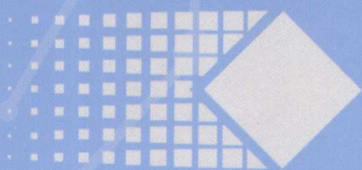


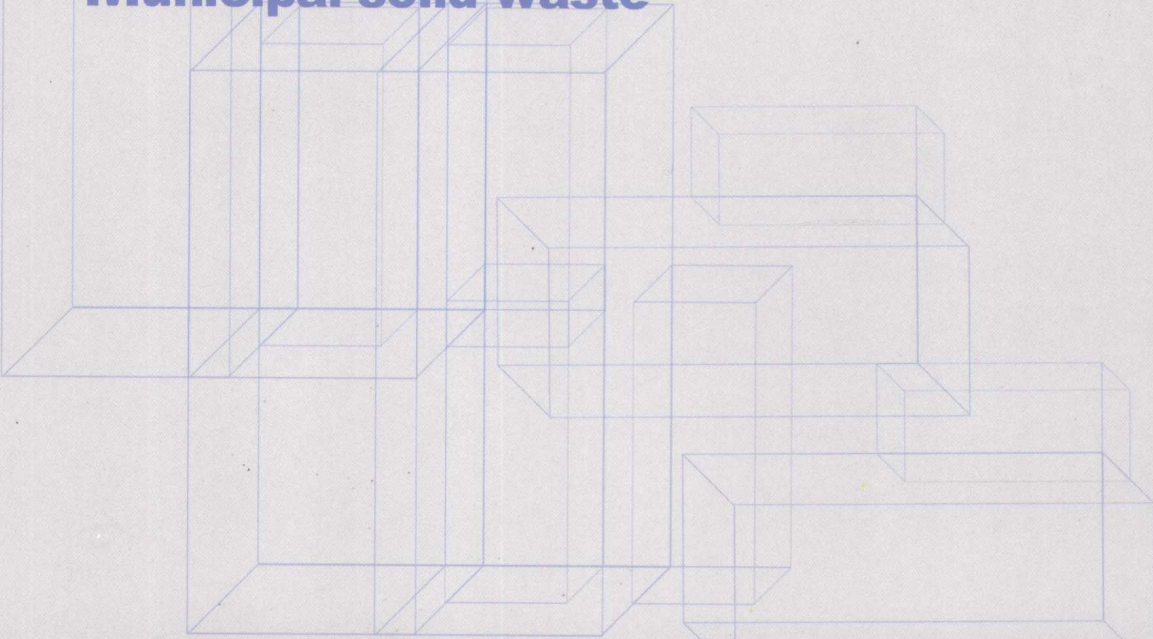
魏自民 席北斗 赵越 著



生活垃圾 微生物强化堆肥技术



Microorganism inoculation
composting of
Municipal solid waste



中国环境科学出版社

生活垃圾微生物强化堆肥技术

魏自民 席北斗 赵 越 著

中国环境科学出版社·北京

图书在版编目 (CIP) 数据

生活垃圾微生物强化堆肥技术/魏自民, 席北斗, 赵越
著. —北京: 中国环境科学出版社, 2008.7

ISBN 978-7-80209-755-1

I. 生… II. ①魏…②席…③赵… III. 生活—
垃圾—堆肥—技术 IV.S141.9

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 095221 号

责任编辑 黄晓燕
责任校对 刘凤霞
封面设计 中通世奥

出版发行 中国环境科学出版社
(100062 北京崇文区广渠门内大街 16 号)
网 址: <http://www.cesp.cn>
联系电话: 010-67112765 (总编室)
发行热线: 010-67125803

印 刷 北京市联华印刷厂
经 销 各地新华书店
版 次 2008 年 7 月第 1 版
印 次 2008 年 7 月第 1 次印刷
开 本 787×1092 1/16
印 张 20
字 数 450 千字
定 价 42.00 元

【版权所有。未经许可请勿翻印、转载, 侵权必究】

如有缺页、破损、倒装等印装质量问题, 请寄回本社更换

前 言

随着社会经济的发展、城市化进程的加快、城镇人口的增加以及人民生活水平的提高,生活垃圾的产生量也在不断地增加。目前,全国城镇生活垃圾产生量约为 1.9 亿 t,其中只有约 7 500 万 t 得到处理,其余 1.15 亿 t 的城镇生活垃圾都被集中或分散倾倒在环境中,即使得到处理的垃圾,仍然没有消除其对环境的影响。从资源学的观点看,生活垃圾也是资源,而且是当前世界上唯一不断增长的潜在资源。因此,在充分意识到生活垃圾对环境巨大压力的同时,还应该了解生活垃圾所存在的巨大资源和经济价值。堆肥处理是实现生活垃圾无害化、减量化、资源化的重要手段之一,国内外在垃圾堆肥处理领域已经开展了许多工作,并取得了一些成果。但总的来说,目前垃圾堆肥处理领域仍大量应用传统工艺,存在技术水平低下、处理效率不高、产品质量不可靠等一系列的问题。

本书研究成果是在国家重点基础研究发展 973 计划课题 (No.2005CB724203)、“十一五”国家科技支撑计划项目课题 (No.2006BAC06B04, No.2007BAC16B03)、农业科技成果转化资金项目 (No.2006GB24420465, No.2007GB24420459)、黑龙江省教委课题 (No.10551041)、哈尔滨市基金项目 (No.2005AFXXJ043)、东北农业大学博士基金项目等联合资助下完成的,同时也参考并收录了大量国内外相关专家学者专著或论文的最新内容,作者也从中获得了很大的教益与启发,在此谨向他们表示衷心的感谢。

本书分三篇共计 19 章,其中基础篇(第 1 章至第 6 章)针对生活垃圾产生特性、堆肥资源化处理技术进行了深入分析,系统总结了国内外堆肥处理工艺技术及设备现状,并对堆肥中的过程控制技术进行了详细阐述;研究篇(第 7 章至第 12 章)概括了多年来作者在生活垃圾堆肥资源化领域的实验室模拟研究成果,系统阐述了堆肥高效微生物的筛选与组合技术、微生物接种工艺技术,同时对堆肥反应速率的影响因子、堆肥反应过程模拟和反应动力学等也进

行了有益的探讨；实践篇（第 13 章至第 19 章）根据多年来作者在生活垃圾工厂化堆肥技术服务和实践，结合微生物强化技术，阐明了堆肥过程中有机物质转化规律，探讨了堆肥过程对难溶性磷转化的影响，并对堆肥产品的施肥效果进行了系统评价。本书内容深入浅出，图文并茂，阅读群体较为广泛。

编著本书的主要人员和分工是：第 1 章至第 6 章（东北农业大学，赵越博士），第 7 章、第 9 章至第 11 章（中国环境科学研究院，席北斗博士），第 8 章（东北农业大学，赵越博士、李鸣晓硕士），第 12 章（中国环境科学研究院，许其功博士），第 13 章（中国农业大学，王世平教授），第 14 章（北京化工大学，姜永海博士），第 15 章至第 19 章（东北农业大学，魏自民博士）。全书由魏自民、席北斗完成统稿及校稿工作。

本书是多年来著者在生活垃圾堆肥资源化领域研究与实践的结晶，但还有许多研究工作需要不断的补充和完善。限于著者水平和经验有限，书中仍难免有不妥甚至错误之处，在此恳请读者不吝指教。

著 者

2008 年 1 月于东北农业大学

致 谢

课题组的全体成员对美国国家职业安全健康研究所（NIOSH）和中国科技部国际合作司提供经费资助，对中国国家环保总局科研立项支持、指导和管理，对中国遗传资源管理办公室在人类生物样品出境提供的指导和帮助，对辽宁省丹东市环保局、宽甸县政府及有关厂矿的协助与支持，表示由衷的感谢。我们还要感谢中国环境监测总站、丹东市环境监测站为课题的实施提供了各种方便。中国地质分析中心和宽甸县医院协助分析了部分样品，在此也一并予以感谢。

课题组全体成员

2007 年 11 月

项目承担单位和主要研究人员

中方

首席专家：中国环境监测总站	魏复盛	院士
主研人员：中国环境监测总站	吴国平	高工
中国环境监测总站	胡伟	博士
北京科技大学	刘平	博士
北京科技大学	邢小茹	博士
北京科技大学	许军	博士
辽宁省丹东市环境监测站	王春利	高工
辽宁省丹东市环境监测站	魏春	高工
辽宁省丹东市环境监测站	刘宗豪	高工（正）
辽宁省丹东市环境监测站	张海波	高工
辽宁省丹东市环境监测站	姜欣	工程师
辽宁省丹东市环境监测站	葛宏斌	助工
辽宁省丹东市环境监测站	司阳	高工
辽宁省宽甸县环保局	陈宇新	助工
质量保证、组织协调：中国环境监测总站 吴国平 高工		

美方

首席专家：美国加州大学洛杉矶分校	Dr. Wendie A. Robbins
美国加州大学洛杉矶分校	Dr. David Elashoff
美国加州大学洛杉矶分校	Dr. Lin Xun
美国加州大学洛杉矶分校	Dr. Bettie Cheng
美国加州大学洛杉矶分校	Dr. Nola Kenidy
项目技术指导、协调员：美国加州大学洛杉矶分校 Dr. Lin Xun	

协作单位

国家地质分析测试中心
辽宁省丹东市宽甸县医院

目 录

基础篇 生活垃圾堆肥原理与技术

第 1 章 概 述	3
1.1 生活垃圾的产生及危害	3
1.2 生活垃圾处理现状	5
第 2 章 堆肥原理及影响因素	12
2.1 堆肥原理	12
2.2 影响堆肥的主要因素	14
2.3 堆肥微生物学	18
第 3 章 堆肥工艺及设备	28
3.1 堆肥工艺种类	28
3.2 堆肥工艺设备系统	29
3.3 堆肥设备与工艺	38
3.4 生活垃圾分选设备	39
第 4 章 堆肥过程及控制	44
4.1 堆肥原料准备	44
4.2 堆肥运行及管理	48
第 5 章 堆肥质量标准体系及指标体系	56
5.1 堆肥无害化条件	56
5.2 堆肥产品质量及卫生要求	57
5.3 堆肥质量标准体系及指标体系	59
第 6 章 堆肥产品推广应用	67
6.1 堆肥产品的推广应用范围	67
6.2 堆肥产品对农业生产作用	68

参考文献.....	74
-----------	----

研究篇 生活垃圾复合菌剂堆肥技术

第7章 堆肥复合菌剂制备.....	83
7.1 概述.....	83
7.2 纤维素分解菌的筛选与培育.....	87
7.3 复合微生物菌剂的制备.....	91
7.4 小结.....	96
第8章 堆肥反应器系统.....	97
8.1 实验室堆肥反应器系统概述.....	97
8.2 堆肥反应器设计实例.....	101
第9章 生活垃圾堆肥接种技术研究.....	115
9.1 概述.....	115
9.2 复合微生物菌剂接种对堆肥的影响.....	116
9.3 堆料初始土著微生物浓度对接种效果的影响.....	128
9.4 三阶段温度控制堆肥法.....	129
9.5 功能菌接种法.....	131
9.6 堆肥质量改善及二次污染防治.....	134
9.7 小结.....	135
第10章 堆肥接种动力学研究.....	137
10.1 动力学理论基础.....	137
10.2 堆肥接种实验动力学分析.....	143
10.3 小结.....	148
第11章 堆肥反应速率影响因子.....	150
11.1 堆肥反应速率影响因子.....	150
11.2 蓬松剂对生活垃圾堆肥的影响.....	151
11.3 供气量、含水率、温度、搅拌对堆肥效果的影响.....	155
11.4 交互作用试验.....	167
11.5 小结.....	168
第12章 堆肥反应过程动态模拟.....	169
12.1 控制因子的选择及指标.....	169
12.2 堆肥反应过程模型建立的理论基础.....	169

12.3 翻转式堆肥反应装置模拟条件	173
12.4 堆肥过程的动态模型建立方法初步探讨	188
12.5 小结	190
参考文献	191

实践篇 微生物强化工厂化堆肥物质转化

第 13 章 工厂化堆肥工艺	197
13.1 生活垃圾工厂化堆肥工艺系统概述	197
13.2 关键技术参数	200
13.3 主要设备及参数	201
第 14 章 生活垃圾堆肥主要生化特性变化	203
14.1 堆肥过程一般性质变化	203
14.2 堆肥过程中微生物及酶活性变化	205
第 15 章 生活垃圾生物堆肥有机物质转化	209
15.1 概述	209
15.2 生活垃圾堆肥有机物质转化	209
15.3 生活垃圾堆肥胡敏酸的光谱分析	217
15.4 堆肥过程中水溶性有机物 (DOM) 光谱学特征	232
第 16 章 生活垃圾堆肥过程中氮素转化	238
16.1 概述	238
16.2 堆肥底物的 C/N 值及其对堆肥过程的影响	239
16.3 堆肥的氮素损失、氮素固定及保氮方法	240
16.4 生活垃圾堆肥有机氮组分的变化	244
第 17 章 生活垃圾堆肥对难溶性磷转化	251
17.1 概述	251
17.2 堆肥对难溶性磷转化	253
第 18 章 微生物接种对堆肥腐熟度的影响	263
18.1 概述	263
18.2 堆肥腐熟度评价指标体系	263
18.3 堆肥腐熟度的综合评价	268
18.4 微生物接种对生活垃圾工厂化堆肥稳定化进程影响	270

第 19 章 堆肥产品肥力效应	274
19.1 概述	274
19.2 生活垃圾堆肥产品培肥对土壤生物学特性的影响	276
19.3 生活垃圾堆肥产品培肥对土壤化学性质的影响	278
19.4 富磷生活垃圾堆肥产品培肥效果	287
参考文献	305

基础篇

生活垃圾堆肥原理与技术

第1章 概述

1.1 生活垃圾的产生及危害

1.1.1 生活垃圾产生现状

随着社会经济的发展、城市化进程的加快、城市人口的增加以及人民生活水平的提高,生活垃圾的产生量也在不断地增加。据报道,全世界每天新增垃圾 469.49 万 t, 人均日产垃圾 0.81 kg, 人均年产垃圾 301.88 kg, 垃圾产生量的年平均增长速度达 8.24%, 高出世界经济平均增长速度的 2.5~3 倍。预计到 2010 年新增垃圾总量将达到 79.66 亿 t, 若将 1990—2010 年这 20 年垃圾预测总量累加, 则超过 1 100 亿 t, 垃圾平均密度将达到 811.99 t/km², 平均每人将拥有垃圾 16.92 t (2010 年全球人口按 65 亿计算)。调查表明, 我国约有 2/3 的城市陷入垃圾围城的困境。以北京市为例, 现日产垃圾 13 000 t, 全年生产 495 万 t, 而且每年将以 8% 的速度递增。1998 年, 经国务院批准的 668 座城市共产生生活垃圾 1.2×10⁸ t, 其中处理量仅达 57%, 且大多数为简易堆放。目前, 我国城市垃圾已达 1.5 亿 t 以上, 人均垃圾年产量在 450~500 kg, 历年堆存量高达 60 亿 t, 得到处理的垃圾不足 1/3, 无害化处理率不到 10%。无论在大城市还是小城镇, 几乎都能看到随处堆放的垃圾和遍地白色污染的情况, 这与我国经济蓬勃发展的大好形势是不相称的。如此大量的垃圾废弃于环境中, 既超出了环境的自然消纳能力、严重危害生态环境和人民的身体健康, 又造成了资源的极大浪费。

从资源学的观点看, 生活垃圾也是资源, 而且是当前世界上唯一不断增长的潜在资源。法国一位哲人说过: “垃圾是摆错了位置的资源。” 垃圾中确实蕴藏着巨大的潜能, 据北京市环保基金会统计, 北京市年产垃圾中有废塑料 36.2 万 t, 而 1 t 废塑料可生产 0.37~0.73 t 油, 每回收 1 t 塑料饮料瓶可获得利润 8 000 元; 年产垃圾中有废纸 38.8 万 t, 每回收 1 t 废纸, 可造出好纸 0.85 t, 节省木材 3 m³, 节省碱 300 kg, 比等量生产好纸减少污染 74%; 年产垃圾中, 废玻璃达 15 万 t, 利用废碎玻璃再生产新玻璃, 可节能 10%~30%, 减少空气污染 20%, 减少采矿废弃的矿渣 80%; 年产垃圾中废电池达 2.37 亿只, 利用废电池可回收镉、镍、锰、锌等宝贵的重金属, 同时可减少重金属对环境的污染及对人体健康的危害; 年产垃圾中有废金属 3.5 万 t, 每回收 1 t 废钢铁, 可炼好钢 0.9 t, 可减少 75% 的空气污染、97% 的水污染和固体废物产生, 比用矿石炼钢节约冶炼费 47%; 年产垃圾中有废食品草木 121.3 万 t, 每回收 1 t 这类垃圾, 可生产 0.6 t 有机肥, 也可生产垃圾燃料, 作为发电、供热的燃料。如果将我国 668 座城市产生的生活垃圾用于发电, 可节约

2.3×10^7 t 煤炭。同样,将这些垃圾用于堆肥,可生产 1.5×10^8 t 有机肥。据报道,我国每年年产 1.5 亿 t 的城市垃圾中,被丢弃的“可再生资源”价值高达 250 亿元!对于中国这个人均资源占有量居世界 100 多位之后的发展中国家来说,垃圾的影响不仅仅是造成环境的污染、资源的浪费,更威胁着其经济和社会的发展。因此,当今城市生活垃圾处理已成为世界性问题,能否正确认识垃圾,并切实采用合理的方法处理和利用垃圾的问题,已成为世界可持续发展战略的重要内容之一,受到世界各国的普遍关注,对垃圾堆肥处理进行科学探索,更是引起各国的广泛重视。

1.1.2 生活垃圾的危害

1.1.2.1 传播疾病

生活垃圾若不能及时从市区清运或简单堆放在市郊,往往会造成垃圾遍布、污水横流、蚊蝇滋生,散发臭味,还会成为各种病原微生物的滋生地和繁殖场。生活垃圾中可能含有有毒、有害、难降解的有机物、重金属、病原菌及寄生虫(卵)等物质。生活垃圾中有害成分以大气、水、土壤、食物为媒介,可通过多途径从呼吸系统、消化系统和皮肤进入人体,从而危害人体健康。因此,如果处置不当,可能对生态环境和人类自身造成很大危害。根据调查(Enger, 2003),在生活垃圾堆放场, 1 m^2 垃圾堆表面最多可招落 2 784 只苍蝇; 25 m^2 就有 1 个鼠洞、8 处鼠迹,通过传播肝炎、肠炎、痢疾及多种蠕虫病菌(即寄生虫病)等,对人体健康造成了非常大的威胁。

1.1.2.2 侵占土地

垃圾堆放和处置需要占用大量的土地面积。一般来说,堆放 1 万 t 城市生活垃圾,要占用 0.067 hm^2 土地。我国城市生活垃圾产生量巨大,而目前其处理能力远低于产生量。因此,大量的城市生活垃圾产生后,直接倾倒或简易堆放,侵占了大量的土地资源,其处理量越少,堆积量就越大,占地也就越多。目前城市近郊区外成为垃圾堆放场所,占用了大量生产、生活用地,堆存侵占的土地面积已超出 5 亿 m^2 。随着经济的快速发展、居民生活水平的提高及人口的不断增长,有机固体废弃物的产生量将越来越多,如不能及时有效地进行处理和利用,有机固体废弃物侵占土地问题将会变得更加严重。

1.1.2.3 污染水体

城市生活垃圾对水体的污染分为直接污染和间接污染两种途径。①直接污染。有机固体废弃物被直接排入江、河、湖、海等地表水,露天堆放的城市生活垃圾被地表径流携带进入地表水中,从而导致有机固体废弃物对水体的直接污染。②间接污染。露天堆存或填埋的城市生活垃圾,产生的渗滤液对水体污染严重。渗滤液是生活垃圾本身分解产生的高浓度污水,即雨水、地表水或地下水流经垃圾层摄取其中的污染物质而产生的污水的总和。其可溶性有害成分在雨水淋溶、渗透作用下可经土壤达到地下水,导致地下水污染。城市生活垃圾中含有大量有机物,在微生物对其进行分解的过程中,会消耗大量的溶解氧(DO),有机固体废弃物中的氮、磷等营养元素又会促进低等水生植物大量繁衍,争夺阳光、空间和氧气,威胁鱼类、贝类的生存,造成水体的富营养化,有机污染物和水生植物的生物降解,将水中的 DO 耗尽,使水体变黑发臭,这种水体的原有生态系统被破坏后将难以得到恢复。水体中硝态氮超标,人若长期或大量饮用,可能诱发癌症。城市生活垃圾简易填埋处置是造成地下水污染的主要来源,生活垃圾和污泥中

含有有毒有机污染物和重金属等有害成分,包含了毒性较大的铬、镉、铅、锌等重金属,这些有毒污染物通过部分饱和或完全饱和和地下水区进行迁移,并且其迁移过程具有隐蔽性、时滞性和长期性。目前我国的简易填埋场附近,由于渗滤液渗入地下水,致使地下水中的硝酸盐、氨氮、细菌总数、大肠杆菌等指标均处超标状态,有的数值甚至超出数百倍。

1.1.2.4 污染大气

生活垃圾在堆存、生物处置过程中,经微生物分解作用,不但产生氨、硫化氢等恶臭气体,对大气产生不同程度的污染,还能产生大量甲烷气体,引起火灾,发生爆炸事故。国内已发生多起垃圾堆着火和填埋场基地建筑物中甲烷气体引起的爆炸事故。生活垃圾在焚烧处置或其他热处理过程会产生酸性气体、粉尘和二噁英等二次污染物。

1.1.2.5 污染土壤

生活垃圾中有害成分在地表径流和雨水淋溶/渗透作用下,通过土壤孔隙向四周和纵深的土壤迁移。在此迁移过程中,有害成分经受土壤吸附或其他作用也发生位移。通常土壤的吸附能力和吸附容量很大,因此有害成分在土壤中呈现不同程度的累积,导致土壤成分和结构的改变,影响植物营养吸收和正常生长,影响土壤中微生物的活动,破坏土壤内部生态平衡,有害物质污染植物,进而通过食物链影响人体健康。

1.1.2.6 影响市容和环境卫生

我国生活垃圾处理效率不高,垃圾清运能力有限,相当部分未处理的生活垃圾露天堆放,除了造成环境污染外,还会影响厂区环境、城市容貌和景观。如生活垃圾中的废弃塑料袋“随风飘舞”,悬挂在树枝上或在水中漂浮,造成环境和市容的污染,严重影响城市景观,形成视觉污染。生活垃圾中含有大量有害病原微生物和寄生虫卵,有机物质的腐烂又滋生大量蚊蝇,造成人、畜传染病和寄生虫的蔓延,危害人体健康,影响城市环境卫生。

1.2 生活垃圾处理现状

目前国内外广泛采用的城市垃圾处理方式主要有卫生填埋、高温堆肥和焚烧及综合处理等。这几种垃圾处理方式的比例,因地理环境、垃圾成分、经济发展水平等因素不同而有所区别。由于城市垃圾成分复杂,并受经济发展水平、自然条件及传统习惯等因素的影响,所以国外对城市垃圾的处理一般是随国情的不同而变化的,往往一个国家的各地区也采用不同的处理方式,很难有一种统一的模式,但最终都是以无害化、资源化、减量化为处理目标。从应用技术看,国外主要有填埋、焚烧、堆肥、综合利用等方式,机械化程度较高,且形成系统及成套设备。从国外多种处理方式的情况看,有以下趋势:①工业发达国家由于能源、土地资源日益紧张,焚烧处理比例逐渐增多;②填埋法作为垃圾的最终处置手段一直占有较大的比例;③农业型的发展中国家大多数以堆肥为主。其他一些新技术,如热解法、堆山造景等技术,也正不断取得进展。

1.2.1 填埋技术现状

填埋技术作为生活垃圾的最终处理方法,目前仍然是我国大多数城市解决生活垃圾

出路的最主要方法。根据环保措施（主要有场底防渗、分层压实、每天覆盖、填埋气导排、渗滤液处理、传染病虫害防治等）是否齐全、能否满足相关环保标准来判断，我国的生活垃圾填埋场可分为三个等级。

1.2.1.1 简易填埋场

这是几十年来在我国一直沿用的填埋场，其特征是基本上没有考虑环保措施，也谈不上执行什么环保标准。目前我国相当数量的生活垃圾填埋场属于这个等级。这类填埋场可称为露天堆置场或简易堆埋场，这种方式的缺点是不可避免地会对周围的环境造成污染。

1.2.1.2 受控填埋场

这类填埋场目前我国也占有较大的比例，其特征是有部分环保措施，但不齐全；虽然有比较齐全的环保措施，但不能全部达标。目前的主要问题集中在场底防渗、渗沥水处理、每天覆盖等技术中不符合卫生填埋场的技术标准。

1.2.1.3 卫生填埋场

这是发达国家普遍采用的生活垃圾填埋技术，其特征是既有完善的环保措施，又能满足环保标准。真正意义上的卫生填埋场目前我国较少，深圳下坪固体废物填埋场是其代表，该填埋场 1997 年 10 月建成投产，每日填埋生活垃圾 1 800~2 000 t，是目前国内为数不多的铺设了人工合成防渗衬底的填埋场之一。

1.2.2 生活垃圾焚烧技术现状

焚烧是世界各国广泛采用的城市垃圾处理技术之一，大型的配备有热能回收与利用装置的垃圾焚烧处理系统，由于顺应了回收能源的要求，逐渐上升为焚烧处理的主流。国外工业发达国家和地区，特别是日本和西欧，普遍致力于推进垃圾焚烧技术的应用。国外焚烧技术的广泛应用，除得益于经济发达、投资力强、垃圾热值高外，主要在于焚烧工艺和设备的成熟、先进。目前国外工业发达国家主要致力于改进原有的各种焚烧装置及开发新型焚烧炉，使之朝着高效、节能、低造价、低污染的方向发展，自动化程度越来越高。

我国生活垃圾焚烧技术的研究起步于 20 世纪 80 年代中期，“八五”期间被列为国家科技攻关项目，目前仅有深圳等极少数城市采用了焚烧技术，尚处于起步阶段。随着我国东南部沿海地区和部分中心城市的生活垃圾热值的提高，近年来已有不少城市将建设生活垃圾焚烧厂提到了议事日程，正在组织实施。综合目前我国生活垃圾焚烧技术应用的现状，大致可以归纳为以下两个等级。

1.2.2.1 国产化焚烧技术设备

目前我国有关单位，在吸取经济发达国家成功经验的基础上，正努力研制国产化的生活垃圾焚烧技术和设备。这些焚烧技术和设备大多数尚处在安装、调试或试运转过程中，技术水平有待提高。

1.2.2.2 综合型焚烧技术设备

综合型焚烧技术设备，是指把引进技术设备与国产技术设备有机结合起来的垃圾焚烧系统。迄今，已采用或拟采用这种模式的有深圳、珠海、广州、上海、北京、厦门等城市。但其中只有深圳市政环卫综合处理厂、深圳市龙岗区垃圾焚烧厂（引进加拿大技