

# 不同腐熟度猪粪、奶牛粪在小白菜和香瓜上施用的农学效应研究

吴华山, 常志州\*, 靳红梅, 徐跃定, 张建英

(江苏省农业科学院农业资源与环境研究所, 江苏 南京 210014)

**摘要:**进行猪粪和奶牛粪自然高温堆肥发酵,分别在15、25、35、50 d取样,获得了不同腐熟程度堆肥产物,分别进行了小白菜和香瓜种子发芽与田间应用试验,以期获得不同腐熟堆肥在蔬菜上施用的农学效应,旨在从堆肥农田施用的农学效应角度,为制订堆肥腐熟度标准提供科学依据。结果表明:牛粪堆肥过程中的最高温度高于猪粪,且高温期也长于猪粪;两种处理在35 d有机碳含量均显著降低,全氮含量为先降低后升高趋势;两种堆肥在35 d后,均达到无害化标准。不同腐熟程度堆肥对小白菜株高和主根长及香瓜苗重和主根长均没有明显抑制作用,对小白菜和香瓜出苗率、根系活力及小白菜单株鲜重和生物产量影响较大,尤其是猪粪腐熟25 d,奶牛粪腐熟15 d的堆肥表现出显著抑制作用。将堆肥理化参数与小白菜、香瓜生长指标进行相关分析表明:pH值、全氮含量和C/N这3种指标均与小白菜和香瓜各项生物性状无显著相关性;有机碳和DOC与各项生物性状指标均表现出显著或极显著相关性;铵/硝与小白菜和香瓜的GI和根系活力均表现极显著或显著的相关性,其结果与现行的堆肥腐熟度指标并不一致。因此,在制订堆肥腐熟度标准时,应关注堆肥产物农田施用后不同作物所表现出的不同农学效应。

**关键词:**猪粪;奶牛粪;堆肥;腐熟度;标准

中图分类号:S141.4

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2014)05-0417-08

doi: 10.13254/j.jare.2014.0142

## Agricultural Effects of Application of Pig Manure and Cow Manure Composts with Different Maturity Extent on Seedling of Chinese Cabbage and Muskmelon

WU Hua-shan, CHANG Zhi-zhou\*, JIN Hong-mei, XU Yue-ding, ZHANG Jian-ying

(Institute of Agricultural Resources and Environment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China)

**Abstract:** Pig manure and cow manure were composted naturally at the same condition. The 15th, 25th, 35th, 50th day compost were fertilized on Chinese cabbage and muskmelon and seed germination and growing influence were analyzed. The aim was to obtain the agricultural effects of application of pig manure and cow manure composts with different maturity extent (CDME). The results showed that the highest temperature of cow manure was higher than pig manure in the process of compost, and the high temperature period of cow manure was longer than pig manure. The contents of total nitrogen of two manure decreased firstly and then increased, while nitrogen concentration increased continually. Both of two treatments achieved harmless standards after 35 days. Cabbage plant height and main root length, muskmelon seedling weight and main root length were not affected significantly by CDME, but seedling emergence and root activity of cabbage and muskmelon were influenced significantly by CDME. And so as the fresh weight and yield of cabbage which were observed when composts of pig manure composting for 25 days and cow manure composting for 15 days showed significant inhibition to plants. The correlation between OC, DOC and biological traits were significant or extremely significant. The correlation between nitrate-N/ammonium-N and GI or root activity were significant or extremely significant, which were not consistent with the current indicators of compost maturity. It is worthy of attention to formulate standards for compost maturity and achieve a great balance between nutrient loss in composting process and agricultural effect in field for compost application.

**Keywords:** pig manure; cow manure; compost; maturity extent; standard

近年来,我国集约化养殖业迅速发展,在改善人民生活与发展农村经济中发挥了积极的作用,同时也

产生了大量的畜禽粪便,若不妥善处理,将影响畜禽的安全生产和人们食品安全,恶化人类的生存环境<sup>[1]</sup>。许多研究表明,堆肥化处理尤其是好氧堆肥是农业废弃物变废为宝的有效途径<sup>[2-5]</sup>,其目的是使堆肥原料中不稳定的有机物,通过高温好氧发酵,逐步降解为性质稳定、对作物无害或改善土壤能力的堆肥产物,且

收稿日期:2014-05-29

项目资助:江苏省农业科技自主创新基金(CX(12)5055)

作者简介:吴华山(1978—),男,硕士,助理,从事农业废弃物资源化方面的研究。E-mail: 13667130@qq.com

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

堆肥产生的高温也能杀灭粪源中的病原微生物,减少环境危害。堆肥腐熟若不充分,则对农作物的生长发育有害;而过度腐熟,则有机碳与氮素损失大,不仅肥效降低,也降低了肥料生产厂家的效益。国内外对各种有机物料堆肥腐熟度做过大量研究,同时提出了各种评定腐熟度的指标与方法<sup>[6-10]</sup>,但这些腐熟度的评价方法大多都是以堆肥自身在腐熟过程中的各种理化性状或病原菌等变化作为研究对象。

将堆肥产物在作物上的农学效应作为评价堆肥腐熟标准的依据,是相对合理的方法。种子发芽系数(*GI*)作为植物毒性指标被认为是最可靠的评价指标之一<sup>[11-12]</sup>。然而不同供试种子对堆肥植物毒性的敏感程度差异显著<sup>[13]</sup>,且 *GI* 也受到萃取率、堆肥样品、环境条件和设备的影响而难以统一比较<sup>[14]</sup>。大多 *GI* 是在室内通过种子在浸提液中的发芽试验得到,虽然 *GI* 正确反映了肥料中的毒性,但也有研究表明未完全腐熟的肥料不一定对作物出苗及后期生长产生不利的影响,甚至还有一定的促进作用<sup>[6,15-17]</sup>。此外,不同的动物粪使其碳氮比、含氮量不同,在堆肥过程中的各项指标变化差异较大,也难以用统一指标表征其腐熟程度。因此,只有针对不同堆肥原料和不同施用对象,在已有研究的基础上,更多地从作物生长角度,客观去评价不同腐熟程度堆肥农田施用的农学效应及对作物的生长发育安全性,制订更为科学的堆肥腐熟评价标准,比单独腐熟度理化指标和发芽指数更具有实际指导意义。

本文分别以猪粪和奶牛粪便作为原料进行自然堆肥发酵,分析猪粪和奶牛粪在腐熟不同程度下的各项指标变化,分析不同腐熟堆肥对种子发芽的影响以及农田施用后对小白菜与香瓜生长的影响。旨在通过对比分析不同腐熟度肥料自身各项指标的变化与实际田间施用农学效应间的相互关系,为制订猪粪和奶牛粪堆肥的腐熟度标准提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地点

试验地点位于江苏省农业科学院六合基地大田

内,属北亚热带湿润性气候区,丘陵地貌,近几年年平均气温 15.0℃,年平均降雨量 980 mm。土壤为马肝土,pH 值 7.2,有机质含量 12.2 g·kg<sup>-1</sup>,全氮 1.12 g·kg<sup>-1</sup>,碱解氮 112.6 mg·kg<sup>-1</sup>,有效磷 27.8 mg·kg<sup>-1</sup>,速效钾 138.3 mg·kg<sup>-1</sup>。

### 1.2 堆肥原料

本试验所用的猪粪和奶牛粪便来自六合基地规模化猪场和附近的奶牛场。为减少添加物对试验结果的影响,将猪粪和奶牛粪均在外面摊开晾干至含水量 65%左右,进行直接堆肥。堆肥前猪、奶牛粪原料的理化性状见表 1。

### 1.3 堆肥、采样方法及分析项目

堆肥方式为条垛式,下部宽 2 m,高 1 m。利用翻抛机进行翻抛,起始 10 d 每 2 d 翻抛 1 次,第 11~31 d,每 3 d 翻抛 1 次,32 d 后 5 d 翻 1 次。堆肥起止时间:2011 年 8 月 8 日—9 月 26 日,共计 50 d。

每日测试堆肥温度,在条垛的上中下多点测量取其平均值。分别在 15、25、35、50 d 采集样品,共获得 4 个不同腐熟度的堆肥物料。测定堆肥产物的含水量、pH 值、Eh、C、N、P、发芽指数、大肠菌群数、铵态氮、硝态氮、DOC、灰分等。

### 1.4 试验处理

本试验设 9 个施肥处理,分别为猪粪、奶牛粪在 15、25、35、50 d 发酵产物,田间试验时,用化肥(CK)作为一个对照,分析小白菜(*Chinese cabbage*,品种为“矮脚黄”)和香瓜(*muskmelon*,品种为“落花甜”)在生长过程中的各项指标。

试验于 2012 年 9 月—2012 年 11 月在江苏省农业科学院六合基地蔬菜大棚内进行。每个处理设 1 个小区,每个小区长 2.8 m,宽 1.5 m,3 个重复。化肥(CK)、堆肥均作基肥一次性施用,于播种前与耕层土壤混合,试验过程中不施追肥。各处理采用等氮量计算施肥量,小白菜施氮量为 90 kg·hm<sup>-2</sup>,试验周期 40 d,播种量为 5.5 kg·hm<sup>-2</sup>。香瓜采用点播方式,行距和株距各为 10 cm,等出苗 20 d 后再进行间苗,保持行距和株距各为 10 cm,以保障正常生长;香瓜施氮量为 175 kg·hm<sup>-2</sup>,生长过程中按照统一的管理模式。根

表 1 堆肥原料的主要理化性状

Table 1 Physical and chemical characters of compost materials

| 品种  | 水分 /% | pH 值 | 总有机碳 /% | 全氮 /g·kg <sup>-1</sup> | 全磷 /g·kg <sup>-1</sup> | 全钾 /g·kg <sup>-1</sup> | 铵态氮 /mg·kg <sup>-1</sup> | 硝态氮 /mg·kg <sup>-1</sup> | 粗灰分 /% |
|-----|-------|------|---------|------------------------|------------------------|------------------------|--------------------------|--------------------------|--------|
| 猪粪  | 65.18 | 7.83 | 31.40   | 23.42                  | 20.95                  | 9.40                   | 4.84                     | 0.37                     | 27.47  |
| 奶牛粪 | 64.99 | 8.13 | 30.58   | 16.42                  | 6.50                   | 10.07                  | 3.61                     | 0.28                     | 26.11  |

系活力、苗高和有效根长均为播种后 3 叶期测定。

1.5 分析方法

1.5.1 肥料分析方法

水分:采用烘干法;有机质:采用重铬酸钾容量法;全氮:采用硫酸-水杨酸-混合盐消煮,硼酸滴定;全磷:采用硫酸-双氧水消煮,钒钼黄比色法;全钾:采用硫酸-双氧水消煮,火焰分光光度法;铵态氮:采用碱扩散法;硝态氮:采用镉柱还原法;粗灰分:采用农业部有机肥料粗灰分测定法(NY/T 303—1995);发芽率指数(GI):根据文献[12];DOC:加10 倍的水稀释震荡充分溶解后用 TOC 测定仪测定;大肠杆菌:平板菌落计数法<sup>[18]</sup>。

1.5.2 植物生理指标分析方法

出苗率:小白菜随机选择 1 m<sup>2</sup> 数出苗数,再除以该范围内施入的种子数,每个小区重复 3 次;香瓜对整个试验小区计数;单株重:小白菜拔出清洗后连根称整株重量;小白菜生物产量:随机选择 1 m<sup>2</sup> 面积,收获后去根称重,再根据比例折算为公顷产量,每个小区重复 5 次;香瓜生物产量:在播种 25 d 后,间苗的同时对所间的所有苗进行称重(连根),并按照所间苗的比例折算;株长(苗高):测量从根叶交界处到最长叶尖的距离;植物根系活力:采用 TTS 方法<sup>[19]</sup>。

2 结果与讨论

2.1 猪粪、奶牛粪堆肥的温度、理化性状及大肠杆菌变化

2.1.1 堆肥过程中的温度变化

堆肥温度反映了堆体内微生物活性变化和有机物料转化。由图 1 可见,堆肥温度变化主要有 3 个阶段,分别为升温、高温和后熟阶段。高温阶段是好氧堆肥的关键阶段,大部分有机物在此过程中氧化分解,堆肥物料中几乎所有的致病微生物在此过程中被杀死而达到稳定化<sup>[20]</sup>。猪粪和奶牛粪堆肥温度 $\geq 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的

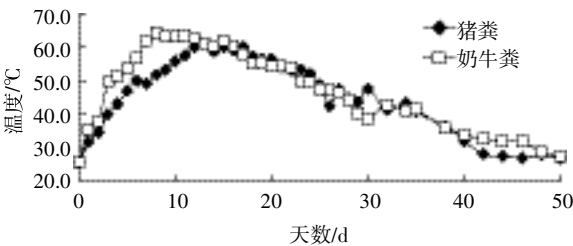


图 1 堆肥过程中的温度变化

Figure 1 Changes of temperature in composting process of pig and cow manure

天数分别为 17 d 和 19 d, $\geq 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的天数分别为 5 d 和 10 d。本试验中,奶牛粪较猪粪升温更快,高温期更长。根据罗泉达<sup>[20]</sup>、贺琪等<sup>[21]</sup>的研究,C/N 比在 25~35 之间最有利于微生物的生长和繁殖,奶牛粪的 C/N 较猪粪更接近适宜的 C/N 比,微生物的活性更大。

2.1.2 堆肥物料理化性状及养分变化

分析猪粪和奶牛粪在不同堆肥时期的样品,其理化性状见表 2。

猪粪和奶牛粪不同处理之间 pH 值有显著的差异。猪粪堆肥 25 d 达到最高值 9.28,奶牛粪堆肥第 15 d 达到最高值 10.80。不同处理的猪粪和奶牛粪堆肥中有机碳和可溶性有机碳(DOC)含量差异显著,表现出堆肥时间越长,含量越低。

猪粪和奶牛粪堆肥前 25 d 内,全 N 含量都显著降低,但随后上升。这是由于堆肥的最初时期内,有机氮化合物被分解,使  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  大量产生,伴随着温度、pH 值的升高而出现  $\text{NH}_3$  挥发损失,到后期表现为氮含量上升趋势,主要是因为堆肥中有机物质的损失导致总质量降低<sup>[23]</sup>。猪粪和奶牛粪堆肥全磷含量均是逐渐上升,这与赵素芬等<sup>[23]</sup>的研究一致;全钾含量变化均是先下降后上升,之所以初始阶段钾含量下降,可能部分钾素可能在堆肥初期随水分流出而损失,后期升高是由于干物质损失的原因。

2.1.3 堆肥中粪大肠杆菌群的数量变化

畜禽粪便中含有大量的致病性大肠杆菌,堆肥是杀死病原微生物的重要手段<sup>[24]</sup>。如图 2,初始猪粪中大肠杆菌数量高于奶牛粪,堆肥第 35 d 奶牛粪便中大肠杆菌数量下降到最低点,而猪粪中大肠杆菌持续下降,到堆肥结束时,2 种粪便中大肠杆菌数量几乎相同。根据农业部《畜禽粪便无害化处理技术规范》,粪大肠杆菌数 $\leq 10^5$  个 $\cdot\text{kg}^{-1}$ 。在本试验中,猪粪堆肥 35 d

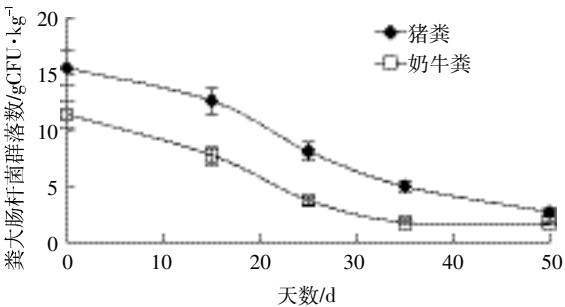


图 2 不同腐熟度猪粪和奶牛粪堆肥对粪大肠杆菌群落数的影响

Figure 2 Number of *E.coli* in compost with different maturity extent of pig and cow manure

表 2 不同腐熟程度的猪粪和奶牛粪堆肥的理化特征

Table 2 Physical and chemical characters of compost with different maturity extent of pig and cow manure

| 种类  | 腐熟<br>天数/d | 含水量/<br>%     | pH 值          | 粗灰分/<br>%     | 有机碳/<br>%     | DOC/<br>%     | TN/<br>g·kg <sup>-1</sup> | TP/<br>g·kg <sup>-1</sup> | TK/<br>g·kg <sup>-1</sup> | NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N/<br>g·kg <sup>-1</sup> | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N/<br>g·kg <sup>-1</sup> |
|-----|------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| 猪粪  | 0          | 65.18 ± 2.21a | 7.83 ± 0.12c  | 27.47 ± 2.23b | 31.40 ± 2.14a | 14.09 ± 1.02a | 23.42 ± 0.11a             | 20.9 ± 0.45b              | 9.40 ± 0.25c              | 4.84 ± 0.06b                                           | 0.37 ± 0.01e                                           |
|     | 15         | 54.12 ± 2.01b | 8.35 ± 0.17b  | 25.61 ± 1.95c | 29.50 ± 2.01a | 12.12 ± 0.45b | 21.33 ± 0.10b             | 21.62 ± 0.21b             | 9.20 ± 0.21c              | 7.85 ± 0.02a                                           | 1.32 ± 0.04d                                           |
|     | 25         | 49.74 ± 1.12c | 9.28 ± 0.42a  | 25.51 ± 1.02c | 26.74 ± 1.94b | 9.98 ± 0.68c  | 19.51 ± 0.29c             | 22.68 ± 0.22b             | 9.36 ± 0.42c              | 7.19 ± 0.02a                                           | 1.81 ± 0.12b                                           |
|     | 35         | 44.47 ± 1.28d | 8.08 ± 0.37c  | 28.32 ± 2.10b | 25.79 ± 1.09b | 6.94 ± 0.77d  | 20.19 ± 0.57c             | 24.46 ± 0.84a             | 10.10 ± 0.36b             | 4.76 ± 0.02b                                           | 1.65 ± 0.11c                                           |
|     | 50         | 41.57 ± 1.21d | 7.44 ± 0.22d  | 32.24 ± 1.94a | 24.88 ± 1.22c | 5.58 ± 0.43d  | 21.52 ± 0.26b             | 25.74 ± 0.37a             | 10.62 ± 0.45a             | 0.86 ± 0.03c                                           | 2.42 ± 0.21a                                           |
| 奶牛粪 | 0          | 64.99 ± 3.45a | 8.13 ± 0.39c  | 26.11 ± 1.92b | 30.58 ± 2.09a | 12.92 ± 1.64a | 16.42 ± 0.70a             | 6.50 ± 0.24c              | 10.07 ± 0.21b             | 3.61 ± 0.11d                                           | 0.28 ± 0.10d                                           |
|     | 15         | 51.55 ± 2.14b | 10.80 ± 1.06a | 26.23 ± 1.26b | 28.37 ± 2.01a | 9.35 ± 1.09b  | 16.12 ± 0.06b             | 6.55 ± 0.08c              | 9.46 ± 0.15b              | 9.87 ± 0.10a                                           | 0.71 ± 0.22b                                           |
|     | 25         | 47.17 ± 2.02c | 9.40 ± 0.22b  | 28.53 ± 1.01a | 26.86 ± 1.76b | 6.74 ± 0.57c  | 15.73 ± 0.52c             | 7.47 ± 0.15b              | 9.65 ± 0.32b              | 8.63 ± 0.06b                                           | 0.57 ± 0.05c                                           |
|     | 35         | 40.71 ± 2.01d | 8.22 ± 0.12c  | 29.42 ± 1.12a | 24.67 ± 1.53c | 5.54 ± 0.62d  | 16.16 ± 0.58b             | 7.96 ± 0.05b              | 10.42 ± 0.53b             | 5.39 ± 0.14c                                           | 0.61 ± 0.01c                                           |
|     | 50         | 39.69 ± 1.78d | 7.64 ± 0.17d  | 29.69 ± 1.60a | 24.17 ± 1.30c | 4.15 ± 0.44e  | 15.88 ± 0.76c             | 9.29 ± 0.23a              | 11.77 ± 0.50a             | 0.62 ± 0.02e                                           | 1.39 ± 0.02a                                           |

注:表中字母分别表示猪粪和奶牛粪分别在同一处理在不同时期的差异显著性( $P<0.05$ )。

Note: Different letters in the table denote the significant difference of the same treatment at different time ( $P<0.05$ ).

后、奶牛粪堆肥 25 d 后就已经达到该标准。

## 2.2 不同腐熟程度猪粪、奶牛粪堆肥对小白菜和香瓜发芽与生长的影响

### 2.2.1 发芽指数(GI)

一般认为,植物毒性是堆肥腐熟度状况最直观的表现<sup>[25]</sup>,堆肥的腐熟程度直接影响着种子发芽指数<sup>[26-27]</sup>,将不同腐熟度的猪粪和奶牛粪用于小白菜(矮脚黄)和甜瓜(落花甜)的发芽指数测试,并用清水作对照(CK)。由图 3、图 4 可见,堆肥时间越长,GI 值越高。小白菜和甜瓜的 GI 值,在 0~35 d 处理间,差异显著( $P<0.05$ );第 35 d 和 50 d 猪粪堆肥的小白菜种子 GI 差异显著,奶牛粪差异不显著( $P<0.05$ )。与之相反,甜瓜种子,第 35 d 和 50 d 奶牛粪堆肥间差异显著,猪粪变化不显著( $P>0.05$ )。这说明不同作物种子对不同原料堆肥反应不完全相同。根据罗泉达等<sup>[5]</sup>研究表明,猪粪堆肥腐熟时,萝卜种子(白丽萝卜)的 GI 值应 $\geq 45\%$ ;本研究两种蔬菜种子,在两种粪便堆肥

35 d 时,其 GI 值均已经超过 45%,但由于作物种子不同,对发芽环境的敏感性有一定差异,因此,并不能就此确定肥料对某种作物的安全性。Zucconi<sup>[27]</sup>认为,当 GI 值 $>50\%$ 时,堆肥对植物已基本没有毒性,根据此标准,两种粪便堆肥到第 35 d 就没有毒性。

### 2.2.2 出苗率和产量

将肥料用于大棚小白菜和香瓜种植,计算小白菜的出苗率和产量;由于香瓜的管理要求较高,后期产量的影响因素较多,因此只监测 25 d 的出苗情况及生物产量,结果见表 3。

小白菜试验中,CK(化肥)处理的小白菜出苗率最高,两种粪便堆肥的出苗率都是随着堆肥天数的增加而增加,堆肥 50 d 后,出苗率与 CK 差异不显著。猪粪堆肥 25 d,奶牛粪堆肥 15 d,其各自出苗率最低,但牛粪堆肥 35 d 与 50 d 的出苗率差异不显著。香瓜试验中,猪粪堆肥 35 d 和 50 d 与奶牛粪堆肥 50 d 的堆肥均与 CK 出苗率差异不显著,但猪粪堆肥 15、25 d

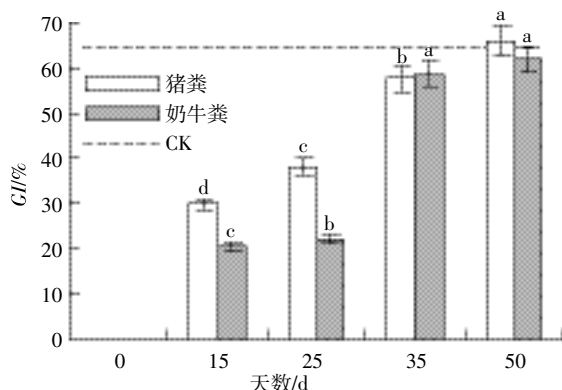


图 3 不同腐熟程度堆肥对小白菜发芽指数的影响

Figure 3 Infuence of compost with different maturity extent on GI of Chinese cabbage

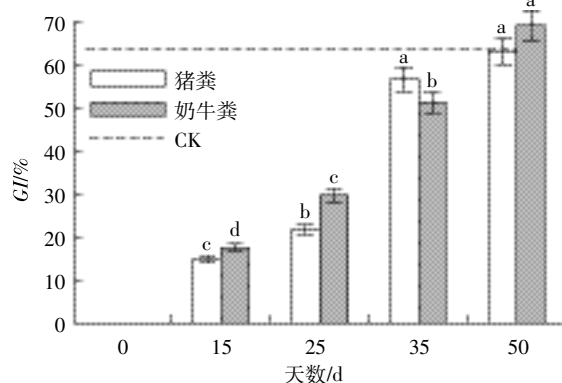


图 4 不同腐熟程度堆肥对甜瓜发芽指数的影响

Figure 4 Influence of compost with different maturity extent on GI of maskmelon

表 3 不同腐熟程度堆肥对小白菜和香瓜出苗率和产量的影响  
Table 3 Influence of compost with different maturity extent (CDME) on emergence rate and yield of Chinese cabbage and muskmelon

| 种类    | 发酵天数 /d | 小白菜           |                        | 香瓜            |                               |
|-------|---------|---------------|------------------------|---------------|-------------------------------|
|       |         | 出苗率 /%        | 产量 /t·hm <sup>-2</sup> | 出苗率 /%        | 25 d 生物产量 /t·hm <sup>-2</sup> |
| 化肥    | —       | 91.26 ± 4.21a | 49.60 ± 4.32b          | 94.29 ± 4.09a | 28.13 ± 0.83b                 |
| 猪粪堆肥  | 0       | 60.21 ± 5.35d | 45.21 ± 4.85c          | 78.2 ± 3.601c | 24.13 ± 1.11c                 |
|       | 15      | 62.94 ± 3.45d | 42.28 ± 3.21d          | 84.94 ± 2.09b | 25.74 ± 2.32c                 |
|       | 25      | 58.83 ± 2.21d | 44.04 ± 4.11c          | 77.39 ± 2.19c | 23.85 ± 2.83c                 |
|       | 35      | 75.94 ± 4.45c | 60.20 ± 1.52a          | 92.94 ± 4.88a | 27.78 ± 1.82b                 |
|       | 50      | 89.12 ± 3.12a | 62.44 ± 2.12a          | 95.15 ± 3.10a | 31.28 ± 2.10a                 |
| 奶牛粪堆肥 | 0       | 55.21 ± 2.68d | 53.48 ± 3.94b          | 76.43 ± 7.71c | 24.25 ± 3.95c                 |
|       | 15      | 53.12 ± 3.84e | 48.96 ± 3.11c          | 81.29 ± 5.30c | 25.11 ± 2.10c                 |
|       | 25      | 79.94 ± 4.77b | 51.44 ± 2.74b          | 85.37 ± 4.09b | 27.49 ± 2.11b                 |
|       | 35      | 87.10 ± 2.90a | 52.36 ± 1.94b          | 85.96 ± 5.16b | 29.70 ± 1.07a                 |
|       | 50      | 88.18 ± 3.68a | 59.96 ± 1.32a          | 91.94 ± 6.42a | 30.72 ± 1.55a                 |

注:表中字母分别表示 11 个肥料处理效果的差异显著性( $P<0.05$ )。下同。  
Note: Different letters in the table denote the significant difference of 11 treatments ( $P<0.05$ ). The same below.

和奶牛粪堆肥 15、25、35 d 的堆肥对香瓜的出苗有一定的抑制作用。表明未腐熟的猪粪、奶牛粪对种子在田间发芽有一定的影响。同时也看出,不同处理间田间出苗率差异性相比室内 *GI* 试验结果的差异性要小,说明在大田环境下,未腐熟肥料对种子的毒性有一定程度的减弱。

猪粪、奶牛粪随着堆肥天数增加,小白菜生物产量随着增加,但猪粪堆肥 35 d 和 50 d 与牛粪堆肥 50 d 处理间差异不显著,但显著高于其他处理;奶牛粪堆肥 25、35 d,小白菜生物产量与 CK 差异不显著;猪粪堆肥 15 d 和 25 d 与奶牛粪堆肥 15 d,小白菜生物产量均显著低于 CK。试验结果表明,猪粪堆肥 35 d 后对小白菜生长没有明显影响;奶牛粪堆肥 50 d 效果最好,在堆肥 25 d 后,对小白菜产量也具有一定的促进作用。

香瓜 25 d 生物量总体趋势与小白菜类似,猪粪堆肥 50 d 和奶牛粪堆肥 35、50 d,其肥料施用效果均显著好于化肥和其他堆肥时间的肥料,猪粪堆肥 0~25 d 及奶牛粪堆肥 0~15 d 的生物产量均显著低于化学肥料,表明粪便的不同腐熟程度对香瓜的生长有显著的影响。

2.2.3 生物性状

在小白菜出苗第 50 d(收获期)测试其地上部单株鲜重、高度、根长和根系活力,在香瓜出苗第 25 d 测试地上部苗重、苗高、根长和根系活力等生物性状。结果见表 4。

不同处理,随着堆肥天数的增加,小白菜单株鲜重增加;但猪粪堆肥 35、50 d 和奶牛粪堆肥 25、35、50

d,其堆肥对小白菜的单株鲜重没有显著性差异,且均优于 CK 处理;猪粪堆肥 25 d 和奶牛粪堆肥 15 d,小白菜的单株鲜重均显著低于 CK。试验表明未腐熟的猪粪和奶牛粪并不一定影响小白菜的单株重量,但在堆肥腐熟过程中的某个时间段(猪粪为第 25 d 左右,牛粪为第 15 d 左右),其堆物对小白菜单株重量影响较大。不同腐熟度的猪粪、奶牛粪对香瓜的苗重影响的差异不显著,这与钱晓雍等<sup>[6]</sup>的结果基本一致。

不同处理间,小白菜株高差异不显著,但表现出随着堆肥时间的增加,株高也增加的趋势。猪粪堆肥 25 d 与奶牛粪堆肥 15 d,堆肥对香瓜的苗高有显著的抑制作用,其他时期的堆肥与化肥处理之间的相关性不显著。

各处理之间,小白菜和香瓜的主根长度差异不显著,表明施用不同腐熟度肥料对小白菜和香瓜的地下部分生长没有显著的抑制作用。

猪粪和奶牛粪在 0~25 d 内,随着堆肥时间的延长对小白菜根系活力有显著的提高;25 d 后的堆肥对小白菜根系活力的影响已经不再显著,且均高于 CK,表明猪粪和奶牛粪在不同时期的堆肥对小白菜根系活力都有一定的促进作用,堆肥 25 d 后,即使未腐熟,都能增强根系活力。香瓜根系活力的结果与小白菜不同,猪粪堆肥 25 d 和奶牛粪堆肥 15 d,显著低于 CK,表明猪粪和奶牛粪在堆肥某个阶段对根系生长具有明显的抑制作用。

比较猪粪和奶牛粪堆肥,猪粪堆肥 25 d 和奶牛粪堆肥 15 d,对小白菜和香瓜的出苗率以及小白菜单株鲜重均有显著抑制作用;对根系活力和生物产量的影

表 4 不同腐熟程度堆肥对小白菜和香瓜生物量的影响

Table 4 Influence of compost with different maturity extent on biomass of Chinese cabbage and muskmelon

| 种类    | 腐熟天数/<br>d | 小白菜            |               |               |                                               | 香瓜             |              |              |                                               |
|-------|------------|----------------|---------------|---------------|-----------------------------------------------|----------------|--------------|--------------|-----------------------------------------------|
|       |            | 单株地上部<br>鲜重 /g | 单株高度 /cm      | 主根长 /cm       | 根系活力 /<br>mg·g <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup> | 单株地上部<br>苗重 /g | 苗高 /cm       | 主根长 /cm      | 根系活力 /<br>mg·g <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup> |
| 化肥    | —          | 81.01 ± 1.13b  | 13.62 ± 0.43a | 10.36 ± 0.31a | 0.242 ± 0.010b                                | 25.12 ± 1.13a  | 8.13 ± 0.33a | 9.59 ± 0.81a | 0.375 ± 0.021b                                |
| 猪粪堆肥  | 0          | 78.28 ± 1.09b  | 13.52 ± 0.54a | 10.36 ± 0.55a | 0.231 ± 0.034c                                | 24.77 ± 1.14b  | 7.51 ± 0.32b | 9.28 ± 1.01b | 0.314 ± 0.033c                                |
|       | 15         | 79.82 ± 1.19b  | 13.48 ± 1.01a | 10.34 ± 0.21a | 0.248 ± 0.023b                                | 24.83 ± 0.93a  | 7.96 ± 0.51a | 9.42 ± 0.56a | 0.354 ± 0.034b                                |
|       | 25         | 73.87 ± 1.23c  | 13.77 ± 0.78a | 10.52 ± 0.62a | 0.274 ± 0.016a                                | 25.27 ± 1.21a  | 7.69 ± 0.82b | 9.37 ± 0.22b | 0.313 ± 0.025c                                |
|       | 35         | 84.98 ± 1.63a  | 13.94 ± 0.90a | 10.88 ± 0.39a | 0.276 ± 0.021a                                | 26.31 ± 1.17a  | 7.94 ± 0.26a | 9.84 ± 0.72a | 0.368 ± 0.012b                                |
| 奶牛粪堆肥 | 50         | 84.82 ± 2.11a  | 14.01 ± 1.20a | 10.99 ± 0.44a | 0.280 ± 0.022a                                | 26.73 ± 0.88a  | 8.01 ± 0.22a | 9.54 ± 0.23a | 0.391 ± 0.013a                                |
|       | 0          | 72.12 ± 2.32c  | 13.41 ± 0.72a | 10.36 ± 0.22a | 0.225 ± 0.013c                                | 24.63 ± 2.23b  | 7.44 ± 0.42b | 9.21 ± 1.11b | 0.311 ± 0.019c                                |
|       | 15         | 71.45 ± 3.91c  | 13.48 ± 0.88a | 10.42 ± 0.52a | 0.246 ± 0.022b                                | 26.31 ± 2.09a  | 7.42 ± 0.51b | 9.31 ± 1.00b | 0.323 ± 0.020c                                |
|       | 25         | 83.24 ± 3.22a  | 13.39 ± 1.02a | 10.72 ± 0.37a | 0.268 ± 0.030a                                | 26.18 ± 1.88a  | 7.98 ± 0.28a | 9.52 ± 0.42a | 0.364 ± 0.026b                                |
|       | 35         | 84.34 ± 4.40a  | 13.53 ± 1.11a | 10.88 ± 0.12a | 0.264 ± 0.031a                                | 26.20 ± 1.72a  | 8.12 ± 0.32a | 9.63 ± 0.54a | 0.367 ± 0.015b                                |
|       | 50         | 85.90 ± 2.09a  | 13.71 ± 0.36a | 10.96 ± 0.37a | 0.270 ± 0.026a                                | 26.28 ± 1.91a  | 8.16 ± 0.29a | 9.61 ± 0.45a | 0.415 ± 0.019a                                |

响也非常显著,表明猪粪和奶牛粪分别在这两个腐熟时期的堆肥不仅对种子出苗有显著的抑制作用,也影响后期的生长发育,导致减产。通过堆肥过程中温度和 pH 值的变化也能看出,这两个时期分别为猪粪和奶牛粪堆肥高温期的末端,也是 pH 值最高的时期,表明此时堆体内微生物最为活跃,对果蔬种子的发芽影响较为明显。猪粪和奶牛粪堆肥 50 d 后的效果最好,但结合 GI、大肠杆菌群和实际田间应用效果,在堆肥时间有限的情况下,猪粪堆肥 35 d,奶牛粪堆肥 25 d 后,已达到安全施用的目标,对后期成长已无显著影响。

### 2.3 不同腐熟度指标与生物性状之间的相关性分析

选择猪粪和奶牛粪腐熟过程中的各项指标:腐熟天数、pH 值、有机碳含量、全氮含量、C/N、DOC 和铵态氮含量/硝态氮含量等 7 个指标,与小白菜和香瓜在田间生长中具有显著性差异的指标进行相关性分析,结果见表 5。

从表 5 可以看出腐熟天数与小白菜的产量和单株鲜重有显著的相关性,与 GI、出苗率和根系活力均有极显著的相关性,表明在一定时期内,腐熟时间越长的堆肥越能促进小白菜和香瓜的生长。相对于其他指标,腐熟时间对于生物性状的显著性,要明显大于理化指标,对蔬菜生长而言,生长的前期或生育短的作物,腐熟时间,是决定堆肥效果的首要因素。根据施林林等<sup>[28]</sup>针对不同腐熟猪粪对花生生长的研究,腐熟度对花生产量有显著的正相关性,主要原因是不同腐熟度猪粪不但能改变土壤食物链结构,直接影响土壤动物组成和分布,而且能调控花生长势。腐熟度越高,大型土壤动物个体数和种群数越少,群落多样性和均匀度提高。

pH 值、全氮含量和 C/N 比与小白菜和香瓜的各项生物性状均没有表现出显著的相关性,而有机碳和 DOC 与各项生物性状指标均表现出显著或极显著相关性(表 5)。这主要是土壤具有较强缓冲能力,少量

表 5 不同腐熟度指标与小白菜和香瓜各项生物指标之间的相关性

Table 5 The correlation between Chinese cabbage, muskmelon and biological indicators

| 指标      | 小白菜     |         |        |        |         | 香瓜      |         |           |         |         |
|---------|---------|---------|--------|--------|---------|---------|---------|-----------|---------|---------|
|         | GI      | 出苗率     | 产量     | 单株鲜重   | 根系活力    | GI      | 出苗率     | 25 d 生物产量 | 苗高      | 根系活力    |
| 腐熟天数    | 0.956** | 0.862** | 0.701* | 0.754* | 0.894** | 0.975** | 0.864** | 0.895**   | 0.817** | 0.880** |
| pH 值    | 0.338   | 0.516   | 0.453  | 0.593  | 0.096   | 0.371   | 0.432   | 0.465     | 0.453   | 0.461   |
| 有机碳     | 0.933** | 0.832** | 0.650* | 0.687* | 0.895** | 0.947** | 0.754*  | 0.839**   | 0.788** | 0.793** |
| TN      | 0.053   | 0.152   | 0.214  | 0.069  | 0.048   | 0.172   | 0.046   | 0.189     | 0.106   | 0.166   |
| C/N     | 0.544   | 0.364   | 0.161  | 0.505  | 0.520   | 0.422   | 0.509   | 0.324     | 0.406   | 0.329   |
| DOC     | 0.858** | 0.867** | 0.717* | 0.722* | 0.824** | 0.939** | 0.793** | 0.887**   | 0.776** | 0.846** |
| 铵态氮/硝态氮 | 0.823** | 0.518   | 0.485  | 0.523  | 0.683*  | 0.729*  | 0.675*  | 0.570     | 0.601   | 0.639*  |

注:  $df=10-2=8$ ,  $r_{0.05(8)}=0.632$ ,  $r_{0.01(8)}=0.765$ 。

有机肥施入并不能短期内影响土壤酸碱度变化,全氮含量和 C/N 比没有影响,是由于试验是在等氮量下进行,部分消除了肥料中氮含量及 C/N 比可能对试验结果的影响。有机碳和 DOC 与小白菜和香瓜各项生物指标表现出显著的相关性,主要是因为有机碳和 DOC 相对于其他指标更能反映腐熟度指标<sup>[29-33]</sup>,而腐熟度又对小白菜和香瓜多数生物性状有显著的相关性缘故。铵态氮/硝态氮比与小白菜和香瓜的 *GI* 和根系活力均表现极显著或显著的相关性,表明铵态氮/硝态氮比对种子的发芽和根系的活力有显著的影响,其他生物性状中仅与香瓜的出苗有显著的相关性,但对作物后期生长影响已经不显著,且对不同的作物影响也不同。

### 3 结论

(1)奶牛粪堆肥过程中的最高温度高于猪粪,且高温期也长于猪粪;2种处理在 35 d 有机碳含量均显著降低,全氮和全钾含量为先降低后升高趋势;2种处理在堆肥经过 35 d 后,大肠杆菌均达到无害化标准,*GI* 也达到腐熟标准。虽然 2 种处理各个指标的变化趋势相同,但在变化幅度上有差异,这由于 2 种粪便的 C/N 比相差较大以及所含成分不同引起的。

(2)猪粪、奶牛粪堆肥 35 d 后,对种子的发芽没有显著的抑制作用。在大田环境下,未腐熟肥料对种子发芽毒性影响小于室内实验结果。

(3)堆肥腐熟过程中的某个时间段(猪粪为第 25 d 左右,牛粪为第 15 d 左右),其堆物使小白菜单株重量最低。不同腐熟度的猪粪、奶牛粪对香瓜的苗重影响的差异不显著。不同处理间,小白菜株高差异不显著,但表现出随着堆肥时间的增加,株高也增加的趋势。猪粪堆肥 25 d 与奶牛粪堆肥 15 d,堆肥对香瓜的苗高有显著的抑制作用,其他时期的堆肥与化肥处理之间的相关性不显著。

(4)施用不同腐熟度肥料对小白菜和香瓜的地下部分生长没有显著的抑制作用。猪粪和奶牛粪在不同时期的堆肥对小白菜根系活力都有一定的促进作用,堆肥 25 d 后,即使未腐熟,都能增强根系活力;但猪粪在 25 d 之前和奶牛粪在 15 d 之前对根系生长具有明显的抑制作用。猪粪堆肥 35 d,奶牛粪堆肥 25 d 后,已达到安全施用的目标,对后期成长已无显著影响。

(5)腐熟时间,是决定堆肥效果的首要因素,腐熟时间与生物性状之间有显著的正相关性,由于有机碳和 DOC 相对于其他指标更能反映腐熟度指标,pH

值、全氮含量和 C/N 比与小白菜和香瓜的各项生物性状均没有表现出显著的相关性,而有机碳和 DOC 与各项生物性状指标均表现出显著或极显著相关性。铵态氮/硝态氮比与小白菜和香瓜的 *GI* 和根系活力均表现极显著或显著的相关性,但铵态氮/硝态氮比对作物后期生长影响已经不显著。

### 参考文献:

- [1] 边炳鑫,赵由才. 农业固体废弃物的处理和综合利用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.  
BIAN Bing-xin, ZHAO You-cai. Agricultural solid waste treatment and comprehensive utilization[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004. (in Chinese)
- [2] 吴华山,郭德杰,马艳,等. 添加羊、兔粪及稻草与猪粪混合对其堆肥腐熟进程的影响[J]. 江苏农业学报, 2012, 28(1): 58-64.  
WU Hua-shan, GUO De-jie, MA Yan, et al. Effect of sheep manure, rabbit manure and straw on pig manure composting[J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Science*, 2012, 28(1): 58-64. (in Chinese)
- [3] 宋彩红,贾璇,李鸣晓,等. 沼渣与畜禽粪便混合堆肥发酵效果的综合评价[J]. 农业工程学报, 2013, 29(24): 227-234.  
SONG Cai-hong, JIA Xuan, LI Ming-xiao, et al. Comprehensive evaluation of co-composting fermentation effect of biogas residue mixed with livestock manure[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(24): 227-234. (in Chinese)
- [4] 赵洪颜,李杰,刘晶晶,等. 沼液堆肥化与牛粪堆肥化的发酵特性及腐熟进程[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(11): 2272-2276.  
ZHAO Hong-yan, LI Jie, LIU Jing-jing, et al. Fermentation process and maturation characteristics for biogas slurry and cattle manure compost[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(11): 2272-2276. (in Chinese)
- [5] 罗泉达,黄惠珠,郑长焰,等. 猪粪堆肥的腐熟度指标[J]. 福建农林大学学报: 自然科学版, 2009, 38(1): 84-87.  
LUO Quan-da, HUANG Hui-zhu, ZHENG Chang-yan, et al. The indices of swine manure compost maturity[J]. *Journal of Fujian Agriculture and Forestry University: Natural Science Edition*, 2009, 38(1): 84-87. (in Chinese)
- [6] 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 evaluation the maturity of animal manure composting[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(3): 549-554. (in Chinese)
- [7] 吴银宝,汪植三,廖新,等. 猪粪堆肥腐熟指标的研究[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(2): 189-193.  
WU Yin-bao, WANG Zhi-san, LIAO Xin, et al. Study on mature index of composting swine manure[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2003, 22(2): 189-193. (in Chinese)
- [8] 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. (in Chinese)
- [9] Ko H J, Kim K Y, Kim H T, et al. Evaluation of maturity parameters and heavy metal contents in composts made from animal manure[J]. *Waste Management*, 2008, 28(5): 813–820.
- [10] Bustamante M A, Paredes C, Marhuenda-Egea F C, et al. Co-composting of distillery wastes with animal manures: Carbon and nitrogen transformations in the evaluation of compost stability[J]. *Chemosphere*, 2008, 72(4): 551–557.
- [11] 黄国锋, 钟流举, 张振钿, 等. 有机固体废弃物堆肥的物质变化及腐熟度评价[J]. 应用生态学报, 2003, 14(5): 813–818.  
HUANG Guo-feng, ZHONG Liu-ju, ZHANG Zhen-tian, et al. Physicochemical changes and maturity evaluation of solid organic waste compost[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(5): 813–818. (in Chinese)
- [12] 黄国锋, 吴启堂, 孟庆强, 等. 猪粪堆肥化处理的物质变化及腐熟度评价[J]. 华南农业大学学报, 2002, 23(3): 1–4.  
HUANG Guo-feng, WU Qi-tang, MENG Qing-qiang, et al. Substance changes and maturity evaluation during pig manure composting[J]. *Journal of South China Agricultural University*, 2002, 23(3): 1–4. (in Chinese)
- [13] 王定美, 武 丹, 李 季, 等. 猪粪及其堆肥不同水浸提比对种子发芽特性指标的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(3): 579–584.  
WANG Ding-mei, WU Dan, LI Ji, et al. Effects of water extraction ratio of pig manure and its compost on seed germinative indicators[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(3): 579–584. (in Chinese)
- [14] 高建程, 于金莲, 石登荣, 等. 不同预堆期对牛粪堆肥进程的影响研究[J]. 农业环境科学学报, 2008, 28(3): 1214–1218.  
GAO Jian-cheng, YU Jin-lian, SHI Deng-rong, et al. Effects of different pretreatment periods on composting process of cattle manure[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 28(3): 1214–1218. (in Chinese)
- [15] 高新昊, 刘兆辉, 张志斌, 等. 不同腐熟程度麦秸堆肥在温室番茄栽培中应用效果研究[J]. 土壤, 2009, 41(2): 253–257.  
GAO Xin-hao, LIU Zhao-hui, ZHANG Zhi-bin, et al. Wheat straw compost as soil amendment in greenhouse tomato production system[J]. *Soils*, 2009, 41(2): 253–257. (in Chinese)
- [16] Sela R, Goldrat T, Avnimelech Y. Determining optimal maturity of compost used for land application compost[J]. *Science and Utilization*, 1998(6): 83–88.
- [17] 孔维栋, 刘可星, 廖宗文, 等. 有机物料种类及腐熟水平对土壤微生物群落的影响[J]. 应用生态学报, 2004, 15(3): 487–492.  
KONG Wei-dong, LIU Ke-xing, LIAO Zong-wen, et al. Effects of different organic materials and their composting levels on soil microbial community[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(3): 487–492. (in Chinese)
- [18] 代群威. 环境工程微生物学试验[M]. 北京: 化学工业出版社, 2010.  
DAI Qun-wei. Environmental engineering microbiology experiment[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2010. (in Chinese)
- [19] 张智良. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003.  
ZHANG Zhi-liang. Plant physiology experiment instruction[M]. Beijing: Higher Education Press, 2003. (in Chinese)
- [20] 罗泉达. C/N 比对猪粪堆肥腐熟的影响 [J]. 闽西职业技术学院学报, 2008, 10(1): 113–115.
- LUO Quan-da. Effect of initial C/N ratio on pig manure compost maturity[J]. *Journal of Minxi Vocational and Technical College*, 2008, 10(1): 113–115. (in Chinese)
- [21] 贺 琪, 李国学, 张亚宁, 等. 高温堆肥过程中的氮素损失及其变化规律[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(1): 169–173.  
HE Qi, LI Guo-xue, ZHANG Ya-ning, et al. N loss and its characteristics during high temperature composting[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(1): 169–173. (in Chinese)
- [22] 赵 秋, 张明怡, 刘 颖, 等. 猪粪堆肥过程中氮素物质转化规律研究[J]. 黑龙江农业科学, 2008(2): 58–60.  
ZHAO Qiu, ZHANG Ming-yi, LIU Ying, et al. Study on the nitrogen transforming regulation during the pig dung compost[J]. *Heilongjiang Agricultural Sciences*, 2008(2): 58–60. (in Chinese)
- [23] 赵素芬, 刘建新, 倪梅娣. 畜禽废弃物高温好氧堆肥过程中磷素的变化研究[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(2): 384–386.  
ZHAO Su-fen, LIU Jian-xin, NI Mei-di. Dynamic phosphorus contents during aerobic and mophilic composting of livestock wastes[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(2): 384–386. (in Chinese)
- [24] 敖日格乐, 王纯洁, 于俊娥, 等. 牛粪堆肥中添加抑菌剂对大肠杆菌杀灭效果的研究[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(1): 243–244.  
AORIGELE, WANG Chun-jie, YU Jun-e, et al. Sterilization effects of bacterial inhibitor on Escherichia coli in cattle manure compost[J]. *Journal of Anhui Agriculture Science*, 2009, 37(1): 243–244. (in Chinese)
- [25] Mathur S P. Determination of compost biomaturity. I. Literature review [J]. *Biological Agriculture and Horticulture*, 1993, 49(10): 65–68.
- [26] 李承强, 魏源送, 樊耀波, 等. 堆肥腐熟度的研究进展[J]. 环境科学进展, 1999, 7(6): 1–12.  
LI Cheng-qiang, WEI Yuan-song, FAN Yao-bo, et al. Advances in study of compost maturity[J]. *Advances in Environmental Science*, 1999, 7(6): 1–12. (in Chinese)
- [27] Zucchini F, Forte M, Monac A, et al. Biological evaluation of compost maturity[J]. *Biocycle*, 1981, 22(4): 27–29.
- [28] 施林林, 常志州, 沈明星, 等. 不同堆腐时间猪粪对花生产量及土壤动物群落影响[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(11): 1427–1436.  
SHI Lin-lin, CHANG Zhi-zhou, SHEN Ming-xing, et al. Effect of swine manure with different composting times on soil fauna community and peanut yield[J]. *Chinese Journal of Eco-agriculture*, 2012, 20(11): 1427–1436. (in Chinese)
- [29] Chefetz B, Hatcher P G, Hadar Y, et al. Chemical and biological characterization of organic matter during composting of municipal solid waste[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1996, 25(4): 776–785.
- [30] Gennaro M C, Ferrara E, Abollino O, et al. Multi-method analysis in studies of characterization and degradation of municipal treatment sludges[J]. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 1993, 53(2): 101–114.
- [31] Murwar H K, Kirchmann H, Swift M J. The effect of moisture on the decomposition rate of cattle manure[J]. *Plant and Soil*, 1990, 122(2): 197–199.
- [32] Huang G F, Wong J W C, Wu Q T, et al. Effect of C/N on composting of pig manure with sawdust[J]. *Waste Management*, 2004, 24(8): 805–813.
- [33] Laor Y, Avimelech Y. Fractionation of compost-derived dissolved organic matter by flocculation process[J]. *Organic Geochemistry*, 2002, 33(3): 256–263.