

鸭粪与芦苇皮、水草高温好氧堆肥试验研究

李霞¹, 严永路², 尹崧², 杨星³, 谢建治^{1*}

(1.河北农业大学资源与环境学院, 河北 保定 071000; 2.河北省环境保护厅, 石家庄 050051; 3.河北农业大学生命科学学院, 河北 保定 071000)

摘要:以鸭粪为主要材料,添加芦苇皮、水草等不同调理剂进行高温堆肥试验,研究了不同配比条件下堆肥体系的温度、pH、C/N、种子发芽指数(GI)的动态变化及其对废弃物堆肥品质的影响。结果表明,鸭粪与芦苇皮混合堆肥效果最好,堆体升温快,4 d 达到 50 ℃,高温维持时间为 15 d,最高温度达 70 ℃,堆肥 30 d 后,油菜种子发芽指数高达 90.48%;鸭粪与水草混合堆肥效果较差,高温维持阶段仅 8 d,最高温度为 57 ℃;纯鸭粪单独堆肥效果最差,16 d 达到 50 ℃,高温维持时间为 6 d,最高温度仅为 53 ℃,到堆肥结束 44 d,油菜种子发芽指数刚达到 80.67%。4 种混合配料堆肥产品全氮、全磷、全钾含量都有所增加,其中鸭粪与芦苇皮配比增加率最大,分别为 15.90%、11.53%和 29.94%。综合以上结果,说明添加秸秆类有机质含量较高的调理剂可加快堆肥的腐熟进程,同时减少营养元素的流失,利于养分的保存,保证了堆肥产品的品质。

关键词:鸭粪;芦苇皮;水草;高温堆肥

中图分类号:S141.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2012)03-0620-06

Composting of Duck Manure Mixed with Reed Skin and Aquatic Weed Under the Aerobic Conditions

LI Xia¹, YAN Yong-lu², YIN Song², YANG Xing³, XIE Jian-zhi^{1*}

(1.College of Resources and Environment Science, Agricultural University of Hebei, Baoding 071000, China; 2.Department of Environmental Protection of Hebei Province, Shijiazhuang 050051, China; 3.College of Life Sciences, Agricultural University of Hebei, Baoding 071000, China)

Abstract: The composting experiment was conducted to study the dynamics of indices (temperature, pH, carbon (C)/nitrogen (N) ratio, seed germination index) during composting process using duck manure mixed with reed skin or (and) aquatic plants. The results showed that the composting of duck manure mixed with reed skin was the best treatment and appeared the special properties of temperature and seed germination index of cabbage during composting. In this treatment, the temperature increased rapidly to 50 ℃ on the fourth day and the highest temperature was 70 ℃, even high temperature could maintain for 15 days. In addition, germination index of cabbage seeds in compost could be up to 90.48% after composting for 30 days. And the composting of duck manure mixed with aquatic plants was poor, high temperature could maintain only for 8 days and the highest temperature was 57 ℃. The composting effect of control (duck manure composting only) was the worst one. Until the 16th day, the temperature increased to 50 ℃ and the highest temperature was 53 ℃. However, high temperature could only keep for 6 days. Cabbage seed germination index was only 80.67% on the last day of composting. Moreover, the contents of nitrogen, phosphate and potassium were measured to illustrate the quality of the composts from four treatments. Compared to the raw materials before composting, the contents of N, P and K in mature composts of four treatments increased. The compost from the treatment of duck manure mixed with reed skin had higher contents of N, P and K. The increased proportions of N, P and K accounted for 15.90%, 11.53% and 29.94%, respectively.

Keywords: duck manure; reed skin; aquatic weed; high temperature compost

收稿日期: 2011-08-17

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2008ZX07209-008-005, 2008ZX07209-007-05); 国家科技支撑计划项目(2007BAD87B04)

作者简介: 李霞(1986—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为环境化学与污染控制。E-mail: lxxat1130317@126.com

* 通讯作者: 谢建治 E-mail: xjianzhi@126.com

随着农村经济快速增长,农村消费品种类和数量明显增加,农村固体废弃物的分选和处理难度明显加大,广大农村的环境污染和生态破坏问题已经成为保持农村经济可持续发展的一大障碍。

白洋淀位于保定境内,芦苇、水草是其主要的水生植物^[1]。调查发现,水草衰亡后大量被打捞,堆积于淀区周围陆地;与此同时芦苇收割加工后,苇地内堆满苇皮苇叶;白洋淀家禽养殖主要以鸭养殖为主,产生的粪便大多数没有经过任何处理,直接进入湖区或就地堆放;杂草落叶、家禽粪便的肆意堆放,严重破坏了白洋淀的生态环境功能。

对于畜禽粪便等固体废弃物,从工艺的安全可靠、运行管理以及我国国情等角度来考虑,堆肥是目前最常用的无害化、资源化处理的有效方法^[2]。其基本过程是将欲处理的有机固体废弃物和调理剂按一定质量比例混合,在适当的水、气条件下,使分解微生物适量繁殖,分解有机物而产生高温,杀死病原菌,使有机物达到稳定化,所产生的堆肥可以安全使用^[3]。通过堆肥可以实现农业可持续发展和经济循环性发展。目前已分别从原料配比^[4]、腐熟度^[5]、堆肥添加剂^[6]等多个角度进行了深入研究。本文将针对白洋淀区域内固体废弃物随意堆放问题进行堆肥化处理,将鸭粪与芦苇皮、水草混合进行高温堆肥,通过研究其在堆肥过程中理化指标的变化,确定鸭粪与苇皮、菹草堆肥的技术参数,有针对性地解决当地废弃物随意堆放问题。

1 材料与方法

1.1 试验材料

以鸭粪作为堆肥的基本原料,以当地较多且易获得的水草和苇皮作为调理剂。试验地设在河北农业大学标本园内。鸭粪取于河北省安新县大田庄养鸭场,苇皮和水草均取自河北省安新县大田庄村。堆肥原料的主要成分见表 1。

表 1 堆肥材料主要成分

Table 1 Main composition of the composting materials

材料	有机质/%	含水量/%	全氮/%	全磷/%	全钾/%	碳氮比
鸭粪	33.59	50.12	1.50	1.36	1.07	13.03
芦苇皮	64.82	29.41	0.72	0.21	0.78	52.22
水草	43.19	92.24	2.48	0.66	3.24	10.10

1.2 试验设计

将苇皮与水草切割为 3~5 cm 的小段,与鸭粪按 2:3 比例混合、压实,调节水分 65% 左右。将混合均匀

的物料堆置为直径 1.5 m、高 1.5 m 的圆锥体,表面覆盖塑料膜,防止水分过量蒸发。堆置期为 44 d。通风方式为翻堆,前期每 5 d 1 次,堆肥进行 16 d 后,每 7 d 翻堆 1 次。试验处理见表 2,每处理 3 次重复。

表 2 鸭粪堆肥试验设计

Table 2 Compost experimental design of duck manure

处理	物料	C/N
对照组	鸭粪	13.03
处理 1	鸭粪+苇皮	26.34
处理 2	鸭粪+水草	12.82
处理 3	鸭粪+苇皮+水草	23.37

1.3 采样时间及方法

每个处理在堆体中央插入温度计,每日上午 10:00、下午 2:00 测定温度,取其平均值为当日堆温。采样时间为堆腐的第 1、6、11、16、23、30、37 d 和 44 d,共计 8 次。每个处理采用五点混合法采样,每个取样量约 200 g。采样后新鲜样品保存于 4 ℃ 冰箱中,24 h 内进行 pH 值和种子发芽率的测定,部分置于室内风干,用于测定其他项目。

1.4 测定项目与方法

1.4.1 温度

每日上午 10:00、下午 2:00,将温度计插入距堆体顶端 70 cm 中心处,测量并记录。

1.4.2 pH 值

取堆料鲜样与蒸馏水以 1:10 比例混合,在室温下用振荡器连续振荡 1 h,静止 30 min 后,上清液经滤纸过滤后用 pH 计测定。

1.4.3 其他理化指标

(1)全 N:采用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 消煮-凯氏定氮法(NY/T 297—1995)。

(2)全 P:采用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 消煮-分光光度法(NY/T 298—1995)。

(3)全 K:采用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 消煮-火焰光度法(土壤农业化学分析,1989)。

1.4.4 种子发芽指数

种子发芽指数是通过测试堆肥浸出液的生物毒性来评价污泥堆肥的腐熟度,是较敏感、可靠、有效和最能反映堆肥产品植物毒性的判断堆肥无害化和腐熟度参数^[7]。

发芽指数(GI)测定方法:分别在不同时期取样 5 g,按肥水比 1:10 浸提,200 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 振荡 1 h 后 4 000 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 离心、过滤,滤后上清液贮存于塑料瓶中备测。

吸取 5 mL 滤液于铺有滤纸的培养皿中,滤纸上放置 10 颗油菜种子(五月蔓),25℃下黑暗中培养 48 h,测定种子发芽率及根长,同时用去离子水作空白对照。计算公式为:

$$GI(\%) = [(处理种子发芽率 \times 处理种子根长) / (去离子水种子发芽率 \times 去离子水种子根长)] \times 100\%$$

1.5 数据处理

试验数据采用 Excel 进行处理和作图,SPSS 软件进行方差分析,最小显著差异法(LSD)作多重比较。

2 结果与分析

2.1 堆肥过程中温度变化

堆温是堆肥过程中微生物活动是否旺盛的标志,是判别堆肥腐熟与否的指标之一。高温利于杀死病原菌,但温度过高会杀死部分有益微生物,温度过低不利于有机物降解和无害化处理。

在鸭粪与不同调理剂配比条件下,温度在堆肥过程中的变化具有明显的差异。其中处理 1(鸭粪+苇皮)升温最快,4 d 温度升高到 50℃以上,且高温维持时间为 15 d,最高温度达 70℃(表 3)。其次为处理 3(鸭粪+苇皮+水草),到达高温时间为 8 d,高温维持时间均为 14 d,最高温度均为 65℃。而处理 2(鸭粪+水草)和对照组(鸭粪)升温较为缓慢,分别于 12 d 和 16 d 到达高温阶段,高温期分别为 10 d 和 6 d,最高温度分别为 61.5℃和 53℃。处理 1、处理 3 的高温维持时间显著高于对照组($P < 0.05$),但两处理间差异不显著。

表 3 堆肥温度变化情况

Table 3 Temperature changes of compost

试验处理	最高温度/ ℃	达到 50℃ 所需天数/d	50℃以上 维持天数/d	降到 40℃以下 所需天数/d
对照组	53±0.5	16±1	6±0b	>35±1
处理 1	70±1	4±1	15±1a	27±1
处理 2	57±1	12±1	8±1b	33±0
处理 3	65±0.5	8±1	14±0a	29±1

注:同列中不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。下同。

堆肥前期温度迅速升高有利于杀灭发酵物料中的病原菌、寄生虫卵,消除对植物生长不利的有毒物质,使其达到无害化要求;当堆温维持在 30~40℃之间,说明堆肥已经基本完成,这与大多数研究者的结论是一致的^[8-9]。

2.2 堆肥过程中 pH 与碳氮比(C/N)变化

pH 值也是影响堆肥的一个重要因素,堆肥过程

中最适宜微生物生长的 pH 值为 6.5~8.5^[10]。

如图 1 所示,4 种不同调理剂配比条件下,堆肥的 pH 均呈现先上升后下降的趋势。堆肥 7 d 内 pH 升高可能是由于微生物在分解蛋白质等有机氮时产生脱氨酶,促使各种氨基酸分解释放出氨^[11],氨态氮快速积累从而提高 pH 值。也说明在堆制初期没有出现因厌氧导致有机酸的积累,这与李玉红等、牛俊玲等的研究结果一致^[4,12]。至堆肥结束时,所有处理的 pH 值在 8.0 左右,符合腐熟堆肥 pH 值为 8.0~9.0 的标准^[13],各处理之间差异不显著($P > 0.05$)。

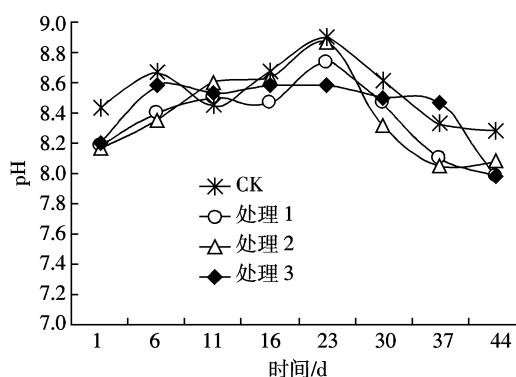


图 1 堆肥 pH 变化情况

Figure 1 pH changes of compost

C/N 变化如图 2 所示。各处理的 C/N 均呈现下降趋势,其初始 C/N 分别为 13.03、26.34、12.82 和 23.37。处理 1(鸭粪+苇皮)和处理 3(鸭粪+苇皮+水草)下降趋势较明显,堆肥结束时(44 d)C/N 分别为 11.68 和 10.74, T 值为 0.44 和 0.46;处理 2(鸭粪+水草)和对照组(鸭粪)初始 C/N 较低,不利于微生物生长,堆腐进行得较缓慢,至堆肥结束时(44 d)C/N 分别为 6.52 和 7.28, T 值为 0.51 和 0.56。所有处理堆肥达到腐熟后的 T 值均小于 0.6,与 Morel 等^[14]的 $T < 0.6$ 时堆肥达到腐熟的结果一致。

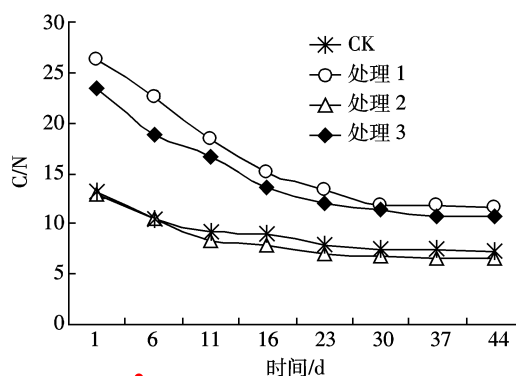


图 2 堆肥 C/N 变化情况

Figure 2 C/N changes of compost

2.3 种子发芽指数(GI)

堆肥腐熟度是影响堆肥品质主要因素之一,用生物学方法测定堆肥的植物毒性是检验堆肥腐熟度的有效方法^[15]。一般认为,当 GI>50%时,堆肥已基本腐熟,当 GI>80%时,该堆肥施入土壤对植物已完全没有毒性。

如图 3 所示,在整个堆肥期间,各处理的种子发芽指数均呈现上升趋势。处理 1(鸭粪+苇皮)的发芽指数上升最快,从开始的 3.23%上升到 106.59%,在堆肥的第 16 d GI 就大于 50%,第 30 d GI 达到 90.48%,说明已经完全腐熟,对植物已没有毒性。其次是处理 3(鸭粪+苇皮+水草)GI 上升较快,第 30 d 达到 80.98%,完成发酵腐熟,堆肥结束发芽率为 94.31%。处理 2(鸭粪+水草)和对照组(鸭粪)GI 上升较慢,到堆肥结束(44 d),发芽指数才分别达到 83.83%和 80.67%,满足生物学腐熟标准。处理 1、处理 3 的发芽增长趋势显著高于对照组($P<0.05$),两处理间并无显著差异。

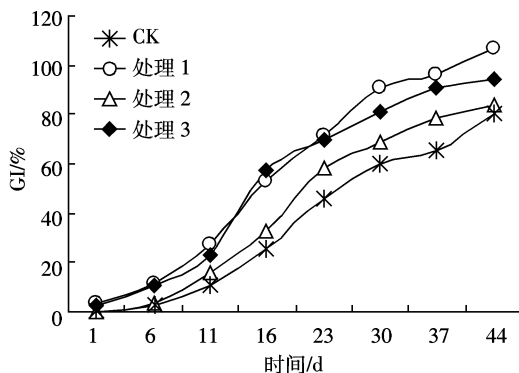


图 3 堆肥种子发芽指数变化情况

Figure 3 Seed germination rate changes of compost

2.4 养分含量

从表 4 可知,堆肥完成后,各处理的养分含量较初始都有所增加。处理 1(鸭粪+苇皮)和处理 3(鸭粪+苇皮+水草)TN 含量增加了 15.90%和 13.48%,显

著高于对照组的 8.11%($P<0.05$);两处理之间无显著差异($P>0.05$)。处理 2(鸭粪+水草)TN 含量由 16.54 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 上升到 18.22 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,增加了 10.17%,与其他处理均无显著差异($P>0.05$)。4 个处理的 TP 增加量均无显著差异($P>0.05$),分别为处理 1 11.53%、处理 2 8.42%、处理 3 10.32%、对照组 6.98%。处理 1(鸭粪+苇皮)TK 增加量为 29.94%,高于对照组的 14.45%、处理 2 的 8.69%和处理 3 的 18.90%,且差异显著($P<0.05$)。

在整个堆肥过程中 TN、TP、TK 含量均呈现上升趋势,这主要是因为随着堆肥高温发酵的进行,有机物的分解,CO₂的挥发和物料水分的蒸发引起干物质的减少而造成的“浓缩效应”^[16],使得 P、K 等元素的相对含量增加;虽然对腐熟过程中 N 元素会以 NH₃ 的形式挥发,造成 TN 含量少,但相比之下干物质的分解速度更快,因此 TN 含量也呈现增加趋势。

从以上 3 个养分含量来看,处理 1 和处理 3 的养分增加幅度均大于处理 2 和对照组,其原因是处理 1、3 两组混料初始 C/N 较高,碳物质损失多,对氮、磷、钾的浓缩作用较强,因此堆肥结束,养分增加量较高,这与李国学等的研究结果一致^[17]。而处理 2 和对照组的 3 种养分绝对含量均高于处理 1 和处理 3,这是由于处理 2 是水草与鸭粪混合堆肥,水草氮磷钾含量相对较高,与本身营养含量丰富的鸭粪混合,造成养分含量较其他配料高;但由于其有机质含量较低,C/N 较小,与鸭粪混合配料后 C/N 较低不适宜微生物活性,不利于有机物的降解,所以造成养分增加程度较低。

3 讨论

堆肥是一个复杂的过程,要达到良好的堆制效果,必须控制一些因素,包括水分、温度、pH 值和碳氮比等,这些因素决定了微生物活动的强度,从而影响堆肥的速度与质量。

表 4 堆肥养分含量变化情况

Table 4 Nutrient content changes of compost

处理	TN/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$		TP/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$		TK/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$		养分增长率/%		
	初始值	最终值	初始值	最终值	初始值	最终值	TN	TP	TK
对照组	14.95±0.15b	16.17±0.26b	13.58±0.20a	14.53±0.04a	10.68±0.14b	12.22±0.12c	8.11b	6.98a	14.45b
处理 1	12.08±0.07d	14.00±0.19c	8.25±0.02d	9.20±0.24d	8.73±0.12c	11.34±0.14d	15.90a	11.53a	29.94a
处理 2	16.54±0.02a	18.22±0.12a	11.92±0.04b	12.93±0.21b	14.63±0.25a	15.90±0.08a	10.17ab	8.42a	8.69c
处理 3	12.63±0.06c	14.34±0.16c	9.43±0.11c	10.40±0.04c	11.10±0.01b	13.20±0.0b	13.48ab	10.32a	18.90b

注:TN 为全氮,TP 为全磷,TK 为全钾。

温度是堆肥能否顺利进行的重要因素,当堆体温度在 55℃以上保持 3 d 或 50℃以上保持 5~7 d,可以杀灭堆料中所含的致病微生物和虫卵,是保证堆肥的卫生指标合格和堆肥腐熟的重要条件^[18]。本试验 4 种处理 50℃以上高温期都维持了 5 d 以上,符合粪便无害化卫生标准,且最高温度没有超过 70℃,不会造成有益微生物被高温杀死。

pH 值的大小对微生物的生长有重要影响,适宜的 pH 值不但可使微生物有效地发挥作用,还可显著提高堆肥初期的反应速度。一般认为,pH 8 左右堆肥可获得最大效率,此范围内可显著提高初期的反应速度,缩短堆肥达到高温所需求的时间,亦可避免由堆肥反应延缓所造成的臭味问题^[19]。总之,pH 值的变化与堆肥物质转化紧密相关,是堆肥物质转化综合效应的反映^[20]。本次堆肥试验 pH 值始终保持在 8.0~9.0,符合堆肥腐熟标准^[13]。pH 变化趋势为先升高后降低,与牛俊玲等^[12]的研究结果一致。

碳氮比(C/N)因与反映物质转化过程并与堆肥时间有较强的相关性而被认为是评价堆肥腐熟度直观的化学指标^[21]。一般认为,高温堆肥中适宜 C/N 为 25~30^[22]。C/N 过低,不能为微生物提供足够的能源物质,影响其生命活动,无法达到高温无害化的目的;C/N 过高,堆肥过程中需氧要求提高,往往达不到良好的好氧条件而产生恶臭^[23]。本试验 4 个处理的初始 C/N 分别为 13.03、26.34、12.82、23.37,其中处理 1(C/N=26.34)和处理 3(C/N=23.37)的堆腐效果明显优于处理 2(C/N=12.82)和对照组(C/N=13.03),说明鸭粪堆肥的适宜 C/N 也在 25 左右,C/N 小于 15 则不利于堆肥的顺利进行。

4 结论

(1)本试验 4 种配比堆肥处理均能达到腐熟。腐熟进度与腐熟效果为处理 1(鸭粪+芦苇皮)>处理 3(鸭粪+芦苇皮+水草)>处理 2(鸭粪+水草)>对照组(鸭粪)。

(2)4 种配料 C/N 分别为对照组 13.03、处理 1 26.34、处理 2 12.82 和处理 3 23.37,以 C/N 为 26.34(即处理 1)的配比方式更适宜微生物活性,有机物降解率高于其他处理,较适宜鸭粪的快速堆腐。

(3)4 种堆肥配比养分含量随着有机物的降解而浓缩,随着堆肥的进行而不断提高,到堆肥结束时,全氮、全磷和全钾含量分别提高了 8.11%~15.90%、6.98%~11.53%和 8.69%~29.94%。其中处理 1(鸭粪+芦苇皮)氮、磷、钾增加量最高,分别为 15.90%、11.53%、

29.94%,说明氮磷钾流失量最少,较利于养分的保存。

(4)综合考虑温度、pH、C/N、发芽指数和营养元素 5 种因素,鸭粪与芦苇皮混合好氧堆肥效果最佳,且适宜解决当地鸭粪和芦苇皮随意堆放的污染问题。

参考文献:

- [1] 李建国,李贵宝,刘芳,等.白洋淀芦苇资源及其生态功能与利用[J].南水北调与水利科技,2004,2(5):37-39.
Li Jian-guo, Li Gui-bao, Liu Fang, et al. Reed resource and its ecological function & utilization in Baiyangdian Lake[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2004, 2(5):37-39.
- [2] 王涛.鸡粪堆肥发酵处理的主要方式[J].中国家禽,2008,30(3):25-26.
WANG Tao. Main methods of composts fermentation technology for chicken manure[J]. *China Poultry*, 2008, 30(3):25-26.
- [3] Ciavatta C, Govi M, Pasotti L, et al. Changes in organic matter during stabilization of compost from municipal solid wastes[J]. *Bioresource Technology*, 1993, 43:141-145.
- [4] 李玉红,王岩,李清飞.不同原料配比对牛粪高温堆肥的影响[J].河南农业科学,2006(11):65-67.
Li Yu-hong, WANG Yan, Li Qing-fei. Effect of different material ratio on high temperature composting of dairy manure [J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2006(11):65-67.
- [5] 钱晓雍,沈根祥,黄丽华,等.畜禽粪便堆肥腐熟度评价指标体系研究[J].农业环境科学学报,2009,28(3):549-554.
QIAN Xiao-yong, SHEN Gen-xiang, HUANG Li-hua, et al. An index system for evaluating the maturity of animal manure composting[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(3):549-554.
- [6] 赵明梅,牛明芬,何随成,等.不同微生物菌剂对牛粪堆肥发酵影响的研究[J].农业环境科学学报,2007,26(增):587-590.
ZHAO Ming-mei, NIU Ming-fen, HE Sui-cheng, et al. Effects of inoculating different microorganism agents on composting of cow manure[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(Sup.):587-590.
- [7] Moreira R, Sousa J P, Canhoto C. Biological testing of a digested sewage sludge and derived composts[J]. *Bioresource Technology*, 2008, 99(17):8382-8389.
- [8] 王卫平,薛智勇,朱凤香,等.不同微生物菌剂处理对鸡粪堆肥发酵的影响[J].浙江农业学报,2005,17(5):292-295.
WANG Wei-ping, XUE Zhi-yong, ZHU Feng-xiang, et al. Effects of inoculating different microorganism agents on composting of chicken manure[J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2005, 17(5):292-295.
- [9] 何惠霞,徐凤花,赵晓峰,等.低温下牛粪接种发酵剂对堆肥温度与微生物的影响[J].东北农业大学学报,2007,38(1):54-58.
HE Hui-xia, XU Feng-hua, ZHAO Xiao-feng, et al. Effects of inoculated complex microbial agent to cattle manure on compost temperature and microorganism under low temperature[J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2007, 38(1):54-58.
- [10] 梁冬梅,王静妹,徐勇,等.碳氮比对牛粪好氧堆肥过程的影响[J].东北农业大学学报,2008,39(8):77-81.

- LUAN Dong-mei, GUAN Jing-shu, XU Jin, et al. Effect of different initial carbon to nitrogen ratio on dairy manure composting [J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2008, 39(8):77-81.
- [11] 马文漪, 杨柳燕. 环境微生物工程 [M]. 南京: 南京大学出版社, 1998:91.
- MA Wen-yi, YANG Liu-yan. The environmental microbial project[M]. Nanjing: Nanjing University Press, 1998:91.
- [12] 牛俊玲, 梁丽珍, 兰彦平. 板栗苞和牛粪混合堆肥的物质变化特性研究[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(4):824-827.
- NIU Jun-ling, LIANG Li-zhen, LAN Yan-ping. The Substance changes during the composting of cow dung and envelope splits of chestnut[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(4):824-827.
- [13] 李艳霞, 王敏健, 王菊思. 有机固体废弃物堆肥的腐熟度参数及指标[J]. 环境科学, 1999, 20(2):98-103.
- LI Yan-xia, WANG Min-jian, WANG Ju-si. The Maturity indexes and standards of organic solid waste composting[J]. *Environment Science*, 1999, 20(2):98-103.
- [14] Morel T L, Colin F, Germon J C, et al. Methods for the evaluation of the maturity of municipal refuse compost[M]//Gasser T K R. Composting of agriculture and other wastes. London & New York: Elsevier Applied Science Publish, 1985:56-72.
- [15] Wang P, Changa C M, Watson M E, et al. Maturity indices for composted dairy and pig manures [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, 36:767-776.
- [16] 马丽红, 黄懿海, 姜 华, 等. 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.
- MA Li-hong, HUANG Yi-hai, JIANG Hua, et al. 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.
- [17] 秦 莉, 沈玉君, 李国学, 等. 不同 C/N 比堆肥碳素物质变化规律研究[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(7):1388-1393.
- QIN Li, SHEN Yu-jun, LI Guo-xue, et al. C Matter change of composting with different C/N [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(7):1388-1393.
- [18] 李国学, 张福锁. 固体废物堆肥化与复混肥生产[M]. 北京: 化学工业出版社, 2000.
- LI Guo-xue, ZHANG Fu-suo. Composting of solid waste and production of organic compound fertilizer[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2000.
- [19] 曾光明, 黄国和, 袁兴中, 等. 堆肥环境生物与控制[M]. 北京: 科学出版社, 2006:360-375.
- ZENG Guang-ming, HUANG Guo-he, YUAN Xing-zhong, et al. The environmental biological and control of compost[M]. Beijing: Science Press, 2006:360-375.
- [20] 孙德民, 李萍萍, 朱咏莉, 等. 接种微生物的醋糟堆肥腐熟过程研究[J]. 江苏农业科学, 2011(1):435-437.
- SUN De-min, LI Ping-ping, ZHU Yong-li, et al. Study on mature process of vinegar residue composting with microbial inoculation [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2011(1):435-437.
- [21] Shao Z H, He P J, Zhang D Q, et al. Characterization of water-extractable organic matter during the bio-stabilization of municipal solid waste[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 164(2/3):1191-1197.
- [22] 李 季, 彭生平. 堆肥工程实用手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- LI Ji, PENG Sheng-ping. The compost engineering practical manual [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005.
- [23] 竹江良, 刘晓琳, 李少明, 等. 两种微生物菌剂对烟草废弃物高温堆肥腐熟进程的影响[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(1):194-199.
- ZHU Jiang-liang, LIU Xiao-lin, LI Shao-ming, et al. Effect of two microbial agents on tobacco fine waste high-temperature compost maturity[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(1):194-199.