

静态垛好氧堆肥堆体中氧气浓度和耗氧速率的垂直分布特征

郑玉琪, 陈同斌*, 高定, 郑国砥, 罗维

(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:探讨堆体不同深度的氧气浓度和耗氧速率特征,对于改进堆体结构,改善堆肥工艺有重要意义.本文分析了猪粪好氧堆肥过程中,堆体不同深度氧气补充和消耗的特点及原因.在不同堆肥时期,通风充氧后,堆体各部位氧气浓度都可以恢复到 17%~20.6%.停止通风后,堆体上部氧气浓度的减小速度比中、下部快,减小后氧气浓度较下部低,最低可至 3%.随着堆肥的进行,停止通风后经过相同的时间,各部位通风前的氧气浓度逐渐升高,高温阶段中期以后,中、下部通风前的氧气浓度可以达到 10%以上,氧气浓度的减小趋势也逐渐减缓.

关键词:堆肥; 氧气; 耗氧速率; 垂直分布

中图分类号: X705 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2004)02-0134-06

Characteristics of Vertical Distribution of Oxygen Concentration and Consumption Rate in Aerobic Static Composting

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

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

Abstract: It is of important to improve the composting techniques and the structure of the pile to know the vertical distribution of oxygen concentration and oxygen consumption rate. The characteristics of oxygen supplement and consumption were analyzed in aerobic static composting. The oxygen concentration at different parts of the pile could increase from 17% to 20.6% after ventilation during different stages of composting. The decrease rate of oxygen concentration at the upper part was faster than that of the middle and bottom of the pile, and the oxygen concentration at the upper part was lower, which could be 3%. After same time of stopping ventilation, the oxygen concentration before ventilation increased along with the proceeding of composting. The oxygen concentration before ventilation could be upper 10% at the middle and bottom of the pile after the middle stage of high temperature, and the decrease rate of oxygen concentration declined too.

Key words: composting; oxygen; oxygen consumption rate; vertical distribution

堆肥是实现固体废弃物资源化利用的有效手段.通过堆肥,可以实现固体废弃物的无害化、减量化、资源化.氧气是影响堆肥进程的关键因素,是判断堆肥是否进行完全的重要参数^[1].氧气的供给对堆肥过程中有机物的分解速率^[2]、温度控制^[3,4]、臭气产生^[2]和堆肥质量^[2,5~7]均有重要影响.

强制通风静态堆肥的单向、定时通风策略决定了堆体不同空间位置温度分布的不均质性^[8~10],而温度、堆肥微生物活性、氧气消耗之间存在着密切的关系,微生物生命活动需要氧气,而氧气的缺乏又限制好氧微生物的生命活动,从而影响温度变化、堆肥过程和堆肥质量.受监测手段的限制,氧气一直是堆肥研究中的难点,研究不同深度氧气的补充和消耗特点,对于改进堆体结构,进一步优化堆肥工艺有重要现实意义.本文在中试规模上研究堆体不同深度的氧气浓度和耗氧速率的变化规律,为堆肥工艺的

改进提供科学依据.

1 试验材料和方法

1.1 试验材料

供试材料为北京市楼梓庄猪场猪粪,含水率 69.6%,挥发性有机物含量为 72%.填充材料为 CTB 调理剂^[11].调理剂的含水率和饱和吸水率为 2.7%、65.7%.

1.2 试验方法

(1)堆肥方法 堆肥池上部敞开,其几何尺寸为:150cm×120cm×180cm.堆体有效高度 150cm,

收稿日期:2003-05-07;修订日期:2003-09-01

基金项目:科技部农业科技成果转化基金支持项目(02EFN216601217);国家“九五”重大科技攻关项目(96-909-01-05)

作者简介:郑玉琪(1973~),男,博士生,主要从事固体废弃物资源化方面的研究.

* 通讯联系人, E-mail: chentb@igsnr.ac.cn

调理剂与猪粪比例为 1:1. 试验采用 CTB 温度反馈自动控制系统进行控制^[12]. 该系统可根据堆体温度变化情况, 通过堆肥专用软件 Compssoft 对通风方式和通风量进行控制. 堆肥于 2003-01-14 开始, 01-24 结束, 共 11 d, 堆肥方式为强制通风静态垛高温好氧堆肥.

(2) 探头布置 在每个堆体的代表部位放置 2 个温度控制探头, 其温度平均值作为控制参数用于温度反馈控制系统. 堆体的氧气采用自主研发开发的堆肥氧气实时、在线监测系统^[13-15]进行测量. 在堆体中自上而下分别于 30、50、70、90、110cm 深度放置氧气监测探头, 并与每个氧气探头并行放置一个温度探头, 探头的放置位置如图 1 所示.

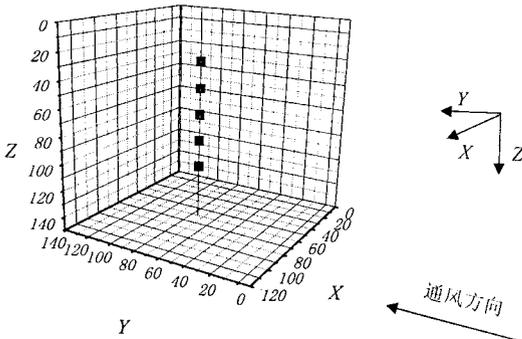


图 1 堆体氧气传感器的放置位置

Fig.1 The location of the oxygen sensor in the pile

2 结果和讨论

2.1 升温阶段

升温阶段, 堆体通风 10 min, 停止 40 min. 通风充氧前, 不同深度氧气浓度(体积分数)都比较低, 其中 30、50、70、90cm 深度氧气浓度基本一致, 在 3%~4% 之间, 110cm 处氧气浓度较高, 为 8% (图 2A~E). 通风后, 不同深度的氧气浓度都由通风前的较低浓度(3%~4%)恢复到 17%~20.6% (如图 2A 所示), 都能满足堆肥对氧气的需要. 其中, 底部的氧气浓度高于其它部分, 110cm 位置可以达到 20.6%, 由下到上浓度逐渐减小, 这是底部自然通风作用的结果. 堆体下部气室通入的空气进入堆体后, 随着气体向上运移, 逐渐与堆体内的气体混合, 氧气浓度逐渐减低, 因此, 堆体中的氧气浓度自下而上逐渐减低, 从而, 堆体底部氧气浓度高于其它部分.

从图 2a~e 可以看出, 停止通风后, 堆体中上部氧气浓度减小到平台期(图中减小趋于平缓的部分)的时间基本相当(如图 2A 所示), 相对较快, 而下部减少的时间相对较长. 由于此时堆体处于升温期, 不同位置的水分含量相差不大, 而供给微生物生命活

动的能源物质也相对较足, 不同位置的温度都在微生物适宜活动(44~58℃)的范围内(表 1), 因此, 氧气浓度的减少不是微生物活动强弱导致的, 而是堆体自然通风、氧气扩散的结果.

表 1 不同堆肥阶段堆体不同深度的温度

Table 1 Different temperature in different depth during different composting stage

堆体深度 / cm	升温阶段温度 / °C	高温阶段温度 / °C	降温阶段温度 / °C
30	44.3	63.8	63.3
50	46.0	57.7	44.4
70	48.3	48.7	45.1
90	57.2	42.3	27.3
110	58.1	26.8	18.9

从图 2a~e 可以看出, 该阶段不同深度的耗氧速率峰值为 200~500 $\mu\text{L} \cdot (\text{L} \cdot \text{s})^{-1}$. 其中, 堆体中部耗氧速率峰值最高, 上部高于下部. 本次堆肥是在寒冷的冬季 1 月份进行, 气温 -10℃~-2℃. 中部及中上部温度 46~57℃(表 1), 最适宜微生物生命活动, 因此耗氧速率高, 上部温度 44℃较低, 因此微生物生命活动相对较弱, 耗氧速率低于中部. 底部温度较中上部低, 同时, 底部接近气室, 自然通风和氧气自由扩散可以补充消耗的氧气, 使氧气浓度处于较高水平, 因此耗氧速率较低.

从耗氧速率的变化趋势来看, 中部减少最快, 上部次之, 底部减少最慢. 表明中部氧气消耗最快, 氧气的补充慢. 下部耗氧速率减小慢, 而此时堆肥处于升温阶段, 堆体除温度差异外, 其它条件基本相同, 因此, 下部耗氧速率减小较慢是底部对堆体氧气扩散补充的结果.

2.2 高温阶段

通风充氧前, 该阶段不同深度的氧气浓度差异很大, 仅堆体上部氧气浓度低于 8%, 其它部位氧气浓度为 12%~19.5% (图 3A~E), 堆体不同部位的氧气可以满足需求, 并且由堆体上部向下部氧气浓度逐渐升高到 19.5% 左右. 通风后, 不同深度的氧气浓度都恢复到 18%~20.6%, 中部和下部氧气浓度较高, 表明通风可以有效补充氧气. 此时, 堆肥高温已经维持 5d. 从图 5 可以看出, 堆肥中的挥发性有机质(VOC)由堆肥初期的 72.7% 降低到 47.1%, 基本上降低到 VOC 的最低水平, 这表明堆体内大部分易降解的有机质已经被分解. 此时, 堆体的湿度由 68% 下降到 57.8% (图 6), 因此, 堆体的通气性良好, 氧气补充快, 通风后氧气峰值高, 氧气浓度自下而上逐渐减低.

停止通风后,氧气浓度的减少趋势自堆体的上部向下逐渐减小(图 3a~e),减小到最低浓度所经历的时间也逐渐延长.停止通风 40 min 后,堆体中

部、下部的氧气浓度没有减小到 12% 以下.

经过 5 d 的高温持续期,堆体供给微生物生命活动的易分解有机质能源物质大部分已经分解(图

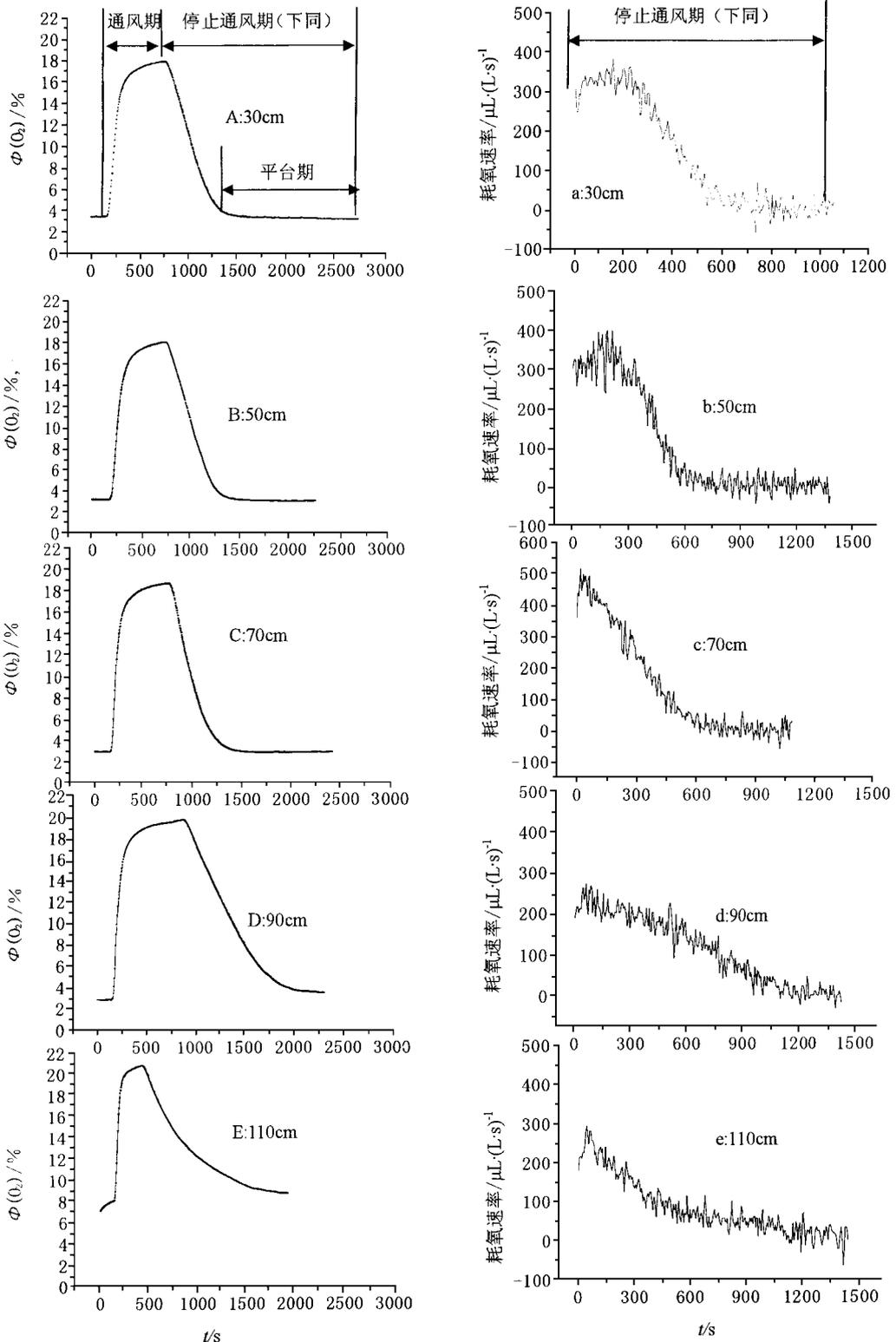


图 2 升温阶段堆体不同深度的氧气浓度(左)和耗氧速率(右)变化

Fig. 2 Variation of O₂ concentration (L) and O₂ consumption rate (R) in different depth of the pile during temperature increase stage

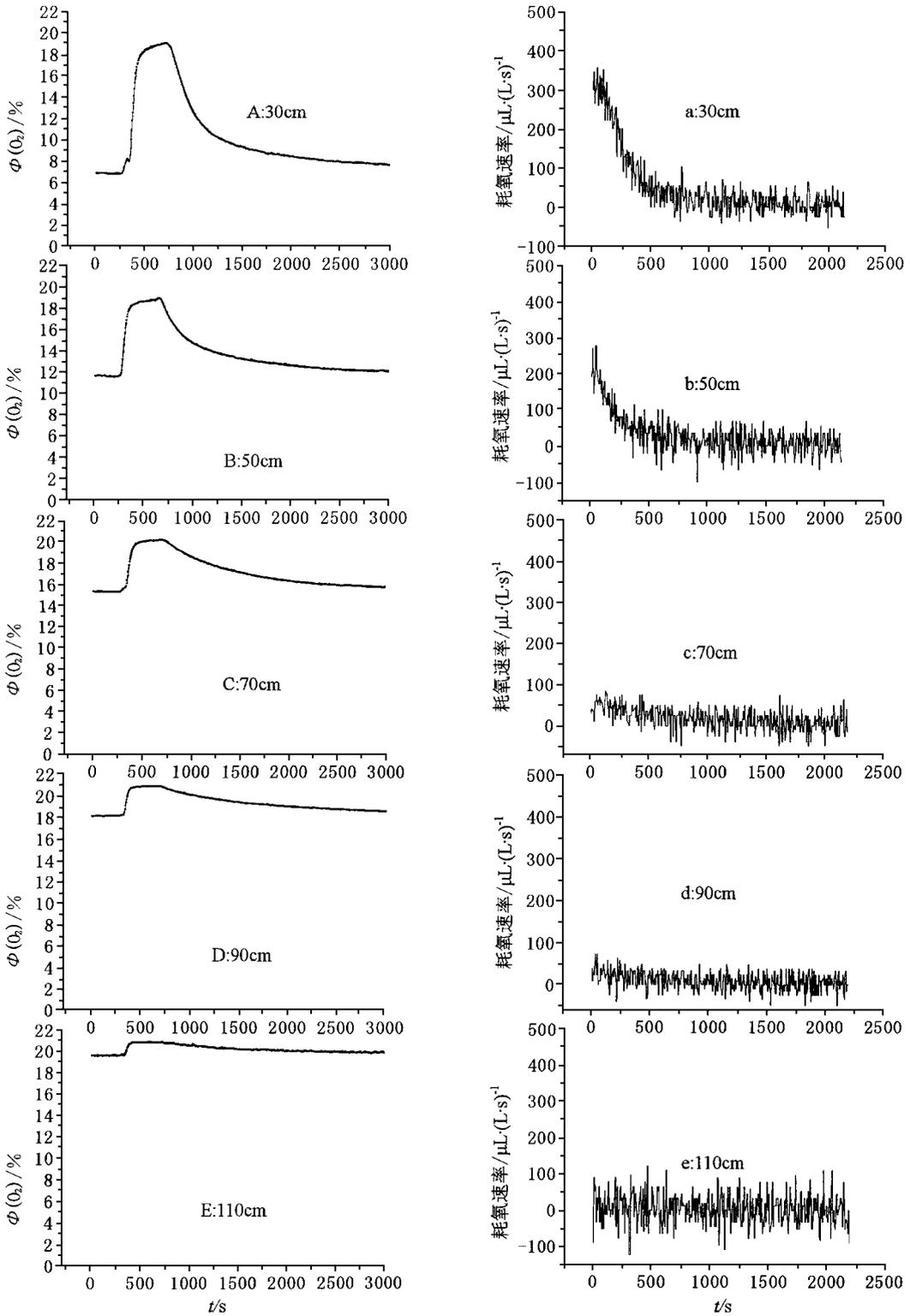


图 3 高温阶段堆体不同深度的氧气浓度(左)和耗氧速率(右)变化

Fig. 3 Variation of O₂ concentration (L) and O₂ consumption rate (R) in different depth of the pile during high temperature stage

5) .同时,由于维持堆体恒温的需要,该阶段通风量大,堆体水分散失较多(图 6),因此,堆体各部位耗氧速率都比较低(图 3a ~ e) .其中,堆体上部耗氧

速率的峰值较中下部高,仍然为 $300\mu\text{L}\cdot(\text{L}\cdot\text{s})^{-1}$ 左右.堆体中、下部耗氧速率小于 $100\mu\text{L}\cdot(\text{L}\cdot\text{s})^{-1}$.堆肥升温阶段和高温阶段前期,堆体中、上部氧气浓度

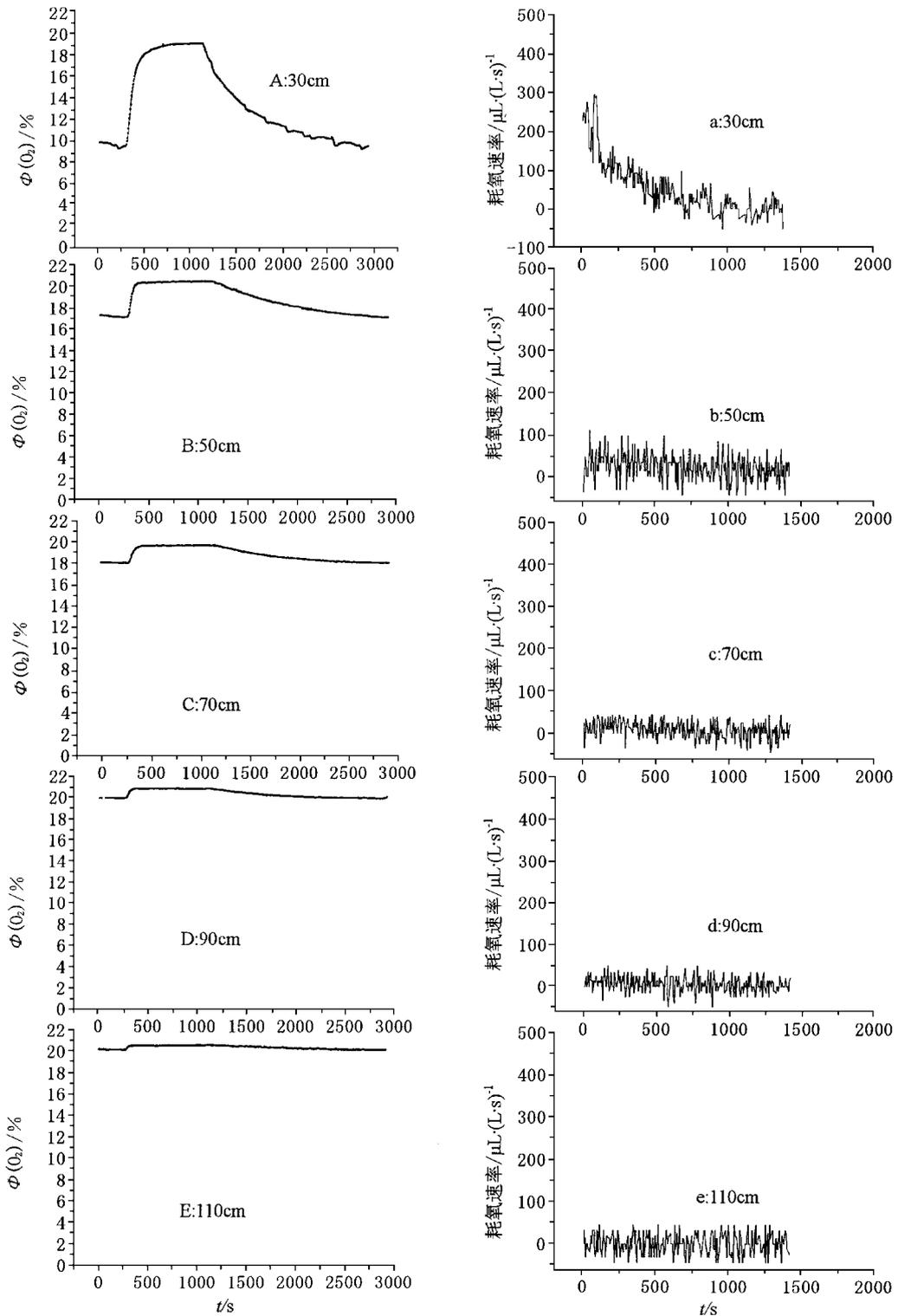


图 4 降温阶段堆体不同深度的氧气浓度和耗氧速率变化

Fig. 4 Variation of O₂ concentration (L) and O₂ consumption rate (R) in different depth of the pile during te mperature decrease stage

相对下部较低,有机质分解速度相对较堆体下部慢,达到堆肥终点的时间相对较长,因此,堆肥高温阶段中后期,耗氧速率的峰值较其它部位高.通风量的加

大,使堆体下部热量散失较多,同时,温度相对较低(表 1),由下向上温度依次升高,这也是造成耗氧速率的峰值由下至上依次升高的原因.

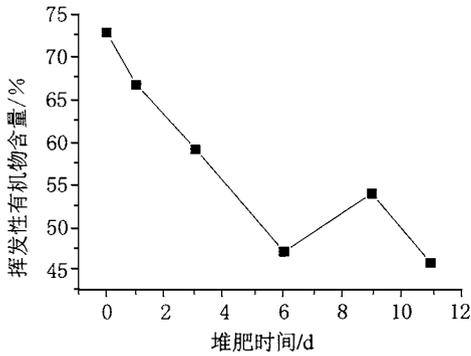


图5 堆肥过程中挥发性有机物(VOC)的动态变化

Fig.5 Variation of VOC during composting

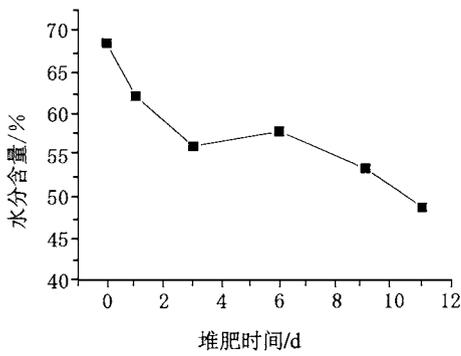


图6 堆肥过程中水分含量的动态变化

Fig.6 Variation of moisture during composting

2.3 降温阶段

堆肥降温阶段,通风前氧气浓度基本上都高于10%,为10%~20%(图4A~E),且氧气浓度自下至上逐渐减小,堆体不缺氧.此时堆体上部温度依然达63℃,但是氧气的消耗亦明显低于前面阶段.通风后,除堆体最上部30cm位置以外,其它部分通风充氧后氧气浓度高于20%.停止通风后,堆体中部和下部氧气浓度减少量很小,70cm以下部位氧气浓度基本没有变化(图4C~E).

该阶段各部位耗氧速率的峰值都较低(图4a~e),除堆体上部外,堆体大部分的耗氧速率低于 $100\mu\text{L}\cdot(\text{L}\cdot\text{s})^{-1}$.虽然堆体上部30cm处温度仍然达63℃,但是与升温期和高温期相比,此时该部位的耗氧速率已经很低,氧气减少的速率也很快,中、下部的耗氧速率均小于 $100\mu\text{L}\cdot(\text{L}\cdot\text{s})^{-1}$.

3 结论

在冬季,猪粪与CTB调理剂1:1的比例下,在不同堆肥阶段,通风充氧后堆体各深度氧气浓度都可以恢复到17%~20.6%,下部氧气恢复到峰值的

时间较上部短,恢复后,氧气浓度较上部高.停止通风后,上部氧气浓度的减小速度比中、下部快,减小后氧气浓度较下部低,随着深度的增加,停止通风后氧气浓度的减少趋势逐渐变缓.随着堆肥的进行,停止通风后经过相同的时间,各部位通风前的氧气浓度值逐渐升高,高温中期以后,中、下部通风前的氧气浓度可以达到10%以上,氧气浓度的减小趋势也逐渐减缓.

堆肥升温期,中部耗氧速率的峰值最高,上部次之,下部最低,这是底部自然通风、氧气扩散的结果.随着堆肥的进行,堆肥高温期至降温期,耗氧速率峰值上移,上部的耗氧速率最高,由上至下逐渐减低.

参考文献:

- [1] Lasaridi KE, Stentiford EI, Szmidt RAK. Biological parameters for compost stability assessment and process evaluation[J]. Acta Horticulturae, 1998, 469: 119~128.
- [2] Frederick C, Michel Jr, Reddy CA. Composting Rate, Odor Production, and Compost Quality In Bench-Scale Reactors[J]. Compost Science and Utilization, 1998, 6(4): 6~14.
- [3] Harper E, Miller FC, Macauley BJ. Physical management and interpretation of an environmentally controlled composting ecosystem[J]. Australian Journal of Experimental Agriculture, 1992, 32: 657~667.
- [4] Iwabuchi K, Nakano Y. Effects of oxygen supply rate and the concentration on composting of dairy manure[A]. ASAE-CSAE-SCGR Annual International Meeting, Toronto, Ontario, Canada: 18~21, July, 1999. ASAE Paper No. 994065.
- [5] Zucconi F, Monaco A, Forte M. Phytotoxins during the stabilization of organic matter[J]. Composting of Agricultural and Other Wastes, 1985, 73~88.
- [6] Iannotti DA, Grebus ME, Toth BL, Madden LV. Oxygen Respirometry to Assess Stability and Maturity of Composted Municipal Solid Waste[J]. J. Environ. Qual., 1994, 23: 1177~1183.
- [7] Bertoldi M, Rutili A, Citterio B, Civilini M. Composting Management: A New Process Control Through O₂ Feedback[J]. Waste Management and Research, 1987, 6: 239~259.
- [8] 黄启飞,黄泽春,高定,郑袁明,郑玉琪,陈同斌.城市污泥堆肥过程中堆体温度的空间变异性研究[J].生态学报,2002, 22(6): 916~921.
- [9] 黄启飞,高定,黄泽春,郑玉琪,李艳霞,陈同斌.鼓风对城市污泥好氧堆肥温度的层次及方位效应[J].生态学报,2002, 22(5): 742~746.
- [10] 陈同斌,黄启飞,高定,黄泽春,郑玉琪,李艳霞.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.
- [11] 高定,黄启飞,陈同斌.新型堆肥调理剂的吸水特性及应用[J].环境工程,2002, 20(3): 48~50.
- [12] 陈同斌.一种用于堆肥的自动控制装置[P].发明专利申请号: CN01120522.9,2001.
- [13] 陈同斌,郑玉琪.一种测量疏松固体介质中氧气含量的装置[P].发明专利申请号: CN01142018.9,2001.
- [14] 陈同斌,郑玉琪.一种连续自动测量疏松固体介质中氧气含量的装置[P].发明专利申请号: CN02130473.4,2001.
- [15] 郑玉琪,陈同斌,高定,黄启飞.堆肥氧气实时在线自动监测系统的开发[J].环境工程,2003, 21(4): 55~57.