

无臭味，成品中富含 N、P、K 素、微量元素及有利于农作物生长的有机质。

(3)农业生产上的初步应用：将高温堆肥处理过的初级产品和无机化肥按照一定的配制要求制成有机-无机复混肥，在大白菜、玉米和菜豆地进行施肥对比试验，结果表明，有机-无机复混肥相比于普通化肥和空白对照，农作物产量平均增产6.5%，效果较好。

高效生物增温剂的制备及其在垃圾堆肥处理中的应用研究立足贵州生产力发展的实际水平，研究以较为经济的生物技术手段来对城市生活垃圾进行无害化和资源化处理，从而实现资源的循环利用，具有良好的应用前景。

关键词：城市，生活垃圾，堆肥，微生物增温剂，菌种筛选，有机复混肥，设备

## ABSTRACT

Garbage is a hidden resources and wealth. There are enormous energy and value deposited in the garbage. The decreasing, harmless and recycling of garbage composting is a great environmental protection problem which is researching and resolving by many countries all over the world. At present, there are three main harmless ways such as sanitation filling, burning and composting in world and out. The composting takes advantage of bio-technology to deal with garbage, it has small investment, running lowly, saving energy sources, no repeating pollution and so on. The Garbage composting will be produced to be the organic fertilizer. So the composting will be one of the mainly developing directions in garbage composting. Traditional composting is bio-chemical process of natural microorganism activity. it depends on the soil microorganism in the fertilizer raw material to decline to resolve the organic matter. Because of the total number of soil microorganism in the fertilizer limit, they need some time to breed to carry on ferment. So there are some problems such as long fermenting-cycle, producing-foul smell and poor fertilizer in the traditional composting. If complex microbial community is used in the tradition composting, the problems all above will be resolved. Many researches show that the fertilizer joined in the valid microorganism germ can consumedly promote the progress for ferment, be advantageous to the creation of the high-quality fertilizer. Therefore, complex microbial community manufacture and its application study in the garbage fertilizer have the important and actual application value.

Although some researchers in world and out have had some research achievements in composting, most microbes which are gotten in achievements belong to one fungus. There is litter study and research in complex microbial community. Single microbe that has high activity isn't as good affection as the complex microbial community in composting. In addition, the cellulose decomposition germ, the fruit gum decomposition germ and proteins to resolve the germ are added in the fertilizer ferment process, they can shorten to ferment time effectively and improve the quantity of fertilizer. But because the reasons

that the technique keeps secret and the quantity of germ exist problem, the extensive application of this kind of technique is very hard. Moreover, the research that the small automation equipments do with the garbage by adding Complex microbial community have not been reported in newspaper. The research discovers that this has the latent applied foreground, and then we are necessity to research for the aspect. According to the above reasons, We have separated and selected some microbes、complex microbial community manufacture、fertilizer of the equipments and its application study in the agriculture. Main contents are as follows:

(1) Selection of microbes and complex microbial community manufacture:

We have separated and selected some microbes which grow well at the condition of 45°C or 55°C from the natural composting. Their adaptability is strong, breed quickly, have the stronger decomposition ability; they go together with the ratio to make complex microbial community. pass to the organic living garbage of processing experiment, The III complex microbial community made form TH001、TH003、TH005 has effected well in composting test. So it is the better complex microbial community.

(2)The research of garbage composting equipments and its application:

According to the principle of the composting, the function of complex microbial community and the characteristics of ferment camalig, the device project is putted forward to handle the garbage. The complex microbial community and garbage will be mixed into the small auto-cylinder storehouse of fermentation to compost. The equipment has some good advantages such as convenient use、small volume、compact construction etc. So these will be advantageous to provide O<sub>2</sub>、transmit material、conduct heat and improve complex microbial effect. Then garbage composting will has good effect of high-temperature composting. After microorganism decomposing, the garbage has garbage-decrementlization 35%~40%, C/N<20, PH≈7.0, H<sub>2</sub>O%=35%~40%、gray color、no foul smell. There are some rich N、P、K and rotten material for advantageous crops growing in it.

(3)Application on the agriculture:

The organic fertilizer is made of high-temperature composting material and fertilizer. The experimental results indicate that the production of crops applied organic fertilizer has increased more than that of crops applied fertilizer、that of crops applied no fertilizer. Moreover, the production of crops applied organic

fertilizer has increased to be 6.5% than that of crops applied fertilizer. Complex microbial community manufacture and its application study in composting connect with the actual productivity development level in Guizhou, the garbage will be harmless and recycled by the more economic living creature technique means, so the circulating exploitation of the resources, have good applied foreground.

**Key words:** City; Garbage; Composting; Complex microbial community; Microbes—selection; Organic fertilizer; Equipment

# 第一章 绪论

## 1.1 前言

人类社会在不断发展的同时正面临两大挑战：一是可开发利用的资源日益减少，出现资源的匮乏；二是人类在自身活动过程产生大量的城市生活垃圾，其中含有许多对植物生长有益的有机营养物质，这些垃圾若不加处理的随意堆放，就会严重污染环境。如何应对上述挑战已成为世界各国急待解决的重大问题之一。城市生活垃圾是城市居民日常生活中或为日常生活提供服务的活动中产生的废弃物，其主要成分包括厨余物、废纸、废塑料、废织物和渣土等。它来源于城市居民家庭、机关、学校和社会单位等。20世纪80年代以来，我国的社会、经济和文化发生了深刻的变化，经济迅猛发展，人民生活水平大幅度提高，城市生活垃圾产量每年以9%左右的速度增长<sup>[1]</sup>，据国家建设部统计资料<sup>[2]</sup>表明，2000年城市生活垃圾的清运量为1.18亿t，总积存量达60亿t，其中以厨余废弃物为主有机成分含量约占36%~45%。它具有以下共性：①无主性，即被丢弃后，不再属于谁，找不到具体责任人；②分散性，分散在各处，需要收集；③危害性，对人们的生产和生活产生不便，危害人们的身体健康；④错位性，一个时空领域的废物在另一个时空领域也许就是宝贵的资源。社会和科技的进步，使越来越多的人逐渐意识到城市生活垃圾是一种潜在的资源财富，它蕴藏着巨大的能量和价值。实现城市生活垃圾的“三化”处理（即减量化、无害化和资源化），才能从根本上解决上述存在的问题，促进人类社会可持续发展。因此，城市生活垃圾处理是当今社会急需研究解决的重大环境保护问题。

城市生活垃圾处理的实质是利用一定的技术和措施来改变原有垃圾的物理性质、化学性质和减少垃圾数量的过程，其最终目标是实现生活垃圾的“三化”处理，既消除垃圾的污染危害，又为社会创造财富，使环境、社会和经济三方面的效益得到兼顾，达到化害为利的目的。目前，国内外城市生活垃圾处理的方法主要有：卫生填埋、焚烧、堆肥及热解等方法，如表1.1所示<sup>[3,4]</sup>。

卫生填埋、焚烧和堆肥作为垃圾处理的三种基本方法，各有优缺点。卫生填埋法具有投资偏中，适用范围广的特点，但运行费用较高，占用大量土地，消耗大量的粘土资源，资源化利用率低，垃圾渗沥液处理还是一个技术难题；而焚烧方法具有处理彻底、减容量大的特点，其焚烧余热可资源化利用，目前一些工业发达国家由于垃圾中可燃组份含量高，垃圾热值高（ $\geq 3767\text{KJ/Kg}$ ），能源紧缺，土地资源宝贵，使焚烧法有增多趋势，但在烟气净化、残渣、废水处理以及废热回收等技术方面有待进一步的研究和发展。而国内大部分生活垃圾中含有大量厨渣，其垃圾热值低，因此采用焚烧方式处理，很难实现自燃方式焚烧，还需加辅助燃料，造成运行费高，投资较大，技术要求高，现在只在少数经济较发达的地区试行；堆肥方法具有比较显著的资源化功能，在许多国家有着悠久历史，工业化的堆肥处理工艺从二十世纪20年代即开始专项研究。

近年来,随着快速堆肥技术(高温堆肥)的发展以及堆肥质量的不断提高,垃圾堆肥处理技术日益得到各国的重视和发展,如日本、美国等这些过去不重视堆肥技术的国家,现在也正加强堆肥处理技术的研究和应用。在我国由于城市生活垃圾中厨余残渣等可堆肥的物质含量高,它们中富含大量有益于植物生长的有机无机营养物质,所以它们更适宜于堆肥处理<sup>[5、6]</sup>,经处理后可得到富含有机质的堆肥初级产品,它可用在中低产田的改造、新耕地的开发、城市园林绿化、退耕还林还草以及有机复混肥料生产等方面,因此高温堆肥方法处理城市生活垃圾具有一定的应用前景性;而热解方法在生活垃圾处理过程中国内还较少采用,技术上还处于摸索阶段。

表 1.1 城市生活垃圾主要处理方法比较

Table 1.1 Contrast among the main treatment ways of municipal solid waste

方法	项 目					
	技术成熟性	适用条件	选 址	污染情况	资源回收利用情况	投资部分
填 埋	成 熟	对垃圾组成成分无严格要求,但含水率不宜过高	困 难	可造成水、大气污染	较 少	投资较小
焚 烧	较成熟(技术集成度和自动化程度高)	对垃圾组成成分有严格要求(垃圾的低位热值大于 3767KJ/Kg)	较容易	可造成大气污染	可回收利用部分资源	投资大
高温堆肥	较成熟(国内有实践经验)	对垃圾组成成分有要求,垃圾中可生物降解有机物的含量大于 40%	容 易	可造成较轻土壤污染	可作农肥和回收部分资源	投资较大
热 解	摸索阶段	固体废物中的有机物	较容易	较小的污染	可回收利用能源	投资大

## 1.2 国内外生活垃圾的处理现状

### 1.2.1 发达国家生活垃圾处理现状

卫生填埋、焚烧、堆肥和综合回收利用是国外通常采用的垃圾处理技术和方法,表 1.2 反映了部分发达国家采用的垃圾处理方法及综合回收利用情况<sup>[7]</sup>。

#### 1.2.1.1 美国垃圾处理状况

美国从 1989 年开始每年对全国的垃圾处理状况进行调查。由调查资料可知,垃圾处理一直以卫生填埋为主,1990 年卫生填埋率为 84%,1993 年为 69%,1999 年下降到 61%,1993~1999 年的 7 年间,填埋处理率减缓下降;1989 年焚烧处理率为 7.5%,1993 年为 8%,1999 年上升为 10%,总体上保持平稳发展;垃圾综合回收利用率在逐年上升,1990 年为 8%,1993 年为 22%,1999 年上升为 30%,上升幅度非常大。这与积极推行垃圾分类收集和庭院垃圾堆肥有直接的关系。从垃圾处理方式可知,全美的生活水平不均衡,中、西部人口少,土地辽阔,所以垃圾处理方式主要是卫生填埋,而东部城市人口多,土地少,填埋的空间很少,所以焚烧处理方式占很大的比例。同

时还积极发展庭院垃圾堆肥处理。

表 1.2 部分发达国家采用的处理方法及垃圾回收利用情况

Table 1.2 The treatment ways and reuse of municipal solid waste in some developed countries

国家	垃圾总量 / 万吨	填埋所占比例 / %	焚烧所占比例 / %	堆肥所占比例 / %	回收所占比例 / %
美国	32746	69	8	-	22
英国	2000	83	13	2	4
日本	5000	15	74	11	-
奥地利	290	48	24	8	20
芬兰	130	65	4	15	16
法国	2000	45	42	10	3
葡萄牙	265	-	90	10	-
西班牙	1330	64	6	17	13
瑞士	370	11	76	13	-

### 1.2.1.2 英国垃圾处理状况

英国 1993 年城市生活垃圾总排放量 2000 万吨，在垃圾的各种处理方式中，卫生填埋占 83%，焚烧占 13%，堆肥处理占 2%，综合回收利用占 4%。1999 年垃圾总排放量 2536 万吨，人均垃圾产量 1.25Kg/d，其处理方式如下：卫生填埋占 67%，焚烧占 9%，堆肥处理占 7%，综合回收利用占 17%（其中生活垃圾回收占 9%）。根据欧盟填埋法令要求英国到 2020 年可生物降解垃圾填埋量降低到 1995 年填埋量的 35%，因此英国环境部于 2000 年发表了《废弃物战略 2000》。它明确规定到 2015 年，至少要有 33% 的垃圾得到再循环或堆肥处理，67% 得到再利用。为此将垃圾处理方式由卫生填埋逐渐转向堆肥、干式循环（纸和塑料）以及焚烧发电等方式，从而实现所制定的目标。到 2015 年，英国垃圾的 27% 将被焚烧发电处理，17% 被堆肥处理，20% 将被制成干的可循环物质，6% 被利用新工艺进行回收处理，其余的 30% 作为不可再循环利用物质进行卫生填埋处理。

### 1.2.1.3 日本垃圾处理状况

日本是一个岛国，人口多，土地少，国土面积 37.78 万 KM<sup>2</sup>。1993 年垃圾总量为 5000 万吨，在垃圾的各种处理方式中，焚烧占 74%、资源化率（经分选、破碎后资源化率及快速堆肥化等资源化率）为 11%，卫生填埋为 15%。而 1998 年垃圾总量为 5160 万吨，垃圾的处理率为 92.5%，未经处理的垃圾占 7.5%。其中，焚烧占 77.9%、资源化率为 14.6%，卫生填埋率为 7.5%。由垃圾处理方式表明：焚烧处理是主要的垃

圾处理方式，同时还积极发展堆肥处理技术。

### 1.2.2 我国城市生活垃圾处理现状

我国城市生活垃圾处理大部分采用填埋方法进行处理，其中只有部分达到卫生填埋的技术要求。“七五”及“八五”期间，深圳、北京、上海、成都等城市相继建成投资额约 1 亿元人民币的大型垃圾卫生填埋场，而更多的中小城市则建成数百个投资额约几百万元到上千万元人民币的中小型垃圾卫生填埋场。

焚烧技术的开发与应用滞后于填埋技术和堆肥技术 5~10 年，其处理生活垃圾量在这三种基本处理方法中所占比例最小。除个别城市(如深圳等)将其作为处理城市生活垃圾的主要方法外，其余大多数省市未将其作为城市生活垃圾的主要处理手段。

堆肥处理技术的应用在我国具有悠久的历史。从最初农村利用人畜粪便和农田废弃物就地沤肥生产农家肥，发展到采用厌氧或好氧堆肥技术来解决生活垃圾的处置问题，开展了大量的堆肥化技术及相关设备开发研究，并在上海、杭州、无锡、重庆等城市建成一批城市生活垃圾机械化堆肥处理厂。由于堆肥系统中垃圾没有进行分类和筛选，堆肥机械设备不能正常稳定的运行，导致堆肥产品杂质含量较多、肥效不高和堆肥产品销路困难。20 世纪 90 年代以后，在四川广汉和北京石景山开展了利用城市生活垃圾生产生物复混肥的应用研究，取得了良好效果。

随着政府日益重视生活垃圾的“三化”处理，大部分城市将垃圾分类收集、资源化综合回收利用作为城市垃圾处理的重要内容进行规划，并积极开展相关工作，但就整体水平而言，要落后于发达国家。

## 1.3 生活垃圾处理的方法和设备

### 1.3.1 卫生填埋技术及设备

#### 1.3.1.1 卫生填埋技术特点

卫生填埋是垃圾处理和最终处置的一种主要的、必不可少的方式。其技术特征是将废物与环境的物质交流渠道加以隔离同时填埋的过程，类似于一个以废物作为填充物，逐步地改变洼地、山谷的地形特征的过程。垃圾填埋场相当于一个“巨大的生物反应器”，使它与周围环境友好相处，同时最大程度地缩短填埋场稳定周期，使其早日恢复利用。因此卫生填埋涉及转运、推铺、压实、覆盖、复垦、渗滤水处理、沼气处理、防渗、恶臭防治等方面技术综合应用<sup>[8]</sup>。

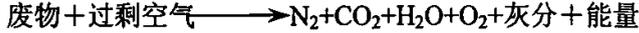
#### 1.3.1.2 卫生填埋设备

卫生填埋专用设备的开发和制造方面还处于初级阶段。大部分设备都是从建筑工程方面转过来的，不太适应卫生填埋的实际需要，如垃圾运输车、推土机、压实机、装载机、挖掘机、布土机等<sup>[9, 10]</sup>。

### 1.3.2 焚烧技术及设备

#### 1.3.2.1 焚烧技术特点

一般固体燃料的燃烧目标主要是热能的利用，而生活垃圾的焚烧目标主要是无害化处理，追求的是生活垃圾能在垃圾焚烧炉中充分燃烧，为此垃圾焚烧工艺通常采用较高的过剩空气比的运行模式和垃圾层处于翻动状态。燃烧转化的依据是其所含有的有机物在高温、有氧条件下具有的反应活性。焚烧的化学反应式为：



焚烧过程中会产生二次污染的问题，主要是烟气污染，包括颗粒物、SO<sub>2</sub>、HCl、NO<sub>x</sub>、重金属和毒害性微量有机物（如二噁英等）等空气污染物。虽然这种方法具有卓越的减量化效果（可使生活垃圾减重 80%~90%）和资源化效益（热能的回收发电），但是还有其污染问题的复杂性（NO<sub>x</sub> 和二噁英等的末端净化工艺等技术难题），因此其运行成本较高，阻碍它的运用和推广<sup>[8]</sup>。

#### 1.3.2.2 焚烧设备

常用垃圾焚烧设备有以下几种型式：①顺推式机械炉排焚烧设备；②逆推式机械炉排焚烧设备；③履带式机械炉排焚烧设备；④立窑式焚烧设备；⑤流化床焚烧设备。目前这些设备除了焚烧炉排和燃烧控制系统尚未实现国产化，其余都基本上实现国产化<sup>[9, 10]</sup>。

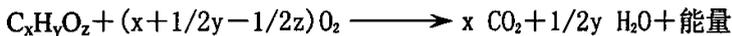
### 1.3.3 高温堆肥技术及设备

#### 1.3.3.1 高温堆肥技术

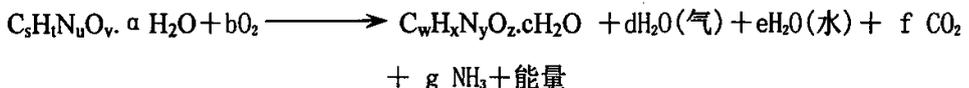
高温堆肥技术是城市生活垃圾处理的主要方法之一。它是在有氧的条件下，利用各种好氧微生物之间（高效复合菌剂）的协同作用，使垃圾中有机物降解，这些降解过程和反应机理极其复杂，主要的降解反应如下：

##### (1) 有机物的氧化

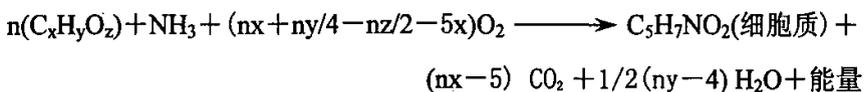
##### 1) 不含氮的有机物 (C<sub>x</sub>H<sub>y</sub>O<sub>z</sub>)



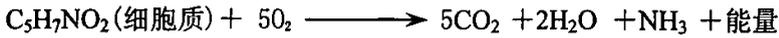
##### 2) 含氮的有机物 (C<sub>s</sub>H<sub>t</sub>N<sub>u</sub>O<sub>v</sub> · a H<sub>2</sub>O)



##### (2) 细胞质的合成 (包括以 NH<sub>3</sub> 作为氮源，有机物的氧化)



##### (3) 细胞质的氧化



在堆肥过程中,各种微生物通过氧化、还原、合成和分解等自身的生命活动来实现有机物的生物降解,主要体现在:一方面垃圾中的溶解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,氧化成简单的无机物,并释放生物生长活动所需要的能量;另一方面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、生物体所必需的营养物质,进入细胞,合成新的细胞物质,微生物不断生长繁殖,产生更多的个体<sup>[8, 11]</sup>。

一个完整的堆肥过程由升温阶段、高温阶段、降温阶段和腐熟阶段四个阶段组成,每个阶段有不同的细菌、放线菌、真菌和原生动植物存在,这些微生物在一定条件下发生相互协调作用,实现上述生物降解反应,达到稳定的腐殖质形成阶段,从而满足高温堆肥技术要求。因此,微生物(高效生物增温剂)在堆肥过程中起着极其重要的作用。

### 1.3.3.2 高温堆肥设备

现有的生活垃圾堆肥处理设备主要有:塔式发酵、设备水平式发酵滚筒、料仓型发酵装置、皮带式条垛工翻堆机、组合型发酵系统和熟化设备等,这些设备与堆肥工艺的研究成果相比,还需进一步的完善<sup>[9, 10]</sup>。

### 1.3.4 热解技术及设备

有机物在加热与无氧或缺氧条件下的裂解反应是使其热解转化的依据。其产物一般为可燃性的气体、焦油和固体渣剩余物,产物的量的分配比例和产物的分子结构与加热温度、是否供足在化学平衡计量下的氧和采用何种供氧剂等有关系。一般的热解反应可以纤维素为例示意如下:



城市生活垃圾热解技术除具有卓越的减量化效果,对环境污染较小,还有资源化效益好——来自热能的回收利用<sup>[8]</sup>。

热解设备在开发和制造方面处于初级阶段,其制造与运行成本较高,因而阻碍它的应用和推广。

## 1.4 课题研究的意义、主要研究内容及来源

### 1.4.1 课题研究意义及主要研究内容

人类社会在不断向前发展,生活垃圾的堆积及其污染问题正变得日益严重,其处理问题已成为世界各国正在关注的热点。目前,国内外城市垃圾的主要处置方法有填埋法、焚烧法和堆肥法三种。填埋法虽然简单易行和投资少,但占地面积大、二次污染较严重和资源不能回收利用;焚烧方法是垃圾处理无害化和减量化效果最好的,但

投资大、运行费用高和易造成空气污染。与前2种处理方法相比,堆肥法是利用微生物技术来处理生活垃圾,具有投资少、运行费用低、节约能源和二次污染小等优点,且经过堆肥处理的生活垃圾可用来生产有机-无机复混肥,有利于资源的可持续利用。正因如此,堆肥处理技术现正成为垃圾处置的主要发展方向之一。

传统的堆肥法主要是一个由自然微生物参与的生理生化过程,利用堆肥原料中的土著微生物来降解有机物,由于堆肥初期土著微生物量和有益菌所占总菌数比例有限,需要一定时间才能繁殖起来进行发酵<sup>[3, 12, 13]</sup>,因此传统堆肥法存在着发酵时间长、产生臭味且肥效低等问题。如果在堆肥原料中人工加入微生物菌剂,则可在一定程度上解决上述问题<sup>[21, 22]</sup>。目前在堆肥化处理中,仍有采用单一菌株(包括细菌、真菌和放线菌群体)作为发酵剂的方法,但单一菌株的开发,无论其活性多高,在加快堆肥化进程中的作用都比不上高效复合菌剂的作用效果<sup>[18, 19]</sup>。此外,在堆肥发酵过程中加入纤维素分解菌、果胶分解菌和蛋白质分解菌等以促进纤维素等有机质的分解,可有效缩短发酵时间,提高堆肥处理效果<sup>[14, 20]</sup>。但由于技术保密的原因或菌剂本身存在的质量问题等而难以得到广泛应用。另外,将高效生物增温剂和小型自动化微生物处理设备合并来处理有机生活垃圾的研究尚未见报道,但我们的初步研究发现其具有潜在的应用前景,有必要开展这方面的研究。

基于以上原因,我们开展了有效菌株的分离和筛选、高效生物增温剂的制备、垃圾处理设备的设计、堆肥化处理以及堆肥产品在农业上的应用等研究。主要内容如下:

### (1) 菌株的分离、筛选和高效复合菌剂的制备

经过分离和筛选,得到在45℃或55℃条件下生长好,适应性强,繁殖快,具有较强分解能力的菌株;按照一定的配比要求制备微生物增温剂,通过对有机生活垃圾的处理实验,确定由菌株TH001、TH003和TH005组成的III号复合微生物增温剂,它处理效果好,是一种能调节菌群结构、提高微生物活性和高效降解有机物的复合菌剂。

### (2) 生活垃圾处理设备研制及应用

针对城市社区生活垃圾日产量不高,根据高温堆肥技术原理、高效生物增温剂作用效果和四棱锥台式生物发酵仓的特点,提出了利用高温堆肥技术处理有机废物的装置方案。该装置在生活垃圾堆肥处理实验中可实现生活垃圾减量率35%~40%,C/N<20,PH≈7.0, H<sub>2</sub>O%=35%~40%;外观呈茶褐色或暗灰色,无臭味,成品中富含N、P、K素、微量元素及有利于农作物生长的有机质。

### (3) 农业生产上的初步应用

将高温堆肥处理过的初级产品和无机化肥按照一定的配制要求制成有机-无机复混肥,在大白菜、玉米和菜豆地进行施肥对比实验,结果表明,有机-无机复混肥相比于普通化肥和空白对照,农作物产量平均增产6.5%,效果较好。

#### 1.4.2 课题来源及在读期间参加的科研项目:

贵州工业大学博士基金课题(校科合博基字2001001号)

贵州省自然科学基金课题(黔基合计字 943056 号)

中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室开放基金课题(HDH010901)

#### 1.5 小结

城市生活垃圾的主要处置方法有填埋、焚烧、高温堆肥和热解四种。目前大多数城市生活垃圾处理仍以卫生填埋为主,该方法使得垃圾中有益的资源基本不能回收利用,同时占地面积大;焚烧方法虽然垃圾的无害化和减量化处理效果最好,但投资大、运行费用高和易造成空气污染。与前2种处理方法相比,堆肥法是利用微生物技术来处理生活垃圾,具有投资少、运行费用低、节约能源和二次污染小等优点,且经过堆肥化处理的生活垃圾可用来生产有机-无机复混肥。它不仅为农业提供了具有改善土质功能肥料,提高资源的利用价值,而且可实现化废为宝和净化环境的目的。因此,高温堆肥技术将是未来城市生活垃圾处理的主要发展方向之一。在高温堆肥技术中,高效生物增温剂的制备及其在垃圾堆肥处理中的应用研究具有极其重要的意义,它一方面为生活垃圾高温堆肥处理提供了重要的技术保障,另一方面也为垃圾的处理提出了一条经济的、可行的和符合可持续发展理念的新途径。因此,它将为加强环境治理,改善环境质量作出积极贡献,具有重要的研究价值和应用前景。

#### 参 考 文 献

- [1] 臧文超. 我国城市生活垃圾现状与管理问题 [J]. 环境保护, 1998, 8: 41~43
- [2] 赵庆良、王琨. 城市垃圾的再生利用 [J]. 能源工程, 1999, (5): 24~26
- [3] 赵由才、柴晓利. 生活垃圾资源化原理与技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2002, 170~180
- [4] 李国学、张福锁. 固体废物堆肥化与有机复混肥生产 [M] 北京: 化学工业出版社, 2000, 13~28
- [5] 连宾. 城乡有机废物农业利用的理论分析 [J]. 贵州科学, 1997, 15(1): 39~45
- [6] Timm is KN. Environmental Biotechnology [M]. Current Opinion in Biotechnology, 1992, 3:225~226
- [7] 何晶晶、冯肃伟、邵立明编著 城市固体废物管理 [M]. 北京: 科学出版社, 2003
- [8] 李建国 赵爱华 张益主编. 城市环境污染与控制丛书—城市垃圾处理工程 [M]. 北京: 科学出版社, 2003
- [9] 孙明湖. 环境保护设备选用手册 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2002, 22~23, 298~300
- [10] 聂永丰编著. 三废处理工程技术手册(固体废物卷) [M]. 北京: 化学工业出版社, 2001

- [11] 陈世和. 城市生活垃圾堆肥处理微生物特性研究 [J]. 废物治理 1990, 7: 23~35
- [12] 贵阳循环经济型生态城市建设总体规划 [R]. 清华大学环境工程系编制 2003
- [13] 席北斗、刘鸿亮等. 纤维素分解菌和 EM 菌协同作用在有机废弃物堆肥中的应用 [J]. 环境与开发, 2001, 4 (16): 16~18
- [14] 陈世和、张所明. 城市垃圾堆肥原理与工艺 [M]. 上海: 复旦大学出版社, 1990
- [15] Tielijn C and Hart SS. Composting for agricultural and J. Sanitary Engineering Division [J]. Proc Am Soc Civil Eng, 1969, 95: 269~287
- [16] 高光智、陈辅利. 固氮菌在污泥中培养研究 [J]. 农业环境保护, 2000, 19 (1): 29~31
- [17] 浦一涛、钟毅沪等. 固氮菌和纤维素分解菌的混合培养及其对生活垃圾降解的影响 [J]. 环境科学与技术, 1999, 1: 15~17
- [18] Xi Bei-dou, Lin Hong-Liang. MAW and sewage sludge with effective complex microorganisms [J]. Journal of Environmental Sciences-China, 2002, 14(2): 264~268
- [19] P. Aaamuthu, Looichee Choong, Shameem Hasan, V. V. Praven. Kinetic evaluation of Composting of agricultural wastes [J]. Environmental Technology, 2001, 21(3): 185~192
- [20] Spaink H P. Regulation of plant morphogenesis by Lipo-chitin-oligosaccharides [J]. Critical Reviews in Plant Sciences, 1996, 15: 559~582
- [21] Eklind Y, H Kirchmann. Composting and storage of organic household waste with different litter amendments. I: carbon turnover [J]. Bioresource Technology, 2000, 7 (4): 115~124.
- [22] Makay Biey E, H Mortier, W Verstraete. Nitrogen transfer from grey municipal solid waste to high quality compost [J]. Bioresource Technology, 2000, 73: 47~52

## 第二章 高温堆肥技术中微生物增温剂的研究

### 2.1 前言

生活垃圾处理是世界各国正在研究解决的重大环境保护问题, 实现其“三化”处理是其主要发展方向。其中高温堆肥处理生活垃圾是一种可持续性的处理方法, 其实质是通过加入增温剂来达到高温堆肥效果, 促进可生物降解的有机物向稳定的腐殖质方向转化。目前在增温剂的研究实验中, Kane, B. E 等<sup>[1]</sup>曾从微生物生态学角度研究过污泥堆肥过程, 分离到 304 株菌株; Godden. B 等<sup>[1]</sup>从牛粪堆肥中分离到 6 种细菌和 9 种放线菌; 日本科研人员经过研究实验<sup>[2, 3]</sup>从自然界中筛选到几种快速分解生活垃圾的有益微生物, 它们具有纤维素、脂类和蛋白质等物质的分解能力。在 45℃~60℃高温条件下, 这些微生物可将生活垃圾中厨余物(如菜叶、米饭、蛋壳和果皮等有机物)分解成 CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>O 和灰质等, 降解率达到 80%, 从而减少了生活垃圾的总量; 同时分解后的残渣可作为有机生物肥料、复混肥的主要组成部分, 它能改变土质结构, 促进农作物的生长和增强农作物的抗病能力。所以高温堆肥处理技术具有保护环境、节约原料和能源、投资少、运行费用低和经济回报高等优点。我国科研人员也开始了该技术的研究和应用<sup>[17, 18, 20]</sup>, 因其主要偏重于堆肥工艺、堆肥参数和影响因素等方面研究, 所以分离和筛选得到的有益微生物品种较少, 垃圾分解效果有限。

因此, 本实验研究的目的是尝试筛选出快速分解有机生活垃圾的微生物, 将其制成高效生物增温剂。在垃圾堆肥处理过程中, 它能促使堆肥温度迅速达到 50℃~70℃高温, 并能持续一段时间杀死病原菌<sup>[16, 23]</sup>、缩短发酵周期、提高堆肥效率和堆肥产品的质量。

### 2.2 材料与方法

#### 2.2.1 菌株的分离、筛选、培养性状和降解特性研究

##### 2.2.1.1 菌株的分离和筛选

###### 2.2.1.1.1 样品来源: 堆肥样品

###### 2.2.1.1.2 实验培养基

###### 2.2.1.1.2.1 菌株分离培养基<sup>[4, 5]</sup>

高氏 1 号培养基: 可溶性淀粉 20g、KNO<sub>3</sub> 1g、NaCl 0.5g、KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> 0.5g、MgSO<sub>4</sub> 0.5g、FeSO<sub>4</sub> 0.01g、琼脂 20g、水 1000ml、PH7.2~7.4; 0.1MPa, 灭菌 20 分钟。

改进的 PDA 固体培养基: 马铃薯 200g, 蔗糖(或葡萄糖)20g, 蛋白胨 5g, 水 1000ml、琼脂 18g; 马铃薯削皮、切块, 煮沸 30 分钟, 然后用四层纱布过滤, 再加葡萄糖、蛋白胨和琼脂, 溶化后补足水至 1000ml。0.1MPa, 灭菌 20 分钟。

牛肉膏蛋白胨培养基: 牛肉膏 3g、蛋白胨 10g、NaCl 5g、琼脂 15~20g、水 1000ml

PH7.0~7.2; 0.1MPa, 灭菌 20 分钟。

#### 2.2.1.1.2.2 降解特性研究培养基<sup>[4, 5]</sup>

淀粉水解培养基: 蛋白胨 1.0%, 可溶性淀粉 0.2%, 牛肉膏 0.5%, NaCl 0.5%, 琼脂 2.0%, PH7.0~7.2; 0.1MPa, 灭菌 20 分钟。

蛋白质培养基: 脱脂奶粉 5.0%, 可溶性淀粉 1.0%, 酵母膏 0.5%,  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  0.1%,  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  0.02%, 琼脂 2.0%, PH7.0~7.2; 0.1MPa, 灭菌 20 分钟。

油脂培养基:  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  0.1%,  $\text{K}_2\text{HPO}_4$  0.1%, KCl 0.05%,  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  0.01%, 橄榄油 1.0%, 聚乙烯醇 0.1%, 琼脂 2.0%, PH7.0~7.4; 0.1MPa, 灭菌 20 分钟。

改进的 PDA 固体培养基: 马铃薯 200g, 蔗糖 (或葡萄糖) 20g, 蛋白胨 5g, 水 1000ml、琼脂 18g; 马铃薯削皮、切块, 煮沸 30 分钟, 然后用四层纱布过滤, 再加葡萄糖、蛋白胨和琼脂, 溶化后补足水至 1000mL。0.1MPa, 灭菌 20 分钟。

#### 2.2.1.1.2.3 液体培养基

改进的 PDA 液体培养基: 马铃薯 200g, 蔗糖 (或葡萄糖) 20g, 蛋白胨 5g, 水 1000ml。马铃薯削皮、切块, 煮沸 30 分钟, 然后用四层纱布过滤, 再加葡萄糖和蛋白胨, 溶化后补足水至 1000mL。0.1MPa, 灭菌 20 分钟。

#### 2.2.1.1.2.4 斜面培养基

高氏 1 号培养基、改进的 PDA 固体培养基: 同上 2.2.1.1.2.1 所示

2.2.1.1.3 实验仪器: 实验所用到的主要仪器设备如表 2.1 所示。

表 2.1 实验所使用的主要仪器设备

Table 2.1 The main facilities and instruments used in the experiments

仪器、设备	制造单位
电热恒温水浴锅	天津泰斯特仪器有限公司
XH-C 型漩涡混合器	江苏省姜堰市康健医疗器械有限公司
pHS-3C 数字式酸度计	上海虹益仪器仪表有限公司
YXQ-SG-46-280S 手提式压力蒸汽灭菌器	上海博讯实业有限公司医疗设备厂
YXQ-LS-50SI 立式压力蒸汽灭菌器	上海博讯实业有限公司医疗设备厂

仪器、设备	制造单位
ECLIPSE-E200 显微镜	日本 Nikon 公司
SPX-250B-Z 生化培养箱	上海博迅实业有限公司医疗设备厂
MJ-160B-II 型恒温恒湿霉菌培养箱	上海跃进医疗器械厂
LRH-250-Z II 微电脑控制光照振荡培养箱	广东省医疗器械厂
高温堆肥装置	自行设计
ZHWY-111B 大容量恒温培养振荡器	上海智城分析仪器制造有限公司
DB-206SC 电热鼓风干燥箱	成都天宇实验设备有限责任公司
DZF-0 真空干燥箱	上海跃进医疗器械厂
SW-CJ-IFD 洁净工作台	上海博迅实业有限公司医疗设备厂
AR520 型电子精密天平	奥豪斯仪器公司
AG135 梅特勒-托利多电子天平	上海梅特勒仪器公司
分光光度计(NO:721)	上海跃进医疗器械厂

2.2.1.1.4 实验方法

2.2.1.1.4.1 增温剂菌株的分离与筛选流程:

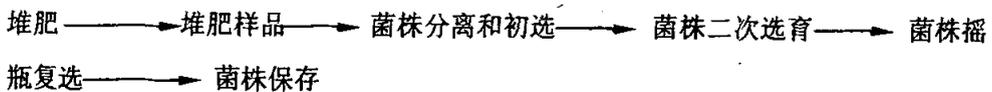


图 2.1 菌株的分离与筛选流程图

Fig2.1 The process of segregation and screening for microbes

2.2.1.1.4.2 实验步骤:

(1) 菌株的分离

取 10g 堆肥样品, 加入到含 90ml 无菌生理盐水 (含玻璃珠) 三角瓶中, 充分震荡打散后, 逐级稀释至合适的稀释度, 分别取 0.5ml 涂布在菌株分离培养基 (见 2.2.1.1.2.1) 平板上, 分别置 45℃ 及 55℃ 培养 48h。

(2) 菌株的初步筛选及特征实验

将不同培养基上分离初选出来的菌株, 依次编号为 TH001、TH002、TH003 等, 再进行二次选育。根据菌株生长过程中菌落形态、生长速度等方面的表现情况, 筛选出综合条件好的菌株, 然后再接种到改进的 PDA 培养基 (见 2.2.1.1.2.1) 平板上, 置于

45℃及 55℃培养 48h, 并对其进行相关的特征实验。

### 2.2.1.2 菌株的培养性状研究

通过菌株的分离、初步筛选及特征实验, 从堆肥样品中得到编号为 TH001、TH002、TH003 和 TH005 的四株综合条件较好有效菌株, 分别对其进行培养特性研究, 具体实验如下:

#### 2.2.1.2.1 TH001 菌株的生长曲线

将菌株接种于液体培养基(见 2.2.1.1.2.3)中, 在 45℃、120r/min 培养条件下摇瓶培养, 按照设定的时间取样, 用布氏漏斗减压抽滤菌丝体, 蒸馏水水洗数次, 置 45℃, 真空度 0.08MPa 的干燥箱中干燥至恒重, 称重并计算生物量<sup>[6]</sup>。生物量计算公式如下:

$$\text{生物量} = \frac{\text{干菌体重量}}{\text{发酵液体积}} \text{ (g/ml)} \dots\dots\dots \text{I}$$

根据计算结果, 建立生物量与其培养时间之间变化关系, 用以说明 TH001 菌株的最佳培养时间。

#### 2.2.1.2.2 TH002 菌株的生长曲线

将菌株接种于液体培养基(见 2.2.1.1.2.3)中, 在 45℃、120r/min 培养条件下摇瓶培养, 按照设定的时间取样测定 OD 值, 建立 OD 值与其培养时间之间的变化关系<sup>[7]</sup>, 用以说明 TH002 菌株的最佳培养时间。

#### 2.2.1.2.3 TH003 菌株的生长曲线

将菌株接种于液体培养基(见 2.2.1.1.2.3)中, 在 45℃、120r/min 培养条件下摇瓶培养, 按照设定的时间取样, 用布氏漏斗减压抽滤菌丝体, 蒸馏水水洗 3-4 次, 置 45℃, 真空度 0.08MPa 的干燥箱中干燥至恒重, 称重, 按公式 I 计算生物量, 根据计算结果, 建立生物量与其培养时间之间变化关系, 用以说明 TH003 菌株的最佳培养时间。

#### 2.2.1.2.4 TH005 菌株的生长曲线

将菌株接种于液体培养基(见 2.2.1.1.2.3)中, 在 45℃、120r/min 培养条件下摇瓶培养, 按照设定的时间取样测定 OD 值, 建立 OD 值与其培养时间之间的变化关系, 用以说明 TH005 菌株的最佳培养时间。

### 2.2.1.3 单菌株的降解特性研究

将筛选出的有效菌株分别接种在培养基（见 2.2.1.1.2.2 及 2.2.1.1.2.3）中培养, 然后进行脱氢酶、蛋白质、纤维素、脂肪和淀粉分解能力等菌株的降解特性研究<sup>[6, 9]</sup>, 具体实验内容如下:

#### 2.2.1.3.1 脱氢酶实验

有机废弃物的生物降解过程属于脱氢反应的过程, 因此脱氢酶活性大小是反映堆肥过程中菌株作用效果的重要指标之一。

实验步骤: ①将实验菌株接种于改性的 PDA 培养基上（见 2.2.1.2.2）, 置于 45℃ 培养 48h; ②取干燥的载玻片, 在上面滴一滴 3% 双氧水溶液, 挑取一环培养好的菌苔, 在双氧水溶液中涂抹, 若产生气泡（氧气）为脱氢酶阳性反应（用“+”表示）, 反之没产生气泡为脱氢酶阴性反应（用“-”表示）。

#### 2.2.1.3.2 淀粉水解实验

在堆肥过程中, 微生物能产生各种淀粉酶, 如枯草杆菌等产生  $\alpha$ -淀粉酶、芽孢杆菌等产生好氧菌  $\alpha$ -淀粉酶, 淀粉酶活性大小是反映堆肥过程中菌株水解淀粉能力的重要指标。堆肥完全腐熟时, 堆料中的淀粉完全被分解, 可采用碘量法判定淀粉水解的程度。

实验步骤: ①将淀粉培养基（见 2.2.1.2.2）溶化后, 倒平板, 凝固后, 置于 45℃ 培养箱中过夜; ②在平板培养基上点种实验菌株, 置于 45℃ 培养 48h; ③在上述条件下形成明显菌落后, 分别向平皿上滴加卢哥氏碘液（由碘片 1g、碘化钾 2g、蒸馏水 300ml 配制）。平板背景呈蓝黑色, 具有淀粉分解能力的菌落周围将出现透明无色圈, 表示淀粉水解阳性, 分别测量透明圈直径与菌落直径并计算比值（HC 值）, 若菌落周围不变色, 表示淀粉水解阴性。

#### 2.2.1.3.3 蛋白质分解实验

微生物对大分子的蛋白质不能直接利用, 必须靠产生的细胞外酶—蛋白质酶将大分子物质分解, 才能被吸收利用。蛋白质分解实验可采用类似于淀粉水解实验的方法, 来判断堆肥菌剂分解蛋白质能力。

实验步骤: ①将蛋白质培养基（见 2.2.1.2.2）溶化后, 倒入平板, 凝固后, 置于 45℃ 培养箱中过夜; ②在平板培养基上点种实验菌株, 置于 45℃ 培养 72h; ③在上述条件下形成明显菌落后, 若菌落周围有无色透明圈, 表示蛋白质分解呈阳性（用“+”表示）, 反之呈阴性（用“-”表示）。

#### 2.2.1.3.4 纤维素分解实验

有机废弃物的纤维素分解通过纤维素酶来实现, 纤维素酶是水解纤维素生成纤维二糖及葡萄糖的一类酶的总称。它包括  $C_1$  酶、 $C_x$  酶和纤维二糖酶（ $\beta$ -葡萄糖苷酶）<sup>[10]</sup>。

纤维素酶活力定性测定可通过纤维素水解酶对滤纸的分解实验来反映<sup>[11]</sup>。

实验步骤：①将液体培养基分装试管（规格：15X200），在培养基中浸泡 1 条新华 1 号滤纸（纸条长 8mm, 宽 1.4mm）；②测定该菌株时应有部分纸条露于培养基液面外；③接种培养基时应有不接种的空白对照；④在 45℃ 培养 264h；⑤在上述实验条件下，能将滤纸条分成一团纤维或将纸条折断或变薄者为阳性（用“+”表示），反之不能将滤纸条分成一团纤维或将纸条折断或变薄者呈阴性（用“-”表示）。

### 2.2.1.3.5 脂肪分解实验

微生物对大分子的脂肪不能直接利用，必须靠产生的细胞外酶—脂肪酶将大分子物质分解。脂肪水解后产生脂肪酸改变培养基的 pH，其中的中性红指示剂使培养基从淡红色变成深红色<sup>[12]</sup>。

实验步骤：①将溶化的油脂培养基（见 2.2.1.2.2）冷至 45℃ 左右时，充分振荡使油脂均匀分布，在无菌操作台上倒平板，凝固后，置于 45℃ 培养箱中过夜；②将菌株点接在上述培养基平板上；③置于 45℃ 培养 48h；④在上述条件下在平板上长菌的周围，如出现红色斑点，表明脂肪水解为阳性（用“+”表示），反之脂肪水解为阴性（用“-”表示）。

### 2.2.1.4 单菌株的有机生活垃圾处理实验研究

常见的有机生活垃圾主要由菜叶、米饭、蛋壳和果皮等有机物构成，所以进行有机生活垃圾处理摇瓶实验研究时模拟实验物由它们组成。其主要是由熟米饭 20g，熟肉粒 5g，果皮与菜叶 15g，黄瓜 7g 和鸡蛋壳 3g 等物质混匀而成<sup>[13]</sup>。具体摇瓶实验如下：

将筛选出的单菌株接种在装有 60ml 液体培养基的 250ml 三角瓶中，在 45℃ 及 120r/min 条件下培养 48h；再加入以上有机生活垃圾混匀；继续在 45℃ 和 120r/min 条件下培养 5d 后，纱布过滤，滤干后记录剩余垃圾的种类，分别称其湿重。

## 2.2.2 高效微生物增温剂的制作

### 2.2.2.1 复合微生物菌液配比

生活垃圾堆肥处理的过程就是利用微生物将可生物降解的有机物向稳定的腐殖质方向转化的过程。垃圾中的物质成分比较复杂，包括微生物容易利用的营养物质（如碳水化合物、蛋白质和脂肪等）和不容易分解的物质（如纤维素和木质素等）。在垃圾的自然降解过程中微生物的作用受一定环境条件制约，其处理效果不理想；而人工加入高效生物增温剂则可调节堆肥菌群结构、提高微生物活性和菌株间的协调作用，能使堆肥温度迅速达到高温并能持续一段时间、缩短发酵周期、提高堆肥效率和堆肥产品质量。虽然有些单一的细菌、真菌和放线菌群体活性高，但是在加快堆肥化过程的作用上都比不上高效生物增温剂菌群间的共同作用<sup>[14, 22]</sup>。本实验目的是经过分离和筛选

等步骤, 获得对垃圾分解效果较好的菌株, 接种到液体培养基(见 2.2.1.1.2.3)中, 在 45℃和 120r/min 条件下培养 48h, 得种子液, 按表 2.2 配制成复合微生物菌液。

表 2.2 复合微生物菌液配比

Table 2.2 The preparation ratio of complex microbial community (ml)

复合菌株组合号	TH001	TH002	TH003	TH005
I	20	20	20	—
II	20	20	—	20
III	20	—	20	20
IV	—	20	20	20
V	15	15	15	15

### 2.2.2.2 复合微生物菌液对有机生活垃圾处理实验

依据有机生活垃圾处理摇瓶实验的程序进行摇瓶筛选, 确定高效生物增温剂组成。将按表 2.2 配制的复合微生物菌液和有机生活垃圾(见 2.2.1.4)混合均匀后, 在 45℃和 120r/min 条件下培养 5d 后, 纱布过滤, 记录滤干物中剩余物的种类并称其湿重。

### 2.2.2.3 处理工艺实验

选用有效菌株分别接种在液体培养基(见 2.2.1.1.2.3)中, 在 45℃和 120r/min 条件下培养 48h 得到种子液, 然后按照 1:1:1 的比例混合装入 250ml 三角瓶中, 每瓶装量为 60ml, 共 3 瓶, 再分别加入等量的有机生活垃圾混合物(见 2.2.1.4)。1 号瓶在 45℃和静止条件下培养 5d; 2 号瓶在 45℃和 120r/min 条件下培养 5d; 3 号瓶在 45℃和 200r/min 条件下培养 5d, 纱布过滤, 记录滤干物中剩余物的种类并称其湿重。

### 2.2.2.4 复合微生物固体增温剂的制作

为了在今后的实验和生产中使用方便, 按图 2.2 制作复合微生物固体增温剂<sup>[7]</sup>。首先将菌株活化, 取斜面保存的菌株接种到液体培养基(见 2.2.1.2.3)中, 在相应的培养条件下培养。按照复合微生物菌液配比实验结果制备复合微生物增温剂; 其次称取一定量的麸皮, 加入 75%水, 搅拌均匀, 润料 1h, 装瓶, 料后 1.0~1.5cm, 包扎, 在  $9.8 \times 10^4$ pa 压力下灭菌 40min。冷却后, 将复合微生物增温剂接种于麸皮, 45℃培养, 待瓶内麸皮结成饼后, 进行扣瓶, 继续培养 5d 即得到种曲; 再次称取麸皮, 加入 5%稻皮, 加入原料量 70%水, 搅拌均匀, 圆气后蒸煮 60min。冷却后, 打散结块, 当料冷至 40℃时, 接入 0.30%种曲, 搅拌均匀, 将其平摊在灭菌的瓷盘中, 料厚 1~2cm。用灭菌过的纱布覆盖后在培养箱中培养, 35℃培养 8h, 40℃培养 8h, 45℃培养 8h, 总

培养时间为 24h；最后将培养好的物料晾干即可得到复合微生物固体增温剂。

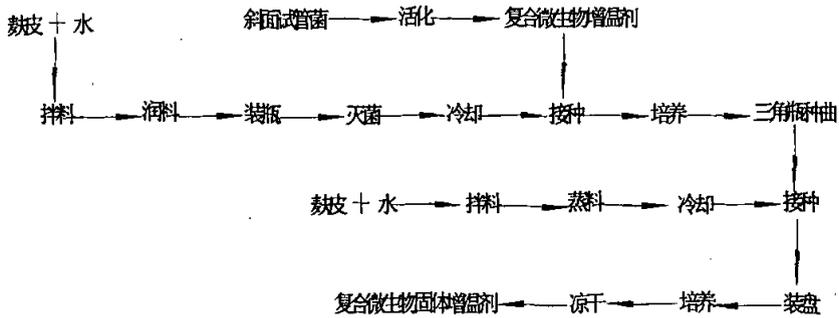


图 2.2 复合微生物固体增温剂制作工艺

Fig2.2 The manufacture process of solid complex microbial community

## 2.3 结果与讨论

### 2.3.1 有效菌株的分离

将在 45℃ 及 55℃ 培养条件下，生长速度快，菌落大，出现频率高的优势微生物菌株的单菌落依次编号，再反复划线分离纯化得纯菌株。其中，在高氏 1 号培养基上分离获得 4 个菌株，在改性 PDA 培养基上分离获得 8 个菌株，在牛肉膏蛋白胨培养基上分离获得 4 个菌株，共计 16 个菌株，分别移至斜面培养基上培养并保存。

### 2.3.2 菌株的初步筛选及特征

针对分离的 16 株菌进行二次培养筛选，根据菌落形态、生长情况等方面的综合情况（见表 2.3），发现编号为 TH001、TH002、TH003 和 TH005 菌株综合表现好。因此将这 4 株菌株确定为有效菌株，并进行各项形态特征实验（见表 2.4）。

表 2.3 菌株的生长情况

Table2.3 The growth information of separated microbes

菌株代号	菌落大小 cm		45℃ 生长情况	55℃ 生长情况
	45℃	55℃		
TH001	6.4	5.6	边缘不规则，菌苔丰满，菌体呈白色，生长好	边缘不规则，菌苔不丰满，菌体呈灰白色，生长好
TH002	6.8	5.2	边缘不规则，表面光亮，菌体呈浅粉红，生长很好	生长较好，菌体呈灰白色
TH003	6.5	5.4	边缘不规则，菌苔丰满，菌落圆形，絮状，菌体呈青绿色，生长好	生长较好，菌体呈暗青色灰白色
TH004	5.2	4.0	边缘不规则，粘稠，易挑起，灰白色，生长较好	生长较好，菌体呈暗灰色
TH005	6.5	6.7	边缘不规则，菌苔丰满，菌体呈灰白色，生长好	边缘不规则，菌苔丰满，菌体呈灰白色，生长好

菌株代号	菌落大小 cm		45℃生长情况	55℃生长情况
	45℃	55℃		
TH006	4.1	3.6	边缘不规则, 菌苔不丰满, 菌体呈红色, 生长不好	不生长
TH007	4.0	3.2	边缘不规则, 菌苔不丰满, 菌体呈浅粉红色, 生长不好	生长不好, 菌体呈灰白色。
TH008	4.4	3.4	边缘不规则, 菌苔不丰满, 菌落絮状, 菌体呈浅绿色, 生长不好	生长不好, 菌体呈浅绿色
TH009	4.6	—	边缘不规则, 菌体呈灰白色, 菌苔不丰满, 生长不好	不生长
TH010	4.2	—	边缘不规则, 菌苔不丰满, 菌体呈灰白色, 生长不好	不生长
TH011	4.3	3.0	边缘不规则, 菌苔不丰满, 菌体呈浅粉红色, 生长不好	边缘不规则, 菌苔不丰满, 菌体呈灰色, 生长不好
TH012	4.3	—	边缘不规则, 菌苔不丰满, 菌体呈红色, 生长不好	不生长
TH013	4.5	3.2	边缘不规则, 菌苔不丰满, 菌体呈红色, 生长不好	生长不太好, 菌体呈粉红色。
TH014	4.4	—	边缘不规则, 菌苔不丰满, 絮状, 菌体呈绿色, 生长不好	不生长
TH015	4.6	3.1	边缘不规则, 粘稠, 难挑起, 菌体呈灰白色, 菌苔不丰满, 生长不好	生长不太好, 菌体呈暗灰色。
TH016	4.3	—	边缘不规则, 菌苔不丰满, 菌体呈灰白色, 生长不好	不生长

表 2.4 有效菌株的形态特征

Table2. 4 The character and form of the separated microbes

菌株代号	细胞形态特征
TH001	细胞为树枝状, 分枝较短, 顶端有胞束孢子, 菌丝无横隔
TH002	革兰氏阴性, 细胞为短杆状, 有芽胞形成, 无周生鞭毛
TH003	丝状体, 菌丝有横隔, 菌丝体末端膨大, 壁加厚, 分生孢子头放射状, 小梗单层, 顶束有顶囊
TH005	革兰氏阴性, 细胞为短杆状, 有芽胞形成, 无周生鞭毛

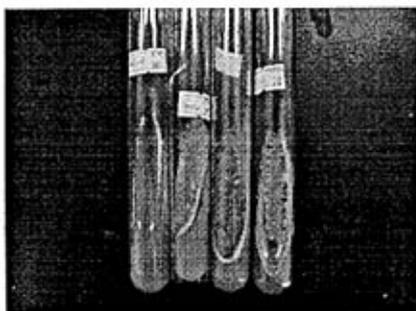
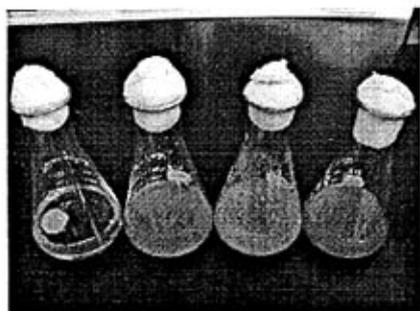


图 2.3 TH001+TH002+TH003+TH005

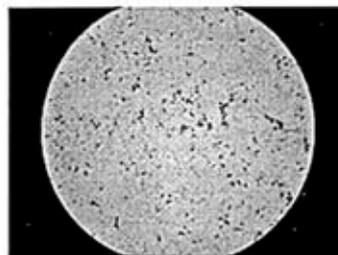
Fig2.3 TH001+TH002+TH003+TH005

图 2.4 菌株在显微镜下照片

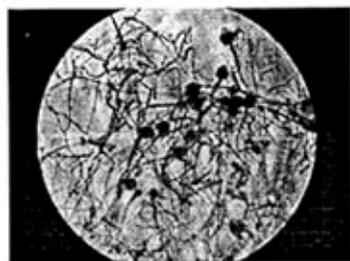
Fig2.4 The separated microbes photographs in microscope



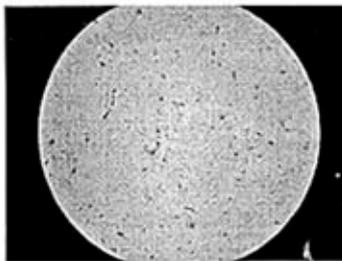
TH001 10X40



TH002 10X100



TH003 10X40



TH005 10X100

根据菌落形态和菌株的特征(见表 2.4、图 2.3 和图 2.4)，可初步确定 TH001 和 TH003 菌株属于真菌，TH002 和 TH005 菌株属于细菌。

### 2.4.3 菌株的培养性状研究

#### 2.4.3.1 TH001 菌株的生长曲线

菌株在液体培养基中生物量的变化与其摇瓶发酵时间的关系如图 2.5 所示。从图

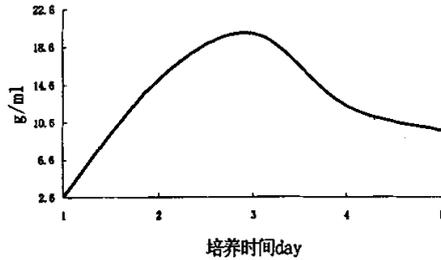


图2.5 TH001菌株生物量曲线

Fig2.5 The TH001 microbe biomass curve

中可知：发酵 1d~2.5d 时，生物量变化很明显；2.5~3d 时，生物量变化较缓慢；发酵 3d 时，生物量达到最大；发酵 3d 时后，生物量逐渐减小；从摇瓶发酵时间和生物量变化两方面考虑，TH001 最佳发酵周期应该为 2.5 天。

### 2.3.3.2 TH002 菌株的生长曲线

菌株在液体培养基中的生长情况如图 2.6 所示：

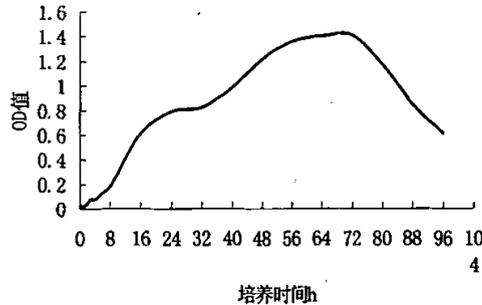


图2.6 TH002菌株生长曲线

Fig2.6 The TH002 microbe-growth curve

图 2.6 表明：摇瓶发酵 0h~56h 时，OD 值变化很明显；在 56h~72h 时，OD 值变化较缓慢；当摇瓶发酵 72h 时，OD 值达到最大；同时摇瓶发酵 72h 后，生长 OD 值变化逐渐减小；从摇瓶发酵时间和生长个数变化两方面考虑，TH002 最佳发酵周期应该为 56h。

### 2.3.3.3 TH003 菌株的生长曲线

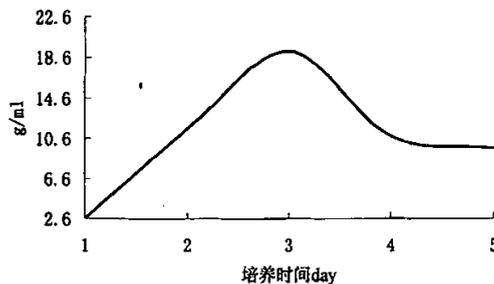


图2.7 TH003菌株生物量曲线

Fig2.7 The TH003 microbe biomass curve

菌株在液体培养基中生物量的变化与其摇瓶发酵时间的关系如图 2.7 所示，从图中可知：摇瓶发酵 1d~3d 时，生物量变化非常明显；当摇瓶发酵 3d 时，生物量达到最大；同时摇瓶发酵 3d 时后，生物量逐渐减小；从摇瓶发酵时间和生物量变化两方面考虑，TH003 最适发酵周期应该为 3 天。

### 2.3.3.4 TH005 菌株的生长曲线

菌株在液体培养基中的生长情况如图 2.8 所示：

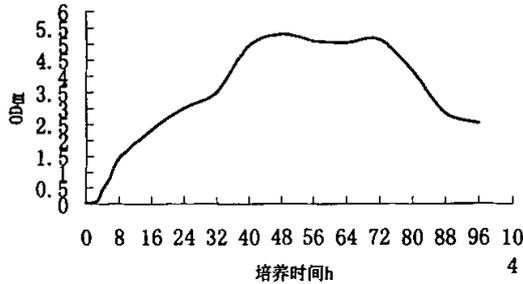


图2.8 TH005菌株生长曲线

Fig2.8 The TH005 microbe-growth curve

从图中可知：摇瓶发酵 0h~48h 时，生长 OD 值变化非常明显；当摇瓶发酵 48h 时，OD 值接近达到最大；同时摇瓶发酵 48h 时后，OD 值逐渐减小；从摇瓶发酵时间和生长 OD 值变化两方面考虑，TH005 最适发酵周期应该为 48h。

从以上 4 株菌株的生长培养曲线综合考虑可得：TH001、TH002、TH003 和 TH005 四种菌株的最适宜培养时间为 48h。

### 2.3.4 菌株的降解特性研究

#### 2.3.4.1 脱氢酶实验

生活垃圾的生物降解过程属于脱氢过程，因此脱氢酶活性大小是反映堆肥过程中菌株作用效果的重要指标。实验结果如表 2.5 所示：

表 2.5 菌株脱氢酶实验

Table2.5 The experimental result of dehydrogenase for the separated microbes

菌株代号	脱氢酶实验	实验现象
TH001	++	气泡多
TH002	+	气泡较多
TH003	++	气泡多
TH005	+	气泡较多

从实验结果可知：在脱氢酶实验中 4 株菌株都能产生脱氢酶，TH002 和 TH005 菌株

产生脱氢酶能力不太强, 而 TH001 和 TH003 菌株表现最突出, 产生脱氢酶能力最强, 对生活垃圾的生物降解能力强。

#### 2.3.4.2 淀粉水解实验

在堆肥过程中, 微生物能产生各种淀粉酶, 如枯草杆菌等产生  $\alpha$ -淀粉酶、芽孢杆菌等产生好氧菌  $\alpha$ -淀粉酶, 淀粉酶的活性是反映堆肥中菌株水解淀粉能力的指标。堆肥完全腐熟时, 堆料中的淀粉完全被分解, 可采用碘量法来判定淀粉水解的程度。实验结果如表 2.6 所示:

表 2.6 菌株淀粉水解实验

Table 2.6 The experimental result of starch hydrolytic for the separated microbes

菌株代号	菌落直径 $D_1$ (mm)	透明无色圈直径 $D_2$ (mm)	$Y = D_2 / D_1$
TH001	14.5	18.5	1.28
TH002	4.5	5.5	1.2
TH003	17.3	19.3	1.19
TH005	4.0	5.0	1.25

从实验结果可知: 在淀粉水解实验中 4 株菌株都能产生淀粉酶, 滴加卢哥氏碘液后, 它们菌落周围将出现透明无色圈。Y 值较大的菌落为淀粉酶较强的菌落, 其淀粉水解能力就越强。其中 TH001 的 Y 值最大, 其产淀粉酶能力最强, 而 TH003 的 Y 值最小, 其产淀粉酶能力最低, 所以它们的排列顺序为 TH001 > TH005 > TH002 > TH003。

#### 2.3.4.3 蛋白质分解实验

微生物对大分子的蛋白质不能直接利用, 必须靠产生的细胞外酶—蛋白质酶将大分子物质分解, 才能被吸收利用。蛋白质分解实验可采用类似于淀粉水解实验的方法, 来判断堆肥过程中菌株分解蛋白质能力的大小, 实验结果如表 2.7 所示:

表 2.7 菌株蛋白质分解实验

Table 2.7 The experimental result of starch protein for the separated microbes

菌株代号	蛋白质分解实验	实验现象
TH001	—	没有明显的透明圈
TH002	+	有明显的无色透明圈
TH003	+	有明显的无色透明圈
TH005	—	没有明显的透明圈

从实验结果可知: 在蛋白质分解实验中只有 TH002 和 TH003 菌株能产生蛋白质酶, 分解能力相对较强, 因此它们菌落周围有明显的无色透明圈, 而 TH001 和 TH005 菌株

的蛋白质分解能力相对很弱，基本上没有产蛋白质酶的能力。

#### 2.3.4.4 纤维素分解实验

生活垃圾中的纤维素分解是通过纤维素酶来实现，纤维素酶是水解纤维素生成纤维二糖及葡萄糖的一类酶的总称。它包括 C<sub>1</sub> 酶、C<sub>x</sub> 酶和纤维二糖酶（ $\beta$ -葡萄糖苷酶）。纤维素酶活力定性测定可通过纤维素水解酶对滤纸的分解实验来反映。实验结果如表 2.8 所示：

表 2.8 菌株纤维素分解实验

菌株代号	纤维素分解实验	实验现象
TH001	+	纸条有明显的折断和变薄
TH002	—	纸条没有明显分成一团纤维或将纸条折断或变薄
TH003	+	纸条有明显的折断和变薄
TH005	+	纸条有明显的折断和变薄
空白	—	纸条没有明显分成一团纤维或将纸条折断或变薄

从实验结果可知：在纤维素分解实验中只有 TH002 作用下的纸条没有明显的折断和变薄，其他 3 株菌株都可使纸条有明显变化，表明了 TH001、TH003 和 TH005 菌株具有较强产纤维素酶能力。

#### 2.3.4.5 脂肪分解实验

微生物对大分子的脂肪不能直接利用，必须靠产生的细胞外酶—脂肪酶将大分子物质分解。脂肪水解后产生脂肪酸能改变培养基的 PH 值，可使培养基中的中性红指示剂从淡红色变成深红色<sup>[8]</sup>。实验结果如表 2.9 所示：

表 2.9 菌株脂肪分解实验

菌株代号	脂肪分解实验	实验现象
TH001	+	有滴红色斑点
TH002	—	无红色斑点
TH003	+	有较多暗红色斑点
TH005	+	有胭脂红色斑点
空白	—	没有红色斑点

从实验结果可知：在脂肪分解实验中只有 TH002 菌株的周围没有出现红色斑点，

其他 3 株菌株的周围都出现红色斑点, 表明了 TH001、TH003 和 TH005 菌株具有较强产脂肪酶能力。

### 2.3.5 单菌株的有机生活垃圾处理实验研究

在单菌株的液体培养液中定量加入常见的有机生活垃圾, 在 45℃和 120r/min 条件下培养 5d 后, 纱布过滤, 滤干后记录剩余垃圾的种类, 分别称其湿重, 实验结果如表 2.10 所示:

表 2.10 不同单菌株处理垃圾分解实验结果

Table2.10 The garbage decomposition result for the single microbe treatment

菌号	垃圾处理后的 PH	滤干后剩余垃圾的湿重量 (g)						有机物的分解率%
		熟米饭	熟肉粒	果皮	菜叶	黄瓜	鸡蛋壳	
TH001	5.80	0	0	9.12	5.00	0.00	0.05	76.38
TH002	6.12	0	0	9.20	10.00	3.5	0.00	62.17
TH003	6.22	0	0	9.10	9.00	0.00	0.35	69.25
TH005	6.18	0	0	9.21	7.80	2.91	0.37	66.33

从实验结果可知: TH001、TH002、TH003 和 TH005 为垃圾分解效果较好的菌株, 通过以上几个相关的实验, 可知 TH001、TH002、TH003 和 TH005 基本符合作为高温菌株的要求, 可将他们组成复合微生物增温剂。

### 2.3.6 高效微生物增温剂的制作

#### 2.3.6.1 复合微生物菌液对有机生活垃圾处理实验

根据有机生活垃圾处理摇瓶实验的程序进行摇瓶筛选, 确定实验中最佳的高效生物增温剂组成。在 45℃和 120r/min 条件下培养 5d 后, 纱布过滤, 滤干后记录剩余垃圾的种类, 分别称其湿重如表 2.11 所示:

表 2.11 不同菌株组合处理垃圾分解实验结果

Table2.11 he garbage decomposition result of the different complex microbial community treatment

菌株组合号	菌液总量 ml	剩余垃圾的种类及湿重量 (g)	有机物的分解率%
I	60	黄 瓜 8.80、菜 叶 9.00、鸡蛋壳 0.10	70.17
II	60	黄 瓜 1.16、菜 叶 11.9、鸡蛋壳 0.52	75.70
III	60	黄 瓜 0.90、菜 叶 9.0、鸡蛋壳 0.04	82.47
IV	60	黄 瓜 9.00、菜 叶 9.20、鸡蛋壳 0.13	69.57
V	60	黄 瓜 1.14、菜 叶 11.30、鸡蛋壳 0.24	78.87

由实验结果可知：由菌株 TH001、TH003 和 TH005 组成的 III 号复合微生物增温剂，能够使有机生活垃圾中许多含糖类、蛋白质、淀粉和脂肪等物质迅速降解。它不仅提高了垃圾降解速度和腐熟化，而且使垃圾处理效果达到较好（有机物的分解率达到 82.47%）。因此，该 III 号增温剂是最佳的复合微生物增温剂组合。

### 2.3.6.2 处理工艺研究实验

将菌株 TH001、TH003 和 TH005 分别接种于液体培养基中，在 45℃ 和 120r/min 条件下培养 48h 得到种子液，然后按照一定比例（见 2.2.2.1）混合装入 250ml 三角瓶中，每瓶装量为 60ml，共 3 瓶，再分别加入常见的有机生活垃圾，实验结果如表 2.12 所示：

表 2.12 不同的工艺对垃圾处理的影响

Table 2.12 The influence of the different technology on garbage treatment

培养方式	菌液总量 ml	剩余垃圾的种类及湿重量 (g)
45℃, 振荡频率 0 r/min	60	基本没有分解
45℃, 振荡频率 120r/min	60	黄瓜 0.91, 菜叶 9.50, 鸡蛋壳 0.03
45℃, 振荡频率 200r/min	60	黄瓜 0.90, 菜叶 9.10, 鸡蛋壳 0.02

由实验结果可知：摇床振荡频率越大，其通风量就越大，也就是耗氧量就越大；耗氧量越大，垃圾分解速度就越大。因此通风量对垃圾的分解速度有较大的影响，通风量越大，越有利于垃圾的快速分解，缩短垃圾处理时间。综合考虑可知：摇床振荡频率为 120r/min 条件下垃圾处理结果相对较好。

### 2.3.6.3 复合微生物固体菌剂的制作

根据优势菌株的培养性状研究、处理工艺研究和复合微生物菌液在有机生活垃圾处理摇瓶等实验可得到：组成复合微生物增温剂的有效菌株的培养条件为：培养温度 45℃、振荡频率 120r/min 和培养时间 48h；在有机生活垃圾处理摇瓶分组实验研究中，确定 III 号复合微生物增温剂（由 TH001、TH003 和 TH005 组成）为最佳组合，然后按照工艺流程（见 2.2.2.4）制作得到 III 号复合微生物固体增温剂。

### 2.3.7 讨论

由实验结果可知：由于实验物料中含有粗纤维、碳水化合物和脂肪等多种化合物，要让它们较彻底的生化降解，仅靠一种微生物是无法完成的，必须要依靠各种微生物的相互交替和协同作用<sup>[19, 21]</sup>，才能满足堆肥过程中微生物所需要的碳、氮等营养物质的供给。所以本实验将 TH001、TH002、TH003 和 TH005 按照一定比例配合后，组成各种生物增温剂，它们是依靠微生物间的优势互补来协同作用，即 TH001 和 TH003 菌株

产生脱氢酶能力最强, TH001 和 TH002 产淀粉酶能力较强, TH002 和 TH003 菌株能产生蛋白质酶, TH001、TH003 和 TH005 菌株具有较强产纤维素酶能力, TH001、TH003 和 TH005 菌株具有较强产脂肪酶能力。将它们组合起来, 从而提高了蛋白酶、脂肪酶和脱氢酶等酶的活力, 更有利提高堆肥处理效果<sup>[16]</sup>。

## 2.4 小结

从堆肥样品中经过分离和筛选可得到具有较高垃圾分解能力的 4 株菌株。通过对它们形态、培养性状和降解特性等方面的实验研究可知: 它们基本具有组成高效生物增温剂的菌株的要求, 并确定这 4 株菌株的培养条件为: 培养温度 45℃、振荡频率 120r/min 和培养时间 48h。将这些菌株按照一定的比例配合后, 组成各种生物增温剂, 进行有机生活垃圾的处理实验, 从实验结果可知: 在 45℃及 120r/min 的条件下摇瓶处理 5d 后, 各种组合的生物增温剂依靠各菌株间的协同作用, 产生大量的蛋白酶、脂肪酶、脱氢酶、纤维素酶和淀粉酶等酶系将常见的有机生活垃圾生物降解; 同时得到由菌株 TH001、TH003 和 TH005 组成的 III 号复合微生物增温剂, 垃圾处理效果最好。因此, 确定 III 号微生物组合为实验研究中最佳的复合微生物增温剂组合。

## 参 考 文 献

- [1] 陈世和. 城市生活垃圾堆肥处理微生物特性研究 [J]. 废物治理 1990, 7: 23~35
- [2] 三浦明美, 齐藤格 日本专利 [P]. 2243466, 1996
- [3] 曹作中, 高海成. 当前我国生活垃圾处理发展方向探讨 [J]. 工程与技术, 2001, 10: 13~18.
- [4] 周德庆著 微生物学教程 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1993
- [5] 范秀容、李广武、沈萍编. 微生物学实验 [M]. 高等教育出版社, 1994
- [6] 朱葛健、王正祥编著 工业微生物实验技术手册 [M]. 北京: 中国轻工出版社, 1994
- [7] 牛天贵主编 食品微生物学实验技术 [M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2002
- [8] 东秀株、蔡妙英等编著 常见细菌系统鉴定手册 [M]. 北京: 科学出版社, 2001
- [9] 徐北斗、刘鸿亮、孟伟等. 垃圾堆肥高效复合微生物菌剂的制备 [J]. 环境科学研究, 2003, 2 (16): 58~60.
- [10] 金维续. 城市固体废物的农业问题 [J]. 环境科学丛刊, 1985, 6(3): 33~36
- [11] 蔡建成等编译. 堆肥工程与工厂 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1990
- [12] 陈世和. 城市生活垃圾堆肥肥化处理 [J]. 环境污染与防治, 1985, 7(4): 29~34
- [13] 朱晓慧、唐宝英、刘佳. 有机生活垃圾微生物处理剂的研究 [J]. 环境污染治理技术与设备, 2004, 5 (5) : 49~51
- [14] 顾希贤 垃圾堆肥微生物接种实验 [J]. 应用与环境微生物学, 1995, 1 (3): 274~278
- [15] H S Shin, E J Hwang, B S Park, et al. The effects of seed inoculation on the rate of

- garbage composting [J]. *Environmental Technology*, 2000, 20:293~300
- [16] 连宾、刘从强 嗜热真菌的生物转化功能与经济价值 [J]. *地球与环境*, vol.32.No.2,2004
- [17] 许修宏、肖玉珍、陈建平. 高效纤维素分解菌分离筛选的研究 [J]. *东北农业大学学报*, 1998, 29 (4): 330~333
- [18] 谢君、任路、李维等. 白腐菌液体培养产生木质素降解酶的研究 [J]. *四川大学学报*, 2000, 37 (增刊) 161~166
- [19] Xi Bei-dou, Lin Hong-Liang. MAW and sewage sludge with effective complex microorganisms [J]. *Journal of Environmental Sciences-China*, 2002, 14 (2): 264~268
- [20] 郭鹏、陈敏、陈中豪. 高效降解木质素优势混合菌的诱变选育研究 [J]. *广东工业大学学报*, 1997, 14 (4): 30~35
- [21] P. Aamuthu, Looichee Choong, Shameem Hasan, V.V. Praven. Kinetic evaluation of Composting of agricultural wastes [J]. *Environmental Technology*, 2001, 21 (3): 185~192
- [22] 李国学、张福锁. 固体废物堆肥化与有机复混肥生产 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2000, 13~28
- [23] 连宾、周正乾、杨秀军、殷正恩. 利用生活垃圾制造有机复合肥研究报告 [M]. *西南农业学报*, 1994, 12 (7): 40~45

### 第三章 高效微生物增温剂在堆肥过程中的应用研究

#### 3.1 前言

根据贵阳市城管局环卫处的统计资料<sup>[1]</sup>表明, 2002 年贵阳市日产城市生活垃圾 1822 吨, 人均垃圾生产量 1.16Kg/d。参考国内经济发展水平、消费水平及燃料结构相当的城市统计数据, 贵阳市城市生活垃圾组成预测如表 3.1 所示:

表 3.1 城市生活垃圾的组成

Table3.1 The composing of municipal solid wastes

年份	厨余	纸类	塑料、橡胶	布类	竹木	玻璃	金属	灰土	砖瓦、陶瓷
2002	32.56	7.86	9.34	3.88	2.60	2.58	0.97	38.51	1.70
2005	33.33	8.84	10.96	6.23	4.68	2.62	1.00	30.66	1.68
2010	39.24	9.08	15.02	6.44	4.76	2.74	1.10	20.06	1.56
2020	42.36	9.32	17.08	6.89	5.04	2.86	1.20	13.81	1.44

从表中可知: 由于贵阳市经济近几年的迅速发展和人民生活水平不断提高, 所以导致了城市生活垃圾组成也在发生显著变化。其发展变化趋势大概为: 垃圾产量增长速度快。如贵阳市小河经济开发区、南明区每日垃圾产量 1120T, 且每年以 7%~9% 的速度递增; 垃圾成分变化快; 有机成分大于无机成分, 可燃成分大于不可燃成分; 可回收利用物质(厨余、纸类等)逐年增多, 可利用价值也增大。但目前贵阳市城市生活垃圾处理方法中仍以简单卫生填埋为主的单一处理方法, 垃圾中的有机物回收利用率不高, 对环境造成一定的危害。近年来以“资源化、无害化、减量化”作为控制固体废物污染的技术政策的提出及城市垃圾分装化的逐步推广, 用堆肥技术来处理生活垃圾将会得到进一步发展和普及, 符合贵阳循环经济型生态城市建设总体规划<sup>[1]</sup>。另外由于大量施用化肥和缺少有机肥投入, 使得农业环境日趋恶化, 土质下降, 耕地有机质平均含量已降到 11.5%, 因而必须调整农用肥结构, 多用有机肥来改善耕地土质<sup>[2]</sup>。因此, 采用堆肥技术处理城市生活垃圾无疑是一种较好的选择。所以与生物处理法相关的高温堆肥处理法将是一种高效、经济和具有发展前景的处理方法。

堆肥处理方法是城市生活垃圾处理的主要方法之一, 它是在有氧的条件下, 利用好氧微生物依据发酵工程技术原理进行的。但是在堆肥过程中, 传统的堆肥法一般都是利用堆肥原料中的土著微生物来降解有机生活垃圾, 由于堆肥初期土著微生物量少, 需要一定时间才能繁殖起来进行发酵<sup>[2, 3]</sup>, 因此传统堆肥法存在着发酵时间长、产生臭味且肥效低等问题。如果在其中人工加入高效微生物增温菌剂, 它可以调节菌群结构、提高微生物活性、充分发挥微生物种群之间的协同作用, 使堆肥温度迅速达到 50℃~70℃ 高温, 杀死病原菌、缩短发酵周期和降解有机物的作用, 从而达到高温堆肥处理

的效果<sup>[4, 5, 6, 30]</sup>。因此, 高效生物增温剂在堆肥过程中起着核心作用, 具有广泛的应用研究价值。

## 3.2 材料及方法

### 3.2.1 高效微生物增温剂的作用机理

#### 3.2.1.1 增温剂菌株的特性

好氧堆肥处理是将生活垃圾中堆腐的有机物料、附加物和高效微生物增温菌剂按照一定的比例混合, 在合适的条件下利用微生物种群之间的协同作用, 使堆肥温度迅速达到 50℃~70℃高温, 杀死病原菌, 因此称其为高温堆肥处理。在此过程中不同微生物分泌的酶的种类不同, 有机物的生化降解是细菌、放线菌和真菌等多种微生物之间共同作用的结果。

##### (1) 细菌 (TH002 和 TH005)

在好氧堆肥处理过程中, 存在大量的细菌。它利用其比表面积大的特点, 可将可溶性有机物吸收到细胞中利用。在不同的堆肥环境中分离的细菌在分类学上具有多样性, 其中包含假单胞菌属 (*pseudomonas*)、克雷伯氏菌属 (*klebsiella*) 以及芽孢杆菌属 (*bacillus*) 的细菌<sup>[7, 8, 9]</sup>。从堆肥过程高温阶段筛选出的菌株 TH005 (见 2.3.2), 能够在 55℃以上温度下生长, 因其能够生成耐热的孢子, 应属于嗜热性芽孢杆菌, 故有抵抗高温、辐射和化学腐蚀的功能。而从堆肥过程中温阶段筛选出的 TH002 (见 2.3.2), 能够在 45℃温度下生长, 被认为是嗜温性细菌, 它是堆肥过程中温阶段的主要微生物。因其能产生芽孢, 故属于芽孢杆菌属。在堆肥过程的初级阶段, TH002 是最活跃的, 随着堆肥温度达到 50℃时, 其种群数也逐渐减少到最低; 此时嗜热菌 TH005 逐渐活跃, 其种群数也逐渐增加到最大; 在降温阶段时, 嗜热菌 TH005 逐渐失去活跃, 嗜温菌 TH002 逐渐恢复活跃。

##### (2) 真菌 (TH001 和 TH003)

从堆肥过程中筛选出的菌株 TH001 (见 2.3.2), 菌丝为树枝状, 分枝较短, 顶端有分生孢子, 菌丝无横隔, 能够在 45℃及 55℃温度下生长, 可分解纤维素; 它是堆肥过程中高温阶段分解纤维素的主要菌群, 也可在降温阶段和熟化阶段出现。从堆肥过程筛选出的菌株 TH003 (见 2.3.2), 丝状体, 菌丝有横隔, 菌丝体末端膨大, 壁厚, 分生孢子头放射状, 小梗单层, 有顶囊, 能够在 45℃下生长, 可分解纤维素, 应属于曲霉, 它是堆肥处理中温阶段的主要菌群, 随着堆肥温度达到 50℃时, 其种群数也逐渐减少到最低; 此时嗜热菌 TH003 逐渐失去活性; 在降温阶段时 TH003 活性逐渐增加。在堆肥过程中由于高温时间持续较短, 对于嗜热菌 TH003 的降解能力不会造成较大影响, 同时它对于堆肥物的腐熟和稳定还起一定作用。

#### 3.2.1.2 堆肥过程中的作用机理探讨

在堆肥过程中微生物降解有机物的作用机理非常复杂, 其主要的內容如下:

(1)在生活垃圾处理过程中人为的加入高效微生物增温剂(见 2.3.6.3),可提高堆肥原料初期中的有益微生物总数。堆肥处理前微生物浓度为  $4 \times 10^5$  CFU/g,在堆肥过程中接种高效微生物增温剂后,微生物增殖较快,48h~52h 后微生物浓度可增加到  $1 \times 10^{10}$  CFU/g,使得微生物的总数得到增加,且接种微生物对其它微生物保持优势,提高了菌群质量。

(2)微生物群落中微生物成员不具备单独降解有些难降解有机物的能力,而微生物群落却能将难降解有机物较彻底降解,主要是通过共代谢途径建立较完整的难降解物质降解酶系进行降解的。共代谢作用是 1959 年美国德克萨斯大学的 Leadbetter 和 Foster 发现,是微生物在它可利用的初级能源物质存在时,才能对它原来不能利用的物质进行生物降解的过程。在此过程中,用于微生物生长的物质称为一级物质,非用于生长的物质称为二级物质,微生物依靠一级物质的消耗而生长,同时具有降解不可利用碳源和能源二级物质的能力。它具有的以下特点:发生共代谢所需的能量通过一级物质代谢提供;二级物质的代谢所需的酶来源于微生物对一级物质的利用而产生的;二级物质的代谢产物不能用于微生物生长<sup>[10]</sup>。在生活垃圾处理过程中接种高效微生物增温剂(见 2.3.6.3),它是具有分解有机物能力较强的微生物,使之成为优势菌株,加速有机物的生物降解(见 2.3.6.1)。在此过程中,利用这些菌株对容易降解的一级物质的分解消耗,提供大量的碳源和能源来促进微生物的生长,能产生大量的蛋白酶、脂肪酶、脱氢酶、纤维素酶和淀粉酶等酶系(见 2.3.4),实现蛋白质的氨化作用(使蛋白质及氨基酸发生分解时其中的 N 呈氨态释放出来,被微生物吸收利用)、糖类物质的分解(能分解淀粉、多糖等,并可将其转化为细胞物质。何苗<sup>[11]</sup>等报道,葡萄糖经相关微生物的代谢还可为难降解的二级物质提供必须的还原力和各种辅酶、脂肪的分解(可将脂肪水解成为甘油和脂肪酸)、腐殖质的形成(由微生物所合成的化合物与植物残体或其分解产物交互作用可形成稳定的腐殖质化合物),同时也产生一些降解酶来降解二级物质。因此,有机生活垃圾处理经过处理后具有 82.47% 较高降解率。

(3)微生物间共生增殖、协调互助作用。在生活垃圾处理过程中加入高效微生物增温剂(见 2.3.6.3),组成了复杂而稳定的微生物群体结构系统<sup>[12]</sup>。它们之间和谐相处,协调作用(见 2.3.6.1),所以在其中微生物利用一级物质分解转化为不完全氧化产物,这种产物与部分二级物质发生反应,产物又被其他微生物利用。如有些微生物可促进不溶性物质的溶解,通过形成多糖物质或分泌有机酸类物质促进难溶性二级物质(K、P、Si 等矿物元素)转变为植物可吸收利用的形式,再通过硅酸盐细菌、菌根菌等作用<sup>[13]</sup>,从而使堆肥中的易分解的有机物质在各种微生物的综合作用下,发生了极其复杂的生物地球化学变化,转变成为对植物生长有利的、不破坏土壤结构的优质有机无机复混肥的原料,从而促进自然生态系统的物质和能量的循环。

### 3.2.2 高效微生物增温剂的应用研究。

3.2.2.1 实验材料

3.2.2.1.1 实验材料：厨余、米糠、谷壳等取自贵大学生食堂和贵阳后坝粮油市场，其组成如表 3.2 所示：

表 3.2 不同堆肥材料的理化性质

Table3.2 Physical and chemical characteristics of different composing materials

原料类型	W(org-C)%	W(TN)%	C/N	W(P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )%	W(K <sub>2</sub> O)%	W(H <sub>2</sub> O)%
厨余	53.75	2.15	25	2.45	0.56	65
米糠	30.28	2.33	13.0	3.01	1.76	2.5
谷壳	46.38	2.10	22.09	0.10	5.34	3.5

注：贵州省农业科学院土壤肥料研究所测定

按照堆肥发酵条件的要求（见 3.2.2.3.2.4），确定堆肥实验材料的每组组成为：厨余 22 Kg、米糠 3 Kg 和谷壳 3 Kg。

3.2.2.1.2 实验菌剂：实验筛选配制的复合微生物菌剂（如表 3.3）。

根据相关的特性实验（见 2.3.4 和 2.3.5），把 TH001 和 TH003 作为基本的复合菌剂组成，而 TH002 和 TH005 作为选择项考虑，因此可得如表 3.3 的配比方案。在堆肥处理过程中，复合微生物菌剂用量为实验材料总重量的 1.5%。

表 3.3 复合增温剂配比组成

Table3.3 The preparation ratio of complex microbial community (ml)

复合菌剂代号	TH001	TH002	TH003	TH005
1	112.5ml	112.5ml	112.5ml	112.5ml
2	150ml	—	150ml	150ml
3	150ml	150ml	150ml	—

3.2.2.1.3 实验装置

随着城市规模的不断扩大，将会出现越来越多的生活小区，据统计生活小区产生生活垃圾 1~2T/天左右，而且家庭产生生活垃圾有机物含量高，能够满足堆肥处理条件，所以利用小型自动化处理设备和生物工程技术原理，可在社区内进行堆肥发酵处理，从而实现生活小区垃圾的无害化处理。因此，对于城市生活小区垃圾日产量不高，处理要求安全卫生等情况，可依据堆肥发酵工艺，提出社区生活垃圾处理的方案，即设计一个封闭的发酵除臭装置即小型自动化垃圾发酵处理机<sup>[14]</sup>（如图 3.4），让易腐败的有机废物在封闭的发酵筒中发生一系列生化降解反应，达到无害化处理要求。

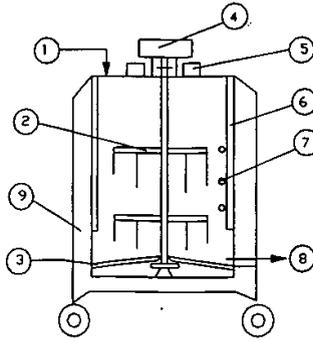


图 3.4 小型圆筒自动垃圾发酵处理机

Fig3.4 The small cylinder auto-storehouse of fermentation

1. 物料进口; 2. 搅拌装置; 3. 加热装置; 4. 动力装置; 5. 除臭装置; 6. 通风装置; 7. 温湿度控制装置; 8. 物料出口; 9. 本体装置

### 3.2.2.2 实验装置的设计

#### 3.2.2.2.1 实验装置的设计要求

城市社区垃圾日产量不高, 依据堆肥工艺技术原理和四棱锥台式生物发酵仓的特点, 提出了堆肥技术处理有机废物的方法及其装置的方案。整个装置具有自动化程度较高、操作方便、结构紧凑和投资小等优点, 可克服堆肥处理过程中堆肥时间长、堆肥不均匀、热量利用不充分等缺点, 从而实现社区生活垃圾无害化处理。

#### 3.2.2.2.2 实验装置的设计计算过程

##### 3.2.2.2.2.1 热量衡算

城市垃圾处理的实质是利用微生物技术和措施来改变原垃圾的物理、化学性质及减少垃圾数量的过程。堆肥过程中微生物氧化分解有机物放出的热量一方面使堆肥发酵的堆层温度上升, 有利于无害化处理, 另一方面使气体的温度升高, 物料中的水分蒸发, 环境间的热传递导致部分热损失。因此堆肥过程中的热量衡算可表示为<sup>[15]</sup>:

$$Q_r \geq q_s + q_a + q_w + q_i \quad (1)$$

(式中:  $Q_r$ —堆肥过程中生化反应所产生反应热;  $q_s$ —堆料上升所需要的热量;  $q_a$ —通风气体带走的热量;  $q_w$ —水分蒸发带走热量;  $q_i$ —环境间热传递导致部分热损失)

由堆肥实验确定有关参数如下: 进料垃圾的有机物含量为 65% (即:  $Y_0 = 0.65\text{g/g}$ ); 堆肥过程中有机物降解率为  $\Delta F = 20\% \sim 30\%$ ; 一次发酵时间为 8 天; 进料含水率  $W_0$  为 60%, 出料含水率  $W_1$  为 45%; 堆肥操作温度为  $T = 55^\circ\text{C}$ ; 堆肥供气  $G_0$  为  $0.20\text{m}^3/\text{m}^3 \cdot \text{min}$ ; 堆料容重为  $0.5\text{kg/l}$ 。

(1) 堆肥过程中生化反应所产生的反应热

$$Q_r = \Delta F_s Q_s = F_0 Y_0 \Delta F Q_s \quad (2)$$

(式中:  $F_0$  为堆料总重量;  $Q_s$  为堆肥过程单位质量挥发有机质反应所产生的热量  $13.5 \times 10^3 \text{KJ/Kg}$ ), 由此可知:

$$Q_r = F_0 \times (1 - 60\%) \times 0.65 \times 30\% \times 13.5 \times 10^3 = 1.13 \times 10^3 F_0 \text{ (KJ)}$$

(2) 堆料上升所需要的热量

$$q_s = F_0 C_{rs} (T - T_a) \quad (3)$$

(式中:  $C_{rs}$ : 堆料的比热容  $2.0 \text{KJ/Kg} \cdot \text{K}$ ;  $T_a$ : 周围环境温度为  $20^\circ\text{C}$ ), 由此可知:

$$q_s = F_0 \times 2.0 \times (60 - 20) \times (1 - 60\%) = 32 F_0$$

(3) 通风气体带走的热量

$$q_a = G_0 C_{ra} (T - T_a) \quad (4)$$

(式中:  $C_{ra}$ : 气体的比热容  $1.005 \text{KJ/Kg} \cdot \text{K}$ ) 由此可知

$$q_a = 0.2 \times 0.2 \times 1000 / 22.4 \times 29 / 1000 \times 1.005 \times \{ (60 - 20) + 273 \} F_0 = 66 F_0$$

(4) 水分蒸发带走的热量

$$q_w = F_0 W_0 C_{rw} (T - T_a) + Q_v \Delta F_v \quad (5)$$

(式中:  $C_{rw}$ : 水的比热容  $4.18 \text{KJ/Kg} \cdot \text{K}$ ; 水的汽化潜热  $2.26 \times 10^3 \text{KJ/Kg}$ ;  $\Delta F_v$  水分的蒸发量) 由此可知:  $q_w = F_0 \{ 60\% \times 4.18 \times (60 - 20) + 2.26 \times 10^3 \times (F_0 W_0 - F_1 W_1) \}$   
 $= 113.4 F_0 + 2.26 \times 10^3 \{ F_0 \times 60\% - F_0 \times 45\% \times (1 - 60\%) (1 - 65\% \times 30\%) / 65\% \} = 965 F_0$

(5) 环境间的热传递导致部分热损失

$$q_i = UA (T - T_a) \quad (6)$$

(式中<sup>[2, 28]</sup>:  $U$ : 环境散热的总的传热系数, 由于采用保温材料,  $U$  为  $1 \text{KJ/m}^2 \cdot \text{C}$ ;  $A$ : 传热面积 (总面积 / 传热距离)  $= A_0 / s$ ,  $s = 0.020 \text{m}$ ), 由此可知:

$$q_i = UA (T - T_a) = 1 \times A_0 / s \times (60 - 20) = 40 A_0 / 0.020 = 2.0 \times 10^3 A_0$$

将以上(3)(4)(5)(6)计算  $q_s$ 、 $q_a$ 、 $q_w$ 、 $q_i$  的结果代入(1)式可得:

$$1.13 \times 10^3 F_0 \geq 66 F_0 + 32 F_0 + 965 F_0 + 2.0 \times 10^3 A_0$$

$$67 F_0 \geq 2.0 \times 10^3 A_0, A_0 / F_0 \leq 0.03$$

设堆肥处理装置外形尺寸  $\Phi 500 \times 1100$ , 体积为  $220 \text{L}$ , 堆料容重为  $0.5 \text{kg/l}$ :

$$F_0 = \rho \times V = 0.5 \times 220 = 110 \text{kg};$$

$$A_0 = 2 \times 3.14 \times 0.25^2 + 3.14 \times 0.5 \times 1.1 = 2.12 \text{m}^2;$$

$$A_0 / F_0 = 2.12 / 110 = 0.019 \leq 0.03$$

所以该设计满足堆肥工艺设计—热量衡算要求。

3.2.2.2.2 物料衡算

堆肥过程中, 有机物部分被微生物分解转化为堆肥, 部分被分解生成  $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}$  和  $\text{NH}_3$

等。以干基为计算基准，设开始堆肥的物料量为  $F_0$ ，有机挥发分的质量分率为  $S_0$ ，堆肥产品的产量为  $F$ ，堆肥产品中有机挥发分的质量分率为  $S$ ，有机挥发分的转化率为  $X_{vm}$ ，表示堆肥反应进行的程度<sup>[15, 16]</sup>。

$$\text{总物料衡算: } F_0 = F_0 S_0 X_{vm} + F \quad (7)$$

$$\text{有机挥发分的衡算: } F_0 S_0 = F_0 S_0 X_{vm} + FS \quad (8)$$

将式(7)代入式(8)可得:

$$F_0 S_0 - F_0 S_0 X_{vm} = (F_0 - F_0 S_0 X_{vm}) S$$

$$X_{vm} = (S_0 - S) / S_0 (1 - S) \quad (9)$$

$$S = S_0(1 - X_{vm}) / (1 - S_0 X_{vm})$$

堆肥实验时，发酵阶段的挥发性固体质量含量 35%~65%减少到 15%~35%，根据方程(9)可以计算有机挥发分的转化率  $X_{vm}$  为 20%~55%。

堆肥实验过程中，通过大量数据可以建立一次发酵阶段堆肥重量变化  $\Delta F$  与挥发性固体含量和含水率之间关系的二元线性方程表达式<sup>[17, 18, 19]</sup>：

$$\Delta F = 2.76 F_0 (S_0 - S) (1 - W_0) + 1.96 F_0 (W_0 - W_1)$$

一次发酵阶段结束时，堆肥体积  $V_1$  是由减重后的出量重量和变化后的容重来确定。

$$\text{即: } V_1 = (F_0 - \Delta F) / \rho (1 + a)$$

(式中:  $\rho$  为发酵进料的容重;  $a$  为容重增加系数)

发酵阶段所需要的体积  $V$  的方程表达式:  $V = [(V_0 + V_r) + V_1] f / 2$

(式中:  $V_0$  为发酵进料的体积;  $V_r$  为堆肥返料体积;  $f$  为一次发酵装置填充系数)

设  $R$  为堆肥返料体积比;  $f$  为 1.0, 由此可知:

$$V = [F_0 (1 + a) + (1 + R) (F_0 - \Delta F)] / 2 \rho (1 + a) = 220 \text{ L}$$

所以该设计满足堆肥工艺设计——物料衡算要求。

### 3.2.2.2.3 通风量计算

在堆肥过程的不同阶段，通风供氧的目的不同，通风量也就不同。堆肥初期易分解的有机物含量高，有机物氧化易分解的必须大量供氧，但通风量过大，水份散失快，温度、水份过低达不到要求，会使生化速度减慢。因此，通风有供氧、降温、带出水分的作用。整个堆肥过程的通风量是根据各阶段的通风目的不同分别计算。

#### (1) 有机物氧化分解所需的氧气量

堆肥过程中有机物分解要的氧气，可通过分解速度与分解所需氧气的表达式<sup>[17]</sup>：

$$ds/dt = - q (z_i - z_o) / a \cdot M \quad (10)$$

(式中:  $s$ —堆肥总质量 Kg;  $q$ —通气量 ( $\text{m}^3/\text{h}$ );  $z_i$ —进气中氧的浓度;  $z_o$ —排气中氧的浓度;  $a$ —分解有机物需要的氧量 (一般取  $0.89 \text{ m}^3/\text{kg}$ );  $M$ —堆肥质量 Kg)

堆肥初期易分解的有机物含量高，有机物氧化分解快，分解速度达到最大时，所需的氧气量达到最大可表达:

$$[ds/dt]_{\max} = us_0/k - q(z_i - z_0) \quad (11)$$

(式中:  $u=0.1/h$ ,  $z_i=0.21$ ,  $z_0=0.16$ ,  $ky=12$ ,  $So=0.3$ ,  $k=[(ky)^{1/2}+1]^2=19.9$ )

将(10)变形可知:  $q/M = -(a_r ds/dt) / (z_i - z_0)$  (12)

将(12)代入(11)可知:  $[ds/dt]_{\max} = (a_r us_0/k) / (z_0 - z_i)$   
 $= 0.89 \times 0.3 \times 0.1 / (0.21 - 0.16) \times 19.9 = 0.023 \text{ m}^3/\text{hkg}$

(2) 有机物分解过程中降温和带出水分所需的氧气量<sup>[15][16]</sup>

$$H = 0.622P_v / (P - P_v), W = M(W_1 - W_2) / (100 - W_2), L = W / (H_2 - H_1)$$

所需氧气量:  $L = L(1 + H_1)$

(式中:  $H$ —空气湿度;  $P$ —湿空气的总压;  $P_v$ —空气中水蒸气分压;  $W_1$ —进口含水量 60%;  $W_2$ —出口含水量 45%。实验可知: 空气进口温度为 20℃, 相对湿度为 75%, 空气出口温度为 50℃, 相对湿度为 90%)

20℃时饱和水蒸汽压为 2.33kN/m<sup>2</sup>, 50℃时饱和水蒸汽压为 14.98kN/m<sup>2</sup>, 总压为常压即 101.3kN/m<sup>2</sup>, 则:

$$H_1 = 0.622P_v / (P - P_v) = 0.622 \times 75\% \times 2.33 / (101.3 - 75\% \times 2.33) = 0.011$$

$$H_2 = 0.622P_v / (P - P_v) = 0.622 \times 90\% \times 14.98 / (101.3 - 90\% \times 14.98) = 0.095$$

$$W = M(W_1 - W_2) / (100 - W_2) = (60\% - 45\%) / (100 - 45\%) = 0.27 \text{ kg}$$

$$L = W / (H_2 - H_1) = 0.27 / (0.095 - 0.011) = 3.21 \text{ kg / kg}$$

$$= 3.964 \times 22.4 / 29 = 3.062 \text{ m}^3 / \text{kg} = 0.017 \text{ m}^3 / \text{hkg}$$

堆肥过程所需氧气:  $Q = [ds/dt]_{\max} + L = 0.023 + 0.017 = 0.040 \text{ m}^3 / \text{hkg} = 0.20 \text{ m}^3 / \text{m}^3 \cdot \text{min}$

由于堆肥过程中所需的氧气量与有机物含量、反应进行的程度、氧的利用率和保温效果等因素有关, 所以高温堆肥处理过程中消耗氧气量一般在 0.15~0.22 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>·min 范围内, 所以本设计符合要求。

### 3.3.2.3 装置的结构设计

该设备结构设计以堆肥工艺计算为依据进行, 它主要由本体部分、动力装置、温湿控制、通风除臭装置和保温部分等组成, 将温度、湿度及本体设备实现自动化控制。

#### (1) 本体部分

根据实验设计要求, 经过工艺计算可知堆肥处理装置体积为 220L。本体采用材料: 0Cr18Ni9Ti, 壁厚 6mm, 外形尺寸 Φ500 x1100; 保温层采用材料: 石棉, 保温层厚 17mm; 有 4 个滚轮。

#### (2) 自动控制系统

由加热装置、除臭装置、温湿度控制装置、搅拌装置、动力装置和通风装置组成, 系统按照工艺指标运行, 自动处理控制各个测量和反馈信号, 实现各个装置协调工作。

A 加热装置: 采用电热器 (2000~4000w), 恒温控制; B 除臭装置: 有专门的空气除臭

器(含有气体监测装置); C 温湿度控制装置: 由温度传感器、湿度传感器和显示器组成自动测控装置, 反映堆肥实时温度变化; D 搅拌装置: 类似锚式搅拌器(自行设计), 搅拌轴  $\Phi = 40\text{mm}$ , 转速  $10 \sim 20\text{r} / \text{min}$ ; E 动力装置: 由电机功率  $1.5\text{KW}$  (三相,  $380\text{V}$ )、联轴器组成; F 通风控制装置: 由空气压缩机功率  $500\text{W}$ , 分风装置(本体装置内设有通风管, 管壁上开通风孔  $\Phi = 10\text{mm}$ , 孔距  $L = 12\text{mm}$ ) 提供氧气供应;  $\text{O}_2 - \text{H}_2\text{S}$  测定仪组成控制装置 (ABCDEF 集成一个自动控制系统)。

### 3.2.2.3 实验装置的应用效果

#### 3.2.2.3.1 实验装置的工作原理

小型自动化垃圾发酵处理机主要由本体装置部分和自动控制系统组成, 结构示意图(见 3.3.1(3))。本体装置分内层和外层, 内层由圆形筒体和上下盖组成, 采用不锈钢材料 ( $0\text{Cr}18\text{Ni}9\text{Ti}$ ) 制造, 中间由保温隔热层构成, 保温隔热材料夹在本体装置内外层之间, 外层由碳钢材料 (A3) 制造, 本体装置底部有四个万向滚轮, 可以任意移动和转动; 自动控制系统由加热装置、温湿度控制装置、搅拌装置、动力装置、通风装置和除臭装置组成, 结构示意图中 2、3、4、5、6、7 各装置集成一个自动控制系统, 按工艺指标 (供风量  $0.22\text{m}^3 / \text{m}^3 \cdot \text{min}$ ; 搅拌转速  $10 \sim 20\text{r} / \text{min}^{[13]}$ ) 运行, 系统自动处理控制各个测量、反馈信号, 实现各装置的协调工作。

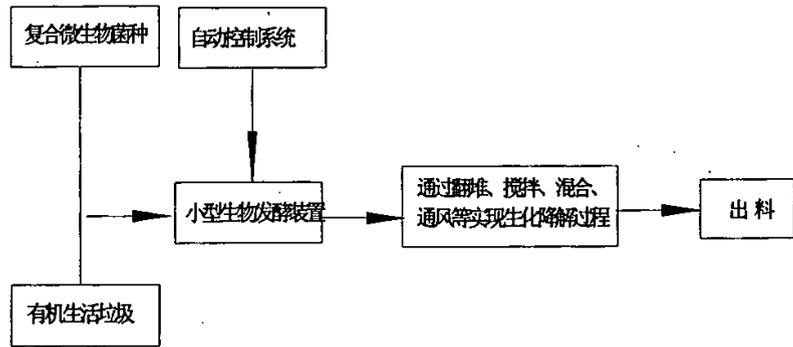


图 3.5 处理垃圾工艺流程图

Fig3.5 The process for fermentation in the auto-storehouse

按处理垃圾工艺流程图 3.5 所示, 将有机废物和复合微生物菌株按照一定的质量比投入小型自动化垃圾发酵处理机中, 设置好自动控制系统工艺指标, 各装置按程序运作, 有机垃圾在小型圆筒生物发酵装置中经过翻堆、搅拌、混合和通风等处理后, 从而实现微生物对有机废物的生化降解过程, 最后出料。

### 3.2.2.3.2 在堆肥过程中的应用研究

3.2.2.3.2.1 堆肥方案：按照复合增温剂配比组成（见 3.2.2.1.2 中表 3.3），将实验材料分 3 组进行堆肥实验。

3.2.2.3.2.2 堆肥时间：堆置 8 天，每天上午、下午测两次温度；分别在堆肥前后取样，样品总量 300g，用风干粉碎备用。

### 3.2.2.3.2.3 测定项目与方法

①测定项目：堆肥干样测定有机碳、全氮、全磷、全钾、有机质、 $H_2O\%$

②测定方法：重铬酸钾容量法（有机碳）、硫酸消煮凯氏法（全氮）<sup>[20]</sup>、 $H_2SO_4-HClO_4$  消化—钒钼黄比色法（全磷）<sup>[21]</sup>、 $H_2SO_4-HClO_4$  浸提—火焰光度法（全钾）<sup>[22]</sup>、有机质、干燥法（ $H_2O\%$ ）

### 3.2.2.3.2.4 堆肥过程中堆肥发酵条件

堆肥处理是堆肥物料中的有机物质（营养物质）在一定物料的细度、温度、氧气、水分含量条件下，它和微生物的相互作用，相互影响的过程。从而实现各种微生物之间相互协调作用，使有机物质（营养物质）被生化降解。因此要具备以下几个条件才能够实现堆肥过程顺利进行。

①堆肥原料特性要求：《城市生活垃圾堆肥处理厂技术评价指标》（CJ/T3059—1996） $H_2O\%$ （50%~60%）；C/N%（25:1~30:1）；有机物含量>20%；

②动力搅拌要求：10~20r/min（1~2次/天）；

③供氧要求：用温度反馈控制空气压缩机供风量  $0.22m^3/m^3 \cdot min$ （2~5min/h；2次/天）；

④堆肥温度要求： $\geq 55^\circ C$ ；

⑤堆肥周期要求：6~8天。

## 3.3 结果和讨论

### 3.3.1 不同复合增温剂处理对垃圾堆肥养分的影响结果

在堆肥处理过程中接种不同微生物增温菌剂后对垃圾养分影响变化，如表 3.4 所示：

表 3.4 不同复合增温剂处理对垃圾堆肥养分的影响

**Table 3.4 Effects of added different microorganism on nutrition in the permentation**

处理编号类型	有机质%	W(TN)%	W(P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )%	W(K <sub>2</sub> O)%	W(org-C)%	C/N
接种前	69.8	1.970	2.258	1.200	50.45	25.6
接种后 1	63.94	1.446	2.752	1.017	37.09	25.6
接种后 2	57.97	2.68	2.761	1.588	33.61	12.5
接种后 3	60.82	2.564	3.036	1.469	35.28	13.8
平均	60.91	2.23	2.850	1.358	35.327	15.8

注：贵州省农业科学院土壤肥料研究所测定

由表可知：在生活垃圾堆肥处理过程中，不同复合增温剂对垃圾堆肥养分的变化有一定的作用，同时也对垃圾发酵腐熟度有一定的影响。

#### (1) 对 C/N 的影响

C/N 是检验肥料腐熟度的一个重要指标。有的学者认为腐熟的堆肥 C/N 理论上应趋于微生物菌体的 C/N (C/N 为 16 左右)；有的学者提出堆肥中的 C/N 从最初的 30:1 降低到 15~20:1 就可认为该产品已经达到腐熟阶段；还有的学者认为 C/N 小于 12 更加适合确保好的腐熟度<sup>[23, 24, 25]</sup>。本实验中所有接微生物增温菌剂的堆肥处理中都有促进堆肥腐熟的作用；在堆肥处理前后的样品测定中，随着堆肥时间延长，每个处理的 C/N、有机质、有机碳含量均呈下降的趋势，表明了有机质在不断的分解，原来的蛋白质转变为微生物蛋白质和腐殖质氮，C 以 CO<sub>2</sub> 的形式释放，垃圾堆肥的腐熟度越来越高。在第 8 天取样的 C/N 测定中，若以 C/N =16 左右为腐熟指标，则垃圾堆肥已经达到腐熟指标的有 2 号样品 (C/N=12.5)、3 号样品 (C/N=13.8)，因此 2、3 号微生物增温剂组合对垃圾腐熟起到一定的促进作用，特别是 2 号(见 3.2.2.1.2 中表 3.3) 的效果最好。

#### (2) 对垃圾肥料养分的影响

氮元素是植物体中蛋白质、叶绿素等的重要组成成分，是植物生长发育所需要的营养物质，也是土壤肥力中最活跃的一种元素，因此全氮含量高低是衡量肥料中的氮素的基础。本实验中所有接微生物增温菌剂的堆肥处理中全氮含量变化(如表 3.6 所示)可知除了 1 号样品外，其余接种处理后的样品全氮含量都明显高于接种前的，因此表明了接种 2、3 号微生物增温剂在垃圾处理过程中，可以有效的促进其中的氮元素分解和矿化，从而有利于氮元素的保存。同样磷、钾也是植物生长发育所需要的营养物质，全磷、钾含量高低也是衡量肥料品质的指标。堆肥处理中全磷含量变化(如表

3.4 所示)可知接种处理后的样品全磷含量都明显高于接种前的,说明了接种微生物增温剂在垃圾处理过程中,对其中磷的矿化具有促进作用,特别是3号微生物增温剂表现明显;堆肥处理中全钾含量变化(如表3.4所示)除了1号样品外,其余接种处理后的样品全钾含量都明显高于接种前的,因此表明了接种2、3号微生物增温剂在垃圾处理过程中,可以有效的促进其中的钾元素矿化的作用。

(3)堆肥过程中的温度变化情况

对于堆肥处理而言,温度是影响微生物活动和堆肥工艺过程的重要因素之一,也是衡量堆肥效果的重要指标<sup>[28]</sup>。堆肥温度与微生物生长的关系<sup>[29]</sup>如表3.5所示:

表 3.5 堆肥温度与微生物生长关系

Table 3.5 The relation of the temperature of permentation and microorganism growth

温度 / °C	温度对微生物生长的影响	
	嗜温菌	嗜热菌
20~38	激发状态	不适用
38~45	抑制状态	开始生长
45~55	毁灭状态	激发状态
55~60	不适用	抑制状态
≥60		毁灭状态

按实验方案进行3组堆肥处理,分别在1组、2组、3组中加入1.5%相应的复合菌剂,该处理过程按照工艺参数运行,进行堆肥实验,实验比较堆肥过程中温度变化如图3.6所示:

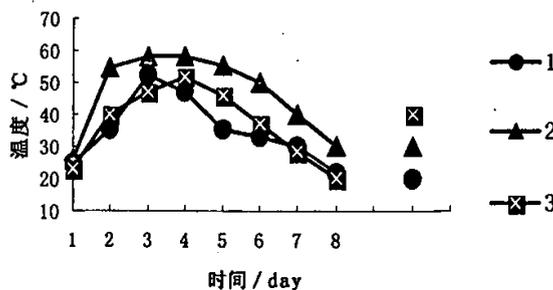


图3.6 堆肥过程温度的变化  
Fig 3.6 Temperature profile during composting

由图可知:第2组接种复合微生物菌剂后,不仅增加了微生物的数量,而且使垃圾中的微生物在质量上发生变化,堆肥初期,堆层处于中温阶段,微生物的活性升高,

嗜温菌较为活跃，将堆腐的有机物料进行降解而释放出热量，这些热量可使堆肥温度上升。由于堆肥物料具有良好的保温作用，因此堆层温度不断上升，经堆肥处理 1~2d 后，使堆温迅速达到堆肥理想温度 55℃。在这个温度下，嗜温菌受到抑制，甚至死亡，而嗜热菌的繁殖进入激发态，使堆肥发酵进入高温阶段（55℃~57℃），在高温阶段的停留时间为 3~4d，在此稳定期内有利于杀死大量的寄生虫卵、病源微生物等（如表 3.6 所示<sup>[29]</sup>），腐殖质开始形成，达到堆肥无害化处理的目的<sup>[1]</sup>。

表 3.6 常见病菌与寄生虫的死亡温度

Table 3.6 The dead temperature of the common germs and parasite

名 称	死亡温度	名 称	死亡温度
沙门氏伤寒菌	≥46℃不生长；55~60℃， 30min 内死亡	化脓性细菌	50℃，10min 内死亡
志贺氏菌	55℃，1h 内死亡	牛结核杆菌	55℃，45min 内死亡
名 称	死亡温度	名 称	死亡温度
大肠杆菌	55℃，1h 内死亡	蛔虫卵	50℃，5d 内死亡
美洲钩虫	45℃，50min 内死亡	钩虫卵	50℃，3d 内死亡
血吸虫卵	53℃，1d 内死亡	蚊 蛆	51~56℃，1d 内死亡

而第 1 组、第 3 组堆肥处理所能达到的堆肥温度都为 52℃，在高温阶段的停留时间为 1~2d，都比不上第 2 组，因此不利于堆肥无害化处理。完成整个堆肥处理一般需要时间为 6~7d，堆肥达到初步腐熟阶段。通常认为高温有利于堆肥化过程的进行，并能杀灭致病菌，达到无害化，当温度超过最佳生理温度值时，则微生物活性受到抑制，阻止了堆肥生化过程的进行，因此确定和维持堆肥最佳生理温度值是至关重要的，一般认为 55℃是 1 生理温度值，55~60 已经明显处于抑制状态，所以第 2 组较符合要求。

#### (4) 堆肥过程中的耗氧量变化情况

对于堆肥处理而言，供气是影响微生物活动和堆肥工艺过程的重要因素之一。其主要的的作用为：提供氧气，以参与微生物的发酵过程；通过供气量的控制，调节最适于温度；在维持最适于温度的条件下，加大通风量可以去除水分。耗氧速率是微生物活动强弱的宏观标志，它的大小表征微生物活动的强弱，反映了堆肥中有机物的分解程度。从图 3.7 可知：加入 3 种复合微生物增温剂的堆肥，都能够很快的降解生活垃圾，消耗 O<sub>2</sub>，随着堆肥处理过程的进行，1~2d 微生物耗氧量迅速增加，3~5d 耗氧量达到最大，微生物活动的逐渐增强，堆肥中有机物的分解程度也逐渐增大；5~7d 耗氧量逐渐下降微生物活动的逐渐减弱，堆肥中有机物的分解程度也逐渐减弱，该变化过程符合相关资料的要求<sup>[27]</sup>。在这 3 组对比实验中，第 2 组变化最显著，因而堆肥效果也最

好。由于堆肥过程中有机物分解的不确定性，因此，我们只能通过测定堆层中的耗氧速率变化来了解堆层生物降解过程和需氧量，从而控制供气量达到堆肥处理的要求。

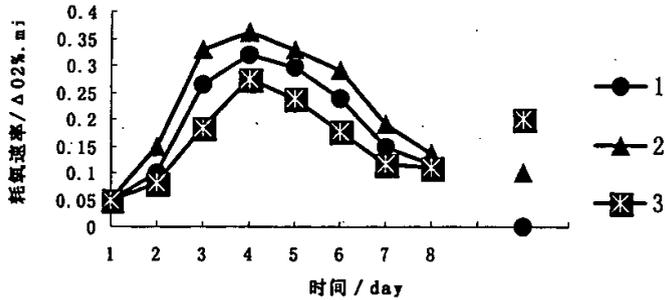


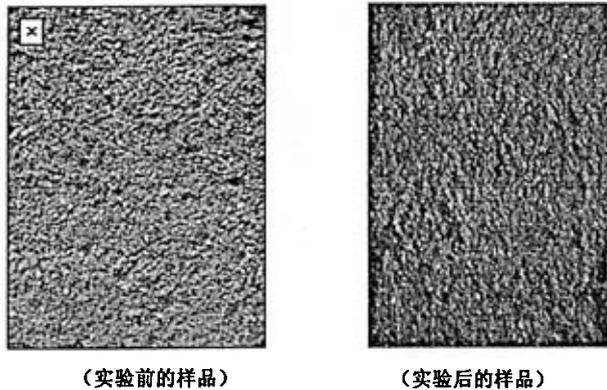
图3.7 堆肥过程中耗氧速率变化

Fig 3.7 Oxygen consumption during composting

(5) 堆肥过程中的垃圾颜色变化情况

图 3.8 堆肥处理过程中垃圾颜色变化

Fig 3.8 The colour change of garbage in the permentation



堆肥过程中加入高效微生物增温菌剂，它能够使堆肥温度迅速达到 50℃~70℃ 高温杀死病原菌、可将生活垃圾中厨余物，如菜叶、米饭、蛋壳和果皮等有机物分解成 CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>O 和灰质等，堆肥原料的物化性质发生了深刻变化，从不均匀的混合物转变成为接近一致的、松散的柔性物质，才使得垃圾在堆肥处理前后颜色由浅黄色变化为黑褐色(如图 3.8 所示)。

3.3.2 堆肥产品质量

由实验结果表明：在有机生活垃圾进行堆肥处理中接入 2 号高效微生物增温菌剂，能够达到高温堆肥的效果，其堆肥产品能够满足以下质量要求：

- ①堆肥中对土壤改良起主要作用的是有机物质，有机质的含量为 57.97%（干燥状态下≥35%），其中氮、磷、钾的含量分别为 2.564%、3.036%、1.588%（干

燥状态下 $\geq 2\%$ 、 $0.8\%$ 、 $1.5\%$ );

②堆肥产品的含水率为  $28\%$  (干燥状态下 $\leq 30\%$ );

③堆肥产品的碳氮比为  $12.5$  (应控制 $\leq 20$ );

④堆肥产品外观满足黑褐色, 无恶臭, 质地松散, 具有泥土芳香气味的要求。

### 3.4 小结

通过对堆肥设备工艺计算、结构设计等方面的综合考虑, 设计出小区生活垃圾的小型自动化微生物处理设备。将有机生活垃圾和高效微生物增温菌剂混合加入该设备进行堆肥处理, 它有利于处理过程中有机物的供氧、传质和传热, 改善和促进微生物生物转化的功能, 加快有机物的降解速度, 实现高温堆肥处理的效果。该装置在生活垃圾堆肥处理实验中可实现生活垃圾减量率  $35\% \sim 40\%$ 、 $C/N < 20$ 、 $PH \approx 7.0$  和  $H_2O = 35\% \sim 40\%$ ; 外观呈茶褐色或暗灰色, 没有臭味, 不再吸引蚊蝇; 能杀死大肠杆菌、伤寒杆菌等致病性微生物, 使产品达到无害化; 成品含有丰富的 N、P、K 素、微量元素和富含有利于农作物生长的有机质。因此将堆肥处理方法、高效生物增温剂和该小型自动化微生物处理设备结合为一体来处理有机生活垃圾是一种行之有效的方法, 适用于社区、宾馆、食品加工业、集市和交易市场等地对有机废弃物处理使用。

### 参 考 文 献

- [1] 贵阳循环经济型生态城市建设总体规划 [R]. 清华大学环境工程系编制 2003
- [2] 席北斗、刘鸿亮、孟伟等, 高效复合微生物菌群在垃圾堆肥中的应用 [J]. 环境科学, 2001, 22 (5): 142~146
- [3] Haug R T .Development of Smulation Models [M], in: The Practical Handbook of Compost Engineering, Lew is Publishers,1993, 342~436
- [4] 连宾、刘丛强 嗜热真菌的生物转化功能与经济价值 [J]. 地球与环境, vol. 32. No. 2, 2004
- [5] 顾希贤 垃圾堆肥微生物接种实验 [J], 应用与环境微生物学, 1995, 1 (3): 274~278
- [6] 陈世和、张所明. 城市垃圾堆肥原理与工艺 [M]. 上海: 复旦大学出版社, 1990
- [7] Nakasaki K, Sasaki M, Shoda M, Kubota H. Characteristie of mesophilic bacteria isolates isolated during thermophilic composting of sewage sludge[J]. Appl. Environ. Microbiol, 1985, 49:42~45
- [8] Strom P. F. Effect of temperature on bacterial species diversity in thermophilie solid waste composting [J]. Appl. Environ. Microbiol, 1985, 50:899~905
- [9] Strom P. F. Identiffication of thermophilic bacteria in solid waste composting [J]. Appl. Environ. Microbiol, 1985, 50:907~913
- [10] 董春娟、吕丙南等. 处理生物难降解物质的有效方式—共代谢 [J]. 化工环保, 2003, 23

- (2): 82~85
- [11] 何苗, 张晓健等. 杂环化合物及多环芳烃厌氧酸化降解性能研究 [J]. 中国给水排水, 1997, 13 (3): 13~16
- [12] 徐北斗、刘鸿亮、孟伟等. 垃圾堆肥高效复合微生物菌剂的制备 [J]. 环境科学研究, 2003, 2 (16): 58~60.
- [13] 连宾. 城乡有机废物农业利用的理论分析 [J]. 贵州科学, 1997, 15(1): 39~45
- [14] 杨双全、连宾. 居民小区生活垃圾处理设备研究 [J]. 贵州科学, vol. 21. No. 4, 2003
- [15] 李建国 赵爱华 张益主编. 城市环境污染与控制丛书—城市垃圾处理工程 [M]. 北京: 科学出版社, 2003
- [16] 谭天恩 麦本熙 丁惠华编著 化工原理 (上、下册) [M]. 北京: 化学工业出版社, 2001
- [17] 蔡建成等编译. 堆肥工程与工厂 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1990
- [18] Xi Bei-dou, Lin Hong-Liang. MAW and sewage sludge with effective complex microorganisms [J]. Journal of Environmental Sciences-China, 2002, 14(2): 264~268
- [19] P.Aamuthu, Looichee Choong, Shameem Hasan, V.V.Praven. Kinetic evaluation of Composting of agricultural wastes [J]. Environmental Technology, 2001, 21(3): 185~192
- [20] 南京土肥所. 土壤理化分析 [M]. 南京: 南京出版社 1985
- [21] 南京农业大学. 土壤农化分析 (第二版) [M]. 南京: 南京农业出版 1985
- [22] 中国土壤学会. 土壤农用化学常规分析方法 [M]. 北京: 科学出版社 1983
- [23] Emeterio IG and Victor PG. Determination of maturity indices for city refuse composts [J]. Agriculture Ecosystems and Environment. 1992. 38: 331~343.
- [24] 刘悦秋、刘克锋、石爱平等. 生活垃圾堆肥优良菌剂的筛选 [J]. 农业环境科学学报 2003, 22 (5): 597~601
- [25] Garcia C.Hernandez T. Coata and Pascual JA. Phytotoxicity due to the agricultural used of urban wastes Germination experiments [J]. J Sci Food Agric. 1992. 59: 313-319
- [26] Eklind Y, H Kirchmann. Composting and storage of organic household waste with different litter amendments. I: carbon turnover [J]. Bioresource Tecnology, 2000, 7 (4) : 115~124.
- [27] 孙明湖. 环境保护设备选用手册 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2002, 22~23, 298~300
- [28] 席北斗、刘鸿亮等. 翻转式堆肥反应装置设计研究 [J]. 环境污染治理技术与设备, 2003, 4 (9) : 85~88
- [29] 李国学、张福锁. 固体废物堆肥化与有机复混肥生产 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2000, 13--28
- [30] 连宾、周正乾、杨秀军、殷正恩. 利用生活垃圾制造有机复合肥研究报告 [M]. 西南农业学报, 1994, 12 (7) : 40~45
- [31] 李国学、张福锁. 固体废物堆肥化与有机复混肥生产 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2000, 13--28

## 第四章 堆肥产品的初步应用

### 4.1 前言

城市有机生活垃圾采用高温堆肥处理是一种可持续性的处理方法。虽然经过处理的堆肥产品存在着两个主要问题：一是产品粗糙，堆肥中含有碎块，影响农田应用；二是其中 N、P、K 等养分含量低、肥效慢、体积大、使用不方便等。在单施堆肥的情况下其增产效益无法与其他肥料相比，但是在我国农业生产的漫长历史中，一直靠有机肥料来改良土壤，培养肥力，张夫道等人对我国 33 年（1949~1981）肥料施用情况进行统计分析结果也证明了这点。目前，我国肥料的发展趋势向着高效化、复合化和缓效化方向发展。有机复混肥作为一种能同时提供多种营养成分的肥料，它具有养分均衡、施用方便和便于运输等优点；复混肥中有机、无机相结合的方式，不仅可以以无机促进有机，而且以有机保无机，减少了肥料中养分的流失，同时也可以利用有机质使由于大量施用化肥和缺少有机肥投入，使得农业环境日趋恶化，土质下降的情况得到改变，达到改良土壤结构、提高土壤保水保肥的能力、增加作物产量和改善农作物品质的目的<sup>[1, 9, 10]</sup>。因此，只有将高温堆肥处理的堆肥产品进一步深加工为有机复混肥才能具有广泛的应用价值。所以开发和生产有机复混肥料是提高经济效益、解决城市生活垃圾的一条好途径。

### 4.2 材料和方法

#### 4.2.1 堆肥产品的试制

##### 4.2.1.1 垃圾堆肥初级产品理化性质

生活垃圾经高温堆肥处理后得到堆肥初级产品经贵州省农业科学院土壤肥料研究所测定(见 3.3.1 中表 3.4)，其理化性质具体如下：有机质 57.97%，W(TN) 2.68%，W(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) 2.761%；W(K<sub>2</sub>O) 1.588%；W(org-C) 33.61%。

##### 4.2.1.2 有机复混肥的生产工艺

有机复混肥是相对一般化学复混肥料（N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、K<sub>2</sub>O 含量总和为 20% 以上）而言。由于垃圾堆肥本身养分含量较低，要达到利用堆肥初级产品的目的，必须添加一定量的化肥。因此有机复混肥生产是由 30%~50% 垃圾堆肥初级产品加上部分化肥混合而成，N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、K<sub>2</sub>O 含量总和为 15%~20%，其生产工艺流程<sup>[2]</sup>如图 4.1：

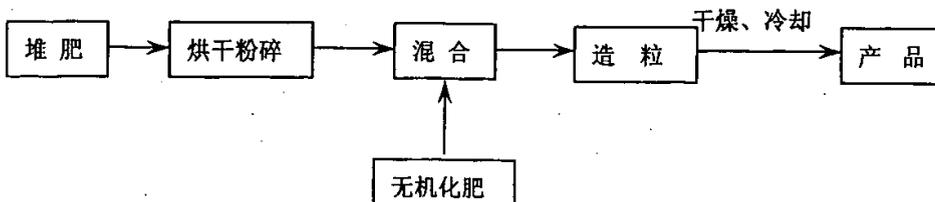


图 4.1 有机复混肥的生产流程

Fig 4.1 The process of production for complex organism fertilizer

4.2.1.3 有机复混肥配方的确定

有机复混肥的配方是指有机复混肥中有机质和氮、磷、钾含量的比例以及其他元素的加入量。因为有机复混肥多数用来作基肥，所以实际就是指基肥中有机质和氮、磷、钾含量的比例。确定有机复混肥配方可采用两步骤：第一是有机物与无机肥的比例；第二是确定无机肥中各种化肥的比例。可利用高温堆肥作为有机部分，利用尿素、过磷酸钙和氯化钾作为无机部分提出的按照下列计算方法确定配比（见表 4.1）。有机复混肥配方确定计算方法<sup>[3]</sup>：

(1) 有机物料与无机物料比例的确定：

有机物料在有机无机复混肥所占的比例为 P，无机肥所占的总比例为 Q，则可列以下方程： $P+Q=100$ ； $PX45 / (P+Q) =20$ 。

(2) 无机物料中各种化肥比例的确定：

设复混肥料中所含 N: P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>: K<sub>2</sub>O=A:B:C，各营养物质在复混肥中的百分含量为 a、b、c，而四种单个基础肥料（N 素化肥、P 素化肥、K 素化肥和有机物料）中的营养物质的百分含量分别为：①a<sub>1</sub>、b<sub>1</sub>、c<sub>1</sub>；②a<sub>2</sub>、b<sub>2</sub>、c<sub>2</sub>；③a<sub>3</sub>、b<sub>3</sub>、c<sub>3</sub>；④a<sub>4</sub>、b<sub>4</sub>、c<sub>4</sub>。又设组成复混肥料中的各个基础肥料的百分含量分别为 X、Y、Z、P。则可列以下方程：

$$a=a_1*X /100+ a_2*Y /100+ a_3*Z /100+ a_4*P /100;$$

$$b= b_1*X /100+ b_2*Y /100+ b_3*Z /100+ b_4*P /100;$$

$$c= c_1*X /100+ c_2*Y /100+ c_3*Z /100+ c_4*P /100;$$

$$a/b=A/B; a/c=A/C; X+Y+Z+P=100; X+Y+Z=Q。$$

将所需要养分比例和数量、有机物料的含量代入以上方程，通过计算可以得到表 4.1 所示。

表 4.1 有机复混肥的配方

Table 4.1 The preparation ratio of complex organism fertilizer

作物类型	所需要养分比例和数量			堆肥数量	1T 复混肥化肥数量				堆肥含水量%
	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O		尿素	过磷酸钙	氯化钾	总量	
大白菜	1	0.3	0.3	0.345	0.3195	0.2670	0.0690	0.655	23.2
菜豆	3.3	1	4	0.345	0.2367	0.1877	0.2298	0.655	21.4
玉米	2.4	1	2	0.345	0.229	0.2741	0.1505	0.655	22.2

- 注：1) 农用尿素(技术指标:总氮 N%≥46、缩二脲%≤1.5、水分含量%≤1.0)－贵州化肥厂生产；  
 2) 农用氯化钾(技术指标:总钾 K%≥60)－俄罗斯化肥厂生产；  
 3) 农用过磷酸钙(技术指标:总 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>%≥14)－息烽重钙厂生产。

4.2.1.4 堆肥产品的生产

生活垃圾经高温堆肥处理后得到堆肥初级产品，按照一定的配方(见 4.2.1.3 表 4.1)

和生产工艺(见 4.2.1.2 图 4.1)来生产堆肥产品—有机复混肥。

## 4.2.2 堆肥产品的田间实验<sup>[4]</sup>

### (1) 大白菜地施肥对比实验

- a. 实验品种:大白菜昆疏 83-1-昆明市昆疏种子有限公司
- b. 实验地点: 贵州大学蔡家关校区中寨农田
- c. 实验方案: 采用自制有机复混肥、普通化肥及空白对照在大白菜地进行施肥对比实验, 2 次重复, 顺序排列, 每块实验面积为  $7.5 \text{ m}^2$ , 每块载 25 株。实验在常规施肥基础上进行, 每块施肥 1.5Kg, 分别将肥料施入定植穴内, 覆盖一层细土, 经常管理, 2 个月后收获。

### (2) 豆地施肥对比实验

- a. 实验品种: 无筋地豆-贵阳三高种业有限公司生产
- b. 实验地点: 贵州大学蔡家关校区中寨农田
- c. 实验方案: 采用自制有机复混肥、普通化肥及空白对照在豆地进行施肥对比实验, 2 次重复, 顺序排列, 每块实验面积为  $7.5 \text{ m}^2$ , 每块载 25 株。实验在常规施肥基础上进行, 每块施肥 1.5Kg, 分别将肥料施入定植穴内, 覆盖一层细土, 经常管理, 2 个月后收获。

### (3) 玉米地施肥对比实验

- a. 实验品种: 玉米-贵阳市蔡家关当地农民自己生产
- b. 实验地点: 贵州大学蔡家关校区中寨农田
- c. 实验方案: 采用自制有机复混肥、普通化肥及空白对照在玉米地进行施肥对比实验, 2 次重复, 顺序排列, 每块实验面积为  $7.5 \text{ m}^2$ , 每块载 25 株。实验在常规施肥基础上进行, 每块施肥 1.5Kg, 分别将肥料施入定植穴内, 覆盖一层细土, 经常管理, 3 个月后收获。

## 4.3 结果与讨论

### 4.3.1 堆肥产品的特征

按照 4.2.1.4 堆肥产品的生产要求, 将生活垃圾生产成有机—无机复混肥产品, 该肥料具有下列特征:

- (1) 经过高温堆肥处理, 杀死大肠杆菌、伤寒杆菌等致病性微生物, 使该产品达到无害化;
- (2) 该产品含有丰富的 N、P、K 三大元素及微量元素(总养分  $(\text{N}+\text{P}_2\text{O}_5+\text{K}_2\text{O})\% \geq 20\%$ 、有机质/ $\% \geq 19.9$ 、水分( $\text{H}_2\text{O}$ ) /  $\% \leq 9.0$ 、酸碱度 (PH)  $\approx 7.0$ );

- (3) 含有丰富的能促进农作物生长的有机质;
- (4) 成品粒度小于 6mm, 长期使用不会影响土粒结构。

按本实验方法所得生活垃圾与现有的有机复混肥国家标准 (见表 4.2) 进行对比, 它基本上达到指标 I 的要求。

表 4.2 有机复混肥标准

Table 4.2 The standard of complex organism fertilizer

肥料名称	项 目	指 标	
		I	II
有机无机复混肥	总养分(N+P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> +K <sub>2</sub> O)/% ≥	20	15
	有机质/% ≥	15	20
	水分(H <sub>2</sub> O)/% ≤	12	14
	酸碱度(PH)	5.5~8.0	

注: 有机复混肥技术指标摘自 NY481-2002

#### 4.3.2 田间对比实验结果

(1) 大白菜实验: 实验结果如表 4.3 所示:

表 4.3 不同处理大白菜产量比较

Table 4.3 Comparison of cabbage yields in different treatments

处 理	株 高 / cm	产 量 (斤)	平均产量(斤)	平均增收 (%)
有机无机复混肥	32	53.6	53.8	15.7
		54.0		
普通化肥	30	49.0	50.2	8.0
		51.4		
空白对照	26	48.0	46.5	—
		45.0		

根据实验结果进行方差分析计算:  $F=10.72 > F_{0.05}$  (查 Table B-6 The F distribution<sup>(5,6)</sup> 得  $F_{0.05}=9.55$ ), 因此经三种处理方式后大白菜产量平均值的差异达到 5% 显著水平。从结果可知, 施用有机复混肥施肥效果比普通化肥平均增产 7.7%, 有较明显的增产效果; 有机复混肥施肥效果比空白对照平均增产玉米 15.7%。

(2) 菜豆实验: 实验结果如表 4.4 所示:

表 4.4 不同处理菜豆产量比较

Table 4.4 Comparison of bean yields in different treatments

处 理	株 高 / cm	产 量 (斤)	平均产量(斤)	平均增收 (%)
有机无机复混肥	26.0	14.5	14.0	19.7
		13.5		
普通化肥	24.2	13.2	13.2	12.8
		13.4		
空白对照	23.5	12.0	11.7	—
		11.4		

根据实验结果进行方差分析计算： $F=10.78 > F_{0.05}$  (查 Table B-6 The F distribution<sup>[5, 6]</sup> 得  $F_{0.05}=9.55$ )，因此经过三种处理方式后菜豆产量平均值的差异达 5% 的显著水平。从结果可知，有机复混肥施肥效果比施用普通化肥平均增产 6.9%，有较明显的增产效果；有机复混肥施肥效果比空白对照平均增产玉米 19.7%。

(3) 玉米实验：实验结果如表 4.5 所示：

表 4.5 不同处理玉米产量比较

Table 4.5 Comparison of corn yields in different treatments

处 理	株 高 / cm	产 量 (斤)	平均产量(斤)	平均增收 (%)
有机无机复混肥	201	15.6	15.4	10.8
		15.2		
普通化肥	193	15.1	14.7	5.8
		14.3		
空白对照	189	14.2	13.9	—
		13.6		

根据表 4.5 结果进行方差分析，计算结果： $F=5.84 > F_{0.10}$  (查 Table B-6 The F distribution<sup>[5, 6]</sup> 得  $F_{0.10}=5.46$ )，因此经三种处理方式后玉米产量平均值的差异达到 10% 显著水平。从结果可知，有机复混肥施肥效果比施用普通化肥平均增产玉米 5%，有较明显的增产效果；有机复混肥施肥效果比空白对照平均增产玉米 10.8%。

用高温堆肥和化肥混合制成的有机复混肥相比于普通化肥、空白对照而言，它是一种能够提供多种营养成分的肥料，具有养分均衡、施用方便和改善土壤结构的优点，所以它能促进农作物产量的增加。从以上大白菜、玉米、豆地施肥对比实验结果可知：施用有机复混肥相比于施用普通化肥的农作物产量都有不同程度的增加，其分别增加了 7.7%、6.9%、5%；施用有机复混肥相比于空白对照的农作物产量都有不同程度的增加，其分别增加了 15.7%、19.7%、10.8%。所以利用城市有机生活垃圾采用高温堆肥处理后制成有机复混肥在农业生产上具有较好的应用效果和价值。

#### 4.4 小结

我国是一个农业大国,随着农业生产的发展,将会施用大量的肥料。在施肥方面将逐步从单组份肥转向多组分肥料,从无机肥、无机复混肥向有机-无机复混肥料方面发展,所以复混肥的生产具有重要意义。因此,利用我国丰富的有机肥料资源(如城市生活垃圾)经过高温堆肥处理后和无机化肥制成复混肥,不仅能够向土壤中提供一定量的N、P、K等养分和微量元素,调整酸碱度<sup>[7]</sup>,而且在堆肥过程中碳水化合物和含氮化合物受到微生物的作用发生了矿质化和腐质化<sup>[8]</sup>,从而能够改善土壤肥力,促进农作物的增产,化废为宝,实现资源的循环利用,符合循环经济的基本要求。通过在大白菜、豆菜和玉米地的施肥对比实验结果(见4.3.2)可知:施用过经过高温堆肥处理后和无机化肥制成有机-无机复混肥的菜地效果优于施用过普通化肥的菜地,农作物平均增产6.53%,增产效果较明显。由此可知,采用2号高效生物增温剂(见3.2.2.1.2中表3.3)来对城市生活垃圾进行高温堆肥处理制成的有机复混肥料产品,它能使农作物的产量增加。因此,该有机复混肥料在农业生产中具有一定的应用价值和应用前景。

#### 参 考 文 献

- [1] 金维续. 城市固体废物的农业问题 [J]. 环境科学丛刊, 1985, 6(3): 33~36
- [2] 贾小红、黄元仿、徐建堂编. 有机肥料加工与施用 [M]. 北京: 化学工业出版社、三农读物出版中心 2001
- [3] 李国学、张福锁. 固体废物堆肥化与有机复混肥生产 [M] 北京: 化学工业出版社, 2000, 13--28
- [4] 连宾、周正乾、杨秀军、殷正恩. 利用生活垃圾制造有机复合肥研究报告 [M]. 西南农业学报, 1994, 12 (7) :40~45
- [5] David S. Moore. THE BASIC PRACTICE OF STATISTICS [M]. USA: W. H. FREEMAN AND COMPANY 1997
- [6] 陈家鼎、刘婉如等. 概率统计讲义 [M]. 高等教育出版社 1994
- [7] 钟羨云. 从改善土壤物理性状来看城市垃圾 [J]. 农业环境保护, 1988, 7(6)21~24
- [8] 陈世和. 城市生活垃圾堆肥肥化处理 [J]. 环境污染与防治, 1985, 7(4): 29~34
- [9] 连宾. 城乡有机废物农业利用的理论分析 [J]. 贵州科学, 1997, 15(1): 39~45
- [10] 张宝林主编. 功能性复混肥料生产工艺技术 [M]. 河南科学技术出版社, 2003, 15~20

## 第五章 结论与展望

### 5.1 结论

高温堆肥处理的目的是实现城市生活垃圾的减量化、无害化和资源化。通过加入高效生物增温剂来提高堆肥处理效果,从而促进可生物降解的有机物向稳定的腐殖质方向转化。因此,高效生物增温剂的制备和在堆肥处理中的应用具有重要的意义。所以本课题尝试从堆肥样品中分离和筛选有效菌株,并对其进行培养性状、降解特性、摇瓶发酵和高温堆肥处理等实验研究。通过对实验数据进行整理分析,可得到以下 5 个方面的结论:

(1) 采用微生物分离和筛选技术从堆肥样品中筛选出 TH001、TH002、TH003 和 TH005 共 4 株有效菌株,分别对它们进行培养性状研究,确定其最佳的培养条件:培养温度 45℃、培养时间 48h、耗氧条件(转速为 120r/min)、pH 值 5.0~7.0。它们基本符合作为高效微生物增温剂的菌株的要求。

(2) 通过对 TH001、TH002、TH003 和 TH005 共 4 株菌株进行脱氢酶实验、淀粉分解实验、纤维素分解实验、蛋白质分解实验和脂肪分解实验等降解特性研究,根据实验结果(见 2.3.4)可知:这四株菌株符合作为高效微生物增温剂的菌株的要求。

(3) 分别将 TH001、TH002、TH003、TH005 菌株进行有机生活垃圾处理摇瓶实验研究,确定了复合微生物增温剂配比组成,再将其进行有机生活垃圾处理摇瓶实验研究。根据实验结果(见 2.3.5 中表 2.10 和 2.3.6 中表 2.11)可知:III号组合是最佳的复合微生物增温剂组合,其配比为:TH001:TH003:TH005=1:1:1。

(4) 将最佳复合微生物增温剂III号和有机生活垃圾混合后在自行设计的处理设备中进行堆肥处理,能够达到高温堆肥的效果。该装置在生活垃圾堆肥处理试验中可实现生活垃圾减量率 35%~40%, C/N<20, PH≈7.0, H<sub>2</sub>O%=35%~40%;外观呈茶褐色或暗灰色,无臭味,成品中富含 N、P、K 素、微量元素及有利于农作物生长的有机质。处理后的初级产品具有一定的应用价值。

(5) 处理后的初级产品和无机化肥制成堆肥产品—有机复混肥,该产品能够达到国家技术标准要求。将其进行大白菜、豆菜和玉米地的田间施肥实验,由实验结果(见 4.3.2 中表 4.3、表 4.4 和表 4.5)表明:施用过该有机复混肥的田地,其农作物产量平均增加 6.5%,达到施用效果。

### 5.2 展望

(1) 随着经济的发展和生产力的不断提高,人类社会在不断向前发展,城市生活垃圾的“无害化、减量化和资源化”处理是城市现代化文明发展的重要标志之一。在我国城市生活垃圾具有丰富的有机肥料资源,相对于其它处理方法而言,采用高温堆肥处理将是一种可持续性的处理方法。它具有广泛的实用价值,更符合我国国情。

(2) 高温堆肥处理是通过加入增温剂来达到高温堆肥效果, 从而促进可生物降解的有机物向稳定的腐殖质方向转化。它能使堆肥温度迅速达到高温并持续一段时间、缩短发酵周期、提高堆肥效率和堆肥产品质量。因此, 增温剂在其中起着重要的作用, 它的研究和开发应用将是国内外学者非常关注的问题。目前组成增温剂的菌株是有限的, 可以根据各地的实际条件, 分离和筛选一些优良的菌株来制成增温剂, 这是一项非常有意义的工作。

(3) 随着国家对“三农”问题的关注, 尤其农业问题, 将是国家重点解决和扶持的问题, 未来几年国家政策将倾斜于农业方面, 农田、农作物和肥料生产将是政府关注热点。但是由于大量施用化肥和缺少有机肥投入, 使得农业生态环境日趋恶化, 土壤肥力下降, 影响农作物的产量和品质, 因而必须调整农用肥结构, 多用有机肥来改善耕地土质。针对这些情况, 采用堆肥技术处理城市生活垃圾无疑是一种较好的选择。利用经过高温堆肥处理后的堆肥和无机化肥配制成有机复混肥, 可作为良好的土壤改良剂及有机肥, 能有效改善土质, 符合发展生态型农业、走可持续发展道路的要求。

(4) 生活垃圾堆肥设备与堆肥工艺的研究成果相比, 还需进一步的完善, 未来设备设计将会沿着自动化程度较高、操控方便、结构紧凑和投资较小的方向发展。

## 致 谢

本文是在导师连宾教授的悉心指导下完成，在此谨向连老师表示衷心的感谢和深深的敬意。整个论文工作过程中，连老师给予了细心的指导与关心，使学生在科研能力上有很大的提高，导师渊博的知识、严谨的治学态度、敏锐的洞察力、对事业孜孜不倦的追求和不断进取的人生态度，永远值得我学习。

贵州省发酵工程与生物制药重点实验室为本人的实验提供了诸多便利条件，真诚感谢化学工程学院及发酵工程与生物制药重点实验室多位老师所给予的关心、帮助和鼓励；感谢贵州省农业科学院土壤肥料研究所袁献芳老师在实验过程中给予的帮助，同时也感谢陈焯老师和潘牧、李静、赵金、郝建朝等同学所给予的关心和支持。

感谢莅临论文答辩的各位老师和专家教授！

杨双全

2006年3月于贵州大学

## 攻读硕士学位期间发表的学术论文及专利

- 1、杨双全、连宾. 居民小区生活垃圾处理设备研究. 贵州科学, vol. 21 No. 4, 2003
- 2、杨双全、连宾. 小区生活垃圾处理设备设计研究. 贵州工业大学学报, vol. 33 No. 2, 2004
- 3、杨双全、连宾. 堆肥过程中生物增温剂菌株的筛选研究. 生态环境 (审稿中)
- 4、专利发明人: 连宾、杨双全、陈莉, 专利申请人: 贵州工业大学. 发明名称: 发酵技术处理有机废物的方法及其装置. 专利申请号: 031351719; 专利申请日 2003-06-06; 专利公开号: CN 1552645, 专利公开日: 2004-12-8. 本专利于 2004 年 5 月荣获第 13 届全国“星火杯”创造发明竞赛叁等奖。

## 原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的科研成果。对本文的研究在做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律责任由本人承担。

论文作者签名：杨进 日期：2006年3月

## 关于学位论文使用授权的声明

本人完全了解贵州大学有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留或向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅；本人授权贵州大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文和汇编本学位论文。（保密论文在解密后应遵守此规定）

论文作者签名：杨进 导师签名：李平 日期：2006年3月