

不同橡胶籽油枯和锯末配比对堆肥化进程及其易氧化有机碳变化的影响

徐 智, 范茂攀, 汤 利*, 罗廷义

(云南农业大学资源与环境学院, 昆明 650201)

摘 要:以橡胶籽油枯、锯末为堆肥基本原料,在添加 10%磷石膏(重量比)条件下,按照重量配比设置 20%橡胶籽油枯+70%锯末(处理 1)、30%橡胶籽油枯+60%锯末(处理 2)、40%橡胶籽油枯+50%锯末(处理 3)3 个堆肥处理,研究堆肥过程中温度、C/N、种子发芽指数(GI)、总有机碳(Total organic carbon, TOC)、易氧化有机碳(Labile organic carbon, LOC)以及 LOC/TOC 的变化,探讨不同油枯和锯末配比对堆肥进程及其堆肥过程中活性有机碳转化的影响。结果表明:橡胶籽油枯添加量的增加有利于高温持续时间(>50℃)的延长(处理 1 为 7 d、处理 2 和处理 3 为 11 d)和堆肥过程中 C/N 的下降(堆肥结束后,处理 1、处理 2 和处理 3 的 C/N 分别为 24.7、18.6 和 16.5);增加橡胶籽油枯的添加量能够明显增加堆肥产品易氧化有机碳的绝对和相对含量,堆肥结束后,处理 1、处理 2 和处理 3 的 LOC 含量较堆肥前分别增加 15.5%、12.4%和 23.8%,LOC 含量分别达到 27.6、29.0 g·kg⁻¹ 和 33.8 g·kg⁻¹,LOC/TOC 分别达到 8.3%、10.4%和 12.7%。

关键词:橡胶籽油枯;锯末;磷石膏;堆肥;易氧化有机碳

中图分类号:S141.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2013)04-0860-06 **doi:**10.11654/jaes.2013.04.029

Effects of Different Ratios of Rubber Seed Oil Cake and Sawdust on Composting Process and Changes of Labile Organic Carbon During Composting

XU Zhi, FAN Mao-pan, TANG Li*, LUO Ting-yi

(College of Resources and Environmental Science, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China)

Abstract: The oil cake of rubber seed and sawdust were used as the basic raw materials for composting. Three treatments with different ratios of rubber seed oil cake and sawdust were set up to investigate their effect on composting process and the changes of activity organic carbon. (treatment 1: 20% rubber seed oil cake + 70% sawdust and 10% phosphogypsum, treatment 2: 30% rubber seed oil cake + 60% sawdust and 10% phosphogypsum, treatment 3: 40% rubber seed oil cake + 50% sawdust and 10% phosphogypsum, W/W). Temperature, pH, C/N ratio and germination index were tested to evaluate composting process, TOC (Total organic carbon), LOC (labile organic carbon) and LOC/TOC were studied to investigated transformation of organic carbon during composting. The results showed that: the thermophilic phase (temperature > 50℃) were obviously prolonged in the treatments with more rubber seed oil cake added (days of thermophilic phase in treatment 1, treatment 2 and treatment 3 were 7 days, 11 days and 11 days, respectively). Meanwhile, the C/N ratio was decreased along rubber seed oil cake ratio increasing (at the end of composting, C/N ratio of treatment 1, treatment 2 and treatment 3 were 24.7, 18.6 and 16.5, respectively). Adding rubber seed oil cake could significantly increased labile organic carbon absolute and relative content, after composting process, LOC contents of treatment 1, treatment 2 and treatment 3 increased by 15.5%, 12.4% and 23.8%, and reached to 27.6 g·kg⁻¹, 29.0 g·kg⁻¹ and 33.8 g·kg⁻¹, LOC/TOC ratio reached to 8.3%, 10.4% and 12.7%.

Keywords: rubber seed oil cake; sawdust; phosphogypsum; composting; labile organic carbon (LOC)

收稿日期: 2012-07-18

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划(2012BAD14B01); 公益性行业(农业)科研专项(201103004, 201103003, 200803030); 云南省高校“农业资源与环境”科技创新团队支持计划

作者简介: 徐 智(1980—), 男, 湖北公安人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事有机固体废物资源化利用方面的研究。

E-mail: xuzhicau@yahoo.com.cn

* 通信作者: 汤 利 E-mail: ltang@ynau.edu.cn

据云南省农业厅统计,到2010年云南省的橡胶面积达47.7万 hm^2 ,云南成为中国橡胶生产第一大省,每公顷可以采摘干橡胶籽1995 $\text{kg}^{[1]}$,每年有100万t左右的橡胶籽产生,在云南,橡胶籽榨油工业正在兴起,橡胶籽榨过油后有60%左右的油枯剩余。油枯养分完全,肥效持久,可以作为各类土壤和多种作物的优质肥料。但由于油枯中含有的植物养分多呈现有机态,不易吸收,且含有一定量的油脂,难以被植物吸收利用。堆肥发酵是实现油枯肥料化和无害化过程的有效方法之一^[2-4]。由于油枯的C/N相对较低,在油枯堆肥时需加入C/N较高的物料以调节C/N^[2-4]。锯末因其产量高、C/N高的特点,常被作为调节堆肥物料C/N的物料。此外,我国磷化工行业中,每年排放的磷石膏量约5000万t,占工业副产石膏的70%以上,且每年以15%的速度增长^[5],云南是磷矿大省,磷石膏的堆积与积累已成为困扰磷化工发展的难题。考虑到堆肥过程中pH值总是呈弱碱性,而适当降低堆肥物料pH值可以减少堆肥过程中氮素的损失,故在油枯和锯末堆肥过程中添加适量磷石膏同步实现磷石膏资源化利用。

施用有机肥是维持土壤生态系统平衡^[6]、培肥土壤、提高土壤肥力的主要途径之一^[7]。有机肥对土壤培肥的目的不仅是为了保持和提高土壤有机质含量,更重要的是为了改善土壤有机质的品质^[8-9]。土壤活性有机质含量可以作为评价土壤有机质或土壤质量的指标之一^[10-11]。溶解性有机质(DOM)、生物量有机质(MBOM)和易氧化有机质(LOM)是活性有机质的不同表现形式,都可在不同程度上反映有机质的有效性,指示土壤有机质或土壤质量。已经有很多关于不同来源有机物对土壤活性有机质的影响的研究报道,研究结果均表明堆肥好于秸秆直接还田^[12-14]。易氧化有机碳反映了堆肥有机质的品质,其含量高则有机质的活性强^[15]。但是,关于堆肥过程中的易氧化有机碳(活性有机碳)的转化研究鲜见报道。

本研究以橡胶籽油枯、锯末和磷石膏为基础堆肥原料,研究不同比例油枯与锯末配比对堆肥过程中活性有机碳变化的影响,以期对橡胶籽油枯肥料化利用和堆肥过程中易氧化有机碳(活性有机碳)的转化奠定理论基础。

1 材料与方法

1.1 试验材料

堆肥材料主要有橡胶籽油枯、锯末和磷石膏。橡

胶籽油枯含有机碳51.5%、全氮4.9%,C/N为10.5,含水量5.0%;锯末含有机碳52.8%、全氮0.4%,C/N为132,含水量29%;磷石膏含水量为35%,pH值约为4.3。

1.2 试验设计

根据预备试验的结果,各个处理磷石膏最大添加量可以达到10%(重量比),根据橡胶籽油枯和锯末的基本性质,基于不同C/N的原则,按照堆肥原料的重量比,试验共设3个处理,分别为处理1:橡胶籽油枯(20%)+锯末(70%)(C/N约为30);处理2:橡胶籽油枯(30%)+锯末(60%)(C/N约为25);处理3:橡胶籽油枯(40%)+锯末(50%)(C/N约为20)。将堆肥物料充分混合后堆成直径约1m、高约0.7m的锥形堆体。

堆肥试验在云南农业大学实验教学园地的温室大棚内进行。堆肥发酵时间为15d。每2d翻堆一次,翻堆时间为每日早上10:00,不覆盖。

1.3 采样时间及方法

各处理分别于试验第0、3、6、9、12、15d采样,在翻堆充分拌匀后,按5点采样法,每处理每次采集6个混合样,其中3个混合样品风干作为干样,3个混合样品作为鲜样现场保存于4℃的冰柜中。

1.4 测定方法

堆制期间每日上午10:00在上、中、下3个采样孔用水银温度计测量堆肥温度,取平均温度作为当日的堆肥温度,同时测定当日气温。水分、全氮量测定分析方法按文献[16]进行;pH值的测定采用电位法^[16];有机碳的测定采用重铬酸钾容量法-外加热法^[16];易氧化有机碳的测定参照袁可能的方法^[17]进行。

种子发芽指数(GI)测定:取5g鲜样加入50mL蒸馏水,振荡1h,吸取5mL滤液,加到铺有2张滤纸的9cm培养皿中,每个培养皿播20粒黄瓜种子,30℃下培养48h,测定发芽率和根长,计算种子发芽指数(GI)值。

1.5 数据分析

采用Excel软件和SPSS 11.5统计软件进行数据处理及分析。

2 结果与分析

2.1 堆肥过程中温度的变化

由图1可知,在本试验中3个处理均在堆肥发酵1d后进入高温阶段(>50℃)。高温过程中,处理2和处理3持续50℃以上11d,处理1持续50℃以上7d;处理1、处理2和处理3的最高温度分别是59、60

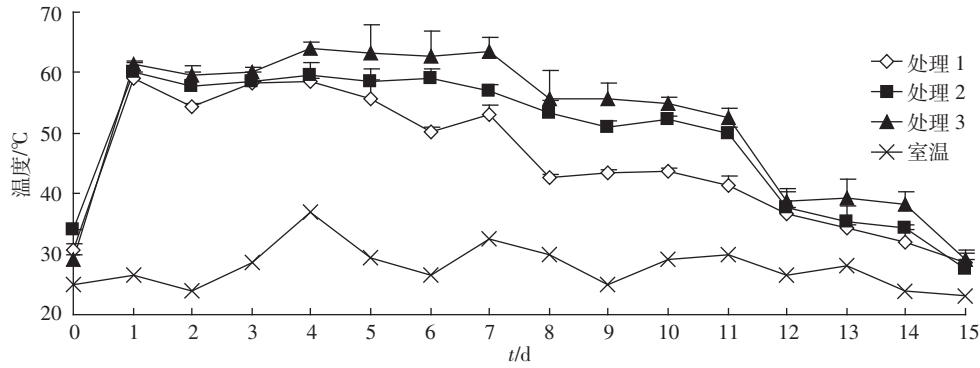


图1 不同处理堆肥过程中温度的变化

Figure 1 Changes of temperature during composting

℃和 61.5 ℃,处理 1 较处理 2 和处理 3 降温更快。

2.2 堆肥过程中 pH 的变化

由图 2 可知,堆肥过程中 pH 值随着堆肥进程而出现下降-上升-下降(处理 1 为上升-下降两个阶段)的变化趋势。3 个处理的 pH 均在 12 d 时到达最大值,而后均呈现下降趋势。试验结束时处理 1、处理 2 和处理 3 的 pH 值分别由起始的 5.85、5.70 和 5.73 上升为 6.15、6.07 和 6.63,其中处理 3 的 pH 值显著高于处理 1 和处理 2 ($P<0.05$),处理 1 和处理 2 之间没有显著差异 ($P>0.05$)。

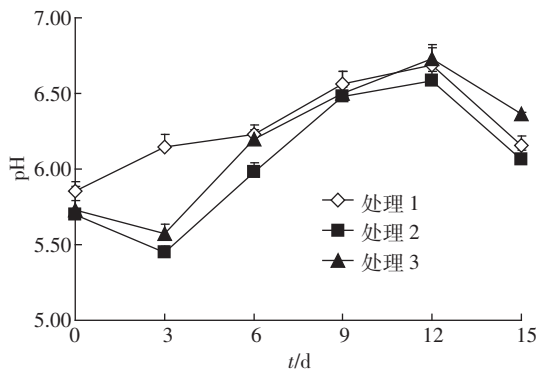


图2 不同处理堆肥过程中 pH 值的变化

Figure 2 Changes of pH during composting

2.3 堆肥过程中 C/N 和 GI 值的变化

不同油枯和锯末配比堆肥过程中 C/N 变化特征如图 3-a 所示。处理 1、处理 2 和处理 3 的 C/N 分别从初始的 31.9、23.7 和 19.1 下降到结束后的 24.7、18.6 和 16.5。堆肥结束后,处理 1 的 C/N 显著大于处理 2 和处理 3 ($P<0.05$),处理 2 和处理 3 没有显著差异 ($P>0.05$)。

堆肥过程中 GI 值变化如图 3-b 所示。堆肥进行 3 d 以后,各个处理的 GI 值都呈上升趋势,到堆肥结

束时(15 d)3 个处理堆肥的 GI 值分别是 58%、72.7% 和 82.7%,各处理间存在显著差异 ($P<0.05$)。

2.4 堆肥过程中总有机碳(Total organic carbon, TOC)和易氧化有机碳(Labile organic carbon, LOC)的变化

各处理全碳呈现下降趋势(图 4-a)。堆肥结束后,处理 2 和处理 3 的 TOC 显著低于处理 1 ($P<0.05$),处理 2 和处理 3 没有显著差异 ($P>0.05$)。

各处理易氧化有机碳(LOC)整体呈上升趋势(图 4-b)。处理 1、处理 2 和处理 3 易氧化有机碳(LOC)

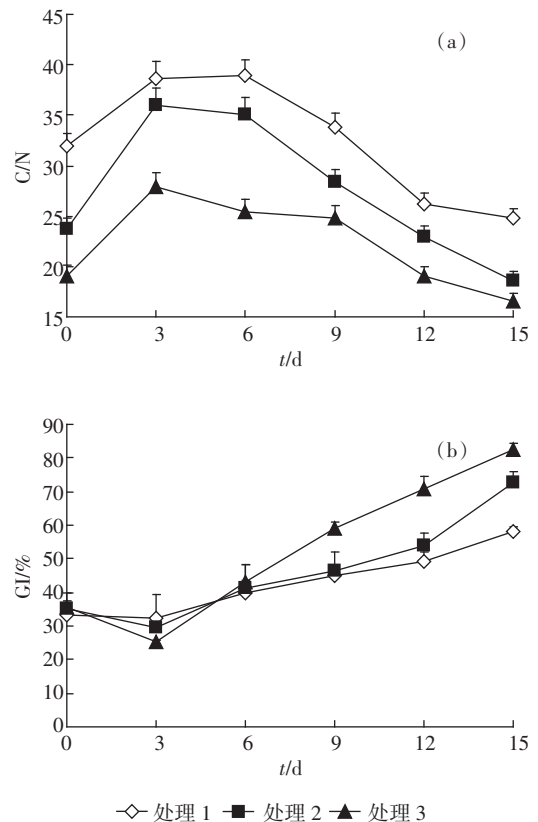


图3 不同处理堆肥过程中 C/N 和 GI 值的变化

Figure 3 Changes of C/N ratio and GI during composting

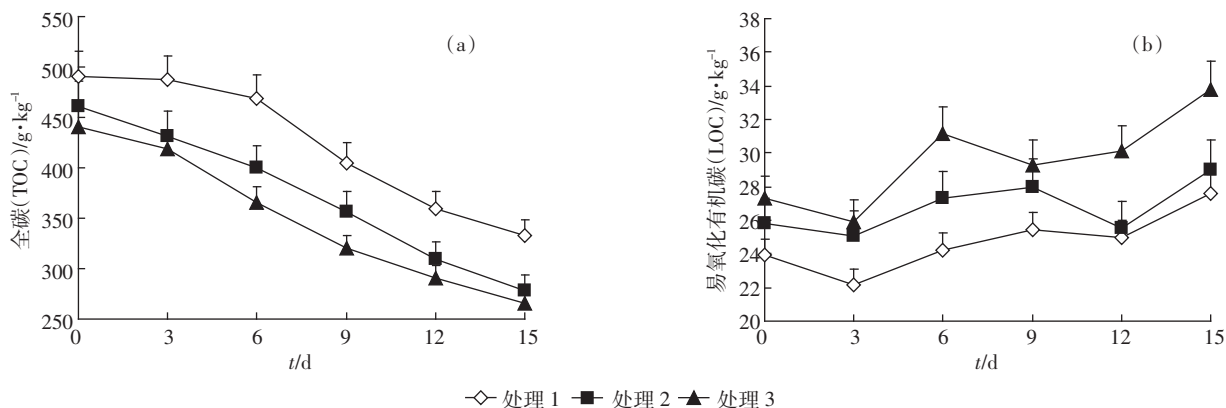


图 4 不同处理堆肥过程中全碳(TOC)和易氧化有机碳(LOC)的变化

Figure 4 Changes of total organic carbon (TOC) and labile organic carbon (LOC) during composting

分别从初始的 23.9、25.8 g·kg⁻¹ 和 27.3 g·kg⁻¹ 上升到结束后的 27.6、29.0 g·kg⁻¹ 和 33.8 g·kg⁻¹, 上升幅度分别达到 15.5%、12.4% 和 23.8%。在堆肥结束时, 处理 3 的易氧化有机碳(LOC)含量显著高于处理 2 和处理 1 ($P<0.05$), 而处理 1 和处理 2 间没有显著差异 ($P>0.05$)。

2.5 堆肥过程中全碳/易氧化有机碳(LOC/TOC)比值的变化

堆肥过程中易氧化有机碳(LOC)与总有机碳(TOC)之比呈上升趋势(图 5)。处理 1、处理 2 和处理 3 经过 15 d 堆肥过程以后, 较堆肥前 LOC/TOC 分别增加 70.3%、86.5% 和 104.6%; 堆肥结束以后处理 3 显著大于处理 2 和处理 1 ($P<0.05$), 处理 2 显著大于处理 1 ($P<0.05$)。处理 1、处理 2 和处理 3 LOC/TOC 分别达到 8.3%、10.4% 和 12.7%。

3 讨论

3.1 不同油枯和锯末配比对堆肥化进程的影响

本研究以堆肥过程中温度、pH 值、C/N 和 GI 值

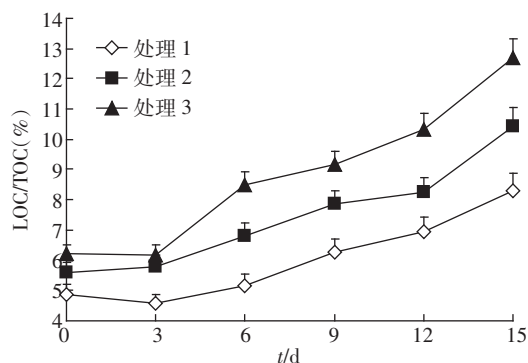


图 5 不同处理堆肥过程中 LOC/TOC 比值的变化

Figure 5 Changes of LOC/TOC ratio during composting

的变化来描述堆肥化的进程。堆肥温度的变化反映了堆体内微生物活性的变化, 堆体温度升高是微生物代谢产热累积的结果, 反过来又决定了微生物的代谢活性^[18], 进而影响堆肥化的进程。3 个处理维持高温($>50^{\circ}\text{C}$)的时间都超过了 7 d, 均符合卫生无害化要求, 添加橡胶籽油枯有利于高温持续时间($>50^{\circ}\text{C}$)的增加。堆肥启动阶段, 微生物活动产生的大量有机酸会引起堆肥前期 pH 值的降低^[19], pH 值的升高则是由于有机质在微生物的强烈作用下分解产生大量 NH_3 引起^[20], 而堆肥后期 pH 值的下降可能是由于 NH_4^+-N 向 NO_3^--N 转化, 减少铵根离子的数量造成的^[21]。因此, 本研究处理 2 和处理 3 的 pH 值随着堆肥进程而出现下降-上升-下降的趋势, 处理 1 的 pH 值在堆肥 12 d 以前一直呈上升趋势, 可能和堆肥物料添加的橡胶籽油枯量较少有一定关系。又因为堆肥的初始物料中添加了 10% 的磷石膏, 初始堆肥物料的 pH 值较低(5.7~5.8 之间), 致使堆肥结束后 pH 值升幅较小(6.1~6.4 之间), 但经过堆肥发酵后 pH 值也符合农业部 NY-525-2012 标准的要求。本研究表明, 堆肥结束后处理 1、处理 2 和处理 3 的 C/N 分别为 24.7、18.6 和 16.5; GI 值分别达到 58%、72.7% 和 82.7%。通常以 C/N 降到 (15~20):1^[22] 时认为堆肥达到腐熟; 当种子 GI 值达到 50% 以上可以认为堆肥基本没有植物毒性, 当 GI $>80\%$, 堆肥已消除植物毒性。因此可以证明, 在橡胶籽油枯和锯末联合堆肥体系中, 适当增加橡胶籽油枯的比例, 降低初始 C/N, 可以增加持续高温($>50^{\circ}\text{C}$)的时间, 有利于堆肥过程中 C/N 的下降和 GI 的增加, 加快堆肥化进程。

3.2 不同油枯和锯末配比对堆肥过程中活性有机碳变化的影响

活性有机碳(质)是在土壤中有效性较高、易被土

壤微生物分解矿化、对植物养分供应有最直接作用的那部分有机碳(质)^[23]。其中溶解性有机碳(质)、生物量有机碳(质)和易氧化有机碳(质)是活性有机质的不同表现形式^[24],都可在不同程度上反映有机质的有效性,指示土壤有机质或土壤质量。随着堆肥产业的发展,堆肥产品正成为土壤有机碳(质)的最直接和最重要的来源。本研究表明,随着堆肥过程的进行,各个处理易氧化有机碳(LOC)整体呈现上升趋势,经过15 d堆肥过程,LOC/TOC分别较堆肥前增加70.3%、86.5%和104.6%;而高伟等^[25]利用猪粪堆肥试验结果表明,在整个堆肥的42 d里,易氧化有机碳呈“降低-升高-降低”的波动过程,总体呈下降趋势。研究结果不一致的原因,可能还是和堆肥的时间相关,理论上讲,堆肥过程实际上是堆肥物料有机物分解的过程,所有的有机物,包括易分解的有机质(活性有机质)可能被微生物作为能源而最终消失^[22]。本研究还表明,在橡胶籽油枯和锯末联合堆肥体系中,油枯/锯末的比值越大,LOC在堆肥结束后的含量越多,LOC/TOC的比值越大。说明增加堆肥过程中易降解有机物的比例,可能会对增加堆肥产品活性有机碳(质)的含量有帮助,而堆肥化的目的之一正是获得良好质量的有机质。因此,堆肥过程中总有机碳(质)和活性有机碳(质)之间可能存在某种平衡关系,活性有机碳(质)的含量可以作为土壤有机碳(质)质量的评判指标,而易氧化有机碳也可以反映堆肥有机质的品质^[15],但其反映的程度和标准还需要做进一步的研究。

4 结论

(1)在橡胶籽油枯和锯末联合堆肥体系中,添加20%、30%和40%的橡胶籽油枯,都能满足堆肥无害化要求,添加橡胶籽油枯可以加快堆肥的腐熟进程。

(2)在橡胶籽油枯和锯末联合堆肥体系中,增加堆肥过程中易降解有机物橡胶籽油枯的比例,有利于LOC/TOC的比值增加,有利于堆肥物料向易氧化有机碳(质)转化,提高堆肥产品有机质的品质。添加20%、30%和40%的橡胶籽油枯的处理,堆肥结束后易氧化有机碳(LOC)较堆肥前分别增加了15.5%、12.4%和23.8%,LOC/TOC比值分别增加70.3%、86.5%和104.6%。

参考文献:

[1] 陈茜文. 橡胶籽的化学成分与综合利用探讨[J]. 中南林学院学报, 1999, 19(4): 58-60.

CHEN Qian-wen. Preliminary research on the chemical compositions of *Hevea brasiliensis* and its comprehensive utilizations[J]. *Journal of Central South Forestry University*, 1999, 19(4): 58-60.

[2] 谢春琼, 郭建芳, 李成学, 等. 添加微生物菌剂对油枯堆肥理化性状的影响[J]. 中国农学通报, 2011, 27(9): 201-205.

XIE Chun-qiong, GUO Jian-fang, LI Cheng-xue, et al. The effects of microbial strains on the physical and chemical properties of canola meal compost[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, 27(9): 201-205.

[3] 李成学, 郭建芳, 何忠俊, 等. 微生物菌剂对油枯堆肥过程中理化性质的影响研究[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(2): 389-394.

LI Cheng-xue, GUO Jian-fang, HE Zhong-jun, et al. Microbial strains affect the physical and chemical properties when composting canola meal[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(2): 389-394.

[4] 邓文祥, 海梅荣, 蒋春和, 等. 不同比例玫瑰废弃物与小桐子油枯对高温堆肥过程中氮素变化的影响[J]. 云南农业大学学报, 2010, 25(3): 414-419.

DENG Wen-xiang, HAI Mei-rong, JIANG Chun-he, et al. Effects of different ratios of rose residue and *Jatropha Curcas* oil cake on dynamic changes of nitrogen during high-temperature composting[J]. *Journal of Yunnan Agricultural University*, 2010, 25(3): 414-419.

[5] 杨沛浩. 磷石膏的综合利用[J]. 中国资源综合利用, 2009, 27(1): 13-15.

YANG Pei-hao. Comprehensive utilization of phosphogypsum[J]. *China Resources Comprehensive Utilization*, 2009, 27(1): 13-15.

[6] 赵其国. 土壤圈物质循环研究与土壤学的发展[J]. 土壤, 1991, 23(1): 1-3.

ZHAO Qi-guo. Material recycling in pedosphere and development trend of soil science[J]. *Soils*, 1991, 23(1): 1-3.

[7] 杨兴明, 徐阳春, 黄启为, 等. 有机(类)肥料与农业可持续发展和生态环境保护[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 925-932.

YANG Xing-ming, XU Yang-chun, HUANG Qi-wei, et al. Organic-like fertilizers and its relation to sustainable development of agriculture and protection of eco-environment[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(5): 925-932.

[8] 彭新华, 张斌, 赵其国. 土壤有机碳库与土壤结构稳定性关系的研究进展[J]. 土壤学报, 2004, 41(4): 618-623.

PENG Xin-hua, ZHANG Bin, ZHAO Qi-guo. A review on relationship between soil organic carbon pools and soil structure stability[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(4): 618-623.

[9] 申进文, 沈阿林, 张玉亭, 等. 平菇栽培废料等有机肥对土壤活性有机质和土壤酶活性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(4): 631-636.

SHEN Jin-wen, SHEN A-lin, ZHANG Yu-ting, et al. Effects of different organic fertilizers on soil labile organic matter and enzyme activity[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2007, 13(4): 631-636.

[10] Blair G J, Lefroy R D B, Lisle L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation and the development of a carbon management index for agricultural systems[J]. *Australian Journal of Agricultural Research*, 1995, 46(7): 1459-1466.

[11] Janzen H H, Campbell C A, Brandt S A, et al. Light-fraction organic

- matter in soils from long-term crop rotations[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, 56:1799-1806.
- [12] Manna M C, Swarup A, Wanjari R H, et al. Long-term effect of fertilizer and manure application on soil organic carbon storage, soil quality and yield sustainability under sub-humid and semi-arid tropical India [J]. *Field Crops Research*, 2005, 93:264-280.
- [13] 杨景成, 韩兴国, 黄建辉, 等. 土壤有机质对农田管理措施的动态响应[J]. *生态学报*, 2003, 23(4):787-796.
- YANG Jing-cheng, HAN Xing-guo, HUANG Jian-hui, et al. The dynamics of soil organic matter in cropland responding to agricultural practices[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(4):787-796.
- [14] 梁尧, 韩晓增, 宋春, 等. 不同有机物料还田对东北黑土活性有机碳的影响[J]. *中国农业科学*, 2011, 44(17):3565-3574.
- LIANG Yao, HAN Xiao-zeng, SONG Chun, et al. Impacts of returning organic materials on soil labile organic carbon fractions redistribution of mollisol in Northeast China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(17):3565-3574.
- [15] 鲍艳宇, 周启星, 姜翼来, 等. 奶牛粪好氧堆肥过程中不同含碳有机物的变化特征以及腐熟评价[J]. *生态学杂志*, 2010, 29(11):2111-2116.
- BAO Yan-yu, ZHOU Qi-xing, LOU Yi-lai, et al. Change patterns of different carbon containing compounds in dairy manure during its aerobic composting and assessment of composting maturity[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2010, 29(11):2111-2116.
- [16] 南京农业大学. 土壤农化分析[M]. 第三版. 北京:中国农业出版社, 1999.
- Nanjing Agricultural University. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. 3rd Ed. Beijing: China Agriculture Press, 1999.
- [17] 袁可能. 土壤有机矿质复合体中腐殖质氧化稳定性的初步研究[J]. *土壤学报*, 1963, 3:286-293.
- YUAN Ke-neng. Studies on the humus oxidation stability of organic mineral complex in the soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1963, 3:286-293.
- [18] Macgregor S T, Miller F C, Psarianos K M, et al. Composting process control based on interaction between microbial heat output and temperature[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1981, 41(6):1321-1330.
- [19] Mathur S P. Composting process//Martin A M ed. Bio-conversion of Waste Materials to Industrial Products. New York:Elsevier. 1991, 147-186.
- [20] Bishop P L, Godfrey C. Nitrogen transformations during sludge composting[J]. *Biocycle*, 1983, 24:34-39.
- [21] Eklind Y, Kirchmann H. Composting and storage of organic household waste with different litter amendments: II. Nitrogen turnover and losses [J]. *Bioresour Technol*, 2000, 74(2):125-133.
- [22] Garcia C, Hernaandez T, Costa F, et al. Evaluation of the maturity of municipal waste compost using simple chemical parameters[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 1992, 23(13-14):1501-1512.
- [23] Whitbread A M, Lefroy R D B, Blair G J. A survey of the impact of cropping on soil physical and chemical properties in north-western New South Wales[J]. *Australian Journal of Soil Research*, 1998, 36(4):669-682.
- [24] 吴小丹, 蔡立湘, 鲁艳红, 等. 土壤活性有机质的研究现状与展望[J]. *湖南农业科学*, 2009(3):39-42.
- WU Xiao-dan, CAI Li-xiang, LU Yan-hong, et al. Situation and prospect of research on active soil organic matter[J]. *Hunan Agricultural Science*, 2009(3):39-42.
- [25] 高伟, 郑国砥, 高定, 等. 堆肥处理过程中猪粪有机物的动态变化特征[J]. *环境科学*, 2006, 27(5):986-990.
- GAO Wei, ZHENG Guo-di, GAO Ding, et al. Transformation of organic matter during thermophilic composting of pig manure[J]. *Environmental Science*, 2006, 27(5):986-990.