

通风量对粪渣与树叶共堆肥的影响

孙晓杰, 王洪涛*, 陆文静

(清华大学环境科学与工程系, 北京 100084)

摘要: 为实现园林废物的无害化与资源化并获得合适的通风量, 以粪渣与树叶为原料, 采用 0.08、0.14 和 0.20 m³/(min·m³) 3 个通风量进行了静态好氧堆肥, 分析了不同通风量对堆肥过程中的堆体温度、二氧化碳浓度、发芽指数、肥效指标氮磷钾以及重金属质量分数等指标的影响。结果表明: 在粪渣与树叶含水率分别为 80% 和 8% 左右, 粪渣与树叶质量比例为 3/1, 通风量为 0.078、0.14 和 0.20 m³/(min·m³) 时, 均可以实现高温好氧堆肥。通风量为 0.14 m³/(min·m³) 时堆肥效果较佳。所得堆肥产品肥效指标和重金属质量分数均符合国家相应标准。

关键词: 堆肥, 通风, 温度, 粪渣, 树叶

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2009.09.044

中图分类号: X705

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2009)-9-0249-05

孙晓杰, 王洪涛, 陆文静. 通风量对粪渣与树叶共堆肥的影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(9): 249-253.

Sun Xiaojie, Wang Hongtao, Lu Wenjing. Effect of ventilation rate on co-composting of night soil and leaf[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(9): 249-253. (in Chinese with English abstract)

0 引言

随着中国城市园林绿化工作的推进, 园林废物的产量也随之增加。园林废物主要指城市园林、公园及绿化带产生的枯枝落叶、树木及草地修剪物、湿地收割的水生植物等。园林废物的组分丰富, 具有很大的循环利用价值。但是目前中国的园林废物基本上没有进行资源化循环利用, 而直接进行填埋处置。

北京奥林匹克森林公园, 投入运营后公园粪渣年产生量约为 2 055 t (含水率 80%), 树叶年产量可达 900 t。如果直接填埋, 不但是一种资源浪费, 而且增加环境污染。如果利用奥森公园绿色废物处理中心的树叶、树枝、芦苇等绿化废物作为骨料与粪渣进行共堆肥, 则既可解决园内废物的污染问题, 实现粪渣“零”排放, 又可部分解决公园肥料来源问题, 同时可减少市政绿化的化肥施用量, 从环保的角度倡导了“绿色奥运”、“科技奥运”的理念。

通风量是影响堆肥效果的重要因素。通风量的大小与堆体内微生物的活动、有机物的分解速度密切相关, 因而堆肥必须有一个相对适合的通风量。通风量过大, 堆体难以维持高温。通风量过小, 堆体内供氧不足, 容易出现厌氧现象, 导致堆体升温缓慢, 产生恶臭气体^[1]。在维持合适的温度条件下, 加大通风量可以增加水分的

去除。已有多名学者对通风量进行了研究^[2-6], 但由于堆肥材料及装置的不同而得出不同的结论。本试验采用静态好氧堆肥装置, 对不同通风量条件下的粪渣与树叶共堆肥进行了试验研究, 以期对堆肥工艺条件的优化、为城市园林如奥林匹克森林公园内的固体废物资源化提供技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验装置

试验装置采用直径为 0.4 m, 高度为 1.0 m, 容积为 100 L 的静态好氧床, 如图 1 所示。

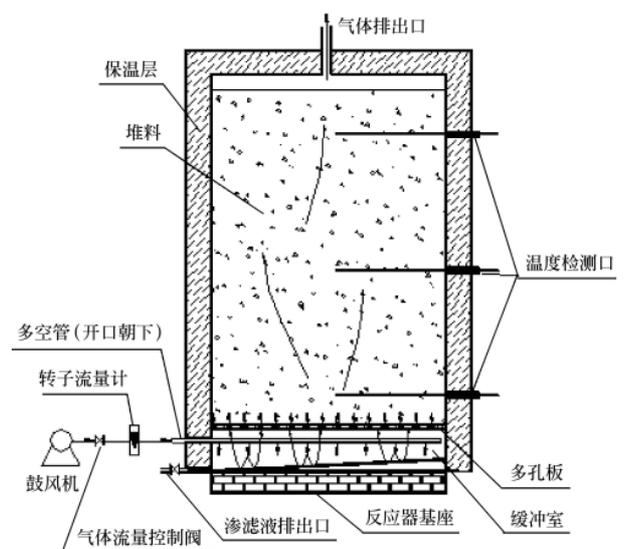


图 1 试验装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of composting system in the experiment

1.2 试验材料

试验所用粪渣取自北京市北护城河粪便消纳站, 树

收稿日期: 2008-12-28 修订日期: 2009-06-01

基金项目: 国家科技支撑计划课题科技奥运专项 (2007BAK1211); 美铝基金: Alcoa Foundation's Conservation and Sustainability Fellowship Program

作者简介: 孙晓杰 (1974-), 男, 山东莱阳人, 助理研究员, 工学博士,

主要从事固体废物处理处置与资源化研究。北京 清华大学环境科学与工程系, 100084。Email: sunxj@mail.tsinghua.edu.cn

通信作者: 王洪涛 (1960-), 男, 辽宁本溪人, 教授/博导。研究方向:

固体废物/危险废物填埋处置技术, 堆肥化技术和生物处理技术。北京 清华大学环境科学与工程系, 100084。Email: htwang@mail.tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2008-12-28 修订日期: 2009-06-01

基金项目: 国家科技支撑计划课题科技奥运专项 (2007BAK1211); 美铝基金: Alcoa Foundation's Conservation and Sustainability Fellowship Program

作者简介: 孙晓杰 (1974-), 男, 山东莱阳人, 助理研究员, 工学博士,

主要从事固体废物处理处置与资源化研究。北京 清华大学环境科学与工程系, 100084。Email: sunxj@mail.tsinghua.edu.cn

通信作者: 王洪涛 (1960-), 男, 辽宁本溪人, 教授/博导。研究方向:

固体废物/危险废物填埋处置技术, 堆肥化技术和生物处理技术。北京 清华大学环境科学与工程系, 100084。Email: htwang@mail.tsinghua.edu.cn

叶取自清华大学校园。其基本性质如表 1 所示。

表 1 粪渣与树叶的基本性质

Table 1 Physical and chemical properties of night soil and leaf

指标名称	含水率	C	N	H	P	K
粪渣	80	5.2±0.24	4.60±0.03	6.75±0.08	0.54	0.34
树叶	8	38.6±0.34	1.29±0.05	4.92±0.11	0.42	1.01

1.3 堆肥工艺运行参数

试验过程中 3 个堆肥装置同时运行, 根据试验材料的基本性质, 按照堆料的含水率控制要求, 确定了粪渣与树叶的配比为 3/1 (质量比)。堆肥过程为两阶段发酵, 一次发酵 18 d, 采用静态好氧床, 间歇式通风, 工作 30 min 停 15 min; 二次发酵 14 d, 采用堆垛式, 隔天翻堆 1 次。试验中采用的堆料组成和运行参数如表 2 所示。

表 2 堆料组成与工艺运行参数

Table 2 Components of the composting materials used and processing parameters

工况	粪渣/kg	树叶/kg	湿基比	干基比	初始含水率/%	强制通风/ $\text{m}^3 \cdot (\text{min} \cdot \text{m}^3)^{-1}$
1号						0.08
2号	15	5	3/1	6/9	62	0.14
3号						0.20

1.4 试验方法

3 个堆体的温度采用热电偶温度传感器测量, 测温点位于堆体垂直方向中心, 每天测温 3 次, 取平均值。通气量采用 LZB-10 转子流量计测定; 甲烷和二氧化碳浓度采用 GHX-3010D 型甲烷和二氧化碳测定仪测定; 碳、氮和氢采用 CE440 型元素分析仪测定; 重金属、总磷和总钾, 消解后采用 IRIS intrepid 型全谱等离子发射光谱仪测定。

考虑到堆肥的利用应该是晾晒后进行, 故采用堆肥的风干样进行种子发芽实验。将堆肥干样样品与去离子水按 1:10 (W:V) 比例混合振荡 2 h, 浸提液在 5 000 r/min 下离心分离 20 min, 上清液经滤纸过滤后待用。将一张滤纸置于干净无菌的 9 cm 培养皿中, 在滤纸上均匀摆放 20 粒大白菜种子, 吸取 5 mL 浸提液的滤液于培养皿中, 在 25℃ 暗箱中培养 48 h, 计算发芽率并测定根长, 然后计算种子的发芽指数。每个样品做 3 个重复, 并同时用去离子水作空白对照^[7]。发芽指数 (germination index) 由下式计算

$$\text{发芽指数} = \frac{\text{样品发芽数} \times \text{样品根长度}}{\text{对照发芽数} \times \text{对照根长度}} \times 100\%$$

2 结果与分析

2.1 堆肥过程中堆体温度随时间的变化

堆肥过程中堆体温度随时间的变化如图 2 所示, 在环境温度为 15~25℃ 的条件下, 一次堆肥开始后, 3 个堆体温度均迅速上升。其变化特性如图 2 所示。一般认为, 最高堆温需达到 50~55℃ 以上并持续 5~7 d (或 55℃ 以上维持 3 d), 才能达到杀灭致病菌要求^[8]。根据表 3,

3 个通风量条件下, 基本上达到要求。通风量为 $0.14 \text{ m}^3/(\text{min} \cdot \text{m}^3)$ 的 2 号堆体堆温既满足最高堆温达到 50~55℃ 以上持续 5~7 d 的要求, 又满足 55℃ 以上维持 3 d 的要求, 因而堆肥效果较佳。

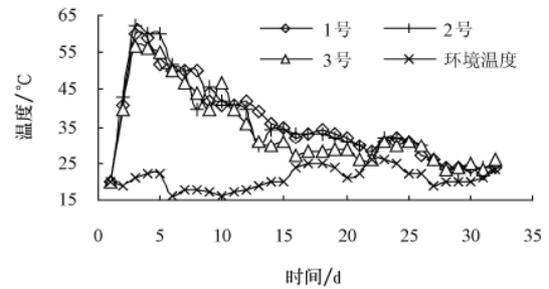


图 2 堆肥过程中温度随时间的变化

Fig.2 Changes of temperature vs time during composting

表 3 堆肥过程中温度变化特性

Table 3 Temperature features during composting

工况	到达 55℃ 的时间/d	维持 55℃ 以上的时间/d	维持 50℃ 以上的时间/d	最高温度/℃
1号	3	2	6	60
2号	3	3	5	62
3号	3	3	4	57

高温期过后, 堆体温度逐渐降低, 至第 16 天, 1、2 和 3 号堆体温度分别降至 32℃、33℃ 和 27℃。在第 17 天将堆肥物料从静态好氧床取出, 在瓷砖硬化的地面上进行二次堆肥。随着试验的进行, 堆料逐渐稳定, 至第 32 天, 1、2 和 3 号堆体温度分别降至 24℃、24℃ 和 26℃, 接近环境温度 23℃。

2.2 堆肥过程中二氧化碳浓度随时间的变化

从图 3 中可以看出, 3 个堆体的二氧化碳浓度均是先上升后下降, 这主要是因为堆肥初期, 堆料中易降解有机物含量高, 因而微生物活性强, 会产生大量的二氧化碳, 因而二氧化碳浓度会增加; 随着堆肥的进行, 微生物可利用堆料中的易降解有机物含量降低, 微生物活性下降, 二氧化碳浓度降低。另外, 2 号反应器二氧化碳浓度一直比较高, 表明该堆体好氧反应显著, 1、3 号反应器好氧速率要低一些。因而, 就排气中的二氧化碳浓度而言, 通风量为 $0.14 \text{ m}^3/(\text{min} \cdot \text{m}^3)$ 的 2 号堆体要优于 1、3 号。

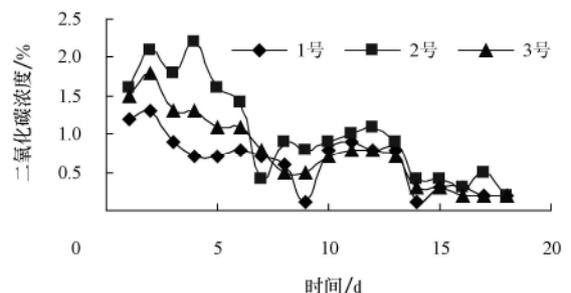


图 3 堆肥过程中二氧化碳随时间的变化

Fig.3 Changes of carbon dioxide vs time

2.3 种子发芽指数

用生物的方法测定堆肥的毒性，是检验有机质腐熟度的最精确和最有效的方法。种子发芽试验是测定堆肥植物毒性一种直接而又快速的方法。不但可检测堆肥样品中的残留植物毒性，而且能预计毒性的发展^[9]。堆肥腐熟后的粪渣和树叶可用做绿化和栽培苗木花卉的肥料。这就要求其不应花草苗木等植物产生毒性，即不应影响种子的正常发芽和生长。因此，本试验进行了白菜种子发芽试验，试验结果见图 4。

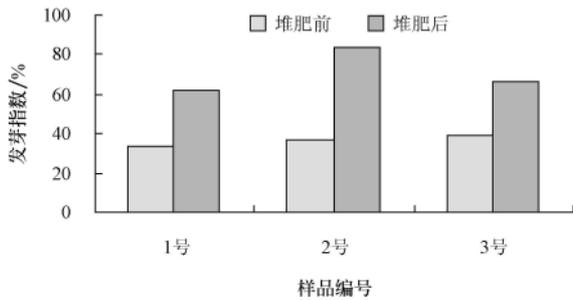


图 4 堆肥前后种子发芽指数的变化

Fig.4 Changes of germination index before and after composting

从图 4 中可以看出，堆肥前 1、2 和 3 号堆料的发芽指数分别为 33.4%、37.5% 和 39.2%，堆肥后发芽指数有了明显提高，分别为 61.6%、83.5% 和 66.8%，基本符合有关堆肥腐熟标准，发芽指数大于 50%^[10-11]。因而，就发芽指数而言，2 号优于 1 号和 3 号。

根据堆温、排气中二氧化碳浓度以及种子发芽指数的试验结果，粪渣与树叶湿基比为 3/1，通风量为 0.08、0.14 和 0.2 m³/(min·m³) 时，均可以实现高温好氧堆肥。通风量为 0.14 m³/(min·m³) 时堆肥效果较佳。以北京奥林匹克森林公园为例，按照粪渣与树叶湿基比 3/1 堆肥，奥林匹克公园内 2 055 t 粪渣需要 685 t 树叶，因而，粪渣可实现零排放，同时可以处理掉大部分的树叶。

2.4 堆肥前后碳、氮、磷、钾和氢的变化

堆肥后，1、2 和 3 号堆体的总碳质量分数有所下降（表 4），分别从开始的 40.30%、39.00% 和 41.82% 下降到结束时的 32.96%、33.36% 和 34.72%。这是由于粪渣和树叶中有机质的降解生成二氧化碳造成的。堆肥结束时，1、2 和 3 号堆体的总氮含量有所上升（表 4），分别从开始的 2.58%、2.55% 和 2.63% 上升至结束时的 2.93%、3.2% 和 3.04%。因此堆肥的碳氮比分别由堆肥开始时的 15.62/1、15.6/1 和 15.9/1 下降到 11.2/1、10.4/1 和 11.4/1（图 5）。通常认为，腐熟堆肥的 C/N 趋向于微生物菌体的 C/N，即 16 左右（15—20）^[12]。但本试验中，堆料的初始 C/N 即在低于 20，因而不适合用 C/N 作为腐熟度指标。有人^[13]提出了一个新指标 $T = \text{终点}(C/N) / \text{初始}(C/N)$ ，即堆肥结束时的 C/N 与开始时的 C/N 的比值，认为堆肥达到腐熟时， T 应小于 0.6。试验中，1、2 和 3 号堆体的 T 值分别为 0.72、0.67 和 0.71，接近 $T = 0.6$ ，根据种子发芽指数的结果，可以认为 T 小于 0.7 时，即可认为堆肥基本腐熟。

表 4 堆肥前后碳、氮、氢、磷和钾质量分数的变化

Table 4 Changes of content of C, N, H, P and K before and after composting %

堆体	堆肥前后	C	N	H	P	K
1 号	前	40.30±0.15	2.58±0.12	4.42±0.32	0.69	0.93
	后	32.96±0.34	2.93±0.05	3.91±0.27	0.71	1.21
2 号	前	39.00±0.26	2.55±0.06	4.44±0.21	0.62	0.95
	后	33.36±0.43	3.20±0.04	3.33±0.17	0.95	1.15
3 号	前	41.82±0.19	2.63±0.08	4.60±0.15	0.46	1.04
	后	34.72±0.48	3.04±0.10	3.68±0.36	0.82	1.55

堆肥后，1、2 和 3 号堆体的氢体积分数有所下降（表 4），分别从开始的 4.42%、4.44% 和 4.60% 下降到结束时的 3.91%、3.33% 和 3.68%。

堆肥前后的氮、磷和钾的变化如表 4 所示，氮、磷和钾的变化范围分别为 2.5%~3.5%、0.5%~1.0% 和 0.9%~1.6%，氮和磷符合相应的控制标准，钾在堆肥前不达标，堆肥后符合相应标准^[14]。

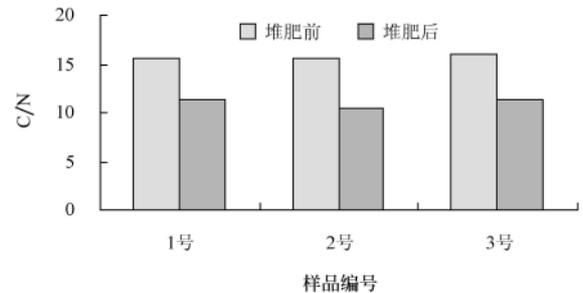


图 5 堆肥前后碳氮比的变化

Fig.5 Changes of C/N before and after composting

2.5 堆肥前后重金属的变化

重金属是具有重要威胁的污染物，因而堆肥的重金属质量分数的高低是其能否利用的重要评价指标。如表 5 所示，试验中，用于堆肥的粪渣和树叶的重金属质量分数均未超标。经过堆肥处理后，重金属质量分数较堆肥前有所增加（表 6），这主要是因为堆肥过程堆料有机物降解导致的。但重金属质量分数并未超标^[14-15]。

表 5 堆肥原料的重金属质量分数

Table 5 Content of heavy metals in composting materials mg·kg⁻¹

	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
粪渣	52	0.8	8.0	70.8	17.2	未检出	389.2
树叶	51.2	0.8	25.2	22.8	13.6	未检出	248.4

表 6 堆肥前后重金属的质量分数

Table 6 Content of heavy metals before and after composting mg·kg⁻¹

堆体	堆肥前后	Cd	As	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
1 号	前	40.0	1.6	27.2	41.6	18.4	未检出	200.0
	后	43.2	2.0	37.2	58.8	23.6	1.6	392.4
2 号	前	58.4	1.5	28.0	46.0	20.0	未检出	222.0
	后	62.4	2.0	37.2	70.8	24.8	4.0	408.0
3 号	前	41.6	1.6	29.6	28.0	18.8	未检出	188.0
	后	57.6	2.0	39.4	53.2	25.6	9.2	384.0

2.6 pH 值变化

pH 值是揭示堆肥分解过程的一个很好的标志。适宜的 pH 值可使微生物发挥其应有的作用, 过高或过低的 pH 值会对堆肥速率产生影响^[1]。

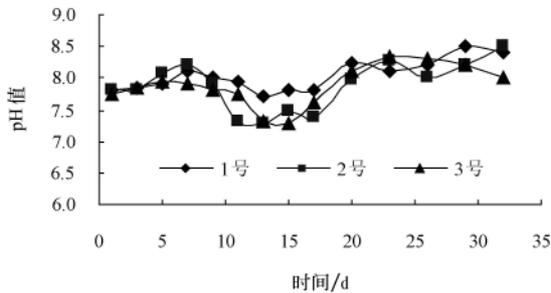


图6 堆肥过程中 pH 值随时间的变化

Fig.6 Changes of pH value vs time during composting

本试验中使用的粪渣与树叶的 pH 值分别为 7.51 和 6.55, 美国环境署规定, 污泥与调理剂的 pH 值应在 6~9^[16]。一般认为, pH 值在 7.5~8.5 时, 可获得最大的堆肥速率。图 6 表明, 堆体的 pH 值处于波动状态, 但总体保持在 7.0~8.5 之间, 因而不需要调整堆体的 pH 值。

3 结论

根据堆温、排气中二氧化碳浓度以及种子发芽指数的检测结果, 粪渣与树叶湿基比为 3/1 时, 通风量为 0.08、0.14 和 0.2 $\text{m}^3/(\text{min} \cdot \text{m}^3)$ 时, 均可以实现高温好氧堆肥。通风量为 0.14 $\text{m}^3/(\text{min} \cdot \text{m}^3)$ 时堆肥效果较佳。

可以使用 $T = \text{终点}(C/N) / \text{初始}(C/N)$ 做为堆肥腐熟度指标, 当 T 在 0.7 以下时即可认为堆肥腐熟。

堆肥的氮、磷变化范围分别为 2.5%~3.5%、0.5%~1.0%, 堆肥后的钾大于 1.0% 左右, 符合相应的控制标准; 重金属质量分数未超标。

粪渣与树叶湿基比为 3/1 时, 堆肥过程中 pH 值保持在 7.0~8.5 之间, 因而不需要调整堆体的 pH 值。

[参 考 文 献]

[1] 柴晓利, 张华, 赵由才. 固体废物堆肥原理与技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
 [2] Rasapoor M, Nasrabadi T, Kamali M, et al. The effects of aeration rate on generated compost quality, using aerated static pile method[J]. Waste Management, 2009, 29: 570-573.
 [3] Li Xiujin, Zhang Ruihong, Pang Yunzhi. Characteristics of dairy manure composting with rice straw[J]. Bioresource Technology, 2008, 99: 359-367.
 [4] 倪媯娣, 陈志银, 程绍明. 不同通风量下猪粪好氧堆肥中

氧气浓度的变化[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2005, 31(5): 603-607.

Ni Meidi, Chen Zhiyin, Cheng Shaoming; et al. Variation of oxygen concentration in pig-manure composting piles under different aeration flowrates[J]. Journal of Zhejiang University(Agric.& Life Sci.), 2005, 31(5): 603-607. (in Chinese with English abstract)
 [5] 张相锋, 王洪涛, 聂永丰. 通风量对蔬菜和花卉废弃物混合堆肥的影响[J]. 农业工程学报, 2005, 21(10): 134-137. Zhang Xiangfeng, Wang Hongtao, Nie Yongfeng. Effect of ventilation rate on vegetable waste and flower straw co-composting[J]. Transactions of The Chinese Society of Agricultural Engineering, 2005, 21(10): 134-137. (in Chinese with English abstract)
 [6] 孟潇, 韩涛, 任连海. 通风量对餐厨垃圾好氧堆肥的影响[J]. 北京工商大学学报: 自然科学版, 2008, 26(3): 4-7. Meng Xiao, Han Tao, Ren Lianhai, et al. Effect of ventilation volume on restaurant garbage aerobic composting[J]. Journal of Beijing Technology and Business University: Natural Science Edition, 2008, 26(3): 4-7. (in Chinese with English abstract)
 [7] 李承强, 魏源送, 樊耀波, 等. 不同填充料污泥好氧堆肥的性质变化及腐熟度[J]. 环境科学, 2001, 22(3): 60-65. Li Chengqiang, Wei Yuansong, Fan Yaobo, et al. The character changes and maturity of sewage sludge aerobic co-composting with various bulking agents[J]. Chin J Environ Sci, 2001, 22(3): 60-65. (in Chinese with English abstract)
 [8] GB7959-87. 粪便无害化卫生标准[S]. 北京: 中华人民共和国卫生部, 1987.
 [9] 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.
 [10] Zucconi F, Pera A, Forte M, et al. Evaluating toxicity of immature compost[J]. Biocycle, 1981a, 22: 54-57.
 [11] Zucconi F, Forte M, Monaco A, et al. Biological Evaluation of compost maturity[J]. Biocycle, 1981b, 22: 27-29.
 [12] 陈世和, 张所明. 城市垃圾堆肥原理与工艺[M]. 上海: 复旦大学出版社, 1990.
 [13] Morel T L, Colin F, Germon J C, et al. Methods for the evaluation of the maturity of municipal refuse compost[A]. Gasser JK R. Composting of agriculture and other wastes[M]. London & New York: Elsevier Applied Science Publish, 1985: 56-72.
 [14] GB8172-87. 城镇垃圾农用控制标准[S]. 北京: 国家环境保护局, 1987.
 [15] GB4284-84. 农用污泥中污染物控制标准[S]. 北京: 中华人民共和国城乡建设环境保护部, 1984.
 [16] Design Manual Number 44: Composting of municipal wastewater sludge[Z]. WWBLDM44, USEPA 625/4-85/014, August 1985.

Effect of ventilation rate on co-composting of night soil and leaf

Sun Xiaojie, Wang Hongtao^{*}, Lu Wenjing

(Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Aerobic static co-composting of night soil and leaf under different ventilation rates of 0.08, 0.14 and 0.2 m³/(min·m³) was studied in pilot scale for obtaining the best ventilation rate. The indexes such as temperature, CO₂ concentration, germination index, fertilizer efficiency such as nitrogen, phosphorus and potassium and contents of heavy metals were analyzed to examine the feasibility of co-composting of night soil and leaf. Results show that: when the wet basis ratio of night soil and leaf was 3/1, night soil and green waste (leaf) can realize co-composting under different ventilation rates of 0.08, 0.14 and 0.20 m³/(min·m³). And the optimal ventilation rate was 0.14 m³/(min·m³). The fertilizer efficiency and content of heavy metals of co-composting products accord with the national standard.

Key words: composting, ventilation, temperature, night soil, leaf