

堆肥环境生物与控制

曾光明 黄国和
袁兴中 杨朝晖 等 著
胡天觉 谢更新



科学出版社
www.sciencep.com

堆肥环境生物与控制

陈其华 主编
陈其华 陈其华 陈其华
陈其华 陈其华 陈其华

堆肥环境生物与控制

曾光明 黄国和 袁兴中
杨朝晖 胡天觉 谢更新 等著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书在有关课题的深入研究和示范工程建设的基础上,汇集了近年来固体废物堆肥化处理方面的最新研究成果。全书共 16 章,包括好氧堆肥中的微生物接种剂、分子生物学技术在堆肥中的应用、堆肥化中木质素的生物降解、生物表面活性剂及其在堆肥中的应用、城市有机垃圾的厌氧消化处理、堆肥动力学基础、城市植物有机固体废物仓式好氧堆肥工艺改进、堆肥二次污染控制技术、生物传感器应用于堆肥过程中生物组分及污染物的检测与控制、有机固体废物堆肥腐熟度的评价、堆肥与重金属污染及其防治、城市生活垃圾堆肥的过程控制、堆肥法处理有毒有害难降解有机污染物的应用、城市生活垃圾堆肥的农业利用、污水处理厂污泥的生物稳定化,另外还讲述了一个示范工程建设——上海市浦东新区生活垃圾综合处理。本书既有相关的理论研究,又有实际应用案例,是一本具有较高学术水平的著作。

本书可供环境科学、环境工程、市政工程、环境生物技术等相关专业的科研人员和研究生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

堆肥环境生物与控制/曾光明等著. —北京:科学出版社,2006
ISBN 7-03-016728-7

I. 堆… II. 曾… III. 固体废物-堆肥-研究 IV. S141.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 157899 号

责任编辑:赵 峰 / 责任校对:刘小梅

责任印制:钱玉芬 / 封面设计:王 浩

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

源海印刷有限责任公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2006 年 4 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2006 年 4 月第一次印刷 印张: 36

印数: 1—2 000 字数: 828 000

定价: 88.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈环伟〉)

高等学校优秀青年教师教学科研奖励计划项目

国家 863 高技术资助项目

国家 973 基础研究项目

科技部国际科技合作重点计划项目

德国技术合作公司 (GTZ) 重点项目 联合资助

中加能源生态环境中心重点项目

湖南省科技厅重大科研项目

国家杰出青年科学基金项目

国家自然科学基金面上项目

前 言

随着经济的发展、人口的增加和生活水平的提高,有机固体废物的量迅速增加,由于缺乏处理或不当处理,产生了严重的环境问题,有机固体废物已成为一个重要的环境污染源,如何科学、经济地处理有机固体废物是摆在环境保护工作者面前的一个紧迫的研究课题。

有机固体废物的堆肥化处理是一种古老的方法,也是目前世界上普遍采用的方法。生物技术(特别是现代生物技术)和控制技术的发展给这一古老的技术增添了新的活力,目前,堆肥化处理技术已成为固体废物处理技术的研究热点。

本书以堆肥环境生物和控制技术为主线,全面总结作者承担的国家高等学校优秀青年教师教学科研奖励计划项目、国家 863 高技术资助项目、国家 973 基础研究项目、科技部国际科技合作重点计划项目、德国技术合作公司(GTZ)重点项目(1998~2004 年)、中加能源生态环境中心重点项目(2000~2004 年)、湖南省科技厅重大项目、国家杰出青年科学基金项目、国家自然科学基金面上项目等的研究成果。在写作上注重学科交叉,力求深入浅出。

本书是集体劳动的结晶,在课题的研究过程中,作者和合作者共申请国家发明专利 25 项、实用新型专利 3 项,已获得发明专利授权 10 项、实用新型专利授权 2 项;在国内外的研究刊物发表论文 596 篇,其中 SCI 收录论文 203 篇(SCI 引用 626 次,SCI 他引 478 次)、EI 收录论文 261 篇;在国内外的有关会议交流论文 176 篇,其中国际会议论文 136 篇,国内会议 40 篇,国际会议大会发言 10 篇,ISTP 收录 90 篇。很多老师和同学参与了课题研究和本专著的撰写,具体为:第 0 章,绪论(郁红艳、谢更新、曾光明);第 1 章,好氧堆肥中的微生物接种剂(陈耀宁、郁红艳、黄丹莲、喻曼、曾光明);第 2 章,分子生物学技术在堆肥中的应用(杨朝晖、肖勇、谢更新、曾光明);第 3 章,堆肥化中木质素的生物降解(黄丹莲、郁红艳、冯冲凌、曾光明);第 4 章,生物表面活性剂及其在堆肥中的应用(时进钢、傅海燕、钟华、王伟、戴芳、刘佳、袁兴中、曾光明);第 5 章,城市有机垃圾的厌氧消化处理(乔玮、陈朝猛、袁兴中、曾光明);第 6 章,堆肥动力学基础(刘存芳、王亮、袁兴中、曾光明);第 7 章,城市植物有机固体废物仓式好氧堆肥工艺改进(胡天觉、黄国和、曾光明);第 8 章,堆肥二次污染控制技术(杨朝晖、高锋、李晨、黄国和、曾光明);第 9 章,生物传感器在堆肥生物组分与污染物的检测与控制中的应用(汤琳、牛承岗、章毅、袁兴中、曾光明);第 10 章,有机固体废物堆肥腐熟度的评价(黄红丽、黄国和、谢更新、曾光明);第 11 章,堆肥与重金属污染及其防治(涂响、陈桂秋、黄国和、曾光明);第 12 章,城市生活垃圾堆肥的过程控制(罗玮、李晓东、黄国和、曾光明);第 13 章,堆肥法处理有毒有害难降解有机污染物的应用(蒋晓云、傅海燕、黄丹莲、陈洋、陈鑫、曾光明);第 14 章,城市生活垃圾堆肥的农业利用(刘红玉、鲁双庆、袁兴中、曾光明);第 15 章,污水处理厂污泥的生物稳定化(张盼月、张碧波、蒋剑虹、李音、李明、曾光明);

附录，上海市浦东新区生活垃圾综合处理（陈耀宁、曾光明、袁兴中、黄国和、郭荣宗）。全书由曾光明和袁兴中统稿，黄红丽校核。在课题研究和专著撰写过程中，还有很多同志给予了热情的帮助，特别是刘鸿亮院士、刘克利教授、王柯敏教授等提出了宝贵意见。在本书的写作和出版过程中始终得到了科学出版社的大力支持和帮助。在此，作者向所有对本书的出版给予关心和支持的前辈、领导、同事和朋友们表示衷心的感谢！

由于作者水平所限，书中缺点和错误在所难免，敬请有关专家及广大读者批评指正。

作 者

2005 年 5 月

目 录

前言

第 0 章 绪论	1
0.1 固体废物堆肥化概述	1
0.1.1 好氧堆肥概述	1
0.1.2 厌氧堆肥概述	2
0.2 固体废物堆肥化研究进展	2
0.2.1 堆肥设备与工艺研究进展	3
0.2.2 堆肥化微生物学研究进展	3
0.2.3 堆肥化控制研究进展	4
0.2.4 堆肥产品和技术的应用研究	5
0.3 固体废物堆肥化发展趋势	6
0.3.1 堆肥化微生物学研究趋势	6
0.3.2 堆肥化控制研究趋势	7
0.3.3 堆肥产品和技术应用研究趋势	8
0.4 本书内容	8
参考文献	9

第一篇 堆肥微生物

第 1 章 好氧堆肥中的微生物接种剂	13
1.1 微生物群落的生态学	13
1.1.1 微生物群体之间的相互作用	13
1.1.2 微生物群落的演替规律	16
1.2 堆肥中的微生物过程	17
1.2.1 中温阶段	18
1.2.2 高温阶段	19
1.2.3 腐熟阶段	20
1.2.4 堆肥中的病原微生物	21
1.3 堆肥中微生物的选育	22
1.3.1 微生物选育的意义	22
1.3.2 微生物菌剂的选育方法	24
1.3.3 微生物接种技术应用于堆肥的理论研究	29
1.4 基于微生物选育技术的堆肥微生物添加剂的开发	30
1.4.1 促进堆肥腐熟, 缩短堆制周期	31

1.4.2	保持微生物活性, 制作微生物制剂	43
1.4.3	减少堆肥过程中氮素损失, 提高养分含量	47
1.4.4	堆制法中微生物对有机污染物的清消	50
1.5	堆肥微生物菌剂研究展望	53
	参考文献	55
第2章	分子生物学技术在堆肥中的应用	58
2.1	堆肥与分子生物学概述	58
2.1.1	堆肥微生物研究现状	58
2.1.2	分子生物学概述	59
2.2	分子生物学在环境科学中的应用概述	62
2.3	16S rRNA/rDNA 序列分析技术在堆肥微生物研究中的应用	66
2.3.1	16S rRNA/rDNA 序列分析技术的基本原理	66
2.3.2	16S rRNA/rDNA 序列分析技术的技术步骤及其应用	67
2.3.3	16S rRNA/rDNA 序列分析技术的应用前景	77
2.4	分子标记技术分析堆肥微生物多样性	77
2.4.1	限制性片段长度多态性 (RFLP) 分析及其应用	78
2.4.2	随机扩增多态性分析 (RAPD) 及其应用	79
2.4.3	DNA 单链构象多态性 (SSCP) 分析及其应用	80
2.4.4	扩增的限制性片段长度多态性 (AFLP) 分析及其应用	85
2.5	生物芯片检测堆肥微生物	86
2.5.1	生物芯片的研究背景	87
2.5.2	生物芯片的工作原理	87
2.5.3	生物芯片使用的操作程序	90
2.5.4	生物芯片的应用	90
2.6	其他技术在堆肥微生物研究中的应用	92
2.6.1	扩增性 rDNA 限制性酶切片段分析及其应用	92
2.6.2	流式细胞术及其应用	93
2.6.3	基因工程及其应用	94
	参考文献	100
第3章	堆肥化中木质素的生物降解	103
3.1	概述	103
3.1.1	木质素的结构及其作用	103
3.1.2	木质素的物理、化学性质	105
3.2	堆肥过程中降解木质素的微生物	108
3.2.1	降解木质素的微生物分类	109
3.2.2	堆肥过程中木质素生物降解研究的重要性	111
3.3	堆肥过程中微生物降解木质素研究	111
3.3.1	白腐菌堆肥化降解木质素研究	111
3.3.2	其他菌堆肥化降解木质素研究	124

3.4 堆肥化中木质素降解研究的问题与展望	133
3.4.1 现存问题	133
3.4.2 展望	134
参考文献	134
第4章 生物表面活性剂及其在堆肥中的应用	137
4.1 堆肥微环境及生物表面活性剂的引入	137
4.2 生物表面活性剂概述	138
4.2.1 生物表面活性剂的概念	138
4.2.2 生物表面活性剂的生产菌	138
4.2.3 生物表面活性剂的种类和结构特点	140
4.2.4 生物表面活性剂的合成	143
4.2.5 生物表面活性剂的提取及纯化	145
4.2.6 生物表面活性剂的物化性质	149
4.2.7 生物表面活性剂的性能和特性	150
4.2.8 生物表面活性剂的应用	155
4.3 生物表面活性剂在堆肥中应用的理论基础	158
4.3.1 生物表面活性剂应用于土壤修复的启示	158
4.3.2 生物表面活性剂对堆肥微环境的作用	165
4.3.3 生物表面活性剂对微生物降解行为的影响	169
4.4 生物表面活性剂在堆肥中的应用实例	173
4.4.1 对促进堆肥中易降解有机质降解的研究	173
4.4.2 生物表面活性剂对堆肥中纤维素降解的促进作用	176
4.4.3 生物表面活性剂在城市生活垃圾堆肥化中的应用	181
4.4.4 生物表面活性剂对堆肥中特殊有机物(石油烃类有机污染物)的降解	182
参考文献	183
第5章 城市有机垃圾的厌氧消化处理	189
5.1 概述	189
5.2 有机垃圾厌氧消化机理	190
5.2.1 厌氧消化的一般原理	190
5.2.2 有机垃圾厌氧消化过程	192
5.2.3 有机垃圾厌氧消化中的微生物及其相互关系	196
5.2.4 厌氧消化动力学	199
5.3 有机垃圾厌氧消化的影响因素	204
5.3.1 厌氧条件	204
5.3.2 pH	205
5.3.3 温度	205
5.3.4 垃圾的组分和颗粒尺寸	206
5.3.5 含水率	208
5.3.6 氨氮浓度	208

5.3.7 搅拌	208
5.3.8 抑制剂	209
5.3.9 添加剂	209
5.4 有机垃圾厌氧消化工艺	211
5.4.1 厌氧消化工艺的分类	211
5.4.2 几种主要的消化技术	213
5.4.3 有机垃圾厌氧消化工艺实例介绍	221
5.4.4 消化残渣的好氧堆肥	228
参考文献	229
第6章 堆肥动力学基础	232
6.1 微生物动力学基础	232
6.1.1 无抑制的动力学模型	232
6.1.2 有抑制的动力学模型	235
6.1.3 生物膜中的扩散传质问题	237
6.2 厌氧消化过程动力学	240
6.2.1 厌氧消化三阶段动力学	241
6.2.2 几种常见厌氧反应器的基本模型	244
6.2.3 厌氧消化过程的参数控制	247
6.3 好氧堆肥化过程动力学	252
6.3.1 好氧堆肥反应的机理	252
6.3.2 堆肥反应各阶段所对应的主要动力学过程	253
6.3.3 好氧堆肥的主要动力学过程详述	255
参考文献	258

第二篇 堆肥过程与控制

第7章 城市植物有机固体废物仓式好氧堆肥工艺改进	263
7.1 概述	263
7.2 好氧堆肥中影响植物有机物降解的主要因素	264
7.2.1 温度	264
7.2.2 水分含量	264
7.2.3 通风供氧	264
7.2.4 pH	265
7.2.5 有机质含量和碳氮比	265
7.3 富水型农业植物废物的易降解性研究	267
7.4 好氧堆肥过程中氨氮的产生和控制技术	270
7.4.1 堆肥过程中氨氮的产生、损失与影响	270
7.4.2 堆肥过程中氮源物质损失的防治技术	277
7.5 好氧堆肥中微生物降解植物有机物动力学	281

参考文献	286
第8章 堆肥二次污染控制技术	290
8.1 堆肥臭气控制及处理技术	290
8.1.1 堆肥臭气的产生	290
8.1.2 堆肥过程的优化	291
8.1.3 物化法堆肥臭气处理技术	291
8.1.4 生物法臭气处理技术	293
8.1.5 组合式臭气处理方法	303
8.2 堆肥的重金属污染问题	304
8.2.1 垃圾中重金属的含量及危害	304
8.2.2 重金属对土壤和农作物的污染	305
8.3 堆肥渗滤液控制及处理技术	306
8.3.1 堆肥渗滤液的产生及危害	306
8.3.2 渗滤液处理方案	306
8.3.3 垃圾渗滤液处理技术	310
参考文献	320
第9章 生物传感器在堆肥生物组分与污染物的检测与控制中的应用	323
9.1 生物传感器概述及分类	323
9.1.1 传感器的概况	323
9.1.2 基本分类及应用	324
9.2 酶生物传感器在堆肥中的应用	324
9.2.1 测定堆肥菌株分泌有效酶活性的电化学传感器	324
9.2.2 测定堆肥中有害组分浓度的抑制型酶传感器	329
9.3 其他传感器在堆肥系统中的应用	339
9.3.1 压电传感器用于堆肥菌株含量测定	339
9.3.2 免疫传感器用于堆肥中有害组分浓度测定	341
9.3.3 DNA 传感器用于堆肥中核酸分子和污染物含量测定	348
参考文献	350
第10章 有机固体废物堆肥腐熟度的评价	356
10.1 概述	356
10.2 腐熟度概念及其影响因素	358
10.2.1 腐熟度	358
10.2.2 影响因素	358
10.3 堆肥腐熟度评价指标体系	363
10.3.1 物理学指标	363
10.3.2 化学指标	364
10.3.3 生物活性指标	369
10.3.4 植物毒性指标	372
10.3.5 卫生学指标	373

10.4	堆肥腐熟度的综合评价·····	373
10.5	数学方法在堆肥腐熟度评价中的应用·····	375
10.5.1	模糊综合评价法·····	376
10.5.2	灰色聚类法·····	378
	参考文献·····	380
第 11 章	堆肥与重金属污染及其防治 ·····	384
11.1	堆肥原料中重金属的特征·····	384
11.2	重金属污染对环境的影响和危害·····	385
11.2.1	重金属对植物的影响和危害·····	386
11.2.2	重金属对人体的影响和危害·····	386
11.2.3	重金属对堆肥的影响·····	386
11.3	堆肥过程对重金属活性的影响·····	390
11.3.1	堆肥中重金属的存在形态·····	390
11.3.2	堆肥过程中重金属形态的变化·····	391
11.4	堆肥中有机质对重金属的吸附·····	394
11.5	添加钝化剂对重金属形态的影响·····	397
11.6	土壤环境对堆肥成品中重金属形态的影响·····	398
11.7	堆肥成品中重金属的去除·····	399
11.8	堆肥成品在治理重金属污染中的应用研究·····	401
	参考文献·····	404
第 12 章	城市生活垃圾堆肥的过程控制 ·····	407
12.1	堆肥反应过程控制的研究及应用简述·····	407
12.1.1	堆肥系统过程控制的理论研究·····	407
12.1.2	堆肥生产过程的计算机控制·····	414
12.1.3	小结·····	422
12.2	城市生活垃圾堆肥生产过程自动监控系统的设计·····	423
12.2.1	生活垃圾堆肥厂生产的工艺流程·····	423
12.2.2	堆肥生产过程自动监控系统·····	426
12.2.3	小结·····	430
12.3	人工智能控制系统在堆肥生产过程中的应用研究·····	430
12.3.1	神经网络预测控制·····	430
12.3.2	堆肥过程模型控制器的设计·····	433
12.3.3	人工智能控制系统·····	439
12.3.4	小结·····	442
12.4	本章结论·····	442
	参考文献·····	443

第三篇 堆肥技术与应用

第 13 章	堆肥法处理有毒有害难降解有机污染物的应用 ·····	447
---------------	-----------------------------------	------------

13.1	概述	447
13.1.1	难降解有机物的种类及其危害	447
13.1.2	堆肥的优点	448
13.2	堆肥法处理难降解有机物	449
13.2.1	石油类	449
13.2.2	硝基芳香烃(炸药类)	454
13.2.3	卤代有机物	455
13.2.4	多环芳烃	458
13.2.5	人工合成有机物	462
13.2.6	环境激素类	467
13.2.7	抗生物降解物	469
13.3	堆肥处理中的微生物	470
13.3.1	类型	471
13.3.2	微生物修复机理	472
13.3.3	微生物作用的影响因素	473
13.3.4	污染物的真菌堆肥处理	474
13.4	展望	475
13.4.1	研究不足	475
13.4.2	新技术的应用及前景	476
	参考文献	476
第14章	城市生活垃圾堆肥的农业利用	480
14.1	城市生活垃圾的组成特点	481
14.2	城市生活垃圾堆肥的特点	483
14.2.1	城市生活垃圾堆肥的理化特性	483
14.2.2	城市生活垃圾堆肥的肥效特性	484
14.2.3	城市生活垃圾堆肥的安全特性	485
14.3	城市生活垃圾堆肥的农业利用	500
14.3.1	城市生活垃圾堆肥对土壤结构的改良作用	501
14.3.2	城市生活垃圾堆肥对土壤肥力的促进作用	503
14.4	我国城市生活垃圾堆肥农用的现状、问题及对策	504
14.4.1	我国城市生活垃圾堆肥农用的现状	504
14.4.2	城市生活垃圾堆肥农用中存在的问题及对策分析	506
14.5	小结	511
	参考文献	512
第15章	污水处理厂污泥的生物稳定化	516
15.1	污泥的来源与性质	516
15.1.1	污泥的产生	516
15.1.2	污泥的组成和性质	517
15.1.3	污泥的处理	519

15.2	污泥的消化	521
15.2.1	污泥的厌氧消化	521
15.2.2	污泥的好氧消化	527
15.2.3	污泥与城市有机垃圾的联合厌氧消化	532
15.3	污泥的堆肥化	535
15.3.1	堆肥化发展历史	535
15.3.2	污泥的好氧堆肥	536
15.3.3	污泥的厌氧堆肥	545
	参考文献	545
附录	上海市浦东新区生活垃圾综合处理	549
1	案例项目建设背景	549
2	工厂设计参数	549
2.1	处理规模	549
2.2	上海市区生活垃圾性质	549
2.3	工艺技术参数	550
3	工厂工艺流程	551
3.1	垃圾堆肥发酵工艺	551
3.2	垃圾自动分选工艺	553
3.3	工艺在线监测系统	553
3.4	堆肥后处理工艺	553
3.5	“三废”治理系统	554
4	工厂的平面布置	554
5	主要构筑物、设备及其参数	555
5.1	主要构筑物	555
5.2	主要设备及参数	556
6	工程运行情况	557
6.1	回收物料的销路情况	557
6.2	有机肥的销售	558
7	工程评价	558

第0章 绪 论

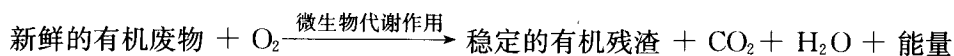
0.1 固体废物堆肥化概述

固体废物一般是指人类在生产、加工、流通、消费及生活等过程中提取目的组分后，弃去的固状物质和泥浆状物质。它是各种废物的终态，特别是从污染控制设施中排出的固体废物浓集了许多污染成分，并且在自然条件影响下，固体废物中的一些有害成分会转入大气、水体和土壤，参与生态系统的物质循环，因而具有潜在的长期的危害（夏浩然等 2002）。

固体废物主要包括城市生活固体废物、工业固体废物和农业固体废物，按组分又可分为有机废物和无机废物。现代化处理固体废物的技术主要有焚烧、堆肥、填埋和固化处理等，其中焚烧和堆肥是有机废物资源化的主要技术手段。由于堆肥法可以使有机废物稳定化，并能在高温发酵时杀灭致病菌，其最终产物还能作为肥料或土壤调节剂，使有机物循环再利用，因此，堆肥法是符合可持续发展的有机废物处理方法，具有强大的生命力。堆肥按需氧程度一般分为好氧堆肥和厌氧堆肥两种。前者是在通气条件下借好氧微生物活动使有机物得到降解，由于好氧堆肥温度一般在 $50\sim 60^{\circ}\text{C}$ ，极限可达 $80\sim 90^{\circ}\text{C}$ ，故亦称为高温堆肥。后者是利用微生物发酵造肥（李国学等 2000）。

0.1.1 好氧堆肥概述

放置在任一场所的有机固体废物在湿度、通风条件满足的情况下，会自动产生热量（如秸秆堆垛、垃圾堆垛），尤其在冬季这种现象更为明显，会产生大量热蒸汽（李国学等 2000）。堆肥化是环境工程中的一种利用自然界中天然存在的，或经过人类某些改变的微生物对有机固体废物的氧化、分解能力，在一定温度、湿度和 pH 条件下使可降解有机固体废物发生生物化学降解，形成类似腐殖质土壤的物质，达到有机固体废物处理无害化和资源化的技术方法。堆肥化的产物称为堆肥。堆肥过程可以简单用以下反应方程式表达（倪骏等 2004）：



在堆肥化过程中，可溶性有机物质可透过微生物的细胞壁和细胞膜被微生物直接吸收；而不溶的胶体有机物质，先被吸附在微生物体外，依靠微生物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代谢活动，进行分解代谢（氧化还原过程）和合成代谢（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。

好氧堆肥法在经历了一段兴衰演变后，近年来又出现了蓬勃发展的势头。它具有运行费用低、二次污染小等优点，在世界各国尤其是发展中国家大有发展前途。

0.1.2 厌氧堆肥概述

厌氧堆肥是指在厌氧微生物的作用下，有控制地使废物中可生物降解的有机物转化为 CH_4 、 CO_2 和稳定物质的生物化学过程。由于厌氧堆肥可以产生以 CH_4 为主要成分的沼气，故又称为甲烷发酵。人类应用厌氧消化技术的历史十分悠久。早期大多数是在农村利用人畜粪便和一些农业废物进行小规模厌氧发酵，产生的沼气用于家庭取暖、照明和炊事等。厌氧消化技术最初的工业化应用是作为粪便和污泥的减量化与稳定化手段得以实施的。厌氧消化处理可以去除废物中 30%~50% 的有机物，并使之稳定化。

有机物的厌氧堆肥分为液化、产酸和产甲烷三个阶段，每一阶段各有其独特的微生物类群起作用。另外的一种理论将厌氧堆肥的生化过程分为两个阶段，即酸性发酵阶段和碱性发酵阶段。两阶段理论将液化阶段和产酸阶段合称为酸性发酵阶段，将产甲烷阶段称为碱性发酵阶段。

在酸化第一阶段由发酵细菌利用胞外酶对有机物进行体外酶解，使固体物质变成可溶于水的物质，然后，细菌再吸收可溶于水的物质，这也就是三阶段理论中的水解阶段。同时产氢、产醋酸细菌把前一阶段产生的一些中间产物如丙酸、丁酸、乳酸、长链脂肪酸以及醇类等进一步水解成醋酸和氢。在这一阶段由于有机酸的大量积累，pH 随之下降，在分解后期，产甲烷菌占主导作用，把酸性发酵阶段产生的有机酸和醇等进一步分解产生甲烷和二氧化碳（乔玮 2003）。

0.2 固体废物堆肥化研究进展

有机固体废物的堆肥技术已有几千年历史。随着生产力的发展和科技的进步，堆肥化技术不断得到改进。一方面，人工堆肥生产有机肥对改善土壤性能与提高肥力维持农作物长期的优质高产是有益的，是农业、林业生产需要的；另一方面，各国有机固体废物数量逐年增加，需要对其处理的卫生要求也日益严格，从节约资源与能源角度出发，有必要把实现有机固体废物资源化作为固体废物无害化处理、处置的重要手段。有机固体废物的堆肥化能同时满足上述两方面要求，所以在国内外处理有机固体废物技术中，该技术由于经济有效且更符合生态学效应而备受关注（胡天觉 2005）。

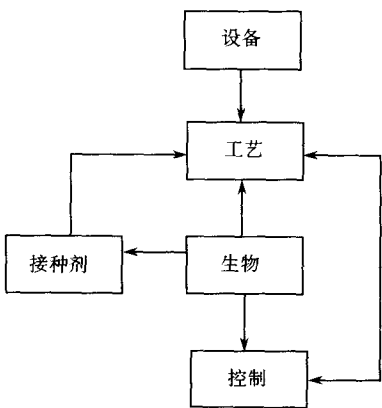


图 0-1 堆肥化研究的主要内容

有机固体废物数量逐年增加，需要对其处理的卫生要求也日益严格，从节约资源与能源角度出发，有必要把实现有机固体废物资源化作为固体废物无害化处理、处置的重要手段。有机固体废物的堆肥化能同时满足上述两方面要求，所以在国内外处理有机固体废物技术中，该技术由于经济有效且更符合生态学效应而备受关注（胡天觉 2005）。

固体废物堆肥化研究内容主要包括五个方面，即堆肥设备研究、堆肥化工艺研究、堆肥微生物学研究、堆肥化控制研究（包括过程控制研究和污染控制研究）以及堆肥技术和产品的应用研究。图0-1表示堆肥化研究的主要内容。