

河海大学“211工程”三期资助研究生系列教材



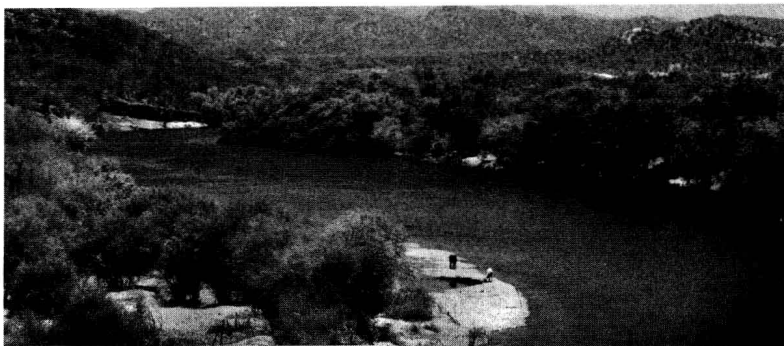
水污染 控制理论与技术

主 编 朱 亮



河海大学出版社
HOHAI UNIVERSITY PRESS

河海大学“211工程”三期资助研究生系列教材



水污染 控制理论与技术

主 编 朱 亮

副主编 卜现亭 李一平
倪利晓 李 勇



河海大学出版社
HOHAI UNIVERSITY PRESS

图书在版编目(CIP)数据

水污染控制理论与技术 / 朱亮主编. —南京: 河海大学出版社, 2011

ISBN 978-7-5630-2979-2

I. ①水… II. ①朱… III. ①水污染—污染控制—研究 IV. ①X520.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 275391 号

- 书 名 水污染控制理论与技术
书 号 ISBN 978-7-5630-2979-2/X·27
责任编辑 朱婵玲
特约编辑 成 微
责任校对 余 波
封面设计 黄 煜
出版发行 河海大学出版社
地 址 南京市西康路 1 号(邮编:210098)
电 话 (025)83737852(总编室)
(025)83722833(发行部)
经 销 江苏省新华发行集团有限公司
排 版 南京理工大学资产经营有限公司
印 刷 江苏农垦机关印刷厂有限公司
开 本 787 毫米×960 毫米 1/16
印 张 27.5
字 数 536 千字
版 次 2011 年 12 月第 1 版
印 次 2011 年 12 月第 1 次印刷
定 价 55.00 元

水是生命之源、生产之要、生态之基。水的基础性、战略性地位不言而喻。多年来,我和同事们一直致力于水资源保护方面的研究。纵观国内外水环境保护和水污染控制的发展历程,水污染控制理论与技术的理念、内涵均已发生了深刻的变化,人水和谐,让河湖休养生息,师法自然已经成为学界共识。水污染控制已由单纯的“污染控制技术”,发展为“水生态的修复与恢复”,由以“水污染控制”为目标向以“流域水生态系统健康保护”为目标的转变。

据此,朱亮教授结合多年来高校人才培养、科学研究的经验,系统整合了水污染控制规划—水污染治理技术—河湖水质改善与生态修复技术—水污染控制与生态补偿经济学的研究成果,编成《水污染控制理论与技术》一书。本书具有以下特色:一是系统性强,层次和脉络清晰,注重体现学科的基础及学科的发展的过程。二是可拓展性强,既考虑读者对水污染控制理论与技术内容的总体把握的要求,又力求为读者进一步深入研究留有拓展空间。三是特色性强,全书充分体现了河海大学环境工程学科特色和水利学科背景。本书既可作为高等学校环境工程专业及相关涉水专业研究生教学用书,对从事水环境保护与生态修复的科研技术人员亦有一定的参考价值。

河海大学环境学院院长



2011年12月

内 容 简 介

《水污染控制理论与技术》是我校“211 工程”研究生精品课程建设的教材。全书分 9 章,第一章 绪论;第二章 水环境污染源分析与评价;第三章 水污染控制优化规划方法;第四章 地表水环境数学模型;第五章 废水处理工程;第六章 非点源污染控制技术;第七章 河流水质改善与生态修复技术;第八章 湖泊水质改善与生态修复技术;第九章 水污染控制与生态补偿经济学方法。

本书的特点是系统整合了水污染控制规划—污水控制工程技术—水环境质量改善与生态修复技术—水污染控制与生态补偿经济学等相关理论与技术。内容安排上,尽可能适应水污染控制从单纯的水污染防治到水环境治理、水生态修复的转变以及水管理从资源管理、污染控制向生态管理的转变趋势,突出体现了水污染控制由单纯的污染控制技术向以流域水生态系统健康保护为目标转变的河湖治理理念。

本书可以作为高等学校环境工程专业及相关涉水专业研究生的教学用书,也可以供从事相关专业的技术、管理和研究人员参考。

水是生命之源,世界万物之本,文明兴衰之根。人类文明进程表明,民族的强盛、社会的繁荣、文化的发展,无不与水有着紧密联系,人水和谐,延绵不断,支撑着人类文明的进程。我国水环境保护虽然取得了积极进展,但水环境污染形势严峻的状况仍未改变,长期严重的水污染问题影响着水资源利用和水生态系统的完整性,影响着人民群众身体健康,已经成为制约我国经济社会可持续发展的瓶颈。水环境的现实状况与经济社会发展对水环境的需求之间存在着尖锐矛盾,且长期以来对其又缺乏系统性、协同性和创新性的科学研究。

我国从 20 世纪 70 年代起开展系统的江河水质保护工作,70 年代后期引入环境容量概念,并在环境容量的基础理论上,实行了目标总量控制制度。“七五”期间,河流水环境综合整治被列入国家科技攻关计划,开展了河流水污染物总量控制和河流水环境综合整治研究。“十五”期间,国家设立了重大科技专项“城市水环境质量改善技术与综合示范”,初步建立了一套“控源、动水、修复”的基本模式。“十一五”期间,通过理念创新,水环境建设现已进入“生态工程治理”和“近自然河流治理”的高级阶段。水环境建设更加尊重河流系统的自然规律,注重河流自然生态和自然环境的恢复和保护,充分发挥河流的综合服务功能。

从水污染控制技术而言,水污染已经突破了单纯的截污治污模式,上升到水生态系统修复和水环境良性循环的层面,更强调以生态技术为核心,辅以物理的、化学的方法及水利、景观等工程手段,进行全方位整治。从水污染控制目标而言,已由以“水污染控制”为目标转变为以“流域水生态系统健康保护”为目标。

2008 年初,胡锦涛总书记从生态文明建设的战略高度,提出让江河湖泊休养生息,使休养生息成为中国水污染控制和水环境综合治理的指导思想。国家环境保护部周生贤部长在第 13 届世界湖泊大会上进一步阐述了让江河湖泊休养生息的内涵:让江湖休养生息需要重视和遵循以人为本、改善民生是核心;恢复生机、提升活力是目标;遵循规律、道法自然是前提;系统管理、综合治理是方法;控源截污、转型发展是关键的原则。

本书力图系统整合水污染控制规划—污水控制工程技术—水环境质量改善与生态修复技术—水污染控制与生态补偿经济学等相关理论与技术。内容安排上,尽可能适应水污染控制从单纯的水污染防治到水环境治理、水生态修复的转变以及水管理从资源管理、污染控制向生态管理的转变趋势,突出体现了水污染控制由单纯的污染控制技术向以流域水生态系统健康保护为目标转变的河湖治理理念。并力求全面系统反映该领域的最新成果和发展趋势,力求突出我校环境工程重点学科的特色。

全书分9章,第一章 绪论;第二章 水环境污染源分析与评价;第三章 水污染控制优化规划方法;第四章 地表水环境数学模型;第五章 废水处理工程;第六章 非点源污染控制技术;第七章 河流水质改善与生态修复技术;第八章 湖泊水质改善与生态修复技术;第九章 水污染控制与生态补偿经济学方法。

本书可以作为环境工程专业及相关涉水专业研究生的水环境保护与生态修复方面的教材,也可以供从事相关专业的技术和管理人员参考。希望通过本教材的使用和阅读,读者能掌握系统的水污染控制理论与技术的知识,促进水环境保护与生态修复技术的发展。

本教材编写过程中,参阅并引用了大量的国内外有关文献和资料,在此向所引用的参考文献的作者致以谢意。

南京市环境保护科学研究所副院长研究员级高工卜现亭、河海大学李一平副教授参与编写了第6、7、8章内容,河海大学李勇副教授、倪利晓副教授分别参与编写了第4章、第5章内容。潘兴华、汤颖等2009级以来的历届研究生同学在本书成书过程中付出了大量的辛勤劳动,在此一并表示感谢。

由于本教材内容涉及领域广泛,编者水平有限,难免有疏漏和错误之处,敬请广大读者不吝指正。

编者

2011年9月

第一章 绪论	1
第一节 水资源	1
一、水资源概况	1
二、水循环	4
三、水利	8
第二节 水环境	11
一、水化学特征	12
二、水环境特征	14
三、城市水环境	16
第三节 水生态	18
一、生态系统的定义	18
二、生态系统的组成	18
三、生态系统的功能	19
四、水利工程对河流生态系统胁迫	21
第四节 水安全	22
一、水安全概念	22
二、中国的水安全问题	23
第五节 水文化	25
一、水文化概念	25
二、水文化建设	26
第二章 水环境污染源分析与评价	28
第一节 污染源与污染物	28
一、污染源	28
二、污染物	28

第二节 点污染源解析	30
一、点污染源的 特征	30
二、工业污染源调查	31
三、城市生活污染源调查	32
四、农村(业)点污染源调查	33
五、交通污染源调查	34
第三节 点污染源预测	34
一、废水量预测	35
二、污染物排放量预测	39
第四节 陆地面污染源估算	41
一、陆地面污染源的 特征	41
二、陆地面源发生量估算	42
三、陆地面源污染物入河量估算	47
第五节 大气干湿沉降与水体内源污染	51
一、水污染的大气沉降	51
二、投料网箱养殖污染	52
三、污染物在底泥中的积累与释放	54
第六节 污染源评价	55
一、水污染控制指标体系	55
二、污染源评价	58
第七节 水环境质量评价	62
一、环境标准体系	62
二、水环境质量评价的分类与步骤	65
三、水质评价方法	67
第三章 水污染控制优化规划方法	76
第一节 水污染控制系统分析	76
一、系统	76
二、系统分析	78
三、水污染控制系统分析	80
第二节 水污染控制规划方法学	82
一、水污染控制规划的目标与任务	82
二、水污染控制规划的一般方法	83
三、水污染控制规划的技术路线	85
四、水污染控制原理	93

第三节 水污染总量控制与分配方法	97
一、水环境质量与污染物排放的响应	97
二、水环境容量	97
三、水体纳污能力	98
四、污染物允许排放量分配	107
第四节 水污染控制系统方案与决策	116
一、方案的制定原则	116
二、方案的生成	118
三、方案的分析	121
四、方案的决策	122
第五节 水污染控制研究展望	129
一、国内外水污染控制技术发展趋势	129
二、水生态系统规划	132
第四章 地表水环境数学模型	136
第一节 数学模型概述	136
一、数学模型的定义与特征	136
二、数学模型分类	137
三、数学模型的建立	137
四、模型参数估值	138
第二节 基本水质问题	143
一、污染物在水环境中的混合过程	143
二、生物化学分解	146
三、大气复氧	147
四、光合作用	149
五、藻类的呼吸	150
六、底栖动物和沉淀物耗氧	150
第三节 河流、河口水质模型	151
一、河流水质模型	151
二、河口水质模型	156
第四节 湖泊、水库水质模型	161
一、湖库的水文水质特征	161
二、湖库箱式水质模型	162
三、非完全混合水质模型	165
四、狭长型湖库水质模型	167

五、湖库环流二维稳态混合模型	168
第五章 废水处理工程	169
第一节 废水处理的反应动力学	169
一、废水处理反应器	169
二、物料衡算分析	171
三、反应器的水力特性	174
四、反应动力学解析	176
五、反应、反应速率和反应速率常数	184
六、停留时间分布及反应器的流动模型	187
第二节 废水控制工程单元分析	190
一、废水工程概述	190
二、废水的特性及组分	193
三、废水处理物理单元操作	197
四、废水处理化学单元操作	214
五、废水处理生物单元操作	220
第三节 废水再生回用技术	226
一、水的再生回用单元	226
二、废水高级处理技术	237
第四节 废水处理技术评价与运行管理	239
一、废水处理技术评价	239
二、处理过程的可靠性	241
三、除臭	242
四、废水处理节能分析	250
第六章 非点源污染控制技术	257
第一节 概述	257
一、非点源污染的特点与分类	257
二、非点源污染治理的原则、目标与步骤	260
三、非点源污染的管理政策	261
第二节 非点源污染模型	264
一、非点源污染模型	264
二、非点源污染模型结构	271
三、常见的非点源污染模型	272
第三节 非点源污染最佳管理措施	285

一、概述	285
二、农村非点源污染最佳管理措施	286
三、城市非点源污染控制与管理	290
四、BMP 绩效评价系统设计	292
第四节 城市雨洪资源综合控制与管理	295
一、雨洪处理技术	295
二、雨洪收集系统	297
三、雨洪利用系统	300
第七章 河流水质改善与生态修复技术	303
第一节 生态恢复的概述	303
一、生态恢复机理	303
二、生态恢复的三个层次	304
三、生态恢复的意义与类型	308
四、生态恢复技术措施与程序	309
五、生态恢复的评价	310
第二节 河流生态系统恢复	312
一、河流生态系统结构	312
二、河流生态系统恢复的理论依据	315
三、河流生态恢复的原则与方法	317
四、河流生态恢复的目标	320
五、河流生态恢复的主要内容	321
六、河流生态恢复实施	322
第三节 河流功能及生态修复措施	324
一、防洪功能及其生态修复	324
二、景观功能及其修复	325
三、自净功能及其修复	327
四、供水功能及其生态修复	329
五、航运功能及其修复	329
六、输沙功能及其修复	331
七、河流生态系统功能修复措施	331
第四节 河流水质改善与生态修复技术方法	333
一、河流生物修复与净化技术	334
二、河流水体曝气增氧技术	340
三、河流的水动力调控技术	341

四、河流污染底泥的治理技术	342
第五节 多自然型河流整治技术	344
一、多自然型河流概念	344
二、多自然型河流技术方法	345
第六节 城市河流景观设计技术	350
一、河流景观的构成	350
二、城市河流的景观设计内容	351
第八章 湖泊水质改善与生态修复技术	358
第一节 湖泊生态系统	358
一、湖泊基本概况	358
二、湖泊生态系统	359
第二节 湖泊污染治理方案制定	360
一、湖泊环境问题诊断	360
二、湖泊污染控制目标	363
三、方案的制定	364
第三节 湖泊水污染源控制系统	370
一、湖泊点源污染控制系统	370
二、湖泊非点源污染控制系统	371
三、湖泊内源污染控制系统	374
第四节 湖泊水体水质改善与生态修复技术方法	379
一、湖泊水体水质改善的物化方法	379
二、湖泊水体生态修复技术	381
第九章 水污染控制与生态补偿经济学方法	395
第一节 经济分析概况	395
一、经济分析的基本概念	395
二、水污染防治经济损益分析	396
三、经济分析程序和内容	401
第二节 水污染控制决策分析方法	402
一、费用-效益分析	402
二、多目标规划决策	407
三、层次分析方法	410
四、多准则决策分析	413

第三节 水生态系统服务功能与评估.....	416
一、水生态系统服务功能的内涵	416
二、水生态系统服务功能评估	418
第四节 生态补偿理论与机制.....	419
一、生态补偿理论	419
二、生态补偿机制	421

第一章 绪 论

第一节 水 资 源

一、水资源概况

(一) 水资源定义

水是人类及一切生物赖以生存的必不可少的物质基础,同时也是工农业生产、社会经济发展和生态环境改善不可替代的极为宝贵的自然资源。水既是人体组成的基本要素,又是新陈代谢的主要介质。可以说,水是人类一切文明之源,没有水就没有生命,更没有社会的进步和繁荣。美国医学博士巴尔克说:“生命就是朝气蓬勃的水”,更加形象地说明了水对人类的重要性。

联合国教科文组织和世界气象组织共同编制的《水资源评价活动——国家评价手册》中将水资源定义为:可资利用或有可能被利用的水源,具有足够的数量和可用的质量,并能在某一地点为满足某种用途而可被利用。《中国大百科全书》中水资源的定义是:地球表层可供人类利用的水,包括水量(质量)、水域和水能资源。《简明大不列颠百科全书》中水资源的定义则为:世界水资源包括地球上所有的(气态、固态或液态)天然水的总量。

水资源的定义有广义和狭义之分。广义的水资源是指地球上所有的水,不论它以何种形式、何种状态存在,都能够直接或间接地加以利用,是人类社会的财富,属于自然资源的范畴。狭义的水资源则认为水资源是在目前的社会条件下可被人类直接开发与利用的水,而且开发利用时必须技术上可行、经济上合理且不影响地球生态。此外,狭义的水资源除了考虑水量外还要考虑水质。不符合使用水质标准,或用现有技术和经济条件难以处理达到使用标准的水也不能视为水资源。极地冰川是地球上最大的淡水资源,但是由于远离人类聚居区,利用时很不经济。山地冰川利用起来虽然较极地冰川容易,但直接利用时会造成山地冰川的不可恢复性破坏,而只能利用自然融化的山地冰川水。海水是地球上最大的水体,但由于其含盐高,因而除了少量的用于海水淡化、直接冲厕或工业冷却外,还没有被人类大规模地开发利用。因此,通常所说的“水资源”是指陆地上可供生产、生活直接利用的江河、湖沼以及部分储存在地下的淡水资源,亦即“可利用的水资源”。这部分水量只占地球总水量的极少部分。

如果从可持续发展的角度来看,水资源仅指一定区域内逐年可以恢复更新的淡水量,具体来说是指以河川径流量表征的地表水资源,以及参与水循环的以地下径流量表征的地下水资源。对一定区域范围而言,水资源的量并不是恒定不变的,它随用水的目的与水质要求的不同、科学技术与经济发展水平的不同而变化。

(二) 世界水资源

地球上的水以气态、液态和固态三种形式存在于空中、地表与地下,成为大气水、海水、陆地水(包括河水、湖水、沼泽水、冰雪水、土壤水、地下水),以及存在于生物体内的生物水,这些水不停地运动和相互联系构成了水圈。

水圈是指地球上被水和冰雪所占有或覆盖而构成的圈层。水圈的上限可到对流层顶,下限为深层地下水所及的深度。地球上的水循环是形成水圈的动力。水圈的水与大气圈、生物圈、岩石圈、土壤圈之间有极密切的关系,并形成各种方式的水交换。

地球上水的总量约为 $1.36 \times 10^9 \text{ km}^3$ 。其中,海洋占 97.41%,覆盖了地球表面积的 71%,淡水仅占地球总水量的 2.59%。而淡水中又大约有 70% 以上属固态水——冰,储存在极地和高山上,只有不到 30% 的淡水存在于地下、湖泊、土壤、河流、大气等之中。但这些水体中淡水总量仅为 $3.8 \times 10^7 \text{ km}^3$ 。除冰川和冰帽外,可利用的淡水总量不到全球总储水量的 1%。这部分淡水与人类的关系最为密切,具有极其重要的社会、经济和环境价值。地球上的水量分布见表 1-1。

表 1-1 地球上的水量分布

水分类型	水量(10^4 km^3)	比例(%)
大气水	1.3	0.001
海洋水	132 000	97.212
冰川和冰帽	2 920	2.15
河水	0.13	0.000 1
淡水湖	12.5	0.009 2
盐水湖	10.4	0.007 7
土壤水	6.7	0.004 9
地下水	835	0.615
生物体内水	0.12	0.000 1
总量	135 784.85	100

虽然淡水在较长时间内可以保持平衡,但在一定时间、空间范围内,它的数量却是有限的。从未来的发展趋势看,突出的水资源供需矛盾将成为社会发展的重要制约因素。联合国水资源管理战略措施专家指出:“水是一种有限的脆弱的环境资源,是一种社会和经济物品。”1992年初有 156 个国家代表参加的“世界水

资源与环境大会”提出了警告：“水资源短缺已成为当今人类面临的最严峻挑战之一。20世纪末及21世纪初,此种情况更令人忧虑”。2000年3月17日国际水问题联合会在荷兰召开了“世界水问题论坛”会议,就水的安全性问题进一步向人们提出警告,各国政府提出了明确的行动纲领。

目前,印度、中国耗用水量分别达到了最大可利用量和安全权限量的70%。阿拉伯地区22个地处沙漠的国家,水资源利用量已超过85%。埃及和以色列基本上已使用了可以利用的全部水资源量。一方面水资源日益短缺,而另一方面水资源浪费特别严重。同时,随着大量污水的排放,水资源污染造成的“水质型缺水”,加剧了水资源短缺的矛盾。

(三) 中国水资源

1. 中国水资源总量

中国水资源总量约为28 124亿 m^3 。其中,河川年平均总径流量约27 115亿 m^3 ,继巴西69 500亿 m^3 、美国30 550亿 m^3 、加拿大29 114亿 m^3 和印尼28 113亿 m^3 之后。但中国人均占有水资源量并不丰富,相当于世界人均占有量的1/4。世界人均占有年径流量最高的国家是加拿大,人均占有年径流量高达14.93万 m^3 /人,是中国人均占有年径流量的近64倍。中国是世界人均水资源缺乏的13个国家之一。中国水资源的主要特征如下:

(1) 空间分布特征:由于受所处地理位置、气候、降水、地形、地貌等自然条件以及人口、耕地与矿产资源分布的影响,中国水资源具有与众不同的特点。

(2) 时间分布特征:水资源受降水影响,其时间分布具有年内、年际变化大,枯水年和丰水年变化大的特点。

(3) 水资源与人口、耕地分布不匹配的特征:水资源空间上分布的不平衡性与全国的人口和耕地分布上的差异性,构成了水资源与人口和耕地不匹配的基本特征。

2. 中国面临的主要水资源问题

根据中国21世纪社会经济发展总目标和水资源供求发展态势,中国今后将面临着以下主要水资源问题。

(1) 水资源供求矛盾进一步加剧

由于人口持续增长和经济高速发展,工农业和人民生活用水将持续增加,使目前存在的水资源供求矛盾更趋激化。其主要表现在:①供求总量更加不平衡,需水量增长速度超过可供水量的增长速度,供水状况趋于恶化;②北方地区和沿海工业发达地区等地域性水资源供求矛盾日趋恶化,将严重制约社会经济的发展;③巨大的人口压力对发展耕地灌溉事业和工业城市用水量增加的矛盾更加尖锐。

(2) 水资源浪费与用水效益低的问题

中国水资源浪费严重。一方面,用水效益低下,大大加剧了全国性水的供需矛