

混合堆肥过程中容重的层次效应及动态变化

陈同斌, 罗维, 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、猪粪混合堆肥表明:升温期和高温期堆体容重分别为 $0.82\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 和 $0.66\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$, 堆体内的氧气仍能满足微生物生长所需;降温期容重为 $0.58\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$, 通气较充分;腐熟期容重为 $0.54\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$, 通风充分. 升温期和高温期仓门附近堆料的容重具有层次效应, 降温期大部分堆料的容重具有层次效应, 腐熟期堆体容重的层次效应减弱. 升温期堆体中轴线附近、高温期仓内壁附近、降温期整个堆体、腐熟期仓门和中轴线附近, 堆体深度对容重具有显著影响. 升温期和腐熟期, 仓门对容重产生显著影响. 各堆肥期堆体的容重随深度的增加而呈增大的趋势, 容重与堆肥时间满足二级动力学方程.

关键词:容重;透气性;混合堆肥;城市污泥;猪粪

中图分类号:X705;X713 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2004)05-0143-05

Stratification of Bulk Density and Its Dynamics in the Process of Co-Composting

CHEN Tong-bin, LUO Wei, GAO Ding, ZHEN 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 studied. At the stages of temperature starting and high temperature, the bulk density were $0.82\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ and $0.66\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$, respectively, but oxygen in the pile at each stage was enough for the microorganism to live on. At the stage of cooling, the bulk density was $0.58\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$, which made aeration better. The bulk density was $0.54\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ at the stage of maturing when aeration is best. The stratified effect of bulk density occurred, near the door of the pile at the stages of starting and high temperature, almost all parts of the pile at the stage of cooling, however, it weakened at the stage of the maturing. The depth had remarkable influence upon the bulk density of compost, by the axis of the pile at the stage of the starting, near the inner wall at the stage of high temperature, for the whole pile at the stage of cooling, and near the door and axis at the stage of maturing. The door had significant effect on the bulk density for both stages of starting and maturing. The bulk density increased with the depth of the pile at every stage of composting. Dynamics of bulk density met with two-order kinetic equation.

Key words: bulk density; aeration; co-composting; sewage sludge; pig manure

堆肥处理是有机废物处理处置的主要方法, 强制通风静态垛堆肥是目前较常采用的堆肥工艺. 20 世纪 50 年代便已对混合堆肥(co-composting)进行过初步研究, 但一直缺乏系统性和深入性^[1]. 由于混合堆肥具有可综合处理利用不同废弃物、减少调理剂用量、提高堆肥产品质量、降低堆肥成本等特点, 目前该法又重新引起人们的重视.

容重是堆肥过程中一项重要的物理参数, 但目前堆肥研究中并未对其引起足够的重视. 容重可间接反映堆料的孔隙度、空气/氧气穿过堆料的难易程度, 是影响鼓风效果的关键因子. 容重不仅影响堆肥过程, 而且影响堆肥产品的质量. 了解混合堆肥过程中的容重变化, 对于堆肥的鼓风、散热、蒸发、除臭等过程尤为重要.

测定容重的方法比较麻烦而费时, 且由于样品间干扰、压实作用以及不均匀性等因素造成容重测定值的较大误差和不确定性, 因此很难准确测定堆肥过程中堆体内不同部位的容重变化. 目前国内外

对堆肥过程中容重变化的研究相对较少^[2].

本研究测定了强制通风静态垛堆肥过程中容重的剖面分布及其动态变化, 为改进堆肥工艺设计、提高堆肥效率和堆肥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[5], 试验设备如图 1.

1.2 采样和分析方法

堆肥 3 d 后停止 1 号堆肥仓的堆肥处理, 以仓门为基线, 沿着宽度方向于 0.375 m (靠近仓门)、0.75 m (堆体的中线) 和 1.125 m 处 (靠近堆肥仓内壁) 纵向挖开 3 个剖面 (分别标记为 A、B、C). 以每

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; 中科院联环保高新技术有限责任公司提供资助

作者简介: 陈同斌 (1963-), 男, 广西人, 研究员, 主要从事植物修复、废弃物处理处置与资源化技术、土壤环境保护研究.

个剖面中心为采样面的中心,布设面积为 $1.2\text{ m} \times 0.8\text{ m}$ 的采样面.将采样区域横向 4 等分,纵向 8 等分(图 2).在每个等分点处用环刀法测定其(湿)容重^[3].堆肥 10d、20d、32d 后分别停止 2 号、3 号和 4 号堆肥池的堆肥处理,以与 1 号仓相同的采样方法进行剖面测定.

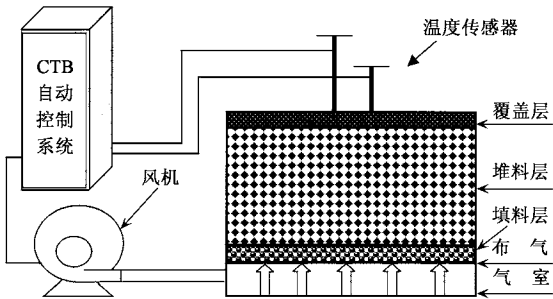


图 1 城市污泥和猪粪混合堆肥试验装置

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

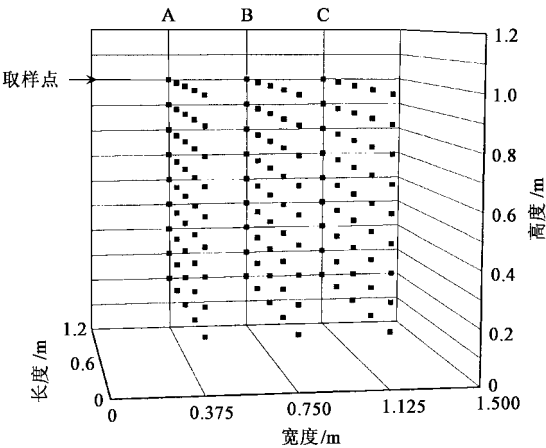


图 2 堆体剖面采样布点

Fig.2 Sample distribution on 3 profiles of a pile

2 试验结果与讨论

根据堆肥过程中的温度变化^[5],将堆肥过程划分为 4 个阶段:升温期 I (0 ~ 4d)、高温期 II (4 ~ 16d)、降温期 III (16 ~ 30d)和腐熟期 IV (30d 以后).

2.1 堆肥过程中的容重值

表 1 为不同堆肥期堆体容重值.表 1 说明,堆肥前堆体的平均容重为 $0.9\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,到腐熟期平均容重变为了 $0.54\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$.在堆肥过程中堆体平均容重不断降低,其中,升温期和高温期容重的降低幅度较大,降温期之后容重降低幅度减弱.不同堆肥期容重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 不同堆肥期堆体的容重¹⁾/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$

Table 1 Statistical value of bulk density for the compost in the pile during composting/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$

堆肥期	平均值	最大值	最小值	变异系数
堆肥前(0d)	0.90	0.95	0.86	0.03
升温期(3d)	0.82	0.93	0.75	0.07
高温期(10d)	0.66	0.78	0.52	0.12
降温期(20d)	0.58	0.74	0.41	0.19
腐熟期(32d)	0.54	0.63	0.42	0.14

1) 每个剖面上的样点数为 45

2.2 升温期堆体不同剖面位置的容重的层次变化

升温期(堆肥 3d)不同堆料层的容重随深度的变化如图 3.图 3 表明,在升温期,剖面 A 大多数层次的平均容重约为 $0.73\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,剖面 B、C 各层的容重皆大于 $0.8\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$.Seekins 认为,如果堆料容重超过 $0.72\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,不利于堆体充分通风^[4],在本试验升温阶段堆体的容重值大于该值,但堆肥的升温过程和发酵过程均能正常进行,由此表明,不同堆肥工艺和物料的适宜容重可能并不相同.由各剖面容重的变化趋势表明,剖面 B 随堆体深度的增加而增加,其他 2 个剖面上的容重随深度的增加变化不明显,因而,升温期靠近堆体中轴线附近的堆料层的容重具有明显的层次效应.

统计检验表明,剖面 A、C 各层的容重没有显著差异,剖面 B 的 10 ~ 20cm 与 60 ~ 80cm 的容重具有显著性差异($p < 0.05$),因而堆体深度对中轴线附近堆料的容重产生明显影响.各剖面的平均容重由大到小分别为:剖面 B > 剖面 C > 剖面 A,且剖面 A 的平均容重与剖面 B、C 具有显著的差异($p < 0.05$),剖面 B 与 C 的平均容重没有显著的差异,因此,仓门对堆体的容重具有显著影响.

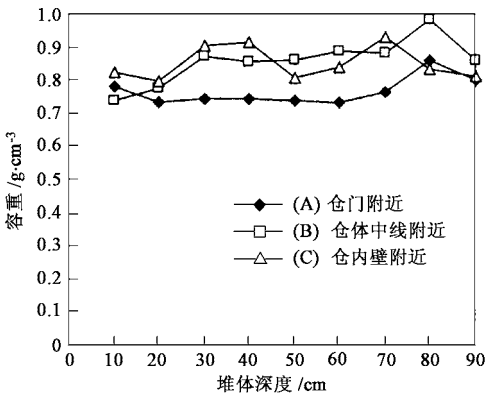


图 3 升温期堆体不同剖面位置的容重层次变化

Fig.3 Stratified change of bulk density in the pile at the stage of temperature starting

2.3 高温期堆体不同剖面位置的容重的层次变化

高温期(堆肥 10 d)堆体不同剖面的容重变化如图 4.图 4 表明:剖面 A 各层随深度的增大而呈增加的趋势;剖面 B、C 容重随深度变化趋势不明显,因而靠近仓门附近堆料的容重具有层次效应.统计检验表明,剖面 A、B 各层的容重没有显著性差异,剖面 C 的 40 cm 与 70 cm 堆料层的容重具有显著性差异($p < 0.05$).因而,高温期堆体深度对靠仓内壁附近的堆料容重产生明显的影响.由各剖面的平均容重由大到小分别为:剖面 C > 剖面 B > 剖面 A,且经统计检验发现,各剖面的平均容重没有显著差异,因此,仓门、仓壁对容重影响差异不显著.

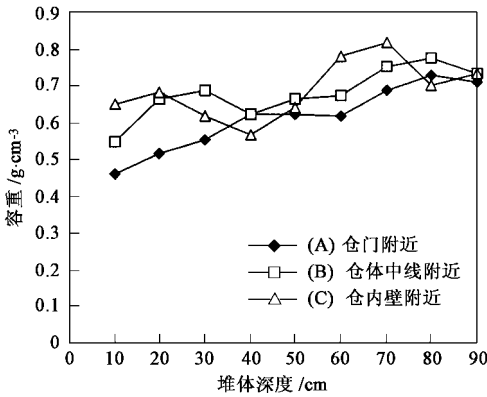


图 4 高温期堆体不同剖面位置的容重层次变化
Fig.4 Stratified change of bulk density in the pile at the stage of high temperature composting

由升温期堆肥温度能实现快速起爆(起爆速率达 $8.56\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{d}$)、高温期能维持较长的时间^[5]说明,即使升温期不通风,堆体中原来保存的氧气也足以满足堆肥微生物快速分解有机物的需要.这与实验中加入 CTB 专用调理剂有关,同时也说明 CTB 调理剂具有良好的调节通气性和吸水性的效果^[5].

2.4 降温期堆体不同剖面位置的容重的层次变化

降温期(堆肥 20 d)堆体剖面各层容重的变化如图 5.图 5 表明,降温期 3 个剖面各层的容重大多都小于 $0.70\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$. Seekins 认为,如果堆料的容重小于 $0.65\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,就会有充足的孔隙使气体穿过堆体^[4].但是,由本试验中该阶段堆体温度迅速下降^[5]表明,当堆体容重小于 $0.70\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 时,大部分堆料孔隙度较大,堆体冷却较充分.统计检验表明,剖面 A 的 10 cm 与 50 ~ 80 cm,剖面 B 的 10 ~ 20 cm 与 50、70 cm,剖面 C 的 10 ~ 30 cm 与 90 cm 的堆料层的容重具有显著性差异($p < 0.05$),由此说明,堆体

深度对整个堆体的容重产生明显的影响.由各剖面容重的变化趋势表明,剖面 A 和剖面 C 随深度增大而呈增大的趋势,因此大部分堆料的容重具有层次效应.由于剖面 A、B、C 的平均容重没有显著差异,因而仓门、仓壁对容重的影响差异不显著.

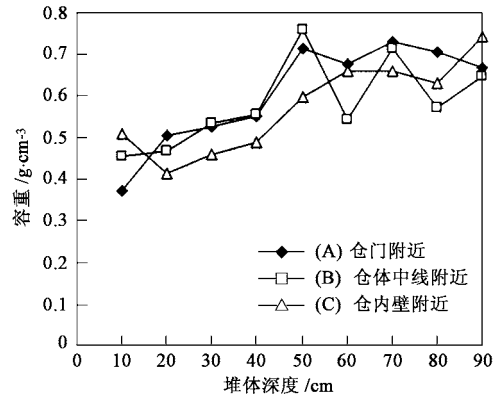


图 5 降温期堆体不同剖面位置的容重层次变化
Fig.5 Stratified change of bulk density in the pile at the stage of compost cooling

2.5 腐熟期堆体不同剖面位置的容重的层次变化

腐熟期(堆肥 32 d)堆体各剖面的容重变化如图 6.由图 6 可看出,除剖面 B 的最底层堆料外,各剖面的容重均小于 $0.65\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,因而堆肥腐熟期堆体的孔隙度已较大,能达到良好的通风、散热和脱水的效果.统计检验表明,腐熟期堆体剖面 A 的 20 ~ 30 cm 与 70 cm、70 cm 与 90 cm,剖面 B 的 10 ~ 20 cm 与 90 cm、20 cm 与 60 cm 具有显著性差异($p < 0.05$),剖面 C 的各层没有显著性差异;因而,深度对靠仓门和中轴线附近的堆体容重影响较大.由各剖面容重

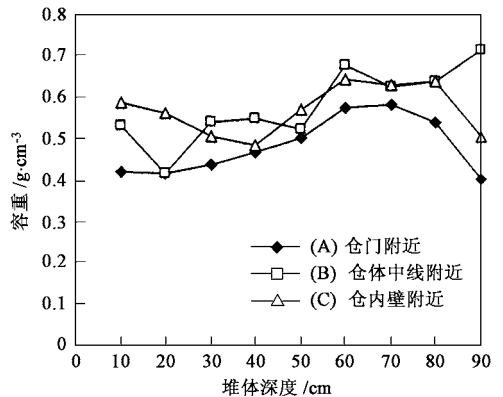


图 6 腐熟期堆体不同剖面位置的容重层次变化
Fig.6 Stratified change of bulk density in the pile at the stage of the compost maturing

的变化趋势表明,剖面 A、B、C 的容重随深度变化趋势不很明显,因而,堆体容重的层次效应减弱.各剖面的平均容重由大到小分别为:剖面 B>剖面 C>剖面 A,且剖面 A 的平均容重与剖面 B、C 具有显著的差异($p<0.05$),剖面 B、C 的平均容重没有显著的差异;由此表明,仓门对容重具有显著的影响.

2.6 不同堆肥期堆体容重均值与深度、时间的关系

不同堆肥期容重与深度变化如图 7.图 7 表明,各堆肥期容重有随深度的增加而呈增大的趋势.由升温期到降温期,堆体上半部的堆料容重变化较大.降温期以后,堆体下半部堆料的容重变化较大.

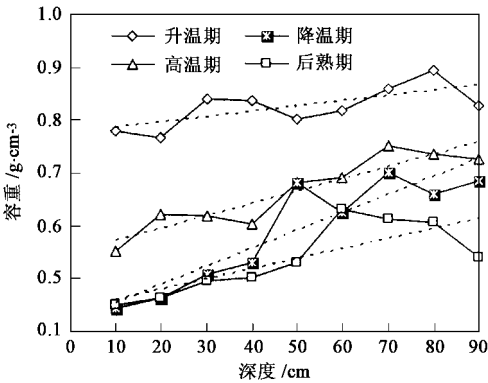


图 7 不同堆肥期堆体容重的层次效应及其线性拟合
Fig.7 Stratified effect of bulk density and its linear modeling at the different stages of composting

为进一步研究堆体容重随深度的变化关系,对不同堆肥期堆体的平均容重随深度的变化进行线性拟合,其函数关系式为:

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

式中, Y 为容重(%), X 为堆料层的深度(cm).拟合参数见表 2.由表 2 可看出,除升温期外,其他堆肥期线性拟合的相关系数达 5% 的显著水平以上,因此堆体容重与深度的线性拟合效果相对较好.

表 2 中的参数 K 可理解为容重随深度的变化程度; K 值增大,则从剖面上部到下部的单位深度的容重变化增大.由各拟合直线的斜率 K 表明,由升温期到降温期, K 值由 0.001 增大到 0.003;而降温期之后, K 值迅速减少.由此表明,随堆肥的进行剖面上下各层的容重差异在不断增大,且到降温期达最大,随后又开始减小,这与各堆肥期的平均容重的变异系数(表 1)相一致.由剖面上下各层容重的差异表明,不同堆肥期堆体内堆料的透气性并不一致.

不同堆肥期堆体上、中、下 3 部分的容重随时间的变化如图 8.图 8 表明,不同堆肥期堆体容重由大到小为:下部>中部>上部.

表 2 不同堆肥期堆体容重层次效应的拟合结果

Table 2 Simulation of bulk density stratification in the pile during composting

堆肥期	K	C	R^2
升温期	0.001	0.776	0.460
高温期	0.002	0.548	0.860 ²⁾
降温期	0.003	0.418	0.828 ²⁾
后熟期	0.002	0.440	0.641 ¹⁾

1)表示 $p<0.05$ 2)表示 $p<0.01$

假设堆肥过程中容重随时间的变化满足二级动力学方程:

$$BD = K_1 t^2 + K_2 t + BD_0 \tag{2}$$

其中, BD 为堆肥 t 天后堆体的容重($g \cdot cm^{-3}$); K_1 为容重的一级速率常数(%/d); K_2 为容重的二级速率常数; t 为堆肥时间(d); BD_0 为初始容重($g \cdot cm^{-3}$).用方程(2)对不同堆肥期堆体上、中、下部的容重随时间的变化关系进行模拟,其模拟参数见表 3.

表 3 容重的二级动力学方程模拟结果

Table 3 Simulation of bulk density dynamics with two order kinetics equation

堆体位置	K_1	K_2	BD_0	R^2
上部(0~30cm)	0.0003	-0.0194	0.9000	0.998 ¹⁾
中部(30~60cm)	0.0004	-0.0240	0.8900	0.973 ¹⁾
下部(60~90cm)	0.0008	-0.0370	0.9000	0.999 ¹⁾

1)表示 R 值达到 1%($p<0.01$)的显著性相关水平

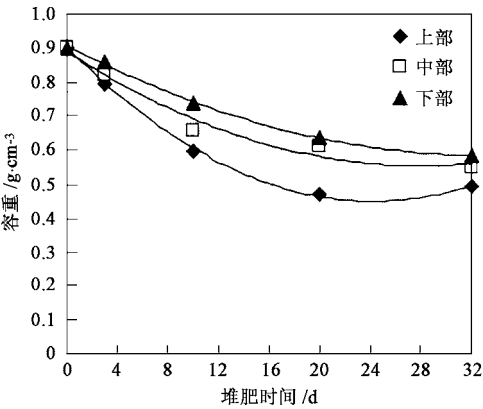


图 8 堆体不同部位容重的动态变化及其模型拟合
Fig.8 Bulk density dynamics at the different part of the pile during composting and its modeling

表 3 可看出,堆体上、中、下部容重的二级动力学方程模拟的 R 值均达到 1 % ($p < 0.01$) 的显著相关水平.因而,堆肥过程中整个堆体的容重随时间的变化满足二级动力学方程.

$$Y = 0.0005 t^2 - 0.0268 t + 0.897 \quad (3)$$

方程(3)表明,随着堆肥发酵过程的不断进行,堆体的容重不断减少,在堆肥开始后 27d 左右,堆体的容重最小.

3 结 论

(1)升温期容重为 $0.82\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$,堆体深度对中轴线附近堆料的容重具有明显影响,仓门附近堆料的容重具有层次效应,仓门对容重产生明显影响.

(2)高温期容重为 $0.66\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$,深度对仓内壁附近的堆料容重产生明显的影响,仓门附近堆料的容重具有层次效应.

(3)由于 CTB 调理剂的作用,升温期和降温期堆体内的氧气仍能满足微生物生长所需.降温期容重为 $0.58\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$,通气较充分,深度对整个堆体的容重产生明显影响,大部分堆料的容重具有层次效应.

(4)腐熟期容重为 $0.54\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$,通风充分,深度对仓门和中轴线附近堆料的容重影响较大,堆体容重的层次效应减弱,仓门对容重产生显著影响.

(5)各堆肥期堆体的容重随深度的增加而呈增大的趋势,容重与堆肥时间满足二级动力学方程: $Y = 0.0005 t^2 - 0.0268 t + 0.897$.

参考文献:

[1] Golueke C G, Diaz L F. Historical review of composting and its role in municipal waste management [A]. In: The Science of Composting: part 1 [C]. Glasgow(United Kingdom): Blackie Academic and Professional, 1996. 3 ~ 14.

[2] Larney F J, Olson A F, Carcamo A A, Chang C. Physical changes during active and passive composting of beef feedlot manure in winter and summer [J]. Bioresource Technology, 2000, 75: 139 ~ 148.

[3] Day M, Krzymien M, Shaw K, Zaremba L, Wilson WR, Botden C, Thomas B. Investigation of the chemical and physical changes occurring during commercial composting [J]. Compost Science & Utilization, 1998, 6: 44 ~ 46.

[4] Seekins B. Trouble shooting the compost pile [J]. BioCycle, 1999, 40(12): 58 ~ 59.

[5] 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.