

接种外源生物菌剂后牛粪堆肥腐植酸变化规律

任 静, 郁继华*, 颀建明, 张国斌, 李雯琳

(甘肃农业大学农学院, 兰州 730070)

摘 要: 添加 3 种不同的外源生物菌剂对牛粪进行堆肥试验, 通过测定堆肥过程中的温度、腐植酸的变化, 研究了添加外源微生物对堆肥腐熟进程的影响, 以及筛选出适合当地堆肥条件的生物菌剂。结果表明, 添加 3 种外源微生物均对堆体快速升温及延长高温期有显著作用; 菌剂 2、菌剂 3 有效地加速了总腐植酸、水溶性腐植酸的转化与合成, 但对游离腐植酸的作用并不显著; 添加菌剂 3 处理的胡敏酸与腐殖化指数高于其他两个处理, 且与对照差异显著。各处理的富里酸含量在堆肥结束时基本相同, 外源菌剂对其并无影响。

关键词: 堆肥; 菌剂; 腐植酸; 牛粪

中图分类号: S141.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2013)06-1277-07 **doi:** 10.11654/jaes.2013.06.027

Variation of Humic Acids During Cow Manure Composting After Exogenous Microbial Agents Inoculation

REN Jing, YU Ji-hua*, XIE Jian-ming, ZHANG Guo-bin, LI Wen-lin

(College of Agronomy, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: To find out the suitable microbial agents to the local manure composting condition, the effects of three kinds of exogenous microbial agents on the cow manure composting were studied. Variations of temperature and humic acid during composting process were investigated in this study. The results showed that all three kinds of exogenous microbial agents increased temperature quickly and prolonged the high temperature period; Agent 2 and Agent 3, which are effective of accelerating transformation and synthesis of total humic acid and the water soluble humic acid, had no obvious effects on the free from humic acid. The humic acid and humification index of Agent 3 treatments were higher than those of the other treatments. There were significant differences between the control and Agent 3 treatments. The content of fulvic acid in all treatments was fundamentally the same at the end of composting, indicating that the exogenous microbial agents had no effects on it.

Keywords: composting; microbial agent; humic acids; cow manure

近年来, 由于养殖业的不断扩大, 家畜粪便已成为目前世界范围内 3 种大量排出的生物质废弃物之一^[1], 通过各种手段, 使其无害化后, 再次进入农田, 成为一条发展有机农业的可行之路。既减轻了环境自我消纳的负重, 又改善了环境质量, 对栽培环境产生较好的经济及生态效益。成熟的堆肥不仅可以提高作物

的产量, 改善农产品的品质, 还能改善土壤的物理化学性质, 是一种优质的有机肥^[2-3]。其中, 畜禽粪便所含的各种有机物质易被微生物分解利用, 从而可通过不同的堆肥工艺得到较好的处理^[4-5]。高温堆肥就是处理畜禽粪便有效的方法, 许多研究者通过添加生物菌剂来达到快速升温、缩短堆肥时间, 提高肥效的目的。王岩等认为, 添加菌剂和腐熟堆肥在堆制初期均能促进堆体快速升温, 较不添加菌剂提前 1~4 d 到达高温阶段(>50℃), 且菌剂添加量越大, 升温越快^[6]。黄懿梅等认为, 外源菌对水溶性氨态氮的转化和水溶性有机氮的形成都有明显的促进作用, 对氮素保存有较好的效果^[7]。何琳燕等认为, 接种 NMF 菌剂的奶牛粪便在 25 d 内可以达到腐熟标准, 氮磷钾总养分和腐植酸分别比不接菌处理提高 18% 和 45%^[8]。徐智等认为, 添加

收稿日期: 2012-11-25

基金项目: 农业部行业专项: 西北非耕地园艺作物栽培基质优化配制技术与产业示范(201203001); 农业产业技术体系建设资金项目: 国家大宗蔬菜产业体系(CARS-25-C-07); 甘肃省级重大专项: 玉米秸秆基质循环利用技术研究与示范(1002FKDA038)

作者简介: 任 静(1984—), 女, 山西临汾人, 硕士研究生, 主要从事设施蔬菜栽培生理与生长调控方向研究。

E-mail: mailrenjing@163.com

* 通信作者: 郁继华 E-mail: yujihua@gsau.edu.cn

福贝与榕风两种菌剂加速了西番莲果渣高温腐熟的进程,改善了堆肥品质^[9]。本试验以奶牛粪便为供试材料,研究了添加3种不同的复合生物菌剂对牛粪温度、腐植酸及腐殖质变化的影响,以期在当地牛粪无害化、可利用化提供科学依据和技术途径。

1 材料与方法

1.1 试验材料

(1)牛粪:堆肥原料为新鲜牛粪,取自甘肃农业大学动物与科学技术学院奶牛养殖场,原料的基本理化性状见表1。

表1 堆肥原料的基本理化性状

Table 1 Major physical and chemical characteristics of compost materials

原料	全氮/%	有机碳/%	碳氮比(C/N)	含水率/%
牛粪	1.64	42.30	25.79	60.68

(2)菌剂:本试验所选取的菌剂,分别为菌剂1(山东农业科学院提供),由枯草芽孢杆菌、唐德链霉菌、白浅灰链霉菌、黑曲霉、里氏木霉等复合菌种组成;菌剂2(南京农业大学提供),由8种纤维素分解细菌、真菌、放线菌组成;菌剂3(甘肃科学院生物所提供),有效活菌数 >80 亿 $\text{cuf} \cdot \text{g}^{-1}$ 。菌剂1、菌剂2均为固体状,菌剂3为液态状。

1.2 试验设计

堆肥试验于甘肃农业大学温室外进行,于外界自然条件下堆放,堆体表面覆盖塑料棚膜(起防雨作用)。每隔3 d人工翻堆1次。试验设4个处理,不加菌剂的对照、分别添加菌剂1、菌剂2、菌剂3的处理。菌剂1的添加量为 $1.5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,菌剂2为 $5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,菌剂3为 $1 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,于堆肥开始时加入。每个处理堆体

约 1.5 m^3 ,呈高为1 m的锥体,设3次重复。

1.3 采样与测定

于堆制第0、1、3、7、14、21、28、35、42、49 d,采用5点法原则,在堆体表层10 cm深处取样。将5点样品充分混匀,一部分风干,粉碎后过60目筛待用,另一部分保存在4℃冰箱中。

堆制开始后,每日下午17:00—18:00,对各堆体进行温度的测量。总腐植酸用焦磷酸钠($\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$)浸提-重铬酸钾($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$)容量法,水溶性腐植酸用水浸提-重铬酸钾($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$)容量法,游离腐植酸用1%氢氧化钠浸提-重铬酸钾($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$)容量法^[10]。腐殖质含量测定采用焦磷酸钠提取-重铬酸钾($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$)法^[11]。

2 结果与分析

2.1 添加菌剂后牛粪堆肥温度变化动态

堆肥过程的温度变化可分为3个时期,即升温时期、高温时期和降温时期。从图1可以看出,菌剂的添加不但提高了物料升温的速度,而且最高温度较对照高出6.8℃。添加3种菌剂的处理,在堆制第1 d即进入了高温阶段,菌剂3的处理高温值达到70.4℃,直至14 d时,高温期结束。菌剂1、2的最高温度分别为66.4℃和69.6℃,但高温期持续时间比菌剂3多出8~9 d。而对照于第4 d升温至最高温度63.6℃后出现下降趋势,55℃以上仅维持了4 d,随即进入降温阶段。

由于定期翻堆,使整个温度变化过程中出现了几次较低值,但物料温度很快回升,并未影响到堆制高温的持续进行。经过高温阶段微生物对有机物的分解,堆肥腐熟后期,有机物的量大大减少,微生物在分解过程中,无法产生足够的热量,使温度呈连续下降趋势,直至堆肥结束。

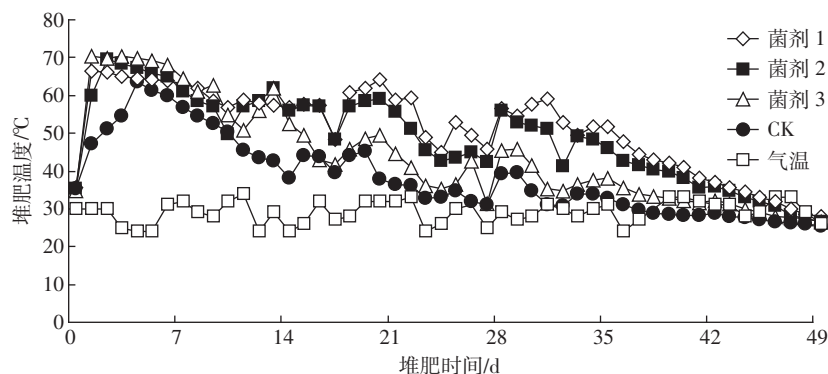


图1 堆肥过程中温度的变化

Figure 1 Change of temperature during composting

不同处理温度的研究表明,3种菌剂的添加,可起到快速升温的效果。菌剂1、菌剂2处理的高温阶段延长,有机物被分解的程度更加剧烈、充分,从而促使物料腐殖化增加,进一步提高了无害化程度。

2.2 添加菌剂后牛粪堆肥腐植酸的变化动态

2.2.1 总腐植酸含量

从图2可看出,添加菌剂2、菌剂3处理的总腐植酸含量呈现先下降而后上升的趋势,对照却显现先下降后上升,再下降的变化。添加菌剂2、菌剂3的处理在0~28 d总腐植酸含量持续下降,说明堆肥至高温阶段结束前腐植酸不稳定,易被分解,在此期间经数量急剧增加的微生物作用后,形成了结构与性质较稳定的腐殖物质。前7 d中,添加菌剂1的处理第1 d达到最小值9.26%,随后升高,第7 d又缓慢下降,说明菌剂1中所含微生物菌群随着堆肥温度的迅速上升及高温期的到来,中温菌群大量死亡或休眠,以致微生物的分解作用降低,嗜热菌群以现有的或部分分解的物料为底物来合成腐植酸。各处理与对照于堆肥第28 d后变化趋于稳定,菌剂2与菌剂3处理的总

腐植酸含量出现缓慢上升,说明在堆肥后期此两种菌剂中有利于腐植酸生成的微生物种群存在,或是外源微生物调节了堆肥后期微生物群落分解与转化之间的平衡,使转化大于分解,从而提高了产品品质。但与堆肥初期相比,结束时的总腐植酸含量降低,菌剂1、菌剂2、菌剂3处理下降幅度依次为7.71%、5.03%、4.00%,对照则下降了9.80%,说明堆肥中不稳定的物质在经过外源微生物的转化后减少了。经统计分析表明,堆肥结束时,添加菌剂3个处理的堆肥总腐植酸含量与不加菌剂的对照差异显著,其中菌剂3与对照的差异达到极显著水平。说明菌剂的添加能有效地加速总腐植酸的分解,并提高堆肥的腐殖化程度及产品质量。

2.2.2 游离腐植酸含量

游离腐植酸含量出现短暂的上升,达到堆肥过程中的峰值后,即平稳下降(图3)。添加菌剂2、菌剂3的处理与对照游离腐植酸含量变化趋势基本一致,在堆肥经过一半的时间,又呈现略微上升的状态,其中菌剂3的处理较菌剂2和对照变化更明显。说明堆肥

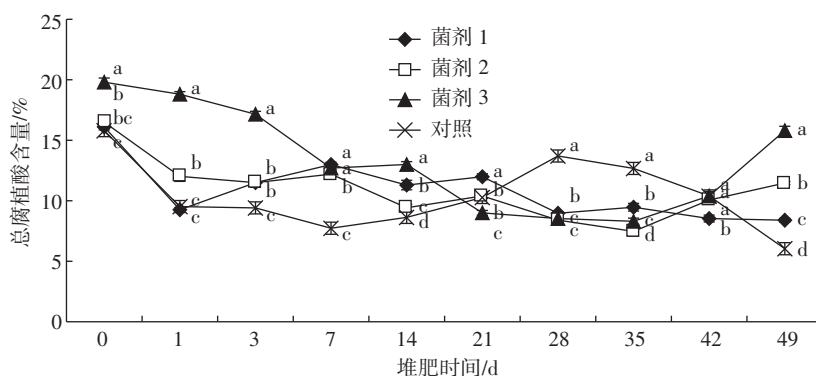


图2 不同处理总腐植酸含量变化

Figure 2 Variations of total humic acid during composting

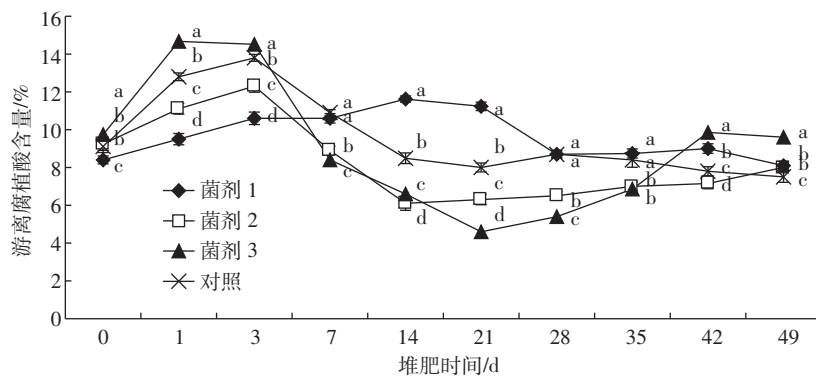


图3 不同处理游离腐植酸含量变化

Figure 3 Variations of free from humic acid during composting

初期总腐植酸中不稳定的成分被快速分解,增加了游离腐植酸的含量,当一些不稳定的游离腐植酸积累到一定浓度后,又成为微生物进一步转化的物质来源,从而游离腐植酸的含量出现降低,最终使转化达到平衡状态。菌剂1处理游离腐植酸含量的峰值出现在第14 d,比其他3个处理延迟了12~13 d,且上升幅度较小,其余阶段无明显变化,说明菌剂1对堆肥中游离腐植酸含量变化未起到较大作用。方差分析结果表明,第49 d时,添加菌剂3处理的游离腐植酸较对照高出0.59%,且差异显著。而其他两个处理的值虽高于对照,但差异并不显著。说明菌剂3有利于游离腐植酸的生成。

2.2.3 水溶性腐植酸含量

随着堆肥的进行,各处理及对照水溶性腐植酸含量的变化趋势相差较大(图4)。在第14 d前,添加菌剂各处理与对照的水溶性腐植酸都呈现不同程度的升高,其中菌剂3处理与对照的变化趋势相似,表明堆肥前期菌剂3对水溶性腐植酸的生成、分解与对照中土著微生物种群的作用大致相同。14 d后,添加菌剂各处理均呈现上升趋势,且至堆肥结束,而对照则

缓慢下降,说明中后期时,那些外源微生物成为优势种群,占据了堆肥的主导地位。从总体看,添加菌剂2、菌剂3的处理在堆肥结束时,水溶性腐植酸的含量较开始时分别增加了1.18%、0.67%。方差分析可得,添加菌剂2、菌剂3的处理在堆肥结束时,水溶性腐植酸的含量显著高于对照。这是由于菌剂中微生物的活性较高,将不稳定的、大分子腐植酸转化为可被植物直接利用的水溶的、小分子腐植酸,从而源源不断地补充着堆肥中水溶性腐植酸,使水溶性腐植酸的含量在堆肥中后期逐渐增加,并高于不添加菌剂的对照。

2.3 添加菌剂后牛粪堆肥腐殖质组分变化动态

2.3.1 胡敏酸含量

堆肥中的腐殖质根据其在酸、碱中的溶解性质,可划分为胡敏酸、富里酸和胡敏素。胡敏酸与富里酸是腐殖质主要成分,两者含量的高低从很大程度上决定着堆肥中腐殖质的含量,进而影响堆肥的品质。

如图5所示,各处理与对照的变化趋势较为一致,都呈现出前期平缓下降(至第7 d降到最低值),而后逐渐升高的走势。对照于前7 d,胡敏酸含量始终

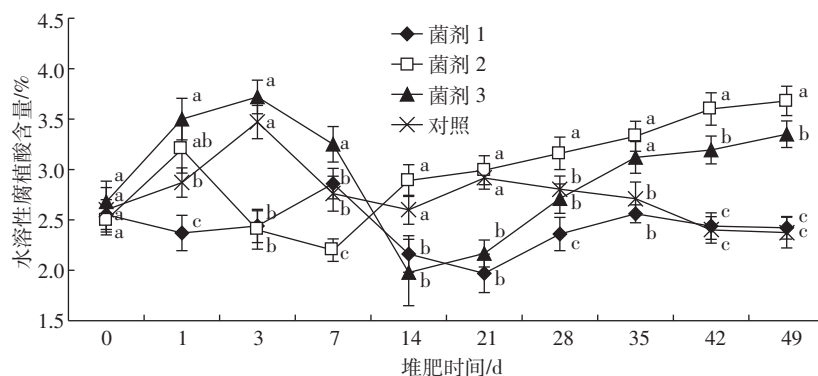


图4 不同处理水溶性腐植酸含量变化

Figure 4 Variations of water soluble humic acid during composting

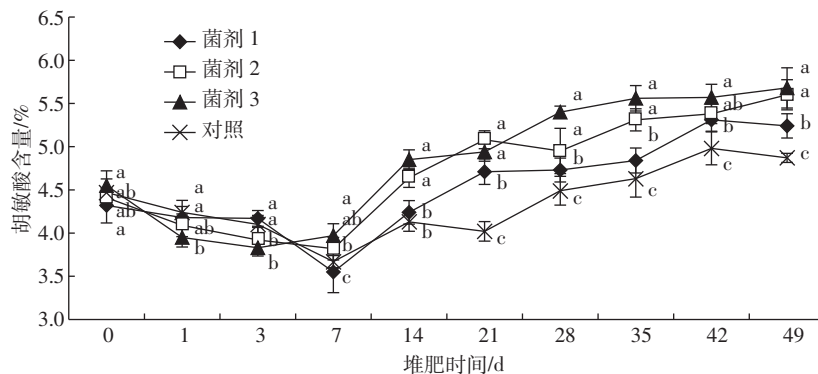


图5 不同处理胡敏酸含量变化

Figure 5 Variations of humic acid during composting

高于添加菌剂的各处理,说明添加菌剂可加快胡敏酸不稳定成分的分解,并且胡敏酸在一定程度上也存在矿化作用,从而使胡敏酸含量暂时降低;第 7 d 后,各处理的上升幅度均超过了对照,且稳定上升,说明堆肥中后期,那些较难降解的纤维素、半纤维素及木质素成了微生物代谢活动的碳源。在此期间,一些结构复杂的腐殖质类物质生成;同时胡敏酸也被代谢活动旺盛的微生物重新合成,形成新的、芳化程度增加的胡敏酸分子。至堆肥结束,添加菌剂 2、菌剂 3 处理胡敏酸的含量为 5.60%、5.68%,经方差分析,此两处理与对照差异显著,表示添加菌剂有助于堆肥胡敏酸生成的,且胡敏酸分子的稳定性也越来越大,加快了堆肥腐殖化的进程。

2.3.2 富里酸含量

如图 6 所示,富里酸的含量在整个堆肥过程中始终保持下降趋势,说明富里酸的分子量小,芳化程度低,较其他有机质更易成为微生物自身代谢活动和合成胡敏酸及其他有机质的物质与能量来源。添加菌剂各处理与对照的变化基本一致,各处理从堆肥开始的

5.93%、5.65%、5.85% 分别降至结束时的 1.56%、1.71%、1.60%,各处理与对照之间也并无显著差异,说明菌剂的添加对堆肥富里酸含量的变化没有影响。

2.3.3 腐殖化指数

腐殖化指数(即胡敏酸与富里酸的比值)能说明腐殖物质在不同形成条件下的复杂程度,其腐殖化指数越高,分子量越大,芳化度越高,复杂程度越大,胡敏酸的相对含量也越高,因此,可作为描述堆肥腐殖化程度的参数。从图 7 可以看出,各处理与对照的腐殖化指数随堆肥的进程而显现出上升的走势。添加菌剂的各处理与对照的腐殖化指数在堆肥结束时,增加幅度菌剂 1、菌剂 2、菌剂 3 分别为 361%、320%、356%、对照为 282%。表明添加外源菌剂可大大提高腐殖化指数,有利于胡敏酸的转化,使堆肥腐殖化更彻底,进而直接提高了堆肥产品腐殖质的含量与品质。

3 讨论

堆肥过程中,堆体温度的上升是微生物代谢产热积累的结果,反映了微生物代谢强度和堆肥物质转化

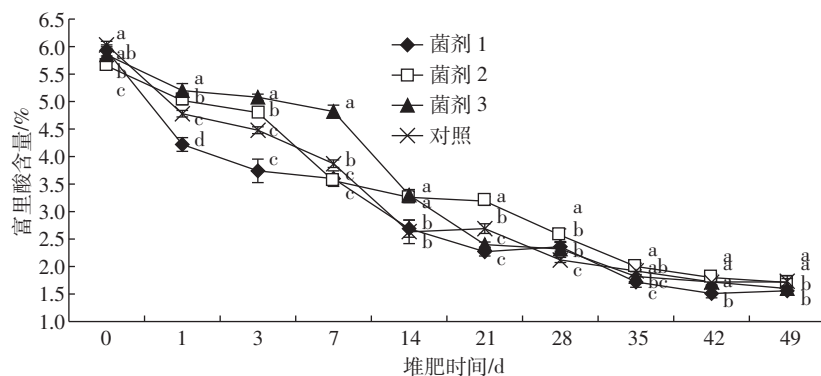


图 6 不同处理富里酸含量变化

Figure 6 Variations of fulvic acid during composting

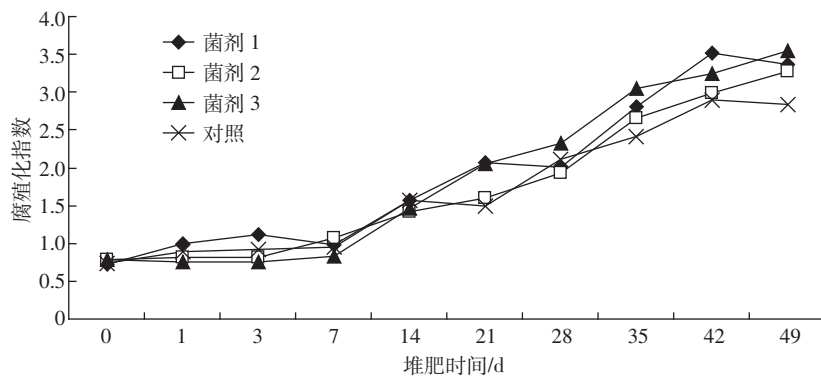


图 7 不同处理腐殖化指数

Figure 7 Variations of humification index during composting

速度^[12]。因此,温度体现了微生物生命活动的剧烈程度。过低的温度会使有机物分解速度下降,但过高的温度会导致一些主要分解纤维素、木质素的中温微生物死亡,堆肥温度的高低直接影响到堆肥进程的速度。而堆肥腐熟时间过长仍是堆肥生产所面临的问题,吴银宝等^[13]研究了在合适的堆肥条件下,加速堆肥腐熟的重点应放在降温腐熟期。可考虑在降温腐熟期加入菌剂,避免堆肥高温期对其不利影响,加快对已分解堆肥基质的利用,达到快速腐熟的目的^[13]。本试验所添加的3种复合菌剂,在堆肥中均表现出了升温速度快、高温持续时间长的作用,但降温期也维持了20 d左右的时间,将堆肥腐熟时间延长了近一半;而在相同的条件下,即便未加入菌剂的对照,堆体也可升温至55℃以上,并持续3~4 d,同样达到了堆肥无害化的标准。因此,添加此3种菌剂在缩短堆肥时间的问题上还有待于进一步的研究。

堆肥中的腐植酸,是由物料中新生成及原有腐植酸转化而来的。腐植酸含量是堆肥腐殖化的一个重要指标,可以用于腐熟度的判定。堆肥时间、原料成分、堆置工艺、环境条件等都可成为限制堆肥中腐植酸生成的因素^[14]。而微生物对腐植酸生成也有很大影响,堆肥过程中接种微生物可以促进腐植酸的生成^[15-18]。堆肥产品理化性质也可通过腐植酸中的各种活性基团来得到有效改善。本试验也表明,在相同条件下,添加菌剂2、菌剂3处理的总腐植酸、游离腐植酸及水溶性腐植酸含量均高于不添加菌剂的对照,说明菌剂可以提高堆肥腐植酸含量,其中菌剂3的作用大于菌剂2。由于复合菌剂成分的不同,各处理的变化差异较大,同时也可在一定程度上推测,堆肥过程中不同阶段的微生物优势种群是不相同的。

腐殖质的主要组成物质为胡敏酸与富里酸,而腐殖化指数是反映堆肥腐殖质组成与性质的指标之一,腐殖化指数越大,说明胡敏酸含量越多。因堆肥原料、工艺的差别,堆肥过程中胡敏酸、富里酸含量的变化规律在国内外研究报道中不完全一致^[19-20],但腐殖化指数的变化规律却大致相同,在整个堆肥过程中均呈上升趋势。有研究表明,在生活垃圾堆肥过程中,胡敏酸的含量与腐殖质的变化显著相关^[5]。也有研究表明,堆肥过程使腐殖化指数增大^[21-22],这是由于两者的酸性官能团含量都相对较高,低分子量的富里酸比胡敏酸水溶性更大^[23]。本研究中,添加菌剂各处理及对照胡敏酸含量与腐殖化指数在第7 d后变化是一致的,都呈上升趋势。而添加菌剂3的胡敏酸含量与腐殖化指

数均显著高于对照,说明添加菌剂3对堆肥腐殖质影响较大,可以提高堆肥腐殖质的组成与性质。

4 结论

(1)在牛粪高温堆肥体系中加入3种外源生物菌剂均延长了堆肥高温期的持续时间。

(2)加入外源生物菌剂,有利于促进牛粪总腐植酸、游离腐植酸及水溶性腐植酸的分解与合成,有利于牛粪堆肥的腐熟化进程,且菌剂3作用最显著。

(3)在牛粪高温堆肥体系中加入外源生物菌剂可以促进胡敏酸与富里酸生成,提高堆肥腐殖化指数,其中,添加菌剂3的作用较其他两种菌剂明显。

参考文献:

- [1] 唐景春,周启星,张冠辉.不同来源生物质废弃物高温堆肥过程的物理化学及微生物性质研究[J].环境科学,2007,28(5):1158-1164.
TANG Jing-chun, ZHOU Qi-xing, ZHANG Guan-hui. Physico-chemical and microbial properties in thermophilic composting processes of different biological solid wastes[J]. *Environmental Science*, 2007, 28(5):1158-1164.
- [2] McConnell D D, Shiralipour A, Smith W H. Compost application improves soil properties[J]. *Biocycle*, 1993, 34:61-63.
- [3] Wong J W C, Li G X, Wong M H. The growth of *Brassica Chinensis* in heavy-metal contaminated sewage sludge compost from Hong Kong[J]. *Bioresource Technology*, 1996, 58:309-313.
- [4] 魏自民,席北斗,赵越,等.生活垃圾微生物强化堆肥技术[M].北京:中国环境科学出版社,2008:5-13.
WEI Zi-min, XI Bei-dou, ZHAO Yue, et al. Living garbage microbial enhanced composting technology [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2008:5-13.
- [5] 魏自民,王世平,席北斗,等.生活垃圾堆肥过程中腐殖质及有机态氮组分的变化[J].环境科学学报,2007,27(2):235-240.
WEI Zi-min, WANG Shi-ping, XI Bei-dou, et al. Changes of humic substances and organic nitrogen forms during municipal solid waste composting[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2007, 27(2):235-240.
- [6] 王岩,李玉红,李清飞.添加微生物菌剂对牛粪高温堆肥腐熟的影响[J].农业工程学报,2006,22(2):220-223.
WANG Yan, LI Yu-hong, LI Qing-fei. Effect of inoculating microbes on cattle manure composting with high temperature[J]. *Transactions of the CSAE*, 2006, 22(2):220-223.
- [7] 黄懿梅,曲东,李国学,等.两种外源微生物对鸡粪高温堆肥的影响[J].农业环境保护,2002,21(3):208-210.
HUANG Yi-mei, QU Dong, LI Guo-xue, et al. Effects of two kinds of inoculating microbes on chicken manure composting[J]. *Agro-environmental Protection*, 2002, 21(3):208-210.
- [8] 何琳燕,曹广祥,盛下放,等.高效菌群对性冷牛粪的快速腐熟作用研究[J].土壤通报,2006,37(4):761-763.
HE Lin-yan, CAO Guang-xiang, SHENG Xia-fang, et al. Effects of decomposing microbial inoculums NMF on quick decomposition of cow

- dung[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2006, 37(4):761-763.
- [9] 徐 智, 汤 利, 李少明, 等. 两种微生物菌剂对西番莲果渣高温堆肥腐熟进程的影响[J]. *应用生态学报*, 2007, 18(6):1270-1274.
- XU Zhi, TANG Li, LI Shao-ming, et al. Effects of two microbial agents on high temperature composting of passion fruitmarc[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(6):1270-1274.
- [10] 中国土壤学会农业化学专业委员会. 土壤农业化学常规分析方法[M]. 北京:科学出版社, 1989.
- The Agricultural Chemistry Specialty Committee of Chinese Soil Academy. The general analysis methods for soil and agriculture chemistry[M]. Beijing: Science Press, 1989.
- [11] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海:上海科学技术出版社, 1978.
- The Chinese Academy of Sciences Institute of Nanjing Soil. Soil physical and chemical analysis[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1978.
- [12] 张克强, 高怀友. 畜禽养殖业污染物处理与处置[M]. 北京:化学工业出版社, 2004.
- ZHANG Ke-qiang, GAO Huai-you. Treatment and disposal of pollutant of livestock and poultry breeding[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004.
- [13] 吴银宝, 廖新倮, 汪植三, 等. 猪粪堆肥微生物及其对堆制腐熟的影响[J]. *家畜生态*, 2003, 24(1):34-38.
- WU Yin-bao, LIAO Xin-di, WANG Zhi-san, et al. Effects to maturity of micro organisms during swine manure composting[J]. *Ecology of Domestic Animal*, 2003, 24(1):34-38.
- [14] 唐景春, 孙 青, 王如刚, 等. 堆肥过程中腐植酸的生成演化及应用研究进展[J]. *环境污染与防治*, 2010, 32(5):73-77.
- TANG Jing-chun, SUN Qing, WANG Ru-gang, et al. Formation and evolution of humic acid during composting process and its application[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2010, 32(5):73-77.
- [15] Vargas Garciam D, Suarez Estrellaf F, Lopezm J, et al. Influence of microbial inoculation and co-composting material on the evolution of humic-like substances during composting of horticultural wastes[J]. *Process Biochemistry*, 2006, 41(6):1438-1443.
- [16] Lopezm J, Vargas Garciam D, Suarez Estrellaf F, et al. Biodelignification and humification of horticultural plant residues by fungi[J]. *International Biodet Erioration & Biodegradation*, 2006, 57(1):24-30.
- [17] Chefetz B, Chen Y, Hadar Y. Purification and characterization of laccase from chaetomium thermophilum and its role in humification[J]. *Applied Environ Micro Biology*, 1998, 64(9):3175-3179.
- [18] Wei Z, Xi B, Zhao Y, et al. Effect of inoculating microbes in municipal solid waste composting on characteristics of humic acid[J]. *Chemosphere*, 2007, 68(2):368-374.
- [19] 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.
- LI Guo-xue, ZHANG Fu-suo. Solid waste composting and organic compound fertilizer production[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2000.
- [20] Chefetz B, Hatcher P G, Hadar Y, et al. Chemical and biological characterization of organic matter during composting of municipal solid waste[J]. *J Environ Qual*, 1996, 25(4):776-785.
- [21] 鲍艳宇, 颜 丽, 娄翼来, 等. 鸡粪堆肥过程中各种碳有机化合物及腐熟度指标的变化[J]. *农业环境科学学报*, 2005, 24(4):820-824.
- BAO Yan-yu, YAN Li, LOU Yi-lai, et al. Dynamics of organic carbons during composting of chicken manure and evaluation of maturity parameters[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(4):820-824.
- [22] Hsu J, Lo S. Chemical and spectroscopic analysis of organic matter transformations during composting of pig manure[J]. *Environmental Pollution*, 1999, 104:189-196.
- [23] Garcia-mina J M. Stability, solubility and maximum metal binding capacity in metal-humic complexes involving humic substances extracted from peat and organic compost[J]. *Organic Geochemistry*, 2006, 37(12):1960-1972.