

城市污水厂污泥快速高效堆肥技术研究

李宇庆¹, 陈玲¹, 赵建夫¹, 许民¹, C. Paul Lo²

(1. 同济大学污染控制与资源化研究国家重点实验室, 上海 200092; 2. School of Public Health and Tropical Medicine Department of Environmental Health Sciences, Tulane University, New Orleans, LA)

摘要: 采用好氧发酵仓式堆肥系统, 研究了城市污泥处理过程中温度、含水率、pH、有机质、水溶性有机碳和发芽指数等指标参数的变化规律。结果表明, 当物料初始含水率控制在 60% 左右时, 在强制通风量为 $300\text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$, 搅拌频率为 $5\text{ min} \cdot 8\text{ h}^{-1} \sim 5\text{ min} \cdot 12\text{ h}^{-1}$ 的工艺条件下, 堆肥过程可以实现顺利升温并在 $55\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上维持 4 d, 满足杀灭致病菌要求的条件; 14 d 反应周期结束时, 物料含水率、水溶性有机碳和有机质含量显著降低, 堆肥产品腐熟, 卫生学指标达到了美国 EPA 污泥产品 A 类标准; 得到的污泥产品成为性质优良的土壤质量调节剂。

关键词: 污泥; 堆肥; 调理剂; 强制通风

中图分类号: X703.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2043(2005)02-0380-04

Rapid and High – Efficiency Composting of Sewage Sludge

LI Yu-qing¹, CHEN Ling¹, ZHAO Jian-fu¹, XU Min¹, C. Paul Lo²

(1. State Key of Pollution Control and Resource Reuse, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. School of Public Health and Tropical Medicine Department of Environmental Health Sciences, Tulane University, New Orleans, LA)

Abstract: A great deal of municipal sludge has been producing annually, and its components are very complex. How to stabilize and dispose the sewage sludge harmlessly is becoming more and more enormous challenge. The changes of chemical parameters, such as temperature, moisture, pH, organic matter, water soluble organic carbon and germination index during the composting process were studied in the present investigation. The optimal technological conditions for composting were evaluated. We have found that the water content of initial materials, forced ventilation volume and mixing frequency were 60%, $300\text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ and $5\text{ min} \cdot 8\text{ h}^{-1} \sim 5\text{ min} \cdot 12\text{ h}^{-1}$, respectively. The results indicated that the temperature could reach $55\text{ }^{\circ}\text{C}$ rapidly and lasted 4 days, suggesting that the conditions were able to fulfil the demand of sterilizing. Furthermore, the water content, water soluble organic carbon (WSOC) and organic matter reduced significantly during the composting process. In addition, the composing products in 14 days were almost mature, and could meet the class A hygienic standard of US EPA. The obtained composting products certainly become better regulator for soil fertility.

Keywords: sludge; composting; amendment; forced ventilation

城市污泥是指城市生活污水、工业废水处理过程中产生的固体废弃物, 是城市污水处理厂的经常性产物。自 1857 年在英国伦敦建立世界上第一个污水处理厂以来, 污泥的处理问题一直是市政管理中的重要问题之一。目前世界年产污泥量已超过 1 亿 t(干污

泥), 我国排放干污泥约为 667 万 t。根据国家环境保护“十五”计划, 到 2005 年, 我国城市生活污水集中处理率要达到 45%, 50 万人口以上的城市要达到 60%; 到 2010 年, 所有城市的污水处理率不得低于 60%, 直辖市、省会城市、计划单列市和风景旅游城市的污水处理率不得低于 70%。据 2003 年中国环境状况公报, 全国工业和城镇生活污水年排放总量为 460.0 亿 t。建设部有关部门统计数据表明, 2000 年全国有城市污水处理厂 427 个, 2003 年增加到 612 个, 目前我国城市污水处理率为 42%。因此, 随着污水处理量的提高和处理程度的深化, 污泥的产生量必将有

收稿日期: 2004-07-15

基金项目: 上海市科委清洁生产重大项目-城市污水厂污泥综合利用成套技术与示范(02DZ12101)

作者简介: 李宇庆(1976—), 男, 江苏无锡人, 同济大学环境科学与工程学院在读博士研究生。E-mail: yvqinglee@163.com

联系人: 陈玲

较大的增长,如何合理地处置污水厂污泥,解决大量污泥的出路已成为非常紧迫的任务。污泥堆肥与其他处理方法(如填埋、焚烧)相比,具有建设投资少、运行费用低、无二次污染等优点,适合于我国国情。本研究针对好氧发酵仓式堆肥系统,研究了城市污泥堆肥过程中温度、含水率、pH、有机质、水溶性有机碳(Water Soluble Organic Carbon, WSOC)、发芽指数(Germination Index)等指标参数的变化规律,以利于进一步优化该堆肥工艺参数和提出合理的腐熟度评价指标。

1 材料与方法

1.1 污泥堆肥试验装置

根据污泥好氧堆肥处理的要求,采用的反应器如图 1 所示。进风口采用空气泵强制通风,出风口采用三通,便于气体采样和排除冷凝水。该反应装置具有可控制时间的搅拌混合和外加加热功能。

1.2 堆肥原料及堆料配比

(1)堆肥原料:选取上海市某水质净化厂内的脱水污泥作为研究对象。该厂主要处理生活污水(约



图 1 污泥堆肥反应器示意图

Figure 1 Diagram of the composting reactor for sludge

90%),另外还有少量食品加工废水(约 10%),采用普通活性污泥法处理,剩余污泥采用阴离子混合型絮凝剂调节后带式压滤脱水,污泥含水率在 80%左右。基本性质参数见表 1 所示。

(2)堆肥调理剂:本试验所选调理剂为木屑,含水率约 15%,有机质约 84%。根据堆料的含水率控制要求,通过物料衡算(以堆料含水率控制为依据)确定污泥与木屑的质量比,并加入一定量的回流污泥,使搅拌后的初始物料含水率在 60%左右,同时加入适量的强化菌剂。本研究采用的堆料组成和工艺运行参数见表 2。

表 1 某污水厂污泥的基本性质

Table 1 Physical and chemical properties of sludge from a factory

指标	数值	指标	数值	指标	数值
含水率/%	80±4	C/N	8~10	pH	6.5~7.0
挥发性固体/%	50~60	水溶性总氮/g·kg ⁻¹ DM	3.0~6.0	有机质/g·kg ⁻¹ DM	500~700
残渣/%	20	总油/g·kg ⁻¹ DM	55~60	优先控制污染物	ND
大肠杆菌/MPN·g ⁻¹ DM	≥24 000	Zn/mg·kg ⁻¹ DM	1 652.7	Cd/mg·kg ⁻¹ DM	17.4

注:DM 为干物质;ND 为未检出。

表 2 堆料组成和工艺运行参数

Table 2 Components of the composting materials used and processing parameters

工况编号	原泥	调理剂	强化菌剂	回流物料	初始含水率	强制通风量	搅拌
1	100 kg	20 kg	15 mL	40 kg	59.0%	300 L·min ⁻¹	5 min·12 h ⁻¹
2	100 kg	25 kg	15 mL	40 kg	58.3%	300 L·min ⁻¹	5 min·8 h ⁻¹

1.3 采样和分析方法

采样时间在堆肥试验开始的第 1~14 d,每天采样 1 次,每次采样约 1 kg。采用多点混合法,将采集的样品混匀后,装入干净的密封袋中,部分新鲜样品在 4℃冰箱内保存,24 h 内分析完毕;另一部分样品平铺在托盘中自然风干,研磨过筛后进行分析,样品各化学指标的分析方法见表 3。

1.4 发芽试验

发芽试验目前常用的两种方法是干样法和湿样法,其中湿样法因简单、快捷而较为常用,该方法已被意大利政府用作评价有机废物和粪便堆肥腐熟度的标准^[1,2]。本研究采用湿样法,具体方法为:新鲜样品与蒸馏水按 1:10(质量:体积)比例混合振荡 2 h,浸提液在 5 000 r·min⁻¹下离心分离 20 min,上清液经滤

表 3 堆肥过程化学指标及其分析方法

Table 3 Chemical indicators and analytical method for the composting process

化学指标	测试条件	仪器和分析方法	样品
含水率/%	105℃下 24 h	减重(DHG-9030A 型电热恒温鼓风干燥箱)	鲜样
pH	1:10 蒸馏水浸提	玻璃电极(pHS-3)	风干样
有机质 VS/%	550℃灼烧 4 h	KSW-4-12 型马福炉	烘干样
水溶性有机碳	1:10 蒸馏水浸提	TOC-VCPN 测定仪,SHIMADZU(日本)	风干样

纸过滤后待用,将一张滤纸置于干净无菌的 9 cm 培养皿中,滤纸上整齐摆放 10 粒 F1 代华王青梗菜种子(日本进口),准确吸取 3 mL 滤液于培养皿中,在 25 ℃,暗箱中培养 48 h,每个样品做 3 个重复,并同时用去离子水作空白对照,发芽指数 GI(Germination Index)可由下式计算:

$$GI = \frac{\text{样品发芽数} \times \text{样品根长度}}{\text{对照发芽数} \times \text{对照根长度}} \times 100\%$$

2 结果与讨论

2.1 堆肥过程中温度的变化

堆料中的有机质在微生物的作用下用于其细胞合成,同时分解为 CO₂ 和水,在此过程中产生大量的热量使堆体温度上升。因此,温度是堆肥得以顺利进行的重要因素。一般认为,堆体温度在 55 ℃ 条件下保持 3 d 以上(或 50 ℃ 以上保持 5~7 d),可以杀灭堆料中所含病原菌,满足堆肥卫生学指标和堆肥腐熟的要求^[3,4]。本试验堆肥温度变化如图 2 所示,堆肥开始后温度上升迅速,1 d 后即可达到 55 ℃,55 ℃ 以上维持了 4 d。高温期阶段过后,随着易降解有机物质的逐渐耗尽,微生物活动无法产生足够热量,堆体温度逐渐降低,13 d 后接近或降至环境温度。工况 1 和工况 2 前 6 d 温度曲线基本相近,但第 7 天开始出现较大差别,工况 2 堆体温度下降缓慢,而工况 1 温度急剧下降,究其原因:主要与工况 2 木屑含量较高,能够为反应后期生物反应提供充足的碳源有关;当然工况 2 平均气温比工况 1 高 9 ℃ 左右也是原因之一。堆肥结束时,物料重量大大降低,如工况 1 物料由开始时的 160 kg 降为 75.6 kg,减少 50% 以上。此时,污泥产品结构松散,颜色逐渐从初期的黑色变成黄褐,臭味消除,并呈泥土气味。

2.2 堆肥过程中含水率的变化

堆肥过程中有机物氧化产生 CO₂ 和水,同时微生物生物反应产生大量的热,水分以水蒸气的形式通过

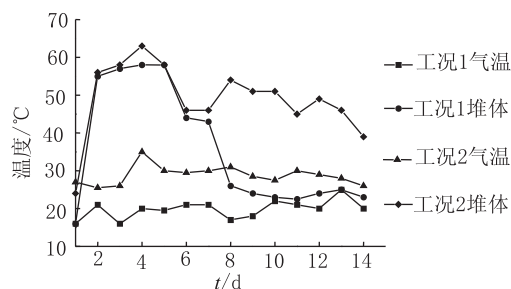


图 2 堆肥过程中温度随时间的变化

Figure 2 Dynamic temperatures vs times during the composting process

通风和搅拌而蒸发,含水率的变化是这两方面因素综合的结果。图 3 是试验所得的堆肥含水率和 pH 随时间的变化曲线,堆肥含水率分别从初期的 59.0% 和 58.2% 下降到了堆肥周期结束时 31.2% 和 40.1%,含水率降低十分显著,这说明所采用的堆肥工况是合理的。

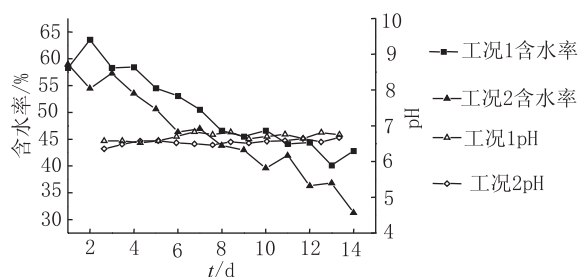


图 3 堆肥过程中含水率和 pH 随时间的变化

Figure 3 Dynamic water contents and pH values vs times during the composting process

2.3 堆肥过程中 pH 值的变化

根据美国环保局 (USEPA) 的规定,污泥与调理剂的 pH 值应在 6~9 之间^[5]。适宜的 pH 值可使微生物有效地发挥作用,保留堆料中有效氮成分,pH 值过高或过低都会影响堆肥的效率。堆肥过程中,堆料中的含氮有机物分解后产生氨气会导致 pH 值升高,而当有机酸产生时则会导致 pH 值下降。而图 3 表明本试验中 pH 值变化基本维持在中性范围内,不需对堆料的 pH 值进行调整。

2.4 堆肥过程中 WSOC 和 VS 的变化

微生物不能直接利用堆料中的固相成分,需通过微生物分泌胞外酶将堆料中的可降解成分水解为水溶性成分才能加以利用。通过研究水溶性成分的变化,可以判断堆肥的腐熟度。图 4 是堆肥过程中 WSOC 和 VS 随时间变化的情况。在高温期内,由于微生物的大量繁殖,堆料中的纤维素、蛋白质等有机大分子物质在胞外酶的作用下发生水解,转化为小分子的糖类、有机酸、氨基酸、肽、酚类等,故 WSOC 含量有所升高;随着这些易降解有机质被微生物合成自身物质及转化为 CO₂ 和水,WSOC 含量逐步降低,堆肥后期 WSOC 略有上升,这可能由于污泥中部分非水溶性有机质在堆肥腐熟阶段经过降解转化为水溶性有机质造成的。整个堆肥过程结束时,工况 1 和工况 2 的 WSOC 分别下降了 54.3% 和 48.2%。

从图 4VS 的变化曲线可以看出,VS 随堆肥的进行而逐渐下降,降解主要发生在高温期。VS 下降主要是由于易生物降解有机物转化为 CO₂ 和 H₂O 的缘

故,在整个堆肥过程中 VS 下降了 10.0%;从整个堆肥过程来看,WSOC 的降解率要高于 VS。由此可见,污泥堆肥过程中水溶性有机碳组成与结构的变化较之固相组分 VS 更能灵敏地反映堆肥腐熟状况。

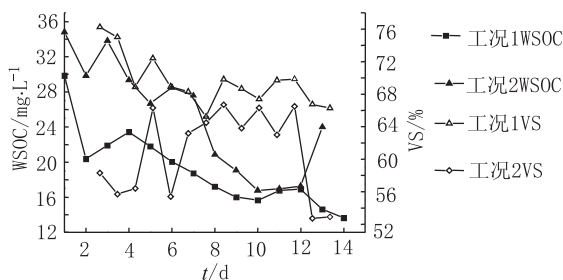


图 4 堆肥过程中 WSOC 和 VS 随时间的变化

Figure 4 Dynamic water soluble organic carbon (WSOC) and volatile substances (VS) vs times during the composting process

2.5 堆肥过程中 GI 的变化

种子发芽指数是通过测试堆肥浸出液的生物毒性来评价污泥堆肥的腐熟度。一般认为,污泥湿样品发芽指数大于 50% 即表明该堆肥产品已达到腐熟^[2,6]。本试验选择灵敏度较高、发芽时间短的 F1 代种子华王青梗菜(日本进口)进行污泥堆肥的发芽试验,图 5 表明了堆肥过程中 GI 的变化规律。从总体上来看,工况 2 污泥堆肥发芽指数先降低后升高,在第 5 d 时发芽指数达到最低点。分析认为,这时污泥堆肥处于高温期,会产生一定量的 NH_4^+ 和有机酸、醛类等物质^[7],这些物质对种子发芽可能产生一定的抑制作用。Zucconic 等^[2]也发现能明显抑制种子发芽的物质主要出现在高温期。随着堆体温度的降低, NH_4^+ 和有机物浓度的亦逐渐降低,堆肥对种子发芽的生物抑制作用降低,GI 逐渐升高。至堆肥结束时,发芽指数可达 60% 左右,这表明 14 d 后污泥堆肥达到腐熟。而工况 1 经 14 d 后堆肥出料 GI 达 69%。

2.6 卫生学指标

美国 EPA 将污泥产品规定为 A/B 两类,其中 B 类(76%)主要用于非食物链的使用,A 类(12%)可以

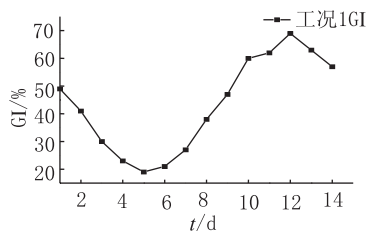


图 5 堆肥过程中发芽指数随时间的变化

Figure 5 Dynamic germination index vs times during the composting process

装袋销售和进行农业利用。但 EPA 严格规定 A 类产品必须进行附加病原体去除工艺,要求 A 级产品中的粪便大肠菌浓度 $<1\,000\text{ MPN} \cdot \text{g}^{-1}\text{DM}$,沙门氏菌浓度 $<3\text{ MPN} \cdot 4\text{g}^{-1}\text{DM}$,侵入性病毒 $<1\text{ PFU} \cdot 4\text{g}^{-1}\text{DM}$,蛔虫卵 $<1\text{ 个} \cdot 4\text{g}^{-1}\text{DM}$ 。本研究获得的堆肥产品经上海市杨浦区疾病预防控制中心分析,大肠菌群降低到 $0.5\text{ MPN} \cdot \text{g}^{-1}\text{DM}$,蛔虫卵杀灭率达 100%,未发现沙门氏菌等致病细菌,污泥堆肥产品所有卫生学指标均能达到美国 EPA 规定的 A 级污泥农用标准。

3 结论

(1) 通过试验研究,获得城市污泥快速高效好氧堆肥合理配料比为:

污泥:木屑:回料:VT 菌剂 = 100 kg: (20 ~ 25) kg: 40 kg: 15 mL

相应的工艺参数为:强制通风量 $300\text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$,搅拌频率 $5\text{ min} \cdot 8\text{ h}^{-1} \sim 5\text{ min} \cdot 12\text{ h}^{-1}$,反应周期 14 d。在此条件下,好氧堆肥过程可以实现顺利升温,堆肥高温期(55℃以上)持续了 4 d,14 d 后堆料基本腐熟,卫生学指标达到了美国 EPA 污泥产品 A 类标准。

(2) 堆肥物料初始含水率的高低,直接影响着好氧堆肥的速度和质量,甚至关系到整个堆肥过程的成败,本试验表明,将堆肥初始含水率控制在为 60% 左右较为适宜。

(3) 污泥堆肥过程中,含水率、有机质、水溶性有机质明显降低;pH 值的变化基本维持在中性范围内;反应周期结束时,堆肥产品的发芽指数达到 60% 左右,表明其 14 d 内基本达到腐熟,实现了城市污水厂污泥的快速、高效好氧堆肥。

参考文献:

- [1] 杨国义,夏忠文,李芳柏,等. 不同填充剂对猪粪堆肥腐熟过程的影响[J]. 土壤肥料,2003(3):29-33.
- [2] Zucconi F, Pera A, Forte M, et al. Evaluating toxicity of immature compost[J]. *Biocycle*, 1981, (22): 54-57.
- [3] GB7959-87, 中华人民共和国粪便无害化卫生标准[S].
- [4] USEPA, A plain English Guide to the EPA Part 503 Biosolids Rule. EPA/8322/R-93/003, 1994.
- [5] Design Manual Number 44: Composting of municipal wastewater sludge. WWBLDM44, US EPA 625/4-85/014, August 1985.
- [6] 田 扬,柳丽芬,张兴文,等. 秸秆与污泥混合堆肥研究[J]. 大连理工大学学报,2003,43(6):753-758.
- [7] Wong M H. Phytotoxicity of refuses compost during the process of maturation[J]. *Environmental Pollution (Series A)*, 1985, (40): 127-144.