

城市垃圾堆肥原理与工艺

陈世和 张所明

复旦大学出版社

城市垃圾堆肥原理与工艺

陈世和 张所明 编著

复旦大学出版社

内 容 提 要

本书系统介绍固体废物的堆肥化处理技术和国内外堆肥工艺。全书分七章，内容包括：堆肥的基本概念及原理；堆肥工艺、设备及影响因素；堆肥的物料平衡和热平衡；堆肥反应的过程控制和腐熟度；堆肥质量和利用；堆肥辅助机械和堆肥厂的环境影响及效益。

本书适用于广大环境保护、环境卫生科研人员、工程设计人员、管理人员参考，可用作有关院校《堆肥原理与工艺》课程的教材。

城市垃圾堆肥原理与工艺

张所明 编著

复旦大学出版社出版

(上海国权路 579 号)

新华书店上海发行所发行 复旦大学印刷厂印刷

开本 787×1092 1/32 印张 7 字数 149,000

1990 年 7 月第 1 版 1990 年 7 月第 1 次印刷

印数 1—2,000

ISBN7-309-00467-1/X·01

定价：2.45 元

前 言

人类社会的发展，特别是近百年来大工业的发展和科学技术的突飞猛进，促使人们越来越关心自己生存的环境，越来越关心我们人类对生态的保护。密集的大工业和不断增长的城市人口产生的大量废物远远地超过了大自然的自净能力，从而破坏了大自然的生态平衡，干扰了人们的正常生活，严重地污染了环境。城市生活垃圾就是其中之一。

城市生活垃圾主要包括城市居民日常生活中产生的厨余垃圾、商业垃圾、道路清扫和少量的建筑垃圾等。

城市生活垃圾成分十分复杂，主要包括有机物和无机物两大类。有机物如纸、蔬菜、水果皮、泔脚、木屑、塑料等，无机物如金属、玻璃、陶瓷、砂石、炉灰等。垃圾中含有大量的细菌、病毒、寄生虫卵、杂草种子，甚至含有毒性的化学物质，它又是微生物生长繁殖的温床、蚊蝇的孳生地，也是疾病传播的媒介。如果管理不当，往往会造成地下水、地表水和大气严重污染，从而影响环境和人体健康。

城市生活垃圾产生量大，污染严重。据统计，我国目前城市生活垃圾的平均产生量，每人每天为 0.7~1 千克，即 100 万人口的城市每天约产生 700 吨左右的生活垃圾。而且，随着城市人口的增加、市场的开放和人们消费活动的强化，我国城市的生活垃圾正在增加。1980 年我国城市垃圾总清运量为 3132 万吨，而 1985 年的清运量就增长了一倍

多，达到6395万吨。

目前，我国城市的生活垃圾基本上未进行无害化处理。大量的垃圾被直接排入市郊，堆弃裸却于坑洼沟塘之中，甚至倾入江河湖海。这种落后而不文明的处理方式是造成城市脏乱差的重要原因，不能适应现代化城市的建设要求。当前，我国各大中城市都面临着垃圾严重污染；合理处理垃圾是一项重要的研究课题，具有很大的实践意义。

堆肥化处理技术具有悠久的历史，尤其在近代，围绕处理城市垃圾和污泥等固体有机废物，堆肥化技术得到了很大的发展。目前，高速机械化堆肥技术在发达国家已得到普遍应用。围绕这一工艺技术，各国研制了许多专用设备。这些设备以提高处理率和防止二次污染为主要出发点，已在世界范围内得到了推广应用。吸取了发达国家成功的经验，我国自70年代末以来，围绕着城市生活垃圾无害化处理，对高温好氧堆肥的工艺和技术进行了大量的研究和实践工作。

本书是作者多年来在从事城市生活垃圾高温好氧堆肥技术研究和实践的基础上编著而成，其目的在于为“城市垃圾堆肥原理与工艺”课程提供合适的教材，同时给广大研究和工程设计人员有关堆肥化技术较为全面和系统的知识，从而促进和提高我国城市垃圾无害化处理的技术水平。

由于编者水平有限，书中难免有错误和不足，疏漏之处敬请读者批评指正。

陈世和

1989年8月于上海

目 录

第一章 堆肥的基本概念及原理	1
第一节 堆肥化定义及其发展历史.....	1
第二节 堆肥的基本概念及原理.....	3
第三节 堆肥微生物和堆肥过程动力学模型.....	7
第二章 堆肥工艺、设备及影响因素	16
第一节 堆肥原料和分类.....	16
第二节 堆肥程序和影响因素.....	19
第三节 堆肥发酵装置.....	25
第四节 堆肥工艺实例.....	42
第三章 堆肥的物料平衡和热平衡	62
第一节 堆肥的物料平衡.....	62
第二节 堆肥的热量平衡.....	74
第四章 堆肥反应的过程控制和腐熟度	78
第一节 堆肥化反应速度.....	78
第二节 堆肥的过程控制.....	81
第三节 堆肥的腐熟度及其测定.....	108
第五章 堆肥质量和利用	121
第一节 堆肥产品成分和分类.....	121

第二节	堆肥质量标准	123
第三节	堆肥的理化作用	124
第四节	堆肥的利用	127
第六章	堆肥辅助机械	131
第一节	计量装置	131
第二节	存料区与贮料池	132
第三节	给料装置	133
第四节	堆肥厂内运输与传动装置	134
第五节	铁金属和其它可回收物资的分选设备	146
第六节	堆肥发酵装置及辅助设施	149
第七节	筛选设备	151
第八节	破碎设备	156
第七章	堆肥厂的环境影响和效益	161
第一节	堆肥厂的环境影响	161
第二节	堆肥厂的效益	170

附 录

- I. 垃圾卫生的监测; 居民24小时生活垃圾调查; 混合垃圾堆放场环境卫生监测;
- II. 生活垃圾化验分析方法; 细菌检验; 蛔虫卵检验; 理化分析;
- III. 环境卫生监测常用标准; 空气污染物三级标准浓度限值; 居住区大气中有害物质的最高容许浓度; 车间空气中生产性粉尘最高容许浓度; 地表水环境质量标准; 生产车间(场所)噪声标准; 城市区域环境噪声标准; 土壤卫生状况的综合评价指标; 评价土壤污染程度标准 A; 评价土壤污染程度标准 B; 粪便无害卫生标准; 城镇垃圾农用控制标准。

第一章 堆肥的基本概念及原理

第一节 堆肥化定义及其发展历史

堆肥化就是依靠自然界广泛分布的细菌、放线菌、真菌等微生物，有控制地促进可被生物降解的有机物向稳定的腐殖质转化的生物化学过程。堆肥化的产物称为堆肥。

有机废物堆肥具有悠久的历史，早在几个世纪以前，农村中就将秸秆、落叶、野草和动物粪便等堆积一起，使其发酵制成肥料。但是，真正对堆肥技术进行科学的探讨则始于20世纪初。1920年，英国人埃·霍华德在印度把落叶、垃圾、动物及人的粪尿在土坑内堆成约1.5米高的土堆，隔数月翻堆一二次，共进行为期6个月的厌氧发酵，此法称为印多尔法。为了促进堆肥的好氧发酵，贝盖洛尔改进了印多尔法，他将固体废物和人粪肥分层交替堆积，并使翻堆由一二次改为多次翻堆（堆积4~6个月），这就是贝盖洛尔法。上述方法在印度、德国、英国、美国、新西兰、澳大利亚、非洲等地都被广泛采用。意大利人贝卡里曾将他的堆肥法向政府申报专利，其方法同霍华德的相似，只是不用土坑而用混凝土堆肥坑。

与此同时，在意大利和法国还广泛采用将落叶、垃圾、动物及人的粪便等先在密封系统进行厌氧发酵，再送入空气进行好氧发酵的堆肥化方法。后来，维迪尔和博达斯对该方法作了改进。维迪尔将发酵渗出液循环使用，充分供给空气

以缩短腐熟时间，博达斯在肥堆中插入管子，使堆内充分通风，不用厌氧发酵，发酵时间可缩短 20 天。

1932 年，荷兰 VAW 公司建立了改良印多尔法的范曼奈法工艺堆肥厂。其工艺是将未经破碎的垃圾用水调节后，在室外堆积 4~8 月（厌氧分解），然后破碎、分选。

1933 年，在丹麦出现了达诺堆肥工艺系统。这是一种运用回转窑发酵筒进行好氧发酵的方法，特点是发酵周期短，一般只需 3~4 天。达诺法在西欧、日本都得到了广泛应用。与此同时，在德国开发了巴登·巴登法。该方法是先将垃圾中不能堆肥的无机物除去，然后与下水系统消化污泥一起露天堆置发酵 4~6 个月，最后再分选、破碎。

1940 年，在美国曾使用机械化的发酵槽，发酵日期缩短 1~3 月，这就是厄普·托马斯法。该方法采用多段竖炉发酵仓，通过接种特种细菌而使堆肥时间大大缩短。由于该方法的显著优越性，而取得了专利。托马斯法的问世，导致高速堆肥的迅速发展。此后，美国又相继研制出了采用密闭发酵槽进行堆肥的福列萨法和箱型间歇堆肥等新工艺。

日本是在 50 年代开始对城市生活垃圾进行堆肥化处理研究的。在世界卫生组织的帮助下，先后进行了堆肥工艺的小试、中试和生产规模的研究，取得了大量的经验。到了 60 年代，日本已建成堆肥厂 30 多座，其中，有 20 多家堆肥厂采用了达诺堆肥系统。70 年代初，由于城市生活垃圾成分逐渐多样化，大量的无机物和高分子有机物进入城市垃圾收集系统，给堆肥化生产带来了困难，并严重影响了堆肥产品的质量，使日本的许多堆肥厂陆续停产关闭。到 1976 年，能运转的设施数目降到 8 个，堆肥法处理垃圾的数量仅占全国垃圾

总量的0.23%。进入80年代,一方面由于土地资源紧张,而垃圾填埋场地难以寻找,焚烧厂两次污染严重,及土壤大量使用化肥造成土壤耕作能力下降而农民要求使用有机肥等原因;另一方面城市生活垃圾的分选破碎技术有了较高的发展,从而使日本逐渐认识到堆肥的价值,并逐渐具备了技术条件。目前,日本的堆肥厂已恢复到24个。

我国是一个有五千年历史的文明古国,自古以来以农业立国,农业是众业之本,人们在长期的农业生产实践中发明了原始的野积式堆肥,对农业生产中产生的秸秆和人畜粪便给以必要的合理的处理和利用。

但是,随着社会的进步人、口的增长、城市的繁荣、生产的发展和城市生活垃圾的泛滥,原始堆肥技术也从仅仅为满足农业需要,转向作为处理城市生活垃圾的重要手段之一。特别是近几年来,城市垃圾已成为一大社会环境公害,大大促进了我国城市生活垃圾堆肥的科学研究。在我国的天津、北京和上海等城市和一些大专院校的研究人员结合我国城市生活垃圾的特点,对我国的城市生活垃圾堆肥进行了基础研究和应用开发研究,取得了一定的成果。同时,在上海、杭州、无锡等地建造了具有一定处理能力和机械化程度的高温好氧的垃圾堆肥试验工厂,以寻找一些符合中国国情的堆肥处理工艺。

第二节 堆肥的基本概念及原理

一、堆肥特征

在一定条件下,通过微生物的作用使生活废弃物中的可降解有机物发酵,并经腐熟而得到产品。这一产品称为堆肥。

堆肥是一种深褐色、质地松散、有泥土味的物质。这种物质的养料价值不高,但却是一种极好的土壤调节剂和改良剂,其主要成分是腐殖质,氮、磷和钾含量一般分别为0.4~1.6%、0.1~0.4% 和 0.2~0.6%。

二、堆肥基本原理

自然界中很多微生物具有氧化、分解有机物的能力。实践证明,利用微生物在一定温度、湿度和 pH 值条件下,使有机物发生生物化学降解,形成一种类似腐殖质土壤的物质,用作肥料和改良土壤,在热力学上是完全可能的。这种利用微生物降解城市有机废物的方法称为生物处理法,一般又称为堆肥处理法。

城市有机废物是堆肥微生物赖以生存、繁殖的物质条件。由于微生物生活时有的需要氧气,有的不需要氧气,因此,根据处理过程中起作用的微生物对氧气不同的要求,可以把有机废物堆肥处理法分为好氧堆肥和厌氧堆肥两种。前者是在通气条件下藉好氧性微生物活动使有机物降解;由于好氧堆肥堆温高,一般在 50~65℃,极限可达 80~90℃,故亦称为高温堆肥。后者是利用厌氧微生物发酵堆肥。

1. 好氧堆肥

好氧堆肥是在有氧的条件下,藉好氧微生物(主要是好氧细菌)的作用来进行的。在堆肥过程中,有机废物中的可溶性有机物质透过微生物的细胞壁和细胞膜而为微生物所吸收;固体的和胶体的有机物先附着在微生物体外,由生物所分泌的胞外酶分解为可溶性物质,再渗入细胞。微生物通过自身的生命活动——氧化还原和生物合成过程,把一部分被吸

收的有机物氧化成简单的无机物，并放出生物生长、活动所需要的能量，把另一部分有机物转化合成新的细胞物质，使微生物生长繁殖，产生更多的生物体。图 1-1 可以简单地说明这个过程。

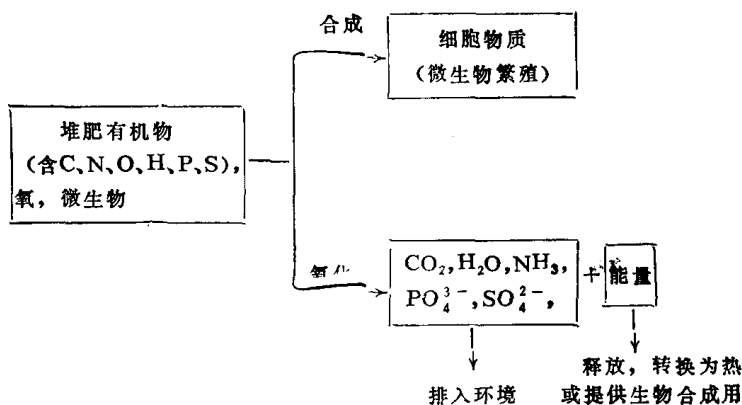
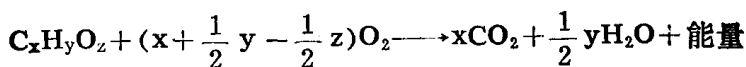


图 1-1 有机物的好氧堆肥分解

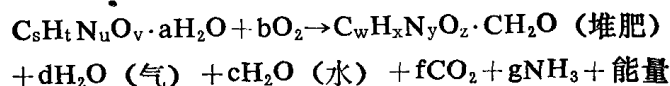
下列方程式反映了堆肥中有机物的氧化和合成：

(1) 有机物的氧化

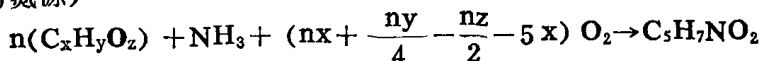
不含氮的有机物 ($C_xH_yO_z$)



含氮的有机物 ($C_sH_tNuO_v \cdot aH_2O$)

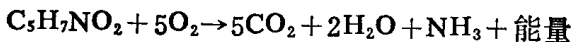


(2) 细胞物质的合成 (包括有机物的氧化, 并以 NH_3 作为氮源)



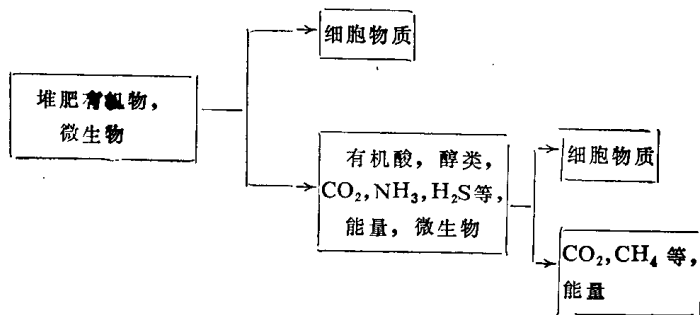
$$(\text{细胞质}) + (nx-5) \text{CO}_2 + \frac{1}{2}(ny-4)\text{H}_2\text{O} + \text{能量}$$

(3) 细胞物质的氧化



2. 厌氧堆肥

厌氧堆肥是在无氧条件下，藉厌氧微生物（主要是厌氧细菌）的作用来进行的。图 1-2 简单说明了有机物的厌氧分解过程。



←——产酸阶段（产酸菌活性）——→ | ←——产气阶段（甲烷菌活性）——→

图 1-2 有机物的厌氧堆肥分解

从图中可以看出，当有机物进行厌氧分解时，主要经历了两个阶段：酸性发酵阶段和碱性发酵阶段。分解初期，微生物活动中的分解产物是有机酸、醇、二氧化碳、氨、硫化氢，等等；在这一阶段中，有机酸大量积累，pH 值随着下降，所以叫做酸性发酵阶段，参与的细菌统称为产酸细菌。在分解后期，由于所产生的氨的中和作用，pH 值逐渐上升；同时，另一群统称为甲烷细菌的微生物开始分解有机酸和醇，产物主要是甲烷和二氧化碳。随着甲烷细菌的繁殖，有机酸迅速分解，pH 值迅速上升，这一阶段的分解叫碱性发酵阶段。

第三节 堆肥微生物和堆肥过程动力学模型

一、堆肥微生物

堆肥是微生物分解有机物的生物化学过程，因此微生物是堆肥的主体。堆肥微生物的来源主要有两方面。一方面是来自有机废物里面固有的大量微生物种群，如在城市生活垃圾中一般细菌数量在 $10^{14} \sim 10^{16}$ 个/千克重。其中，总大肠菌和粪性大肠菌分别占 10% 和 1%。堆肥微生物来源的另一面是人工加入的特殊菌种，这些菌种对堆肥有机物具有较强的分解能力，具有活性强、繁殖快、分解有机物迅速等特点，能够加速堆肥反应的进程，缩短堆肥反应的时间。堆肥中含有的微生物种类主要有细菌、真菌和放线菌，有时还有酵母

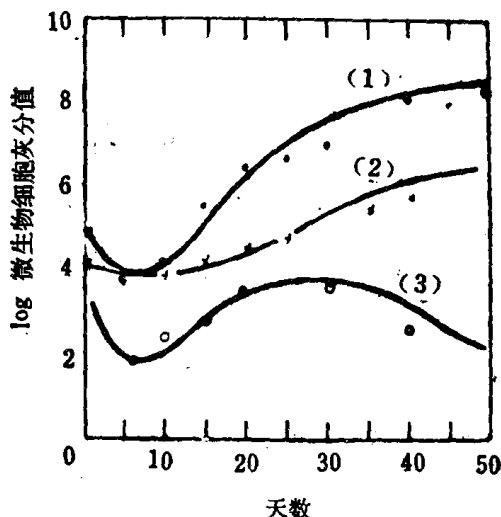


图 1-3 堆肥中微生物细胞灰分值的变化

(1)真菌生长曲线；(2)放线菌生长曲线；(3)细菌生长曲线

菌和原虫等。在堆肥过程中，随有机物的降解，堆肥微生物在数量和种群上也随之发生变化，如图 1-3 所示。

好氧堆肥从堆积到腐熟的微生物生化过程是复杂的，它大致可分为三个阶段：

1. 中温阶段（产热阶段）

堆肥初期，堆层基本呈中温，嗜温性微生物较为活跃并利用堆肥中可溶性有机物旺盛繁殖。它们在转换和利用化学能的过程（此时可溶性物质如单糖分解最快）中，有一部分变成热能，加上堆肥物质具有良好的保温作用，温度不断上升。此阶段微生物以中温、需氧型为主，通常是一些无芽胞细菌。

适于中温的微生物种类极多，其中最主要有细菌、真菌和放线菌，这些微生物都有分解有机物的能力，不仅对于不同温度有各自的适应性，且对于不同化合物的适应也各不相同，如细菌特别适应水溶性单糖类，放线菌和真菌对于分解纤维素和半纤维素物质具有特殊的功能。

2. 高温阶段

当肥堆温度升高到 45℃ 以上即进入高温阶段。在这一阶段，嗜温性微生物受到抑制甚至死亡，嗜热性微生物逐渐代替了嗜温性微生物的活动，堆肥中残留的和新形成的可溶性有机物质继续分解转化，复杂的有机化合物如半纤维素、纤维素和蛋白质等也开始被强烈分解。在高温阶段中，各种嗜热性微生物的最适温度也是不相同的，在堆肥温度上升过程中，嗜热性微生物的类群和种类是互相接替的。通常，在 50℃ 左右进行活动的主要是嗜热性真菌和放线菌；温度上升到 60℃ 时，真菌几乎完全停止活动，仅为嗜热性放线菌与细菌的活

动；温度升到70℃以上时，对大多数嗜热性微生物已不适宜，微生物大量死亡或进入休眠状态。根据微生物的活性，可将微生物在高温阶段的生长过程分为三个时期：

(1)对数增长期：此时嗜热性微生物处于对数增长期，营养过剩，其活性增长速度与有机物浓度无关，仅与温度及供氧量有关。

(2)减速增长期：在易分解和部分较难分解有机物不断消耗和新细胞不断合成后，有机物含量急剧下降，直至有机物不再过剩，且成为微生物进一步生长的限制因素时，嗜热性微生物便从对数增长期过渡到减速增长期，此时微生物增长速度将直接与剩下的营养物浓度成正比。

(3)内源呼吸期：此时继续通入空气，微生物仍不断进行代谢活动，但因堆肥中易分解和部分较难分解有机物几乎耗尽，微生物代谢进入内源呼吸期。虽然在有机物充足时内源呼吸也存在，但细胞的合成远大于消耗，故表现不明显；而在内源呼吸期则不然，因为此时微生物已不能从其周围环境获得足够的能量以维持生命，于是开始显著地代谢自身细胞内的营养物质。随后，微生物在维持其生命中逐渐死亡，细胞内部分酶分解细胞壁的某些部分，营养物质便离开细胞本体而向外扩散，以提供给活着的微生物较多营养。此时，细胞的生长虽没有完全停止，但被细胞分解率所超越，致使微生物量减少。由于此时能量水平低，耗氧量减少，故通气量亦可减少。

整个微生物的生长变化过程可用图1-4表示。在高温阶段微生物活性经历了三个时期变化后，堆积层内就开始发生与有机物分解相对立的另一过程，即腐殖质的形成过程，堆

肥物质逐步进入稳定状态。

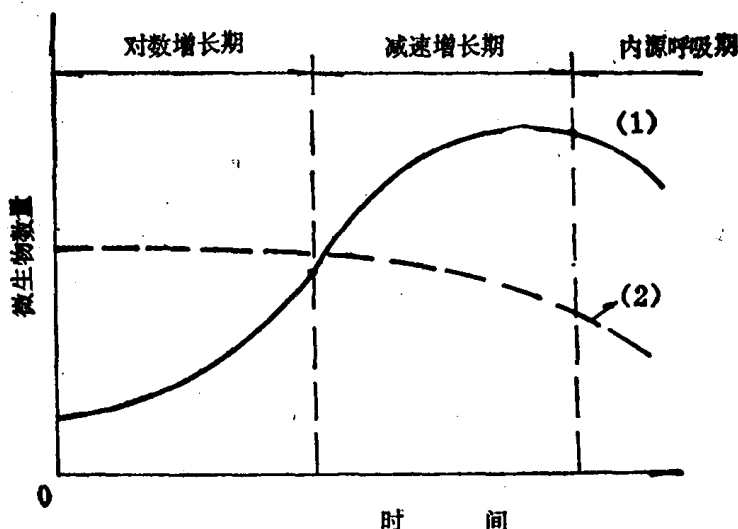


图 1-4 微生物活性示意图

(1) 微生物活性曲线；(2) O_2 利用率

3. 降温阶段

在内源呼吸后期，只剩下部分较难分解及难分解的有机物和新形成的腐殖质，此时微生物活性下降，发热量减少，温度下降。在此阶段嗜温微生物又占优势，对残余较难分解的有机物作进一步分解，腐殖质不断增多且稳定化，此时堆肥即进入腐熟阶段。降温后，需氧量大大减少，含水量也降低，堆肥物孔隙增大，氧扩散能力增强，此时只须自然通风。

二、堆肥过程动力学模型

堆肥是一种生物学的处理工艺，在有机废物发生生物转化的过程中，酶是一个很重要的催化剂。酶是在生物体内合成