

混合堆肥过程中自由空域 (FAS) 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中心, 北京 100101)

摘要:城市污泥、猪粪混合堆肥试验表明:升温期和高温期 FAS 分别为 42.3%、26.2%,在这 2 个堆肥期内堆体上部的 FAS 明显高于下部,堆体内的空气能满足微生物的需求;降温期 FAS 为 52.4%,堆体上部的 FAS 高于中部,中部高于下部,FAS 呈明显的层次效应;腐熟期 FAS 为 54.7%,FAS 的层次效应减弱,堆体上部和中部的通气性明显好于下部.不同堆肥期剖面上下部 FAS 的差异由大到小分别为:降温期 > 高温期 > 后熟期 > 升温期;堆体内 FAS 由高到低为:上部 > 中部 > 下部.FAS 随时间的变化满足二级反应动力学方程.

关键词:FAS;混合堆肥;城市污泥;猪粪

中图分类号:X705 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2004)06-0150-04

Stratification of Free Air Space and Its Dynamics in the Process of Co-Composting

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

(Center for 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. Free air space (FAS) in the whole composting pile was 26.2% at the temperature rising stage and 42.3% at the stage of high temperature composting. FAS in the upper portion of composting pile was higher than that in the lower, where the air was enough for microorganism to live on for two stages above. The FAS was 52.4% at the stage of the cooling, when the effect of stratification of FAS was significant. The FAS in the upper pile was bigger than that in the middle, which was bigger than that in the lower. At the stage of maturing, FAS was 54.7% and its stratified effect weakened, but the capability of aeration in the upper and in the middle of the pile was larger than that in the lower. At the different stages of composting, the degree of difference of FAS was of the order: the cooling stage > the high temperature stage > maturing stage > the temperature rising stage. The difference in the pile for every stage of composting was as follows: the upper > the middle > the lower. The change of FAS agreed with two-order kinetics.

Key words:free air space;co-composting;sewage sludge;pig manure

Schulze 借鉴土壤学理论,在堆肥科学中提出了自由空域(FAS)的概念,将 FAS 定义为堆料中的气体体积与堆料总体积之比^[1].FAS 是好氧堆肥的一个重要工艺参数,也是衡量堆料中空气含量的重要指标^[2].适宜的 FAS 不仅有利于为好氧微生物供氧,减少厌氧发酵,提高腐熟度,而且也有利于堆肥温度控制,缩短堆肥周期^[3].

FAS 受很多因素的影响,其中与堆肥湿度的关系最密切^[1~6],另外还受通气、混合以及加入调理剂或回流堆肥的影响^[1,3].有研究报道了堆料的重量和压实作用以及堆体的深度会使堆体内出现 FAS 的垂直梯度效应^[3,5],但是由于难于测算 FAS,因而很少有人对此加以深入研究.

本研究开展了强制通风静态垛城市污泥、猪粪混合堆肥试验,探讨了堆肥过程中堆体不同深度 FAS 的变化规律以及动态特征,为优化堆肥工艺、

提高堆肥效率和堆肥产品的质量提供更充分的科学依据.

1 材料和方法

1.1 试验材料、设备

试验材料和堆肥方法见文献[7],试验设备如图 1.

1.2 采样、分析和计算方法

要获得堆体中不同深度的 FAS 值,需要确定堆体不同深度堆料的湿度(用于确定固体含量)、容重和 VS 的百分含量.以上参数的采样和测定方法见文献[7,10,11].

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(2004AA645010);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项目.

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.

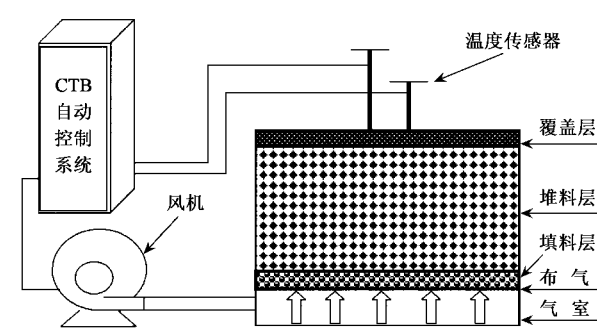


图 1 城市污泥、猪粪混合堆肥试验装置示意图

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

美国堆肥协会 (USCC)^[8]和 Singley^[9]分别提出了 2 种不同的 FAS 测定方法. 这些方法费力、费时. 本次试验的 FAS 值由方程(1)间接求得^[3]:

$$FAS = 1 - \frac{Y_m \times S_m}{(G_m \times Y_w) - Y_m \times (1 - S_m) / Y_w} \quad (1)$$

式中, Y_m , 堆肥的(湿)容重, $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$; S_m , 堆肥的固体百分含量, %; Y_w , 水的密度, 一般为 $1.00 \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$; G_m , 堆肥的相对密度, 由方程(2)求解获得:

$$1 / G_m = V_s / G_v + (1 - V_s) / G_f \quad (2)$$

式中, G_v 为 VS 的相对密度, 一般为 1; G_f 为灰分的相对密度, 一般为 2.5; V_s , 挥发固体的含量, %.

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)^[7].

2.1 FAS 的统计特征值

不同堆肥期堆体内 FAS 的统计值见表 1. 由表 1 可看出, 堆肥过程中 FAS 值由堆肥前的 18.3 % 逐步增加到腐熟期的 54.7 %, 其中升温期和高温期堆体的 FAS 值增加相对较为明显, 降温期之后 FAS 的增加趋于平缓. 不同堆肥期 FAS 的变异系数由大到小分别为降温期 > 高温期 > 腐熟期 > 升温期.

表 1 不同堆肥期堆体内 FAS 的统计值¹⁾

堆肥期	平均值/ %	最大值/ %	最小值/ %	变异系数/ %
堆肥前(0d)	18.3	29.2	2.1	0.11
升温期(3d)	26.6	47.3	3.9	0.16
高温期(10d)	42.3	69.7	9.3	0.21
降温期(20d)	52.4	76.3	5.9	0.23
腐熟期(32d)	54.7	76.9	14.1	0.19

1) 每个堆肥期的样本数为 45 个

2.2 升温期堆体内 FAS 的层次变化

图 2 是升温期堆体内 FAS 的层次变化. 图 2 表明, 表层 10 ~ 20cm 处堆料的 FAS 大于 30 %, 其余大部分堆料层的 FAS 在 20 % ~ 30 % 之间. 统计分析发现, 堆体上部(0 ~ 30cm)与堆体下部(90 ~ 120cm)堆料层的 FAS 具有显著的差异 ($p < 0.05$), 因而, 堆体上部 FAS 明显高于堆体下部. Jeris 和 Schulze 研究认为: 当 FAS 大于 30 % 时, 堆肥供氧性能良好, 当 FAS 小于 28 % 时, 堆肥供氧性能下降^[1, 6]. 由此推断, 堆肥升温期堆体上部的供氧性能良好, 下部供氧性能较差. Haug 认为: 当堆体中心(温度最高部分)的 FAS 大于 20 % 时, 堆料中的空气才能维持好氧堆肥的需求^[3]. 本试验表明, 升温期堆体中部的 FAS 均大于 20 % 和升温期的温度升高明显^[7], 因而, 升温期堆体内空气能维持好氧堆肥的需求, 堆肥效果良好.

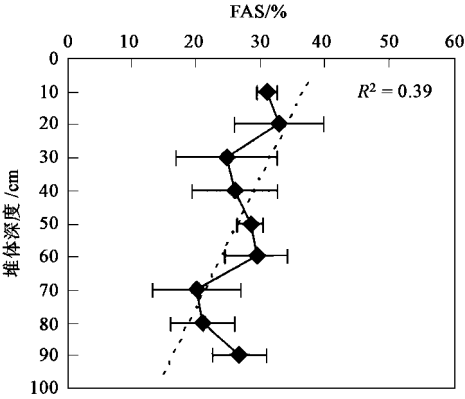


图 2 升温期堆体内 FAS 的层次变化

Fig. 2 FAS Change in the pile at the stage of temperature starting

2.3 高温期堆体内 FAS 的层次变化

图 3 是高温期堆体内 FAS 的层次变化. 可以看出, 由堆体的上部到下部, FAS 从 54.3 % 下降到 36.6 %. 统计分析发现, 堆体上部与下部的 FAS 具有显著的差异 ($p < 0.05$), 因而, 堆体上部(0 ~ 30cm)的 FAS 明显高于堆体下部(90 ~ 120cm). 由于堆体各层的 FAS 均大于 30 %, 因而高温期堆体中空气含量能充分满足微生物发酵的需求. 堆体中、下部 FAS 的降低可能是由于高温期堆体中、下部堆料的湿度增加^[12], 且压实作用增强所导致.

2.4 降温期堆体内 FAS 的层次变化

图 4 是降温期堆体内 FAS 的层次变化. 图 4 表明, 由堆体上部到下部, FAS 从 62.5 % 减少到 47.0 %. 统计分析发现, 堆体上、中、下部的 FAS 具有显著性差异 ($p < 0.05$), 因而, 堆体上部 FAS 明显

大于中部,中部明显大于下部;由此表明,堆料的FAS呈明显的层次效应.在降温期,由于连续的通风作用而使堆体上部、中部的湿度差异越来越小,通气性越来越接近,而堆体下部湿度进一步增大^[12],且随着深度的增加,堆体的压实作用越来越明显,从而使堆体由上部到下部,FAS降低、FAS呈明显的层次效应.

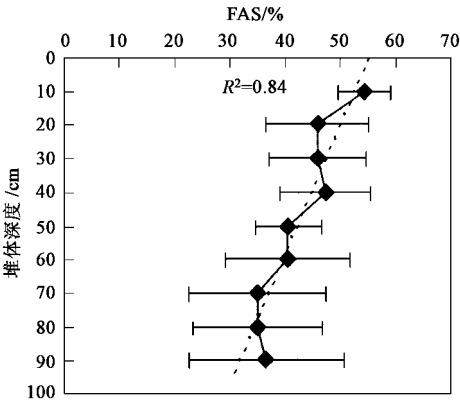


图3 高温期堆体内FAS的层次变化

Fig.3 FAS change in the pile at the stage of high temperature composting

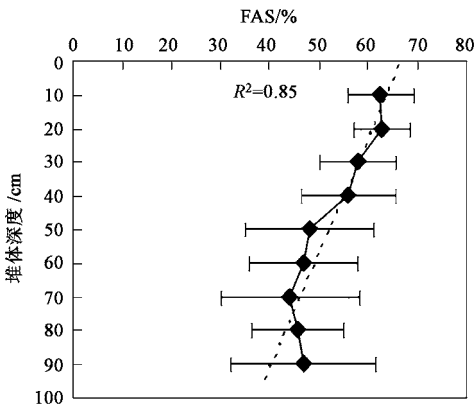


图4 降温期体内FAS的层次变化

Fig.4 FAS change in the pile at the stage of cooling

2.5 腐熟期堆体内FAS的层次变化

图5是腐熟期堆体内FAS的层次变化.由图5可看出,堆体上部的FAS为60%左右,中部降到46.0%,下部又增加到54.4%.经统计分析发现,上部与中部的FAS没有显著差异,堆体上部与下部的FAS具有显著的差异($p < 0.05$).由此表明,与降温期相比,腐熟期堆体内FAS的层次效应减弱,堆体上部和中部的通气性能趋于稳定,且明显好于下部堆料的通气性.

2.6 不同堆肥期堆体内FAS与深度的线性拟合以

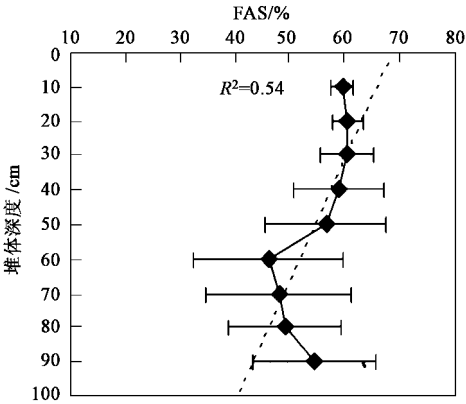


图5 腐熟期体内FAS的层次变化

Fig.5 FAS change in the pile at the stage of maturing

及FAS的动态变化

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

$$Y = KX + C \tag{3}$$

式中, Y 为 FAS 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.

各堆肥期堆体内FAS与深度的线性拟合结果如表2.表2说明,除升温期外,高温期、降温期和腐熟期的FAS与深度的线性拟合相关系数均达到5%的显著性相关水平,因而其拟合效果相对较好.

表2 不同堆肥期堆体内FAS与深度的线性拟合结果

Table 2 Results of linear modeling of FAS changing with depth of the pile

堆肥期	K	C	R ²
升温期	- 0.10	31.53	0.39
高温期	- 0.22	53.34	0.84 ¹⁾
降温期	- 0.25	64.93	0.85 ²⁾
后熟期	- 0.15	62.33	0.54 ²⁾

1) 表示 $p < 0.01$; 2) 表示 $p < 0.05$;

方程(3)中斜率 K 可理解为 FAS 随深度的变化程度; K 的绝对值增大,则从剖面上部到下部的单位深度的 FAS 增大.由各拟合直线的斜率 K 表明,由高温期到降温期,拟合直线的 K 值在 - 0.1 到 - 0.25 之间;其 K 的绝对值最大.综上所述,不同堆肥期剖面上下 FAS 的差异由大到小分别为:降温期 > 高温期 > 后熟期 > 升温期,这与以上统计结果中各堆肥期 FAS 的变异系数相一致,亦即:随着堆肥的进展,剖面上下各层的 FAS 差异增大.由剖面上下 FAS 的差异表明,堆体各层的通气性很不一致,因此可通过翻堆处理来保证堆体各层的好氧降

解程度一致性,提高堆肥质量。

不同堆肥期堆体内的 FAS 随时间变化如图 6。图 6 表明,不同堆肥期堆体上下 FAS 由高到低皆为:上部>中部>下部。

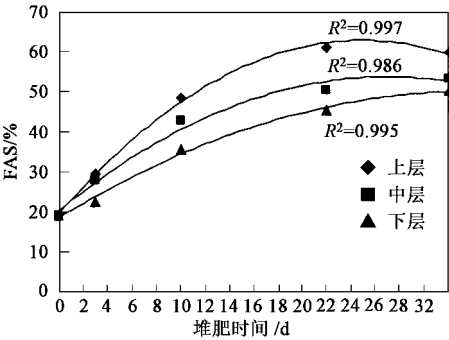


图 6 堆体内 FAS 的动态变化及其模型拟合
Fig. 6 FAS dynamics at the different stage of composting and its modeling

假设堆肥过程中 FAS 随时间的变化满足二级反应动力学方程:

$$FAS = K_1 t^2 + K_2 t + FAS_0 \tag{4}$$

式中,FAS 为堆肥 t 天后堆体的自由空域(%); K_1 为 FAS 的一级动力学常数(%/ d); K_2 为 FAS 的二级动力学常数; t 为堆肥时间(d); FAS_0 为初始 FAS(%)。用方程(4)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,其模拟结果如表 3。

表 3 FAS 的二级动力学方程模拟结果

堆体位置	K_1	K_2	C	R^2
堆体上部(10~30cm)	- 0.07	3.49	19.55	0.99 ¹⁾
堆体中部(30~60cm)	- 0.05	2.49	20.21	0.98 ¹⁾
堆体下部(60~90cm)	- 0.03	1.87	18.45	0.99 ¹⁾

1) 表示 $p < 0.01$

由表 3 说明,堆体上、中、下部模拟的 R^2 值均在 0.98 以上,均达到 1 %水平的显著性相关。因而,堆肥过程中 FAS 随时间的变化满足二级动力学方程:

$$FAS = - 0.05 t^2 + 2.75 t + 18.27 \tag{5}$$

由方程(5)可知,混合堆肥 27d 左右,FAS 达最大。

为使堆肥处理经济而又快速,需要长期维持堆体中均匀、一致的 FAS 条件;如果堆体不同深度的 FAS 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,建议在堆肥过程中通过采取适当的翻堆、混合搅拌,改进鼓风方式或者改善堆体结构等措施,尽量避免工艺参数不均带来的负面效应。

3 结论

升温期堆体内的 FAS 为 26.6 %,堆体上部的 FAS 明显高于堆体下部,但堆体内空气能维持好氧堆肥需求。高温期堆体内的 FAS 为 42.3 %,堆体上部 FAS 明显高于下部,堆体内空气能充分满足微生物发酵的需求。降温期堆体内的 FAS 为 52.4 %,堆体上部 FAS 明显大于中部,中部明显大于下部,堆体内的 FAS 呈明显的层次效应。腐熟期堆体内 FAS 为 54.7 %,FAS 的层次效应减弱,堆体上部和中部的通气性明显好于下部。

不同堆肥期剖面上下 FAS 的差异由大到小分别为:降温期>高温期>后熟期>升温期。不同堆肥期堆体上下 FAS 由高到低皆为:上部>中部>下部。堆肥过程中 FAS 随时间的变化满足二级反应动力学方程。

参考文献:

[1] Shulze K L. Continuous Thermophilic Composting[J]. Appl. Microbiol., 1962, (10):108~122.

[2] Annan J S. Comparision of Techniaues for Measuring Air Filled Porosity in Composts of Biosolids and Wood Chip[D]. Clemson, S.C.: Clemson University, 1998.

[3] Haug R T. The Practical Handbook of Compost Engineering[M]. Boca Raton: Lewis Publishers, 1993.

[4] Golueke C G, McGauhey P H. Reclamation of Municipal Refuse by Composting[A], Technical Bulletin No.9[C]. Berkeley, Canifornia: Sanitary Engineering Research Laboratory, University of California, 1953.

[5] Das K, Keener H M. Process control based on dynamic properties in composting: moisture and compaction considerations[A]. The Science of Composting: part 1[C]. Glassgow (United Kingdom): Blackie Academic and Professional, 1996.

[6] Jeris J S, Regan R W. Controlling environmental parameters for optimal composting II: Moisture, free air space and recycle[J]. Compost Science, 1973, Mar-Apr.

[7] 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.

[8] U. S. Composting Council. Test Methods for the Examination of Composting and Composts[S]. Draft 3.9.3. 1997.

[9] Singley M E, et al. Sludge Composting and Utilization: A Design and Operating Manual[M]. New Brunswick, NJ: New Jersey Agricultural Experimentation Station. Cook College, Rutgers. 1982.

[10] 陈同斌, 罗维, 高定, 等. 混合过程中容重的层次效应及其动态变化[J]. 环境科学, 2004, 25(5):143~147.

[11] 罗维, 陈同斌, 高定, 等. 混合堆肥过程中挥发性固体(含量)的层次效应及动态变化[J]. 环境科学, 2004, 25(3):155~159.

[12] 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. 环境科学学报, 2004, 24(1):126~133.