



普通高等教育“十五”国家级规划教材

环境工程原理

胡洪营 张旭 黄霞 王伟 合编



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

普通高等教育“十五”国家级规划教材

环境工程原理

胡洪营 张旭 黄霞 王伟 合编

高等教育出版社

内容提要

本书是“十五”国家级规划教材,是我国第一本超越污染介质的界限,系统介绍环境净化与污染控制基础理论及其工程原理的本科生教材。内容包括环境工程原理基础、分离过程原理和反应工程原理三大部分。环境工程原理基础部分主要讲述单位与量纲分析、物料与能量守恒原理、流体流动、传递过程等;分离过程原理部分主要讲述沉淀、过滤、吸收、吸附的基本原理;反应工程原理部分讲述化学和生物反应计量学、动力学、环境领域常用的各类反应器及其解析理论等。

本书可作为环境工程、环境科学、给水排水工程及其他相关专业的本科生教材,也可供相关专业的研究生学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

环境工程原理/胡洪营等编. —北京:高等教育出版社,2005.8

ISBN 7-04-017398-0

I. 环... II. 胡... III. 环境工程学-高等学校-教材 IV. X5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 056643 号

策划编辑 陈文 责任编辑 陈海柳 封面设计 王 睢 责任绘图 朱 静
版式设计 范晓红 责任校对 俞声佳 责任印制 韩 刚

出版发行	高等教育出版社	购书热线	010-58581118
社 址	北京市西城区德外大街 4 号	免费咨询	800-810-0598
邮政编码	100011	网 址	http://www.hep.edu.cn
总 机	010-58581000		http://www.hep.com.cn
经 销	北京蓝色畅想图书发行有限公司	网上订购	http://www.landaco.com
印 刷	高等教育出版社印刷厂		http://www.landaco.com.cn
开 本	787×960 1/16	版 次	2005 年 8 月第 1 版
印 张	37.75	印 次	2005 年 8 月第 1 次印刷
字 数	690 000	定 价	42.70 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 17398-00

前 言

“环境工程原理”是高等院校环境工程专业的一门重要的专业基础课。该课程自2003年秋季学期在清华大学开设以来,受到了积极的关注,教育部“高等学校环境工程教学指导委员会”于2004年8月在四川大学召开的会议上,将“环境工程原理”列为高等学校环境工程专业的核心课程,并组织编写了“环境工程原理”教学基本要求。

本书是针对环境工程专业的特点,为高等院校环境工程专业编写的一本教材。该教材系统分析和归纳总结了水处理工程、大气污染控制工程、固体废物处理处置工程、污染环境净化与生态修复工程等所涉及的技术原理,提炼出具有共性的基本原理、现象和过程,进行系统、深入的阐述,具有较强的理论性和系统性,体现了环境工程专业的特色。该教材从环境工程的实际需求出发,通过与环境工程实践紧密结合的例题,对基本原理进行深入浅出的阐述,注重分析问题和解决问题能力的培养,能满足不同学科背景的环境工程专业学生的需求。其内容适应80~100学时教学需要,各院校可根据各自的特点,依据教育部“高等学校环境工程教学指导委员会”提出的“环境工程原理”教学基本要求,确定适宜的学时和教学内容重点。该教材也适用于环境科学、给水排水工程等相关专业本科生,还可供研究生和环境领域的科技人员学习参考。

近年来,环境污染问题日趋复杂,并表现出明显的复合化特征、时间特征及地域特征。环境问题的这些特点决定了环境工程专业技术人才应具有较强的解决复杂问题的综合能力和系统、整体优化的观念,而扎实、系统和宽厚的理论基础是具备这些能力的基石。

经过长期的探索和实践,环境科研和工程技术人员开发出种类繁多的环境净化与污染控制技术,形成了体系庞大的环境净化与污染控制技术体系。但是,从技术原理上看,这些种类繁多的环境污染控制技术可以分为“隔离技术”、“分离技术”和“转化技术”三大类。隔离技术是将污染物或污染介质隔离,从而切断污染物向周围环境的扩散途径,防止污染的进一步扩大;分离技术是利用污染物与污染介质或其他污染物在物理性质或化学性质上的差异使其与介质分离,从而达到污染物去除或回收利用的目的;转化技术是利用化学或生物反应,使污染物转化成无毒无害或易于分离的物质,从而使污染环境得到净化与处理。

将隔离、分离、转化等技术原理应用于具体的污染控制工程将涉及流体输送、物质传递、分离过程和反应工程等的基本原理,深入理解、掌握和正确利用这些原理对提高污染控制设施的效率有重要意义。

基于以上分析,本书主要内容包括环境工程原理基础、分离过程原理和反应工程原理三部分。环境工程原理基础部分主要讲述物料与能量衡算的基本理论和方法、流体流动以及热量和质量传递的基本理论;分离过程原理部分主要讲述沉淀、过滤、吸收、吸附、离子交换、萃取和膜分离的基本理论;反应工程原理部分主要讲述化学和微生物反应的计量学、动力学及其研究方法、环境工程中常用的各类化学和生物反应器及其解析理论等。

本书是在“环境工程原理”讲义的基础上编写的,该讲义已经在清华大学试用两年,在体系和内容上得到了逐步完善。主要编写人员有胡洪营(第一章、第十一章、第十二章、第十三章、第十四章和第十五章)、张旭(第二章、第三章、第四章和第五章)、黄霞(第六章、第七章、第八章和第十章)、王伟(第九章)。此外,王丽莎参加了第一章和第十一章至第十五章的图表设计、文字编辑和例题、习题的编写;陆松柳参加了第二章至第五章的例题和习题的编写;刘春参加了第八章的编写和第六章至第十章的例题和习题的编写;吴乾元参加了第十一章至第十五章的文字编辑和例题、习题的编写;郭斌参加了第一章至第五章的文字编辑和例题、习题的编辑;张薛参加了第六章、第七章、第八章和第十章的文字编辑。

本书由清华大学郝吉明教授担任主审。清华大学环境科学与工程系主任陈吉宁教授对“环境工程原理”课程的开设和教材的编写给予了大力支持。钱易院士、陈吉宁教授、施汉昌教授、张晓建教授、李广贺教授、左剑恶副教授等参加了教学大纲的前期讨论,并提出了宝贵的意见和建议。清华大学环境科学与工程系2001级和2002级本科生对本教材提出了许多建设性的意见和建议。在此对支持和关心本教材编写的老师、同学表示衷心的感谢。

教育部“高等学校环境工程教学指导委员会”对本书的编写给予了大力的支持,并于2004年11月7日在北京组织召开了审稿会。审稿会由清华大学环境科学与工程系郝吉明教授主持,华东理工大学姚重华教授、北京工业大学金毓荃教授、西安交通大学陈杰蓉教授出席了会议,并提出了许多宝贵的意见。哈尔滨工业大学孙德智教授和北京航空航天大学朱天乐教授审阅了部分书稿。高等教育出版社陈文副编审和陈海柳编辑为本书的出版付出了大量心血。在此对他们表示诚挚的感谢。

本书编写过程中参考了大量的教材、专著和相关资料,在此对这些著作的作者表示感谢。

“环境工程原理”课程的开设和教材的编写是一个新的尝试,由于编者水平有限,不妥和错误之处在所难免,欢迎读者批评指正。

编 者

2005年2月于清华园

目 录

第一章 绪论	1
思考题与习题	10

第一篇 环境工程原理基础

第二章 质量衡算与能量衡算	14
第一节 常用物理量	14
第二节 质量衡算	26
第三节 能量衡算	36
思考题与习题	45
本章主要符号说明	47
第三章 流体流动	49
第一节 管流系统的衡算方程	49
第二节 流体流动的内摩擦力	58
第三节 边界层理论	65
第四节 流体流动的阻力损失	71
第五节 管路计算	88
第六节 流体测量	96
思考题与习题	105
本章主要符号说明	109
第四章 热量传递	112
第一节 热量传递的方式	112
第二节 热传导	113
第三节 对流传热	123
第四节 辐射传热	155
第五节 换热器	167
思考题与习题	176
本章主要符号说明	178
第五章 质量传递	180
第一节 环境工程中的传质过程	180
第二节 质量传递的基本原理	182
第三节 分子传质	185

第四节 对流传质	195
思考题与习题	204
本章主要符号说明	205

第二篇 分离过程原理

第六章 沉降	208
第一节 沉降分离的基本概念	208
第二节 重力沉降	214
第三节 离心沉降	223
第四节 其他沉降	233
思考题与习题	235
本章主要符号说明	238
第七章 过滤	240
第一节 过滤操作的基本概念	240
第二节 表面过滤的基本理论	242
第三节 深层过滤的基本理论	253
思考题与习题	262
本章主要符号说明	264
第八章 吸收	267
第一节 吸收的基本概念	267
第二节 物理吸收	268
第三节 化学吸收	280
第四节 吸收设备的主要工艺计算	287
思考题与习题	299
本章主要符号说明	301
第九章 吸附	304
第一节 吸附分离操作的基本概念	304
第二节 吸附剂	306
第三节 吸附平衡	310
第四节 吸附动力学	320
第五节 吸附操作与吸附穿透曲线	323
思考题与习题	338
本章主要符号说明	339
第十章 其他分离过程	341
第一节 离子交换	341
第二节 萃取	352
第三节 膜分离	367

思考题与习题	399
本章主要符号说明	402
第三篇 反应工程原理	
第十一章 反应动力学基础	408
第一节 反应器和反应操作	408
第二节 反应的计量关系	415
第三节 反应动力学	423
思考题与习题	437
本章主要符号说明	439
第十二章 反应动力学的解析方法	440
第一节 动力学实验及实验数据的解析方法	440
第二节 间歇反应器的解析	443
第三节 连续反应器的解析	449
思考题与习题	457
本章主要符号说明	460
第十三章 均相化学反应器	461
第一节 间歇与半间歇反应器	461
第二节 完全混合流反应器	465
第三节 平推流反应器	472
思考题与习题	480
本章主要符号说明	482
第十四章 非均相化学反应器	484
第一节 固相催化反应器	484
第二节 气-液相反应器	503
思考题与习题	521
本章主要符号说明	522
第十五章 微生物反应器	524
第一节 微生物与微生物反应	524
第二节 微生物反应的计量关系	526
第三节 微生物反应动力学	534
第四节 微生物反应器的操作与设计	548
思考题与习题	560
本章主要符号说明	562
参考文献	564
附录	566

附录 1 常用单位的换算	566
附录 2 某些气体的重要物理性质	570
附录 3 某些液体的重要物理性质	571
附录 4 干空气的物理性质	575
附录 5 水的物理性质	576
附录 6 饱和水蒸气的物理性质	577
附录 7 常用固体材料的密度和比定压热容	581
附录 8 某些气体和蒸气的导热系数	582
附录 9 某些液体的导热系数	583
附录 10 某些固体材料的导热系数	584
附录 11 壁面污垢热阻	586
附录 12 不同材料的辐射黑度	587
附录 13 列管换热器的传热系数	588
附录 14 管内流体常用流速范围	590
附录 15 扩散系数	590
附录 16 若干气体水溶液的亨利系数	591

第一章 绪 论

一、环境问题与环境学科的发展

“环境”是一个相对的概念,它是与某个中心事物相关的周围事物的总称。环境学科中涉及的环境,其中心事物从狭义上讲是人类,从广义上讲是地球上所有的生物。环境学科所研究的环境包括自然环境和人工环境两种。

自然环境是直接或间接影响到人类和生物的所有自然形成的物质、能量和自然现象的总体,是人类赖以生存、生活和生产所必需的自然条件及自然资源的总称,它包括阳光、空气、水、土壤、岩石、温度、气候等自然因素,也包括微生物、高等生物等。自然环境在人类出现之前就已存在,人类发展的历史是一个与自然环境相互影响和相互作用的历史。随着人类的出现,环境问题也伴随而生。狩猎、耕作、放牧、灌溉、森林砍伐等人类活动都在不同程度上对自然环境产生了一定的影响,如灌溉导致的土地盐碱化、水土流失等,但这种影响的程度从人类出现到产业革命的漫长时期内并不十分突出。产业革命以后,人类的生产力获得了飞速发展,技术水平迅速提高,人口迅速增长,人类活动的强度和范围逐渐增强和扩展,人类与环境的矛盾以及由此带来的环境问题也日趋突出。

生态破坏和环境污染是目前人类面临的两大类环境问题,它们已经成为影响社会可持续发展、人类可持续生存的重大问题。

环境学科是随着环境问题的日趋突出而产生的一门新兴的综合性边缘学科。它经历了 20 世纪 60 年代的酝酿阶段,到 20 世纪 70 年代初期,从零星的环境保护的研究工作与实践逐渐发展成为一门独立的新兴学科。

环境学科是研究人类活动与其环境质量关系的科学,其主要任务是研究人类与环境的对立统一关系,认识两者之间的作用与反作用,掌握其发展规律,从而保护环境,并使其向对人类有利的方向演变。

环境学科是一门正在蓬勃发展的科学,其研究范围和内涵不断扩展,所涉及的学科非常广泛,而且各个学科间互相交叉和渗透,因此目前有关环境学科的分支学科还没有形成统一的划分方法。图 1.1 是环境学科的分科体系,从图可以看

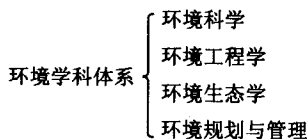


图 1.1 环境学科体系

出,环境工程学是环境学科的一个重要分支。

二、环境污染与环境工程学

环境污染是人类面临的主要环境问题之一,它主要是由于人为因素造成的环境质量恶化,从而扰乱和破坏了生态系统、生物生存和人类生活条件的一种现象。狭义地说,环境污染是指由有害物质引起的大气、水体、土壤和生物的污染。

环境工程学作为环境学科的一个重要分支,其主要任务是利用环境学科以及工程学的方法,研究环境污染控制理论、技术、措施和政策,以改善环境质量,保证人类的身体健康和生存以及社会的可持续发展。环境工程学的研究对象不仅包括水质净化与水污染控制技术、大气(包括室内空气)污染控制技术、固体废物处理处置与管理与资源化技术、物理性污染(热污染、辐射污染、噪声、振动)控制技术、自然资源的合理利用与保护、环境监测与环境质量评价等传统的内容,还包括生态修复与构建理论与技术、清洁生产理论与技术以及环境规划、管理与环境系统工程等。

环境工程学是在吸收土木工程、卫生工程、化学工程、机械工程等经典学科基础理论和技术方法的基础上,为了改善环境质量而逐步形成的一门新兴的学科,它脱胎于上述经典学科,但无论是学科任务还是研究对象都与这些学科有显著的区别,其学科内涵远远超过了这些学科。特别是近二十多年来,环境工程学的发展非常迅速,反应工程、应用微生物学、生态学、生物工程、计算机与信息工程以及社会学的各个学科都向其渗透,其学科理论体系日趋完善,学科分支日趋扩展,目前已经成为具有鲜明特色的独立的学科体系。图 1.2 是环境工程学的学科体系。

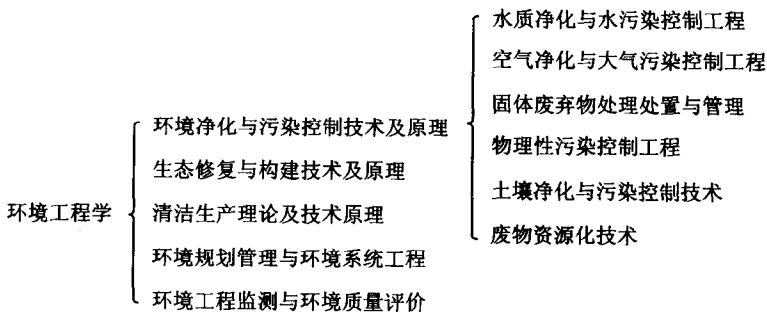


图 1.2 环境工程学的学科体系

三、环境净化与污染控制技术概述

(一) 水质净化与水污染控制技术

1. 水中的主要污染物及其危害

根据污染物的不同,水污染可分为物理性污染、化学性污染和生物性污染三大类。污水中的物理性和化学性污染物种类多,成分复杂而多变,物理化学性质多样,可处理性差异大。为了便于理解污水处理的对象与原理,污水中的污染物常按图 1.3 进行分类。

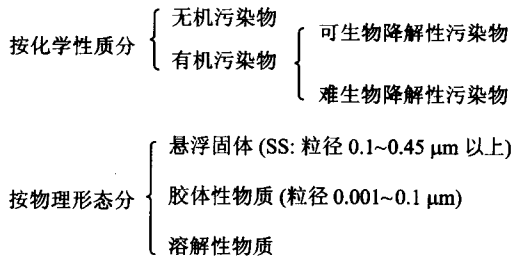


图 1.3 污水中的污染物分类

水中的无机污染物包括氮、磷等植物性营养物质、非金属(如砷、氟等)、金属与重金属(如汞、镉、铬)以及主要因无机物的存在而形成的酸碱度。氮、磷是导致湖泊、水库、海湾等封闭性水域富营养化的主要物质。许多重金属对人体和水生生物有直接的毒害作用。

污水中的可生物降解性有机污染物(多为天然化合物)排入水体以后,在微生物的作用下得到降解,从而消耗了水中的溶解氧,引起水体的缺氧和水生动物的死亡,破坏水体功能。在厌氧条件下有机物被微生物降解产生 H_2S 、 NH_3 、低级脂肪酸等有害或恶臭物质。另外, H_2S 会与 Fe 等形成黑色沉淀,引起水体的“黑臭”现象。

难生物降解性污染物,如农药、卤代烃、芳香族化合物、聚氯联苯等,一般具有毒性大、化学及生物学稳定性强、易于在生物体内富集等特点,排入环境以后长时间滞留,并通过食物链对人体健康造成危害。近年来,由持久性污染物(persistent organic pollutants, POPs)引起的环境污染问题备受人们的关注。

2. 水质净化与水污染控制技术

水处理的基本目的是利用各种技术,将污水中的污染物分离去除或将其转化为无害物质,使污水得到净化。水处理的方法种类繁多,归纳起来可以分为物理法、化学法和生物法三大类。各种水处理方法的原理与主要去除对象分别见表 1.1、表 1.2 和表 1.3。

表 1.1 水的物理处理法

处理方法	主要原理	主要去除对象
沉淀	重力沉降作用	相对密度大于 1 的颗粒
离心分离	离心沉降作用	相对密度大于 1 的颗粒
气浮	浮力作用	相对密度小于 1 的颗粒
过滤(砂滤等)	物理阻截作用	悬浮物
过滤(筛网过滤)	物理阻截作用	粗大颗粒、悬浮物
反渗透	渗透压	无机盐等
膜分离	物理截留等	较大分子污染物
蒸发浓缩	水与污染物的挥发性差异	非挥发性污染物

表 1.2 水的化学处理法

处理方法	主要原理	主要去除对象
中和法	酸碱反应	酸性、碱性污染物
化学沉淀法	沉淀反应、固液分离	无机污染物
氧化法	氧化反应	还原性污染物、有害微生物(消毒)
还原法	还原反应	氧化性污染物
电解法	电解反应	氧化、还原性污染物
超临界分解法	热分解、氧化还原反应、游离基反应等	几乎所有的有机污染物
汽提法	污染物在不同相间的分配	有机污染物
吹脱法	污染物在不同相间的分配	有机污染物
萃取法	污染物在不同相间的分配	有机污染物
吸附法	界面吸附	可吸附性污染物
离子交换法	离子交换	离子性污染物
电渗析法	离子迁移	无机盐
混凝法	电中和、吸附架桥作用	胶体性污染物、大分子污染物

表 1.3 水的生物处理法

处理方法		主要原理	主要去除对象
好氧处 理法	活性污泥法	生物吸附、生物降解	可生物降解性有机污染物、还 原性无机污染物(NH_4^+ 等)
	生物膜法	生物吸附、生物降解	
	流化床法	生物吸附、生物降解	
生态技 术	氧化塘	生物吸附、生物降解	有机污染物、氮、磷、重金属
	土地渗滤	生物降解、土壤吸附	
	湿地系统	生物降解、土壤吸附、植物吸附	
厌氧处 理法	厌氧消化池	生物吸附、生物降解	可生物降解性有机污染物、氧 化态无机污染物(NO_3^- , SO_4^{2-})
	厌氧接触法		
	厌氧生物滤池		
	高效厌氧反应 器(UASB ^① 等)		
厌氧-好氧联合工艺		生物吸附、生物降解、硝化-反 硝化、生物摄取与排出	有机污染物、氮(硝化-反硝 化)、磷

注:① UASB: upflow anaerobic sludge blanket(升流式厌氧污泥床反应器)。

物理法是利用物理作用分离水中污染物的一类方法,在处理过程中不改变污染物的化学性质。

化学法是利用化学反应的作用处理水中污染物的一类方法,通过改变污染物在水中的存在形式,使之从水中去除,或者使污染物彻底氧化分解、转化为无害物质,从而达到水质净化和污水处理的目的。

生物法是利用生物特别是微生物的作用,使水中的污染物分解、转化成无害物质的一类方法。

(二) 空气净化与大气污染控制技术

1. 空气中的污染物及其危害

空气中污染物的种类繁多,根据其存在的状态,可分为颗粒/气溶胶状态污染物和气体污染物,具体如图 1.4 所示。空气中的污染物不但能引起各种疾病,危害人体健康,还能引起大气组分的变化,导致气候变化,从而影响树木(森林)、农作物等的生长。

2. 空气净化与大气污染控制技术

空气净化与大气污染控制技术可分为分离法和转化法两大类。分离法是利用污染物与空气的物理性质的差异使污染物从空气或废气中分离的一类方法。

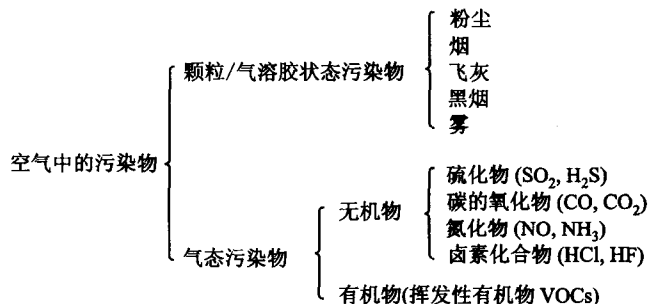


图 1.4 空气中的污染物分类

转化法是利用化学反应或生物反应,使污染物转化成无害物质或易于分离的物质,从而使空气或废气得到净化与处理的一类方法。常见的空气净化与大气污染控制技术列于表 1.4。

表 1.4 空气净化与废气处理技术

处理技术	主要原理	主要去除对象
机械除尘	重力沉降作用、离心沉降作用	颗粒/气溶胶状态污染物
过滤除尘	物理阻截作用	颗粒/气溶胶状态污染物
静电除尘	静电沉降作用	颗粒/气溶胶状态污染物
湿式除尘	惯性碰撞作用、洗涤作用	颗粒/气溶胶状态污染物
物理吸收法	物理吸收	气态污染物
化学吸收法	化学吸收	气态污染物
吸附法	界面吸附作用	气态污染物
催化氧化法	氧化还原反应	气态污染物
生物法	生物降解作用	可降解性有机污染物、还原态无机污染物
燃烧法	燃烧反应	有机污染物
稀释法	扩散	所有污染物

(三) 土壤净化与污染控制技术

1. 土壤污染物及其危害

土壤中的污染物主要有重金属、挥发性有机物、原油等。土壤的重金属污染主要是由于人为活动或自然作用释放出的重金属经过物理、化学或生物的过程,在土壤中逐渐积累而造成的。土壤的有机污染主要是由化学品的泄漏、非法投放、原油泄漏等造成的。与水污染和大气污染不同,土壤污染通常是局部性的污

染,但是在一些情况下通过地下水的扩散,亦会造成区域性污染。

土壤污染的危害主要有以下几个方面:① 通过雨水淋溶作用,可能导致地下水和周围地表水体的污染;② 污染物通过土壤颗粒物等形式能直接或间接地为人或动物所吸入;③ 通过植物吸收而进入食物链,对食物链上的生物产生毒害作用等。

2. 污染土壤净化技术

由于土壤的物理结构和化学成分较复杂,污染土壤的净化比废水与废气处理困难得多。污染土壤的净化技术可分为物理法、化学法和生物法。表 1.5 列出了几种代表性的土壤净化方法。

表 1.5 土壤净化与污染控制技术

处理技术	主要原理	主要去除对象
客土法	稀释作用	所有污染物
隔离法	物理隔离(防止扩散)	所有污染物
清洗法(萃取法)	溶解作用	溶解性污染物
吹脱法(通气法)	挥发作用	挥发性有机物
热处理法	热分解作用、挥发作用	有机污染物
电化学法	电场作用(移动)	离子或极性污染物
焚烧法	燃烧反应	有机污染物
微生物净化法	生物降解作用	可降解性有机污染物
植物净化法	植物转化、植物挥发、植物吸收/固定	重金属、有机污染物

(四) 固体废弃物处理处置与管理

1. 固体废弃物的种类及其危害

固体废弃物是指人类活动过程中产生的、不再具有使用价值而被废弃的固态或半固态物质。人类生产活动中产生的固体废弃物俗称“废渣(residue)”,我国制定的《固体废物管理法》中将其定义为“工业固体废物(废渣)”;在生活活动中产生的固体废弃物俗称“垃圾(refuse)”,在《固体废物管理法》中将其定义为“城市垃圾”。

固体废弃物对环境的危害包括:① 通过雨水的淋溶和地表径流的渗沥,污染土壤、地下水和地表水,从而危害人体健康;② 通过飞尘、微生物作用产生的恶臭以及化学反应产生的有害气体等污染空气;③ 固体废弃物的存放和最终填