

固体废物处理与资源化丛书

固体废物堆肥 原理与技术

柴晓利 张 华 赵由才 等编



Chemical Industry Press

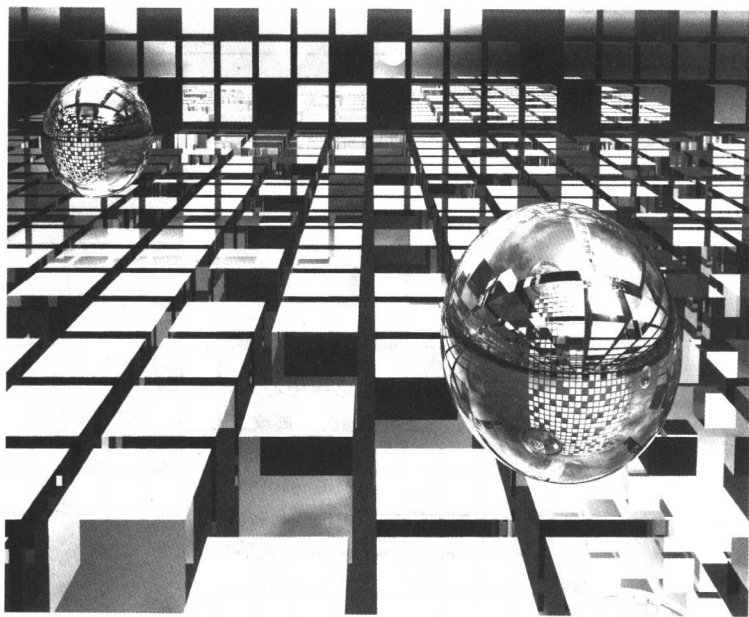


化学工业出版社
环境科学与工程出版中心

固体废物处理与资源化丛书 (第10卷)

固体废物堆肥 原理与技术

柴晓利 张 华 赵由才 等编



化学工业出版社

环境科学与工程出版中心

· 北 京 ·

(京) 新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

固体废物堆肥原理与技术/柴晓利, 张华, 赵由才等
编. —北京: 化学工业出版社, 2005. 7

(固体废物处理与资源化丛书)

ISBN 7-5025-7483-2

I. 固… II. ①柴…②张…③赵… 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 084316 号

固体废物处理与资源化丛书

固体废物堆肥原理与技术

柴晓利 张 华 赵由才 等编

责任编辑: 管德存 徐 娟

责任校对: 洪雅姝

封面设计: 潘 峰

*

化 学 工 业 出 版 社 出版发行
环境科学与工程出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

购书咨询: (010) 64982530

(010) 64918013

购书传真: (010) 64982630

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销
北京云浩印刷有限责任公司印刷
三河市前程装订厂装订

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 15 字数 365 千字

2005 年 9 月第 1 版 2005 年 9 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-7483-2

定 价: 38.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

内 容 提 要

本书是《固体废物处理与资源化丛书》之一，全面论述了固体废物堆肥处理的原理与技术。具体分为 11 章，分别为固体废物概述、堆肥的基本原理、堆肥过程的物料和热量平衡、堆肥工艺、堆肥的过程控制、堆肥腐熟度评价及其指标体系、堆肥设备、堆肥产品质量及农业利用、有机-无机复混肥生产工艺、堆肥在控制污染及其他方面的应用、堆肥系统及运行。书中还有典型实例介绍，对实际工程设计和运行管理有指导作用。

本书适合固体废物处理方面的科研、设计和管理人员阅读，也可作为大中专院校相关专业师生的参考用书。

序

随着我国国民经济和社会的发展，固体废物产生量在迅速增加。在我国的城镇中，以生活垃圾为主的固体废物的收集、运输、处理与处置、分类与分选、资源化循环利用等，不仅是当地政府的重要日常工作，也是当今社会可持续发展的核心内容。

固体废物处理与资源化，首先强调的是资源化，即物质的循环使用。所谓固体废物的资源化，一方面是固体废物通过简单加工后的再利用，另一方面是通过功能的改变而得到再利用。通过简单维修或转换使用者，不能认为是固体废物的资源化过程。分类的固体废物资源化过程应该比混合的各种固体废物资源化过程更容易实现。因此，实行固体废物分类收集、运输、储存和加工，是资源化的最佳路径，应该持之以恒地加以实施。

固体废物的处理，一般是指不考虑再利用的无害化方法，如生活垃圾的填埋与焚烧、放射性废物的固化与稳定化、危险废物的去毒化与安全填埋等。有机可降解废物的堆肥既是一种固体废物的处理方法，也是一种资源化方法。

近二十年来，我国在固体废物处理与资源化方面发展较快，越来越多的高等院校和科研单位开始进行固体废物的研究工作，许多企业也积极介入固体废物的处理与资源化行业，从业人员数量迅速增加。同时，我国政府和企业对固体废物处理与资源化方面的投入逐年增加，研究开发了一系列新技术、新方法，在传统技术的改造和改良方面也有进展。另外，国外大量相关企业也在我国开展业务，在管理和技术方面积累了许多经验教训。因此，全面总结和介绍国内外固体废物处理与资源化技术，对于发展我国的环境保护事业，具有重要的意义。

本丛书反映了国内外固体废物处理与资源化领域的发展现状和趋势，内容覆盖了生活垃圾、危险废物、一般工业废物、建筑废物、放射性废物等的处理与资源化各个方面，适于从事固体废物研究、开发、教学、培训和管理等的人员阅读参考。

赵由才

2004年1月

前 言

随着人类社会、经济的发展和科学技术的进步，生活水平普遍提高，固体废物（包括城市生活垃圾、工农业所产废物以及污水污泥等）排放量日益增多，这些源源不断、大量产生的固体废物，已成为一个困扰经济发展、污染市容环境、影响市民生活的社会问题。如何遵循可持续发展的原则，减少固体废物排放量，变废为宝，实现固体废物的资源化循环利用，选用技术可靠、经济适用、卫生安全的固体废物处理技术，从根本上实现固体废物处理减量化、资源化和无害化的规划目标，逐步做到化害为利、变废为宝，是我国面临的一项重要的重要的社会发展战略任务。

目前常用的固体废物处理、处置技术主要包括卫生填埋技术、焚烧处理技术和堆肥技术。堆肥技术由于二次污染小，可有效实现有机物质的资源化，越来越受到人们的重视。固体废物堆肥技术在我国应用非常广泛，估计在今后相当长一段时间内，固体废物堆肥仍将是我国固体废物处理的主要方式之一。随着高温好氧堆肥技术、动态厌氧堆肥处理技术的迅速发展和应用，堆肥技术将在世界范围内经历一次从量变到质变的变化过程，但无论如何，今后堆肥技术仍将在国内外固体废物综合处理体系中占有重要位置。

本书编写人员分工如下：第二、四、五、六、八章，张华、范建军、柴晓利；第九、十章，张华、范建军、郭强；第一、三、十一章，楼紫阳、柴晓利、赵由才；第七章，唐圣军、赵由才、郭强。

本书所列出的所有机器设备和生产厂家，仅仅是出于全书的完整性和论述的需要，撰写人员和出版社不为这些机器设备和厂家提供任何保证和推荐，也不为任何由于使用这些机器设备所造成的损失和其他任何问题承担任何经济 and 法律责任。

本书得到国家科技部“十五”攻关项目“小城镇科技发展重大项目——小城镇环境保护关键技术研究及设备开发”（No. 2003BA808A17）和教育部“博士点”基金“稳定化垃圾生物滤床的生物降解特性及其应用研究”（No. 20020247020）的部分资助。

由于编者水平有限，不可避免存在疏漏之处，真诚希望广大同行、专家和读者批评指正。

柴晓利

2005年5月于上海

目 录

第一章 固体废物概述.....	1	计算	35
第一节 固体废物的来源.....	1	第二节 堆肥的热量平衡	35
一、固体废物的定义和特性.....	1	一、连续操作过程中各项热量及水平衡	
二、固体废物的来源.....	1	计算公式	36
第二节 固体废物的危害.....	3	二、间歇操作过程中各项热量及水平衡	
第三节 固体废物的性质.....	4	计算公式	37
一、固体废物的物理性质.....	4	第四章 堆肥工艺	38
二、固体废物的化学性质.....	5	第一节 堆肥物料和分类	38
三、固体废物的生物特性.....	6	一、堆肥原料	38
第四节 固体废物的处理、处置及资源化		二、原料中的添加剂	39
技术.....	7	三、堆肥形式的分类	41
一、主要污染控制技术政策.....	7	第二节 堆肥的基本工艺	43
二、垃圾处理处置的主要方式.....	8	一、好氧堆肥的基本工艺流程	43
第二章 堆肥的基本原理	12	二、典型好氧堆肥工艺	44
第一节 堆肥化的概念及其发展历史	12	三、好氧堆肥系统介绍	47
一、堆肥化的概念	12	四、厌氧堆肥工艺	50
二、堆肥的发展历史及现状	12	第三节 堆肥的影响因素	58
三、堆肥化中存在的问题	15	第四节 污泥堆肥	60
四、堆肥化的前景	16	一、污泥堆肥工艺过程	61
第二节 堆肥的基本概念和原理	18	二、污泥堆肥设备	62
一、堆肥的特点	18	三、需要注意的问题	65
二、堆肥的基本原理	18	四、复混肥料的生产	66
第三节 堆肥微生物	21	第五节 秸秆和禽畜粪便堆肥	67
一、堆肥微生物的种类及特征	21	一、秸秆堆肥	67
二、堆肥微生物降解的基本原理	24	二、禽畜粪便堆肥	69
三、微生物的降解转化能力	26	第六节 蚯蚓处理有机废物	71
四、堆肥微生物的影响因素	26	一、生物反应器处理有机废物	71
第四节 堆肥过程动力学	27	二、与堆肥法联合处理城市垃圾	72
一、堆肥化过程动力学原理	27	三、影响因素	72
二、米氏常数的意义及测定	29	四、蚯蚓粪有机肥的特点	73
第三章 堆肥过程的物料和热量平衡	31	第五章 堆肥的过程控制	74
第一节 堆肥的物料平衡	31	第一节 堆肥过程中的含水率控制	74
一、计量反应式	31	一、垃圾含水率的确定	74
二、固相成分变化率	31	二、堆肥过程的含水率控制	76
三、碳素变化率与挥发性成分变化率的		第二节 堆肥过程中的有机质控制	78
关系	32	一、堆肥原料有机物质的调控	79
四、氮素的变化规律	33	二、堆肥反应中有机物含量的过程变化	80
五、伴有堆肥产品的固相各成分变化的		三、碳氮比的控制	80

四、减少氮素损失的措施	82	二、堆肥产品的成分和养分	148
第三节 堆肥过程的温度控制	83	三、堆肥的质量标准	150
第四节 堆肥过程中的通风控制	85	第二节 堆肥的利用	154
一、通风方式分类	85	一、堆肥的效用	154
二、强制通风控制方法	88	二、堆肥的农业利用	158
三、强制通风量计算	91	三、堆肥以堆肥茶的形式施用	159
四、强制通风系统的设计计算	92	第三节 堆肥中重金属的影响	160
第五节 堆肥过程的其他因素控制	101	一、堆肥中重金属的形态和性质	160
一、pH 值的控制	101	二、控制技术	161
二、堆肥原料的颗粒大小控制	101	三、重金属对环境容量的影响	164
第六节 恶臭的控制和处理	102	第四节 生活垃圾与农用肥料	165
一、恶臭物质	102	一、微生物肥料	165
二、堆肥恶臭的控制	102	二、有机肥料	166
第六章 堆肥腐熟度评价及其指标体系	106	三、复合肥料	166
第一节 堆肥腐熟度的概念及评价方法	106	四、土壤改良剂	166
一、腐熟度的概念	106	五、其他新型垃圾肥料	167
二、堆肥腐熟和稳定的评估方法	106	第九章 有机-无机复混肥生产工艺	169
三、综合评价方法	115	第一节 基本理论	169
第二节 腐熟度检验测定方法	116	一、有机-无机复混肥的作用原理	169
一、淀粉测定法	116	二、有机-无机复混肥配方设计的影响	170
二、氮素试验法	117	因素	170
三、耗氧速率法	118	三、有机-无机复混肥配方	172
四、生物可降解度的测定	119	四、有机-无机复混肥的配制	174
五、明胶测试法	120	第二节 有机复混肥的生产实例	176
六、自热测试法	120	一、利用城市生活垃圾生产复混肥	177
第七章 堆肥设备	121	二、污泥肥料的精加工生产	179
第一节 预处理设备	121	三、以晒盐硝皮为原料生产复混肥	180
一、计量装置	122	四、利用糠醛渣生产糠肥	181
二、进料供料设备	122	五、腐殖酸复混肥	181
第二节 发酵设备	131	六、秸秆、禽畜粪便混合堆肥生产有机	181
一、多层立式堆肥发酵塔	131	复混肥	181
二、卧式堆肥发酵滚筒	133	第三节 有机复混肥的运输与贮存	182
三、筒仓式堆肥发酵仓	134	一、贮运过程中的变化	182
四、箱式堆肥发酵池	135	二、贮存中的注意事项	183
五、条垛式发酵设备	137	第四节 有机复混肥的使用	184
第三节 后处理设备	139	一、有机复混肥施用时注意的问题	184
一、精分选设备	139	二、有机复混肥施肥技术	185
二、造粒精化设备	140	三、有机复混肥的施用量	187
第四节 其他辅助设备	144	第五节 有机-无机复混肥的农田施用	188
一、堆肥场的运输与传动装置	144	效果	188
二、二次污染防治方法与设备	145	一、对产量和品质的影响	188
第八章 堆肥产品质量及农业利用	148	二、不同施肥处理对土壤肥力的影响	190
第一节 堆肥产品特点及质量标准	148	第十章 堆肥在控制污染及其他方面的	
一、堆肥产品的分类	148	应用	191

第一节 堆肥处理有机污染物	191	一、运行管理总则	211
一、有机污染物的堆肥处理	191	二、主要工艺流程	211
二、堆肥处理技术应用于有机污染土壤 时的影响因素	195	三、称重	212
三、堆肥处理有机污染土壤方面有待 研究的问题	197	四、板式给料	213
第二节 堆肥处理气体及水污染	198	五、皮带输送	213
一、去除挥发性有机污染物和控制 恶臭	198	六、振动筛选	213
二、处理城市雨水污染	200	七、滚筒筛选	214
第三节 堆肥的革新应用——防治 病虫害	200	八、一级发酵	214
第十一章 堆肥系统及运行	204	九、二级发酵	215
第一节 堆肥系统	204	十、通风	215
一、受料、进料系统	204	十一、污水回流	216
二、预处理系统	206	十二、控制检测	216
三、发酵系统	208	十三、化验（检验）	216
四、后处理系统	208	十四、变配电	217
五、运输及包装系统	209	第三节 堆肥实例介绍	217
六、脱臭设备及其他系统	210	一、堆肥实例一（无锡 100t/d 生活 垃圾处理厂）	217
第二节 运行和管理	211	二、堆肥实例二（常州市城市生活垃圾 综合处理工艺）	221
		参考文献	225

第一章 固体废物概述

第一节 固体废物的来源

一、固体废物的定义和特性

固体废物，是指在生产建设、日常生活和其他活动中产生的污染环境的固态、半固态废弃物。

从广义上讲，根据物质的形态来分，废物可分为固体废物、液态废物和气态废物三种。其中在液态废物和气态废物中，大部分是水和空气中混掺了废弃的污染物。在我国，一般被纳入到水环境或大气环境中进行管理。而剩下的不能排入水体的液态废物以及不能排入大气的置于容器中的气态废物，由于大多具有较大的危害性，在我国也纳入到固体废物管理体系。

固体废物一般具有如下特性：①无主性，即被丢弃后，不再属于谁，找不到具体的负责者，特别是城市固体废物；②分散性，丢弃、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，危害人体健康；④错位性，一个时空领域的废物在另一个时空领域可能是宝贵的资源。

二、固体废物的来源

固体废物的种类繁多而且性质各异，为了便于固体废物的全过程管理，因此有必要对固体废物进行分类。固体废物有多种分类方法：按其产生来源可分为工业废物和生活垃圾等；按其污染特性可分为危险废物和一般废物等；按其组成可分为有机废物和无机废物；按其形态可分为固体废物、半固态废物和液态（气态）废物。

我国采用固体废物的来源及其性质相结合的方法对固体废物进行分类。在《中华人民共和国固体废物污染环境防治法》中，固体废物分为城市生活垃圾、工业固体废物和危险废物三类。

1. 城市生活垃圾

城市生活垃圾又称为城市固体废物，是指在城市日常生活中或为城市日常生活服务的活动中产生的固体废物，以及法律、行政法规中视作城市生活垃圾的固体废物。城市生活垃圾主要来自于城市居民家庭、城市商业、餐饮业、旅馆业、旅游业、服务业、市政环卫业、交通运输业、街道打扫垃圾、建筑遗留垃圾、文教卫生和行政事业单位、工业企业单位、水处理污泥和其他零散垃圾等。城市生活垃圾的成分复杂，主要包括厨余物、废纸、废塑料、废织物、废金属、废玻璃陶瓷碎片、砖瓦渣土、废旧电池、废旧家用电器等。影响城市生活垃圾成分的主要因素有居民的生活水平、质量和习惯、季节、气候等。

目前我国城市垃圾的分类主要是根据城市垃圾产生或收集来源进行分类，通常可分为：①家庭垃圾，是居民住户排出的包括厨余垃圾和纸类、废旧塑料、罐头盒、玻璃、陶瓷、木片等零散垃圾在内的日常生活废物；②庭院垃圾，包括植物残余、树叶、树杈及庭院其他清扫杂物；③清扫垃圾，指城市道路、桥梁、广场、公园及其他露天公共场所由环卫系统清扫收集的垃圾；④商业垃圾，指城市商业、各类商业性服务网点或专业性营业场所（如菜市

场、饮食店等)产生的垃圾;⑤建筑垃圾,指城市建筑物、构筑物进行维修或兴建的施工现场产生的垃圾;⑥其他垃圾,是除以上各类产生源以外场所排放的垃圾的统称。

另外,可根据处理处置方式或资源回收利用可能性,对城市生活垃圾简单分为可回收废品、易堆腐物、可燃物及其他无机废物等四大类,或者有机物、无机物、可回收物品三大类。

2. 工业固体废物

工业固体废物是指在工业交通等生产活动过程中产生的固体废物。按工业固体废物的产生行业划分,具有代表性的工业固体废物有冶金、能源、石油化学、矿业、轻工业固体废物。

(1) 冶金工业固体废物

冶金工业固体废物主要包括各种金属冶炼或加工过程中所产生的废渣,如高炉炼铁产生的高炉渣,平炉转炉电炉炼钢产生的钢渣,铜、镍、铅、锌等有色金属冶炼过程产生的有色金属渣,铁合金渣及提炼氧化铝时产生的赤泥等。

(2) 能源工业固体废物

能源工业固体废物主要包括燃煤电厂产生的粉煤灰、炉渣、烟道灰、采煤及洗煤过程中产生的煤矸石等。

(3) 石油化学工业固体废物

石油化学工业固体废物主要包括石油及加工工业产生的油泥、焦油页岩渣、废催化剂、废有机溶剂等,化学工业生产过程中产生的硫铁矿渣、酸渣、碱渣、盐泥、釜底泥、精(蒸)馏残渣以及医药和农药生产过程中产生的医药废物、废药品、废农药等。

(4) 矿业固体废物

主要包括采矿废石和尾矿,废石是指各种金属、非金属矿山开采过程中从主矿上剥离下来的各种围岩,尾矿是指在选矿过程中提取精矿以后剩下的尾渣。

(5) 轻工业固体废物

轻工业固体废物主要包括食品工业、造纸印刷工业、纺织印染工业、皮革工业等工业加工过程中产生的污泥、动物残物、废酸、废碱以及其他废物。

(6) 其他工业固体废物

其他工业固体废物主要包括机加工过程产生的金属碎屑、电镀污泥、建筑废料以及其他工业加工过程产生的废渣等。

3. 危险废物

危险废物是指列入国家危险废物名录或是根据国家规定的危险废物鉴别标准和鉴别方法,认定具有危险特性的废物,我国危险废物的相关标准主要包括《国家危险废物名录》和《危险废物鉴别标准》。危险废物的主要来源是工业固体废物,据估计,我国工业危险废物的产生量约占工业固体废物产生量的3%~5%,主要分布在化学原料和化学制造业、采掘业、黑色金属冶炼及压延加工业、有色金属冶炼及压延加工业、石油加工业及炼焦业、造纸及制品制造业等工业部门。城市生活垃圾的废电池、废日光灯、废弃日用化工产品以及医疗废物也是危险废物中不容忽视的一部分。

由于危险废物含有高度持久元素、化学品或化合物,具有毒害性、爆炸性、易燃性、腐蚀性、化学反应性、传染性、放射性等一种或几种危害特性,对人体健康和环境具有极大的直接或潜在危害,因此是固体废物管理、处置体系的工作重点。

第二节 固体废物的危害

固体废物对环境的危害不仅与固体废物的性质有关,还和其数量有关。任何固体废物,其量在一定数值以下,不会对环境产生危害,这个数值与固体废物的种类和性质有关。当固体废物的量达到一定程度时,就可能产生环境污染。城市生活垃圾集中堆放到一定量时,就会对堆放场周围的环境造成污染。除了量的因素以外,固体废物的性质也决定了固体废物的危害性。建筑垃圾属于无毒无害废物,量再大,也不会造成严重环境污染。废电池、废日光灯等,量可能不大,但任意丢弃在环境中,就会对环境造成严重污染和危害。因此,在进行固体废物处理时,必须准确掌握处理的量和度。过分强调所涉及的固体废物的毒性和造成一定污染的量,都可能会增加处理成本。

固体废物对人类环境的危害,表现在以下几个方面。

1. 侵占土地

固体废物需占地堆放,堆积量越大,占地越多。据估算,每堆积1万吨废渣约需占地1亩[●]。随着工农业生产的发展以及人们消费水平的增长,固体废物占地的矛盾日益尖锐。

2. 污染土壤

废物堆置过程中,其中的有害组分容易污染土壤。如果直接利用来自医院、肉类联合加工厂、生物制品厂的废渣作为肥料施入农田,其中的病菌寄生虫等就会使土壤污染。人与污染的土壤直接接触,或生吃此土壤上种植的蔬菜、瓜果,都有可能致病。污染土壤中的病原微生物以及其他有害物质,随天然降水径流或渗流进入水体后也可能进一步危害人的健康。

工业固体废物还会破坏土壤内的生态平衡。土壤是许多细菌、真菌等微生物聚居地。这些微生物形成了一个庞大的生态系统,在大自然的物质循环中,担负着碳循环和部分氮循环等重要任务。工业固体废物,特别是有害固体废物,经过风化、雨淋、产生高温、毒水或其他反应,能杀灭土壤中的微生物,使土壤丧失腐解能力,导致草木不生。

固体废物中的有害物质进入土壤后,还可能在土壤中积累。此外,来自大气层核爆炸实验产生的散落物,以及来自工业或科研单位的放射性固体废物,也能在土壤中积累,并被植物吸收,进而通过食物进入人体。

3. 污染水体

固体废物引起水体污染的途径有:随天然降水径流进入河流、湖泊,或因较小颗粒随风飘迁,落入河流、湖泊,污染地面水;随渗滤液渗透到土壤中,进入地下水,使地下水污染;废渣直接排入河流、湖泊或海洋,造成污染。

即使无害的固体废物,排入河流、湖泊,也容易造成河床淤塞,水面减小,水体污染,甚至导致水利设施效益的减少,甚至废弃。我国沿河流、湖泊、海岸建立的许多企业,每年向附近水域排放大量灰渣。仅燃煤电厂每年向长江、黄河等水系排放灰渣就达500万吨以上。有的电厂的排污口外的灰滩已延伸到航道中心,灰渣在河道中大量淤积,从长远看,对其下游的大型水利工程是一种潜在的威胁。

4. 污染大气

固体废物一般通过下列途径使大气受到污染。在适宜的温度和湿度下,经某些有机微生物

● 1亩=666.7m²,下同。

物的分解，固体废物释放出有害气体。固体废物中的细粒、粉末等受到风吹日晒，可以加重大气的粉尘污染，如粉煤灰堆遇到四级以上风力，可被剥离 1~1.5cm，灰尘飞扬可高达 20~50m；在大风季节，平均视程可降低 30%~70%。在运输和处理固体废物的过程中，也会产生有害气体和粉尘。此外采用焚烧法处理固体废物时如果不采取严格的尾气处理措施，其排放的废气会使空气严重污染。有的露天焚烧炉排出的粉尘在接近地面处的含量达到 0.56g/m³。

5. 影响环境卫生

工业废渣、垃圾在城市堆放，既有碍观瞻，又容易传染疾病。我国对城市垃圾、粪便常用的处理方法是施于农田。目前随着城市人口剧增，垃圾粪便排放量很大，据全国 300 个城市的统计，城市垃圾的清运量仅占产生量的 40%~60%，无害化处理率平均只有 1.6%，50%以上的垃圾堆存在城市的一些死角，98%以上的垃圾、粪便未经无害化处理进入环境，这些都将对人类健康产生潜在威胁。

第三节 固体废物的性质

城市固体废物的性质主要有物理性质、化学性质、生物化学性质以及感观性能。感观性能主要包括废物的颜色、臭味、新鲜或者腐败的程度等，往往可通过人的感观直接进行判断。下面将对前三种性质进行详细讨论。

一、固体废物的物理性质

垃圾的物理性质与垃圾的组成密切相关。组成不同，物理性质也不同。一般用组分、含水率和容重等三个物理量来表示城市垃圾的物理性质。

1. 物理组分

物理组分(%)常以湿基表示。但化验分析常用烘干垃圾，故物理组分也可用干基表示。当垃圾的含水量已知时，可用下式进行换算。

$$G = \frac{a(100 - W)}{100} \quad (1-1)$$

式中， G 为新鲜湿垃圾中某成分质量分数(%)； a 为烘干垃圾中同类组分的质量分数(%)； W 为垃圾的含水率(%)。

2. 含水率

含水率定义为单位质量垃圾所含水量，用质量分数(%)表示。其计算式为

$$W = \frac{A - B}{A} \times 100\% \quad (1-2)$$

式中， A 为新鲜垃圾(或湿垃圾)试样原始质量； B 为试样烘干后的质量。

垃圾的含水率主要随垃圾成分、季节、气候等条件的变化而变化，其变化幅度在 11%~53%之间(典型值 15%~40%)。据统计，影响垃圾含水率的主要因素是垃圾中动植物含量和无机物含量。当垃圾中动植物的含量高、无机物的含量低时，垃圾含水率就高；反之则含水率低。这种变化具有一定的规律，按其变化可得下式。

$$y = 0.67x + 12.38 \quad (1-3)$$

式中， y 为含水率； x 为动植物含量。同时垃圾含水率还受到收运方式(如不同收集容器、是小车收集还是集装箱、有无盖子、密封好坏等)等的影响。

3. 容重

垃圾在自然状态下，单位体积的质量称为垃圾的容重。容重法主要分析自然容重、标准容器容重、垃圾车容重等。垃圾自然容重是将垃圾自然堆成锥体，求其体积和质量，再求得垃圾的容重。将垃圾填满标准容积的容器，以这种方法求出的容重为垃圾标准容器容重。在垃圾运输过程中，测得垃圾车箱内的垃圾容重即为垃圾车容重。

二、固体废物的化学性质

固体废物的化学性质对于选择其处理与处置方法非常重要，表示固体废物化学性质的特征参数有挥发分、灰分、灰分熔点、元素组成、固定碳及发热值。

1. 挥发分

挥发分 (V_s) 是反映垃圾中有机物含量近似值的指标，以垃圾在 600°C 温度下的灼烧减量作为指标。测定步骤如下：先用普通天平称取一定量烘干试样 W_2 ，装入坩埚内，置于马弗炉内，在 600°C 下灼烧 2h，然后取出置于干燥器中冷却到室温，称重。计算式为

$$V_s = \frac{W_3 - W_4}{W_3 - W_1} \times 100\% \quad (1-4)$$

式中， V_s 为垃圾的挥发性固体含量 (%)； W_1 为坩埚质量； W_3 为烘干垃圾和坩埚质量之和； W_4 为灼烧残留量和坩埚质量之和。

2. 灰分及灰分熔点

灰分是指垃圾中不能燃烧也不挥发的物质，即灰分是反映垃圾中无机物含量的参数，常用符号 A 表示，其数值即为灼烧残留量 (%)，测定方法同挥发分，计算式为

$$A = (1 - V_s) \times 100\% \quad (1-5)$$

灰分熔点符号为 T_A ，熔点高低受灰分的化学组成影响，垃圾成分不同，则其灰分含量及灰分熔点也不同，主要取决于垃圾中 Si、Al 等元素含量的多少。

注意：亦有人将垃圾放入高温炉内灰化，以 $(815 \pm 10)^{\circ}\text{C}$ 灼烧到质量恒定，取其残留物质量所占试样原质量的百分数作为灰分。

3. 元素组成

元素组成主要指固体废物中 C、H、O、N、S 及灰分的百分含量。测知垃圾化学元素组成可估算垃圾的发热值，以确定垃圾焚烧方法的适用性，亦可用于垃圾堆肥化等好氧处理方法中生化需氧量的估算，所以，对选择垃圾处理工艺是很有必要。

垃圾的化学元素组成复杂，其测定方法亦很繁琐，需要用到常规的化学分析方法和仪器分析方法，有时还需先进的精密仪器。其中，C、H 元素联合测定常用碳氢全自动测定仪，全氮测定采用凯氏消化蒸馏法，全磷测定采用硫酸过氯酸铜蓝比色法，全钾测定采用火焰光度法，有些金属元素测定需要用到原子吸收光度法等精密仪器，故较之物理组成分析，垃圾化学元素测定难以普及。一般城市环卫系统较少进行这项工作。

国外有资料报道，采用元素分析法测定垃圾的化学组成其成分（质量分数）大致为：C 10%~20%；H 1%~3%；O 10%~20%；N 0.5%~1.0%；S 0.1%~1.2%；灰分 10%~25%；水分 40%~60%；热值约为 2930~5200kJ/kg。

4. 发热值

单位质量有机垃圾完全燃烧，在一定温度下反应到达最终产物时的焓变化，称为有机垃圾的发热值。根据燃烧产物中水分存在状态的不同又可分为高位发热值（液态水）与低位发

热值（气态水）。两者之差为水的气化潜热。城市垃圾的发热值对分析燃烧性能，判断能否选用焚烧处理工艺提供了重要依据。一般用氧氮量热计测量的是高位热值。

根据经验，当城市垃圾的低热值大于约 3350kJ/kg (800kcal/kg) 时，燃烧过程无需加助燃剂，即可实现自燃烧。

三、固体废物的生物特性

城市固体废物的生物特性可从两方面进行分析：城市固体废物本身的生物性质及对环境的影响；城市固体废物中不同组成进行生物处理的性能，即所谓可生化性。

(1) 由于垃圾成分的复杂性，尤其当包括人畜粪便、生活污水处理后污泥等易降解物质时，本身含有机生物体很复杂，其中有不少生物性污染物。城市垃圾中腐化的有机物含有各种有害的病原微生物，还含有植物虫害、草籽、昆虫和昆虫卵，易造成生物污染。

在生活污水污泥与粪便污泥中可发现很多病原细菌、病毒、原生动物及后生动物，尤其是肠道病原生物体，如典型的寄生物有阿米巴溶组织、各种线虫（如蛔虫、钩虫、血吸虫等），尤其是蛔虫卵在污水和污泥中广泛存在。另外还存在真菌生物体，其中的致病菌能在一定条件下传染到人体中引起疾病。

粪便对人体的最危险污染就是生物性污染，未经处理的粪便污染可进入水体，造成水体的生物性污染，有可能引起传染病的暴发流行并能传播多种疾病。据报道，70%的疾病是由于粪便没有无害化处理造成给水水体的生物性污染引起的。因此如何进行生物转化，使之稳定并消灭上述致病性生物体具有十分重要意义。

(2) 与废水处理类似，垃圾生物处理的可行性与其组成及微生物的生活条件有着密切联系，即城市垃圾中有机物质的可生物降解性能、生物处理过程微生物所要求的环境条件及营养物质是否得到满足，都关系到城市垃圾生物处理的可行性。

垃圾组成中含大量有机物，它能提供给生物体碳源和能源，是进行生物处理的物质基础。动植物界中的有机物大致可分为碳水化合物、脂肪、蛋白质。各类物质的生化分解速度及分解产物也有所不同。以对污泥厌氧消化为例：脂肪产气量最大，且产气中甲烷含量很高；蛋白质产气量较少，但产气中甲烷含量高；碳水化合物的产气量及甲烷含量均较低。但另一方面就分解速度而言，碳水化合物最快，其次是脂肪，蛋白质的分解速度最慢。城市垃圾中碳水化合物含量较多，且主要是纤维素，因其含大量的纸、布、蔬菜等。碳水化合物中，单糖、二糖类最容易被生物降解。多糖类中，淀粉极易分解，其分子组成为 $C_6H_{10}O_5$ ，纤维素较难分解，其分子组成为 $C_6H_{10}O_6$ ，木质素则更难分解。有研究报道，城市垃圾中淀粉含量较低，一般为 2%~6%，在堆肥化过程中分解速度快、降解彻底。与此相反，纤维素以相当慢的速度被微生物降解。试验结果表明，堆肥化不同阶段纤维素降解率如下：一次发酵中温阶段（反应的第 1~2d），降解率 7%~11.4%；高温阶段（反应的第 2~6d），降解率 30.7%~43.2%，一次发酵后期到二次发酵初期（反应的第 6~12d），降解率 4%~13%。即纤维素的总降解率为 34.7%~68.2%，且高温阶段纤维素降解率占总降解率的 63.3%~88.5%。

总之，明确要测定的城市垃圾组成，分析其生物处理可行性，是合理选择处理工艺的重要步骤，目前这方面的专门研究尚不多，可借鉴工业废水生物处理可行性方法，即通过测定废水 BOD_5 与 COD 的比值法和测定微生物的呼吸耗氧过程法来判断。若垃圾可生化性能较好，就可通过不同生物处理达到生物转化，以实现垃圾的无害化，消除对环境的有害影响。

第四节 固体废物的处理、处置及资源化技术

一、主要污染控制技术政策

固体废物污染的控制技术政策是固体废物管理的直接体现，固体废物管理思想是建立城市固体废物处理处置技术体系的原则。目前固体废物管理的思想的核心是“三化”原则，即无害化、减量化与资源化。只是不同国家不同发展阶段的固体废物管理的“三化”原则的侧重有所不同。

西方发达工业国家经历工业化进程后，资源和能源短缺问题日益突出，同时固体废物的管理、处理和处置技术有了长足发展。因此提出了“资源循环”口号，固体废物处理、处置也开始向“资源化”方向发展，走可持续发展的固体废物管理道路。

我国固体废物污染控制工作起步较晚，开始于 20 世纪 80 年代初期。由于技术力量和经费力度有限，近期内还不可能在较大范围内实现“资源化”。为此我国在总结国内外的经验基础上，提出了以“资源化”、“无害化”、“减量化”作为控制固体废物污染的技术控制政策，在一段时间内以“无害化”为主，随着经济、技术和管理体制的发展，逐步从“无害化”向“资源化”过渡。

1. 无害化

固体废物无害化处理的基本任务就是将固体废物通过工程处理，达到不危害人体健康，不污染周围自然环境（包括原生环境和次生环境）。目前，废物的无害化处理工程已发展成为一门崭新的工程技术。诸如垃圾的焚烧、卫生填埋、堆肥、粪便的厌氧发酵、有害废物的热处理和解毒处理等。但是对废物进行无害化处理时也必须看到无害化处理的通用性是有限的，它们的使用都有其局限性，如焚烧垃圾需要垃圾具有较高的热值，发酵需要垃圾有机物含量高；而且它们通常会产生二次污染，如填埋会产生渗滤液，污染地下水，焚烧会产生二噁英（dioxin）等致癌物质。

2. 减量化

固体废物的减量化任务主要是通过适宜的手段减小固体废物的数量和容积。这一任务的实现，需从两方面入手：一是对固体废物进行处理和利用；二是减少固体废物的产生。对固体废物进行处理和利用属于生产过程的末端，主要是通过各种手段使垃圾减少容积或质量，如生活垃圾采用焚烧法处理后，体积可减少 80%~90%，余烬便于运输和处置。同样压实、破碎等亦可达到减量化目的。

减少固体废物的产生，是从源头开始改进或采用新的生产工艺，尽量减少或不排废物，需从资源的综合开发和生产过程中物质资料的综合利用两方面着手。同时有必要通过政府颁布法律、法规以推广“3R”思想（减量，Reduce；再使用，Reuse；再生利用，Recycle），从量和质方面对生产、流通、消费等环节加以限制，减少垃圾的排放量。如可通过税收优惠，使再生包装材料的价格低于其他材料；或通过征收废物处置费，提高非再生包装材料的成本，从而提高再生包装的环保意识。

3. 资源化

固体废物资源化的基本任务是采取工艺措施从固体废物中回收有用的物质和能源。目前市场上垃圾处理和资源化的技术也是鱼目混珠，存在一些不切实际的概念，其中一个就是过分强调垃圾全部资源化利用，这是脱离实际的。

垃圾处理的最主要目标是治理环境污染，资源利用的前提也应以不造成二次污染为限度。如果以二次污染为代价，那么这种利用就是没有意义的。例如，对垃圾中的废塑料进行分选、清洗、造粒后出售，具有一定的经济效益，但是如果考虑清洗废水带来的二次污染，这种利用就不一定是经济的。在垃圾资源化过程中一定要避免污染转移。

垃圾资源化的产品不一定具有经济性，技术可行性并不代表经济上的可行性，还要确实考虑市场因素，盲目建设只会造成投资的浪费。

资源化的原则如下。①市场与收集相辅相成：只有确立了市场，才能收集并资源化；同时市场的确立要以再循环产品连续提供可接受的产品质量加以保证。②系统的经济性：主要指资源综合利用中系统的投入和产出的平衡，再生资源的处理、处置与再利用的平衡，一次资源与二次资源的经济性比较。③系统开发的技术可行性：这取决于科学和技术的发展。④系统设计的环境效益：如果产生严重的二次污染问题也是不可行的。

二、垃圾处理处置的主要方式

垃圾无害化处理方法主要有卫生填埋法、焚烧法、堆肥法、厌氧发酵法、热解和资源化综合处理法，同时还有一些不合格的堆放处理方法。无论是处理方法还是处置技术，固体废物处理与资源化都存在许多问题，目前国内的整个产业还处于发展之中，远未达到完善的程度。

1. 堆放法

这是一种无二次污染控制措施可言的垃圾处置方法。许多城镇直接把垃圾运输到一个临时堆放的场地，久而久之这个地方就成了垃圾堆放场。垃圾是一种极其复杂的废物，由于生物降解和化学作用，随着时间的推移会逐渐腐烂和生物降解，产生有严重危害的渗滤液，有爆炸可能性的沼气，不均匀的垃圾表面沉降，以及成分在不断变化的垃圾分解物。特别是渗滤液，污染物的浓度非常高，毒性也非常大。误喝 1mL 的渗滤液就足以使人出现严重中毒现象，如腹泻等。渗滤液渗透到地下水后，地下水的重金属和有毒有害有机物将严重超过国家标准，人或动物饮用后其健康会受到损害。沼气则容易在堆放场及周围四处迁移，很容易在某个地方积累到 5%~15% 的体积爆炸浓度范围，一旦遇到明火，就可爆炸。另外堆放场不用土壤对垃圾表面进行日覆盖，其周围臭气熏天，蚊蝇孳生，环境极其恶劣。因此对那些既无渗滤液收集和设施，也无沼气疏导和垃圾表面覆盖的堆放场，必须进行改造，使之达到卫生填埋场的标准。我国采用堆放法处置垃圾的比例正在逐步降低，目前大约占 70%。

2. 卫生填埋法

针对垃圾堆放法存在的严重弊端，英国和美国等国家率先采用卫生填埋法处置垃圾，其处理场地称为卫生填埋场。卫生填埋场的建造比较复杂。针对渗滤液渗透对地下水的污染，在卫生填埋场的底部和周围必须铺设高性能聚乙烯材料（HDPE）或其他有类似功能的材料，厚度在 1.5~2.5mm，同时在其上面还应铺设至少 0.5m 的黏土以防止垃圾对衬底材料的破坏。若采用黏土作衬底材料，其渗透系数也必须小于 10^{-7} cm/s，并且黏土厚度大于 2m。在衬层上面铺设集水和排水盲沟，使渗滤液能够及时排出垃圾堆体。排出的渗滤液必须进行有效处理后才能排至水体。

目前，我国有许多城市建设了卫生填埋场，如杭州、福州、南昌、深圳、广州、北京、厦门等。不过，也有许多城市仍然采用堆放法处置垃圾。卫生填埋场面临的最大挑战是渗滤液的低成本高效率处理问题；同时，一个不可避免的问题是：卫生填埋法把资源埋在地下，无法利用，是个严重的浪费。