

环境科学与工程进展丛书

21世纪的 水处理

金兆丰 主 编 ●

邓慧萍
黄建元 副主编 ●
董秉直



化学工业出版社
环境科学与工程出版中心

环境科学与工程进展丛书

21 世纪的水处理

金兆丰 主编

邓慧萍 黄建元 董秉直 副主编

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

21 世纪的水处理/金兆丰主编. —北京: 化学工业出版社, 2003.3
(环境科学与工程进展丛书)
ISBN 7-5025-4360-0

I. 21… II. 金… III. 水处理-国际学术会议-文集 IV. TU991.2-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 004724 号

环境科学与工程进展丛书

21 世纪的水处理

金兆丰 主编

邓慧萍 黄建元 董秉直 副主编

责任编辑: 管德存

文字编辑: 徐延荣 丁建华

责任校对: 陈 静

封面设计: 蒋艳君

*

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

北京市燕山印刷厂印刷

三河市延风装订厂装订

开本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印张 17½ 字数 434 千字

2003 年 3 月第 1 版 2003 年 3 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-4360-0/X·249

定 价: 48.00 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

出版者的话

环境保护是我国的基本国策之一，近年来呈蓬勃发展之势。而环境科学与工程有许多热点和重点领域更是国内众多学者关注的对象。如环境化学、污泥处理及资源化技术、污水处理新技术、污水回用技术、生物脱氮除磷技术、生物修复技术、垃圾处理与资源化、烟气脱硫脱硝技术等。政府部门、高等院校及科研设计单位均投入了大量人力、物力从事这些方面的研究与开发工作，并不断有新成果出现。为方便学者之间技术交流，及时推广新的研究成果和工程经验，化学工业出版社环境科学与工程出版中心组织国内一批高水平的专家、学者精心编写了这套“环境科学与工程进展”丛书。

本套丛书具有以下特点。

(1) 针对性 丛书每个分册都只针对某一特定专业领域或某项专门技术，汇集国内众多专家、学者的成果与经验，针对性强，便于读者对这一专题研究进展情况进行全方位了解和比较。

(2) 先进性 丛书每个分册原则上只收录 2000 年以后各个作者新的研究成果，技术内容比较先进，使读者能够及时了解某个专题的前沿技术及今后的发展趋势。

多年来，化学工业出版社一直把环保图书作为主要出书方向之一。2000 年 6 月、2001 年 6 月、2002 年 6 月我社成功地在全国各大、中城市举办了三届化工版环保图书展，2003 年 6 月我社将举办第四届化工版环保书展。本套丛书将有部分分册参展，希望能得到广大读者的认可，也希望广大读者对我社环保图书出版多提宝贵建议与意见。

化学工业出版社
环境科学与工程出版中心
2003.3

前言

21 世纪是水的世纪。

人类面临的水患、水资源短缺、水污染等问题，以及由此而起的种种社会问题将对 21 世纪人类社会持续发展带来深刻的影响。水的问题可能超过能源问题成为 21 世纪世界上最重要的课题。

为此，各国政府和世界上与水有关的专家、学者、工程技术人员、管理人员和普通居民都在积极探寻解决 21 世纪水问题的途径。其中，研究新的水处理技术，是解决水污染和合理利用水资源的重要途径之一，各国都已经在这一领域取得丰硕的成果，通过加强国际交流将促进我国水处理技术的进一步发展。

在新世纪的第一年，由同济大学环境科学与工程学院、中国城镇供水协会科技委员会和中国土木工程学会水工业分会给水委员会共同主办，国际水协（IWA，International Water Association）和日本水道协会协办的“2001 年中日水处理技术国际交流会”于 11 月在同济大学举行。会议主题是“21 世纪的水处理技术和发展趋势”，发表论文内容包括水资源保护与利用、水处理技术、水质检测方法以及管网技术，几乎涉及水处理技术领域的所有分支。会议共有来自日本政府机构、著名大学及国际知名企业的 30 位专家和来自中国 19 个省市的 100 多位专家教授参加，发表交流论文共计 72 篇。

2002 年适逢中日邦交正常化 30 周年纪念，同济大学与国际水协（IWA）和中国城镇供水协会科技委员会于 10 月共同主办了“2002 年中日水处理技术国际研讨会”，邀请了日本放送大学校长、国际水协（IWA）主席丹保宪仁教授在会上以“水的 21 世纪”为题作中日邦交正常化 30 周年纪念特别讲演。

这两次学术交流会所发表的论文，荟萃了中日两国在水处理领域技术交流的结晶。为了满足同行们的要求，让更多的读者分享这两次学术交流会的成果，了解中日两国水处理领域的最新研究方向和动态，编者选择两次交流会的部分论文（中方 31 篇、日方 18 篇），并增加中日两国近期水处理领域的科研论文（中方 14 篇、日方 1 篇），加以整理和翻译，编成《21 世纪的水处理》一书。丹保宪仁教授的讲演“水的 21 世纪”放在本书首篇作为代序。

全书分“总论”、“水质及水质分析”、“水处理理论与技术”、“膜处理技术”、“水资源综合利用”、“供水管网及供水规划”、“污泥处理理论与实践”等七章。本书适合给水排水工程和环境工程领域的工程技术人员、管理人员、科研人员以及大学教师、本专科学学生、研究生阅读。

因我们水平所限，本书肯定有不少不足之处，诚挚地希望读者批评指正。

金兆丰
于同济大学
2002 年 11 月

内 容 提 要

本书是“环境科学与工程进展”丛书的一个分册。全书分总论、水质及水质分析、水处理理论与技术、膜处理技术、水资源综合利用、供水管网及供水规划、污泥处理理论与技术 7 章。共收录论文 64 篇, 比较全面地介绍了中国及日本在水处理领域的最新研究成果及工程应用实例, 并反映了 21 世纪水处理领域的发展方向与趋势。

本书可供给排水专业、环境工程专业科研、工程技术人员及大专院校师生参阅。

目 录

第一章 总论	1
一、水的 21 世纪	1
二、中国城市供水的发展和展望	8
三、中国饮用水的水质问题与水的深度处理	15
四、中国净水技术的发展与展望	19
五、日本净水技术的发展与展望	23
六、日本的高效净水技术开发研究项目——ACT21 计划	26
七、净水工艺的合理选择	32
八、城市用水量需求调查和科学预测	37
九、日本的给水设施设计规范	41
十、大阪市的供水工程与净水处理	46
第二章 水质及水质分析	54
一、关于分质供水趋势的探讨	54
二、应用灰关联模式识别模型评价枯水期汉江水质	59
三、包头市黄河水源污染演变与现状（节选）	63
四、日本的水源水质保护的现状与课题	71
五、日本的水质问题和对应的方法	78
六、固相微萃取 /GC /ECD 直接测定水中的三种氯酚	82
七、流动注射分光光度法测定总氮以及利用测总氮通道来测定凯氏氮	85
八、水中肠道病毒	87
九、利用 GC /MS 分析霉味物质	91
十、TOC 在净水领域的应用	94
第三章 水处理理论与技术	98
一、饮用水除污染优化组合净水技术	98
二、三种预氧化剂在水处理中的应用试验研究	103
三、活化硅酸助凝剂在处理黄浦江原水中的生产性应用研究及技术经济分析	107
四、受污染河水净化技术研究	112
五、混凝变频加药实现混凝处理的最佳工况	117
六、聚合硫酸铁、碱式氯化铝两种混凝剂联用处理高浊、高色度黄河原水的研究	119
七、平流式水力旋流沉砂池的水力特征	120
八、回转圆筒型圆形沉砂池的除砂特性	125
九、改性滤料过滤除铁过程中水头损失增长的规律	128
十、活性污泥法污泥回流系统改造的探讨	132
十一、微孔曝气系统中氧转移速率的探讨	135
十二、采用电解法保存自来水的技术	139

十三、超声技术降解水中有机污染物研究	142
十四、稠油污水有机组成的分析与研究	146
十五、不加药的除铁方法	149
十六、加强混凝沉淀在处理有机物污染中的作用	152
第四章 膜处理技术	157
一、长江原水混凝-超滤处理技术的试验研究	157
二、UF 膜与混凝联用处理淮河水的中试试验	162
三、膜滤技术于饮用水处理的实用性研究	165
四、臭氧活性炭与超滤深度处理工艺	168
五、浸没式膜-SBR 反应器对焦化废水中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的去除研究	171
六、反渗透法去除水中溴酸根离子	174
七、采用不加混凝剂的颗粒过滤法浓缩膜过滤冲洗水的效果	178
八、浸没式中空纤维膜过滤法在净水处理中的应用与膜污染	181
九、高通量、低压式大孔径膜过滤装置	184
十、高浓度活性炭-膜过滤法净水技术研究	187
第五章 水资源综合利用	197
一、长江口陈行水库避咸蓄淡潜力探讨	197
二、居住区雨水利用工艺及其设计水量计算	205
三、国内外雨水利用的历史和发展	208
四、城市污水回用现状及发展趋势	211
五、电解法工艺在回用水处理中的应用前景	215
六、中水回用的风险讨论	219
七、水质、节水与水价的关系	222
八、地下水的高效取水滤管	227
第六章 供水管网及供水规划	231
一、字典序目标规划法在大型供水管网改、扩建工程优化决策中的应用	231
二、供水管网管理信息系统的开发和应用	235
三、景德镇市给水管网规划设计	238
四、山区城市供水规划技术研究	242
五、大都市配水管网抗震改造设计方法	244
第七章 污泥处理理论与实践	249
一、自来水厂排泥水处理技术的若干问题探究	249
二、PAM 在自来水厂排泥水处理中的调质作用及机理探讨	252
三、污泥脱水设备应用现状与分析探讨	257
四、新型滚压式污泥脱水机试验研究	260
五、采用陶瓷膜浓缩水厂污泥的研究	266

第一章 总 论

一、水的 21 世纪^①

概述

在世界人口达到 60 亿的世纪之交,惟有人才是万物之首的说法已经难以为继,与万物共存已经成为新世纪格言。水的问题不仅只限于食品生产、供给城市清洁的水以及防御洪水,而且还要保证各种水系生物都能健康生存,惟有如此,才能保证人类本身健康地生存,这种思想正逐渐成为人们的共识。与其他生物共存将迫使人们变得更加宽容。即使人与人之间,也广泛出现与水系统有关的南北问题、上下游问题、盐碱化问题等等难以解决的问题,因此,必须对作为人类文明基础的 21 世纪的水问题引起足够的重视。

1. 行将结束的近代(我们生长的时代)

经过始于 16 世纪的西欧产业革命时代,带来了延绵 200 年的人类大增殖的近代,如今已经达到地球的容量限度,发展速度开始降低,有人甚至认为 22 世纪将可能见到发展的结束。支撑近代 200 年来大发展的是近代科学技术,教育的发展带来了科学技术的普及。人们认识了自然现象和社会现象,并从中总结出规律,明确其因果关系,建立了学术体系,通过教育的普及,使近代的文明得以广泛传播。恰恰在这个时候,人们将人类活动的规模与地球的尺度进行对比,看到了近代文明在构成上的限度。地球环境制约的时代已经到来。

大多数近代产业的特征是在高速、大量的输送技术支撑下,使某种科学原理所形成的单项生产技术达到规模化和效率化,形成比较单纯粗放的产业,把地球上的空间按不同的目的进行纵向分割,从而发挥其应对高消费经济的机能与作用。近代生产活动的特征是以量(说穿了是金钱)为衡量成果的基准,以经济增长为主轴线,对各种价值都用单纯的量化(金钱化)指标来评价。近代历史上之所以能这样较单纯地进行社会分割,形成产业,组成行政系统、建立教育体系,保持社会有效地发展,是因为地球上的环境和资源(空间)有富裕。然而,在世界人口膨胀到 60 亿的当今世纪,这种条件已不复存在。

2. 水文大循环与流域的水利用

地球上人类赖以生存的根本,是水的输送和通过水对物质和热能的输送,而这种输送是由太阳的能量所驱动的、巡回在天和地之间的水文大循环来完成的。地球表面约有 3/4 被水覆盖。存在于地表的水的总量为 $136 \times 10^4 \text{ km}^3$,其中 97.3% 存在于占地球表面积 70.8% 的海洋中,陆地上的水不过仅占 2.8%。而其中大半(总水量的 2.14%,约 $2.92 \times 10^4 \text{ km}^3$)是冰盖和冰川的冰,它们在水文大循环中的循环速度极其缓慢,几乎不能作为水资源加以利用。海洋这一咸水的大贮水区域和陆地水域蒸发成水蒸气所形成的水,其总量仅 13 km^3 ,不过占地球上总水量的 0.001%。这部分水成为降水再次降到地面需要不到 10 天的时间,即成为地球上全部淡水的主要水源。以雨、雪等形式降到地面上的淡水,经过河水

^① 作者为丹保宪仁,金兆丰译校。

(1.25km^3 , 0.0001%)、淡水湖水 (125km^3 , 0.009%) 流入海洋。其间, 在地下水 (土壤水分 67km^3 , 0.005% , 深层地下水 8350km^3 , 0.61%) 和地面水 (河水、湖泊水等) 之间以各种形态和速度进行交换。由于地球的陆地表面积大约是地球总表面积的 $1/4$, 所以河水 flows 到海洋大约需要 $2\sim 3$ 天的时间。这样, 淡水完成一次循环 (水文大循环) 平均需要 $10\sim 11\text{d}$, 乃是一种高速度的输送过程。

从世界上淡水的利用量来看, 农业用水无论从目前的利用量 ($3300\text{km}^3/\text{a}$) 还是需要量的增长率来说都居于首位, 作为一种不能替代的资源, 与城市用水量 ($500\text{km}^3/\text{a}$) 和工业用水量 ($1300\text{km}^3/\text{a}$) 相比, 其数量级是不同的。输送到城市的水主要用作生活用水和工业用水。由于水具有清洗、溶解、输送、温湿度调节等多种性质, 利用这些性质, 将水用于饮用及其他多种用途。例如洗涤时, 物品上的污物被溶解到水里; 冲洗厕所时, 利用水的输送 (质量) 能力和水的溶解性, 将粪便输送出去, 并保持便器清洁等等。因为水是一种高速循环资源, 能够以低廉的价格大量获得, 所以被广泛应用于各式各样的用途。但是, 对维持生态系统的水和农业用水来说, 城市用水和工业用水不过只是总需要水量的一部分。

在相对于流域的大小来说用水规模很小 (小城镇或村庄)、而且森林保持良好的流域建设给水系统时, 可以只取必须量的优质原水, 经过简单的处理, 就能供给所有用途的自来水。而当河水流速极低, 不可能大量取水时, 则可代之以利用水质优良的地下水。在这种情况下, 很容易满足日本水道法第 1 条规定的城市给水系统的目标 “以低廉的价格供给清洁、丰富的水”, 可以说是理想的状况。日本夏、冬季河水水量少, 春、秋季河水水量多。在枯水季节水量最少的枯水流量 (一年有 355 天的流量超过该流量) 下, 每 1km^2 集水区域只有 $0.01\text{m}^3/\text{s}$ 的水流到河里, 在这样的情况下, 如果要保持正常供水, 每人需要 400m^2 的水源地。即使在冬季可以贮存降雪、森林及火山带的地下能保持地下水、枯水流量达到 $0.02\text{m}^3/(\text{s}/\text{km}^2)$ 的较佳状况的流域, 每人必需的水源地面积也超过 200m^2 。

随着城市人口的增加, 难以从天然河流常年获得必要的水量, 解决的办法是在春季融雪期以及台风季节把大量水贮存在上游水库中, 枯水期放出水库的水以补水量的不足。 1700mm 的年降水量的区域可按 0.6 强的径流率计算, 而在水库贮水增加了河水滞留时间的流域, 以及森林覆盖良好、保水率高的流域, 随着蒸发损失水量增加, 径流率低于日本的年平均值 $0.8\sim 0.65$ 。即使能够建造巨大的水库使河水流量常年保持完全平均化, 城市居民每人也需要 100m^2 左右的集水面积, 但对整个流域实现水量完全平均化实际上是不可能的, 能够做到调节 $30\%\sim 50\%$ 左右的径流量可能已经是极限了。因此, 用筑坝蓄水的办法进行水源开发, 通常每一居民必须有 300m^2 左右的集水面积, 才能维持近代给水系统的需要。

3. 城市水代谢与下游污染

送到城市的清洁水, 具有清洗、溶解、输送、温湿度调节等多种性质, 利用这些性质, 将水用于饮用及其他多种用途。正因为水具有多种性质, 各式各样的杂质就会进入水中。所有使用过的水均作为污水, 其中所含的有机物在水中分解将使河水腐败, 悬浮物沉淀后则将使河水水质恶化, 这些成分通过污水处理厂去除后, 污水被排放到城市沿岸或河流的下游。

栖息于河流中的细菌 (好氧型) 摄取和分解污水中的有机物时, 其呼吸作用将消耗水中的氧。氧在空气中的浓度可达 21% , 而它溶解在水中的浓度充其量为 $10\text{mg}/\text{L}$

(0.00001%)。氧是难溶气体，但它对水中的动物和细菌却是至关重要的气体。当细菌快速增长（因分解有机物）时，水中少量溶解的氧被消耗殆尽，此时不仅水中动物不能生存，就连利用氧来分解有机物的好氧细菌也难以生存，水则变成腐败状态。水中的细菌相由好氧细菌群置换为厌氧细菌群。有机物在这种无氧条件下发生厌氧分解（腐败、发酵）而减少。自然水域一旦发生这种状态，就会产生甲烷和硫化氢，生态系统被破坏。铁、锰、砷、磷等从底泥中溶出，对环境中的生物和人们的用水造成各式各样的障碍。

溶解氧不足量（氧亏量 OD）是指水中溶解氧与其饱和值的差值，这是一种比较粗的水污染指标。在比较湍急的河道，虽然伴随细菌对有机物的降解，水中溶解氧会下降，但同时空气在翻腾的水面溶入水中，溶解氧又得到补充。在下游平静的河道或湖泊中，氧气从水面的补充比较困难，一旦有机物较多时，水中溶解氧将消失。Streeter-Phelps 氧垂曲线理论提出了水中溶解氧在好氧细菌降解有机物时的消耗和从大气的补充的共同作用下，水中溶解氧浓度随时间而变化的公式。此后，用水中溶解氧消耗多少来表示可生物降解性有机物的量，即生化需氧量 BOD 成为水质污染的主要指标。每人每天排出的粪便的 BOD 为 15g，其他杂废水为 45g 左右，合计每人每天消耗水中溶解氧 60g。1 头牛的 BOD 为 600~750g/d，是人的 10 倍；1 头猪的 BOD 为 120g/d，是人的 2 倍。可见，上游畜产业对河流的污染负荷比城市更大。

可生物降解性有机物被栖息于天然河流和湖泊中的好氧细菌群分解，细菌本身得到增殖，这就是自然净化作用。把这种自然净化作用人工强化和高速化的结果，就产生了污水的生物化学处理。Eckenfelder 以 BOD 为主要指标，用于污水生化处理厂的设计和运行，以耗氧的概念把污水处理和环境管理统一起来，形成了经典的近代排水系统质量管理的基础理论体系，以及污水好氧生物处理系统（活性污泥法和生物滤池等），从而控制了 BOD 型的有机污染。

污水中 200mg/L 左右的 BOD_{95%} 被高浓度细菌捕食后，以污泥（菌胶团）形式被分离，使水中 BOD 降低到 10mg/L 的程度后再行排放。这与鱼类能够安全生存的水质要求 BOD 为 3mg/L（日本河流水环境质量标准 B 类）相比仍然太高，需要用 2~3 倍流量的清洁河水加以稀释，或进行更高层次的处理。日本的河流一般来说流程短，污水排放口靠近海域，大城市大都靠近海边的河道最下游，处理水直接排海，因而上述问题不太明显，可以免于增加深度处理设施。但是近年来下游流域和沿海污染加重，因此也正在逐渐引入深度处理设施。

上游农田大量施肥使磷和氮流入水系，引起下游封闭性水域藻类增殖，使水产生不愉快的味道和气味，有时还会产生有毒藻类。这是所谓富营养化现象。同时还有农药的流入，会显著增加下游人和动物的环境风险。这类污染属于面源（非点源）污染，是一种难控制的污染。另一方面，对于筑坝蓄水的河道，由于河水下流时间的平均化，可以提高水资源的利用率，但河水滞留时间长，通常的污水生化处理和河流自净作用不能有效去除的磷和氮等营养盐，会导致藻类的增殖，在污水处理厂增加脱氮、除磷深度处理工艺能控制下游的富营养化，增加活性炭吸附以及臭氧氧化等深度处理工艺能去除藻类引起的异臭味或毒性物质。欧美国国家只要在主要河流的下游以及穿过农业区域的河流下游筑坝蓄水，一般都要对进水进行混凝沉淀法除磷处理。未来的时代将重视削减环境负荷，富营养化的控制对于区域水环境代谢体系将成为必不可少的工作。

4. 水的社会环境问题

为了向下游大城市供给清洁的水，在上游筑坝建造许多水库，这使上游原来可以充分使用的水环境和水利用受到很大制约，筑坝还需要搬迁居民，这更加剧了上游居民对下游城市的不满。如果建坝后还要发电，由于水力发电厂的存在，除鱼类以外，其他水栖生物都失去了生存的自然环境，各式各样的问题都产生了。

另外，由于上游居民区和畜牧业产生的 BOD 型污染没有得到可靠的治理，农药和肥料等化学物质的污染也经常发生，下游对生命风险的增大也一天比一天担忧。再加上城市对所有用途的水都用自来水这一个系统来供应，为了最大量地取得上游最优质的水，拼命建造蓄水水库，结果不仅使上游居民的利益受到损失，而且还带来了水库贮水富营养化、污浊水的长期化现象等，可谓是自尝恶果。

要解决这些问题，并不是营造森林、停止筑坝就行了那么简单。江户时代日本列岛不过 3000 万人口，德川幕府 2 世纪半的闭关锁国政策（封闭型社会）在人口增加到 3000 万时就宣告失败。江户时代末期以自然能为基准的日本农业社会已经达到成熟和饱和，如果循着这一世界上罕见的大实验的历史来思考一下，可以说，即使加上北海道，仅仅依靠可再生能源，日本能够养活的人口充其量也不过 4000~4500 万。因此，只依靠太阳能的恩泽，目前 1 亿 2 千 5 百万日本人中，有 8000 万以上是过剩的，这些过剩的人，实际上是依靠国际贸易的财富从国外获得能源和资源而生存下来的。

处于这种境况的人们，所有的用水用途都用上游清洁的水，很少顾及中游的生态系统的保护，甚至连冲洗厕所都要用能够饮用的优质水，这种安逸的城市生活看来是难以为继的。当然，上游也有改变农业和畜牧业粗放方式的必要。日本 60% 的森林覆盖率居于世界之冠，却从国外进口廉价的木材，使外国的森林减少，自己的森林原封不动地被保存下来。城市领域大量使用不可再生的商业能源来赚取外汇，而国土的生物生产能力支撑了有 8000 万以上过剩人口的日本的繁荣和生存。东京和大阪等大城市区域，应该像香港和新加坡之类就生态系统来说属于孤岛型的城一样地考虑其城市水环境和水利用的形态。

海洋中的水量极大，甚至可以说是无限的，在消耗大量商业能源进行海水淡化之前，仍有人打算把粗放型的一根水管供给所有用途的用水方式（近代给排水系统）带到下一时代去继续使用。低质淡水（污水处理水等）经过深度处理成为优质水， 1m^3 消耗的能量不过 $0.5\text{kW}\cdot\text{h}$ 。而海水淡化成本就高得多，即使采用当今最先进的膜处理技术，为了得到 1m^3 淡水，需要消耗 $6\sim 7\text{kW}\cdot\text{h}$ 以上的能量，同时还要排出 1m^3 的浓废水。随着地球温暖化问题的出现，限定能量消耗上限的政策开始提上议事日程，因此海水淡化技术目前不可能推广使用。必须重新设计新的水环境和水利用体系，即上下游都要按“质”来区分水的用途，建立减少“质”的浪费的用水系统，从而能够以最小的能源消耗和物质消耗来满足人与人以及人与其他生物的共存。

5. 流域环境系统

对于城市化已经发展到顶点的 21 世纪的日本来说，必须构建由城市、生产绿地、自然保护区这三个明确划分的领域组成的新体系。第 1 领域是“城市与产业”领域，是以物资的生产与获取为最大目的，运用商业能源的集中消耗，几乎不进行生物生产（尽管也生产小孩）的领域；第 2 领域是“生产绿地”领域，是指以一粒种子获得尽可能多的生物产品的农田和人工林等领域；第 3 领域是“自然生态保护区”领域，是指仅依靠太阳能使生物群在多样化生物链中稳定生存的区域（图 1-1）。

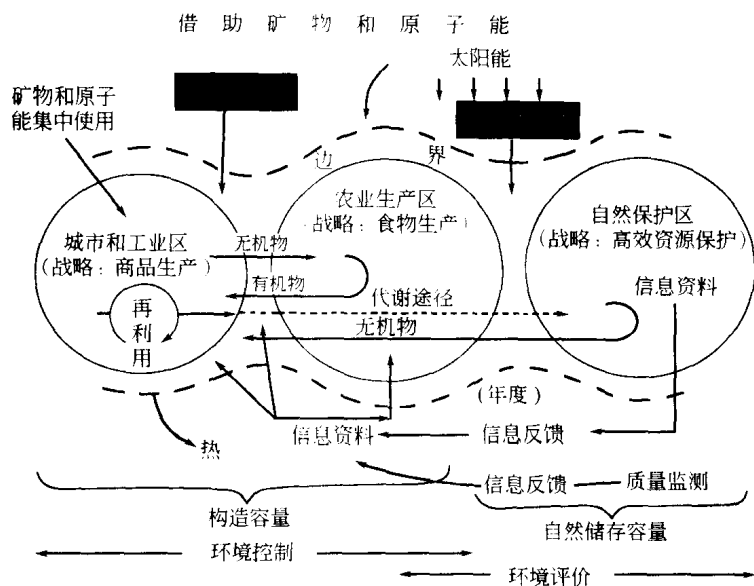


图 1-1 构成流域的 3 个领域

第 3 领域“自然生态保护区”领域把“人”作为生物物种之一来对待，过度蔓延的人类只有不以集团形式进入自然保护区，才能保全自然保护区的价值（Worth，不是价格 Value）。生物多样性的价值是不能用价格来换取的，自然生态林的价值就是一个例子。第 2 领域“生产绿地”领域具有介于第 1 领域和第 3 领域之间的中间特征，既有能以价格（Value）来评价的农、林产品的生产活动，又有如景观、休养等其他只具有价值的功能，两者共存于该领域中。

即使在第 2 领域中，农田和森林的特征也略有差异。对农田来说，20 世纪被称为绿色革命的土地生产能力的大幅度提高有赖于化石能的大量投入才可能实现，这就把作为太阳能驱动体系的生产绿地的本质，改变成依赖于人工能的体系。人工灌溉则进一步增强了这种色彩。作为农田生产物的食物生产，是能以 2 年的较短循环周期与城市领域进行循环的系统（食物、粪便、肥料）。与城市领域相同，在大多数情况下，食物生产系统也仅以能否获得物资这一价格（Value）基准作为评价的中心。在 WTO 体制中，食物供给已经加入了价格评价的市场机制，国际上屡屡发生价格竞争，其结果是使日本的食物自给率降低到 40% 多。

与此相反，同样属于生产绿地领域的人工林，是以太阳能为原动力营造的生态体系，生产物（木材）与城市领域维持着 50~100 年的长期需给关系，其回归路径也不如农产物那样直接。人工林的生态系统能比较稳定地保持数十年，相对于寿命较短的生物（如小型动物和草本植物等，有时甚至包括人），其功能接近于自然生态系统。作为取得清洁水的水源，管理良好的人工林显示出与自然保护领域相似的功能。在过度蔓延的人类划分城市和农业区域的边界时，以及划分农业区域与自然生态区域的边界时，作为一种具有较大惯性和包容力的生态系统的人工森林，似乎能够起到自然保护区域的作用。

以上 3 个领域依靠河流连接在一起，上游的森林区域负责集中和贮存优质的水，中游负责农业用水的水代谢，下游区域负责城市活动的水代谢，形成原型的流域构架。这种构架会因流域的产业结构、人口分布的不同而发生各种变化，此时必须按相应的流域规划进行管理。

6. 精确控制分离界限的水处理技术

近代给排水系统和环境保护所用的水处理流程，实际上是效仿地球水文大循环中，在生态学、地球化学作用下自然发生的水质变换过程，通过集中施加电力等人工能源，达到比自然过程快得多的水质变换速度。在给水处理方面的代表性技术是 19 世纪初期出现的慢滤系统（包括自然沉淀和慢速砂滤），以及 20 世纪初在美国东部出现、至今仍广泛用于给水处理

化学 沉淀 尺寸	有 机 物		无 机 物			分离 水平
	生物可降解 (BOD)	生物难降解 (COD-BOD)	有机络合物	可凝聚物	稳定物质	
10^{-3} m (悬浮物)		有机土壤			泥沙 黏土	
10^{-6} m	细菌		好氧生物处理			
			化学混凝处理			微滤 (MF)
						超滤 (UF)
10^{-9} m		腐殖酸	活性炭吸附	化学沉淀 Fe^{2+} , Mn^{2+} Ca^{2+}	离子交换 Na^+ , Cl^- NO_3^-	纳滤 (NF)
10^{-10} m	聚糖 臭味物质 有机酸	富里酸 DDT, DHO 等				反渗透 (RO)

图 1-2 水质变换矩阵

然而，到 20 世纪后期，人类已掌握了大量合成自然界本来不存在的各种有机化合物的化工技术。在通常的时空规模下这些有机物很难通过自然生态系统进行无机化或无害化，而在环境中积累起来，被生物摄取后产生致癌和致突变作用事例也不少，而且阈值低到 $10^{-9} \sim 10^{-12} (\mu\text{g/L} \sim \text{ng/L})$ 量级，定量分析也非常困难。通常的情况下各种污染成分并存，微量多成分的分析、影响评价和去除也都很困难，因此必须在传统水处理流程的基础上增加去除微量成分的处理环节。此外，近年来内分泌干扰物质，即所谓“环境荷尔蒙”的健康影响问题也引起关注，这些物质浓度极低，且毒性尚不明确。诸如此类影响人体健康的微量有机化合物在多数情况下自然净化速度极慢，只能通过活性炭吸附、离子交换、臭氧处理或纳滤等附加深度处理方法从废水或饮用水的原水中去除，水处理系统因此变得复杂化，且消耗大量的能量，这是人们不愿看到的情况（图 1-2）。

20 世纪 50 年代年初，美国就考虑到 20 世纪末将面临的淡水资源不足的问题，内政部设立了海水淡化局（Office of Saline Water），开展了大规模的研究工作。现在广泛采用的多段闪蒸法就是当时研究推广的结果，逐渐成为淡水化主流的反渗透法也是当时由佛罗里达大学 Reid 教授提出的。与常规水处理相比，淡水化所需的能量消耗要高出 10 多倍，达到 $7 \sim 10 \text{ kW} \cdot \text{h/m}^3$ 。这样的高能量消耗在地球环境时代是很难推崇的。尤其是对于能源几乎全靠进口的日本，推行淡水化相当于进口水资源，从安全保障的角度上也很难接受。沿岸取水要避开微量污染很不容易，城市排水接纳水域的负荷增加也成为问题，因此，除岛屿这样远离陆地的情况外，推行淡水化是不适宜的。城市应考虑推行污水处理水的再利用，以降低能量

消耗，同时减轻下游的污染负荷。

但是，20 世纪末进入实用化的微滤（MF）、超滤（UF）、反渗透（RO）等新型膜处理技术，其性能已经有显著提高，能够在图 1-2 所示的胶体到无机盐的广泛范围内，选择任意的分离尺寸，并能精确地设计分离的界限。尽管所需能量比传统处理工艺多，但却很容易与微生物生化反应等各式各样的反应工艺结合起来，组成复合水处理系统。而且容易自动化，适用于小型化装置，对 21 世纪的地域水系统规划中的分散型水处理系统特别合适，是 20 世纪末水处理工程的革命性技术。

7. 按质和量分类的新型水环境代谢体系

迄今为止的城市给排水系统中，给水以“充足、低价地向市民供给清洁的水”为目的，排水则以“促进城市卫生和发展、保护公共水域”为目的，给水和排水系统分别建设，并列存在，而忽略了二者都是水文大循环中串连的环节，未将两个系统融为一体、作为参与城市水的消费和自然水域中的水质变化过程的共同体来设计和运行。

传统的给排水系统是建立在这样一个基础上，即人们在大自然的恩惠下生存，在人类社会自在生活，按照生活上的种种要求进行人类活动，而自然环境的容量能够满足这些活动的需要。但是，当人类活动的规模相对于自然已变得较大时，在满足生活要求的同时，也必须考虑尽量减轻对环境的影响，建立新型水环境代谢体系。未来的城市水环境代谢体系要在“水资源按用途分类并重复利用，维护最低的价格（最小的能量消耗）”的方针下设计“供给必须水量并满足必要水质”的水供给系统，将“用水和排水（水代谢）的城市要对水环境负直接责任”作为技术和经营的原则。用达到饮用水要求的优质水供应各种用途，最终又作为污水混合处理排放的粗放型城市给排水系统不能再发展了。达到上述目的至少需要半个世纪，但我们必须从现在起就着手于建立“将人们的需要与地球环境加以综合考虑”的新型城市水环境代谢体系。

我们必须认识到，人类在地球上动物总体重中占了 25%，但在与其他动物共存的地球生态体系中并不是简单意义上的一个物种，而是具有极高能源和资源消耗密度、构成特异生存空间、飘浮于多样性自然生态体系的海面上、必须与其他生物共存的集团。而所谓城市区域是类似于动物体那样的能耗和代谢空间，它将电能和化学能等高质低熵能量的高密度消耗巧妙地置于再生系统内，严密控制与外部环境间的开放式物质代谢和热量代谢，因此，不能将人类的物质代谢与其他生物群在自然生态体系中的代谢混为一谈，而必须考虑建立一个复合型环境代谢体系，使与自然界间的开放式代谢按环境负荷最小的方式与自然界耦合，并具有明确的、可控制的组织边界，在边界的内侧（城市）建立具有模拟生物体那样的构造，以最小的能量消耗来驱动最低限度的物质再利用回路。地球上多种多样的生物链中，不乏能量最有效利用和物质多次再生利用的范例，形成了循环型自然生态体系。

人体内的水分起着物质和热量输送的作用，经过 20 多次的循环再利用后才排出体外，总水分的 5% 左右必须从体外补充。体内的循环系统和各个部位以水为媒体进行的热量、物质传递和分离，都通过生物膜进行，并伴随着生物化学反应，其动力为高质量的生物能。今天我们面向 21 世纪考虑向新型给排水系统的转换，利用有机合成膜进行精密分离的技术已经展示了其前景。在城市水环境代谢工程领域，200 年来人类与自然界间进行物质交换的生态学工程技术支撑了近代社会的发展，未来的社会将在此基础上进一步引入可称之为生体学或生理学技术的膜分离技术，作为水重复利用和再生循环利用的核心水处理技术。20 世纪初期的快速过滤和污水生化处理技术得到普及并广泛应用于近代给排水工程 100 年后，膜技

术的出现宣告了一项新的水质变换基本技术的诞生。

8. 新型城市和区域水环境代谢体系的构想

对于人类活动集中、人口密度高的地区，设立并列的二元输水系统，强化闭路循环，明确划分环境保护区（自然体系）和环境控制区（城市体系），建立人类活动和自然环境保持协调关系的水环境代谢空间。在生态系统的链接中，必须明确城市应负的责任，从而建立如图 1-3 所示的城市水环境体系。

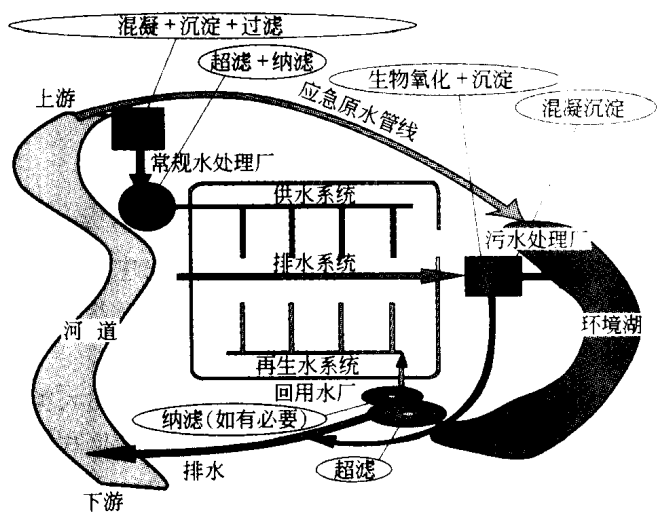


图 1-3 水环境圈

这种水环境体系的目标如下：

- ① 将水环境尽可能明确地划分为应保护和应利用的两个区域，并明确两个水环境区的结合条件，维持水环境保护区的良好自然条件；
- ② 环境控制（水处理等）仅在两个区域的边界处和城市区域内进行；
- ③ 充分认识到城市用水的本质是

“水质”的合理利用，尽可能按水质进行水的多次重复使用，将水的再利用工程中的附加能量消耗降到最低限度；

④ 水环境区域划分要有局限，以防止水环境代谢的无限度广域化，城市要在自身可控的限度内建立水环境代谢体系；

⑤ 环境控制区（城市）内的人类活动不能越过环境区域界限而波及环境保护区。

在城市与流域和农业的关系日益密切的 21 世纪，有必要建立如图 1-3 所示的城市水环境圈（区域）。自然水域的上下游全部河道中都保存着供给生物用的清洁水（包括人的饮用水），城市使用过的污水经过污水处理厂深度处理后，流入城市区域以内的贮水区域即所谓环境湖（Environmental lake）内。环境湖作为城市的水调节核心，其作用是使城市在自身控制范围内，具有检测和调节所需水量（水质）的功能。湖中适量的新鲜水由自然界获得补充，环境湖的水（再生水）则供给城市的非饮用水和农业用水。城市水环境圈中水处理的主体技术应该是膜处理技术。

二、中国城市供水的发展和展望[●]

自 1879 年旅顺引泉供水，1883 年上海杨树浦水厂投产，到 1949 年，中国供水事业发展缓慢。到 1949 年只有 72 个城市约 900 万人喝上自来水，日供水能力仅 $240 \times 10^4 \text{m}^3$ ，管道长度仅 6589km。1949 年后，中国供水事业快速发展，特别 20 世纪 80 年代至 90 年代大发展大提高时期，使供水事业得到蓬勃发展和提高。

1. 供水事业高速发展和提高的 50 年

(1) 快速增长的供水能力、供水量

中国城市供水能力及年供水量发展情况如图 1-4。

● 作者为宋仁元，沈大年。

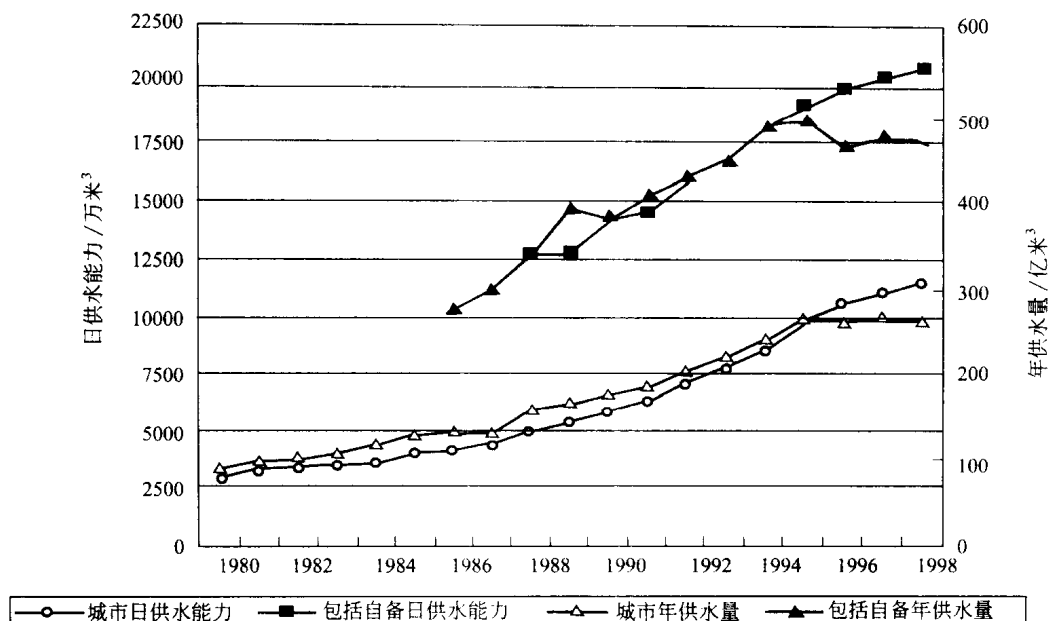


图 1-4 日供水能力及年供水量

到 1998 年，中国 660 多个城市共建有 2075 个水厂，供水能力为 $1.15138 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{d}$ (包括自备水源为 $2.09918 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{d}$)。管道长度 $13 \times 10^4 \text{ km}$ 。到 1999 年供水能力大于 $50 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的城市有 52 个，大于 $100 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的有 22 个，大于 $200 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的有 4 个。上海市的供水能力为 $0.102 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{d}$ (其中市区 $720 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$)，一个城市的供水能力就相当于 50 年代全国城市供水能力的 4 倍。

中国城市供水系统 1980~1998 年供水能力、最高日、平均日供水量如图 1-5。

1998 年城市供水能力已是最高日供水量的 1.28 倍 (包括自备水源为 1.30 倍)，除少数城市外，供不应求的矛盾已经解决。

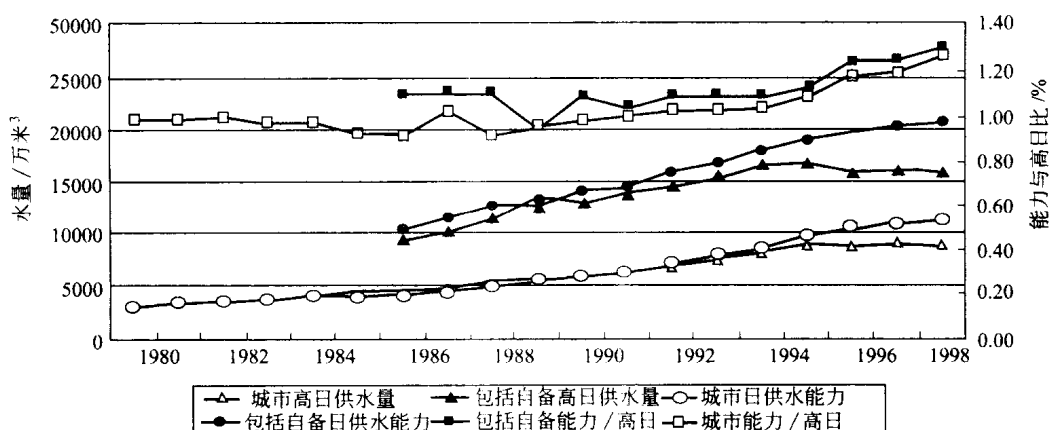


图 1-5 日供水能力高日水量及能力高日比

(2) 快速增长的供水人口、普及率及用水单耗

中国城市供水的用水人口及普及率发展情况如图 1-6。

中国城市供水的综合用水单耗及生活用水单耗发展情况如图 1-7。城市人口的 95.9%，