

现代水资源环境保护理论与实践丛书



水污染与水环境修复

周怀东 彭文启 等编著



化学工业出版社
环境科学与工程出版中心

现代水资源环境保护理论与实践丛书

水污染与水环境修复

周怀东 彭文启 等编著



化学工业出版社
环境科学与工程出版中心

· 北 京 ·

(京) 新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

水污染与水环境修复/周怀东, 彭文启等编著. —北京:
化学工业出版社, 2005. 3
(现代水资源环境保护理论与实践丛书)
ISBN 7-5025-6753-4

I. 水… II. ①周… ②彭… III. 水环境-污染防治
IV. X143

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 018988 号

现代水资源环境保护理论与实践丛书

水污染与水环境修复

周怀东 彭文启 等编著

责任编辑: 刘兴春

责任校对: 李 林

封面设计: 于剑凝

*

化 学 工 业 出 版 社 出版发行
环境科学与工程出版中心

(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

北京市兴顺印刷厂印装

开本 850mm×1168mm 1/32 印张 12¼ 字数 314 千字

2005 年 5 月第 1 版 2005 年 5 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-6753-4/X·600

定 价: 36.00 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

《现代水资源环境保护理论与实践丛书》

编撰委员会

主 任：夏 军

副主任：庞进武 黄国和 周怀东 朱党生

委 员：(以姓氏笔画为序)

王中根 左其亭 史晓新 朱党生 吴泽宁

张 翔 张利平 张建永 张祥伟 陈 冰

陈 曦 周可法 周怀东 庞进武 夏 军

高传昌 黄国和 彭文启 谢 平 窦 明

秘 书：左其亭 (兼)

序

水是一种特殊的资源，支撑着所有的生命，它既是基础性资源又是战略性资源，也是整个国民经济的命脉。随着人口增长、社会经济发展，对水资源的需求量不断增加，水资源短缺和水环境污染问题日益突出，严重地困扰着人类的生存和发展。水问题已不再仅限于某一地区或某一时段，而成为全球性、跨世纪的关注焦点。

我国是一个水问题最多的发展中国家之一，水资源与环境成为制约我国社会经济可持续发展的关键因子，也是科学界、水利和环境保护部门共同关注的热点问题。由夏军等多位中青年专家撰写的《现代水资源环境保护理论与实践丛书》具有重要的意义。

该丛书由6部专著组成，内容涉及水资源管理与保护、水环境评价与修复、水生态与调控，都是目前研究和关注的热点问题，也是多位作者最新研究成果的展示。因此，可以说，该丛书是我国水资源与环境领域研究的系统性著作之一，具有鲜明的时代特征和重大现实意义，具有很强的科学性、创新性、系统性和实用性，具有较高的学术价值和应用价值。该丛书内容涉及“水资源环境保护”的关键研究方向和研究内容，必然会极大推动我国水资源环境保护理论研究与实践应用。特此为序。

中国科学院院士 刘昌明

2005年2月

前 言

水污染控制和水环境修复是水资源可持续利用长期必须面对的重大问题之一。科学发展观强调以人为本,坚持社会发展与自然保持和谐一致,重视发展与环境的互动,人类活动如果忽视环境的保护,超过一定限度经济发展就会受到制约。水资源开发利用的制约限度即是通过“水资源承载能力”和“水环境承载能力”表征,在保护的前提下合理利用上述两种能力是水资源管理的重要内容。我国水资源危机不仅表现在总量的匮乏,而且还表现为水质恶化、水体功能下降、水生生态系统结构破坏和功能衰退等。水量不足和水质型缺水已成为影响我国许多地区社会经济可持续发展和维持生态良性循环的重要制约因素。

为了满足人类社会发展的持续需要以及实现人与自然的和谐发展,水污染控制和受污染水环境修复的研究和实践一直都是水环境领域的热点问题。欧美发达国家,从20世纪50~60年代就开始污染水环境的修复工作,相比之下,我国则起步较晚,无论在修复理论还是在工程实践上都存在明显差距。由于水环境退化不仅是人为污染或干扰的结果,全球气候变化等自然因素也可能对其产生显著影响,这使得整个问题的复杂性大为增加,成为环境研究中的难点和长久挑战。因此,中国水利水电科学研究院水环境研究所组织科研人员,结合我国水污染特征,综合水污染、水生态等方面的研究成果编著了本书。

本书由两个部分组成,即水污染成因与预测、水环境修复。全书共分为8章:第1章主要介绍我国水污染状况和特征;第2章着重论述水污染的成因及其生态效应;第3章则系统介绍水污染预测

理论与方法；第4章对国内外的水环境修复技术进行述评；第5章～第8章则分别对河流、湖库、湿地和地下水的生态修复理论、技术方法和工程应用进行详细阐述。

本书由周怀东、彭文启主编。各章节的主要编写人员分别为：第1章，周怀东教授；第2章和第3章，彭文启博士；第4章，周怀东教授；第5章，毛战坡博士；第6章，王雨春博士；第7章，王世岩博士；第8章，杜强博士。

本书可供从事水资源控制、水资源保护的科研、规划、设计、施工的科研、管理人员参考，也可供高等院校、相关专业师生参阅。

由于时间仓促、作者水平有限，书中难免有疏漏与不足之处，敬请广大读者提出宝贵意见。

编著者

2005年2月

内 容 提 要

本书从理论和实际应用等方面对水污染与水环境修复进行了系统论述,是水污染和水环境修复理论和实践经验的总结。本书在系统评价我国水污染状况和特征基础上,论述了水污染成因及其生态效应,详细介绍了水污染预测理论与方法;在对水环境修复理论与方法进行系统述评基础上,分别对河流、湖库、湿地和地下水的生态修复理论、技术方法和工程应用进行详细阐述,具有较强的实用性和借鉴意义。

本书可以供从事水污染控制、水资源保护的科研、规划、设计、施工的科研、管理人员参考,也可供高等院校相关专业师生参阅。

目 录

1 中国水污染状况	1
1.1 污染源	1
1.1.1 点源污染调查	1
1.1.2 污染物入河量调查评价	3
1.1.3 非点源污染调查	5
1.2 地表水水化学特征	7
1.2.1 矿化度	7
1.2.2 总硬度	8
1.2.3 水化学类型	8
1.3 地表水现状水质评价	8
1.3.1 河流水质评价	9
1.3.2 水库湖泊水质评价	11
1.3.3 水库湖泊营养状况评价	13
1.3.4 底质污染评价	15
1.4 集中式饮用水源地水质及供水水质	18
1.4.1 地表水集中式饮用水源地水质评价	19
1.4.2 重点饮用水源地水质状况评价	19
1.4.3 水源地有毒有机物污染状况评价	20
1.5 水功能区状况评价	21
1.5.1 水功能区水质达标状况	21
1.5.2 分类水功能区水质达标状况	24
1.5.3 水功能区接纳污染物状况	26
1.6 地表水质变化趋势分析	27
1.7 地下水污染评价	28

1.7.1	地下水水质综合评价	28
1.7.2	地下水污染	29
1.7.3	地下水供水水源地水质现状	30
1.8	中国水环境特征	31
	参考文献	33
2	水污染成因	35
2.1	水生态系统	35
2.1.1	河流生态系统与水质净化	35
2.1.2	湖库生态系统	38
2.1.3	水环境承载力	39
2.2	水污染类型	40
2.2.1	热污染	40
2.2.2	耗氧污染	41
2.2.3	植物营养盐	42
2.2.4	酚类污染	43
2.2.5	重金属类污染	44
2.2.6	农药污染	47
2.2.7	油类污染	48
2.2.8	氰化物污染	48
2.2.9	酸污染	49
2.2.10	病原体污染	50
2.2.11	放射性污染	51
2.2.12	有毒有机物污染	51
2.3	水环境污染作用机制	52
2.3.1	物理机制	53
2.3.2	化学机制	53
2.3.3	生物学机制	53
2.3.4	综合机制	55
2.4	水生生态系统污染生态效应	57
2.4.1	水生生态系统污染生态效应概述	57
2.4.2	重金属污染效应	59

2.4.3	有毒有机物污染效应	64
2.4.4	水污染生态评价	66
	参考文献	73
3	水污染模拟预测	74
3.1	水污染源预测	74
3.1.1	点源预测	75
3.1.2	非点源预测	77
3.1.3	污染源入河量预测	82
3.2	地表水水质预测	82
3.2.1	水质模型中的物理过程	83
3.2.2	水质控制方程	90
3.2.3	水质模拟	94
3.3	地下水污染与预测	112
3.3.1	地下水污染概论	112
3.3.2	地下水污染预测	115
	参考文献	117
4	水环境修复技术与评价	120
4.1	水环境修复技术综述	120
4.1.1	物理方法	120
4.1.2	化学方法	122
4.1.3	生物方法	123
4.2	水环境修复评价	127
4.2.1	河流修复可行性研究	128
4.2.2	河流恢复评价	129
4.2.3	湿地修复评价	132
	参考文献	134
5	河流生态修复	137
5.1	河流生态系统概述	138
5.2	河流修复基本理论	141

5.2.1	河流景观修复	142
5.2.2	河流生态修复	145
5.3	河流生态修复历史与内容	155
5.3.1	河流污染控制及生态修复历史	155
5.3.2	河流生态系统修复内容	159
5.4	河流修复措施与技术	162
5.4.1	河流缓冲区域生态系统修复措施	162
5.4.2	河流水生生物群落恢复	168
5.4.3	河流底泥疏浚	170
5.4.4	河流调水	177
5.4.5	河流曝气复氧	179
5.5	河流水环境修复典型实例	185
5.5.1	英国泰晤士河水污染防治	185
5.5.2	苏州河水污染综合治理	187
	参考文献	191

6	湖泊水库水环境污染与修复	196
6.1	概述	196
6.2	湖泊和水库水环境和生态系统基本特征	198
6.2.1	湖泊成因和类型	198
6.2.2	湖泊水环境特点	199
6.2.3	湖泊生态系统的基本特征	203
6.3	湖泊和水库的水环境污染	205
6.3.1	湖泊和水库的主要污染问题及其特征	205
6.3.2	湖泊(水库)重金属元素的环境行为及控制因素	208
6.3.3	湖泊(水库)有毒有机物污染	217
6.3.4	湖泊和水库的富营养化	222
6.3.5	湖泊和水库的酸化	233
6.3.6	湖泊萎缩和湖泊生态系统完整性的破坏	235
6.4	污染湖泊恢复原理和技术	238
6.4.1	污染湖泊和水库恢复的基本原则	239
6.4.2	湖泊和水库的外源污染控制	240

6.4.3	湖泊和水库的内源控制	245
6.4.4	湖泊环境的理化性质改善	252
6.4.5	污染湖泊的生态修复和控制技术	258
6.4.6	湖泊和水库修复技术的综合运用	263
	参考文献	268
7	湿地污染修复	272
7.1	概述	273
7.1.1	湿地与湿地的定义	273
7.1.2	湿地生态系统的组成	276
7.1.3	湿地类型与分布	278
7.1.4	湿地水环境的水化学特征	280
7.2	湿地污染及环境效应	284
7.2.1	污染物在湿地中的迁移转化	284
7.2.2	湿地污染的危害和影响	288
7.2.3	我国湿地污染现状与湿地退化	292
7.3	湿地修复基本理论	296
7.3.1	湿地修复概述	296
7.3.2	湿地修复的理论依据	297
7.3.3	湿地修复的基本原则	301
7.3.4	湿地修复的目标	302
7.3.5	湿地修复的步骤	304
7.4	湿地修复的技术与措施	311
7.4.1	湿地修复技术	311
7.4.2	湿地修复措施	320
7.4.3	湿地生态系统的综合修复	324
7.5	湿地修复评价	326
7.5.1	湿地修复的合理性评价	326
7.5.2	湿地修复成功的评价体系	327
7.5.3	湿地修复的持续性和稳定性	329
	参考文献	330

8 地下水污染修复	334
8.1 地下水的基本特征	334
8.1.1 水文循环与地下水	334
8.1.2 地下水贮存和地下水类型	335
8.1.3 地下水的补给径流与排泄	339
8.1.4 地下水的动态与均衡	340
8.2 物理特性	340
8.2.1 含水介质特性	340
8.2.2 地下水的运动与达西定律	341
8.2.3 地下水流水质方程式	343
8.3 化学特性	345
8.3.1 地下水化学成分	345
8.3.2 地下水中基本的物理化学作用	346
8.4 地下水污染	348
8.4.1 地下水污染途径及污染条件	348
8.4.2 主要的地下水污染物质	349
8.5 地下水修复	351
8.5.1 地下水污染评价	351
8.5.2 抽提处理	355
8.5.3 气提技术	356
8.5.4 空气吹脱技术	358
8.5.5 生物修复技术	361
8.5.6 渗透反应墙 (PRB) 修复	369
8.5.7 稳定和固化	371
8.5.8 电动力学修复	372
8.5.9 典型地下水污染修复实例	372
参考文献	373

1

中国水污染状况

为全面了解我国水环境状况，系统分析水污染程度、污染物种类和数量，本章从污染源调查评价、地表水化学特征、河流湖库现状水质、水质变化趋势、底质污染、集中式饮用水水源地水质、水功能区水质评价、供水水质评价以及地下水水质评价等 9 个方面分析了我国地表水资源质量状况。

1.1 污染源

人类活动和自然过程对地表和地下水水质的污染，依排放方式可分为点源和非点源。点源主要是由工矿企业废水和城镇生活污水形成；非点源也称面源，指在较大范围内，溶解性或固体污染物在降雨径流等作用下，通过地表或地下径流进入受纳水体造成的污染。我们的点源调查包括工矿企业废污水排放调查、城镇生活污水调查及集约化、规模化养殖污染源三部分。非点源调查包括农田径流营养成分流失调查、农村生活污水及生活垃圾排放量调查、分散式禽畜养殖污染物排放调查、城市径流污染物流失调查、水土流失状况等五大类。调查项目主要为化学需氧量、氨氮、总氮和总磷。

1.1.1 点源污染调查

(1) 工业污染源

2000 年全国工业（不包括火核电工业，下同）废水排放量为 $510 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，工业废水中化学需氧量（COD）和氨氮排放量分别为 $1234 \times 10^4 \text{ t}$ 和 $108 \times 10^4 \text{ t}$ 。东部地区工业废水及 COD、氨氮排放量分别占全国工业排放量的 49%、54% 和 37%；中部地区分别占 35%、31% 和 42%；西部地区分别占 16%、15% 和 21%。2000 年水资源一级区工业污染源调查成果见表 1-1。

表 1-1 2000 年水资源一级区点源废污水及
化学需氧量和氨氮排放量

水资源 一级区	废污水排放量 ($\times 10^8 \text{ m}^3$)			COD 排放量 ($\times 10^4 \text{ t}$)			氨氮排放量 ($\times 10^4 \text{ t}$)		
	城镇生活	工业	合计	城镇生活	工业	合计	城镇生活	工业	合计
松花江区	11.2	23.1	34.2	59.9	49.7	109.6	7.7	2.5	10.2
辽河区	11.0	21.1	32.1	51.9	79.9	131.8	5.8	4.2	10.0
海河区	24.2	36.2	60.3	61.3	159.0	220.9	5.3	16.0	21.3
黄河区	13.3	29.1	42.5	36.4	99.3	135.7	4.0	9.1	13.1
淮河区	19.3	44.9	64.2	56.9	156.6	213.5	5.9	22	27.9
长江区	82.6	215.9	298.5	185.4	362.0	547.4	20.1	39.5	59.5
(其中太湖流域)	(20.9)	(32.3)	(53.3)	(66.5)	(49.7)	(116.1)	(6.5)	(3.5)	(10.0)
东南诸河区	13.5	36.8	50.3	42.0	55.3	97.3	4.7	2.9	7.7
珠江区	48.9	95.6	144.5	118.9	249.5	368.4	10.6	9.7	20.4
西南诸河区	1.7	2.1	3.8	2.3	3.6	5.9	0.2	0.4	0.6
西北诸河区	4.0	5.4	9.5	11.8	18.8	30.6	0.8	1.5	2.3
全国	230	510	740	627	1234	1861	65	108	173

(2) 城镇生活污染源

2000 年全国城镇（包括所有具有下水管网的建制市和建制镇）生活污水排放量为 $230 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，城镇生活污水中 COD 和氨氮排放量分别为 $627 \times 10^4 \text{ t}$ 和 $65 \times 10^4 \text{ t}$ 。东部地区城镇生活污水及 COD、氨氮排放量分别占全国城镇排放量的 57%、59%、55%；中部地区分别占 27%、28%、32%；西部地区分别占 16%、12%、13%。

2000 年水资源一级区城镇生活污染源调查成果见表 1-1。

(3) 城市废污水排放及处理情况

2000 年我国城市（指市区，下同）人口和工业产值分别占全国城镇人口和全国工业产值的 56% 和 40%，其用水量和废污水排放量分别占全国城镇用水量和废污水排放量的 61% 和 44%。2000 年全国城市废污水排放量为 $332 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，约占其用水量的 68%，目前具有二级以上生化处理能力的污水处理厂约 400 座，设计生化处理能力 $2158 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。由于废污水收集管网不配套、运行经费不足、设备技术故障等原因，实际正常运行的一般只有 40%~50%。2000 年全国城市废污水处理量为 $114 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，其中城市废污水集中处理量为 $65 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，约占其排放量的 20%。

(4) 点源排放总量

2000 年全国点源（包括工业污染源和城镇生活污染源）废污水排放量为 $740 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，其中工业废水排放量占 69%，城镇生活污水排放量占 31%。全国点源 COD 排放量为 $1861 \times 10^4 \text{ t}$ ，其中工业废水 COD 排放量占 66%，城镇生活污水 COD 排放量占 34%；氨氮排放量为 $173 \times 10^4 \text{ t}$ ，其中工业废水氨氮排放量占 62%，城镇生活污水氨氮排放量占 38%。2000 年水资源一级区点源废污水及化学需氧量和氨氮排放量见表 1-1。

1.1.2 污染物入河量调查评价

点源废污水和污染物入河量是指通过入河排污口直接进入江河湖库等地表水体的废污水和污染物量。在全国监测调查的 16432 个人河排污口中，连续排放的占 70%，间歇排放的占 30%。2000 年排入全国已划定的水功能区的废污水及 COD 和氨氮入河量分别为 $538 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $1214 \times 10^4 \text{ t}$ 和 $104 \times 10^4 \text{ t}$ ，分别占其对应陆域范围废污水及 COD、氨氮排放量的 79%、72% 和 66%。2000 年水功能区废污水、化学需氧量和氨氮入河量见表 1-2。