

混合堆肥过程中挥发性固体含量的层次效应及动态变化

罗维, 陈同斌*, 高定, 郑国砥

(中国科学院地理科学与资源研究所环境修复室, 北京 100101)

摘要:城市污泥与猪粪混合堆肥表明:升温期和高温期堆体上部有机物降解的差异较大,降温期堆体下部各层有机物降解的差异较大,且堆体内挥发性固体(VS)含量已形成明显的层次效应,腐熟期堆体中部有机物降解的差异较大,堆体内 VS 含量的层次效应仍很明显;不同堆肥期堆体内 VS 含量的差异由大到小分别为:降温期 > 腐熟期 > 高温期 > 升温期,不同部位有机物降解程度由大到小为:上部 > 中部 > 下部;VS 含量随时间的变化满足一级反应动力学方程,城市污泥和猪粪混合堆肥过程中 VS 的降解速率约为 $0.3 \text{ kg} \cdot \text{d}^{-1}$, VS 含量降低了 8.2%.

关键词:混合堆肥;城市污泥;猪粪;挥发性固体;有机物降解

中图分类号:X705;X713 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2004)03-0155-05

Stratification of Volatile Solid Content and Its Dynamics in the Process of Composting

LUO Wei, CHEN Tong-bin, GAO Ding, ZHENG Guo-di

(Laboratory of Environmental Remediation, Institute of Geographic Science and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract:Co-composting of sewage sludge and pig manure was conducted and it was indicated that, at the stages of temperature starting and high temperature composting, the difference of organic decomposition in the upper portion was largest among three portions of composting pile. The difference was largest in the lower part of the pile and the stratification effect of volatile solid (VS) content was formed at the stage of cooling, while it was largest in the middle and the stratification effect was still remarkable at the stage of maturity. At different stages of composting, the difference of VS content in the pile was of the order: the cooling > the maturity > the high temperature > the temperature starting. At each stage of composting, the difference of organic decomposition in the pile was as follows: the upper > the middle > the lower. The change of VS content met with first-order kinetics equation and decomposition rate of VS was $0.3 \text{ kg} \cdot \text{d}^{-1}$ while average loss of VS content was 8.2% in the whole process of composting.

Key words:co-composting;sewage sludge;pig manure;volatile solid content;organic decomposition

目前我国城市污泥年排放量(湿重)约为 380 ~ 550 万 $\text{t}^{[1]}$, 畜禽粪便年产量达 5.8 亿 $\text{t}^{[2]}$. 这些有机固体废物极易污染环境, 危害人类健康, 对其进行治理已势在必行. 混合堆肥是有机固体废物处理处置的有效方法, 强制通风静态堆肥是目前较常采用的堆肥工艺.

国内外的研究表明, 强制通风静态堆肥过程中堆体内温度、氧气、湿度具有层次效应^[3~6], 且堆体内生物挥发固体(BVS)具有空间梯度^[7]. 有机物的燃烧挥发部分通常称为挥发性固体(VS), 包括 BVS 和 NBVS(非生物挥发固体, 即生物难降解部分). 由于堆肥过程中 NBVS 变化很小, 因而, VS 含量的变化可反映堆肥有机物降解程度的变化^[8].

尽管有研究曾报道过堆肥过程中有机物降解程度的差异^[9], 但是少有人研究不同堆肥期堆体内 VS 含量的变化规律及其动态特征. 本研究开展了

中试规模强制通风静态堆肥混合堆肥试验, 采集和测定不同堆肥期堆体剖面上大量 VS 含量的变化数据, 并对其进行了统计分析. 研究目的在于探索静态堆肥强制通风混合堆肥的不同堆肥期堆体内有机物的降解规律, 为改进堆肥工艺, 提高产品质量提供科学依据.

1 材料和方法

1.1 试验材料、设备和方法

试验材料和方法见文献^[10], 试验设备如图 1.

1.2 采样和分析方法

收稿日期:2003-10-29;修订日期:2003-12-10

基金项目:国家高技术研究发展计划项目(2001 AA645010);科技部农业科技成果转化资金项目;北京市重点农业科技推广示范项目;中科博联环保高新技术有限责任公司提供资助

作者简介:罗维(1972~),男,四川金堂人,博士研究生,主要从事废弃物处理处置与资源化研究.

* 通讯联系人: E-mail: chentb@igs.nrr.ac.cn.

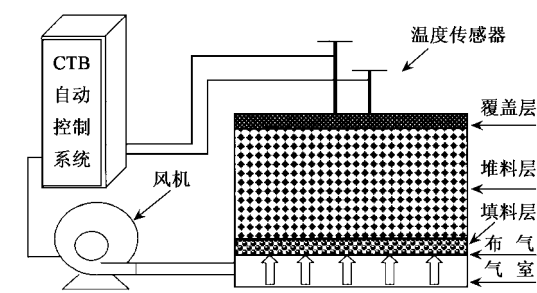


图 1 城市污泥、猪粪混合堆肥试验装置示意图

Fig.1 Device of co-composting of sewage sludge and pig manure

堆肥 3d 后,停止 1 号堆肥仓的堆肥处理.以仓门为基线,在宽度的中点(0.75 m)处沿鼓风方向纵向挖开 1 个剖面.剥去覆盖层,由剖面的上部向下均匀、平行地划分 9 个堆料层,每个堆料层深度为 10 cm;在每个堆料层的底线上均匀地确定 5 个采样点,每个点取 10 ~ 20 g 左右的堆肥样(见图 2).立刻将样品放入烘箱,以 105 ℃烘至恒重,然后放入马弗炉内以 550 ℃灼烧 6 h.样品在马弗炉灼烧前后的质量差(挥发性固体)占灼烧前脱水样品(总固体)的百分比就是该样品的 VS 含量.堆肥 10 d、22 d、32 d 分别停止 2、3、4 号堆肥仓的堆肥处理,按照与 1 号仓相同的采样和测定方法对 2、3、4 号仓进行采样和测定.

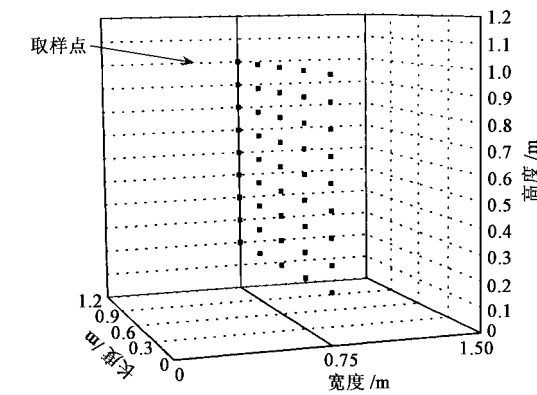


图 2 堆体剖面采样布点

Fig.2 Sample distribution on 3 profiles of a pile

2 结果与讨论

根据堆肥过程中的温度变化,可将堆肥过程划分为 4 个阶段:升温期 I (0 ~ 4d)、高温降解期 II (4 ~ 16d)、降温期 III(16 ~ 30d)、腐熟期 IV(30d 以后)^[10].

2.1 堆肥过程中 VS 的含量

由表 1 看出,堆肥 VS 含量由堆肥前的 57.6 %

降低到腐熟期的 49.4 %,VS 含量降低了 8.2 %.从总体而言,堆肥过程中 VS 含量的变化呈逐步降低趋势.由不同堆肥期 VS 含量的变异系数表明,不同堆肥期 VS 含量的变异系数由大到小分别为降温期 > 腐熟期 > 高温期 > 升温期.

表 1 不同堆肥期堆体内 VS 的含量¹⁾

Table 1 Volatile solid content during composting

堆肥期	均值/ %	最大/ %	最小/ %	变异系数/ %
堆肥前 (0d)	57.6	63.3	55.5	0.02
升温期 (3d)	56.8	61.5	47.4	0.05
高温期 (10d)	54.0	58.8	46.6	0.07
降温期 (20d)	51.5	56.4	41.2	0.09
腐熟期 (32d)	49.4	55.8	37.6	0.08

1) 每个堆肥期的样本数为 45 个

2.2 升温期堆体剖面上 VS 含量的层次变化

升温期也是堆肥快速起爆期,该时期堆体剖面上 VS 含量的变化如图 3.由图 3 表明,堆体上部(0 ~ 30 cm) VS 含量在 54.9 % ~ 58.1 % 之间,波动较大.堆体中部(30 ~ 60 cm) VS 含量由 58.1 % 轻微下降到 56.9 %.堆体下部(60 ~ 90 cm) VS 含量在 56.3 % ~ 56.9 % 之间,波动较小.经统计检验发现,堆体上部 20 cm 的 VS 含量与其他各层 VS 含量的差异显著($p < 0.05$),其他各层的 VS 含量差异不显著.堆体上、中、下部 VS 含量的差异不显著.由此表明,升温期堆体上部有机物降解差异较大,其他各层有机物降解差异不明显,堆体内 VS 含量没有产生很明显的层次效应.

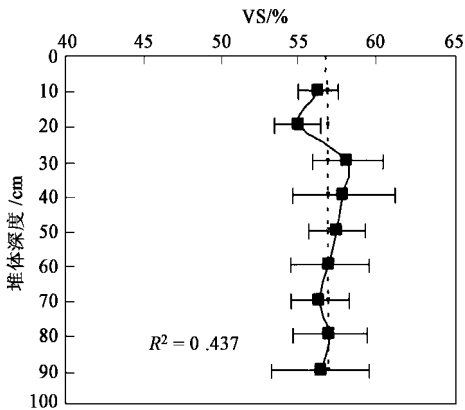


图 3 升温期堆体 VS 含量的变化

Fig.3 The change of volatile solid content in pile at the stage of temperature starting

2.3 高温期堆体剖面上 VS 含量的层次变化

图 4 是高温期堆体剖面上 VS 含量的变化.图 4 表明,堆体上部 VS 含量在 47.5 % ~ 48.3 % 之间呈

增加趋势,中部 VS 含量在 50.5 %~53 %之间波动.堆体下部的 VS 含量相对较为稳定.经统计检验发现,堆体上部 10cm 与 30cm 的 VS 含量具有显著性差异($p < 0.05$),其他各层堆肥的 VS 含量没有显著性差异;堆体上、中、下部 VS 含量的差异不显著.因此,高温期堆体上部各层的有机物的降解差异较大,堆体内 VS 含量没有明显的层次效应,但从总体趋势来看,此时堆体内的 VS 含量开始出现“上低下高”的趋势.

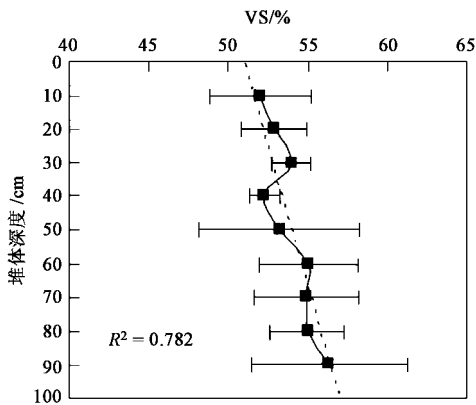


图 4 高温期堆体 VS 含量的变化

Fig. 4 The change of volatile solid content in pile at the stage of high temperature composting

2.4 降温期堆体剖面上 VS 含量的层次变化

降温期堆体 VS 含量的变化如图 5.图 5 表明,10~60cm 堆料层的 VS 含量在 47.5 %~54 %之间,且呈递增趋势,70cm 堆料层的 VS 含量下降到 53 %,但 70~90cm 堆料层的 VS 含量又迅速增大到 56 %.经统计检验表明,70~80cm 与 90cm 的 VS 含量具有显著差异($p < 0.05$),堆体上、中、下部的 VS

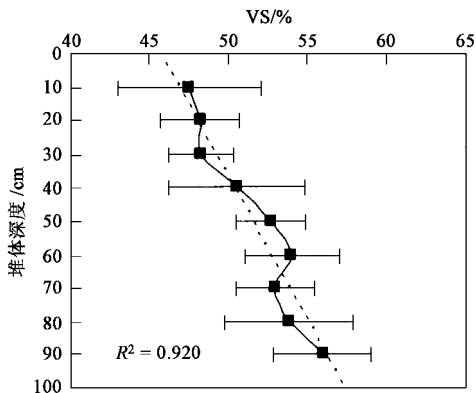


图 5 降温期堆体 VS 含量的变化

Fig. 5 The change of volatile solid content in pile at the stage of cooling

含量亦具有显著差异($p < 0.01$).由堆体各层 VS 的变化表明,降温期堆体下部各层有机物降解差异较大,堆体内 VS 含量已形成明显的层次效应.

2.5 腐熟期堆体剖面上 VS 含量的层次变化

腐熟期堆体剖面上 VS 含量的变化如图 6.由图 6 表明,虽然 10~30cm 堆料层的 VS 含量下降很小,但是对整个堆料层而言,其 VS 含量相对较低;30~90cm 堆料层的 VS 含量由 46.0 %增大到 55.9 %,形成较好的逐级增加的梯度效应.经统计学检验发现,堆体中部 50cm 与 60cm 的 VS 含量具有显著差异($p < 0.05$),堆体上、中、下部的 VS 含量仍具有显著差异($p < 0.05$).与降温期堆体上、中、下 VS 含量差异的显著性($p < 0.01$)相比,腐熟期堆体上、中、下 VS 含量差异的显著性($p < 0.05$)有所降低.由堆体各层 VS 的变化表明,腐熟期堆体中部有机物降解差异较大,堆体内 VS 含量的层次效应仍很明显,但有减弱的趋势.

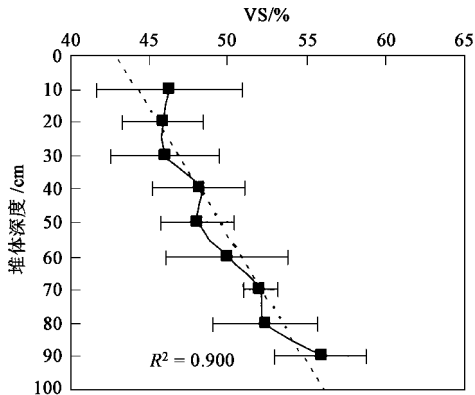


图 6 腐熟期堆体 VS 含量的变化

Fig. 6 Change of volatile solid content in pile at the stage of maturity

2.6 不同堆肥期堆体剖面上 VS 与深度的线性拟合及 VS 的变化

为弄清不同堆肥期堆体中 VS 含量与深度的关系,对不同堆肥期堆体中 VS 含量与深度的关系进行了线性拟合,其函数关系式为:

$$Y = KX + C \tag{1}$$

式中, Y 为 VS 含量(%), X 为堆料层的深度(cm), K 为拟合直线的斜率, C 为拟合直线与 X 轴的截距.各堆肥期线性拟合结果如表 2.由表 2 说明,高温期、降温期和腐熟期 VS 含量与深度的线性拟合效果相对较好,而升温期的拟合效果相对较差.

方程(1)中斜率 K 可理解为 VS 含量随深度的变化程度; K 值增大,则从剖面上部到下部单位深

度的 VS 含量增大.由各拟合直线的斜率 K 表明,由升温期到降温期,拟合直线的 K 值由 0.003 增大到 0.120;其中升温期到高温期 K 值增加最大,而降温期到后熟期 K 值基本保持不变.综上所述,不同堆肥期剖面上下 VS 含量的差异由大到小分别为:降温期 > 腐熟期 > 高温期 > 升温期,亦即:不同堆肥期堆体中不同层次的有机物腐熟程度并不一致.

表 2 不同堆肥期堆体中 VS 含量与堆体深度的线性拟合结果
Table 2 Results of linear modeling of volatile solid content changing with depth of the pile at different stages of composting

堆肥期	K	C	R^2
升温期	0.003	56.6	0.437
高温期	0.047	51.6	0.782($p < 0.01$)
降温期	0.120	46.2	0.920($p < 0.01$)
腐熟期	0.110	43.4	0.900($p < 0.01$)

不同堆肥期堆体中的 VS 含量随时间的变化如图 7.由图 7 表明,不同堆肥期堆体不同部位的 VS 含量均表现为:上部 > 中部 > 下部,亦即堆体内有机物降解程度由大到小皆为:上部 > 中部 > 下部.

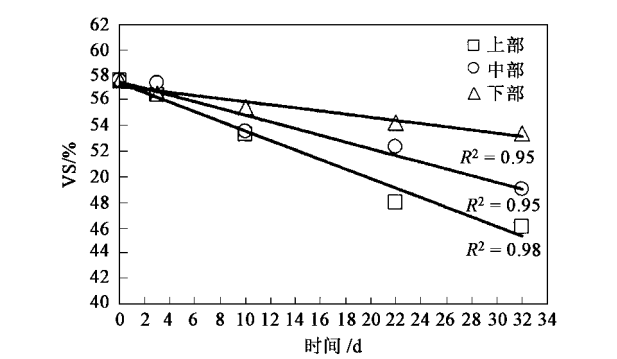


图 7 不同堆肥期堆体 VS 含量的变化
Fig.7 Dynamics of volatile solid at the different stage of composting and its modeling

假设堆肥过程中 VS 含量随时间的变化满足一级反应动力学方程:

$$VS = \lambda t + VS_0 \quad (2)$$

式中,VS 为堆肥 t 天后 VS 的含量(%); λ 为 VS 的降解速率(%/ d); t 为堆肥时间(d); VS_0 为初始 VS 的含量(%).用方程(2)对不同堆肥期堆体上、中、下部的 VS 含量随时间的变化关系进行模拟,其模拟结果如表 3.

由表 3 说明,堆肥过程中 VS 含量随时间的变化满足一级反应动力学方程,这与 Hamoda 等人得到堆肥过程中有机物降解符合一级反应动力学模型

的结论相一致^[11].已知 $VS_0 = 57.6\%$,由 VS 含量的平均值和堆肥时间的关系,可得到堆体中 VS 的降解速率 K 的大小为 0.256(%/ d),所以堆肥过程 VS 的降解动力学方程为:

$$VS = - 0.256 t + 57.6 \quad (3)$$

根据已知堆体体积、污泥和猪粪的初始容重、初始含水率、初始 VS 含量以及污泥和猪粪的混合比,可将 VS 的百分含量换算成质量,计算出其降解速率约为 $0.3 \text{ kg} \cdot \text{d}^{-1}$.

表 3 VS 的一级反应动力学模拟结果
Table 3 Results of modeling of volatile solid content with one-order kinetics

堆体位置	λ	VS_0	R^2
堆体上部(10 ~ 30cm)	- 0.376	57	0.98($p < 0.01$)
堆体中部(30 ~ 60cm)	- 0.263	57	0.95($p < 0.01$)
堆体下部(60 ~ 90cm)	- 0.122	57	0.95($p < 0.01$)

3 讨论

以上试验表明,升温期到降温期堆体内 VS 含量的差异不断增大,但腐熟期 VS 含量基本保持不变,因而,为避免堆肥过程中堆肥腐熟程度的不一致,可延长腐熟期使堆体上下腐熟一致,从而提高堆肥产品的质量,但是这种方法会延长堆肥周期,增加堆肥的占地面积和成本.如果需要缩短堆肥周期,并得到腐熟度一致的堆肥产品,可在高温期后对堆体进行翻堆处理或者采取其他避免堆体不同部位有机物降解差异的措施,例如变单一方向通风为双向通风,改进堆肥仓的气密性、保温性以及散热性能^[6],以保证堆体各层堆料的腐熟度尽量一致.

一般认为,堆肥过程中 VS 含量的损失在 17 % ~ 53 % 之间^[12].本堆肥试验过程中 VS 含量损失为 8.2 %,低于该范围.很多研究者认为,城市污泥或者畜禽粪便堆肥过程中 VS 的变化在很大程度上受调理剂的影响^[13~15].如果使用生物难降解的调理剂,堆肥过程中 VS 含量的损失将小于 10 %;由本试验表明,使用生物难降解的 CTB 专用堆肥调理剂可能是 VS 含量损失较低的原因之一.另外,VS 含量的变化还受堆肥物料类型的影响,一般而言,城市固体废弃物堆肥过程中 VS 含量的变化较大,而城市污泥或畜禽粪便堆肥过程中 VS 含量的变化较小^[16,17].因此,当使用难生物降解的调理剂进行城市污泥或猪粪堆肥时,为提高堆肥效率,可适当加入城市固体废物,以便减少生物难降解调理剂的用量.

由于堆肥过程中湿度和容重的层次效应^[10]是导致堆体内 VS 含量形成层次效应的重要原因,因

此,为减少堆肥过程中堆体上下有机物腐熟度的差异,提高堆肥效率和堆肥产品的质量,可在高温期后调节堆体的湿度和容重。

4 结论

升温期和高温期堆体上部有机物降解的差异较大,其他各层有机物降解差异不明显,堆体内 VS 含量未形成层次效应;降温期堆体下部各层有机物降解的差异较大,堆体内的 VS 已形成层次效应;腐熟期堆体中部有机物降解的差异较大,堆体内 VS 的层次效应仍很明显。

不同堆肥期堆体内 VS 的差异由大到小分别为:降温期 $\geq$ 腐熟期 $>$ 高温期 $>$ 升温期,不同堆肥期堆体不同部位有机物降解程度由大到小皆为:上部 $>$ 中部 $>$ 下部。

堆肥过程中 VS 随时间的变化满足一级反应动力学方程,城市污泥和猪粪混合堆肥过程中 VS 的降解速率约为 $0.3 \text{ kg} \cdot \text{d}^{-1}$, VS 的损失为 8.2%。

参考文献:

- [1] 曹秀芹,陈珺.污水处理厂污泥处理存在问题分析[J].北京建筑工程学院学报,2002,18(1):1~4.
- [2] 白群安,王志跃.畜禽排泄物与环境保护[J].国外畜牧科技,2001,28(6):29~31.
- [3] Tiquia S M, Tam N F Y. Co-composting of spent pig litter and sludge with forced aeration[J]. Bioresource Technology, 2000, 72:1~7.
- [4] 陈同斌,黄启飞,高定,等.城市污泥堆肥温度动态变化过程及层次效应[J].生态学报,2002,22(5):736~741.
- [5] 郑玉琪,陈同斌,高定,等.猪粪快速好氧堆肥过程中氧气浓度的变化[J].生态学报,2002,22(5):747~751.
- [6] 罗维,陈同斌,高定,等.城市污泥与猪粪混合堆肥过程中的湿度空间变异[J].环境科学学报,2004,24(1):126~133.
- [7] Walker L P, Nock T D, Gossett J M, VanderGheynst J S. The role of periodic agitation and water addition in managing moisture limitations during high-solids aerobic decomposition[J]. Process Biochemistry, 1999, 34: 601~612.
- [8] Naylor L M. Composting[J]. Environmental Science and Pollution Series, 1996, 18(69):193~269.
- [9] Eitzer B D, et al. Emissions of volatile organic chemicals from municipal solid waste composting facilities[J]. Environmental Science and Technology, 1995, 29: 896~902.
- [10] 罗维,陈同斌,高定,等.城市污泥、猪粪混合堆肥过程中湿度的层次效应及其动态变化[J].环境科学,2004,25(2):140~144.
- [11] Hamoda M F. Evaluation of municipal solid waste composting kinetics[J]. Resources, Conservation, and Recycling, 1998, 23: 209~223.
- [12] Wiley J S, Asce A M, Pearce G W. A preliminary study of high-rate composting[J]. American Society of Civil Engineering Transactions, 1955, 1009~1034.
- [13] Witter E and Lopez Real J M. Monitoring the composting process using parameters of composting stability[A]. In: Compost: Production, Quality and Use[C]. London, United Kingdom: Elsevier Applied Science, 1987.
- [14] Liao P H, Vizcarra A T, Chen A, Lo K V. Composting salmon farm mortalities with passive aeration[J]. Compost Science and Utilization, 1996, 2(4): 58~66.
- [15] Lynch N J, Cherry R S. Winter composting using the passively aerated windrow system[J]. Compost Science & Utilization, 1996, 4(3): 44~52.
- [16] Brown K H, Bouwkamp J C, Couin F R. The influence of C:P ratio on the biological degradation of municipal solid waste[J]. Compost Science & Utilization, 1998, 6(1): 53~58.
- [17] Canet R, Pomares F. Changes in physical, chemical and physico-chemical parameters during the composting of municipal solid wastes in two plants in Valencia[J]. Bioresource Technology, 1995, 51: 259~264.