

# 城市污泥好氧堆肥过程中积温规律的探讨

陈同斌, 黄启飞, 高 定, 黄泽春, 郑玉琪, 李艳霞

(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:** 对城市污泥好氧堆肥稳定化过程的温热条件进行了探讨, 将物候学中的积温概念应用于堆肥稳定化(腐熟)过程, 它同时兼顾到堆肥过程中的温度强度和持续时间两个参数。对于采用的强制通风静态垛堆肥工艺(CTB 自动控制堆肥工艺), 建议以 15 作为生物学零度, 积温指标为 10000  $^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$  左右。堆肥原料的性质、堆肥工艺、微生物种群、生物学零度、外界环境等因素可能会对积温产生一定影响。

**关键词:** 积温; 城市污泥; 堆肥

## Accumulated Temperature as an Indicator to Predict the Stabilizing Process in Sewage Sludge Composting

CHEN Tong-Bin, HUANG Qi-Fei, GAO Ding, HUANG Ze-Chun, ZHENG Yu-Qi, LI

Yan-Xia (Laboratory of Environmental Remediation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China). Acta Ecologica Sinica, 2002, 22(6): 911~ 915

**Abstract** Accumulated temperature is an important index of the required heat condition during the growth of plant. The accumulated value of daily temperature during the growing period is relatively steady. Like the growing process of plant, the heat condition is also important for the composting process. The two aims of composting process, eliminating pathogen and stabilizing organic matter, all relates to the heat condition. It is necessary to keep the composting process during the moderate temperature for a period of time to complete the stabilizing process.

The species and activity of microorganisms are very important to the stabilizing process. The chemical reaction increases one time more when the temperature increases 10 during the range in which is suitable for microorganisms growth. The high-temperature-short-period reaction and the low-temperature-long-period reaction achieve the approximately stabilizing effect. So the deteminate temperature and the duration during the temperature are all required for the stabilizing process.

The study was carried out to investigate the accumulated temperature during the stabilizing process.

All experimented composting piles were placed in a building in two 1.6m  $\times$  1.0m bays with cement floors and walls. Aeration boards were laid on the bottom of the bays. The piles contained sewage sludge (moisture= 83% ~ 85%, volatile solid= 49% ~ 58%, C/N= 5~ 16, pH= 6.5~ 8.5), recycled compost and bulking agent with six proportions. A bulking agent layer on the aeration boards dispersed air through the 1.0m high mix layer. All piles were covered with a 20 cm insulating layer of recycled compost. Each bay had a aerator to supply air. Sensors were inserted into the geometrical centers of piles to detect the pile temperatures, and the detected values were fed back to the computerized control system. A three-stage control algorithm controlled the damper duty cycle of aerators. The control software logged temperatures every 15 minutes and generated reports. When the composting process was during the temperature-de-

基金项目: 国家“九五”科技攻关资助项目(96-909-01-05)

收稿日期: 2001-09-07; 修订日期: 2002-02-25

作者简介: 陈同斌(1963~), 男, 广西人, 博士, 研究员。主要从事植物修复、废弃物资源化技术和土壤环境保护研究。E-mail: Chentb@igsr.ac.cn

creasing period, the composting maturity was detected every day. When the compost process had completed, the composting time was logged and the index of accumulated temperature was calculated.

The result indicated that a complete composting process was composed of four periods: temperature slowly increasing period, temperature fast increasing period, high temperature period and temperature decreasing period. The temperature developing trends of different treatments, as well as the durations of composting processes, were not complete similar. The composting duration was short when the composting temperature was higher; on the other hand, the composting duration was long when the composting temperature was lower. The required heat conditions of different treatments were similar when the stabilizing process nearly finished.

The indicator of accumulated temperature required for the stabilizing process were calculated using 10, 15 and 20 as the biology zeros, respectively. The statistics of the variance were smaller when using 15 as the biology zero, so it was appropriate to use the value as the biology zero and its index of accumulated temperature was about 10000 · h.

The factors influencing accumulated temperature included the properties of composting materials, composting technics, the biology zero of microorganism and the environment conditions.

The index could be used to define the heat condition required during the composting process and provide the science basis to improve the composting technics. The index could also be used to define the maturity of compost and predict the composting process.

The concept of accumulated temperature in phenology was introduced to composting science to quantitatively analyze the heat condition during the stabilizing process and which included the temperature intensity and the duration. It was verified that the accumulated temperature could be used to predict the stabilizing process of sewage sludge composting. The result should be tested in composting of other organic wastes.

**Key words:** accumulated temperature; sewage sludge; composting

文章编号: 1000-0933(2002)05-0911-05 中图分类号: S141.6, X705 文献标识码: A

早在 1735 年, A. F. 德列奥来尔首先发现, 植物完成一定发育阶段, 虽然经历日数可能不同, 但所需积温比较接近。积温是研究植物生长发育对热量条件的要求和进行热量资源评价的一项重要指标, 植物某个发育阶段内每日温度的累加值是相对稳定的<sup>[1,2]</sup>。

与植物生长过程类似, 堆肥过程是一个微生物发酵过程, 它在本质上是一种酶促生物化学反应系统, 温热条件是其重要参数。堆肥化的两个目的是灭菌和稳定化, 它们都与温热条件有着密切的联系<sup>[3]</sup>。美国国家环保局标准规定, 高温堆肥在 55 以上要维持 3~5d, 我国国家标准规定在 50~55 以上要维持 5~7d, 以达到杀灭病原菌、杂草种子的目的<sup>[4]</sup>。这一标准是基于病原菌热灭活动力学理论建立的<sup>[5]</sup>, 包含了温度强度和持续时间两个因素: 当在某种温度强度下持续一定时间, 就可以保证杀灭病原菌。堆肥在高温下维持一定的时间后, 虽然灭菌过程已达到标准, 但是堆肥的稳定化过程并未完成。之所以在高温灭菌后还要持续进行中温堆肥, 就是为了完成另一个重要的过程: 稳定化。

稳定化过程贯穿于整个堆肥过程, 在中温条件下(30~40)稳定效率最高, 但是其完成时间并没有具体的规定, 一般凭经验判断或将各种复杂腐熟度检测方法相结合来判断。

堆肥的稳定化过程主要是由微生物完成的。在堆肥中存在着各种各样的微生物群落, 其中细菌占主导地位, 真菌、放线菌也有较多的数量<sup>[6,7]</sup>。微生物的群落结构将会随着堆肥不同时期温度的变化而相应变化, 微生物种群在整个堆肥过程中的演替能很好地指示堆肥腐熟程度<sup>[8]</sup>。因此, 微生物的种类和活动情况对于堆肥的腐熟(稳定化)起着至关重要的作用。

不同种类微生物的生长繁殖对温度的要求不同, “三基点温度”(作物生命活动过程中所要求的最适温度以及能忍耐的最低和最高温度)是度量微生物对温度要求的标准。一般而言, 嗜温菌最适宜温度是 30~40, 嗜热菌发酵最适宜温度是 50~60, 过高的温度将会抑制对纤维素等分解能力很强的嗜温菌的活

动<sup>[8]</sup>。以生物为媒介的反应过程,在适合于生物体生长繁殖的温度范围内,温度每升高 10℃,生物的化学反应速率将增加一倍<sup>[5]</sup>。温度和反应速率之间的定量化关系使得温度和反应时间联系起来。对于一定量的反应底物,高温短时间反应和低温长时间反应可以达到基本一致的稳定化效果。因此,堆肥的稳定化过程既要求一定的温度强度,也需要一定的温度总和(温度强度乘持续时间)。

在污泥高温好氧堆肥的高温灭菌过程和稳定化过程中,都要同时兼顾到温度强度和持续时间两个因素。对于高温灭菌过程已经有相关标准,对于稳定化过程却缺乏具体的参数。本文拟探讨污泥好氧堆肥稳定化过程对温热条件的要求。

## 1 材料与方 法

**1.1 试验材料** 城市污泥为北京方庄污水处理厂的脱水污泥,含水率 83%~85%,挥发性有机物含量为 49%~58%,C/N 为 5~16,pH 为 6.5~8.5。堆肥中采用的调理剂(型号 CTB,中国科学院地理科学与资源研究所环境修复室研制)的含水率和饱和含水率分别为 2.70%、65.7%。回流污泥的含水率和挥发性有机物含量分别为 39.1%、38.3%。

**1.2 试验装置** 堆肥池规模为 1.6m × 1.0m × 1.1m。堆肥池底部铺放布气板,布气板上均匀分布着布气孔。试验装置在有关文献中已做详述<sup>[9]</sup>。

**1.3 试验方法** 为了探讨污泥好氧堆肥稳定化过程温热条件一致性的普遍意义,在不同季节都进行了试验。试验共有 6 个处理,其中春季 1 个处理,夏季 1 个处理,秋季 2 个处理,冬季 2 个处理(表 1)。将堆料按设定的比例充分混匀后上堆。在堆体的几何中心设置两支温度传感器,以它们的测定平均值作为堆体的温度。采用中国科学院地理科学与资源研究所环境修复研究室研制的温度变送器及堆肥自动测控软件(Comp soft)集成系统(CTB 堆肥自动测控系统)进行堆温的监测和控制。为使积温数值更加精确、量化,温度数据的采集频率为每 15min 采集一次温度数据。

当堆肥温度处于下降期时,每天采用福木勒法对堆肥腐熟度进行检测<sup>[10]</sup>。当测得的腐熟度指标表明堆肥已经腐熟时,记录堆肥完成时间,并进行积温指标的计算。

表 1 堆肥试验时间及处理

Table 1 Date and treatments of the composting

处理号 Treat- ments	混料比例 Mixing ratio (污泥 回流污泥 CTB 调理剂) (Sewage sludge recycled compost CTB bulking agent)			试验时间 (年-月) Date (YearMonth)
	(Sewage sludge compost)	(recycled CTB bulking agent)	(CTB bulking agent)	
I	2	1	1	1999-11
II	1	0	1	2000-03
III	3	1	2	2000-05
IV	1	0	1	2000-09
V	1	0	1	2001-03
VI	1	0	1.5	2001-03

## 2 结果

### 2.1 污泥好氧堆肥的典型温度曲线

图 1 是各处理的温度变化曲线。在堆肥过程中,由于微生物分解有机物释放热量而使得堆肥温度上升。一般而言,在试验的堆肥系统中,通常在 4d 内可达到 50~60℃。处理 V、VI 的原料初始温度过低,所以升温期较长。堆肥发酵由中温进入高温后,在高温范围内稳定一段时间,堆肥中的寄生虫和病原菌被杀死,腐殖质开始形成,堆肥达到初步腐熟。在降温阶段,由于大部分的有机物在高温阶段已经被降解,因此,堆肥的产热过程小于散热过程,堆肥温度也就降

至中温阶段(30~40℃),这时堆肥产物进一步稳定。

Miller 认为,堆肥温度的上升过程是堆肥起始温度、微生物新陈代谢产热过程及堆体保温效应综合作用的结果<sup>[11]</sup>。图 1 的温度曲线表明,一个完整的堆肥过程是由 4 个堆肥阶段组成的,分别为缓慢升温阶段、快速升温阶段、高温阶段和降温阶段。

对于堆肥稳定化所需的时间目前还没有明确的界限。因为堆肥作为一种改良土壤的物质,其价值部分取决于堆肥中的有机物含量,所以把所有有机物都稳定到变成 CO<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>O 并非最佳选择,当耗氧率降低到所产生的厌氧和发臭情况不致达到妨碍产物贮存和最终使用,就可以认为稳定化程度已满足要求<sup>[12]</sup>。

本试验条件下,当堆肥经过高温阶段(50℃以上 5~7d),堆温处于下降阶段,经过福木勒法检测堆肥达到腐熟则可认为堆肥稳定化过程结束<sup>[10]</sup>。试验结果表明,各个处理在处理时间上存在差异,温度升降的变化过程也不完全相同,但是各个处理的温度一般要经过 4 个阶段,而且堆肥温度较高的处理,堆肥时间短,

堆肥温度较低的处理,堆肥时间较长(图1),在一定温度范围内经过一定的处理时间,堆肥稳定化过程就可以完成。这表明,对不同的处理,尽管温度的升降情况变化不一,而且堆肥稳定化所需时间的长短不一,但达到稳定化所需要的温热条件可能较为一致。

### 2.2 积温规律的探讨

在物候学上,每种植物都有一个开始发育的下限温度,称为这种植物的生物学零度。高于生物学零度的日平均温度称为活动温度,低于生物学零度的日平均温度对植物发育没有作用,不予考虑。如果日平均温度正好等于生物学零度,计算中取零值。将植物发育时期内大于生物学零度的日平均温度,即活动温度累加起来就是活动积温。活动温度与生物学零度的差值是对植物发育有效的部分,称有效温度,其逐日的差值累加起来就是有效积温。净有效积温是植物在某时段内生物学零度和有效温度上限之间温度的累积值<sup>[13]</sup>。将有效积温的概念引用到堆肥反应过程中,用以下公式计算有效积温:

$$T = \sum(T_i - T_0) \times \Delta t \tag{1}$$

$T_i$  为  $i$  时刻的堆温,  $T_0$  为堆肥中微生物大量繁殖时的起始温度(生物学零度)。  $\Delta t$  为  $T_i$  持续的时间。Moshier 和 Anderson 研究认为,当堆肥物料的温度低于 20 ,堆肥过程将显著变慢甚至停止<sup>[14]</sup>。从试验结果(处理 V、VI)可以看出,当堆肥温度在 10 以下时,堆肥温度增长缓慢,当超过 10 时,堆肥温度增长迅速,因此,对于本试验的原料,将  $T_0$  值分别设 10、15、20 进行计算。由公式(1)计算所得结果如表 2。

表 2 污泥好氧堆肥的有效积温

Table 2 The available accumulated temperature of composting

	有效积温 ( · h)						均值 Mean	方差 Variance	变异系数(%) Variety coefficient
	A available accumulated temperature								
	I	II	III	IV	V	VI			
$T_{10}$	12565	12241	12132	11251	11407	12752	12058	608	5.0
$T_{15}$	10948	10496	10552	10186	9515	10914	10435	532	5.1
$T_{20}$	9332	8751	8972	9121	7744	9202	8853	579	6.5

结果表明,  $T_{10}$ 、 $T_{15}$ 、 $T_{20}$  变异性都较小,  $T_{15}$  的方差较小,因此以 15 作为堆肥反应的生物学零度,以此种条件下堆肥的积温来衡量堆肥稳定化过程的温热条件。在本试验所采用的工艺和规模条件下,积温指标的平均值为 10435 · h。这一参数在堆肥过程中有着重要的意义,当堆肥堆体代表部位的积温达到 10000 · h 左右时,可以认为堆肥稳定化过程基本完成。

### 2.3 讨论

本研究提出的堆肥“积温”概念,可作为判定堆肥稳定化过程是否完成的指标,同时也为堆肥原料的预处理及工艺改进提供科学依据。将堆肥所需的积温作为一个特定工艺的腐熟度参考指标,根据堆肥过程中温度的自动监测和积温的自动计算,可以实时在线地监测和预报堆肥稳定化过程(腐熟过程)的进程。

堆肥稳定化过程的积温指标是在一定前提条件下计算求得的一个经验参数,只有在其它条件相对固定的条件下,温热条件对堆肥稳定化过程的主导作用才明显地显示出来。实际上,外界环境条件是在不断变化的,堆肥系统自身对温度也有一定的缓冲能力,所以积温的稳定性是相对的。堆肥原料的性质、堆肥工艺、微生物种群、生物学零度、外界环境可能是影响积温稳定性的主要因素。

堆肥原料有机物含量及其性质是影响堆肥过程中热量产生的重要参数,污泥的热值与污泥中挥发性有机物的含量成正比<sup>[12]</sup>。堆肥原料的其它理化性质如颗粒度、碳氮比(C/N)、pH 等对于微生物的活性均有影响,因此堆肥原料的性质对积温指标有一定的影响。

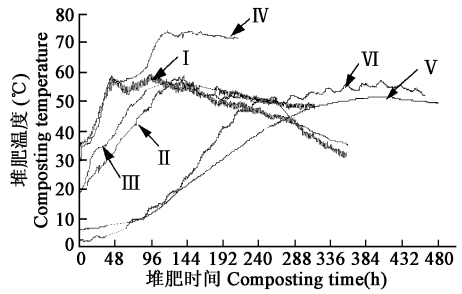


图 1 污泥好氧堆肥温度曲线

Fig 1 Temperature dynamics of sewage sludge composting  
I ~ VI treatments see table 1

堆肥工艺是影响堆肥温热条件的内因,不同堆肥工艺所需的处理时间长短不一。堆肥工艺中人为可控因素一般为混料比和通风控温过程,这些工艺参数通过影响堆体的热量平衡对积温产生影响。

微生物是堆肥过程的产热者,生物学零度与堆肥中微生物种群的性质有关,当堆肥原料性质和微生物的种群差别不太大时,在理论上生物学零度是一个相对固定的数值,通过本试验建议将好氧堆肥过程中生物学零度的经验值定为 15。环境的温度、湿度、风力等气象因素也会影响堆体的辐射和传导过程,虽然现代堆肥工艺对于堆体的保温性能都给予足够的重视,但是堆体不断与外界环境进行能量和物质交换,外界环境因素对于积温指标也可能会产生或多或少的影响。

将物候学上积温的理论和计算方法引入堆肥科学,目前还存在不少需要完善的地方。例如它只考虑一个堆肥生物学零度作为起始温度,实际上微生物种类不同,生长发育阶段不同,其生物学零度是不相同的。堆肥科学上普遍认为嗜热菌最适宜温度是 30~40,嗜热菌发酵最适宜温度是 50~60,因此不同的温度范围内,不同优势微生物的生物学零度存在较大差异。鉴于问题的复杂性,本文没有对微生物的生物学零度进行分段讨论,所设定的生物学零度是个平均值。其次,在积温的计算过程中应该考虑上限温度,因为堆肥温度过高往往抑制或损害微生物的生长,当堆肥温度上升到 70 以上时则几乎对所有微生物均有抑制作用。试验采用的 CTB 堆肥控制系统中,由于采用的实时温度监测和反馈控制,堆肥温度控制在 60 以下,因此不会出现温度过高的问题。虽然某些堆肥工艺的积温指数很高,但由于极端高温的限制,仍难以满足稳定化的要求。所以,在堆肥科学中积温概念在理论和方法上均需研究完善。

### 3 结论

不同季节和不同混料比例的试验结果证明:尽管污泥堆肥的条件各不相同,但堆肥达到稳定化所需积温却相对稳定。对于本试验采用的强制通风静态堆肥工艺(CTB 自动控制堆肥工艺),建议以 15 作为生物学零度,积温指标为 10000 · h。堆肥积温可以作为污泥高温好氧堆肥过程中兼顾温度强度和持续时间的重要参数,在堆肥稳定化过程温热条件确定、堆肥进程的预报及腐熟度的确定方面都有广泛的用途。

### 参考文献

- [1] Zhang J C (张家诚). *The Climate Pandect of China* (in Chinese). Beijing: Meteorology Press, 1991.
- [2] Hou H S (侯宏森), Qi L F (齐来福) and Wang M X (王茂新). *The Newly Edited Handbook of Agriculture Climate* (in Chinese). Beijing: Agricultural Press, 1985.
- [3] Finstein M S, Miller F C, Strom P F. Waste treatment composting as a controlled system. *Biotechnology*, 1986, 8(3): 396~443.
- [4] China Environmental Protection Agency (国家环保局). *The Managing and Disposing Technologies of Municipal Solid Waste* (in Chinese). Beijing: Petrochemical Industry Press, 2000.
- [5] Cai J C (蔡建成). *Composting Engineering and Plant* (in Chinese). Beijing: Machine Industry Press, 1990.
- [6] Finstein M S, Morris M L. Microbiology of municipality solid waste composting. *Advances in Applied Microbiology*, 1975, 19: 113~151.
- [7] Kane B E, Mulins J T. Thermophilic Fungi in a Municipal Waste Compost System. *Mycologia*, 1973, 65(5): 1087~1100.
- [8] Li G X (李国学), Zhang F S (张福锁). *Solid Waste Composting and Production of Organic Fertilizer* (in Chinese). Beijing: Chemical Industry Press, 2000.
- [9] Chen T B (陈同斌), Huang Q F (黄启飞), Gao D (高定), et al. Temperature dynamic during the sewage sludge composting process. *Acta Ecologica Sinica* (in Chinese) (生态学报), 2002, 22(5): 736~741.
- [10] Zhang F S (张福锁). *The Progress in Soil and Plant Nutrition* (in Chinese) (Vol 3). Beijing: Agricultural Press, 1995.
- [11] Miller F C. Composting as a process based on the control of ecologically selective factors. In: Blaine Metting F ed. *Soil Microbial Ecology: Applications in Agriculture and Environmental Management*. New York: Marcel Dekker, 1992. 352~376.
- [12] Haug R T. *The Practical Handbook of Compost Engineering*. Florida: Lewis Publishers, Boca Raton, 1993.
- [13] Lu D H (陆鼎煌). *Meteorology and the Forest Meteorology* (in Chinese). Beijing: Forest Press, 1994.
- [14] Mosher D, Anderson R K. *Composting sewage sludge by high-rate suction aeration techniques—the process as conducted at Bangor, ME, and some guides of general applicability*. Washington: United States of America Government Printing Office, 1977.