

高等学校规划教材

固体废物处理 及污染的控制与治理

赵勇胜 董军 洪梅 编著



化学工业出版社

高等学校规划教材

固体废物处理 及污染的控制与治理

赵勇胜 董军 洪梅 编著



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书以固体废物的管理为框架,介绍了固体废物的基本性质、废物的收集和运输、固体废物的焚烧和堆肥化;重点介绍了城市垃圾的卫生填埋处理和已污染的垃圾填埋场污染的控制和恢复治理理论、方法和措施。具体特点有:全面、系统介绍固体废物处置与处理的卫生填埋方法、理论与实践,如“最终堆放理论”、“反应堆理论”等;此外,对填埋场防护系统的研究也是本书的特色;系统地介绍了固体废物填埋场地对环境污染的模拟预报、控制和治理的内容;充分结合科研成果,使之具有较强的实用性。

本书可供环境、水资源、生态、国土和资源等领域高等院校的师生,以及相关专业的技术人员和管理人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

固体废物处理及污染的控制与治理/赵勇胜,董军,洪梅编著. —北京:化学工业出版社,2009.1

高等学校规划教材

ISBN 978-7-122-03943-9

I. 固… II. ①赵…②董…③洪… III. ①固体废物-废物处理-高等学校-教材②固体废物-污染控制-高等学校-教材 IV. X705

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 165688 号

责任编辑:何丽 满悦芝
责任校对:王素芹

文字编辑:郑直
装帧设计:尹琳琳

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印刷:北京云浩印刷有限责任公司

装订:三河市宇新装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张13½ 字数332千字 2009年2月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:25.00 元

版权所有 违者必究

前 言

随着环境污染问题的加剧，固体废物对环境的污染越来越受到人们的关注，固体废物的处理与处置是经济社会可持续发展的重要内容之一。

固体废物问题的解决需要从减量化、无害化和资源化等方面进行全面、系统、综合的管理。从处理与处置方法来看，目前主要有卫生填埋、焚烧和堆肥。其中焚烧和堆肥处理对垃圾有特定的要求，如有机物含量、可燃物比例等。卫生填埋可以对所有的固体废物进行处置。许多学者认为：尽管存在着多种处理与处置方法，但固体废物的填埋处理在将来仍然是最为经济、方便和适用的处置方法，如发达国家 69%~73% 的城市垃圾是采用填埋方法处理的 (Frank Kreith, 1994)。目前，我国绝大多数城市的固体废物采用了填埋的方法，但由于种种原因，很多填埋场造成了周围环境和地下水的污染。

目前，我国对固体废物填埋处理的理论、方法以及填埋场地土壤、地下水污染的模拟预报和控制治理等方面的研究尚未广泛开展，在教学过程中急需开展这些方面的内容，以适应实际工作的需求。

针对我国城市垃圾对环境污染程度越来越严重的现状，我们较早地开展了城市垃圾卫生填埋方式、防护屏障以及填埋场地土壤和地下水污染的控制和恢复治理等方面的研究，承担并完成了国家自然科学基金、教育部优秀年轻教师基金、吉林省杰出青年基金、国土资源部研究专题和国际合作项目等，取得了一些成果。本书就是在上述研究成果的基础上，结合国内外新近研究成果编写而成。全书由赵勇胜、董军、洪梅编著，各章的执笔人为：第一章 (赵勇胜)、第二章 (董军)、第三章 (洪梅、赵勇胜)、第四章 (洪梅)、第五章和第六章 (洪梅、赵勇胜)、第七章和第八章 (董军、赵勇胜)、第九章 (赵勇胜)、第十章 (赵勇胜、董军)、第十一章 (赵勇胜、洪梅、董军)、第十二章 (赵勇胜)、第十三章 (赵勇胜、董军)、第十四章 (赵勇胜)。参加与本书内容相关科研工作的研究生有：张伟红、郑连阁、朱国营、何连生、李兵、史敬华、王蕾、陈延君、王昊、张文静、Henry Kibet Rotich、杨继东、周睿、宗芳、刘莹莹、韩融等。

自 1996 年，吉林大学每年为环境工程专业的本科生讲授“固体废物处理工程”专业课，并不断对讲义进行了完善。希望本书的出版能够在固体废物管理、填埋处理和污染场地的控制和恢复治理等方面的学习中有所帮助。

作 者

2008 年 8 月

目 录

第一章 引言	1
一、固体废物的概念	1
二、危险废物及其分类	1
三、固体废物造成的环境问题	2
四、固体废物处理现状	3
习题与思考题	4
第二章 城市固体废物的基本性质	5
第一节 固体废物的来源和分类	5
一、固体废物的来源	5
二、城市固体废物的分类	6
第二节 城市固体废物的组成	6
一、城市固体废物的组成	6
二、影响城市固体废物组成的因素	6
三、城市固体废物产量变化分析	8
第三节 城市固体废物的特性	9
一、城市固体废物的物理特性	9
二、城市固体废物的化学特性	10
三、城市固体废物的生物特性	11
习题与思考题	12
第三章 固体废物处理的现状及发展趋势	13
第一节 固体废物处理现状	13
一、发达国家城市固体废物处理现状 及发展	13
二、我国生活垃圾处理技术现状	15
第二节 生活垃圾处理技术比较	16
第三节 固体废物处理的发展趋势	17
习题与思考题	18
第四章 固体废物的收集、运输及预处理	19
第一节 固体废物的分类收集与运输	19
一、城市垃圾的收集与运输	19
二、危险废物的收集与运输	22
第二节 固体废物的预处理	23
一、固体废物的压实	23
二、固体废物的破碎	24
三、固体废物的分选	26
四、固体废物的固化	32
习题与思考题	33
第五章 固体废物的焚烧与热分解	34
第一节 固体废物的焚烧处理技术	34
一、焚烧处理废物的类型	34
二、焚烧处理技术的特点	34
三、城市生活垃圾的焚烧过程	35
四、影响固体废物燃烧的因素	35
五、焚烧处理技术指标	36
六、城市固体废物焚烧废气及污染控制	37
七、热能的再利用	39
八、焚烧设备	39
九、生活垃圾焚烧厂工艺	40
第二节 垃圾衍生燃料化技术	41
第三节 固体废物的热分解处理技术	42
一、热解的概念	42
二、热解的原理	42
三、典型固体废物——废塑料的热解	43
习题与思考题	44
第六章 城市固体废物的堆肥化技术	45
第一节 堆肥化概述	45
一、堆肥化及堆肥的概念	45
二、堆肥的作用	45
三、堆肥的原料	46
四、堆肥的质量及卫生要求	46
五、堆肥化的分类	47
第二节 好氧堆肥化	47
一、好氧堆肥化的原理	47
二、好氧堆肥化的类型	48
三、好氧堆肥化过程	48
四、好氧堆肥化工艺	49
五、影响好氧堆肥的因素	50

六、典型好氧堆肥化工艺	51	分解代谢	53
七、好氧堆肥化设备	52	三、厌氧堆肥化工艺类型	54
八、堆肥的腐熟度	53	四、影响厌氧堆肥化的因素	54
第三节 厌氧堆肥化	53	五、厌氧堆肥化装置	55
一、厌氧堆肥化过程	53	习题与思考题	56
二、厌氧堆肥化过程中有机物的			
第七章 固体废物的卫生填埋处理	57		
第一节 固体废物的填埋处理方法	57	第三节 填埋场气体及其处理	69
一、卫生填埋场及其结构	57	一、填埋场气体的组成和产生	69
二、填埋方式	58	二、填埋场气体的产量	70
三、危险废物的安全填埋	60	三、填埋场气体的产生速率	72
第二节 填埋场渗滤液及其处理	61	四、填埋场气体的迁移	72
一、渗滤液的组成与特征	61	五、填埋场气体的处理和综合利用	73
二、渗滤液的产生与控制	64	习题与思考题	74
第八章 城市固体废物填埋场的设计与建设	75		
第一节 填埋场选址	75	二、防渗层常用材料	95
一、填埋场的选址原则	75	三、天然防渗材料防渗机理	96
二、填埋场选址程序、方法及适宜性		四、固体废物填埋场的防渗系统	98
评价	76	第六节 防渗层可靠性评价	102
第二节 填埋场场地勘察	80	一、极限状态方程	102
第三节 填埋场环境影响评价	80	二、回归模型	103
一、卫生填埋环境影响评价研究现状	80	第七节 填埋场环境监测	104
二、填埋场环境影响评价	82	一、填埋场环境监测项目	104
第四节 填埋场设计	87	二、填埋场监测	104
一、设计内容及程序	87	三、地下水监测	104
二、城市固体废物填埋场的构成	88	四、地表水监测	105
三、填埋场主体结构设计	89	五、气体监测	106
第五节 填埋场防渗系统	95	六、最终盖层稳定性监测	106
一、防渗层及其功能	95	习题与思考题	106
第九章 固体废物的“最终储存”处置	107		
第一节 最终储存质量	107	三、污染物的衰减过程	110
第二节 包容方法	108	第四节 填埋场防护系统的天然防渗	
一、对防护层的要求	108	材料	111
二、对场地岩石地层的要求	109	一、天然防渗材料	111
第三节 冲淡-衰减方法	109	二、天然防渗材料的改性	111
一、设计思路与原则	109	第五节 存在的问题和未来研究趋势	122
二、对下覆地层的基本要求	109	习题与思考题	124
第十章 固体废物填埋处理的“反应堆”方法	125		
第一节 生物反应堆及其特点	125	第四节 渗滤液循环	133
一、生物反应堆理论	125	一、渗滤液循环	133
二、生物反应堆填埋场的特点	125	二、渗滤液循环处理的特点	134
第二节 反应堆方法的原理	126	三、渗滤液循环的主要方式	134
一、固体废物填埋场内部微生物作用		四、渗滤液循环室内实验	135
过程	126	第五节 生物反应堆处理的强化	136
二、填埋场垃圾的稳定化过程	128	一、粉煤灰对生物反应堆的强化	136
三、影响填埋场垃圾稳定化的因素	129	二、活性污泥对生物反应堆的强化	137
第三节 生物反应堆中污染物质的迁移		三、通风对生物反应堆的强化	138
转化	132		

四、生物反应堆的强化模拟实验	140	习题与思考题	144
第十一章 固体废物填埋场的环境污染	145		
第一节 填埋场防护系统	145	第二节 地表径流的排泄控制	150
一、吉林市生活垃圾填埋场的污染	146	第三节 填埋场最终盖层的破坏	151
二、长春市金钱堡生活垃圾填埋场的污染	146	第四节 填埋气体控制	151
三、北天堂垃圾填埋场的污染	149	第五节 填埋场的稳定性	152
		习题与思考题	152
第十二章 固体废物填埋场环境污染的风险评价	153		
第一节 确定性的水均衡模型	154	三、简单风险评价	158
第二节 相对危险性分级模型	155	四、综合风险评价	158
第三节 随机模拟模型	156	第五节 垃圾填埋场污染的风险评价	158
第四节 垃圾填埋场风险评价的层次递进方法	157	一、评分和筛析方法	158
一、问题识别	157	二、垃圾填埋场地下水污染风险评价	163
二、风险筛析	157	习题与思考题	166
第十三章 填埋场环境污染的模拟和预报	167		
第一节 污染质在地下环境中的运移	167	第三节 已污染填埋场地的地球化学环境	179
一、污染质在包气带中的运移	167	一、实验材料和方法	180
二、污染质在含水层中的运移	168	二、实验结果分析	180
三、地下水中污染质运移的弥散理论	168	第四节 地下水中污染质运移的评估及模拟预报	184
四、地下水中污染质运移的阻滞作用	171	一、地下水中污染晕扩展的评估	184
第二节 污染质作用的水文地球化学原理	172	二、地下水污染的数值模拟	184
一、水文地球化学概述	172	习题与思考题	187
二、络合作用与氧化还原作用	174		
三、吸附作用与溶解沉淀作用	177		
第十四章 填埋场地环境污染的控制与修复	188		
第一节 国内外研究现状	188	趋势	191
一、国内研究现状	188	六、地下水污染控制和恢复治理的基本原则	191
二、国外研究现状	188	第三节 实例研究	192
第二节 地下水污染的控制与修复方法技术	188	一、北天堂垃圾填埋场概况	192
一、地下水污染的异位处理方法	189	二、垃圾填埋场地污染地下水的强化自然衰减	193
二、地下水污染的原位处理方法	189	三、北天堂垃圾填埋场地下水污染的控制和修复	202
三、植物处理方法	190	习题与思考题	203
四、自然衰减方法	190		
五、目前地下水污染修复技术的发展			
参考文献	204		

第一章 引言

人口、资源和环境是人类所面临的三大问题。资源匮乏和环境污染已越来越受到人们的普遍关注，特别是由于人类生活、生产活动所产生的废气、废水、固体废物（“三废”）导致的严重的环境污染和生态恶化。对于废气和废水，人们很早就认识到其危害性，并对其造成的污染的控制和治理给予了高度重视。相对而言，人们对固体废物危害性的认识较晚，对环境造成污染的控制和治理的研究开展的也晚一些。

固体废物环境污染的研究涉及地质、水文地质、工程地质、环境工程、环境科学、生态学、地球化学、生物化学等多门学科，内容极为复杂。

一、固体废物的概念

1. 固体废物

固体废物（solid waste）主要指人类在社会生产、流通和消费等过程中产生的不具原始使用价值的废弃固体或半固体物质，包括一般性固体废物和极具危害性固体废物两种。根据美国环境保护局（EPA）的定义：一般性固体废物主要包括城市生活垃圾、污水处理过程产生的污泥以及工业、农业、商业、采矿等活动中所产生的固体、半固体甚至液体废物；极具危害性固体废物主要指具有放射性、易燃易爆性、毒害性、腐蚀性、传染性、化学反应性等固体废弃物。

2. 城市固体废物

城市固体废物（municipal solid waste, MSW）指在城市居民日常生活中或为城市日常生活提供服务的活动中产生的固体废物，不包括工业固体废物和农业固体废物。其主要来源于城市居民家庭、商业活动、服务业、园林、企事业单位、机关、学校等。

二、危险废物及其分类

我国危险废物（hazardous waste）是指列入国家危险废物名录或者根据国家规定的危险废物鉴别标准和鉴别方法认定的具有危险特性的废物。我国于 1998 年公布的危险废物名录中，共有 47 类危险废物，包括：医药废物、农药、有机溶剂、焚烧残渣等。

根据联合国的相关文件，把危险废物分成以下九个等级。

一级：爆炸性物质，主要指火药或含有火药的物质。它们可以通过自身的化学反应中发生的热、高压、高速气体的作用给周边环境带来危害。其代表物有 TNT、苦味酸、黑素金等物质。

二级：可燃气体，指温度为 21.1°C 时压力超过 2.8kgf/cm^2 (0.275MPa) 或温度为 54.4°C 时压力超过 7.3kgf/cm^2 (0.72MPa) 的物质。代表性物质有乙炔、液态氮等。

三级：易燃性液体或引火性液体，指有引火点的液体、液体混合物或含有引火点固体悬浮物的液体。代表性物质有汽油、挥发油、灯油、酒精等。

四级：可燃性物质，主要包括可燃性固体、自燃性固体和禁水性物质。

可燃性固体指在空气中容易燃烧或经摩擦可能着火的物质，代表性物质有红磷、硫

黄等。

自燃性物质指自燃发热或在与空气接触的过程中发热并容易引起火灾的物质，代表性物质有烷基苯、硫化钠、干椰子油等。

禁水性物质指与水反应时有可能自燃着火的物质或与水接触产生可燃性气体的物质，代表性物质有碳化钙、锂铝氢化物、氨基钠等。

五级：氧化性物质和有机过氧化物。氧化性物质指未必可燃，但通过放出氧，燃烧气体物质或有助燃功能的物质，代表性物质有硝酸铵、氯酸钾、过氧化钡等。

有机过氧化物的物质结构为—O—O—，一般认为是过氧化氢的诱导体，分子中的一个或两个氢原子可被有机基团置换下来。这种物质的热稳定性差，容易引起自燃，甚至爆炸，另外对摩擦和撞击比较敏感，代表性物质有过氧化苯酰等。

六级：易传播毒性和病毒的物质。有毒物质指如果喝、吸入或与皮肤接触时，容易引起人的死亡或伤害的物质。

易传播病毒的物质指能给动物或人体带来发病原因的或有其可能性的微生物或含有其毒素的物质。

七级：放射性物质，指放射能为 $0.002\mu\text{Ci/g}$ ($1\text{Ci}=37\text{GBq}$) 以上的物质。

八级：腐蚀性物质，指溢漏时会给生物组织或周边物质造成损伤的物质。

九级：其他危险性物质，指不属于其他分类，但有危险性的物质。

日本的废弃物处理法依据废物的危害性对危险废物做了如下规定：

(1) 易燃烧的废油 挥发油类、煤油类、轻油类；

(2) 有明显腐蚀性的废酸、废碱 废酸 pH 为 2.6 以下；废碱 pH 为 12 以上；

(3) 感染性废物 从医疗相关单位产生的含有或沾有感染性病原体的废物或有这种危险性的废物；

(4) 特定有害产业废物 如废 PCB 及受 PCB 污染的物质、废石棉等。

三、固体废物造成的环境问题

固体废物，尤其是极具危害性的固体废物的不合理处置将对空气、土壤、地表水和地下水等造成污染，甚至发生燃烧、爆炸等直接影响附近居民生命和财产安全的事故。如美国处理中低放射性固体废物的 Hanford 填埋场，由于封装废物的储存罐泄漏，渗滤液通过防护层直接进入土壤和地下环境，对其周围的土壤、植被和水资源造成了严重污染，致使附近农场的牛奶中放射性元素的含量较高。因此，对于极具危害性的固体废物，其处理与处置应十分慎重，否则会带来严重的后果。

一般性固体废物比较常见，而且数量庞大，特别是城市垃圾。据报道，发达国家每人年生产垃圾约 3.5t，发展中国家约 1.3t，全世界每年新增垃圾约 $(80\sim 100)\times 10^8\text{t}$ 。据 1985 年资料，美国年产生约 $1.5\times 10^8\text{t}$ 生活垃圾，垃圾处理场已达 5 万多个，占地总面积大于 $1.18\times 10^4\text{km}^2$ 。据 1978 年美国环保局 (EPA) 的资料显示，美国近一半的垃圾填埋场对水体有污染。据 1989 年统计，美国 50 个州中，有 100 个固体废物填埋场地需要特别注意的州有 11 个；有 100~1000 个填埋场地需要注意的州有 32 个；超过 1000 个填埋场地需要注意的州有 7 个。在其他国家，由固体废物造成的严重环境污染事故也时有发生，如南非的 WATERVAL 河谷填埋场污染了下游 2km 多范围的地下水；又如英国德贝夏郡的 LOSCOE 填埋场在 1984 年封闭后，附近街区就出现了树木死亡、土壤变热和干裂、草坪枯死以及产

生难闻气体等一系列异常现象，两年之后，填埋场产生的甲烷引发爆炸事故，导致距填埋场70m之外的民宅被毁，人员受到伤害。而因填埋场渗滤液泄漏污染土壤和水体（尤其是地下水）的事故则更为频繁。

在我国，有三分之二的城市在20世纪末就已经形成了“垃圾包围城市”的严重局面。而且大多数城市的垃圾填埋场没有经过科学合理的设计和防护处理，有的甚至露天堆放或简单掩埋，不仅侵占了大量的近郊土地，还造成蚊蝇滋生、周围树木枯死、植被退化、土壤干裂、地表水和地下水受到严重污染等许多生态环境问题，严重影响了附近居民的生产、生活和健康，影响了城市的环境质量和可持续发展。目前，我国的城市垃圾年产量已达 $1.2 \times 10^8 \text{ t}$ 左右，而且还在以每年8%左右的速度增长（2002年）。根据2002年的调查（王翊虹等），北京市及周边共有不同规模的垃圾填埋场476个，其中有104个已经停止使用；在372个正在使用的垃圾填埋场中，只有14个是卫生填埋场，其余358个为直接堆放或简单掩埋，如北天堂垃圾填埋场，没有任何工程防护措施，城市垃圾直接倾倒在原永定河河床采砂坑内，致使地下水受有机物、氮、硬度和矿化度等的污染，污染面积已超过了 1 km^2 ，严重影响了地下水的正常使用。又如北京郊区的另一座垃圾堆放场，位于河流冲积层沉积物之上，垃圾直接堆放于砂石坑内，甲烷气体通过砂石层向上运移，于1995年发生两次爆炸并引发火灾，造成多人被烧伤。另外，大庆市的生活垃圾填埋场也曾发生过燃烧，大火持续了十几个小时。因此，可以预见，随着经济的发展和人们生活水平的不断提高，城市固体废物的产量将迅速增加，如何处理数量庞大的城市固体废物是关系我国经济可持续发展、水资源和环境保护的重大问题。

四、固体废物处理现状

固体废物的处置是一个十分复杂的问题，是一个系统工程，它涉及管理科学和工程技术等多个方面。城市固体废物的处置方法主要有焚烧、堆肥和卫生填埋等。焚烧和堆肥要求固体废物中的可燃物达到一定的比例或有一定数量的有机组分，而卫生填埋则适合于处理各种类型的固体废物。这三种处理方法在国内外都有应用，但不同的国家根据自己的实际情况，如城市垃圾的特点、经济发展水平、土地使用状况等，所采用的处理方法有所不同，但总体来看，大多数国家以卫生填埋法为主。

关于城市固体废物科学处理与处置问题的研究，国际上是在最近几十年才开展起来的，如德国在20世纪70年代以前，其城市固体废物的处置基本上没有规则，对生活垃圾堆放场地点的选择主要以距离近、运输方便等为基本原则，并未考虑其对周围环境的污染和对附近居民生活的影响等问题，因此，居民区周围和城郊附近的垃圾堆随处可见。这一时期的垃圾堆已经给环境带来了严重的污染，治理任务至今仍很繁重。从20世纪70年代开始，发达国家的固体废物处置逐渐从简单堆放发展到具有一定工程防护措施的卫生填埋，现在的垃圾填埋处置已发展到对固体废物、填埋场气体（LFG）、垃圾渗滤液等进行监测和控制，以避免其对周围环境，特别是地下水、地表水和大气造成污染。近些年来，垃圾填埋污染场地和污染地下水的恢复和治理问题是水资源和环境工程学中一个新的研究领域，是环境和水资源学者研究的前沿和热点。发达国家已经在这方面开展了大量的研究工作和实践，如水动力场控制、微生物降解、工程防护等；我国在这方面的研究还比较欠缺。

我国目前固体废物处理的主要方法是卫生填埋处理，此外还有少量的焚烧、堆肥处理设施。对于城市垃圾卫生填埋技术和垃圾污染场地的恢复治理问题尚未开展系统的研究，远不

能满足环境、水资源保护的要求。目前，我国的垃圾填埋场主要存在以下几个问题：首先，许多城市的固体废物随意倾倒，形成了“垃圾包围城市”的态势，严重影响市郊居民的生活和健康；其次，现存的大部分城市垃圾填埋场未经过科学的选址，也未采取科学的设计和工程防护措施，造成了周围土壤、地下水和地表水的严重污染；再次，我国对固体废物填埋场地的污染状况尚不十分清楚，缺少足够的监测资料，对污染场地的控制和恢复治理更加欠缺；最后，对于新垃圾填埋场的建设没有制定明确的、可操作的法律法规，包括填埋场的设计、运行、管理及封闭后的污染监测等。实际上，我国城市垃圾填埋达到卫生填埋标准的较少，大多数是把垃圾运到指定地点直接堆放，然后进行简单的封边、压实和掩埋处理，并没有严格地按照卫生填埋的原则、标准和要求进行操作，所以对周围环境构成了较大的威胁。

综上所述，我国急需研究建立安全有效的固体废物处理与管理的策略和方法，制定完善的垃圾填埋场建设、运行、管理和污染监测等的原则、标准和法律法规。缓解或避免固体废物对环境、水资源的污染，对垃圾污染场地的模拟预测和恢复治理等是环境工作者当前刻不容缓的任务。

习题与思考题

1. 什么是固体废物？什么是城市固体废物？
2. 固体废物带来了什么样的环境问题？
3. 与废水和废气相比，固体废物污染环境的特点是什么？

第二章 城市固体废物的基本性质

第一节 固体废物的来源和分类

一、固体废物的来源

固体废物的来源很多，包括居民、商业、机关单位、建筑业、城市服务业、水处理厂、工业、农业等。表 2-1 列出了固体废物的来源和类型。

表 2-1 固体废物来源和类型

来 源	典型设施、活动或场所	固体废物类型
居民区	家庭、公寓、单元套房、街区	食品废物、纸、纸板、塑料、纺织品、庭院废物、木料、玻璃、金属、特殊废物(如家电、电池等)、家庭危险废物
商业	商店、饭店、市场、写字楼、旅店、打印社、服务站、汽车修理店等	食品废物、纸、纸板、塑料、木料、玻璃、金属、特殊废物(同上)、危险废物
机关	学校、医院、大学、监狱、政府	同上(商业)
建筑	建筑工地、修路、建筑拆除	木料、钢铁、混凝土、泥土等
市政服务(不含水处理厂)	街路清扫、景观美化、公园和海滩等娱乐场所、河床清理等	垃圾、街道扫集物、干草、园艺修剪物、公园和海滩等娱乐场所产生的普通废物等
水处理厂	水、废水、工业处理过程	处理厂废物,主要是污泥
城市固体废物	上述全部	上述全部
工业	建筑、制造、轻重工业、精炼厂、化工厂、发电厂等	工业废物主要是废原料等;非工业废物包括食品废物、垃圾、灰、建筑垃圾等;特殊废物、危险废物
农业	农田、果园、畜牧厂、猪舍、农场等	腐败的食品废物、农业废物、垃圾、危险废物等

来源：Tchobanoglous (1993)。

固体废物根据不同的来源在英语里用不同的术语表达：

solid waste（固体废物），也称 refuse（废弃物），是总称。

garbage（饮食垃圾）指的是在食品加工处理、准备和烹饪的过程中产生的动物和蔬菜废弃物，不包括罐头、屠宰场等食物加工处理过程中产生的废物，主要来源于居家厨房、仓库、市场和饭店等。

rubbish（垃圾）由来自于居家、仓库和公共机构的可燃性和不可燃性固体废物组成，它不包括饮食垃圾。

trash 通常是指 rubbish 的亚类，主要包括可燃性废物和不可燃性废物。可燃性废物由纸、破布、木头、树枝等组成；不可燃性废物指不能在 700～1100℃ 燃烧的物质，如锡罐、玻璃、灰和土壤等。

居家和商业固体废物（不包括特别废物和危险废物）主要由来自于居民区和商业设施的有机和无机固体废物组成。典型有机废物包括食物废物、纸板、塑料、纺织品、木料、庭院废物等；无机废物包括玻璃、金属及泥土。能迅速分解的废物，如食物，称之为易腐烂

废物。

二、城市固体废物的分类

城市固体废物的分类方法很多，如按源地分类、可燃性分类等。

1. 按源地分类

家庭垃圾：居民住宅、旅馆、饭店等产生的垃圾属此类；

食品垃圾：食品买卖、储存、加工及其他过程中产生的残渣；

零散垃圾：城市居民在各种场合抛弃在废物箱的固体垃圾，包括旧家具、电器等；

市场垃圾：商店、市场等处产生的非生产性废物，其主要成分是包装材料、采暖残渣、办公室废物以及市场销售的剩余物品；

街道扫集物；

医院垃圾：应集中收集、单独处理；

建筑垃圾；

粪便污水。

2. 按可燃性分类

易燃固体废物：包括纸屑、木、竹、稻草等；

难燃固体废物：塑料、橡胶、皮革等；

不燃固体废物：金属、玻璃、砖瓦、灰土等。

此外，还有许多其他分类方法，如按化学组成可分为有机废物和无机废物；按热值分为高热值废物和低热值废物；按危害状况分为一般废物和有害废物；元素分类法（根据固体废物的化学成分分类）；重量分类法（根据固体废物的轻重分类）等。

对城市固体废物进行科学分类，有助于对其进行科学的管理和处置。欧洲国家对固体废物的类型及其管理和控制都制定了详细的法律规定。如英国的《污染和环境保护法》定义了“控制性固体废物”，并对其进一步细化，如居家废物、商业废物和工业废物等，同时对不同类型的废物都有具体的控制和管理规定。

第二节 城市固体废物的组成

一、城市固体废物的组成

城市固体废物的组成比较复杂，它随地理条件、气候条件、城市发展规划、能源结构、经济发展程度、居民生活习性和生活水平等的不同而不同。因此，各国、各城市甚至各地区的固体废物的组成都有可能不尽相同。一般来说，发达城市或地区的固体废物中有机物含量相对较高，而无机物含量相对较低。表 2-2 为发达国家典型城市固体废物的组成，表中没有考虑工业固体废物的存在和居民生活垃圾中有毒的化学废物如油漆、清洗剂、杀虫剂等容器残留物的影响。

二、影响城市固体废物组成的因素

城市固体废物的组成主要受地理条件、城市发展规划、能源结构、居民生活水平、居民生活习惯的影响。近些年来，随着我国经济的飞速发展和人们生活水平的不断提高，我国城市固体废物的产量急剧增长，组成成分也发生了较大的变化，主要表现为有机物含量增加、可燃物增多、可回收利用价值增大。

表 2-2 城市固体废物的组成（质量百分含量）

单位：%

废 物 组 成	美 国			澳大利亚(悉尼)
	范 围	典 型 值	加州 Davis 市	典 型 值
有机物				
食品废物	6~18	9.0	6.0	27.5
纸	25~40	34.0	33.1	15.2
纸板	3~10	6.0	7.9	5.6
塑料	4~10	7.0	10.7	7.6
纺织品	0~4	2.0	2.4	2.3
橡胶	0~2	0.5	2.5	0.6
皮革	0~2	0.5	0.1	
庭院废物	5~20	18.5	17.7	20.5
木料	1~4	2.0	5.0	0.6
其他有机物	—	—	0.4	0.6
无机物				
玻璃	4~12	8.0	5.8	9.3
金属罐	2~8	6.0	3.9	5.3
铝	0~1	0.5	0.4	0.3
其他金属	1~4	3.0	3.6	
泥土、灰等	0~6	3.0	0.5	3.6

注：根据 Tchobanoglous 等综合而成。

1. 城市能源结构对城市固体废物组成的影响

城市燃料的消费结构是影响城市固体废物组成的一个重要因素。城市燃煤区固体废物中的无机组分含量明显高于燃气区，而有机组分和可回收废物的比例明显低于燃气区。随着我国经济的不断增长，城市燃气的普及率（以使用人口计）由 1986 年的 28.52% 增加到 1995 年的 70%，集中供热普及率由 1995 年的 20% 增加到 2000 年的 30% 左右，部分经济发达地区达到 45%，因此，我国城市固体废物中有机组分的含量总体上有逐渐上升的趋势。

2. 居民生活水平和消费结构对城市固体废物组成的影响

居民的生活水平、生活方式对城市固体废物的组成具有明显的影响。如从 1953 年到 1992 年英国生活废物的组成发生了较大的变化：灰渣含量由 60% 降低到 5% 左右，纸和食品废物分别由 7% 和 3% 增加到 30% 和 35%。这些变化与居民生活水平的提高和生活方式的改变有着密切的关系。

随着我国人民生活水平的不断提高，城市固体废物组分的含量也发生了相应的变化。总的来说，煤渣的含量持续下降，而易堆腐废物和可回收利用废物的含量不断增长。例如，杭州市 1996 年生活废物中煤渣、灰土等无机组分的含量比 1985 年下降了 39%，而易堆腐废物含量增加了 52%。另外，同一城市的不同地区，固体废物组分的含量也不尽相同，一般情况下，高级住宅区固体废物中可回收利用的废物，如塑料、纸类、金属、玻璃等的含量明显高于普通住宅区；工业区固体废物中无机物的含量普遍高于住宅区。

另外，随着居民生活水平和消费观念的变化，商品包装业在近些年得到了迅速发展；一次性使用商品广泛应用于宾馆、餐饮等各个行业。商品的包装材料和一次性使用商品的废弃，造成固体废物数量的急剧增长和组分的变化。

3. 管理策略的变化对城市固体废物组成的影响

随着国际上更多的国家固体废物减量和循环利用计划的实施，城市固体废物的数量和组

成将会发生一定的变化。

三、城市固体废物产量变化分析

城市固体废物的产量和组成是进行固体废物管理与处置的重要依据。因此，对城市固体废物的产量及其变化趋势进行预测具有重要意义。影响固体废物产量的因素主要包括内在因素（人口、居民生活水平、城市建设水平等）、社会因素（社会行为准则、社会道德规范、法律、规章制度等）和个体因素（人类本身的行为习惯等）。可以利用已有的数据资料来估算固体废物的产量和变化情况。表 2-3 为长春市城市固体废物的产生量，其中工业固体废物主要为粉煤灰、炉渣、煤矸石、冶炼废渣等。可以根据已有的多年资料进行未来年份固体废物产量的估算。

表 2-3 长春市城市固体废物产生量 单位：万吨

年 份	1996	1997	1998	1999	2000
生活垃圾	89	90	100.5	105.3	106
工业废物	141.92	184.67	170.7	146.57	148.75

（一）根据已知资料进行推算

根据已知的或估算的人均固体废物年产量 $[kg/(人 \cdot a)]$ 及其增长率和人口预测数计算未来固体废物的平均年产量。推算公式如下：

$$W[kg/(人 \cdot a)] = W_0(1+r)^n \tag{2-1}$$

式中 W_0 ——基准年份（一般为最近年份）的实际产量；

r ——年平均递增率；

n ——预测年份。

用这种方法预测固体废物的产量有一定的局限性，主要有以下几个原因：

- ① 实际年增长率受多种因素的影响，通常开始增长较快，而后速度逐渐减慢，不一定呈线性变化关系；
- ② 年平均递增率（ r ）常受经济增长速度、城市发展水平与人口数量变化以及城市煤气化率突变性等的影响；
- ③ 近年来，提倡净菜上市、食品行业包装材料革新等因素也会影响城市固体废物年增长率的变化。

（二）数理统计法

1. 线性、非线性回归法

利用已有的多年系列资料建立城市固体废物产量与时间的一元线性回归方程，或非线性回归方程进行城市固体废物产量的预测，具体形式如下：

$$Y = a + bT \tag{2-2}$$

$$Y = ae^{bT} + c \tag{2-3}$$

式中 Y ——城市垃圾的产量；

T ——预测年份；

a, b, c ——回归系数。

2. 多元回归分析法

由于影响城市固体废物产量变化的因素很多，如人口密度、能源结构、地理位置、季节

变化、生活习俗（如食品结构）、经济状况、废品回收利用率等，因此建立城市固体废物产量预测模型时应考虑多个因素，具体方程如下：

$$Y=F(\text{人口密度、能源结构、地理位置、季节变化、生活习俗、经济状况、废品回收利用率等}) \tag{2-4}$$

这种方法要遵循连贯性和类推两条原则。连贯性就是指所研究的对象始终按照一种规律发生和发展，事物发展的过去、现在和将来无任何不同；类推是指所研究事物的某种稳定结构及其变化遵循一定的规律，可以根据这个规律类比过去和现在，预测未来。

第三节 城市固体废物的特性

城市固体废物的性质主要包括物理、化学、生物化学和感官性能等方面。感官性能主要指的是固体废物的颜色、气味、新鲜或腐败程度等，一般可通过感官直接作出判断。下面主要详细介绍前三种性质。

一、城市固体废物的物理特性

城市固体废物的物理性质主要包括密度、含水率、颗粒大小及分布情况、持水度和孔隙度等。城市固体废物的物理性质与其组成有直接的关系。

1. 密度

密度是单位体积的重量，用 kg/m^3 表示。固体废物的密度因其组成、压实程度、分解程度等的不同而不同，填埋场内的固体废物密度还随日覆盖层和填埋废物总厚度的变化而变化。另外，在填埋场内，由于填埋场气体的产生和固体废物的降解，质量损失明显，其密度也随时间变化。

在估算固体废物的总质量和体积时，密度是很重要的。例如，松散固体废物的平均密度是 115kg/m^3 ，被压实后密度变为 $235\sim300\text{kg/m}^3$ 。

城市固体废物的密度可以指松散时的密度，也就是装在固体废物箱中未被压实时的密度（表 2-4），也可以指压实后的密度，因此要说明固体废物的密度时必须说明其存在的状态（表 2-5）。固体废物的密度不仅随存在状态（松散的还是压实的）而变化，还随地理位置、季节、储存时间等而变化。例如，从边远地区收集来的固体废物，由于在运输过程中会有一定程度的压实，其密度相对较大；在秋季，固体废物中的枯叶、干草等比夏天多，其密度相对较小；固体废物储存时间越长，由于自身的沉降和压实，其密度相对较大。另外，固体废物的压实密度受含水率的影响较大，如有报道城市垃圾填埋场中固体废物的密度可高达 1900kg/m^3 ，而一般生活垃圾填埋场中固体废物的密度为 $500\sim1000\text{kg/m}^3$ 。

表 2-4 未压实废物典型密度（美国）

组 分	食品废物	纸	塑料	花园修剪物	玻璃	含铁金属
密度/ (kg/m^3)	288	81.7	64	104	194	320

2. 含水率

含水率就是单位质量垃圾的含水量，通常用百分数（%）表示，在讨论密度、压实程度、水分等在垃圾稳定化过程中的作用、焚烧效率等时，含水率是非常重要的参数之一。其计算式为：

表 2-5 垃圾压实情况与密度关系

生 活 垃 圾	密度/(kg/m³)		生 活 垃 圾	密度/(kg/m³)	
	范 围	典型值		范 围	典型值
压缩的普通垃圾	90~180	130	填埋场中良好压缩垃圾	600~740	600
未压缩的园林废物	60~150	100	加工后压缩成型	600~1070	710
未压缩的炉灰	650~830	740	粉碎但未压缩的垃圾	120~270	210
经运输车压缩的垃圾	180~440	300	粉碎但已压缩的垃圾	650~1070	770
填埋场中正常压缩垃圾	360~500	440			

$$W=(A-B)/A\times100\%$$
 (2-5)

式中 A——新鲜垃圾（原湿垃圾）样品的原始质量；

B——105℃烘干后的质量。

垃圾的含水率随组成、季节、气候、运输方式（如不同收集容器、有无盖子、密封是否良好等）等因素的变化而变化。据调查，垃圾的含水率主要与垃圾中动植物和无机物的含量有关，动植物含量高、无机物含量低时，含水率就高，反之则低。而且，这种变化遵循一定的规律，如表 2-6 按其变化可得出如下动植物含量和含水率之间的线性关系：

$$y=0.67x+12.38$$

式中 y——含水率；

x——动植物含量。

表 2-6 垃圾中动植物含量与含水率关系

动植物含量/%	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
含水率/%	12.38	15.73	19.07	22.42	25.77	29.11	32.46	35.81	39.15	42.84	45.84
动植物含量/%	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	
含水率/%	49.19	52.54	55.83	59.23	62.58	65.92	69.27	72.62	75.96	79.31	

3. 持水度

城市固体废物的持水度是指重力作用下固体废物样品中保持的总水量。持水度对固体废物来说也是个关键参数，因为当水分含量大于废物的持水度时，就形成垃圾渗滤液。垃圾渗滤液是垃圾填埋场的主要问题。持水度随压实程度和固体废物的稳定化程度而变化。一般居民区和商业来源的未经压实的混合废物的典型持水度值在 50%~60%之间。

4. 压实固体废物的渗透性

压实固体废物的渗透系数是评价填埋场废物的重要物理参数，它决定着垃圾填埋场中渗滤液和气体的运动。渗透性受固体废物的其他性质影响，主要包括孔隙大小、分布，比表面积和孔隙度等。

二、城市固体废物的化学特性

固体废物的化学性质对处理方法的选择起着重要作用，特别是在固体废物焚烧、能量回收时尤为重要。其中重要的特性有近似分析、灰分熔点、元素分析及能值等。元素分析在确定养分的有效性时比较重要。

1. 近似分析

近似分析主要包括 4 个方面，即湿度（在 105℃加热 1h 后的水分损失量）、挥发性可燃组分含量（在 950℃封闭燃烧后的质量损失）、固定碳（除挥发性组分外的可燃剩余物）和