



世纪高等教育环境工程系列规划教材

现代环境工程原理

李永峰 陈红 主编
周琪 主审



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

X5
2013/9

21 世纪高等教育环境工程系列规划教材

现代环境工程原理

主 编 李永峰 陈 红
 副主编 程国玲 唐 利 周雪飞
 主 审 周 琪



机械工业出版社

本书较全面、系统地阐述了现代环境工程原理及相应生物技术。主要介绍了流体的流动过程、沉降与过滤、传热与传质、吸收机制、吸附机理、膜分离、化学反应工程原理、生物反应工程原理、环境生态工程原理、环境工程分子生物学原理、水污染控制工程原理、大气污染控制工程原理、固废污染控制工程原理。

本书可作为高等学校环境科学与工程系、生物工程系和化学工程系等有关专业的本科及研究生教材，也可作为环保系统、农林系统的培训教材和相关科研、技术人员的参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

现代环境工程原理/李永峰, 陈红主编. —北京: 机械工业出版社, 2012. 6
21 世纪高等教育环境工程系列规划教材

ISBN 978-7-111-38151-8

I. ①现… II. ①李… ②陈… III. ①环境工程学—高等学校—教材
IV. ①X5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 078639 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 马军平 责任编辑: 马军平 臧程程 任正一

版式设计: 霍永明 责任校对: 申春香

封面设计: 路恩中 责任印制: 乔宇

北京瑞德印刷有限公司印刷 (三河市胜利装订厂装订)

2012 年 9 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 29.25 印张 · 725 千字

标准书号: ISBN 978-7-111-38151-8

定价: 58.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心: (010)88361066

教材网: <http://www.cmpedu.com>

销售一部: (010)68326294

机工官网: <http://www.cmpbook.com>

销售二部: (010)88379649

机工官博: <http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线: (010)88379203

封面防伪标均为盗版

前 言

本书较全面、系统地阐述了环境工程原理及相应生物技术。全书共分为 14 章，第 1 章的任务是让读者对环境污染控制工程有基本的认识，为深入理解、掌握和正确利用环境工程技术原理与具体的污染控制过程打下良好的基础。第 2 章研究了流体的宏观运动规律，讨论了流体流动过程的基本原理和流体在管内流动的规律。第 3 章简要地介绍了重力沉降、离心沉降及过滤等分离法的操作原理及设备。第 4 章主要介绍一般传递过程中的传热与传质两种基本物理现象，研究热能传递与能量转换过程，分析传热与传质过程的基本规律。第 5 章主要介绍相组成的表示方法、吸收的气液相平衡关系及其应用、吸收传质机理及速率方程、吸收塔的有关计算等。第 6 章主要介绍各种吸附机理。第 7 章主要介绍膜分离原理及膜的性质，其中着重介绍反渗透、电渗析和超滤。第 8 章在介绍了反应动力学基础以及解析方法的基础上，同时介绍了各种均相化学反应器与非均相化学反应器。第 9 章系统地介绍了生物反应工程的基本理论、基本规律、传递因素对生物反应过程的影响及生物反应器设计和操作的基本原理与方法，并对生物反应工程领域的一些新的进展进行了简要的介绍。第 10 章从环境生态工程的基本原理入手，阐述了污水的土地处理、稳定塘、人工湿地、生态浮岛、固体废物处理生态工程以及大气污染防治生态工程的基本概况、类型、基本原理以及工程实例。第 11 章首先介绍同环境工程研究密切相关的一些分子生物学知识，然后根据应用广度和深度依次探讨了基因指纹技术、16S rRNA 基因文库技术、荧光原位杂交技术及宏基因组技术的原理及其在环境工程领域中的应用。第 12 章详细介绍了水污染控制工程中常用的物理法、化学法、物化法及生物处理法的基本原理以及其在水处理中的应用。第 13 章以大气污染控制为主要内容，介绍了大气污染物的种类及来源和环境空气质量控制标准的种类和作用，侧重介绍燃烧过程的基本原理、燃料燃烧产生的污染物的种类及其生成机理、如何控制燃烧过程，以便减少污染物的排放量，并介绍了各种除尘装置的结构原理、性能特点。第 14 章围绕着固废的性质及其处理方式展开讨论，对固体废物控制工程原理进行了介绍，并配备了相应电子教材。本书可作为高等学校环境科学与工程系、生物工程系和化学工程系等有关专业的本科及研究生教材，也可作为环保系统、农林系统的培训教材和相关科研、技术人员的参考书。

由于编者水平有限，书中有未尽之处，请读者指正。

目 录

前言	
第1章 绪论	1
1.1 环境工程基础	1
1.2 污染治理与单元操作	2
1.3 生物过程	7
1.4 背景知识和概念	10
思考题	13
参考文献	13
第2章 流体的流动过程	14
2.1 流体流动中的作用力	14
2.2 流体静力学方程	25
2.3 流体动力学基本方程	30
2.4 流体流动现象	41
2.5 流体在管内的流动阻力	51
2.6 管路计算	66
2.7 流速和流量测定	73
思考题	80
参考文献	81
第3章 沉降与过滤	82
3.1 非均相物系的分离	82
3.2 颗粒和颗粒群的特性	84
3.3 重力沉降	86
3.4 离心沉降	97
3.5 过滤	106
3.6 空气净化工程	122
思考题	127
参考文献	128
第4章 传热与传质	129
4.1 传热学概述	129
4.2 热传导	133
4.3 对流传热	142
4.4 辐射换热	154
4.5 换热器	163
4.6 环境工程中的质量传递	168
4.7 分子传质	173
4.8 对流传质	181
思考题	187
参考文献	188
第5章 吸收机制	189
5.1 吸收概述	189
5.2 吸收传质机理	193
5.3 吸收在环境工程中的应用	200
思考题	200
参考文献	200
第6章 吸附机理	201
6.1 吸附基本理论	201
6.2 吸附剂及其再生	208
6.3 吸附设备及其工艺	212
6.4 吸附在环境工程中的应用	216
思考题	218
参考文献	219
第7章 膜分离	220
7.1 概述	220
7.2 膜分离过程	220
7.3 反渗透和纳滤	223
7.4 电渗析	228
7.5 超滤	232
思考题	237
参考文献	237
第8章 化学反应工程原理	238
8.1 反应动力学基础	238
8.2 反应动力学的解析方法	243
8.3 均相化学反应器	246
8.4 非均相化学反应器	248
思考题	252
参考文献	253
第9章 生物反应工程原理	254
9.1 概述	254
9.2 酶促反应动力学	256
9.3 微生物反应动力学	266
9.4 微生物反应器操作	273
9.5 动植物细胞培养动力学	279
9.6 生物反应器中的传质过程	281
9.7 生物反应器	286

9.8 生物反应工程领域的拓展	293	参考文献	393
思考题	301	第 12 章 水污染控制工程原理	394
参考文献	301	12.1 物理处理方法	394
第 10 章 环境生态工程原理	302	12.2 化学和物理化学处理方法	402
10.1 环境生态工程的基本原理	302	12.3 废水生物处理	409
10.2 污水的土地处理	306	思考题	417
10.3 稳定塘	311	参考文献	417
10.4 人工湿地	314	第 13 章 大气污染控制工程原理	418
10.5 生态浮岛	326	13.1 大气和大气圈	418
10.6 固体废物处理生态工程	330	13.2 大气污染	420
10.7 大气污染防治生态工程	335	13.3 燃烧与大气污染	427
思考题	341	13.4 除尘器	431
参考文献	341	思考题	437
第 11 章 环境工程分子生物学原理	343	参考文献	437
11.1 分子生物学基础	343	第 14 章 固废污染控制工程原理	438
11.2 基因指纹技术	356	14.1 固体废物概述及储存	438
11.3 16S rRNA 基因克隆文库构建 与应用	366	14.2 固体废物的物化处理	444
11.4 荧光原位杂交技术	372	14.3 固体废物的生物处理	453
11.5 宏基因组技术	381	思考题	461
思考题	392	参考文献	461

第 1 章

绪 论

本章提要：随着环境问题的日趋突出，产生了一门新兴的综合性边缘学科——环境科学。近年来，人们又将目光转向如何将这一领域应用到实际中，因此关于环境工程学的大量研究逐步展开。“环境工程原理”是环境工程专业、环境科学专业、给水排水工程专业以及其他相关专业的专业基础课。在本书的起始篇章中，我们会介绍环境工程学的一系列基本概念及其研究领域等内容。本章的任务是让读者对环境污染控制工程有基本的认识，为深入理解、掌握和正确利用环境工程技术原理与具体的污染控制过程打下良好的基础。

1.1 环境工程基础

1.1.1 环境工程学的概念

环境工程是一门独特的技术学科，它所关注的主要问题是环境污染物及其对环境的影响。最早的环境工程应用于处理人类废物的历史，可以追溯到人类认识到废物会携带疾病这一性质之后。据介绍，早期人类历史上所出现的有关水质的文献记载大概出现在公元前 2000 年，是用煮沸和过滤的方法来净化水。

环境工程学就是在人类同环境污染作斗争、保护和改善生存环境的过程中形成的，是环境科学的一个分支。主要研究运用工程技术和有关学科的原理和方法，保护和合理利用自然资源，防治环境污染，以改善环境质量。

环境工程原理是环境类及其相近专业的一门主干课程，它是综合运用数学、物理、化学、计算技术等基础知识，分析和解决环境工程领域内环境治理过程中各种物理操作问题的技术基础课，是以环境工程学中涉及的一些基本概念和一些常见的单元操作作为研究对象，系统地研究这些单元操作的基本原理、典型设备的结构、典型工艺以及在环境工程实践中的应用，为后续专业课程的学习打下坚实的基础。

1.1.2 环境污染与环境工程学

“环境”是与某个中心事物相关的周围事物的总称，是一个相对的概念。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、土壤和生物体的污染。

环境工程的研究内容是环境资源的质量和可利用性，以及那些会对它们产生影响的废物流。环境资源包括生物生存的地球—大气系统中的所有自然物质。然而，环境工程关注更多的是两种主要的环境流体——水和空气。土壤也受到人们的关注，但是与水和空气相比其受关注的程度要少一些。

环境工程的中心任务是利用环境学以及工程学的方法，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。人们需要做一系列的工作以实现这个目标，如对环境污染做出评价、设计并运行处理工艺和排放控制设施来满足环境质量标准的需要、设计控制战略等，也包括起草环境标准。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。而随着环境工程学的广泛研究，其发展迅速，更向反应工程、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渗透，使其理论体系日趋完善，学科分支日趋扩展，并逐渐建立成为具有鲜明特色的独立的学科体系。图 1-1 所示为环境工程学的学科体系。

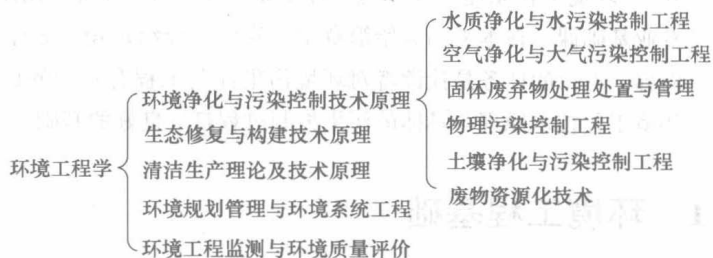


图 1-1 环境工程学的学科体系

1.2 污染治理与单元操作

1.2.1 水污染控制工程

水污染控制工程，是以工程技术措施防止、减轻乃至消除水环境的污染，改善和保持水环境质量，保障人民健康，以及有效地保护和合理地综合利用水资源。它主要是由给水与排水工程特别是水处理工程发展起来的。给水处理的目的是将水源取来的水经过处理后使之满足特定的使用用途。而所采用的处理工艺随水源的不同和应用目的的不同而有所变化。排水处理即将使用过的水进行废水处理。废水在被排放到环境之前，需要收集起来用物理、化学和生物的方法进行处理。需要使用何种特定的废水处理工艺取决于水的使用情况和处理后的废水排放到何处。

最初，人们将生活和生产中产生的废水随意地排放，致使庭院、街道等污秽不堪，影响了人们的正常生活，因此人们开始探索污水的排放方式，出现了渗坑、渗井。而这种排放方式仅仅把污水从地面排放转移为地下排放，仍会对地下水进行污染。大约公元前 3750 年前，在印度的尼普尔人们修建了拱形水道。我国早在公元前 2000 多年前在河南淮阳就设有给排水管道。在早期的欧洲，随着工商业的发展，城市人口不断增加，污水、污物也随之增多，而

且随意排放，导致城市及其附近的水体的环境卫生日益恶劣，霍乱、痢疾等传染病盛行。这与缺乏必要的下水道系统，地下饮用水源受到污染有直接的关系。于是从19世纪初开始，在欧美一些大城市开始建造下水道工程。因此，水质工程从历史上看具有两个主要的目标：一个是提供外观和口味都良好的饮用水，第二是防止流行病通过饮用水传播。水质工程的另外一个重要目标是晚些时候才出现的，即保护我们的自然环境免受废水污染的不利影响。

氧化塘是另一种自然处理方法，其利用自然生长的藻菌共生系统对污水进行自然生物处理。我国在2000多年前就利用城镇和农村附近的水塘处理污水和人畜粪便，并通过繁殖藻类、水草等用于养鱼、养鸭、鹅等。随着工业不断发展，产生的工业废水的量越来越大，其中所含污染物的种类和数量也越来越多，包括重金属、放射性核素、有机毒物等，其中有些是致癌、致畸和致突变物质。因此人们积极研究、开发和应用了一些经济、节能和有效的单元处理方法，如化学沉淀、吸附、溶剂萃取、蒸发浓缩、电解、膜分离、氧化还原等。水处理方法种类繁多，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见表1-1。

表 1-1 水的物理、化学、生物处理法的原理

物理法		化学法		生物法		
处理方法	主要原理	处理方法	主要原理	处理方法	主要原理	
沉淀	重力沉降作用	中和法	酸碱反应	好氧 处理法	活性污泥法	生物吸附、 生物降解
离心分离	离心沉降作用	化学沉淀法	沉淀反应、固液分离		生物膜法	
气浮	浮力作用	氧化法	氧化反应		流化床法	
过滤（砂滤等）	物理阻截作用	还原法	还原反应	生态 技术	氧化塘	生物吸附、 生物降解
过滤（筛网过滤）	物理阻截作用	电解法	电解反应		土地渗滤	生物降解、 土壤吸附
反渗透	渗透压	超临界分解法	热分解、氧化还原反应、游离基反应等		湿地系统	生物降解、 土壤吸附、 植物吸附
膜分离	物理截留等	汽提法	污染物在不同相间的分配	厌氧 处理法	厌氧消化池	生物吸 附、生物降 解
蒸发浓缩	水与污染物的 挥发性差异	吹脱法	污染物在不同相间的分配		厌氧接触法	
		萃取法	污染物在不同相间的分配		厌氧生物滤池	
		吸附法	界面吸附	高效厌氧反应器		
		离子交换法	离子交换	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	
		电渗析法	离子迁移			
混凝法	电中和 吸附架桥作用					

物理法是利用物理作用在处理过程中不改变污染物的化学性质而分离水中污染物的一类方法；化学法是利用化学反应的作用，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。

1.2.2 大气污染控制工程

大气污染控制是一门综合性很强的技术, 影响大气环境质量的因素很多, 仅考虑各个污染源的单项治理是不够的, 必须考虑区域性的综合防治, 从各个单元的治理过渡到区域的治理。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大气态污染物(图 1-2)。空气中的污染物不但能引起各种疾病, 危害人体健康, 还会引起大气组分的变化, 导致气候变化, 从而影响树木、农作物等的生长。

对主要大气污染物的分类统计表明, 其主要来源有 3 大方面: 燃料燃烧、工业生产过程和交通运输。前两类污染源通称为固定源, 交通运输工具(机动车、火车、飞机等)则称为流动源。

自 20 世纪 70 年代的能源危机以来, 为了节约能源, 多国普遍开始建造密闭性房屋以增加保暖效果。室内空调的普遍采用和室内装潢的流行, 都严重影响着室内空气质量。国外学者调查表明室内空气污染物种类已高达 900 多种, 主要包括甲醛等挥发性有机物、 O_3 、 CO 、 CO_2 、氡及其子体等。

近几十年来开始受到人们关注的几种其他空气污染问题概述如下:

(1) 酸沉降 酸沉降是指大气中的酸性物质以降水的形式或者在气流作用下迁移到地面的过程。酸沉降包括“湿沉降”和“干沉降”。湿沉降通常指 pH 值低于 5.6 的降水, 包括雨、雪、雾、冰雹等各种降水形式。最常见的就是酸雨。干沉降是指大气中的酸性物质在气流的作用下直接迁移到地面的过程。美国对于酸沉降的研究和立法所做的努力, 大部分都是集中在治理中西部发电用煤炭燃烧所产生的含硫物质上, 这些含硫物质导致了东部一些州酸沉降的发生。

(2) 平流层的臭氧损耗 氯氟烃(CFCs)被广泛用做空调和冰箱的工作流体, 它们也被用做气溶胶喷雾推进剂和发泡剂。经过这些使用途径后, 大量的氯氟烃被排放到大气中。在低层大气中氯氟烃是不起反应的, 可是, 一旦到达距地球表面 15~50km 的高空, 受到紫外线的照射, 就会生成新的物质和氯离子, 氯离子可发生一系列破坏多达上千到十万个臭氧分子的反应, 而本身不受损害。这样, 臭氧层中的臭氧被消耗得越来越多, 臭氧层变得越来越薄, 局部区域如南极上空甚至出现臭氧层空洞。

(3) 有害空气污染物 1990 年美国的《清洁空气法修正案》中有一部分内容明确指定了 189 种物质为有害空气污染物(HAPs)。这项法规要求那些每年排放某种有害空气污染物的量超过 10t, 或所有的有害空气污染物的量之和超过 25t 的排放源, 必须使用最大可达控

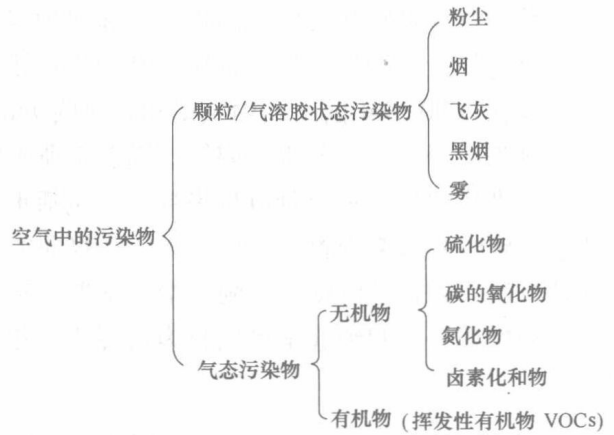


图 1-2 空气中的污染物分类

制技术 (MACT) 来减少污染物的排放。

(4) 生物质烹调用炉 在世界范围内, 最大的空气污染问题可能是在发展中国家的农村地区, 烹调用炉燃烧的排放物。通常情况下, 没有烟道或通风口, 燃烧后产生的副产物直接被排放到生活空间中。在做饭期间, 室内空气中一氧化碳、悬浮颗粒物和苯并[α]芘的含量经测量要大大高于那些受污染的城市空气。

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; 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。常见的空气净化与废气处理技术见表 1-2。

表 1-2 空气净化与废气处理技术

处 理 技 术	主 要 原 理
机械除尘	重力沉降作用、离心沉降作用
过滤除尘	物理阻截作用
静电除尘	静电沉降作用
湿式除尘	惯性碰撞作用、洗涤作用
物理吸收法	物理吸收
化学吸收法	化学吸收
吸附法	界面吸附作用
催化氧化法	氧化还原作用
生物法	生物降解作用
燃烧法	燃烧反应
稀释法	扩散

1.2.3 土壤污染控制工程

通过各种途径输入土壤环境中的物质种类十分繁多, 有的是有益的, 有的是有害的, 有的在少数情况下是有益的, 而在多数情况下是有害的; 有的虽无益, 但也是无害。我们把输入土壤环境中的足以影响土壤环境正常功能, 降低作物产量和生物学质量, 有害于人体健康的那些物质, 统称为土壤环境污染物。根据污染物的性质, 可以把土壤污染物大致分为无机污染物和有机污染物两大类。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。

根据土壤环境主要污染物的来源和土壤环境污染的途径, 我们可以把土壤环境污染的发生类型归纳为:

(1) 水质污染型 污染源主要是工业废水、城市生活废水和受污染的地面水体。经由水体污染所造成的土壤环境污染, 其分布特点是: 由于污染物质大多以污水灌溉形式从地表进入土体, 所以污染物一般集中于土壤表层。但是随着时间的延续, 某些污染物可随水自上

向土体下部迁移，一直到达地下水层。它的特点是沿已被污染的河流或干渠呈树枝状或呈片状分布。

(2) 大气污染型 土壤环境污染物来自被污染的大气。经由大气的污染而引起的土壤环境污染，主要表现在：工业或民用煤的燃烧所排放出的废气中含有大量的酸性气体；工业废气中的颗粒状浮游物质（包括飘尘）；炼铝厂、磷肥厂、砖瓦窑厂等排放的含氟废气，既会直接影响周围农作物，又会造成土壤的氟污染；原子能工业、核武器的大气层试验产生的放射性物质随降雨、降尘而进入土壤，对土壤环境产生放射性污染。

(3) 固体废弃物污染 在土壤表面堆放或处理处置固体废物、废渣，不仅占用大量耕地，而且可以通过大气扩散或降水淋滤使周围地区的土壤受到污染。其污染特征属点源性质，主要是造成土壤环境的重金属污染，以及油类、病原菌和某些有害有机物的污染。

(4) 农业污染型 农业污染型就是由于农业生产的需要而不断地使用化肥、农药、城市垃圾堆肥等引起的土壤环境污染。其中主要污染物质是化学农药和污泥中的重金属。污染物质主要集中于表层或耕层，其分布比较广泛，属于面源污染。

(5) 综合污染型 对于同一区域受污染的土壤，其污染源同时来自受污染的地面水体和大气，或同时遭受固体废物，以及农药、化肥的污染。因此，土壤环境的污染往往是综合污染型的。

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 1-3 列出了几种代表性的土壤污染控制技术。

表 1-3 土壤污染控制技术

处 理 技 术	主 要 原 理
客土法	稀释作用
隔离法	物理隔离（防止扩散）
清洗法（萃取法）	溶解作用
吹脱法（通气法）	挥发作用
热处理法	热分解作用、挥发作用
电化学法	电场作用（移动）
焚烧法	燃烧反应
微生物净化法	生物降解作用
植物净化法	植物转化、植物挥发、植物吸收/固定

1.2.4 危险废物管理

危险废物又称为“有害废物”、“有毒废渣”。关于危险废物的定义，各国、各组织有自己的提法，在国际上还没有形成统一的意见。

人类接触危险废物的历史已经相当悠久了。自然界本身就存在着许多有害物质，但这些危险物质的数量以及其和人类的接触是极其有限的。工业革命在欧洲兴起并迅速在世界各地蔓延发展至今，它给人类带来的不仅是超过历史上任何时期的物质文明发展，同时还带来了超过所有时期产生数量总和的危险废物。危险废物之所以会引起危害主要是由于这些废物具

有危害特性，这些特性主要包括可燃性、腐蚀性、急性毒性、浸出毒性、反应性、传染性、放射性等。

危险废物的管理包括两个主要目标。一个目标是开发和应用正确使用、处理和处置危险物质的方法，以防止其造成污染。过去二十几年来在正确管理危险废物方面已经取得了巨大的进步。第二个目标是识别和修复由于过去不适当的使用、储存和处置危险废物而被污染的废物场。表 1-4 列出了几种危险废物的处理方法及原理。

表 1-4 几种危险废物的处理方法及原理

处 理 技 术	主 要 原 理
焚烧	燃烧反应
固化/稳定化	用适当的添加剂与污染物混合，以降低其毒性并减小迁移率
化学浸取	置换反应、氧化还原反应、配合反应
生物浸取	微生物的生长代谢、淋溶作用、吸附作用、转化作用

1.3 生物过程

1.3.1 好氧悬浮生长处理技术

好氧生物处理是在有氧的情况下，利用好氧微生物（主要是好氧菌，包括兼性微生物）的作用来进行的。由于微生物具有来源广、易培养、繁殖快、对环境适应性强、易变异等特性，因此在使用上能较容易地采集菌种进行培养增殖，并在特定条件下进行驯化使之适应有毒工业废水的水质条件。微生物的生存条件温和，新陈代谢过程中不需高温高压，它是不需投加催化剂的催化反应，用生化法促使污染物的转化过程与一般化学法相比优越得多。

除活性污泥法外，生物滤池、生物转盘、污水灌溉和生物塘等也都是废水好氧处理的方法。向生活污水注入空气进行曝气，并持续一段时间以后，污水中即生成一种絮凝体。这种絮凝体主要是由大量繁殖的微生物群体所构成，它有巨大的表面积和很强的吸附性能，称为活性污泥。活性污泥由有活性的微生物、微生物自身氧化的残留物、吸附在活性污泥上不能被生物降解的有机物和无机物组成。其中微生物是活性污泥的主要组成部分。活性污泥中的微生物又是由细菌、真菌、原生动物、后生动物等多种微生物群体相结合所组成的一个生态系统。

活性污泥在运行中最常见的故障是在二次沉淀池中泥水的分离问题。造成污泥沉降性问题的原因从效果上分类有污泥膨胀、微小絮体、不絮凝、起泡沫和反硝化。所有的活性污泥沉降性问题，皆因污泥絮体的结构不正常造成。活性污泥颗粒的尺寸的差别很大，其幅度从游离的个体细菌的 $0.5 \sim 5.0 \mu\text{m}$ ，直到直径超过 $1000 \mu\text{m}$ (1mm) 的絮体。污泥絮体最大尺寸取决于它的粘聚强度和曝气池中紊流剪切作用的大小。

活性污泥的净化过程与机理分为三个部分：初期去除与吸附作用、微生物的代谢作用和絮凝体的形成与凝聚沉降。

(1) 初期去除与吸附作用 它引起了污水与活性污泥接触后很短的时间内就出现了很高的有机物 (COD) 去除率的现象。由于污泥表面积很大且表面具有多糖类粘质层，因此，

污水中悬浮的和胶体的物质是被絮凝和吸附去除的。

(2) 微生物的代谢作用 在有氧的条件下, 活性污泥中的微生物以污水中各种有机物作为营养, 将一部分有机物合成新的细胞物质, 将另一部分有机物进行分解代谢, 最终形成 CO_2 和 H_2O 等稳定物质。

(3) 絮凝体的形成与凝聚沉降 为了使菌体从水中分离出来, 现多采用重力沉降法。如果每个菌体都处于松散状态, 由于其大小与胶体颗粒大体相同, 它们将保持稳定悬浮状态, 沉降分离是不可能的。为此, 必须使菌体凝聚成为易于沉降的絮凝体。絮凝体的形成是通过丝状细菌来实现的。

1.3.2 厌氧生物处理技术

长期以来好氧生物处理技术, 尤其是活性污泥法一直是我国城市污水处理厂的主体工艺, 它具有处理效率高、出水水质好的特点, 但它也存在能耗高、运行费用大、剩余污泥产量多等缺点。随着大批城镇污水处理厂建设事业的发展, 急需开发能耗低、剩余污泥产量少、适合中小型污水处理厂的新工艺。厌氧生物处理技术因其具有能耗低、污泥产量少的特点, 在许多发展中国家的城市污水处理中得到广泛应用。厌氧生物处理工艺传统上称之为厌氧消化, 也称污泥消化。过去它多用于城市污水处理厂的污泥、有机废料以及部分高含量有机废水的处理。20 世纪 50 年代后, 随着环境污染的加剧和全球性能源危机的日益突出, 在废水处理领域内, 人们开始对厌氧生物处理工艺产生了新的认识和估价。尤其是 20 世纪 70 年代以来, 生物相分离技术提出以后, 研究开发的第二代厌氧生物处理工艺和装置, 使废水厌氧生物处理系统的有机负荷率和处理效率大大提高, 进一步拓展了厌氧生物处理的应用领域。厌氧生物处理方法和基本功能有酸发酵和甲烷发酵。

废水厌氧生物处理是指在无分子氧条件下通过厌氧微生物的作用, 将废水中的各种复杂有机物分解转化成甲烷和二氧化碳等物质的过程, 也称为厌氧消化。与好氧过程的根本区别在于不以分子态氧作为受氢体, 而以化合态氧、碳、硫、氮等作为受氢体。厌氧生物处理是一个复杂的微生物化学过程, 依靠三大主要类群的细菌, 即水解产酸细菌、产氢产乙酸细菌和产甲烷细菌的联合作用完成。传统观点认为, 有机物的厌氧生物处理分为两个阶段: 产酸(或酸化)阶段和产甲烷(或甲烷化)阶段。产酸阶段几乎包括所有的兼性细菌; 产甲烷阶段的细菌主要为产甲烷细菌。Bryant 认为, 厌氧消化过程划分为三个连续的阶段, 即水解酸化阶段、产氢产乙酸阶段和产甲烷阶段。

按微生物生长状态分为厌氧活性污泥法和厌氧生物膜法; 按投料、出料及运行方式分为分批式、连续式和半连续式; 厌氧活性污泥法包括普通消化池、厌氧接触工艺、上流式厌氧污泥床反应器等; 厌氧生物膜法包括厌氧滤池、厌氧流化床、厌氧生物转盘等。

根据厌氧消化中物质转化反应的总过程是否在同一反应器中并在同一工艺条件下完成, 又可分为一步厌氧消化与两步厌氧消化等。

1.3.3 生物脱氮除磷技术

污水生物处理主要是指利用微生物的生命活动过程, 对废水中的污染物进行转移和转化, 从而使废水得到净化的处理方法。通过微生物酶的作用, 在好氧条件下污染物最终被分解成 CO_2 和 H_2O ; 在厌氧条件下污染物最终形成的则是 CH_4 、 CO_2 、 H_2S 、 N_2 、 H_2 和 H_2O 以

及有机酸和醇等。

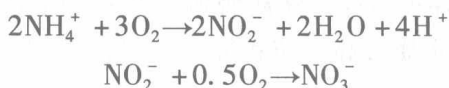
1. 生物脱氮

生物脱氮就是利用适当的运行方式，将自然界中的氮循环现象运用到废水生物处理系统中，从而取得废水中脱氮的效果。生物处理过程中，废水中的含氮有机物首先被异养型微生物氧化分解为氨氮，然后由自养型硝化细菌将氨氮转化为 NO_3^- ，最后再由反硝化细菌将 NO_3^- 还原转化为 N_2 和 NO_2 ，从而达到脱氮的目的。

(1) 氨化作用 含氮有机物经微生物降解释放出氨的过程，被称为氨化作用。在未处理的废水中，含氮化合物主要以有机氮的形式存在。它们在氨化菌的作用下，发生氨化反应，其反应式为



(2) 硝化作用 硝化作用是由氨到 NO_3^- 的生物氧化过程，而 NO_2^- 为反应过程中的主要的中间产物。首先，在亚硝酸菌的作用下，氨转化为 NO_2^- ，称为氨化作用（矿化作用），这是有机氮转化为氨的生物转化形式；在硝酸菌的作用下， NO_2^- 进一步转化为 NO_3^- 。反应式为

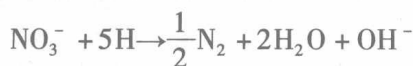


总的反应方程式为



亚硝酸菌和硝酸菌为好氧自养菌，以无机碳化合物为碳源，从 NH_4^+ 或 NO_2^- 氧化反应中获取能量。

(3) 反硝化作用 反硝化是异养型兼性厌氧菌，在缺氧的条件下，以硝酸盐氮为电子受体，以有机物为电子供体进行厌氧呼吸，将硝酸盐氮还原为 N_2 或 N_2O ，同时降解有机物的过程。参与这一反应的微生物是反硝化细菌。反应式为



2. 生物除磷

生物除磷就是利用聚磷菌一类的细菌，过量地、超出其生理需要地从外部摄取磷，并将其以聚合形态储藏在体内，形成高磷污泥排除系统，从而达到从废水中除磷的效果。

(1) 厌氧——好氧除磷工艺 主要是通过排出富含磷的剩余污泥，来达到除磷的目的。它的优点是：水力停留时间比较短；BOD 的去除率大致与一般的活性污泥系统相同；磷的去除率大致在 76% 左右；沉淀污泥含磷率约为 4%，污泥的肥效好；混合液的 SVI 值低于 100，易沉淀，不膨胀；同时工业流程简单，建设费用及运行费用都较低；而且厌氧反应器能够保持良好的厌氧状态。其缺点是除磷率难以进一步提高，且在沉淀池内容易产生磷的释放现象。

(2) Phostrip 工艺 与厌氧-好氧除磷工艺相比，Phostrip 工艺除磷效果很好，处理水中含磷量一般都低于 1mg/L；产生的污泥含磷量高，适于作肥料；可以根据 BOD/P 值来灵活

地调节回流污泥与混凝污泥的比例。但是本工艺流程复杂，运行管理比较麻烦，建设和运行费用高。

3. 生物脱氮

(1) 活性污泥脱氮系统 活性污泥法脱氮传统工艺是以氨化、硝化和反硝化这三个反应过程为基础的三级活性污泥法。在第一级曝气池内，废水中的 BOD、COD 被去除，有机氮被转化为 NH_3 或 NH_4^+ ；废水经沉淀后进入第二级硝化曝气池，在这里进行硝化反应，使 NH_3 及 NH_4^+ 氧化为 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ ；在第三级的反硝化反应器内 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 被最终还原为氮气，并逸往大气。在这一级应采取厌氧-缺氧交替的运行方式。

这种系统由于将污泥分成数级分隔开来，各级构筑物中生物相较单一，去氮、硝化和反硝化作用都比较稳定，处理效果好。但是处理设备多，造价高，管理不便。

根据脱氮时所用的碳源，可将传统的活性污泥法脱氮系统分为内源碳和外加碳源两类。在传统的多级工艺上，还开发了单级污泥系统，就是将去碳和硝化在一个曝气池中进行。

缺氧-好氧活性污泥法脱氮工艺是将反硝化反应器放在了系统的最前端，故又称前置反硝化生物脱氮系统。反硝化、硝化和去碳是在两个不同的反应器内分别完成的。与传统的活性污泥脱氮系统相比，缺氧-好氧活性污泥法脱氮工艺有如下优点：无需外加碳源；可不另行投碱以调节 pH 值；出水水质较高；流程简单，建设费用和运行费用较低。目前，这种工艺被广泛应用。

(2) 生物膜脱氮系统 生物膜法脱氮工艺至今大多数还处于小试、中试及半生产性试验阶段。生物滤池、生物转盘、生物流化床等常用的生物膜法处理构筑物均可设计使其具有去除含碳有机物和硝化/反硝化功能。目前所研究的生物膜脱氮系统几乎都是将硝化和反硝化分离开来。在好氧去碳和硝化部分，可以使用普通的好氧生物滤池，也可以使用普通的活性污泥曝气池；而缺氧的反硝化反应器，可以使用缺氧的生物滤池，也可以使用缺氧的生物转盘及缺氧生物流化床。同活性污泥法一样，反硝化反应器可以在去碳、硝化反应器的前面，也可以在后面。

4. 同步脱氮除磷工艺

A^2/O 工艺为厌氧-缺氧-好氧脱氮工艺的简称，这是一种典型的应用广泛的生物脱氮除磷的工艺。

污水首先进入厌氧反应器与回流污泥混合，在兼性厌氧发酵菌的作用下将部分易生物降解的大分子有机物转化为乙酸，发生氨化反应；聚磷菌在吸收乙酸的同时释放出体内的磷。在缺氧反应器中，反硝化菌利用污水中的有机物和经混合液回流而带来的硝酸盐进行反硝化，同时去碳脱氮。在好氧反应器中，有机物含量相当低，有利于自养硝化菌生长繁殖，进行硝化反应，同时聚磷菌过量摄取磷。最后，通过沉淀，排除剩余污泥达到除磷的目的。

1.4 背景知识和概念

1.4.1 含量和其他度量单位

1. 含量

含量有多种表示方法。在含有组分 A 的混合物中，A 的含量可以用单位体积混合物中

含有组分 A 的质量或物质的量 (mol) 表示, 1 mol 等于元素的阿伏加德罗常数: $N_A = 6.02 \times 10^{23}$ 。为了方便起见, 1 mol 化学元素或化合物的质量等于它的相对原子质量或相对分子质量, 单位为 g。流体体积最常用的表达方式是立方厘米 (cm^3)、升 (L) 或立方米 (m^3), $1 \text{m}^3 = 1000 \text{L} = 10^6 \text{cm}^3$ 。因而, 表示水中污染物含量常用的单位是 mg/L 或 mol/L , 后者常用特殊符号 M 来表示, 称为物质的量浓度。空气中表示组分含量的单位通常用 $\mu\text{g/L}$ 或 mol/m^3 。含量也可以用组分 A 的量与混合物总量或混合物中惰性组分量的比值表示。

2. 质量浓度与物质的量浓度

(1) 质量浓度 单位体积混合物中某组分的质量称为该组分的质量浓度, 以符号 ρ 表示, 单位为 kg/m^3 。组分的质量浓度定义式为

$$\rho = m/V$$

式中 m ——混合物中组分的质量 (kg);

V ——混合物的体积 (m^3)。

若混合物由 N 个组分组成, 则混合物的总质量浓度为

$$\rho \sum_{i=1}^N \rho_i$$

(2) 物质的量浓度 以单位体积溶液里所含溶质的物质的量来表示溶液组成的物理量, 叫做溶质的物质的量浓度。

1.4.2 物质衡算和能量衡算

物质守恒是环境工程中最重要原理。其基本思想很简单, 那就是: 物质既不会凭空产生, 也不会通过迁移和转化过程而消失。在工业生产的过程中, 投入的原料不可能全部转化成产品, 会有一部分废弃物排放到环境中。这些废弃物则在不同的环境条件下, 以不同的种类、形态、数量、含量、排放方式、去向、时间和速率进入环境。但随着科技的进步与发展, 过去的废物在今天可能会变废为宝。

物质衡算是依据质量守恒定律, 进入与离开某一操作规程的物料质量之差, 等于该过程中累积的物料质量, 即

$$\text{输入量} - \text{输出量} = \text{累积量}$$

对于练习操作的过程, 若各物理量不随时间改变, 即处于稳定存在状态时, 过程中不应有物料的积累。则物料衡算关系为

$$\text{输入量} = \text{输出量}$$

我们可以把物质守恒应用到流体存在于开放或封闭的容器内的环境系统中。一个开放的容器允许与周围环境有物质交换, 而一个封闭容器的内容物是独立的。一个容器可以代表一个实际存在的器皿或罐子, 也可以简单地代表空间中所选定的某一受控体积。图 1-3 列出了用于表示环境系统的几种典型的容器及其物质流程图。

常见的应用物质守恒定理的一些物质及其属性见表 1-5。