

畜禽粪便堆肥前期理化及微生物性状研究

曹云, 常志州*, 黄红英, 徐跃定, 吴华山

(江苏省农业科学院农业资源与环境研究所, 江苏省农业废弃物资源化工程技术中心, 南京 210014)

摘要: 分别以鸡粪、猪粪、牛粪为原料进行堆肥试验, 研究三种畜禽粪便堆肥启动期和高温期理化及可培养微生物数量及脱氢酶、蛋白酶和纤维素酶活性等指标变化规律, 为筛选合适的微生物菌剂维持堆肥高温提供理论依据。结果表明, 将新鲜的鸡粪、猪粪、牛粪含水量调节到 55% 左右, 堆肥温度在 2 d 内均可升至 50 ℃ 以上, 并维持此温度的时间均超过 5 d, 达到堆肥无害化的卫生标准。堆肥前期, 三种堆肥的细菌、真菌、放线菌、纤维素分解菌数量变化趋势相同, 表现为嗜温性微生物数量先升高再降低; 嗜热菌数量随温度上升而增加。牛粪堆肥中真菌、嗜热放线菌及纤维素分解菌的数量显著高于鸡粪和猪粪 ($P \leq 0.05$)。三种堆肥的脱氢酶活性先上升后下降; 蛋白酶活性随堆肥温度的升高而上升; 猪粪和牛粪堆肥纤维素酶活性呈波动上升趋势, 鸡粪堆肥则呈先上升后下降趋势。三种堆肥的温度与嗜热纤维素分解菌数量呈显著正相关 ($P \leq 0.05$)。

关键词: 畜禽粪便; 堆肥; 纤维素降解菌; 嗜热微生物

中图分类号: X713 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2015)11-2198-10 doi:10.11654/jaes.2015.11.023

Chemical and Biological Changes During Early Stage of Composting of Different Animal Wastes

CAO Yun, CHANG Zhi-zhou*, HUANG Hong-ying, XU Yue-ding, WU Hua-shan

(Jiangsu Agricultural Waste Treatment and Recycle Engineering Research Center, Institute of Agricultural Resources and Environment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China)

Abstract: Prolonging the thermophilic phase of composting is an effective measure to increase the efficiency of composting. It is necessary to elucidate factors determining persistent high temperature during composting. In this study, chemical properties, microbial populations and enzyme (dehydrogenase, protease and cellulase) activities were determined during the early stage of composting of poultry waste, pig manure, and dairy manure. Temperature in three piles increased to 50 ℃ within 2 d and remained above that for 5 d when the initial moisture content was adjusted to ~55%. The products met the national decontamination standard for animal feces. The populations of bacteria, fungi, actinomycetes and cellulose-decomposing microorganisms showed similar trends among three piles during composting. The mesophilic microbial population increased at the initial stage, but decreased at the thermophilic phase, while the thermophilic microbial population increased with increasing temperature. The populations of fungi, thermophilic actinomycetes and cellulose-decomposing microorganisms in the dairy manure compost were significantly greater than those in the poultry waste and pig manure compost ($P \leq 0.05$). Dehydrogenase activity in these three piles increased initially but declined thereafter, while the protease activity increased with increasing compost temperature. Cellulase activity fluctuated at beginning and showed ascendant trend in pig and dairy manure composts, but declined later in the poultry wastes. The thermophilic cellulose-decomposing microorganism population was significantly positively correlated with temperature in the three piles during composting ($P \leq 0.05$).

Keywords: animal wastes; composting; cellulose-decomposing microorganism; thermophilic microorganism

收稿日期: 2015-05-12

基金项目: 环境保护部水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07101-004); 江苏省自然科学基金(SBK2015043629)

作者简介: 曹云(1981—), 女, 江苏丹阳人, 副研究员, 主要从事农业废弃物资源化利用研究。E-mail: youngtsao66@126.com

* 通信作者: 常志州 E-mail: czhizhou@hotmail.com

随着我国规模化畜禽养殖业的迅速发展,大量畜禽粪便已成为新的污染源。高温好氧堆肥是畜禽粪便无害化处理和肥料化利用的重要途径^[1-2]。传统堆肥一般发酵周期较长,效率低,为加快堆肥腐熟进程,人们往往对堆肥原料进行预处理,在预处理过程中,使用最多的方法是向物料中加入微生物制剂^[3-4]。据报道,我国生产微生物菌剂的厂家已超过 2000 家^[5]。但不同复合菌剂、不同的添加辅料和配比,导致堆肥腐熟效果不同^[6-10]。探明不同畜禽粪便中微生物的数量变化规律对于选择适宜的畜禽粪便堆肥菌剂,促进其堆肥效果具有重要的意义。

堆肥过程中,易分解的有机物(如淀粉、糖类等)和较易分解的有机物(如纤维素等)在升温 and 高温期在酶参与下已得到分解,此阶段微生物活动最为强烈。对堆肥升温期和高温期微生物数量和酶活性进行研究,了解堆肥过程中微生物动态变化,有利于推断有机物的降解程度^[6]。然而,以往的研究着重于单一微生物数量或者酶活性变化规律研究,而对堆肥微生物与酶活及温度变化的关系关注较少。因此,对堆肥启动及高温过程中微生物及酶活性变化进行研究,有利于了解堆肥启动期和高温期的生物化学过程,揭示影响畜禽粪便堆肥持续高温的主要因素,从而为适合于不同畜禽粪便的微生物菌种筛选、堆肥辅料组合配制及适宜的接种时间等提供重要理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

堆肥用原料猪粪、牛粪取自江苏省农业科学院六合动物科学基地,鸡粪取自江苏省农业科学院附近蛋用鸡养殖场。其基本理化性质见表 1。

1.2 试验方法

将新鲜的鸡粪、猪粪和牛粪在阴凉处风干至含水率为 55% 左右开始堆肥。堆肥试验在江苏省农业科学院网室内进行,堆肥共设三个处理,分别为鸡粪、猪粪、牛粪。堆体均为锥形体,规格为直径 1.5 m、高 1 m。堆肥过程中不翻堆,共堆制 11 d。在堆肥第 0、4、8、12、16、20、24、30、42、54、66、92、102、117、126、138、

208、256 h 取样,每次按四分法从堆肥外层、中层、里层各取约 200 g 样品,混匀;然后把样品一分为二,一份在 4℃ 冰箱保存用于微生物指标测定,一份风干磨细用于理化性质测定。

1.3 测定项目与方法

堆肥温度测定:将水银温度计从堆体部四周插入,在堆体上(距离地面 80 cm)、中(距离地面 50 cm)、下层(距离地面 20 cm)分别插入温度计,插入深度为 30 cm。每隔一段时间记录堆温和气温,以所得平均值为最终堆体温度。

pH 值采用肥水比 1:5(W/W),ORION 酸度计测定;电导率采用肥水比 1:5(W/W),雷磁 DDS-307 电导率仪测定。含水率、有机质、全氮、灰分的测定采用国家标准方法^[11]。有机物损失率(OM-loss, %)=($X_2 - X_1$)/ $X_1 \times 100$,其中 X_1 、 X_2 为堆肥开始和结束时灰分含量。

可溶性有机碳(DOC)、可溶性有机氮(DON)测定:称取 10 g 新鲜堆肥于 50 mL 三角瓶中,加 50 mL 0.5 mol·L⁻¹ K₂SO₄ 振荡 1 h 后以滤纸过滤,然后过 0.45 μm 滤膜,取上清液用 TOC (Analytikjena multi N/C 3100)测定待测液中的 DOC、DON。

堆肥中细菌、真菌、放线菌数量测定采用梯度稀释涂平板法。所用培养基分别是牛肉膏蛋白胨培养基、马丁氏培养基和高氏 1 号培养基^[12]。纤维素分解细菌、真菌分别在 Mendels、刚果红培养基培养 2 d 和 5 d 后开始计数^[13-14]。嗜温和嗜热微生物培养温度分别为 30℃ 和 55℃。堆肥蛋白酶、纤维素酶、脱氢酶的测定分别采用福林酚法、3,5-二硝基水杨酸法、三苯基四唑氯化物(TTC)法^[15]。蛋白酶活性以 1 h 后 1 g 样品产生的酪氨酸质量表示(μg Tyr·g⁻¹·h⁻¹);纤维素酶活性以 24 h 后 1 g 样品生成葡萄糖的质量表示(mg·g⁻¹·d⁻¹);脱氢酶活性以每 24 h 每克样品中生成的 1,3,5-三苯甲腈 triphenyl formazan (TPF) 的质量表示(μg TPF·g⁻¹·d⁻¹)。

1.4 数据处理

图表采用 Sigmaplot 10.0 制作,数据显著性分析采用 SPSS 16.0 软件进行。

表 1 堆肥原料的基本性质

Table 1 Basic characteristics of composting materials

堆肥原料 Raw material	含水率 Moisture content/%	pH	总有机碳 Total organic carbon/g·kg ⁻¹	总氮 Total nitrogen/g·kg ⁻¹	总磷 Total phosphorous/g·kg ⁻¹	总钾 Total potassium/g·kg ⁻¹
鸡粪 Poultry manure	72.4	8.01	302.6	15.2	20.04	33.30
猪粪 Pig manure	75.2	7.82	415.8	21.9	22.30	12.16
牛粪 Dairy manure	83.2	7.88	300.2	9.9	30.32	11.18

2 结果与分析

2.1 堆肥过程中温度和水分的变化

堆肥过程中的温度变化是堆肥腐熟的重要参数之一。在11 d的堆置期间,各处理温度在2 d内均可升至50℃以上,并维持此温度的时间均超过5 d,达到了粪便无害化标准^[16]。2 d后各处理温度逐渐升高并达到最高峰,其中牛粪最先(66 h)达到最高温度(61.6℃),其次为鸡粪,发酵71 h时达到最高温度61.3℃,此后略有下降;猪粪发酵138 h后温度达到峰值(66.8℃),此后一直维持在66℃以上,见图1(A)。堆肥过程中,三种堆肥含水率变化如图1(B)所示,各处理初始含水率为50%~55%,随着堆肥的进行,各处理含水率很快下降,至试验结束时,鸡粪、猪粪、牛粪堆肥的含水率均下降至39%左右。

2.2 堆肥过程中pH和电导率的变化

图2(A)所示的是堆肥过程中pH值的变化趋势。在前3 d(升温期),由于微生物分解蛋白质类有机物产生氨氮,促使pH值上升较快^[17]。试验结束时,鸡粪、猪粪两种堆肥的pH值分别为9.1、8.8。由于牛粪中蛋白质类有机物含量较鸡粪和猪粪少,在堆肥后期,随着氨的挥发及蛋白质类有机物的降解,pH值下

降到8.2。堆肥中电导率的变化在一定程度上反映了堆肥中有机、无机氮的相互转化程度和可溶性盐的浓度^[18]。从图2(B)可以看出,鸡粪堆肥电导率呈先上升后下降趋势,猪粪、牛粪堆肥电导率前期上升明显,后期变化不大。三种堆肥原料相比,鸡粪堆肥的电导率最大、其次为猪粪,牛粪堆肥电导率最小。

2.3 堆肥前期水溶性碳、氮含量变化

水溶性有机碳(DOC)是微生物在分解有机物料中半纤维素、纤维素等的产物,但它又是微生物本身所依赖的碳源与能源^[19]。DOC含量可能与物料的分解速度和微生物的利用有关。堆肥前期,水溶性有机碳呈波动上升趋势,可能是因为堆肥前期物料中有机碳分解的速率大于微生物的降解和利用,使得堆肥中水溶性有机碳含量增加^[20]。堆肥前期水溶性氮的含量呈上升趋势,鸡粪、猪粪、牛粪堆体DON含量在48~72 h达到最大值,分别由初始的2.78、2.75、0.16上升到4.46、4.21、2.16 g·kg⁻¹。这是部分无机N转变成有机N,而被同化固定下来的缘故^[21]。堆肥物料间相比,堆肥前期猪粪和鸡粪DOC、DON含量相近,后期猪粪DOC含量显著高于鸡粪,牛粪DOC、DON含量最小(图3)。

堆肥开始后的72 h内,鸡粪、猪粪、牛粪堆体C/N

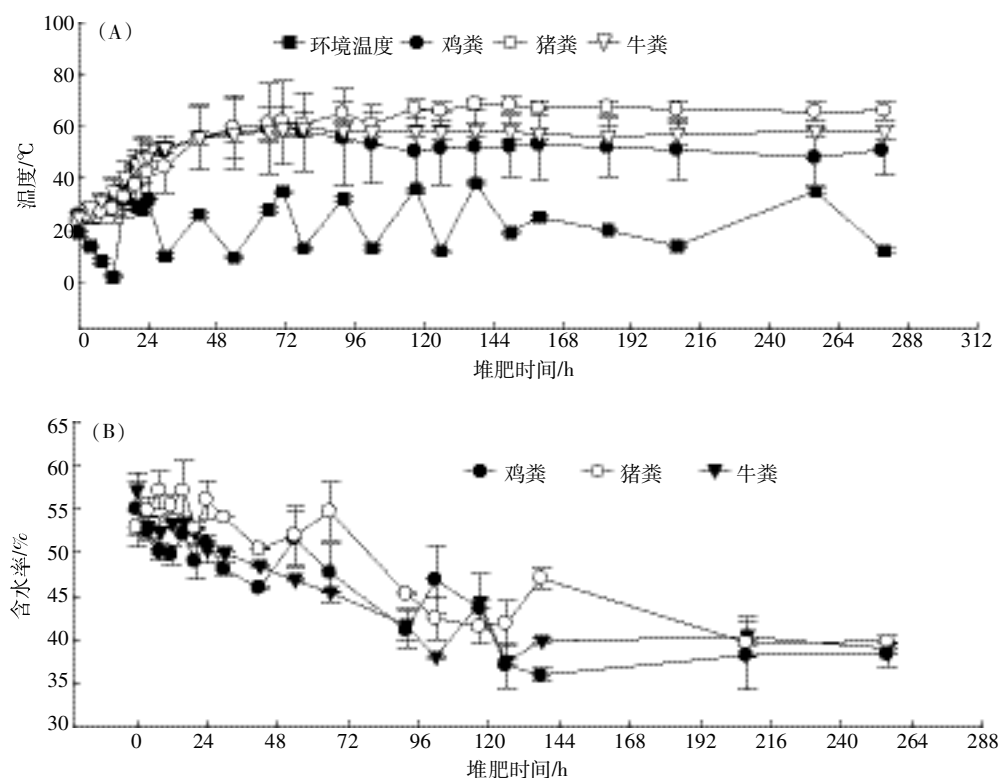


图1 堆肥前期温度和含水率变化

Figure 1 Temperature and moisture variations in different waste piles during early stage of composting

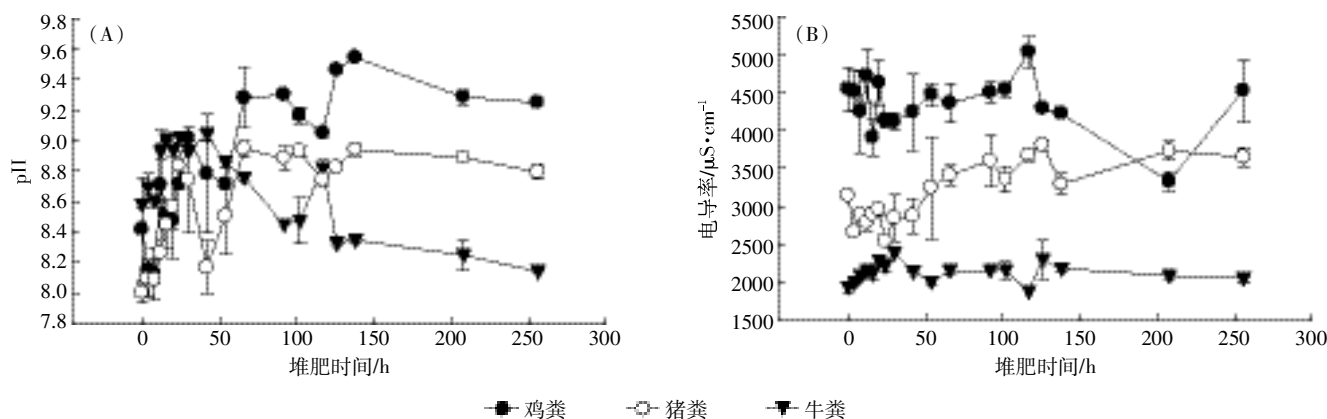


图 2 堆肥前期 pH、电导率变化

Figure 2 Dynamics of pH and EC in different waste piles during early stage of composting

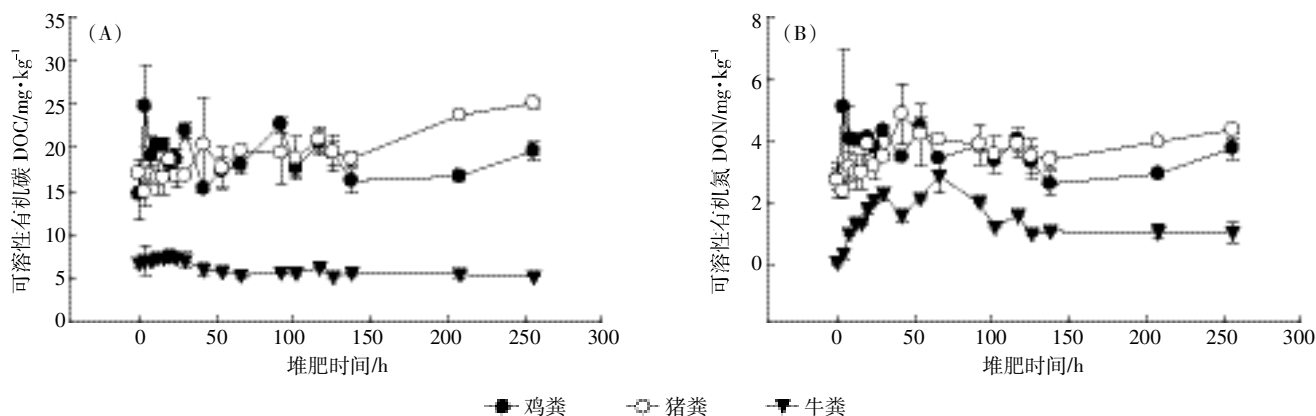


图 3 堆肥前期可溶性有机碳、可溶性有机氮含量变化

Figure 3 Dynamics of water soluble carbon (DOC) and water soluble nitrogen (DON) in different waste piles during early stage of composting

比分别由初始的 34、32、42 上升到最大值 41、35、52, 72 h 后 3 种堆体 C/N 开始下降, 至试验结束 (256 h) 时, C/N 下降至初始水平。在整个堆肥期间, 牛粪 C/N 最大, 其次为鸡粪, 猪粪 C/N 最小, 见图 4(A)。从有机质消耗曲线来看, 牛粪堆肥 72 h 前的有机质消耗速率最大, 此后逐渐放缓, 鸡粪、猪粪堆置 120 h 有机质消耗最快。至试验结束, 鸡粪、猪粪、牛粪有机物分别损失了 33%、30%、15%, 见图 4(B)。

2.4 堆肥前期各类型微生物数量变化

微生物的数量直接影响堆肥的进程。堆肥过程中细菌是分解有机物和产热的主要微生物种群。在堆肥初期, 一些嗜温性和嗜热性细菌快速增殖, 堆肥前期, 鸡粪、猪粪、牛粪堆体嗜温性细菌持续上升并达到最大(表 2)。鸡粪、猪粪、牛粪堆置 138 h、96 h、24 h 后分别由初始的 8.38 、 8.81 、 $7.23 \lg \text{CFU}\cdot\text{g}^{-1}$ 上升至 10.15 、 9.63 、 $8.83 \lg \text{CFU}\cdot\text{g}^{-1}$ 。当堆肥进入高温期后, 随着温度的升高和营养物质的消耗, 嗜温性细菌数量开始下降, 嗜热性细菌则呈不断上升趋势, 堆肥结束时, 鸡

粪、猪粪、牛粪嗜热细菌数量分别由初始的 4.79 、 4.37 、 $5.23 \lg \text{CFU}\cdot\text{g}^{-1}$ 上升至 6.05 、 6.69 、 $6.83 \lg \text{CFU}\cdot\text{g}^{-1}$ (表 2)。

在堆肥前期, 嗜温性放线菌数量的变化趋势与细菌大致相同, 但其数量较细菌少。鸡粪、猪粪、牛粪堆肥的嗜温性放线菌数量分别在 92 h、72 h、138 h 达到最大(表 2)。整体而言, 牛粪高温放线菌数量显著高于鸡粪和猪粪, 且随温度的上升呈上升趋势, 说明放线菌是牛粪堆肥高温期分解木质纤维素的优势菌群, 在堆肥高温期能稳定分解木质纤维素^[22]。Liu 等^[23]研究表明, 牛粪与稻糠堆肥中嗜温性细菌和放线菌数量呈先上升后下降趋势, 与本研究结果一致。Goyal 等^[2]研究了鸡粪、牛粪与甘蔗秸秆混合堆肥嗜温和嗜热性微生物变化规律, 结果表明嗜热性微生物数量在前 14 d 呈持续上升趋势。

真菌对堆肥原料的分解起着重要作用, 特别是高温真菌对纤维素具有很强的分解作用^[24]。堆肥前期, 三种粪便中真菌数量均显著低于细菌和放线菌。堆肥

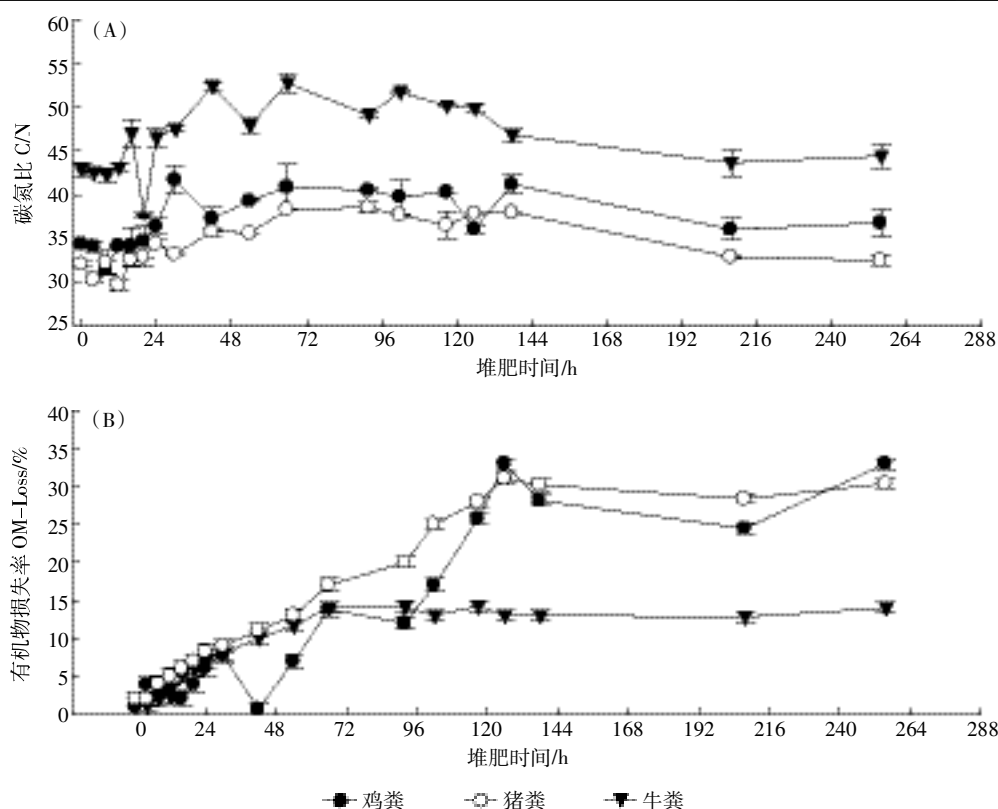


图4 堆肥前期碳氮比、有机物损失率变化

Figure 4 Changes of C/N and organic matter loss rate in different waste piles during early stage of composting

过程中,鸡粪、猪粪堆肥嗜温性真菌数量无明显变化趋势,牛粪堆肥中嗜温真菌数量呈先上升后下降趋势,且牛粪堆肥中真菌数量显著高于($P \leq 0.001$)猪粪堆肥和鸡粪堆肥(表2)。在本试验中,猪粪堆肥和鸡粪堆肥过程中均未分离到嗜热真菌。Tiquia 等^[25]研究了堆肥中真菌数量变化规律,结果表明大多数真菌在堆肥温度高于 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时均消失,但当温度低于 $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后一些真菌群落开始恢复。牛粪堆肥中嗜热真菌的数量随着堆肥温度的升高而增加,与 Goyal 等^[2]的研究结果一致。

堆肥过程中,纤维素分解菌通过分泌纤维素酶对纤维素、木质素等的降解是堆肥腐熟的关键^[25]。本试验中,鸡粪、猪粪、牛粪堆肥中嗜温性纤维素分解细菌和真菌数量也呈现先上升而后下降并逐步趋于平稳的趋势(表2)。牛粪堆肥中嗜温和嗜热纤维素分解菌的数量均显著高于猪粪和鸡粪堆肥($P \leq 0.001$),与牛粪的纤维素含量较猪粪、鸡粪高有关。鸡粪和猪粪堆肥嗜热性纤维分解细菌在 48 h 后随着温度的上升而升高。牛粪堆肥中嗜热纤维素分解菌的数量随着温度的上升而持续增加,牛粪堆肥结束时,嗜热纤维素分解细菌的数量均较初始值增加了 1 个数量级。这与

Liu 等^[23]的研究结果一致。Kornilowicz-Kowalska 等^[26]研究也发现,动物羽毛废弃物堆肥第 1 周嗜温性纤维素分解菌占绝对优势,且其数量达到最大,但随着堆肥温度的上升,嗜温性纤维素分解菌数量开始下降,嗜热性纤维素分解菌数量开始上升。这是因为在堆肥初期由于存在大量的可溶性碳源供微生物利用,但随着堆肥的进行,这些可溶性物质被消耗殆尽,一些复杂碳源如木质纤维素类开始被降解,纤维素分解菌数量增加^[23]。本试验中(表3),牛粪堆肥的温度与嗜热纤维素分解细菌数量相关性达显著水平 $r^2=0.765$ ($P \leq 0.05$)。梁东丽等^[10]研究也表明,鸡粪、猪粪、牛粪堆肥温度与纤维素酶活性呈显著正相关关系,说明堆肥高温期,嗜热性纤维素分解菌对纤维素、木质素等的矿化和分解及高温的维持起了重要作用。在猪粪、鸡粪堆肥高温期接种嗜热性纤维素分解菌可能加快堆肥中有机质分解和转化,促进腐熟。

2.5 堆肥前期酶活性变化

2.5.1 堆肥前期脱氢酶活性变化

脱氢酶变化可反映堆肥过程中有机物质的氧化程度^[10]。鸡粪、猪粪、牛粪堆肥过程中脱氢酶活性的变化趋势都随着反应的进行先上升后下降(图5A),且

表 2 堆肥前期各类型微生物数量(lg CFU·g⁻¹)变化
Table 2 Changes of mesophilic and thermophilic microbiological populations(lg CFU·g⁻¹) in different waste piles during early stage of composting

时间/h		嗜温菌					嗜热菌				
		MB	MF	MA	MCB	MCF	TB	TF	TA	TCB	TCF
鸡粪	0	7.38	2.87	3.11	3.48	2.01	4.79	—	2.95	3.54	—
	12	7.08	2.45	3.06	3.02	2.11	4.11	—	3.12	3.41	—
	24	8.34	2.39	3.31	3.38	2.56	5.00	—	3.78	3.32	—
	42	8.75	2.36	4.49	4.30	2.32	5.48	—	3.84	3.11	—
	66	8.39	2.29	4.1	3.85	2.35	5.08	—	3.32	3.45	—
	92	9.38	2.31	5.32	3.16	2.24	5.05	—	3.27	3.62	—
	138	10.15	2.2	4.38	3.23	2.01	5.55	—	2.92	3.75	—
	208	7.32	2.25	4.11	3.34	2.11	5.66	—	3.89	3.46	—
	256	7.06	2.11	4.06	3.12	2.26	6.05	—	3.12	3.61	—
猪粪	0	8.81	3.62	4.41	3.65	2.29	4.37	—	3.62	3.33	—
	12	8.41	3.40	4.78	3.57	2.21	4.90	—	3.97	3.97	—
	24	8.76	4.28	4.63	3.70	2.93	5.96	—	4.28	3.22	—
	42	8.96	3.26	5.09	4.63	2.87	4.93	—	4.22	3.97	—
	66	9.41	3.12	5.63	3.66	2.67	5.15	—	4.16	4.38	—
	92	9.63	3.23	5.15	3.80	2.12	5.44	—	4.61	4.35	—
	138	9.34	3.57	4.76	3.48	2.31	6.43	—	3.94	4.14	—
	208	8.41	3.74	4.38	3.67	2.87	6.53	—	3.99	4.82	—
	256	8.3	3.38	4.23	3.53	2.45	6.69	—	3.48	4.69	—
牛粪	0	7.23	4.02	4.56	5.89	3.23	5.23	3.64	4.12	4.23	3.85
	12	7.12	4.07	4.69	6.05	4.02	5.01	3.83	4.35	4.72	3.06
	24	8.83	4.70	5.52	6.34	4.48	5.90	3.92	4.53	4.16	3.70
	42	8.79	4.75	5.21	6.42	4.51	6.15	4.14	5.39	5.14	3.74
	66	8.65	4.15	5.18	6.81	4.70	6.57	4.08	5.11	5.64	4.02
	92	8.01	5.65	5.75	6.00	4.08	6.51	4.83	5.41	5.05	4.63
	138	8.32	4.95	5.79	5.72	4.43	6.56	4.36	5.32	5.72	4.30
	208	8.23	4.76	5.29	5.94	4.31	6.68	4.58	5.19	5.63	4.12
	256	8.45	4.87	5.67	6.03	4.14	6.83	4.28	5.67	5.23	4.23

注:MB 为嗜温性细菌;MF 为嗜温性真菌;MA 为嗜温性放线菌;MCB 为嗜温性纤维素分解细菌;MCF 为嗜温性纤维素分解真菌;TB 为嗜热性细菌;TF 为嗜热性真菌;TA 为嗜热性放线菌;TCB 为嗜热性纤维素分解细菌;TCF 为嗜热性纤维素分解真菌。“—”表示未分离到。下同。

Note:MB-mesophilic bacteria;MF-mesophilic fungi;MA-mesophilic actionmytes;MCB-mesophilic cellulose bacteria;MCF-mesophilic cellulose fungi;TB-thermophilic bacteria;TF-thermophilic fungi;TA-thermophilic actionmytes;TCB-thermophilic cellulose bacteria;TCF-thermophilic cellulose fun-gi;“—”- not detected. The same below.

鸡粪和猪粪堆体的脱氢酶活性上升速度和峰值均较牛粪大。由表 4 可见,鸡粪、猪粪堆肥脱氢酶活性变化均与嗜温纤维素分解菌数量显著相关($P\leq 0.05$),牛粪脱氢酶活性与嗜温真菌及嗜热菌数量呈显著正相关($P\leq 0.05$)。本试验脱氢酶活性变化趋势与梁东丽等^[10]、高华等^[27]报道一致,但活性高峰提前,其原因可能是堆肥原料与堆肥方式差异所致。

2.5.2 堆肥前期蛋白酶活性变化

蛋白酶主要参与堆肥中氨基酸蛋白质等含氮化合物的分解和转化,是参与堆肥过程氮素转化的最

重要酶^[28-29]。由图 5(B)可见,堆肥过程中蛋白酶活性变化趋势也是随堆肥进行呈现波动上升趋势。鸡粪、猪粪、牛粪堆肥蛋白酶活性均在升温期的前 24 h 增幅最大。这是因为在堆肥初期粗蛋白成分较多,有机质含量高,营养丰富,促进了产蛋白微生物的生长及蛋白酶的合成,蛋白酶活迅速上升^[17,23]。进入高温期,蛋白酶活仍然较高,说明此阶段氨基酸蛋白质类物质尚未完全降解。鸡粪、猪粪、牛粪堆肥蛋白酶活性分别在第 117 h、66 h、16 h 达到峰值,其峰值分别为 93.2、66.4、56.8 mg·g⁻¹·d⁻¹。鸡粪堆肥蛋白酶峰值最大,这是

表 3 不同类型微生物数量与堆肥温度的相关性(r^2 值)

Table 3 Correlationship between microbial population and temperature(r^2)

项目	MB	MF	MA	MCB	MCF	TB	TF	TA	TCB	TCF
鸡粪 Poultry manure	0.228	-0.641	0.740*	0.289	0.587	0.581	—	0.403	0.003	—
猪粪 Pig manure	0.324	-0.759	0.179	0.028	0.189	0.726*	—	0.762*	0.379	—
牛粪 Dairy manure	0.793*	0.64	0.823**	0.278	0.899**	0.915**	0.746*	0.901**	0.765*	0.40

注:** 和 * 分别表示达到 $P \leq 0.01$ 和 $P \leq 0.05$ 的显著性检验水平。
Note: ** Indicates significant correlation between two variables at $P \leq 0.01$; * significant correlation between two variables at $P \leq 0.05$.

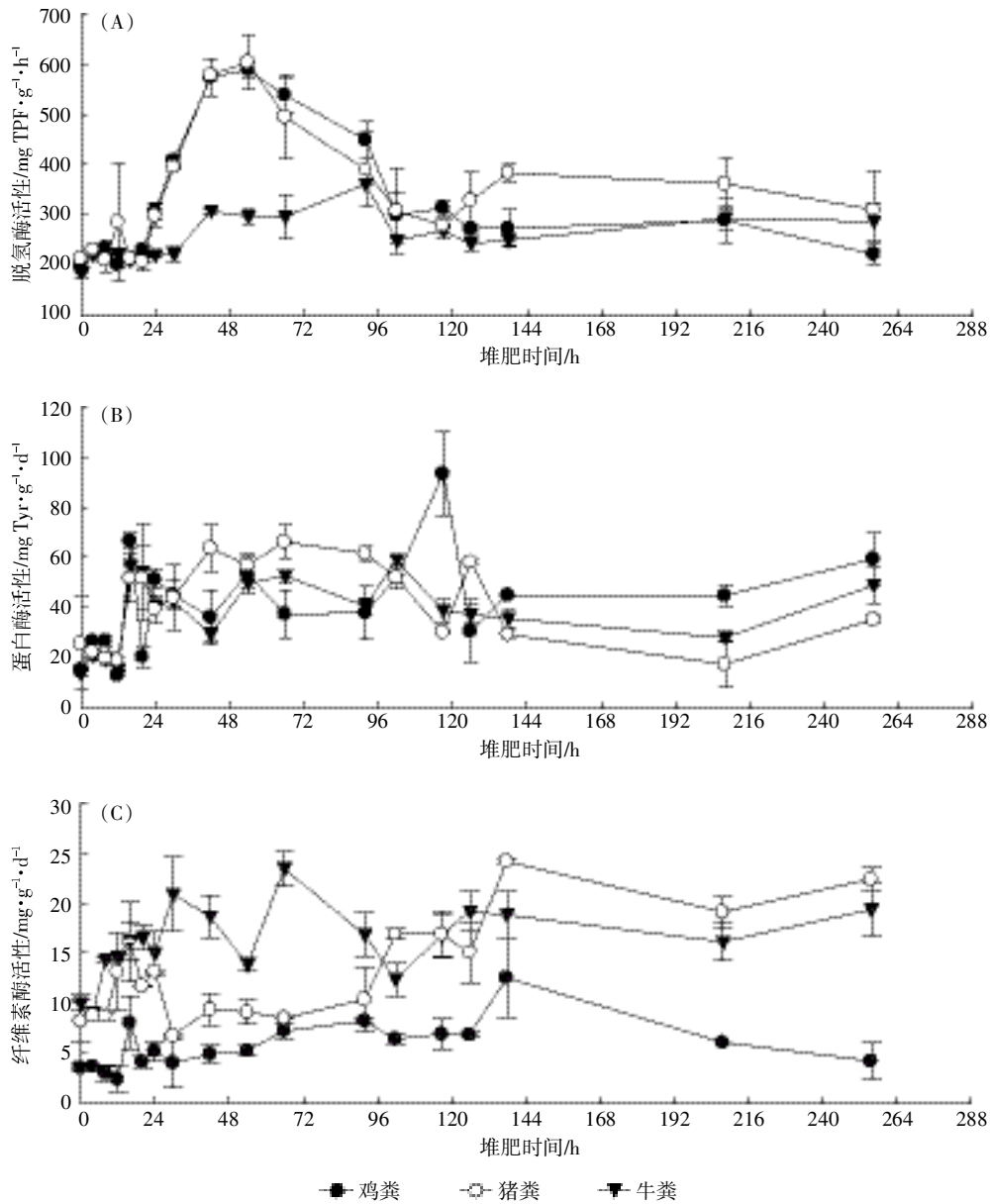


图 5 堆肥过程中脱氢酶、蛋白酶、纤维素酶活性变化

Figure 5 Dynamics of dehydrogenase(A), protease(B) and cellulase(C) activities in different waste piles during composting

由于家禽消化系统的特殊结构和消化道长度较短等原因,家禽饲料利用率较低,家禽粪便中有机氮含量较多^[30]。鸡粪、猪粪堆肥蛋白酶活性与嗜温性细菌和

放线菌数量显著正相关,牛粪堆肥蛋白酶活性除了与嗜温性细菌显著正相关外,与嗜热放线菌及嗜热纤维素分解菌数量的相关性也达到显著水平。Liu 等^[23]研

表 4 堆肥前期脱氢酶、蛋白酶、纤维素酶活性与微生物数量的关系

Table 4 Correlation between microbial population and activities of dehydrogenase, protease and cellulose

项目		MB	MF	MA	MCB	MCF	TB	TF	TA	TCB	TCF
鸡粪堆肥	脱氢酶	0.111	-0.237	0.613	0.771*	0.424	-0.589	—	0.454	-0.474	—
	蛋白酶	0.122	-0.932**	0.499	-0.171	0.208	0.588	—	-0.485	0.270	—
	纤维素酶	0.867**	-0.458	0.621	-0.042	0.210	0.372	—	-0.176	0.538	—
猪粪堆肥	脱氢酶	0.469	-0.686*	0.717*	0.702*	0.409	-0.045	—	0.493	0.34	—
	蛋白酶	0.808**	-0.766*	0.841**	0.532	0.191	-0.186	—	0.708*	0.003	—
	纤维素酶	0.226	-0.284	0.396	0.375	0.130	0.887**	—	-0.31	0.782*	—
牛粪堆肥	脱氢酶	0.446	0.715*	0.581	0.228	0.664	0.719*	0.847**	0.824**	0.595	0.580
	蛋白酶	0.718*	0.359	0.470	0.597	0.579	0.662	0.528	0.668*	0.678*	0.141
	纤维素酶	0.594	0.615	0.794*	0.148	0.841**	0.785*	0.680*	0.869**	0.771*	0.559

注:**和*分别表示达到 $P \leq 0.01$ 和 $P \leq 0.05$ 的显著性检验水平。

Note:** and * Indicate significant correlation between two variables at $P \leq 0.01$ and 0.05 , respectively.

究发现,牛粪和稻糠体积比 85/15 混合堆肥,蛋白酶活性呈现先上升后下降趋势。De 等^[31]采用马粪、鸡粪和稻秸混合堆肥蛋白酶活性也呈相同趋势。

2.5.3 堆肥前期纤维素酶活性变化

纤维素酶是堆肥有机质转化的重要酶,主要参与纤维素的水解,最终生成葡萄糖^[32-33]。纤维素酶活性与环境的呼吸强度有关,同时也受底物诱导和降解产物的阻遏^[8,34]。三种畜禽粪便堆肥过程中纤维素酶活性(以葡萄糖计)变化趋势有所不同,猪粪和牛粪基本上呈现波动上升趋势,鸡粪堆肥则是先上升后下降趋势(图 5C)。梁东平等^[10]研究表明,鸡粪、猪粪、牛粪堆肥前 15 d 纤维素酶活性均呈上升趋势,可能是因为鸡粪纤维素含量较低,且本研究未添加秸秆等堆肥辅料。三种粪便堆肥过程中纤维素酶活性均在升温期 and 高温期出现 2 个较为明显的波峰,说明在畜禽粪便中的纤维素是在不同阶段由不同产纤维素酶微生物种群逐步降解的。堆肥初期,分泌纤维素酶的微生物主要是嗜冷微生物,随着堆体温度上升,嗜热微生物、中温微生物均随之增多,其活性也逐渐增大,因此纤维素酶活性增加^[10]。三种粪便相比,堆肥前期牛粪堆肥纤维素酶活性明显高于猪粪和鸡粪,与梁东平等^[10]的研究结果一致。升温后期猪粪堆肥纤维素酶活性上升较快,与高温期猪粪堆肥中嗜热性微生物数量的显著上升有关,因为猪粪堆肥纤维素酶活性与嗜热性微生物数量相关性较好。鸡粪堆肥纤维素酶活性在升温后期出现明显下降,可能是因为高温期大量嗜温性微生物死亡,而鸡粪堆肥中高温纤维素分解菌数量又较低(表 4)。鸡粪、猪粪、牛粪堆肥纤维素酶活性的大小均与温度呈显著正相关,皮尔逊相关系数分别为 $r^2=0.555(P=0.017)$ 、 $r^2=0.525(P=0.025)$ 、 $r^2=0.680(P=0.002)$ 。

3 结论

(1)鸡粪、猪粪、牛粪调节含水量至 55%左右,堆肥温度在 2 d 内均可升至 50℃以上,并且维持此温度的时间均超过 5 d。

(2)在堆肥过程中,鸡粪、猪粪、牛粪中的细菌、真菌、放线菌数量变化趋势相同,表现为嗜温性均是先升高后降低;嗜热菌的数量随温度的上升而上升。牛粪堆肥中真菌、嗜热放线菌及纤维素分解菌的数量显著高于鸡粪和猪粪堆肥。

(3)鸡粪、猪粪、牛粪堆肥过程中脱氢酶活性变化趋势为先升高后下降。三种畜禽粪便堆肥蛋白酶活性随温度的升高而上升,鸡粪堆肥蛋白酶峰值最大。猪粪和牛粪堆肥纤维素酶活性呈波动上升趋势,鸡粪堆肥则是先上升后下降趋势。鸡粪、猪粪、牛粪堆肥纤维素酶活性的大小均与温度呈显著正相关,因此在堆肥高温阶段接种嗜热性纤维素分解菌对于维持堆肥高温,加速堆肥有机质降解,促进腐熟有重要意义。

参考文献:

- [1] 李国学, 张福锁. 固体废物堆肥化与有机复混肥生产[M]. 北京: 化学工业出版社, 2000: 75-79.
LI Guo-xue, ZHANG Fu-suo. Composting of solid wastes and organic compound fertilizer manufacturing[M]. Beijing: Chemical Engineering Press, 2000: 75-79.
- [2] Goyal S, Dhull S K, Kapoor K K. Chemical and biological changes during composting of different organic wastes and assessment of compost maturity[J]. *Bioresource Technology*, 2005, 96(14): 1584-1591.
- [3] 张 军, 雷 梅, 高 定, 等. 堆肥调理剂研究进展[J]. 生态环境, 2007, 16(1): 219-224.
ZHANG Jun, LEI Mei, GAO Ding, et al. Application of amendments in composting: A review[J]. *Ecology and Environment*, 2007, 16(1): 219-

- 224.
- [4] Faure D, Deschamps A M. The effect of bacterial inoculation on the initiation of composting of grape pulps[J]. *Bioresource Technology*, 1991, 37(3):235-238.
- [5] 高云航, 勾长龙, 王雨琼, 等. 低温复合菌剂对牛粪堆肥发酵影响的研究[J]. *环境科学学报*, 2014, 34(12):3166-3170.
GAO Yun-hang, GOU Chang-long, WANG Yu-qiong, et al. Effects of the cold-adapted complex microbial agents on cattle manure composting [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, 34(12):3166-3170.
- [6] 徐 智, 张隼利, 张发宝, 等. 接种内外源微生物菌剂对堆肥效果的影响[J]. *中国环境科学*, 2009, 29(8):856-860.
XU Zhi, ZHANG Long-li, ZHANG Fa-bao, et al. Effects of indigenous and exogenous microbial inocula on composting in a bioreactor[J]. *China Environmental Sciences*, 2009, 29(8):856-860.
- [7] Richard T L, Hamelers H V M, Veeken A, et al. Moisture relationship in composting processes[J]. *Compost Science and Utilization*, 2002, 10(4):286-302.
- [8] Tiquia S M, Tam N F Y, Hodgkiss I J. Effects of bacterial inoculum and moisture adjustment on composting of pig manure[J]. *Environmental Pollution*, 1997, 96(2):161-171.
- [9] 顾文杰, 张发宝, 徐培智, 等. 接种菌剂对堆肥微生物数量和酶活性的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2009, 28(8):1718-1722.
GU Wen-jie, ZHANG Fa-bao, XU Pei-zhi, et al. Inoculum additions during composting: Impacts on microbial populations and enzyme activity[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(8):1718-1722.
- [10] 梁东丽, 谷 洁, 秦清军, 等. 接种菌剂对猪粪高温堆肥中酶活性的影响[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(9):243-248.
LIANG Dong-li, GU Jie, Qin Qing-jun, et al. Effects of inoculants on enzymes activities of pig manure during high temperature composting [J]. *Transactions of the CSAE*, 2009, 25(9):243-248.
- [11] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
BAO Shi-dan. *Agricultural and chemical analysis of soil*[M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [12] 李阜棣, 喻子牛, 何绍江. 农业微生物学实验技术[M]. 北京: 中国农业出版社, 1996:32-36.
LI Fu-di, YU Zi-niu, HE Shao-jiang. *Agricultural microbiology experiment technology*[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1996:32-36.
- [13] Kasana R C, Salwan R, Dhar H, et al. A rapid and easy method for the detection of microbial cellulases on agar plates using gram's iodine[J]. *Current Microbiology*, 2008, 57(5):503-507.
- [14] Mandels M, Weber J. The Production of cellulases[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 1969, 95(2):391-414.
- [15] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 中国农业出版社, 1983:260-292.
GUAN Song-yin. *Soil enzymes and study methods*[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1983:260-292.
- [16] 中华人民共和国卫生部. GB/T 7959—2012 粪便无害化卫生标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
Ministry of Health of PRC. GB/T 7959—2012 Hygienic requirements for harmless disposal of night soil[S]. Beijing: China Standard Press, 2006.
- [17] 鲍艳宇, 周启星, 颜 丽, 等. 畜禽粪便堆肥过程中各种氮化合物的动态变化及腐熟度评价指标[J]. *应用生态学报*, 2008, 19(2):374-380.
BAO Yan-yu, ZHOU Qi-xing, YAN Li, et al. Dynamic changes of nitrogen forms in livestock manure during composting and relevant evaluation indices of compost maturity[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(2):374-380.
- [18] 罗一鸣, 魏宗强, 孙钦平, 等. 沸石作为添加剂对鸡粪高温堆肥氨挥发的影响[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(2):243-247.
LUO Yi-ming, WEI Zong-qiang, SUN Qin-ping, et al. Effects of zeolite addition on ammonia volatilization in chicken manure composting[J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(2):243-247.
- [19] Zmora-Nahuma S, Markovitch O, Tarchitzky J, et al. Dissolved organic carbon(DOC) as a parameter of compost maturity[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2005, 37:2109-2116.
- [20] 张雪辰, 邓 双, 杨密密, 等. 畜禽粪便堆腐过程中有机碳组分与腐熟指标的变化[J]. *环境科学学报*, 2014, 34(10):2559-2565.
ZHANG Xue-chen, DENG Shuang, YANG Mi-mi et al. Changes of organic carbon fractions and maturity index during composting of manure [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, 34(10):2559-2565.
- [21] 黄国锋, 钟流举, 张振钿, 等. 猪粪堆肥化处理过程中的氮素转变及腐熟度研究[J]. *应用生态学报*, 2002, 13(11):1459-1462.
HUANG Guo-feng, ZHONG Liu-ju, ZHANG Zhen-tian, et al. On nitrogen transformations and maturity during composting of pig manure [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(11):1459-1462.
- [22] 李敏清, 袁英英, 杨江舟, 等. 畜禽粪便堆肥过程中酶活性及微生物数量的变化研究[J]. *中国生物工程杂志*, 2010, 30(11):56-60.
LI Min-qing, YUAN Ying-ying, YANG Jiang-zhou, et al. Changing of enzymes activity and microbe quantity in animal manure during composting[J]. *China Biotechnology*, 2010, 30(11):56-60.
- [23] Liu D Y, Zhang R F, Wu H S, et al. Changes in biochemical and microbiological parameters during the period of rapid composting of dairy manure with rice chaff[J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(19):9040-9048.
- [24] 席北斗, 刘鸿亮, 白庆中, 等. 堆肥中纤维素和木质素的生物降解研究现状[J]. *环境污染治理技术与设备*, 2002, 3(3):19-23.
XI Bei-dou, LIU Hong-liang, BAI Qing-zhong, et al. Study on current status of lignin and cellulose biodegradation in composting process[J]. *Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control*, 2002, 3(3):19-23.
- [25] Tiquia S M. Evolution of extracellular enzyme activities during manure composting[J]. *Journal of Applied Microbiology*, 2002, 92(4):764-775.
- [26] Kornilowicz-Kowalska T, Bohacz J. Dynamics of growth and succession of bacteria and fungal communities during composting of feather waste[J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101:1268-1276.
- [27] 高 华, 秦清军, 谷 洁, 等. 农业废弃物堆腐过程中氧化还原酶活性的变化[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2008, 36(2):222-228.
GAO Hua, QIN Qing-jun, GU Jie, et al. Activity changes of oxidoreductase during composting of agricultural waste materials[J]. *Journal of*

- Northwest A&F University(Nat Sci Ed), 2008, 36(2):222-228.
- [28] 刘学玲, 黄懿梅, 姜继韶, 等. 微生物生理群在猪粪秸秆高温堆肥碳氮转化中的作用[J]. 环境工程学报, 2012, 6(5):1713-1720.
- LIU Xue-ling, HUANG Yi-mei, JIANG Ji-shao, et al. Function of microbial physiological group in carbon and nitrogen transformation during a swine manure-straw compost[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2012, 6(5):1713-1720.
- [29] 倪治华, 薛智勇. 猪粪堆制过程中主要酶活性变化[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(3):406-411.
- NI Zhi-hua, XUE Zhi-yong. Changes of main enzymes activities of pig manure during composting[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2005, 11(3):406-411.
- [30] 伍 兵, 邓悟森, 谭周进, 等. 鸡粪堆肥的酶活特性研究[J]. 中国微生物生态学杂志, 2011, 23(11):972-975.
- WU Bing, DENG Wu-sen, TAN Zhou-jin, et al. Studies on enzyme characteristics during composting of chicken manure[J]. *Chinese Journal of Microecology*, 2011, 23(11):972-975.
- [31] DeL H M A, Deferieri R, Jimenez P, et al. Evolution of alkaline phosphatase and protease activities, total organic carbon and CO₂ evolved during composting[J]. *Agrochimica*, 2005, 49(1):22-28.
- [32] Khalil A I, Beheary M S, Salem E M. Monitoring of microbial population and their cellulolytic activities during the composting of municipal solid waste[J]. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 2011, 17:155-161.
- [33] 黄 翠, 杨朝晖, 肖 勇, 等. 堆肥嗜热纤维素分解菌的筛选鉴定及其强化堆肥研究[J]. 环境科学学报, 2010, 30(12):2457-2463.
- HUANG Cui, YANG Zhao-hui, XIAO Yong, et al. Isolation and identification of cellulolytic thermophiles for composting and their enhancement of composting[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2010, 30(12):2457-2463.
- [34] 熊仕娟, 徐卫红, 杨 芸, 等. 不同温度下微生物和纤维素酶对发酵猪粪理化特性的影响[J]. 环境科学学报, 2014, 34(12):3158-3165.
- XIONG Shi-juan, XU Wei-hong, YANG Yun, et al. Effects of microbes and cellulose in pig manure fermentation at different temperature[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, 34(12):3158-3165.

《保鲜与加工》杂志 2016 年征订征稿启事

中文核心期刊

中国北方优秀期刊

英国《国际农业与生物科学研究中心》

中国科技核心期刊

中国学术期刊(光盘版)收录期刊

(CABI)收录期刊

中国农业核心期刊

美国《化学文摘》(CA)收录期刊

英国《食品科技文摘》(FSTA)收录期刊

主管:天津市农业科学院

主办:国家农产品保鲜工程技术研究中心(天津)

国际标准连续出版物号:ISSN 1009-6221

国内统一连续出版物号:CN 12-1330/S

邮发代号:6-146 双月刊,逢单月 10 日出版,单价 10 元,全年 60 元。

《保鲜与加工》杂志是我国农产品采后技术研究领域的中文核心期刊,据中国知网的最新统计结果,5 年复合影响因子为 1.234。本刊主要报道农产品保鲜与加工相关领域基础理论、新技术、新工艺、新设备、新材料的研究成果及国内外相关行业的动态与信息。主要设置专家论坛、保鲜研究、加工研究、检测分析、专题论述、技术指南、行业资讯、科普沙龙、科技前沿、政策法规等栏目。适于科技人员、农业技术推广人员、相关企业管理和技术人员、大专院校师生及广大从事保鲜与加工技术研发领域的人士参阅。欢迎在全国各地邮局(所)或本编辑部订阅,欢迎广大读者踊跃投稿,并诚邀刊登各类相关广告。

通讯地址:天津市西青区津静公路 17 公里处,国家农产品保鲜工程技术研究中心(天津)《保鲜与加工》编辑部

邮编:300384

电话:022-27948711

联系邮箱:bxyjg@163.com

投稿平台:www.bxyjg.com