



高等学校教材

水污染控制工程

赵庆良 任南琪 主编



化学工业出版社
教材出版中心

高 等 学 校 教 材

水 污 染 控 制 工 程

赵庆良 任南琪 主编



化 学 工 业 出 版 社
教 材 出 版 中 心

· 北 京 ·

(京) 新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

水污染控制工程/赵庆良, 任南琪主编. —北京: 化学工业出版社, 2005. 3
高等学校教材
ISBN 7-5025-6430-6

I. 水… II. ①赵…②任… III. 水污染-污染控制-高等学校-教材 IV. X52

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 012218 号

高等学校教材

水污染控制工程

赵庆良 任南琪 主编

责任编辑: 王文峡

文字编辑: 荣世芳

责任校对: 陈 静 于志岩

封面设计: 于剑凝

*

化学工业出版社
教材出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话: (010) 64982530

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

*

新华书店北京发行所经销

大厂聚鑫印刷有限责任公司印刷

三河市东柳装订厂装订

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 28 $\frac{3}{4}$ 字数 783 千字

2005 年 5 月第 1 版 2005 年 5 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-6430-6/G · 1638

定 价: 45.00 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

前言

环境问题是国民经济发展中备受瞩目的重大问题之一，正在全面、深刻地影响着人们的社会生活。环境恶化已经成为导致人类疾病和死亡的主要因素，因而 21 世纪将是人类与环境污染和生态破坏决战的世纪。

在众多的环境问题中，水体污染和水资源短缺将是今后相当长一段时间内全球最严重的问题之一。例如中国 2/3 的湖泊受到不同程度的富营养化污染危害，七大水系 63% 的河段因受到不同程度的污染而失去了饮用水功能。水污染正从东部向西部发展，从支流向干流延伸，从城市向农村蔓延，从地表向地下渗透，从区域向流域扩散。据国家环境保护局披露：全中国 7 条大流域面临的严重问题是水体污染和水资源短缺，主要河流有机污染普遍，主要湖泊富营养化严重。七大水系污染程度由重到轻顺序为：海河、辽河、黄河、淮河、松花江、长江、珠江。辽、淮、黄、海 4 条河流都有 70% 以上的河段受到污染。

水体污染和地表水资源的贫乏，加速了对地下水的掠夺式开发，这不仅导致全国目前已形成多个地下水区域性“降落漏斗”，而且高强度的地表水及陆源污染的渗漏，使得地下水水质日益恶化，许多地方的井水不能食用。

中国的淡水资源虽然较丰富，地表水资源总量居世界第 6 位，但由于人口众多，人均水资源占有量远低于世界平均水平，占第 110 位，还不到世界人均值的 1/4，中国被列为世界人均水资源缺乏的 13 个国家之一。加上水资源分布不均和受到严重污染，水资源不足的状况还会加剧。近 20 年来，水资源缺乏和不合理利用问题日益突出，已成为社会经济发展的制约因素。可以说，中国水污染已突破了最后的防线，水污染不治，中华民族将没有明天。

工业污染是水环境恶化的主要原因之一。由于国内工业技术水平普遍较低，工业结构不合理，粗放型经济增长方式尚未根本改变，全国县及县以上企业的各类污染物排放仍呈增长的总趋势。经常存在一家企业污染一条河、污染一片天的现象。此外，生活污水是水污染的另一主要来源。随着生活水平的提高，日常污水排放数量越来越多，已占有废水排放量的 1/3 以上。水污染造成严重的社会经济问题，这表现在城乡居民饮用水安全受到威胁；污水灌溉造成土地污染，导致所产粮食中有毒物质积累；污染区居民的肠道疾病率、癌症病率、婴儿先天畸变率等都比较高。最后，中国是发展中国家，城市基础设施落后，在环保方面的投入远远不及西方发达国家，因而城市污水处理率低下，由此造成不同程度的水环境污染。

基于中国水污染和水资源短缺的现状，如何在短时期内有效地控制和从根本上解决中国水污染问题，是每一位环境保护工作者肩负的重大使命之一。本书编写的宗旨就是能使学生们全面地了解有关水污染现状与危害、系统地掌握废水中各类污染物去除的技术与工艺以及水回用的途径与策略等。期望本书的出版能够为中国水污染治理与环境改善起到积极的作用。

本书由赵庆良和任南琪主编，其中任南琪承担了第 8 章的编写，其余章节均由赵庆良编写。此外，参加本书部分编写和整理的还有林虹、李巍（第 1 章），刘雪雁（第 2 章），管风伟（第 3 章），张晓红（第 4 章），蔡萌萌、范翔（第 5 章），缪佳（第 6 章），赵赫（第 9 章），李巍（第 10 章），尤世界、李巍（第 11 章），齐旭东（第 12 章），刘志刚（第 13 章）。

由于知识水平和编著水平有限，经验不足，加之时间仓促，书中错误和不妥之处在所难免，热忱欢迎广大读者批评指正。

赵庆良 任南琪
2005 年 1 月于哈尔滨

目 录

1 概论	1
1.1 水污染种类与现状	1
1.1.1 水污染种类	1
1.1.2 水污染现状	3
1.2 水污染危害与控制意义	4
1.2.1 水污染危害	4
1.2.2 水污染控制意义	4
1.3 水污染控制方法	5
1.3.1 清洁生产	5
1.3.2 废水处理工艺、现状与发展方向	5
1.3.3 固体与生物固体处理工艺、现状与发展方向	8
1.3.4 处理后废水的回收与再用	9
复习思考题	9
参考文献	9
2 水污染的组分及衡量指标	11
2.1 物理组分及特征指标	11
2.1.1 色度	11
2.1.2 浊度	12
2.1.3 温度	12
2.1.4 密度	12
2.1.5 固体与粒径分布	12
2.1.6 吸光度与透光率	13
2.1.7 电导率	13
2.1.8 臭味	14
2.2 化学组分及指标	14
2.2.1 pH 值	14
2.2.2 碱度	15
2.2.3 氮	15
2.2.4 磷	17
2.2.5 硫	18
2.2.6 氯化物	19
2.2.7 金属	19
2.3 有机污染物质及指标	22
2.3.1 有机物含量测定	22
2.3.2 生化需氧量 (BOD)	23
2.3.3 化学需氧量 (COD)	24
2.3.4 总有机碳 (TOC)	24
2.3.5 BOD、COD 和 TOC 的相互关系	25
2.3.6 理论耗氧量 (ThOD)	25
2.3.7 可吸收紫外的有机组分	25
2.3.8 油和油脂	26
2.3.9 表面活性剂	26
2.3.10 特殊的有机化合物	27
2.4 微生物学特征及指标	29
2.4.1 地表水和废水中常见的微生物	29
2.4.2 致病生物	30
2.4.3 指示生物	30
2.4.4 细菌与病毒的计数和鉴定	30
2.4.5 聚合酶链式反应 (PCR)	32
2.5 毒性学特性及指标	32
2.5.1 毒理学实验的意义	33
2.5.2 毒理学实验	33
2.5.3 毒理学实验常用参数	34
复习思考题	35
参考文献	35
3 废水的物理处理工艺	36
3.1 格栅	36
3.1.1 粗格栅	36
3.1.2 细格栅	37
3.1.3 微滤机	38
3.1.4 筛渣的特性与处置	39
3.2 调节池	39
3.2.1 调节池的功能	40
3.2.2 调节池的设计计算	40
3.3 混合及混合器	44
3.3.1 废水处理中的连续快速混合	44
3.3.2 废水处理中的连续混合	45
3.4 重力分离理论	45
3.4.1 颗粒沉降理论	46
3.4.2 不连续颗粒沉降	48
3.4.3 絮凝颗粒的沉降	50
3.4.4 斜板 (管) 沉淀	51
3.4.5 受阻 (分层) 沉淀	53
3.4.6 压缩沉淀	54
3.4.7 加速流场中的重力分离	54
3.5 沉砂池	55
3.5.1 平流式沉砂池	55

3.5.2 曝气沉砂池	57	复习思考题	100
3.5.3 钟式沉砂池	58	参考文献	100
3.5.4 固体脱砂	58	5 废水的好氧生物处理原理	101
3.5.5 砂砾量、特性、处理和处置	59	5.1 废水好氧生物处理概述	101
3.6 初次沉淀池	60	5.1.1 有机物降解的过程与规律	101
3.6.1 沉淀池性能	60	5.1.2 微生物在废水处理中的作用	103
3.6.2 沉淀池的形式与构造及其设计	60	5.1.3 废水好氧生物处理的工艺类型	103
3.6.3 固体和浮渣的定性和定量	66	5.2 微生物的组成结构、分类与鉴定	104
3.7 快速澄清池	66	5.2.1 细胞成分	104
3.7.1 强化颗粒絮凝	67	5.2.2 细胞结构	105
3.7.2 渣砾层絮凝和沉淀的分析	67	5.2.3 环境因素	107
3.8 旋流与涡流分离器	67	5.2.4 微生物的分类与鉴定	108
3.8.1 旋流分离原理	67	5.2.5 分子工具的使用	110
3.8.2 旋流与涡流分离器系统与设计	68	5.3 微生物代谢	111
3.9 气浮	70	5.3.1 微生物生长的碳源和能源	111
3.9.1 气浮原理	70	5.3.2 营养和生长因子的需求	112
3.9.2 气浮处理系统与设计	73	5.4 细菌的生长	112
复习思考题	78	5.4.1 细菌的生长与繁殖	112
参考文献	78	5.4.2 生物量及其表征	113
4 废水的化学处理工艺	79	5.4.3 化学计量式用于估算生物量 产率和需氧量	115
4.1 化学中和、结垢控制和稳定化	79	5.4.4 不同条件下生物量合成产率系数	116
4.1.1 pH 值调节	79	5.5 微生物生长动力学	117
4.1.2 结垢潜在性的分析	80	5.5.1 可溶性底物的利用速率	117
4.1.3 结垢控制	81	5.5.2 可溶性底物的生物增长速率	118
4.1.4 稳定化	82	5.5.3 总挥发性悬浮固体和活性生物量	119
4.2 化学混凝	84	5.5.4 底物利用和生物量增长的 动力学系数	119
4.2.1 化学混凝基本原理	84	5.5.5 颗粒有机物质转化为可溶性 底物的速率	120
4.2.2 废水中颗粒的自然性质	86	5.5.6 摄氧速率	120
4.2.3 表面电荷的发生和测量	87	5.5.7 温度对微生物生长的影响	120
4.2.4 颗粒之间的相互作用与脱稳	87	5.6 有机物的好氧生物氧化	120
4.3 化学沉淀	90	5.6.1 有机物好氧氧化的微生物类群	121
4.3.1 化学沉淀法基本原理	90	5.6.2 有机物好氧氧化的化学计量式	121
4.3.2 化学沉淀法除氨	91	5.6.3 生长动力学	121
4.3.3 化学沉淀法除磷	91	5.6.4 环境因素	121
4.3.4 化学沉淀去除重金属和溶解性 无机物质	92	5.7 生物硝化与反硝化	122
4.4 化学氧化	94	5.7.1 生物硝化	122
4.4.1 化学氧化基本原理	94	5.7.2 生物反硝化	125
4.4.2 易于生物降解 (BOD) 与难于生 物降解有机化合物的化学氧化	95	5.8 生物除磷	128
4.4.3 氨的化学氧化	96	5.8.1 生物除磷的微生物学	128
4.5 化学药品的贮存与投加	97	5.8.2 生物除磷的化学计量式	129
4.5.1 化学药品贮存和装卸	97	5.8.3 生长动力学	129
4.5.2 固态、液态与气态化学药品投 加系统	97	5.8.4 环境因素	130

5.9 氧的传递理论	131	6.4.7 生物除磷工艺设计应考虑的因素	167
5.9.1 基本原理	131	6.4.8 生物除磷工艺的控制	168
5.9.2 氧转移速率与供气量的计算	132	6.5 膜生物反应器工艺	169
5.9.3 供氧方式	134	6.5.1 膜生物反应器的特点	169
复习思考题	135	6.5.2 膜生物反应器的分类	170
参考文献	135	6.5.3 膜生物反应器的应用	171
6 废水的悬浮生长好氧生物处理工艺	136	6.5.4 膜污染机理与控制	172
6.1 悬浮生长好氧处理工艺的物料平衡	136	6.5.5 膜生物反应器工艺的处理能力	174
6.1.1 生物量质量平衡	136	6.6 悬浮生长曝气塘	174
6.1.2 底物质量平衡	138	6.6.1 悬浮生长曝气塘的类型	175
6.1.3 混合液活性污泥浓度和活性污泥 产量	139	6.6.2 双动力推流塘系统	176
6.1.4 活性污泥的表现产率	140	复习思考题	176
6.1.5 需氧量	140	参考文献	176
6.1.6 设计运行参数	141	7 废水的附着生长好氧生物处理工艺	178
6.2 有机物氧化和硝化工艺	141	7.1 附着生长处理工艺概述	178
6.2.1 完全混合活性污泥工艺	142	7.1.1 生物膜中的底物通量	179
6.2.2 串联完全混合活性污泥工艺	146	7.1.2 生物膜中的底物质量平衡	179
6.2.3 传统推流式活性污泥工艺	146	7.1.3 底物通量限制	180
6.2.4 高负荷曝气活性污泥工艺	148	7.2 生物滤池	181
6.2.5 分段进水活性污泥工艺	148	7.2.1 生物滤池的一般构造与净化过程	181
6.2.6 接触稳定活性污泥工艺	148	7.2.2 普通生物滤池	182
6.2.7 高纯氧曝气活性污泥工艺	149	7.2.3 高负荷生物滤池	186
6.2.8 传统延时曝气活性污泥工艺	149	7.2.4 塔式生物滤池	190
6.2.9 氧化沟工艺	150	7.2.5 活性生物滤池	191
6.2.10 序批式反应器 (SBR) 工艺	150	7.3 生物转盘	192
6.2.11 循环活性污泥系统 (CAASTM) 工艺	153	7.3.1 构造与特征	192
6.2.12 两段污泥工艺	153	7.3.2 典型工艺流程	193
6.3 生物反硝化脱氮工艺	153	7.3.3 设计与计算	194
6.3.1 前置缺氧反硝化脱氮工艺	153	7.4 淹没式生物滤池	196
6.3.2 后置缺氧反硝化脱氮工艺	157	7.4.1 淹没式生物滤池的构造	197
6.3.3 同步硝化/反硝化脱氮工艺	158	7.4.2 淹没式生物滤池的池型	198
6.3.4 外加碳源的两级硝化/反硝化 脱氮工艺	161	7.4.3 淹没式生物滤池的典型工艺 流程	199
6.3.5 序批式反应器 (SBR) 工艺	162	7.4.4 淹没式生物滤池的设计与计算	199
6.3.6 厌氧硝化回流液的脱氮—— Sharon TM 工艺	163	7.5 生物流化床	201
6.4 生物除磷工艺	163	7.5.1 两相流化床	201
6.4.1 A/O 工艺和 A ² /O 工艺	164	7.5.2 三相流化床	204
6.4.2 UCT 工艺和 Johannesburg 工艺	164	7.6 固定膜-活性污泥的复合工艺	204
6.4.3 改进的 Bardenpho 工艺	165	7.6.1 复合工艺基本原理	204
6.4.4 VIP 工艺	166	7.6.2 复合工艺的载体种类与性能	205
6.4.5 序批式反应器 (SBR) 工艺	166	7.6.3 序批式生物膜反应器	208
6.4.6 PhoStrip TM 工艺	166	7.7 固定膜-稳定塘的复合工艺	209
		7.8 生物膜/悬浮生长联合处理工艺	211
		7.8.1 活性生物滤池 (ABF) 工艺	213
		7.8.2 普通生物滤池/固体接触	

(TF/SC) 工艺	213	工艺条件	243
7.8.3 粗滤池/活性污泥 (RF/AS)		8.6.3 颗粒污泥的性质	246
工艺	214	8.6.4 UASB 反应器的结构设计原理	246
7.8.4 生物滤池/活性污泥 (BF/AS)		8.6.5 UASB 反应器的若干发展	250
工艺	214	8.7 两相厌氧生物处理	252
7.8.5 普通生物滤池/活性污泥		8.7.1 两相厌氧生物处理原理	252
(TF/AS) 工艺	214	8.7.2 两相厌氧生物处理技术	253
复习思考题	215	8.7.3 最适液相末端发酵产物的选择	253
参考文献	215	复习思考题	254
8 废水的厌氧生物处理工艺	219	参考文献	254
8.1 厌氧生物处理的沿革、特征及发展		9 废水的深度处理工艺	256
趋势	219	9.1 废水深度处理概述	256
8.1.1 厌氧生物处理的发展沿革与应用		9.1.1 废水深度处理的必要性	256
现状	219	9.1.2 废水深度处理的应用范围与	
8.1.2 厌氧生物处理的特征	221	评价	256
8.1.3 厌氧生物处理的发展趋势	221	9.2 深度处理技术	257
8.2 厌氧生物处理的基本原理	222	9.2.1 二级处理后废水中的残余成分	257
8.2.1 复杂有机物的厌氧降解	222	9.2.2 深度处理技术的分类	257
8.2.2 水解阶段	223	9.2.3 有机和无机胶体及悬浮固体的	
8.2.3 产酸发酵阶段	223	去除	258
8.2.4 产氢产乙酸阶段	224	9.2.4 溶解性有机与无机污染物质的	
8.2.5 产甲烷阶段	225	去除	258
8.2.6 其他厌氧生物处理过程	227	9.2.5 生物组分的去除	259
8.3 厌氧微生物生态学	229	9.2.6 工艺选择依据和运行数据	259
8.3.1 影响产酸细菌的主要生态因子	229	9.3 过滤	259
8.3.2 影响产甲烷细菌的主要生态		9.3.1 过滤工艺与滤池	259
因子	231	9.3.2 深层过滤	262
8.3.3 影响硫酸盐还原菌的主要生态		9.3.3 表面过滤	270
因子	235	9.3.4 膜过滤工艺	272
8.3.4 厌氧生化反应动力学	236	9.4 吸附	281
8.3.5 厌氧生物处理过程中微生物		9.4.1 吸附原理	281
优势种群的演替及相互关系	237	9.4.2 吸附剂及其再生	283
8.4 悬浮生长厌氧生物处理法	238	9.4.3 活性炭吸附动力学	284
8.4.1 完全混合悬浮生长厌氧消化池	238	9.4.4 活性炭处理工艺的应用	286
8.4.2 厌氧接触法	239	9.4.5 颗粒活性炭接触器的分析和	
8.4.3 厌氧序批式反应器	239	设计	287
8.5 附着生长厌氧生物处理法	239	9.4.6 粉末活性炭吸附器的分析和	
8.5.1 升流式厌氧填充床反应器	239	设计	288
8.5.2 厌氧膨胀床反应器	240	9.4.7 粉末活性炭活性污泥处理法	289
8.5.3 厌氧流化床反应器	241	9.5 离子交换	290
8.5.4 降流式厌氧附着生长反应器	241	9.5.1 离子交换树脂	290
8.5.5 厌氧生物转盘	242	9.5.2 常见的离子交换反应	290
8.6 升流式厌氧污泥层工艺	243	9.5.3 离子交换树脂的交换容量	291
8.6.1 UASB 工艺的工作原理	243	9.5.4 离子交换化学	291
8.6.2 颗粒污泥形成的原理及主要		9.5.5 离子交换的应用	293

9.6 高级氧化工艺	294	10.6.6 紫外辐射消毒的环境影响	326
9.6.1 高级氧化理论	294	10.7 可选消毒技术的比较	326
9.6.2 羟基自由基的产生技术	295	10.7.1 杀菌效果	327
9.6.3 高级氧化工艺的运行	296	10.7.2 消毒技术的优点及不足	327
9.6.4 高级氧化工艺的应用	296	复习思考题	328
复习思考题	297	参考文献	328
参考文献	297	11 固体与生物固体处理、处置和回用	329
10 废水的消毒处理工艺	298	11.1 固体与生物固体概述	329
10.1 消毒理论	298	11.1.1 固体与生物固体的来源、性质 与数量	329
10.1.1 理想消毒剂的性质	298	11.1.2 固体处理的一般工艺流程	333
10.1.2 消毒的方法和手段	298	11.2 污泥和浮渣的抽运	334
10.1.3 消毒机理	299	11.2.1 污泥泵和浮渣泵	334
10.1.4 影响消毒剂效果的因素	299	11.2.2 水头损失	335
10.2 氯消毒	302	11.3 固体与生物固体的预处理	335
10.2.1 氯化物的性质与化学	302	11.3.1 碾磨	335
10.2.2 氯的折点反应	304	11.3.2 筛选	335
10.2.3 消毒工艺变量的测量和报告	306	11.3.3 除砂	335
10.2.4 氯和各种氯化物的杀菌效率	306	11.3.4 混合与贮存	336
10.2.5 影响氯消毒效率的因素	307	11.4 固体与生物固体的浓缩	336
10.2.6 消毒所需氯剂量	309	11.4.1 共沉浓缩	337
10.2.7 氯消毒时副产物的形成及控制	310	11.4.2 重力浓缩	337
10.3 二氧化氯消毒	311	11.4.3 气浮浓缩	338
10.3.1 二氧化氯的性质与消毒作用	311	11.4.4 离心浓缩	339
10.3.2 二氧化氯消毒效果	312	11.4.5 重力带式浓缩	340
10.3.3 二氧化氯消毒时副产物的形成 和控制	313	11.4.6 旋转鼓浓缩	340
10.4 臭氧消毒	314	11.4.7 各种浓缩法的应用	341
10.4.1 臭氧的属性	314	11.5 固体与生物固体的稳定	341
10.4.2 臭氧消毒化学	314	11.5.1 稳定的内涵	341
10.4.3 臭氧消毒系统的构成	315	11.5.2 碱式稳定法	342
10.4.4 臭氧消毒效果	316	11.6 固体与生物固体的厌氧消化	344
10.4.5 臭氧消毒所需剂量	316	11.6.1 工艺原理	344
10.4.6 臭氧消毒时副产物的形成 及控制	317	11.6.2 中温厌氧消化工艺概况	345
10.5 其他化学消毒方法	317	11.6.3 中温厌氧消化的工艺设计	346
10.5.1 过氧乙酸	317	11.6.4 池体设计的选择和混合系统	348
10.5.2 臭氧/过氧化氢	318	11.6.5 提高固体负荷及消化池性 能的方法	350
10.5.3 复合化学消毒工艺	318	11.6.6 气体的产生、收集和利用	350
10.6 紫外 (UV) 辐射消毒	318	11.6.7 消化池的加热	351
10.6.1 紫外辐射的来源	319	11.6.8 高温厌氧消化	352
10.6.2 紫外消毒系统的构成及配置	321	11.6.9 两相厌氧消化	353
10.6.3 紫外辐射的杀菌效果	321	11.7 固体与生物固体的好氧消化	354
10.6.4 紫外剂量的计算	324	11.7.1 工艺概况	354
10.6.5 紫外消毒的准则选取及系统 评价	324	11.7.2 传统的空气好氧消化法	355
		11.7.3 两级消化法	357

11.7.4 自加热高温好氧消化法 (ATAD)	357	12.2 废水的回收及再用处理技术	390
11.7.5 高纯氧消化法	359	12.2.1 废水中污染物质去除技术	390
11.8 固体与生物固体的调节、干化与 脱水	360	12.2.2 水回收的传统废水处理工艺 流程图	390
11.8.1 调节	360	12.2.3 水回收处理的预期效果	391
11.8.2 脱水	362	12.3 回收水的贮存	393
11.8.3 干化	365	12.3.1 蓄水池及相关问题	393
11.9 固体与生物固体的加热干燥	367	12.3.2 敞口及封闭水池的管理对策	394
11.9.1 传热手段	367	12.4 回收水在农田及风景区的浇灌回用	396
11.9.2 加热干燥产物的性质	369	12.4.1 灌溉水的水质评价	396
11.9.3 加热干燥产物的运输和贮存	369	12.4.2 其他问题	398
11.9.4 易燃及易爆危险物	370	12.5 回收水在工业生产中的冷却回用	398
11.9.5 空气污染和臭味控制	370	12.5.1 工业水的用途	399
11.10 固体与生物固体的焚烧	370	12.5.2 冷却塔补充水	399
11.10.1 完全燃烧的基本方式	371	12.5.3 冷却塔的盐水平衡	399
11.10.2 多层炉焚烧	372	12.5.4 冷却塔系统中常见的水质 问题	400
11.10.3 流化床焚烧	372	12.6 回收水在补充地下水的回注应用	400
11.10.4 与市政固体垃圾联合焚烧	373	12.6.1 地下水的回注方法	401
11.10.5 空气污染控制	373	12.6.2 地下水回注的预处理要求	401
11.11 固体与生物固体的堆肥	373	12.6.3 地下水中污染物质的变迁	401
11.11.1 工艺微生物学	374	12.6.4 地下水回注准则	402
11.11.2 工艺概况	374	12.7 回收水的计划间接与直接饮用水 回用	403
11.11.3 设计要点	375	12.7.1 计划间接与直接饮用水回用	403
11.11.4 与市政固体垃圾联合堆肥	376	12.7.2 饮用水回用的标准与最终 目标	403
11.12 生物固体的土地施用	376	12.8 废水回收和回用的规划	404
11.12.1 生物固体处理场地的鉴定和 选择	376	12.8.1 废水回收和回用的市场预测	404
11.12.2 设计负荷率	377	12.8.2 回用水的价格分析	405
11.12.3 施用方法	378	12.8.3 废水回收和回用设施规划	406
11.13 生物固体的运输和贮存	378	复习思考题	407
11.13.1 生物固体的运输方法	378	参考文献	407
11.13.2 生物固体的贮存	379	13 废水处理厂的设计、运行和管理	408
复习思考题	379	13.1 概述	408
参考文献	379	13.1.1 废水的组成分析	408
12 水的回收与再用	381	13.1.2 废水处理厂的设计水量	409
12.1 概述	381	13.1.3 废水处理厂的设计水质	411
12.1.1 废水回收与再用水循环中的 作用	381	13.1.4 废水处理应满足的标准与 要求	412
12.1.2 废水回收与再用的途径	381	13.2 废水处理厂的设计	413
12.1.3 废水回收与再用中的公共健康 及环境问题	384	13.2.1 设计步骤	413
12.1.4 废水回收与再用中的标准	385	13.2.2 废水处理工艺流程的确定	416
12.1.5 废水回收与再用中的风险性 评价	386	13.2.3 设计参数的选择	418
		13.2.4 废水处理厂的厂址选择	422

13.2.5 废水处理厂的平面与高程布置.....	422	简介	438
13.2.6 废水处理厂的附属设施	424	13.4 废水处理厂的能量消耗与提高能源	
13.3 废水处理厂的运行与管理	426	效率的措施	439
13.3.1 废水处理与水质监测	426	13.4.1 能量消耗	439
13.3.2 固体与生物固体处理	430	13.4.2 提高能源效率的措施	440
13.3.3 臭气处理与臭味控制	435	复习思考题	442
13.3.4 废水处理厂的噪声控制	437	参考文献	443
13.3.5 废水处理厂的工艺自动控制			

1 概 论

任何一个地区或环境，只要有人类的日常生活和生产活动存在，就需要从各种天然水体中取用大量的水，并经过或简单或复杂工艺处理以后供生活和生产使用。这些纯净的水在经过使用以后，改变了原来的物理性质或化学成分，甚至丧失了某种使用价值，成为含有不同种类杂质的废水。这些废水如果未经任何处理排放到水环境中，就不可避免地造成水环境的不同性质或不同程度的污染，从而危害人民身心健康，妨碍工农业生产，制约人类社会和经济的可持续发展。废水中的污染物质种类繁多，因原水使用方式的不同，或主要含有有机污染物、或含有无机污染物、亦或含有病原微生物等，更可能多种污染物并存。受污染的水一般成分较为复杂，主要包括物理组分、化学组分、有机污染物质以及微生物和病原微生物等，这些组分多数对人的身体健康有害。为了解决水资源短缺和水环境污染加剧问题，迫使人们必须考虑解决污染的源头控制、废水与生物固体处理和处理后废水的回用等问题。

1.1 水污染种类与现状

1.1.1 水污染种类

人类的活动会把大量的工业、农业和生活废弃物排入水中，使水受到污染。《中华人民共和国水污染防治法》对“水污染”的定义为：水体因某种物质的介入，而导致其化学、物理、生物或者放射性等方面特征的改变，从而影响水的有效利用，危害人体健康或者破坏生态环境，造成水质恶化的现象称为水污染。

水的污染有两类：自然污染与人为污染。当前对水体危害较大的是人为污染。水污染又可根据污染物的不同而分为化学性污染、物理性污染和生物性污染三大类。

1.1.1.1 化学性污染

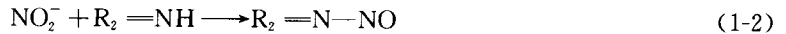
化学性污染是指污染物为化学物品而造成的水体污染。根据污染物的特性，可分为无机有毒物质、有机有毒物质、需氧污染物质、植物营养物质和油类污染物质等五类。

(1) 无机有毒物质 污染水体的无机污染物质有酸、碱和一些无机盐类。酸碱污染具有较强腐蚀性，对管道和构筑物造成腐蚀。排入水体后使水体的 pH 值发生变化，破坏自然缓冲作用，抑制微生物生长，干扰水体自净，使水质恶化、土壤酸化或盐碱化。对渔业水体影响更大，当 pH 值为 5.5 时，一些鱼类不能生存或生殖率下降。

污染水体的无机有毒物质包括金属、非金属及其化合物两类。金属毒物主要是汞、铬、铝、铅、锌、镍、铜、钴、锰、钛、钒、钼、铋等元素的离子或化合物。其中，前四种危害极大。如汞进入人体后转化为甲基汞，会在脑组织积累，破坏神经功能，无药可治，直至严重发作而死亡。金属毒物不能被微生物降解，只能在不同形态间相互转化、分散。其毒性以离子态存在时最为严重，又易被配位体配合或被带负电荷的胶体吸附而四处迁移，不一定都富集于排水口下游的底泥中。金属毒物常被生物富集于体内，富集倍数可达几百至千倍，又通过饮水和食物链，最终毒害人体。它们能与生理高分子物质作用而使之失去活性，也可能积累在某些器官中，导致慢性

中毒，有时造成的危害长达10~20年才显露，严重的会突发致病，导致死亡。

非金属毒物主要有砷、硒、氰、硫、亚硝酸根等。如砷中毒时引起中枢神经紊乱，诱发皮肤癌。水产品都或多或少地被海水与海底淤泥中的砷污染。亚硝酸盐在人体内能与仲胺在厌氧情况下作用生成亚硝胺，反应如下。



(2) 有机有毒物质 污染水体的有机有毒物质主要是指酚、苯、硝基物、胺基物、有机农药(DDT、有机氯及有机磷)、多氯联苯、多环芳烃、合成洗涤剂等人工合成有机化合物。以有机氯农药为例，它具有很强的化学稳定性，在自然环境中的半衰期为十几至几十年。此外，它们都可能通过食物链在人体内富集，危害人体健康。如聚氯联苯、联苯胺、稠环芳烃等都是较强的三致物质(致癌、致畸、致突变)。有机氯农药是疏水亲油物质，能够被胶体颗粒和油粒吸附并随它们在水中扩散，还能在水生生物体内大量富集，使富集在水生生物体内的浓度几千倍甚至几百万倍于水体，然后经食物链进入人体，积累在脂肪含量高的组织中，在达到一定浓度后，即显示出对人体的毒害作用。

(3) 需氧污染物质 废水中凡是能通过生物化学或化学作用而消耗水中溶解氧的物质，统称为需氧污染物。绝大多数的需氧污染物是有机物质。一般情况下，需氧污染物专指有机物。

(4) 植物营养物质 植物营养物质主要是生活与工业废水中含氮、磷等的物质，以及农田排水中的氮和磷。当废水进入受纳水体，使水中N和P的浓度分别超过0.2mg/L和0.02mg/L时，就会引起受纳水体的富营养化，增进各种水生生物(主要是藻类)的活性，刺激它们的异常增殖，这样会造成一系列的危害：藻类占据的空间逐渐增大，鱼类的活动空间变小，死亡藻类将沉积水底，增加水体有机物含量；藻类种类逐渐减少，从以硅藻和绿藻为主转为以繁殖迅速的蓝藻为主，蓝藻不是鱼类的良好饲料，并且有些还会产生毒素；藻类过度生长，将造成水中溶解氧的急剧减少，使水体处于严重缺氧状态，造成鱼类死亡，水体腐败发臭。

(5) 油类污染物质 油类污染物包括石油类和动植物油两种。油类污染物能在水面上形成油膜，隔绝大气与水面，破坏水体的复氧条件。它还能附着于土壤颗粒表面和动植物体表，影响养分的吸收和废物的排出。当水中含油0.01~0.1mg/L，对鱼类和水生生物就会产生影响，当水中含油0.3~0.5mg/L，就会产生石油气味，不适合作为饮用水。

1.1.1.2 物理性污染

物理性污染是指固体物质、温度等造成的水体污染，此外还包括放射性污染。

(1) 固体物质污染 固体污染物的存在不但使水质浑浊，而且使管道及设备阻塞、磨损、干扰废水处理及回收设备的工作。由于大多数废水中都有悬浮物，因此去除悬浮物是废水处理的一项基本任务。

(2) 热污染 温度超过60℃的工业废水(如直接冷却水)，排入水体后，会引起水体的水温升高，形成热污染效应。热污染的危害主要有以下几点。由于水温升高，使水体溶解氧浓度降低，相应的亏氧量(一定温度下水中饱和溶解氧与实际溶解氧浓度差值)随之减少，故大气中的氧向水体传递的速率也减慢。另一方面，由于水温升高，会导致水生生物耗氧速度加快，促使水体中溶解氧更快地被消耗殆尽，水质迅速恶化，造成鱼类和水生生物因缺氧而窒息死亡；可以加速藻类的繁殖，从而加快富营养化的进程；导致水体中的化学反应加快，水温每升高10℃，化学反应加快一倍，从而使水体的物理化学性质如离子浓度、电导率、腐蚀性等发生变化，可能对管道和容器造成腐蚀；加速细菌生长繁殖，增加后续水处理的费用。如取该水体作为给水水源，需要增加混凝剂和氯的投加量，且使水中有机氯化物的量增加。

(3) 放射性污染 放射性污染物是指具有放射性核素的物质通过自身衰变放射出X、α、β、

γ 射线及质子束等造成的污染。废水中的放射性物质主要来自铀、镭等放射性物质和稀土的提纯生产与使用过程，如以核能为动力的企业、稀土冶炼厂、矿物冶炼厂等都会产生一定量的放射性污染的废水。放射性物质进入人体后会继续放出射线，危害机体，诱发癌症和贫血，还对孕妇和婴儿产生遗传性伤害。

1.1.1.3 生物性污染

生活污水，特别是医院污水和某些工业废水污染水体后，往往可以带入一些病原微生物。例如某些原来存在于人畜肠道中的病原细菌（伤寒、副伤寒、霍乱细菌等）都可以通过人畜粪便的污染而进入水体，随水流动而传播。一些病毒（如肝炎病毒、腺病毒等）也常在被污染的水中发现。某些寄生虫病（如阿米巴痢疾、血吸虫病、钩端螺旋体病等）也可通过水进行传播。防止病原微生物对水体的污染也是保护环境、保障人体健康的一大课题。

1.1.2 水污染现状

近年来，随着国民经济和人类社会的不断向前发展，资源浪费、环境污染等一系列问题日益突出。工业企业的迅速发展和城市人口的高度集中导致了世界用水量的迅猛增长，相应地导致了工业废水和生活污水排放量的大幅度增加。

20世纪60年代以来，世界上的水体的污染已经达到了极为严重的程度。据统计，全世界每年至少有 $4200 \times 10^8 \text{ m}^3$ 以上的工业废水排入水体，致使 $1/3$ 的淡水受到不同程度的污染。美国年排放工业废水达 $1500 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，全国52条主要河流和五大湖都遭受了污染，有的成为“臭河”，有的成为“死湖”。如伊利湖的湖水中，汞含量超出标准14倍，不仅鱼类全部绝迹，甚至虫类也不多。日本全国47条主要河流已有23条受到了严重污染，第一大湖琵琶湖沿岸的500多家工厂的废水竟使蓄水量 $275 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的湖的湖水有时变绿，有时变红，有时发臭。加之日本近海地区特别严重的污染，使日本列岛真正成为了“公害列岛”。前苏联废水的年排放量超过 $1000 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。前苏联农业部承认，每年饮水污染造成的经济损失高达66亿美元之多。伏尔加河受到了污染，使著名的鲟鱼近乎绝迹。占世界淡水储量 $1/5$ 的贝加尔湖，最深处1500m，也受到了污染。黑海、里海由于受到沿岸石油工厂工业废水的污染而成了名副其实的“黑海”。

据2003年中国环境状况公报显示，在淡水环境的七大水系407个重点监测断面中，38.1%的断面满足Ⅰ～Ⅲ类水质要求，32.2%的断面属Ⅳ类、Ⅴ类水质，29.7%的断面属劣Ⅴ类水质。其中七大水系干流的118个国控断面中，Ⅰ～Ⅲ类水质断面占53.4%，Ⅳ类、Ⅴ类水质断面占37.3%，劣Ⅴ类水质断面占9.3%。

2003年度七大水系污染程度由重到轻依次为海河、辽河、黄河、淮河、松花江、长江、珠江。海河水系污染严重，劣Ⅴ类水质断面占50%以上；辽河水系总体水质较差，劣Ⅴ类水质断面占40.6%；黄河水系总体水质较差，支流污染普遍严重；淮河干流以Ⅳ类水体为主，支流及省界河段水质仍然较差；松花江水系以Ⅳ类水体为主；珠江水系、长江干流及主要一级支流水质良好，以Ⅱ类水体为主。

2003年全国工业和城镇生活废水排放总量为 $460.0 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，比上年增加4.7%。其中工业废水排放量 $212.4 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，比上年增加2.5%；城镇生活污水排放量 $247.6 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，比上年增加6.6%。废水中化学需氧量（COD）排放总量 $1333.6 \times 10^4 \text{ t}$ ，比上年减少2.4%。其中工业废水中COD排放量 $511.9 \times 10^4 \text{ t}$ ，比上年减少12.3%；城镇生活污水中COD排放量 $821.7 \times 10^4 \text{ t}$ ，比上年增加5.0%。废水中氨氮排放总量 $129.7 \times 10^4 \text{ t}$ ，比上年增加0.7%。其中工业废水中氨氮排放量 $40.4 \times 10^4 \text{ t}$ ，比上年减少4.0%；城镇生活污水中氨氮排放量 $89.3 \times 10^4 \text{ t}$ ，比上年增加3.0%。

不难看出，中国七大水系的水质污染情况都已相当严重，如不进行水污染控制，就难以适应新时期下经济的高速增长，甚至连人的饮用水都将出现危机。

在中国，过去由于人类在对水资源的认识和利用上存在的误区，许多地区进入水系、湖泊、

海域的各类污染物质超过其环境容量和自净能力,导致众多水体被严重污染。据调查,全国有 7 亿人饮用大肠杆菌超标水,1.64 亿人饮用有机污染严重的水,3500 万人饮用硝酸盐超标水。淮河流域许多地区癌症发病率比正常地区高出十几倍到上百倍,一些村庄 2/3 的人肝肿大,同时由于河口的污染,溯河性鱼虾资源遭到破坏,产量大幅度下降,部分内湾渔场基本荒废。缺水导致华北平原生态急剧恶化,许多地方出现了“有河皆枯,有水皆污”的现象。西部开发更是受到水资源短缺的严重制约。一些地区无限制地抽取地下水,将进一步加剧土地的退化,形成恶性循环。水体污染、水资源短缺、严重缺乏生态用水和水生态失衡,给环境安全带来了严重的后果,使大半个中国都处在水危机中。

1.2 水污染危害与控制意义

1.2.1 水污染危害

目前,全世界每年约有 4200 多亿立方米的废水排入江河湖海,污染了 5.5×10^4 亿立方米的淡水,这相当于全球径流总量的 14% 以上。中国的水环境污染形势也十分严峻,主要污染物排放总量仍处于较高水平,水污染的发展趋势仍未得到有效控制,许多水域水质仍在下降。中国的水环境安全已经受到威胁,一些不安全的因素和区域已经显现。

水环境污染的危害主要表现在以下几个方面。

1.2.1.1 主要污染物排放量远远超过水环境自净能力

2003 年全国废水排放总量为 $460 \times 10^8 \text{ m}^3$,废水中 COD 排放量 $1333.6 \times 10^4 \text{ t}$ 。据专家预测,按十大水系多年平均径流量计算,中国地表水全部达到国家Ⅲ类水质标准时的 COD 容量为 $800 \times 10^4 \text{ t}$ 。由于排放总量大且相对集中,已对地表水体产生了普遍影响,对地下水水质产生威胁。

1.2.1.2 水污染严重

2003 年全国七大江河水系 407 个监测断面中仅 38.1% 的断面满足Ⅲ类以上水质标准,劣Ⅴ类水质占 40.6%,辽河、海河、淮河污染严重,主要超标污染物为高锰酸盐和氨氮。全国 75% 的湖泊出现不同程度的富营养化,尤以巢湖、滇池、太湖为重。近岸海域以Ⅱ类和超Ⅳ类海水为主,主要超标污染物为氮和磷,赤潮发生次数和面积明显增加。氮、磷等营养类污染物未得到有效控制,加剧了地表水的污染程度,是湖泊富营养化和海洋赤潮产生的主要物质来源。

1.2.1.3 饮水安全受到威胁

2001 年,开展集中式饮用水水质月报的 46 个环境保护重点城市中,仅 28.3% 的城市饮用水源地水质良好,26.1% 的城市水质较好,45.6% 的城市水质较差。经全国布点监测,2000 年农村地区饮用水卫生合格率为 62.1%,全国尚有 3.6 亿农村人口喝不上符合标准的饮用水。

1.2.1.4 水生态失衡

以江河断流、湖泊湿地萎缩、地下水位持续下降为主要特征的水生态失衡问题仍未解决,部分地区愈演愈烈。河流断流不仅发生在小河小溪,而且发生在大江大河;不仅发生在西北干旱区,而且发生在降雨量比较充沛的西南地区,断流范围在扩大。由于自然和人为的原因,黄河自 20 世纪 70 年代初以来持续 20 多年出现断流,从 1999 年开始缓解,但工农业用水仍在增加,引水、调水及拦水工程有增无减,潜在的问题依然存在。湖泊退化是水环境恶化的重要表现。20 世纪 70 年代末至 80 年代中期,中国自然湖泊总数减少 19%,总面积缩小 11%。中国约有 2/3 的城市供水和大量的农业灌溉依靠地下水,超强度利用导致水位持续下降,地面沉陷日益严重,漏斗范围不断扩大,部分地区形势还在加剧。

1.2.2 水污染控制意义

日益严重的水污染所造成的影响已经不仅仅局限于环境领域,在水资源相对匮乏的国家,水

污染所带来的社会影响和压力是沉重和多方面的，而且这种影响和压力正随着时间的推移给经济的发展和品质带来重大的影响，并有可能在不远的将来构筑几乎难以逾越的障碍。因此，水污染控制已经成为人类在 21 世纪发展的重要议程。

1.3 水污染控制方法

1.3.1 清洁生产

清洁生产是指既可满足人们的需要又可合理使用自然资源和能源并保护环境的实用生产方法和措施，其实质是一种物料和能耗最少的人类生产活动的规划和管理，将废物减量化、资源化、无害化或消灭于生产过程之中。同时，对人体和环境无害的绿色产品的生产亦将随着可持续发展进程的深入而日益成为今后产品生产的主导方向。

1989 年联合国环境署工业与环境规划活动中心（UNEP/PAC）提出“清洁生产”的定义为：“清洁生产是指将综合预防污染的环境策略持续应用于生产过程和产品中，以减少对人类和环境的风险性。”对生产过程而言，清洁生产包括节约原材料和能源，淘汰有毒原材料，在全部排放物和废物离开生产过程以前减少它们的数量和毒性。对产品而言，清洁生产策略旨在减少产品的整个生命周期过程中，从原料的提炼到产品的最终处置对人类和环境的影响。清洁生产包括下面三方面内容：清洁的能源、清洁的生产过程、清洁的产品。

1.3.1.1 清洁的能源

清洁利用矿物燃料；加速以节能为重点的技术进步和技术改造，提高能源利用效率；加速开发水能资源，优先发展水力发电；积极、稳妥地发展核能发电；开发利用太阳能、风能、地热能、潮汐能、生物能等可再生资源。

1.3.1.2 清洁的生产过程

采用少废、无废的生产工艺和高效生产设备；尽量少用、不用有毒有害的原料；减少生产过程中的各种危险因素和有毒有害的中间产品；优化工艺操作参数；加强生产自动化控制；完善生产现场管理等。

1.3.1.3 清洁的产品

清洁的产品应具有合理的使用功能和使用寿命；产品本身及在使用过程中，对人体健康和生态环境不产生任何影响和危害；产品失去使用功能后，应易于回收、再生和回用等。

通过清洁生产这种新的创造性的思想，将整体预防的环境战略持续应用于生产过程、产品和服务中，从而增加生态效率和减少人类及环境的风险。

1.3.2 废水处理工艺、现状与发展方向

从市政设施和社区中收集来的废水最终要回归河流和土地，或者被重新利用。工程技术人员和负责公共健康的管理工作者所面临的复杂问题是：在给定的应用条件下，废水处理要达到怎样的水平才能使公众健康和环境得以保护。只有结合实际情况和需要，应用科学知识与技术，基于以往经验的工程判断、国家和政府的相关法规进行综合考虑才能对此问题作答。在一些情况下还需要进行风险评定。

1.3.2.1 废水处理工艺

现代废水处理工艺习惯上按作用原理划分为物理处理、化学处理、物理化学处理和生物处理四类工艺。

物理处理工艺是利用物理作用来分离废水中的悬浮物或乳浊物，常见的有格栅、筛滤、离心、澄清、隔油等方法。化学或物理化学处理工艺是利用化学或物理化学反应的作用来去除废水中的溶解物质或胶体物质，常见的有中和、沉淀、氧化还原、催化氧化、光催化氧化、微电解、