

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

罗维, 陈同斌*, 高定, 郑玉琪, 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:由城市污泥、猪粪混合堆肥试验表明:升温期堆体各剖面的湿度在 50.82%~60.87%之间,高温期在 38.7%~52.17%之间;升温期和高温期堆体中湿度的层次效应不明显,堆肥仓门、仓内壁以及堆体深度对湿度层次效应的影响较小;降温期堆体各剖面的湿度在 24.54%~49.39%之间,湿度层次效应非常明显,仓门、仓内壁和堆体深度对湿度层次效应产生明显影响;后熟期堆体各剖面的湿度在 19.18%~49.34%之间,湿度层次效应相对减弱,仓门和仓内壁是导致湿度层次效应减弱的重要原因。不同堆肥期堆体剖面的湿度差异由大到小为:后熟期>降温期>高温期=升温期,堆体的湿度由大到小为:下部>中部>上部。堆肥过程中湿度随时间的变化满足二级动力学方程。

关键词:城市污泥;猪粪;混合堆肥;湿度;层次效应

中图分类号:X705 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2004)02-0140-05

The Stratification of Moisture Content and Its Dynamics in Co-composting of Sewage Sludge and Pig Manure

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

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

Abstract: The experiment of co-composting of sewage sludge and pig manure was studied. The moisture contents were 50.82%~60.87% at the stage of temperature rising and 38.7%~52.17% at the stage of thermophilic fermentation, and the stratification of moisture content were not obvious for both stages because the door, the internal wall and the depth of the composting bay had little effect on the stratification. At the stage of cooling, the moisture content was 24.54%~49.39%, and the stratification of moisture content was remarkable as the door, the internal wall and the depth of the composting bay had great influence on it. At the stage of maturity, the moisture content was 19.18%~49.34%, and the stratification of moisture weakened, for which the door and the internal wall were mainly responsible. At the different composting stage, the degree of difference of moisture content on the profiles of the pile was of the order: maturity stage>cooling stage>thermophilic stage=temperature rising stage, and the moisture content in the pile was as follows: the lower>the middle>the upper. The relation between moisture content and composting time met with two-order kinetics equation.

Key words: sewage sludge; pig manure; co-composting; moisture content; stratification

近年来,西方发达国家将越来越多的资金注入堆肥工厂的规划、设计、建造以及相关机械设备的研制,出现了一批按照工程学、生物学原理设计、且符合液体和气体排放相关法规的大规模现代化堆肥厂,固体废物的堆肥化和土地利用在废物处理处置中所占比例得到了稳步提高^[1]。

强制通风静态垛堆肥是目前较常采用的堆肥工艺。混合堆肥(Co-composting)是废弃物堆肥化处理的一种新途径。混合堆肥可调节堆体空隙率、含水率、C/N,还可平衡堆肥产品养分含量、降低重金属浓度等。

水份不但为微生物代谢和生理活动所需的可溶性营养物提供载体^[2],而且还能溶解有机物、参与

微生物新陈代谢、蒸发带走热量、调节堆肥温度^[3,4]。因此,湿度是混合堆肥的重要参数之一,也是工艺控制的关键因子。强制通风静态垛堆肥系统是一种半开放系统,沿着堆体中轴流向的传热和传质速率的变异通常会导致几个主要状态变量(温度、湿度、氧气浓度和生物挥发固体)具有空间梯度^[5~8]。

由于湿度对好氧堆肥分解速率产生很大的影

收稿日期:2003-03-20;修订日期:2003-04-17

基金项目:北京市重点农业科技推广示范项目;科技部“农业科技成果转化资金”项目;中科院联环保高新技术有限责任公司资助项目

作者简介:罗维(1972~),男,四川金堂人,博士研究生,主要从事固体废物处理处置及其资源化研究。

* 通讯联系人, E-mail: Chentb@agsnrr.ac.cn

响,湿度管理对于维持堆体内有机物的快速好氧分解尤为重要,因此,研究堆体湿度的层次效应及其动态变化规律具有重要意义。

本研究开展了中试规模的强制通风静态垛堆肥试验,目的在于探索堆体湿度的层次效应及其变化规律,找到产生层次效应的原因,为改进静态垛强制堆肥系统的工程设计和工艺参数,提高堆肥产品的质量提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 试验材料

供试材料为北京高碑店污水处理厂的生活污泥和楼梓庄养猪场的猪粪。污泥含水率为 84%,容重(湿)为 $0.94\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,VS 含量为 51%。猪粪的含水率为 43.45%,容重(湿)为 $0.89\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,VS 含量为 59%。

1.2 试验设备

堆肥仓由气室、布气板以及堆体 3 部分构成,其大小为 $1.5\text{ m}\times 1.2\text{ m}\times 1.7\text{ m}$ 。用本室与中科博联环保高新技术公司研制的温度变送器、CTB 自动控制系统^[9]和堆肥自动控制软件(Compsoft V1.0)^[10]对堆肥过程进行调控,试验装置如图 1 所示。

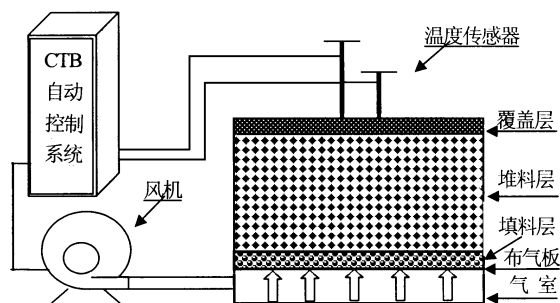


图 1 污泥、猪粪混合堆肥试验装置示意图

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

1.3 试验方法

试验共设 4 个处理(4 个堆肥仓),在每个堆肥仓的气室上布设相同规格的布气板。将城市污泥、猪粪、CTB 调理剂^[11]按照 1:1.5:1 (V/V) 的比例混合均匀,然后均匀地堆积于填料层之上,直到堆料层高度达到 1.2m。最后,在堆料层上均匀布设覆盖层(已腐熟的堆肥)。

由上到下每个堆体中心插入 2 个温度探头,插入深度分别为 65cm 和 80cm。连接温度传感器、CTB 自动控制系统和风机。4 个堆肥仓同时开始堆

肥处理。

1.4 采样和分析方法

堆肥 3d 后,停止 1 号堆肥仓的堆肥鼓风处理。以仓门为基线,沿着宽度方向于 0.38m(靠近仓门)、0.75m(堆体的中线)和 1.13m 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。每个采样面上均匀布设 $0.3\text{ m}\times 0.1\text{ m}$ 的矩形网格,在每个网格的 4 个交点处采取 10~20g 的堆肥样,在 103~105℃ 下烘至恒重为止,用称重法测定湿度值。堆肥 10d、20d、32d 后,分别停止 2 号、3 号和 4 号堆肥仓的堆肥处理,以与 1 号仓相同的采样方法进行剖面采样和测定。

2 试验结果与讨论

堆肥开始后,堆肥温度变化如图 2。图 2 表明,堆肥先后经历了升温期(0~4d)、高温降解期(4~16d)、降温期(16~30d)、后熟期(30d 以后)。

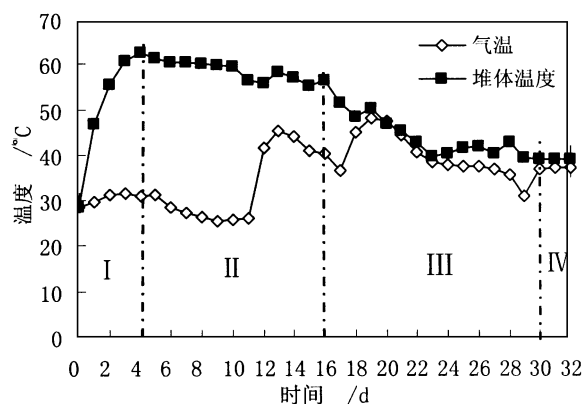


图 2 不同堆肥期堆体温度的变化

Fig. 2 Temperature change at the different stages of composting

2.1 升温期堆体不同剖面位置的湿度层次变化

图 3 为堆肥升温期(堆肥 3d 后)堆体不同剖面位置的湿度层次变化。图 3 表明,升温期堆体各剖面的湿度在 50.82%~60.87% 之间,处于最佳的湿度范围,且各剖面的湿度变化相当接近;经统计检验发现,各剖面的湿度随深度的变化差异不显著($p < 0.05$),因而湿度的层次效应不明显。由此表明,在升温期,堆肥仓门、堆肥仓的内壁以及堆体深度对湿度层次效应的产生影响较小。

2.2 高温期堆体不同剖面位置的湿度层次变化

图 4 为堆肥高温期(堆肥 10d 后)堆体不同剖面位置的湿度层次变化。图 5 表明,各剖面的湿度在

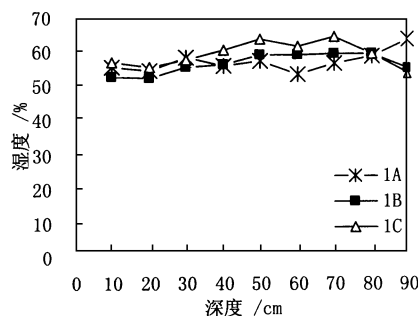


图3 升温期堆体不同剖面位置的湿度层次变化
Fig.3 Moisture stratification in the pile at the stage of temperature rising

38.7%~52.17%之间波动,但变化相对较小.剖面2A的上、中、下部的湿度均较小,剖面2B与剖面2C的上部(0~30cm)的湿度较为接近,但其下半部(50cm以下)的湿度比2C小;经统计检验发现,各剖面的湿度随深度的变化差异不显著($p < 0.05$),因而湿度的层次效应不明显.由此表明,在高温期,虽然仓门对湿度层次效应产生一定影响,但仓门、仓内壁和堆体深度对湿度的影响仍较小.

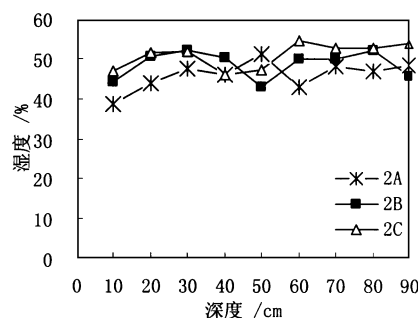


图4 高温期堆体不同剖面位置的湿度层次变化
Fig.4 Moisture stratification in the pile at the stage of thermophilic fermentation

2.3 降温期堆体不同剖面位置的湿度层次变化

图5为堆肥降温期(堆肥20d后)堆体不同剖面位置的湿度层次变化.图5表明,各剖面的湿度在24.54%~49.39%之间,且比较接近.根据显微水平上湿度与氧气交换的机理,当堆肥湿度大约为40%时,湿度不会限制氧气交换^[12],且堆体已利于脱水和散热.经统计检验发现,各剖面的湿度随深度的变化均达到1%($p < 0.01$)的显著性差异水平,因而,堆体湿度层次效应明显.各剖面上部(0~30cm)湿度较小,下部(60~90cm)湿度较大.由此表明,降温期,堆肥仓门、仓内壁和堆体深度均对湿度层次效应产生明显影响.

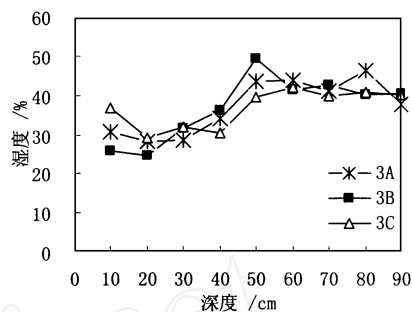


图5 降温期堆体不同剖面位置的湿度层次变化
Fig.5 Moisture stratification in the pile at the stage of cooling

2.4 后熟期堆体不同剖面位置的湿度层次变化

图6为后熟期(堆肥32d后)堆体不同剖面位置的湿度层次变化.图6表明,各剖面湿度变化差异逐步突出,湿度范围在19.18%~49.34%之间.剖面C湿度均值相对较大,剖面A上部湿度均值比剖面B小,下部比剖面B大.经统计检验发现,各剖面的湿度随深度的变化达到5%($p < 0.05$)的显著性差异水平,且差异由大到小分别为:剖面A>剖面C>剖面B.由此表明,后熟期仓门和仓内壁是导致湿度层次效应减小的重要原因.

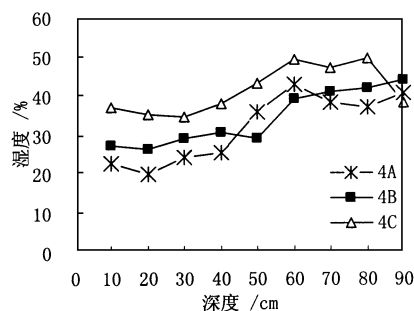


图6 后熟期堆体不同剖面位置的湿度层次变化
Fig.6 Moisture stratification in the pile at the stage of maturity

由不同堆肥期湿度层次效应的分析表明,在升温期和高温期堆肥仓门、仓壁以及堆体深度对湿度的影响较小,而降温期之后堆肥仓门、仓壁和堆体深度对湿度的影响较大. Miller认为:堆肥湿度的变化是有机质降解的标志^[13],由此推断:降温期之后,仓门、仓壁以及堆体深度对有机质降解具有明显的影响.由于降温期鼓风能充分进入堆体,而本次试验中湿度分析样是沿着堆体的鼓风方向上采集的,因此,在降温期中单一的鼓风方式也是产生湿度层次效应的重要原因之一.

为减少这些因素对堆肥效率和产品质量的影响,可对堆肥仓的材料和结构进行改进;或者在堆体

开始降温时立刻下堆,重新调节湿度后进行后熟处理;也可采取改变单一鼓风方式等措施.

2.5 堆体湿度层次效应的线性拟合及其动态变化

图 7 为不同堆肥期堆体不同深度的湿度变化及其线性拟合.由图 7 表明,各堆肥期堆体的湿度随深度的增大而呈增大的趋势,且堆体上半部的湿度变化较大,下半部的湿度变化较小.

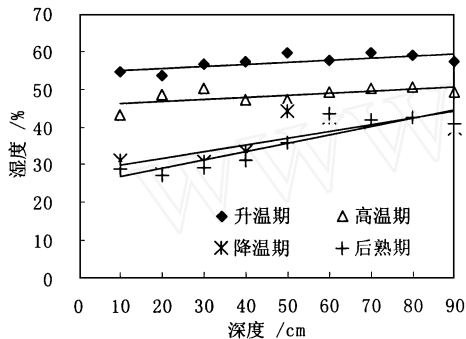


图 7 不同堆肥期堆体湿度的层次效应及其线性拟合
Fig. 7 Moisture stratification and its linear modeling at the different stages of composting

为进一步研究堆体湿度随深度的变化关系,对不同堆肥期堆体的平均湿度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 为湿度(%)、 X 为堆料层的深度(cm).拟合参数见表 1.由表 1 可看出,后熟期湿度与深度线性拟合效果相对较好 ($R^2 = 0.81$).

表 1 不同堆肥期堆体湿度层次效应的拟合结果
Table 1 The results of modeling of moisture stratification at the different stages of composting

堆肥期	K	C	R^2
升温期	0.053	54.531	0.51 ($p < 0.05$)
高温期	0.053	45.803	0.40 ($p < 0.05$)
降温期	0.182	27.910	0.63 ($p < 0.01$)
后熟期	0.222	24.53	0.81 ($p < 0.01$)

参数 K 可理解为湿度随深度的变化程度; K 值增大,则从剖面上部到下部的单位深度的湿度增大.由各拟合直线的斜率 K 表明,从升温期到后熟期,拟合直线的 K 值由 0.053 增大到 0.222.不同堆肥期剖面上下湿度的差异由大到小分别为:后熟期 > 降温期 > 高温期 = 升温期.

不同堆肥期堆体中的湿度随时间的变化如图 8.图 8 表明,不同堆肥期堆体湿度由大到小为:下部 > 中部 > 上部.

假设堆肥过程中湿度随时间的变化满足二级动力学方程:

$$MC = K_1 t^2 + K_2 t + MC_0 \tag{2}$$

其中 MC 为堆肥 t 天后堆体的湿度(%) ; K_1 为湿度的一级速率常数(%/ d) ; K_2 为湿度的二级速率常数; t 为堆肥时间(d) ; MC_0 为初始湿度(%).用方程 (2) 对不同堆肥期堆体上、中、下部的湿度随时间的变化关系进行模拟,其模拟参数见表 2.

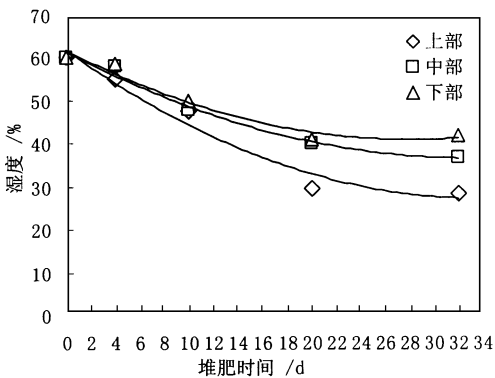


图 8 堆体不同部位湿度的动态变化及其模型拟合
Fig. 8 The moisture dynamics at the different stages of composting and their modelings

表 2 湿度的二级动力学方程模拟结果
Table 2 The results of modeling of moisture content with two-order kinetics equation

堆体位置	K_1	K_2	MC_0	R^2
上部	0.026	- 1.482	61.768	0.97 ($p < 0.01$)
中部	0.023	- 1.499	61.364	0.98 ($p < 0.01$)
下部	0.030	- 2.036	61.712	0.97 ($p < 0.01$)

表 2 可看出,堆体上、中、下部模拟的 R^2 值均在 0.96 以上,其统计学检验的结果均达到 1 % ($p < 0.01$) 的显著相关水平.因而,堆肥过程中湿度随时间的变化满足二级动力学方程.

$$MC = 0.0266 t^2 - 1.622 t + 61 \tag{3}$$

为使堆肥处理经济而又快速,需长期维持堆体中均匀、一致的湿度条件;如果堆体不同深度的湿度具有明显的不均一性,则不利于提高堆肥效率和堆肥产品的质量.为此,建议在堆肥过程中采取适当的翻堆、混合搅拌,改进鼓风方式或者改善堆体结构等

措施,努力避免工艺参数的不均性带来的负面效应.

3 结论

升温期和高温期,堆体湿度的层次效应均不明显,堆肥仓门、堆肥仓的内壁以及堆体深度对湿度层次效应产生的影响较小;降温期,堆体湿度层次效应非常明显,堆肥仓门、内壁和堆体深度对堆体湿度的层次效应产生很大影响;后熟期堆体湿度的层次效应相对减弱,仓门和仓内壁是导致湿度的层次效应减弱的重要原因.

不同堆肥期剖面上下湿度的差异由大到小分别为:后熟期 > 降温期 > 高温期 = 升温期. 不同堆肥期堆体湿度由大到小为:下部 > 中部 > 上部. 堆肥过程中湿度随时间的变化满足二级动力学方程, $MC = 0.0266 t^2 - 1.622 t + 61$.

参考文献:

- [1] Golueke C G, Diaze I F. Historical review of composting and its role in municipal waste management[A]. In: M. de Bertoldi, *et al* (eds). The Science of Composting, Part I[C]. Blackie Academic and Professional, Glasgow:1996. 3 ~ 14.
- [2] Stentiford E I. Composting Control: Principles and Practice [A]. In: M de Bertoldi, *et al* (eds). The Science of Composting, Part I[C]. Blackie Academic and Professional, Glasgow: 1996. 3 ~ 4.
- [3] 李艳霞,王敏健,等. 固体废弃物的堆肥化处理技术[J]. 环境污染治理技术与设备,2000,1(4):39 ~ 45.
- [4] Sharma V K, Canditelli M, *et al*. Processing of urban and agro-industrial residues by aerobic composting: review[J]. Energy Covers Management, 1997, 38(5): 452 ~ 478.
- [5] McCartney D, Chen Hongtu. Using a biocell to measure effect of compressive settlement on free air space and microbial activity in window composting[J]. Compost Science & Utilization, 2001, 9(4): 285 ~ 302.
- [6] Quazi H, Bari A K. Effect of air recirculation and reuse on composting of organic solid waste[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2001, 33: 93 ~ 111.
- [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] Schloss P D, Chaves B, Walker L P. The use of the analysis of variance to assess the influence of mixing during composting[J]. Process Biochemistry, 2000, 35: 675 ~ 684.
- [9] 陈同斌,高定,黄启飞,等. 一种用于堆肥的自动控制装置[P]. 中国专利:CN01120518.0,2001.
- [10] 陈同斌,高定,黄泽春,等. 污泥堆肥自动化控制系统(V1.0). 国家版权局:SR0529,2001.
- [11] 高定,黄启飞,陈同斌,等. 新型堆肥调理剂的吸水特性及其应用[J]. 环境工程,2002,20(3):48 ~ 51.
- [12] Miller-Sylvan F C, Hills W. Thermal evolution during composting of sewage sludge[A]. In: M de Bertoldi, *et al* (eds). The Science of Composting, Part I[C]. Blackie Academic and Professional, Glasgow: 1996. 106 ~ 115.
- [13] Miller F C, Finstein M S. Materials balance in the composting of wastewater sludge as aerated by process control[J]. Journal of Water Pollution Control Federation, 1985, 57: 122 ~ 127.