CAR3次之。发酵10d后,各处理CO₂排放速率迅速下降至稳定。由图3(b)可见:各处理CO₂累积量呈先指数性增长后缓慢增加的趋势。堆肥结束时,各堆体累积量高低顺序为CR>CAR2>CAR3>CAR1>EM>CK。CR、CAR2和CAR3较CK分别提高33.75%、22.03%和15.78%,说明添加自制复合菌剂可促进有机质降解和CO₂排放。

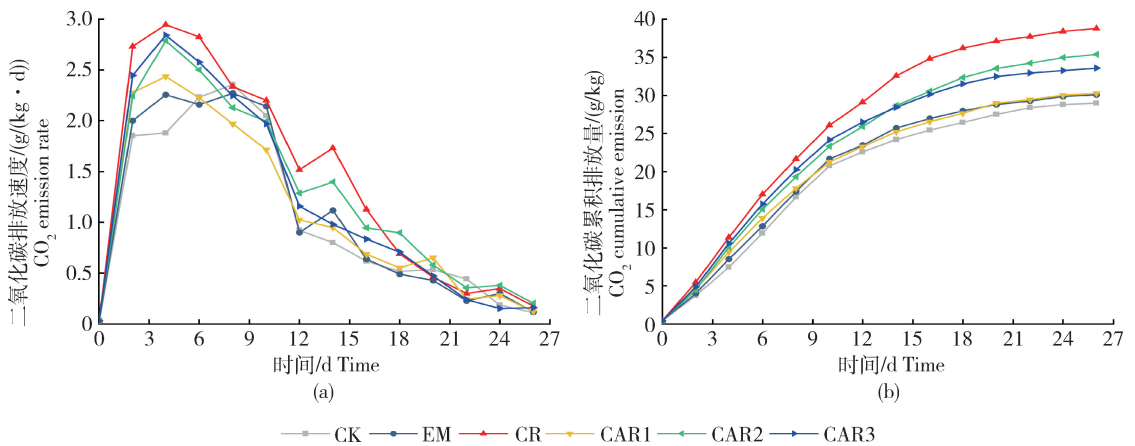


图 3 堆肥过程中二氧化碳排放速率(a)和累积排放量(b)

Fig. 3 Emission rate (a) and cumulative emission (b) of CO₂ during composting

2.3 不同复合菌剂对堆肥过程中氮素转化的影响

2.3.1 全氮、有机氮及碱解氮的变化

堆肥过程中全氮、有机氮及碱解氮含量变化见表 6。可知：各处理全氮含量呈先降低后升高的变化趋势。在堆肥第 6 天，堆体升温迅速，大量有机氮被分解，堆体全氮含量迅速下降。堆肥结束时，各堆体全氮含量较初始有所提高，这是堆肥过程中有机质降解引发的“浓缩效应”导致的。CAR3 含量最高，除 CAR2 外，CAR3 全氮含量相比其他处理均达到显著性差异 ($P < 0.05$)，增加了 7.94%~19.81%。随着堆肥进程的结束，各处理有机氮含量均有所增加，增幅顺序为 CAR3 > CAR2 > CR > CAR1 > EM > CK，CAR3 比初始增加了 30.97%，且与其他处理之间差异显著 ($P < 0.05$)，表明该处理对于减少氮素损失，促进氮素向有机态氮转化效果最好。发酵结束时，CAR3 碱解氮含量较 CK 显著增加了 26.55% ($P < 0.05$)，而仅含有自制复合菌剂的 CR 只增加了 17.09%，说明功能菌剂与自制复合菌剂协同使用更有利于堆肥氮素向无机氮和小分子有机氮转化，可提高堆肥产品的速效养分含量。

2.3.2 铵态氮和硝态氮的变化

堆肥过程中硝铵态氮含量变化见图 4。如图 4(a) 可见：各堆体铵态氮含量呈急剧上升后快速下降的趋势，堆肥第 6 天左右达到峰值，各菌剂处理铵态氮峰值较 CK 提高 13.55%~24.60%，CAR3 最高，说明 CAR3 高温期氨化作用最为强烈。至堆肥结束时，CK 铵态氮含量最高，较其他处理增加 24.50%~64.70%。由图 4(b) 可见：各处理硝态氮含量呈先缓慢后迅速升高的趋势。发酵初期，堆体温度高且

pH 急剧上升，抑制了硝化细菌的生长，各处理硝态氮含量几乎保持不变。随着高温期的结束，具备硝化作用的微生物逐渐成为优势菌群，各处理硝态氮含量迅速升高。堆肥结束时，各菌剂处理硝态氮含量较 CK 增加 62.85%~101.45%，CAR1 最高，表明功能菌剂与自制复合菌剂 1:1 配比时，最利于硝化作用的进行。

2.3.3 氨气挥发速率和积累量

堆肥过程中氨气挥发情况见图 5。如图 5(a) 所示：各处理氨气挥发速率呈发酵初期急速上升，中期波动下降，后期快速降低直至稳定的趋势。各堆体氨挥发速率均在第 6~8 天达到最大值，CAR1 峰值最高，CR 最低，两者相差 5.05%，说明各处理氨挥发峰值差异不明显。堆肥结束时，各处理氨挥发速率均下降至稳定范围内。由图 5(b) 可见：各处理氨挥发积累量在堆肥初期迅速升高，4~10 d 内呈线性增加，而后逐渐平稳。堆肥结束时，CAR3 积累量最小，比 CK 减少了 10.28%，说明功能菌剂与自制复合菌剂 1:3 配比协同处理不仅能降低高温期氨挥发峰值，还有效减少了其他时期氨气挥发量，最利于氮素的积累。

2.4 不同复合菌剂对堆肥产品腐熟度的影响

堆肥结束时各堆体发酵产品腐熟情况见表 7。可知：CK 的小白菜种子发芽率明显低于其他堆体，而各菌剂处理之间无显著性差异，说明添加微生物菌剂可以促进种子萌发，但效果差异不大。各堆体根长表现为 CAR3 效果最好，比 CK 和蒸馏水处理显著增加了 56.70% 和 40.74% ($P < 0.05$)，说明功能菌剂与自制复合菌剂 1:3 配比最有利于种子生

表6 堆肥过程中全氮、有机氮和碱解氮含量(w)的变化

Table 6 Changes of total nitrogen, organic nitrogen and alkali hydrolyzed nitrogen content during composting

处理 Treatment	$w(\text{全氮})/\%$ Total nitrogen				$w(\text{有机氮})/(\text{g}/\text{kg})$ Organic nitrogen				$w(\text{碱解氮})/(\text{g}/\text{kg})$ Alkali hydrolyzed nitrogen			
	0 d	6 d	16 d	26 d	0 d	26 d	0 d	26 d	0 d	26 d	0 d	26 d
	CK	3.44±0.12 b	2.73±0.16 d	3.61±0.13 e	3.87±0.18 d	33.76±1.15 b	37.81±1.77 d	754.10±134.55 a	3 893.36±490.64 c			
EM	3.56±0.02 a	2.95±0.06 c	3.90±0.05 d	4.13±0.16 c	35.01±0.21 a	40.20±1.64 c	745.16±38.97 a	4 254.60±42.43 bc				
CR	3.58±0.04 a	3.11±0.11 abc	4.01±0.05 cd	4.30±0.04 bc	35.16±0.44 a	41.85±0.44 bc	744.81±62.01 a	4 558.61±302.81 ab				
CARI	3.56±0.06 a	3.06±0.15 bc	4.13±0.02 bc	4.23±0.06 c	35.03±0.60 a	41.10±0.58 c	746.81±30.49 a	4 265.09±73.47 bc				
CAR2	3.55±0.06 ab	3.23±0.09 ab	4.21±0.11 ab	4.47±0.05 ab	34.85±0.57 ab	43.63±0.50 ab	753.29±106.93 a	4 562.61±142.63 ab				
CAR3	3.52±0.02 ab	3.28±0.07 a	4.33±0.08 a	4.64±0.09 a	34.57±0.27 ab	45.28±0.85 a	754.63±25.88 a	4 927.13±167.38 a				

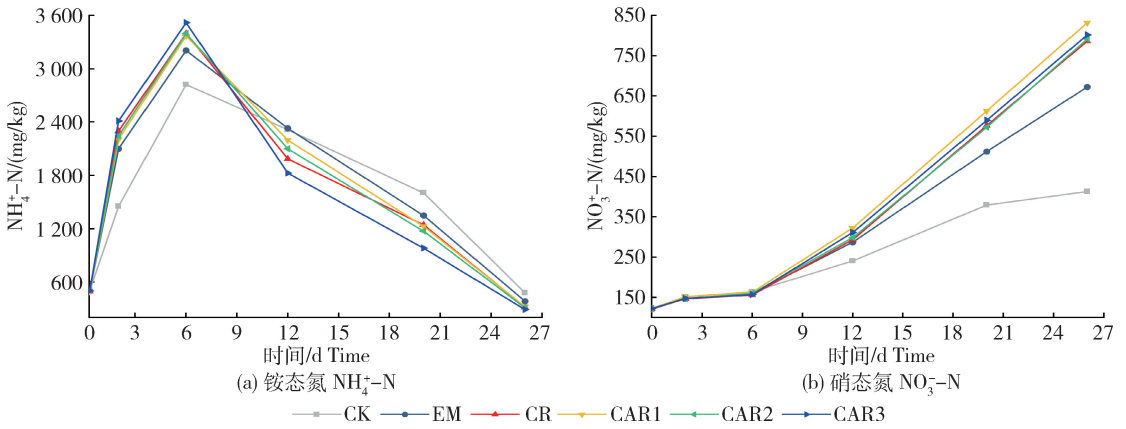


图 4 堆肥过程中铵态氮和硝态氮含量的变化

Fig. 4 Changes of ammonium and nitrate nitrogen content during composting

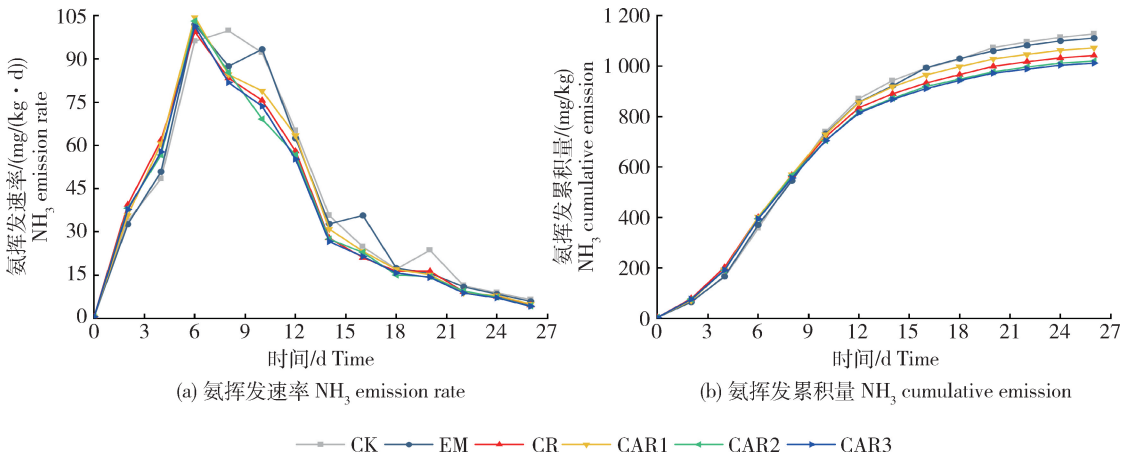


图 5 堆肥过程中氨气排放速率和累积排放量

Fig. 5 Emission rate and cumulative emission of NH_3 during composting

表 7 堆肥结束时各处理种子发芽势和碳氮比

Table 7 Germination index and C/N of each treatment at the end of composting

处理 Treatment	发芽率/% Germination percentage	根长/cm Root length	GI/% Germination index	C/N
空白	91.11±0.05 ab	2.16±0.36 cd		
CK	82.22±0.05 b	1.94±0.13 d	81.05±0.05 d	10.94±0.45 a
EM	86.67±0.07 ab	2.40±0.66 bcd	105.69±0.08 c	9.43±0.54 b
CR	87.78±0.02 ab	2.84±0.26 ab	126.67±0.03 b	7.43±0.11 c
CAR1	88.89±0.07 ab	2.50±0.34 bc	112.92±0.09 c	8.90±0.65 b
CAR2	93.33±0.03 a	2.88±0.33 ab	136.59±0.05 ab	7.46±0.53 c
CAR3	92.22±0.02 a	3.04±0.27 a	142.46±0.03 a	6.96±0.81 c

根,可能与其腐熟程度高,微生物区系较丰富有关。各处理 GI 值表现为 CAR3>CAR2>CR>CAR1>

EM>CK。添加自制复合菌剂的处理 GI 值比 CK 显著提高了 39.32%~75.77% ($P<0.05$),促生效

果明显,说明自制复合菌剂可以有效提高堆肥产品腐熟程度。发酵结束时,各处理碳氮比大小为CK>EM>CAR1>CAR2>CR>CAR3,CAR3最低,较CK显著降低了36.33%($P<0.05$),说明该处理发酵过程中有机碳转化量最大,全氮含量提升最多,最利于堆体发酵腐熟。

3 讨论

3.1 不同配比复合菌剂对堆体发酵条件和腐熟度的影响

温度、pH、含水率和电导率等发酵工艺参数是影响有机肥发酵过程的重要因素,不仅控制着堆体分解腐熟进程,同时对堆体中碳氮元素的迁移转化也具有重要影响^[4-6]。温度是堆肥进程中各生理生化过程顺利进行的基础,是堆肥成功的决定性因素。本研究表明,添加自制复合菌剂的处理温度峰值比CK明显提高,到达高温期时间大大缩短,全部达到无害化标准^[14],其中自制复合菌剂含量最高的CR效果最好。Xu等^[13]研究表明,在堆肥中添加纤维素降解菌种,对于促进堆体升温,延长高温时间,加速堆肥腐熟具有重要作用。这与本研究结果一致。这是自制复合菌剂有利于纤维素降解,能产生大量能源物质,使堆体内微生物迅速增殖并进行生命活动降解有机质,同时释放大量热导致的。pH是影响堆体矿物质转化与氮素损失的重要因素,也对微生物活性和堆肥腐熟影响较大。有研究表明,pH在堆肥前期迅速上升,稳定范围内波动并在后期下降的现象是堆肥腐熟的重要标志^[15]。本试验各添加自制复合菌剂处理pH变化均符合腐熟标志。CAR3的pH峰值最高,这与该堆体微生物生命活动剧烈,小分子酸代谢迅速有关。CK的pH始终较低,影响了微生物对有机质的降解,是造成CK堆体高温期滞后的主要原因,这与徐瑞蔓等^[7]的研究结果一致。含水率对微生物活性与堆体通透性具有重要影响。本研究发现,各添加自制复合菌剂处理含水率降幅远大于CK和EM,与其升温迅速、微生物氧化分解作用剧烈有关。说明自制复合菌剂对于堆体发酵腐熟有明显的改善效果。陈威旺^[16]研究表明,添加外源菌剂可以促进堆体微生物生命活动,有利于堆体含水率的下降,对堆肥好氧发酵具有积极作用。这与本研究结果相符。电导率是代表堆体可溶性盐含量和腐熟程度的重要指标,其变化趋势与有机质降解速率密切相关。本研究发现,添加自制

复合菌剂处理的EC值变化明显优于CK与EM,堆肥结束时,只有CK的EC值超过4 mS/cm,对种子有毒害作用^[17]。说明自制复合菌剂有利于堆肥腐熟,发酵前期可以加速有机质的分解,产生大量可溶性盐使EC值升高,后期则促进腐殖质的形成,降低游离态养分离子含量以保持EC值适宜,利于种子萌发,这与常瑞雪等^[11-16]的研究结果一致。碳氮比是堆肥微生物繁殖和反映腐熟状况的重要指标。薛晶晶等^[18]研究表明,堆肥发酵过程中碳氮有机物分解速率的不同步导致碳氮比呈下降趋势。本研究表明,堆肥结束时,全部堆体碳氮比较初始明显下降,除CK和EM外,各添加自制复合菌剂堆体的碳氮比远低于10,可认为腐熟良好^[19],说明自制复合菌剂能通过改善发酵参数,调控碳氮素分解转化强度,达到降低碳氮比,促进堆肥腐熟和减少碳氮损失的目的,这与陈雪娇等^[19]研究结果一致。种子发芽指数是评价堆肥产品生物毒性和堆体腐熟状况的生物学指标。Zucconi等^[20]认为GI>50%时,堆肥基本无毒性,GI>80%时,达到腐熟标准。本研究结果表明,添加自制复合菌剂处理的GI值较CK显著升高,均达到110%以上,CAR3最高。这表明功能菌与自制复合菌剂1:3配施具有更好的协同作用,可以提高堆肥中活性物质含量,利于种子生根及根系生长,促生效果最好。时小可等^[21]研究表明,堆肥中添加纤维素降解菌株可以显著提高GI值,促进发酵原料中有害物质的降解,利于堆肥腐熟。这与本研究结果一致。

3.2 不同配比复合菌剂对碳素损失转化的影响

堆肥的实质是微生物降解转化有机废弃物的生理生化过程,碳是微生物进行生命活动不可缺少的能量来源,也是有机物分解转化的基本元素。本研究发现,随着自制复合菌剂添加量的增加,各堆体有机质降解速率迅速升高,分解更彻底,CAR3效果最优。史龙翔和王义祥等^[22-23]研究表明,堆肥过程中有机质降解,碳损失转化受到发酵材料、温度、含水率、微生物等多种因素共同影响,但微生物因素影响较大,接种纤维素降解菌株有利于促进有机质的矿化分解,此结论与本试验结果一致。

在好氧发酵过程中,微生物分解有机质产生水和CO₂并释放能量。因此,CO₂排放量可以反映堆体降解速度及微生物代谢强度,但作为碳损失的主要途径和温室气体重要组分,减少CO₂排放十分必要^[4]。本研究发现,CR堆体CO₂日排放速率始

始终保持领先,这与它升温最快,含水率降幅最大,堆体通透性好,因此微生物活性最高,有机质矿化作用最强有关。堆肥结束时,CR 的 CO_2 累积量最大,表明其对于有机质的分解效果最好,但不利于碳素保存。堆肥前期 CAR3 的 CO_2 排放速率仅次于 CR,后期排放速率则迅速降低,至堆肥结束时 CO_2 累积量远低于 CR 而总腐殖酸生成量最高。表明 CAR3 既可以改善发酵参数,提高堆体腐熟效率,又能通过功能菌和自制复合菌剂的协同作用促进碳转化保留,减少碳损失。这可能是 CAR3 添加适宜比例功能菌,可以提高堆肥腐殖酸缩合度、芳构化程度及活性所致,此结果与王义祥等^[11-23]的研究结果相符。

3.3 不同配比复合菌剂对氮素损失转化的影响

氮是微生物进行代谢及生物合成的必需元素,也是堆肥产品质量的重要养分指标。在堆肥发酵过程中,各种形态氮素的相互转化是一个非常复杂的过程,与各阶段微生物组成、堆体理化性质变化密切相关^[4-11]。马丽红等^[24]研究发现,在堆肥过程中添加木霉及腐熟堆肥,显著提高了堆体全氮和有机氮含量。本研究表明,在堆肥结束时,与 CK 和 EM 相比,添加自制复合菌剂的处理全氮、有机氮及碱解氮含量均有所提升。一方面由于加入自制复合菌剂改善了堆体发酵参数,有利于有机质的降解,“浓缩效应”导致氮素含量的相对增加;另一方面则是高酶活纤维素降解菌有利于纤维素的降解,产生大量易降解的碳源物质-葡萄糖,从而改善了堆体易降解碳氮元素比例,提高了微生物的氮同化能力,有利于抑制氨挥发,减少氮挥发损失。这与常瑞雪、MENG 等的^[11-25]研究结果一致。

氮同化作用是堆肥微生物利用铵态氮在谷氨酸脱氢酶作用下,与 α -酮戊二酸结合生成谷氨酸,并最终转化为生物态有机氮的过程^[26]。氨挥发是堆肥过程中氮素损失的主要途径,也是减少氮素损失的重要突破口。本研究表明,在堆肥高温期,各处理氨气挥发速率均达到峰值,但随着自制复合菌剂添加比例的增加,各处理氨挥发峰值呈降低趋势。CR 在高温期本应氨气挥发最严重,但由于其微生物活性强,碳素三羧酸循环效率高,氮同化底物含量高,微生物氮同化作用强烈,大量铵态氮被转化为生物态氮得以固定,因此氨挥发峰值最低,这与前人发现微生物可以通过氮同化作用显著减少堆肥氨挥发量,提高氮素积累^[26-27]的研究结果一致。自制复合菌剂促进氮同化作用的原因可能是含有大量的谷氨

酸棒杆菌,这是一种能够生产谷氨酸脱氢酶并进一步合成谷氨酸的菌株,同时,芽孢杆菌属微生物也是常见具备氨同化能力的菌种,两者均能促进堆体中氮素向生物态氮的转化^[28]。各堆体氨挥发累积量表明,堆肥结束时 CAR3 氨挥发累积量低于 CR,且有机氮和碱解氮含量较 CR 有所提高,其原因可能是 CAR3 除添加自制复合菌剂外,还有酵母菌、固氮菌等功能菌株可以起到协同的作用。潘飞等^[29]研究表明,堆肥中加入纤维素降解菌和固氮菌协同处理,对于堆体氨挥发的抑制和有机氮的转化效果显著,这与本研究结果一致。

刘玉婷^[30]研究表明,氮同化是不同微生物在堆肥发酵的早中晚期接替进行,综合作用的结果。CR 仅含有自制复合菌剂,只有高温期氮同化作用较强,降低了氨挥发峰值,当腐熟期其他微生物区系发挥作用时,CR 的氮同化作用减弱,导致氨挥发量升高,也可能是功能菌的缺失导致只有一部分谷氨酸顺利转化为有机氮得以保存。而添加了功能菌剂的 CAR3 氮同化作用全程顺利进行,氮同化量逐渐占据上风,最终氨挥发累积量最低,有机氮转化量最大。CAR3 铵态氮含量在高温期达到峰值,而堆肥结束时最低,表明 CAR3 微生物活性强,前期氨化作用强烈产生大量铵态氮,随后氮同化作用使铵态氮转化为稳定的微生物有机氮得以保存,而不是通过氨挥发途径大量损失^[31]。堆肥结束时 CAR3 硝态氮含量较低,也表明 CAR3 减少的铵态氮是通过氮同化作用部分转化为有机态氮,而非全部通过硝化作用转化为硝态氮。自制复合菌剂的添加有利于提高堆体氮同化作用,减少高温期氨挥发量,添加适量的功能菌剂,可通过不同微生物区系的协同作用促进堆体发酵各阶段的氮同化和硝化作用,有利于氮素的固定转化。

4 结 论

本研究以兔粪和香油渣为好氧发酵材料,研究了不同复合菌剂对堆肥过程中碳氮转化与损失的影响。主要结果如下:

1) 本试验条件下,各处理中自制复合菌剂添加量越大,高温峰值更高、高温期持续时间更长,含水率降幅增大,有机质降解速率加快,主要发酵参数得到明显优化,发酵更迅速,腐熟更彻底。

2) V(功能菌剂):V(自制复合菌剂)=1:3 配比添加的 CAR3 堆体碳氮比下降迅速,GI 值显著提

高,CO₂排放量较CR降低13.43%,总腐殖酸含量显著增加11.92%,NH₃挥发量比CK减少10.28%,有机氮含量显著提升19.74%,堆体腐殖化与氨同化作用强烈,有利于提高堆体发酵效率与养分固持能力,其促进堆肥腐熟和减少碳氮损失的效果最优。

参考文献 References

- [1] 李太魁,王小非,郭战玲,张香凝,寇长林,王彦江. 添加生物炭对猪粪好氧堆肥过程氮素转化与氨挥发的影响[J]. 生态环境学报, 2021, 30(4): 874-879
Li T K, Wang X F, Guo Z L, Zhang X N, Kou C L, Wang Y J. Effects of biochar on nitrogen transformation and ammonia emissions during pig manure composting [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2021, 30(4): 874-879 (in Chinese)
- [2] 曹哲统,冷治涛,杨远文,孙长征,肖士军,郭宪峰. 好氧堆肥技术在畜禽粪污资源化利用中的研究进展[J]. 中国乳业, 2021(11): 65-72
Cao Z T, Leng Z T, Yang Y W, Sun C Z, Xiao S J, Guo X F. The research progress of aerobic composting technology in the resource utilization of livestock and poultry manure[J]. *China Dairy*, 2021(11): 65-72 (in Chinese)
- [3] Zhang Z J, Li X, Hu X, Zhang S, Li A N, Deng Y C, Wu Y B, Li S Y, Che R X, Cui X Y. Downward aeration promotes static composting by affecting mineralization and humification [J]. *Bioresource Technology*, 2021, 338: 125592
- [4] 山楠. 畜禽养殖固体废物不同堆置条件下碳氮气体排放规律研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2018
Shan N. Carbon and nitrogen gaseous emissions under alternative storage of solid manure [D]. Beijing: China Agricultural University, 2018 (in Chinese)
- [5] Qiu Z P, Li M X, Song L Y, Wang C, Yang S, Yan Z Y, Wang Y Q. Study on nitrogen-retaining microbial agent to reduce nitrogen loss during chicken manure composting and nitrogen transformation mechanism [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 285: 124813
- [6] Kausar H, Ismail M R, Saud H M, Habib S H, Othman R, Bhuiyan M S H. Changes of physical and chemical characteristics during microbial composting of rice straw at various pH levels [J]. *Compost Science & Utilization*, 2014, 22(3): 153-163
- [7] 徐瑞蔓,李茜,孙宇,陈迪,赵洪颜,袁旭峰,朴仁哲. 食用菌菌糠堆肥化发酵特性及腐熟进程[J]. 中国农业大学学报, 2022, 27(3): 181-193
Xu R M, Li X, Sun Y, Chen D, Zhao H Y, Yuan X F, Piao R Z. Fermentation characteristics and decay process of edible fungi and bran composting [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2022, 27(3): 181-193 (in Chinese)
- [8] Li Y J, Liu L C, Yang B, Zhang W D, Yin F, Xu L, Zhao X L, Liu J, Chen Y B, Liu S Q. Experimental study on biogas production by mesophilic fermentation for rabbit dung [J]. *Advanced Materials Research*, 2013, 763: 160-164
- [9] 程益, 雍婕, 肖红仕, 周海燕, 吴永尧. 复合菌液体发酵芝麻饼工艺研究[J]. 现代农业科技, 2017(1): 250-252
Cheng Y, Yong J, Xiao H S, Zhou H Y, Wu Y Y. Liquid fermentation technology of sesame crackers with combined bacterium [J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2017(1): 250-252 (in Chinese)
- [10] 孙桂阳, 张国言, 董元杰. 不同来源农业废弃物堆肥进程与产品肥效研究[J]. 水土保持学报, 2021, 35(4): 349-360
Sun G Y, Zhang G Y, Dong Y J. Composting process of agricultural wastes from different sources and fertilizer efficiency of their products [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(4): 349-360 (in Chinese)
- [11] 常瑞雪, 王骞, 甘晶晶, 李彦明. 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
Chang R X, Wang Q, Gan J J, Li Y M. Influence of easily-degraded organic matter content on maturity and nitrogen loss during composting of cucumber vine [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(1): 231-237 (in Chinese)
- [12] Jiang J S, Kang K, Chen D, Liu N N. Impacts of delayed addition of N-rich and acidic substrates on nitrogen loss and compost quality during pig manure composting [J]. *Waste Management*, 2018, 72: 161-167
- [13] Xu J, Xu X H, Liu Y, Li H T, Liu H J. Effect of microbiological inoculants DN-1 on lignocellulose degradation during co-composting of cattle manure with rice straw monitored by FTIR and SEM [J]. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 2016, 35(2): 345-351
- [14] 郝丽娜, 常瑞雪, 李彦明, 汪杰, 陈清, 赵恒宇. 接种外源微生物对堆肥中重金属铜锌铅形态变化的影响[J]. 中国农业大学学报, 2020, 25(5): 122-129
Hao L N, Chang R X, Li Y M, Wang J, Chen Q, Zhao H Y. Effects of exogenous inoculums on the fractions variation of heavy metals copper, zinc and lead in compost [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2020, 25(5): 122-129 (in Chinese)
- [15] 时红蕾, 王晓昌, 李倩. 四环素对人粪便好氧堆肥过程中酶活性及腐熟的影响[J]. 环境化学, 2018, 37(2): 209-215
Shi H L, Wang X C, Li Q. Effects of tetracycline in human feces on its aerobic composting process: Enzyme activities and compost maturity [J]. *Environmental Chemistry*, 2018, 37(2): 209-215 (in Chinese)
- [16] 陈威旺. 复合微生物菌剂的制备及投加策略对农村易腐生活垃圾堆肥效果影响研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2020
Chen W W. Research on the influence of the preparation and dosing strategy of compound microbial agent on the composting effect of rural perishable domestic waste [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020 (in Chinese)

- [17] 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
Lu R K. *Chemical Analysis Methodes of Soil Agriculture* [M]. Beijing: China Agricultural Sciencetech Press, 2000 (in Chinese)
- [18] 薛晶晶, 李彦明, 常瑞雪, 王珏, 彭粮欢. 厨余与园林废物共堆肥过程氮素转化及损失[J]. 农业工程学报, 2021, 37(10): 192-197
Xue J J, Li Y M, Chang R X, Wang J, Peng L H. Nitrogen transformation and loss during co-composting of kitchen and garden wastes [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, 37 (10): 192-197 (in Chinese)
- [19] 陈雪娇, 王宇蕴, 徐智, 赵乾旭. 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
Chen X J, Wang Y Y, Xu Z, Zhao Q X. Effect of phosphogypsum addition on the rice husk and oil cake composting process and evaluation of its physicochemical character as a substrate [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(5): 1001-1008 (in Chinese)
- [20] Zucconi F, Forte M, Monaco A, De Bertoldi M. Biological evaluation of compost maturity[J]. *BioCycle*, 1981, 22(4): 27-29
- [21] 时小可, 颀建明, 冯致, 郁继华, 蔡高贺. 三种微生物菌剂对羊粪高温好氧堆肥的影响[J]. 中国农学通报, 2015, 31(2): 45-48
Shi X K, Xie J M, Feng Z, Yu J H, Cai G H. Effects of three microbial agents on high temperature aerobic composting of sheep manure [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2015, 31(2): 45-48 (in Chinese)
- [22] 史龙翔, 谷洁, 潘洪加, 张凯煜, 殷亚楠, 赵听, 王小娟, 高华. 复合菌剂提高果树枝条堆肥过程中酶活性[J]. 农业工程学报, 2015, 31(5): 244-251
Shi L X, Gu J, Pan H J, Zhang K Y, Yin Y N, Zhao T, Wang X J, Gao H. Improving enzyme activity by compound microbial agents in compost with mixed fruit tree branches and pig manure during composting [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(5): 244-251 (in Chinese)
- [23] 王义祥, 高凌飞, 叶菁, 李艳春, 翁伯琦. 菌渣垫料堆肥过程碳素物质转化规律 [J]. 农业工程学报, 2016, 32(S2): 292-296
Wang Y X, Gao L F, Ye J, Li Y C, Weng B Q. Change of carbon substance characteristics during composting of waste packing and fungus chaff [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(S2): 292-296 (in Chinese)
- [24] 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, 110
Ma L H, Huang Y M, Li X Z, Qi J H, Zhao Z Z, Li P. Effect of two amendments on nitrogen transformation and its related microbial during cow manure composting [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2010, 28(1): 76-82, 110 (in Chinese)
- [25] Meng L Q, Li W G, Zhang S M, Wu C D, Jiang W, Sha C Q. Effect of different extra carbon sources on nitrogen loss control and the change of bacterial populations in sewage sludge composting [J]. *Ecological Engineering*, 2016, 94: 238-243
- [26] 李云蓓. 碳源调控对污泥堆肥过程氮素损失的影响及其作用机制[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014
Li Y B. Effect of carbon regulation on nitrogen losses and its mechanism during sewage sludge composting [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014 (in Chinese)
- [27] 孟利强. 碳源调控污泥堆肥氮素转化与含氮气体释放生物机制研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019
Meng L Q. Study on biological mechanism of nitrogen transformation and nitrogen gas release from sewage sludge composting regulated by carbon [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019 (in Chinese)
- [28] Meng L Q, Li W G, Zhang S M, Wu C D, Wang K. Effects of sucrose amendment on ammonia assimilation during sewage sludge composting [J]. *Bioresource Technology*, 2016, 210: 160-166
- [29] 潘飞, 蔡映杰, 俞武, 宋博博, 曾庆福. 啤酒厂污泥与鸡粪接种菌剂堆肥除臭效果及其作用机制 [J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(6): 1236-1241
Pan F, Cai Y J, Yu W, Song B B, Zeng Q F. The effect of deodorization of brewery sludge and chicken manure composting by inoculating flora and its mechanism [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(6): 1236-1241 (in Chinese)
- [30] 刘玉婷. 禽粪好氧堆肥过程中氮素转化与菌群互作规律的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2018
Liu Y T. The interaction mechanism of nitrogen transformation and bacterial dynamics during aerobic composting of poultry manure [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2018 (in Chinese)
- [31] Wang X, Selvam A, Chan M T, Wong J W C. Nitrogen conservation and acidity control during food wastes composting through struvite formation [J]. *Bioresource Technology*, 2013, 147: 17-22