

环境科学与工程丛书

城市污水再生 及热能利用技术

CHENGSHI WUSHUI ZAISHENG JI

尹军 陈雷 白莉 编著



化学工业出版社

环境科学与工程丛书

城市污水再生 及热能利用技术

尹 军 陈 雷 白 莉 编著



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书重点围绕城市污水再生利用、污水热能利用及污水污泥资源化利用技术而展开。全书共分三篇 18 章, 论述了城市污水再生利用的意义、技术方法、途径, 污水资源回收的物质, 规划评价方法及实际工程分析; 详细介绍了城市污水热能回收利用系统的原理、技术方式、工艺技术分析、主要影响因素分析、有关实验研究方法 & 国内外研究与工程应用实例; 重点介绍了当前城市污水污泥的主要资源化利用途径、技术方法及需考虑的工程技术问题。

本书可供环境工程、市政工程等领域的工程技术人员、科研人员参考, 也可供高等院校相关专业师生参阅。

图书在版编目 (CIP) 数据

城市污水再生及热能利用技术/尹军, 陈雷, 白莉
编著. —北京: 化学工业出版社, 2010.3
(环境科学与工程丛书)
ISBN 978-7-122-07723-3

I. 城… II. ①尹…②陈…③白… III. 城市污水-废
水综合利用-研究 IV. X703

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 019283 号

责任编辑: 刘兴春 汲永臻
责任校对: 战河红

装帧设计: 杨 北

出版发行: 化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)
印 装: 三河市延风印装厂
787mm×1092mm 1/16 印张 16 $\frac{1}{4}$ 字数 421 千字 2010 年 5 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888(传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899
网 址: <http://www.cip.com.cn>
凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 58.00 元

版权所有 违者必究

前 言

改革开放以来,我国经济快速增长,各项建设取得巨大成就,但同时也付出了相当大的资源和环境代价,经济发展与环境保护的矛盾日趋尖锐。因此在全社会深入开展节能减排工作,发展低碳经济,加快建设资源节约型、环境友好型社会,对贯彻落实科学发展观,转变经济发展方式,应对全球环境变化,实现我国经济社会全面协调可持续发展具有极其重要而深远的意义。

为实现中国经济社会又好又快发展,调整经济结构,转变经济增长方式,缓解我国能源、资源和环境的瓶颈制约,并为中国水体污染控制与治理提供强有力的科技支撑,我国在2006年提出并已开始实施的《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020)》中,首次将水体污染控制与治理列为与大型飞机、载人航天与探月工程等相并列的16个重大科技专项。根据这一发展规划纲要要求,按照“自主创新、重点跨越、支撑发展、引领未来”的环境科技指导方针,水体污染控制与治理专项从理论创新、体制创新、机制创新和集成创新出发,针对解决制约我国社会经济发展的重大水污染科技瓶颈问题,重点突破工业污染源控制与治理、农业面源污染控制与治理、城市污水处理与资源化、水体水质净化与生态修复、饮用水安全保障以及水环境监控预警与管理等水污染控制与治理等关键技术和共性技术,遵循集中力量解决主要矛盾的原则,选择典型流域开展水污染控制与水环境保护的综合示范。水专项是新中国成立以来投资最大的水污染治理科技项目,总经费概算三百多亿元人民币。

城市污水处理与资源化利用,在建设资源节约型、环境友好型社会的进程中具有重要位置,也是目前国家实施的水体污染控制与治理专项的重要组成部分之一,需集当今各种污水处理技术之大成。因此,当前对城市污水资源化利用的研究与技术开发工作,应以更加宽广的视野进行观察、分析和讨论,并将城市污水看作是一个潜力巨大的、具有多种用途的资源,在不断深入研究开发各种高效节能污水资源化技术基础上,进一步从不同角度挖掘和开发污水资源化过程中所蕴藏的潜能。从自然资源利用角度而言,城市污水的再生与资源化利用应当是全方位的、彻底的,而不是局部的、有限的,否则就是对资源的一种浪费。

当今科学技术的飞速发展,已使人们认识到经过一定程度处理的城市污水,除了可以作为水资源的一部分加以利用外,还可以将其作为城市低温热能资源加以利用,从而开辟了清洁能源利用的新途径。作为21世纪的理想的城市污水资源化技术,不应仅仅满足于将城市污水只作为水资源方面的补充利用,应是集污水再生回用、污泥利用及污水热能利用三位一体的系统体系,而21世纪科学技术发展的水平和能力,已为实现这一目标提供了可靠技术保障。

本书正是基于上述观点和认识,为了适应形势发展的需要,根据近年来国内外城市污水资源化利用领域所取得的科学技术进步成果,在我们2003年编著的《城市污水的资源再生及热能回收利用》基础上重新进行编著而成的。本书主要围绕城市污水再生利用、污水热能利用及污水污泥资源化利用技术而展开,力图反映国内外该领域的最新科研及应用成果,以使内容更加丰富,系统性更强,既具有较强的理论性和技术性,又具有一定的实用性。我们希望通过该书的编著,为进一步丰富和完善城市污水资源化利用理论与技术体系,推动我国城市污水资源化利用总体技术水平的提高做出微薄贡献。

考虑到污水再生回用、污水热能利用及污泥资源化利用技术各有其相对独立性,特别是

国内有关污水热能利用技术方面的系统论述极少，在本书编著过程中，除设置第一篇有关城市污水再生与资源化技术的内容外，独立设置一篇专门论述城市污水热能利用技术的内容，同时又单独设置了一篇有关污泥资源化利用方面的内容。在这种框架下，本书共分三篇：第一篇在分析了城市污水资源特征基础上，论述了城市污水再生利用的意义、技术方法、途径，污水资源回收的物质，规划评价方法及实际工程分析；第二篇基于水源热泵技术的日趋成熟与发展，在分析了热泵原理与特性的基础上，详细介绍了城市污水热能回收利用系统的原理、技术方式、工艺技术分析、主要影响因素分析、有关实验研究方法及国内外研究与工程应用实例；第三篇在论述和分析污水处理过程中产生的固体废物——污泥的特性及处理利用现状基础上，重点介绍了当前城市污水污泥的主要资源化利用途径、技术方法及需考虑的工程技术问题。

在本书的编著过程中，由陈雷、尹军、林英姿负责第一篇的内容编写，尹军、白莉、韦新东负责第二篇的内容编写，尹军、张立国负责第三篇的内容编写，全书最后由尹军统稿和定稿。

限于作者水平和编著时间，本书在编著过程中如有不妥之处，敬请读者予以批评指正。

编著者
2010年1月

目 录

第一篇 城市污水的再生回用与资源回收

第 1 章 概述	1
1.1 城市污水资源的特征	1
1.1.1 水资源状况及其特征	1
1.1.2 水资源危机及解决对策	4
1.1.3 城市污水资源的特征	6
1.2 城市污水再生回用与资源回收的意义	7
1.2.1 城市污水再生回用与资源回收的目的	7
1.2.2 城市污水再生回用与资源回收的意义	8
1.3 城市污水再生利用的发展状况与前景	9
1.3.1 国外污水再生利用的发展状况	9
1.3.2 我国污水再生利用的发展历史与现状	12
1.3.3 污水再生存在的问题及发展方向	13
第 2 章 城市污水再生回用方法与资源回收技术	15
2.1 物理处理技术与方法	15
2.1.1 混凝技术	15
2.1.2 过滤技术	16
2.1.3 离心分离技术	17
2.2 化学处理技术与方法	18
2.2.1 氧化还原技术	18
2.2.2 电解技术	19
2.2.3 消毒技术	20
2.2.4 化学沉淀技术	23
2.3 物理化学处理技术与方法	26
2.3.1 气浮技术	26
2.3.2 吸附技术	27
2.3.3 超滤技术	28
2.3.4 萃取技术	29
2.3.5 液膜分离技术	30
2.4 生物化学处理技术与方法	30
2.4.1 好氧生物处理技术	30
2.4.2 厌氧生物处理技术	32
2.4.3 生物脱氮除磷技术	32
第 3 章 城市污水的再生回用	35
3.1 城市污水再生回用的分类与水质要求	35
3.1.1 城市污水再生回用的分类	35

3.1.2 城市污水再生回用的途径与水质要求	35
3.2 城市污水再生回用于工业用水	43
3.2.1 城市污水再生回用于循环冷却水	43
3.2.2 城市污水再生回用于生产工艺用水	45
3.3 城市污水再生回用于农业用水	47
3.4 城市污水再生回用于景观水体	49
3.5 城市污水再生回用于地下水回灌	51
3.6 城市污水再生回用于建筑中水	51
3.7 城市污水再生回用于生活杂用水	52
3.8 城市污水再生回用其他方式	53
3.9 城市污水再生回用的经验总结与发展趋势	56
3.9.1 城市污水回用于农业灌溉	57
3.9.2 城市污水回用于工业用水	57
3.9.3 城市污水回用于娱乐景观用水	58
3.9.4 城市污水回用于地下水回灌	58
第4章 污水的资源回收	60
4.1 概论	60
4.2 金属离子的回收	60
4.2.1 化学沉淀法	60
4.2.2 离子交换法	62
4.2.3 吸附法	63
4.2.4 电化学法	65
4.2.5 微生物净化回收	65
4.3 酸碱物质的回收	66
4.3.1 酸的回收	66
4.3.2 碱的回收	68
4.4 油类物质的回收	70
4.4.1 含油废水回收油类物质	70
4.4.2 含油污泥回收油类物质	71
4.4.3 重污油回收的实例	71
4.5 有机原料的回收	72
4.5.1 有机原料的回收方法	72
4.5.2 造纸黑液酸吸法回收木质素	74
4.6 污水的综合利用	74
4.6.1 基本概念	74
4.6.2 水资源的综合利用	75
第5章 城市污水再生利用项目的规划与评价	76
5.1 概述	76
5.2 城市污水再生利用项目的目标与规划	76
5.2.1 城市污水再生利用的目标	76
5.2.2 城市污水再生利用项目的规划方法	77
5.2.3 城市污水再生利用项目的规划方案	78
5.2.4 城市污水再生利用项目的规划范围	78

5.3 城市污水再生利用市场评估	79
5.3.1 城市污水再生利用市场信息调查	79
5.3.2 城市污水再生利用市场评估	80
5.4 城市污水再生利用工程的设计原则	81
5.4.1 城市污水再生利用工程设计的特点	81
5.4.2 城市污水再生利用工程设计的组织	83
5.4.3 城市污水再生利用工程项目的合同	83
5.5 城市污水再生利用工程项目的经济分析	85
5.5.1 经济分析的目的	85
5.5.2 经济分析的方法	86
5.5.3 经济评价的敏感性分析	89
参考文献	91

第二篇 城市污水热能的回收利用

第6章 概述	92
6.1 城市低温热能资源	92
6.2 城市污水的热能特征	93
6.3 城市污水热能回收利用的意义	94
6.4 城市污水热能回收利用发展状况	95
第7章 热泵原理与特性	97
7.1 热泵工作原理	97
7.2 热泵的基本运行	98
7.2.1 制冷过程	98
7.2.2 压焓图 ($p-H$ 图)	99
7.2.3 冷冻机的基础计算	101
7.2.4 冷媒	101
7.3 不同热源的热泵种类	102
7.4 热泵的特性	104
7.4.1 性能表示方法	104
7.4.2 能力特征	107
7.4.3 使用范围	108
第8章 城市污水热能回收利用系统原理及方式	109
8.1 热回收热泵系统	109
8.2 污水热源泵的组成及工作原理	110
8.3 城市污水热能回收与利用系统工作原理	111
8.4 城市污水热能利用的基本方式	112
8.5 城市污水热能利用热力学分析	113
8.6 其他水源热能回收系统	114
8.6.1 中水热能回收系统	114
8.6.2 河水、海水的热能回收系统	114
8.7 热泵集中供热(冷)系统	115
8.8 城市污水在融雪方面的热能利用	116

第 9 章 城市原生污水热能回收技术分析	117
9.1 城市原生污水热能回收利用方式分类及特点	117
9.1.1 泵吸式	117
9.1.2 热交换方式	118
9.2 城市原生污水热能回收利用方式分析及比较	121
9.3 城市原生污水热能回收利用系统污水水质控制	122
9.3.1 城市污水热能回收利用系统污水水质控制技术措施	122
9.3.2 城市污水热能回收利用系统污水水质控制技术装置	122
第 10 章 城市污水热能回收利用系统运行状况分析	124
10.1 城市污水热能回收利用系统评价指标的计算与分析	124
10.1.1 城市污水热能回收利用系统节能性评价指标的计算与分析	124
10.1.2 城市污水热能回收利用经济性评价指标的计算与分析	125
10.1.3 城市污水热能回收利用系统环保性评价指标的计算与分析	125
10.2 处理后污水热能回收利用系统运行状况	126
10.2.1 用于供暖时的运行状况	126
10.2.2 用于空调制冷时的运行状况	127
10.3 原生污水热能回收利用系统运行状况	128
10.3.1 用于供暖时的运行状况	128
10.3.2 用于空调制冷时的运行状况	129
10.4 不同换热形式的污水热泵工程运行能效分析	131
10.4.1 直接换热式机组运行工况分析	131
10.4.2 间接换热式机组运行工况分析	132
10.4.3 两种换热形式的系统运行效果比较	134
第 11 章 我国城市污水热能回收利用可行性分析	135
11.1 我国城市污水热能回收利用节能状况和经济性的分析	135
11.1.1 计算和分析方法	135
11.1.2 分析结果	135
11.2 我国城市污水热能回收利用对减少大气污染的作用	139
11.2.1 计算和分析方法	139
11.2.2 分析结果	140
第 12 章 污水热能利用系统实验研究	142
12.1 污水热能利用实验台	142
12.1.1 实验台构成及主要设备	142
12.1.2 测试系统标定	145
12.1.3 实验台误差分析	146
12.1.4 实验台性能检测	148
12.2 盘管换热实验	148
12.2.1 盘管中换热介质流动方向对换热量影响	148
12.2.2 盘管连接方式对换热量影响	149
12.2.3 盘管入口温度对换热量影响	149
12.3 系统整体供热特性分析	150
12.3.1 室内外温度变化情况	150
12.3.2 系统供热量、耗热量及供热系数	151

12.3.3	系统整体供热工况实验结果分析	152
12.4	热泵机理特性分析	153
12.4.1	热泵机组日平均吸热量、供热量及耗功量	153
12.4.2	机组瞬时吸热量、供热量及耗功量	154
12.4.3	蒸发温度、冷凝温度及热泵性能系数	155
12.4.4	热泵机组供热工况实验结果	155
12.5	污水热能利用系统的数学模型化	156
12.5.1	换热盘管数学模型	156
12.5.2	热泵机组数学模型	159
12.5.3	污水热能回收利用系统程序框图	160
第13章	国内外污水热能回收利用实例	163
13.1	国内某城市污水热能回收利用研究实例	163
13.1.1	试验流程及条件	163
13.1.2	与其他供能方式的比较	164
13.2	国内某污水厂二级出水热能利用实例	165
13.2.1	二级出水热泵系统	165
13.2.2	运行维护	166
13.2.3	基建投资和运行成本	167
13.3	国内某住宅建筑污水热能利用实例	168
13.3.1	地下环路式水源热泵系统	168
13.3.2	地下水式水源热泵系统	169
13.3.3	水环式水源热泵系统	169
13.4	日本城市污水热能回收利用工程实例	170
13.4.1	利用城市污水的热能供热和制冷	170
13.4.2	直接利用热能城市污水的热能融雪	170
参考文献		174

第三篇 城市污水污泥资源化利用

第14章	城市污水污泥特性及资源化利用状况	175
14.1	污水污泥的来源与分类	175
14.1.1	污水污泥的来源	175
14.1.2	污水污泥的产生量	175
14.1.3	污水污泥的分类	177
14.2	我国城市污水污泥的特性	178
14.2.1	污泥中营养物质含量	178
14.2.2	污泥中重金属离子含量	179
14.2.3	污泥中碳水化合物、脂肪和蛋白质的含量	181
14.2.4	污泥的含能量	181
14.2.5	污泥的碳氮比、pH值及酸碱度	181
14.2.6	污泥的微生物学特性	181
14.2.7	污泥中的有毒有机物	184
14.3	国内外城市污水污泥资源化利用状况及趋势	184
14.3.1	我国城市污水污泥资源化利用状况	184

14.3.2	国外城市污水污泥资源化利用状况	185
14.3.3	我国城市污水污泥资源化利用中存在的问题	186
14.3.4	我国城市污水污泥资源化利用对策	189
第15章	城市污水污泥土地利用	192
15.1	农田利用	192
15.2	林地利用	193
15.3	园林绿化利用	193
15.4	用于严重扰动的土地改良	194
15.5	污泥土地利用应注意的问题	195
15.5.1	加强病原菌和寄生虫的控制	195
15.5.2	重视对污泥中重金属及有毒有机物的控制	195
15.5.3	注意盐分和氮、磷等养分的影响	196
15.5.4	污泥的施用量	197
15.5.5	制定完善标准和法律法规,推广与普及环境知识	197
15.6	污泥土地资源化利用准则	198
15.6.1	污泥施用年限	198
15.6.2	污泥施用率	198
第16章	城市污水污泥堆肥	200
16.1	概述	200
16.2	堆肥的基本原理	200
16.2.1	堆肥过程的基本原理	200
16.2.2	堆肥过程的微生物学	201
16.2.3	堆肥过程的热力学	202
16.3	污泥堆肥工艺及其控制	203
16.3.1	污泥堆肥技术发展历史和现状	203
16.3.2	堆肥材料的选择	204
16.3.3	堆肥材料的混合	209
16.3.4	污泥堆肥过程的工艺控制	213
16.3.5	污泥堆肥工艺设备的类型	216
16.3.6	污泥堆肥的前处理和后处理工艺	218
16.3.7	堆肥产品的质量要求	218
16.4	堆肥工艺臭气的控制	221
16.4.1	臭气的来源	221
16.4.2	臭气控制技术	222
16.4.3	生物过滤的基本原理	222
16.4.4	生物过滤工艺的设计和运行	223
16.4.5	生物过滤工艺的不足	223
16.4.6	气体质量的监测	224
第17章	城市污水污泥在建材方面的利用	226
17.1	烧结建材	226
17.1.1	污泥砖	226
17.1.2	人工轻质填充料	228
17.2	污泥制水泥	228

17.2.1	概述	228
17.2.2	技术处理要点	229
17.3	污泥制生化纤维板	231
17.3.1	基本原理	231
17.3.2	制造工艺	232
17.4	污泥制陶粒	233
17.4.1	概述	233
17.4.2	河湖底泥制陶粒	233
17.4.3	污水处理厂污泥制陶粒	235
第 18 章	污水污泥两相厌氧消化及其他资源化利用途径	236
18.1	污泥两相厌氧消化制沼气	236
18.1.1	两相厌氧消化工艺基本原理	237
18.1.2	两相厌氧消化工艺处理混合污泥的效能	238
18.1.3	预处理对低有机质污泥厌氧消化性能的改善	239
18.2	污泥气化法	241
18.2.1	基本原理与工艺流程	241
18.2.2	应用实例	241
18.3	其他方面的资源化利用	242
18.3.1	污泥制动物饲料	242
18.3.2	污泥制吸附剂	242
18.3.3	污泥作黏结剂	243
18.3.4	污水污泥替代部分纸浆用于造纸的初步研究	243
参考文献		244

第一篇 城市污水的再生回用与资源回收

第 1 章 概 述

水在自然界中的循环运动即水的自然循环。在没有人类社会干扰的情形下，水的自然循环是良性的。大气中的水与地球表面的水通过降水过程及蒸腾作用相互循环补给，地表水与地下水通过渗流过程相互补给循环。降雨或积雪融化汇成径流，由江河汇集于湖海，再经蒸发到大气，而回到源头。在上述水的自然循环中，一些杂质会进入水中，造成一定程度的污染，但在环境容量范围内，水的自净作用对污染可以起到足够的缓解作用，使水可以维持一定的洁净度。

人类社会的生活、生产离不开水，大量的水在人类取用后即进入了水的社会循环。用过的水被人类不同程度的污染后，一般被废弃并任其回到天然水体中。废水带入的杂质远远超过环境容量，无法通过自净作用保持水质，导致天然水体的污染程度日益加剧，也使水的循环进入恶性状态。

上述情形是由于水的社会循环不完善造成的。长期以来，人类只重视取用水，忽视了废水的处理与再用。但随着水环境的恶化，取用水也逐渐面临着由于原水变化带来的安全问题、技术问题、经济问题、社会问题等。因此人们已认识到，只有从优化水的社会循环着手，才可能从根本上解决水的资源与环境问题，保障人类社会的可持续发展。

在水的社会循环中，污水的再生与回用是一个最为关键的环节。污水经二级处理，排放的仍然是大量的污染水，仅仅是污染的程度得到一定减轻，经年累月的进入水体，仍然会导致水体污染的继续加剧。只有将大部分的废水经过再生处理后代替新鲜水再用，才能减少用水过程对新鲜水的污染量，同时也可以减少排放到水体中的污染物的量。因此，水的再生与回用既是开源也是节流，是水的可持续开发利用的重要保障。

1.1 城市污水资源的特征

1.1.1 水资源状况及其特征

水在自然界通过蒸发、降水、下渗与径流等运动方式进行着周而复始的循环运动。水从地球表面蒸发，主要依靠地面蒸发、水面蒸发、海洋蒸发、叶面蒸发和截流蒸发等方式形成蒸汽，并在高空凝结。在一定的条件和环境下，凝结在空中的水以降雨或降雪的方式降落到地球表面。降落在陆地上的水或是以地面径流的形式汇集成江河流入海洋或湖泊，或是以地下渗流的形式渗入江河湖泊和海洋。

水在自然界的循环过程中，水量虽然不会增加或减少，但这种循环却对地球的自然环境和人类的生存产生巨大影响。通过蒸发进入大气的水汽是产生雨雪闪电的主要物质基础，空气中的含水量的多少，直接影响气候的湿润和干燥；降水形成的径流，冲刷和侵蚀地面，将平原切割成沟壑，山丘侵蚀为平原；水流搬运大量泥沙，堆积形成冲积平原，低洼地由于地

表水的蓄积形成湖泊或沼泽；渗入地下的水，溶解岩层中的物质，富集盐分，送入海洋；容易溶解的岩石受到水流强烈的侵蚀和溶解作用，形成岩溶等地貌；降水将大气中游离的氮素带到地面，滋养植物；陆地上径流将大量的有机物带入海洋，供养海洋生物。此外，水在自然界的这种循环也为人类利用水资源创造了基本条件。

自然界的水，其总量约为 $1.4 \times 10^{18} \text{ m}^3$ ，其中海洋占总水量的 94%，约为 $1.3 \times 10^{18} \text{ m}^3$ ，陆地上 6% 的水资源中有 4% 是深层水或高矿化度水，其水量约为 $5.5 \times 10^{16} \text{ m}^3$ ，其余 2% 为淡水。而这 2% 的淡水中又有近 1.7% 为冰川，仅有余下的 0.3%（约 $0.47 \times 10^{16} \text{ m}^3$ ）的淡水开发条件较好，其中逐年更新的淡水仅占总剩余量的 1%，即全球总量的 0.003%，其绝对量约为 $4.7 \times 10^{13} \text{ m}^3$ ，而且其中在一定经济技术条件下能为人们利用的又极为有限（表 1-1-1）。

表 1-1-1 地球水资源的分布

水的类型	体积/ km^3	占总水资源的比例/%
海洋	1.32×10^9	93.7
咸水湖及内陆海	1.04×10^5	0.008
大气中的水	1.3×10^4	0.001
土壤及渗透水	6.7×10^4	0.005
冰帽及冰川	2.92×10^7	2.14
浅层地下水(<800m)	4.17×10^6	0.31
深层地下水	4.17×10^6	0.31
河流	1.25×10^3	0.0001
淡水湖	1.25×10^5	0.009
合计	1.4×10^9	100

1.1.1.1 我国水资源状况

我国水资源量包括地表水资源量和地下水资源量。地表水资源量是指河流、湖泊等水体的动态水量，通常用河川径流量来表示。我国水资源主要来自降水，水资源总量较为丰富，国家水利部门的调查统计表明，我国年平均降水总量约为 $6 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ，平均降水深 648mm，小于世界平均降水深 798mm 和亚洲平均降水深 741mm。有 45% 的降水转为地表和地下水资源量，其余 55% 的水量为植物蒸腾或地表水分蒸发所消耗。以河川径流量为代表的地表水资源量约为 $2.7 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ，折合径流深 284mm，地下水资源量约为 $8.3 \times 10^{11} \text{ m}^3$ ，扣除地表和地下水重复计算的 $7.3 \times 10^{11} \text{ m}^3$ ，水资源总量为 $2.8124 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ，与河川径流量相似。我国湖泊的储水总量为 $7.6 \times 10^{11} \text{ m}^3$ ，其中淡水储量约占 28%，为 $2.17 \times 10^{11} \text{ m}^3$ 。

我国河川年径流量位居世界第六位，按国土面积计算，平均每平方公里的产水量为世界陆地平均每平方公里产水量的 90% 左右，但由于人口众多，我国的人均占有水资源量仅有 2300 m^3 ，不足世界人均占有水量的 1/4，列世界第 110 位；我国耕地每公顷平均水量约 26250 m^3 ，只占世界平均值的 1/2。预计到 2030 年，中国人口接近十六亿的高峰时，人均水资源仅有 1760 m^3 ，即使在充分考虑节水的情况下，估计用水总量为 $(7 \sim 8) \times 10^{11} \text{ m}^3$ ，要求供水能力比现在增长 $(1.3 \sim 2.3) \times 10^{11} \text{ m}^3$ 。扣除必需的生态环境需水后，全国实际可能利用的水资源量约为 $(8 \sim 9) \times 10^{11} \text{ m}^3$ ，预计的用水量已经接近合理利用水量的上限。不仅如此，我国水资源时空分布不均匀，淮河流域及其以北地区的国土面积占全国的 63.5%，但水资源仅占全国总量的 19%。此外，水资源的年内、年际分配严重不均，大部分地区 60%~80% 的降水量集中在夏秋汛期，洪涝干旱灾害频繁。

新中国成立以来，我国进行了大规模的防治水害和开发利用水资源的工作，取得了巨大成就，但同时在水资源利用和管理方面也存在着许多问题：可利用的水资源量占水资源总量

的比重小，对水资源的综合利用不够，地下水开采过量，水的浪费问题也十分突出，特别是北方水资源严重不足。另外，我国水污染现象普遍较严重，据 2007 年国家有关部门调查，虽经多年治理，全国地表水污染依然严重，七大水系总体为中度污染，75% 的湖泊出现不同程度的富营养化，这都导致了我国可利用的水资源日益短缺。水资源缺乏和水域污染已成为我国经济和社会发展的制约因素，我国也被联合国列为 13 个水资源贫乏的国家之一。我国缺水严重的城市如表 1-1-2 所列。

表 1-1-2 我国缺水严重城市统计资料

缺水城市/座(全国:114)		占缺水城市比例/%	占该地区城市的比例/%
南北分	北方地区:71	62.3	30.0
	南方地区:43	37.7	17.8
东西分	沿海地区:48	42.1	25.0
	中部地区:41	36.0	20.0
	西部地区:25	21.9	25.0

资料来源：城市可持续发展与水污染防治对策。

衡量一个国家淡水资源储备多少的标准是：淡水消耗量占全国可用淡水的 20%~40% 的为中高度缺水国家，超过 40% 的为高度缺水国家。据统计，我国可利用的淡水资源平均 $11 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ，按目前的正常需要和不超采地下水，我国年缺水总量在 $(3 \sim 4) \times 10^{10} \text{ m}^3$ 。全国用水量低于日均 10L 或 15L 的严重缺水人口已达 4700 万，100 多个水资源缺乏的城市中有 40 个城市被列为水荒城市。全国农村约有 500 万人，3000 万牲畜饮水困难。每年平均受害农田达 20km²。根据水利部门调查分析，我国北方缺水地区总面积已达 58 多万平方公里，包括北京、天津、河北、山西、河南和山东等地。尤其是遇上干旱少雨的年份，常使河道干涸断流，水库储水锐减。水资源紧张严重阻碍了国民经济的发展，给人民的生活带来很大的不便。

随着经济和社会的高速发展，中国需水量将愈来愈大，如果不采取有力措施，我国有可能在未来出现更严重的水危机，水资源问题已成为中国实施可持续发展战略过程中必须认真解决的重大问题。

1.1.1.2 我国水资源的特点

我国地域辽阔，地处亚欧大陆东侧，跨高中低三个纬度区，受季风与自然地理特征的影响，南北、东西气候差异很大，致使我国水资源的时空分布极不均衡。

(1) 水量在地区上分布不均衡 我国南方地区，特别是广东、福建、浙江、湖南、广西、云南、西藏东南部等地区水系发达，水量丰沛，其水资源量占全国水资源总量的 80% 以上，人均水资源占有量为 4000m³ 左右。而我国北方地区，如内蒙古、甘肃、宁夏、新疆西部和北部、东北西部等地区干旱少水，水资源严重缺乏，其水资源量仅占全国水资源总量的 14% 左右，人均水资源占有量仅为 900m³ 左右，已低于国际水资源紧缺限度 ($\leq 1000 \text{ m}^3$)。

此外，我国水资源分布与降水分布基本相似。影响我国大部分地区降水的是来自西太平洋的东南季风和印度洋、孟加拉湾的西南季风，雨季随这两个季风的进退而变化。我国东南沿海地区年降水量通常超过 2000mm，西南部分地区，平原地区略少约 1600~1800mm，长江中下游地区大部分超过 1000mm，淮河流域为 800~1000mm，华北平原和东北平原的年降水量约为 500~600mm，东北西部降水则更少，仅为 300~400mm，而大西北沙漠区，年降水量更是不足 25mm。由于河川径流主要来自降水，因受海陆位置、气候条件、地形条件等因素的影响，我国水资源的地区分布与降水分布相似，呈东南多、西北少，由东南沿海地

区向西北内陆递减，分布很不均匀。

(2) 水量在时程分配上分布不均匀 由于受季风气候的影响，我国降水和径流在年内分配上很不均匀，年际变化大，枯水年和丰水年持续出现。降水的年际变化随季风出现的次数、季风的强弱及其夹带的水汽量在各年有所不同。年际间的降水量变化大，导致年径流量变化大，而且时常出现连续几年多水段和连续几年的少水段。一般来说，我国南方属于低纬度湿润地区，降雨量较多，雨季降雨集中，气温高，蒸发量大，水文循环强烈；我国北方则属于高纬度地区，冰雪覆盖期长，气温低，水文循环弱；而我国西北干旱地区降水稀少，蒸发能力大，但实际蒸发量小，水文循环也较弱。我国各地年最大降水量和年最小降水量的比值相差较大，西北地区（除新疆西北山地外）一般大于 8，华北地区 4~6，东北地区 3~4，南方地区 2~3，西南地区小于 2。

河川径流量的年际变化除取决于降水外，还受地面条件、蒸发量大小、汇流面积大小等影响，降水量大时，往往地面吸收少，蒸发也少，形成径流所占的比重就大，相反降水量少，地面吸收多，蒸发量也多，形成径流所占的比重就小，结果使径流变化幅度比降水变化幅度更大。长江以南各河流的最大径流量与最小径流量的比值一般小于 5，而北方地区可高达 10 以上。

另外对于我国绝大部分河流来说，径流的年内分配主要取决于降水的季节分配。冬季我国大部分地区少雨雪，各河流均为枯水季，我国北方冬季径流量占全年的 4%~6%，长江流域及西南部分地区占到 6%~8%。春季随着气温回升，径流量也开始增加，北方河流春季径流量所占比例一般达 6%~8%，南方地区有些河流则开始进入汛期。全国降雨一般集中在 6~9 月份，在夏季汛期 4 个月的径流量约占全年的 60%~70%，而我国北方河流的汛期径流更为集中，部分河流的最大 4 个月径流占全年径流的 80%以上。

我国降雨量和径流量在年内分配上的不均匀以及年际变化大导致了我国水资源在时程分配上分布不均匀，这不仅容易造成频繁的大面积洪灾或旱灾，而且对水资源的开发利用也极为不利。

(3) 水资源与人口、耕地的分布不相适应 我国北方，包括东北、西北、山东半岛、海河流域、黄河流域、淮河流域的水资源量只占全国水资源总量的 14.4%，人口却占全国的 43.2%，耕地占全国的 58.3%，而南方，包括华南、东南、西南以及长江流域的水资源量占全国水资源总量的 81%，人口只占全国的 54.7%，耕地占全国的 35.9%。以单位水量相比，南方的亩均水量约为 4134m³，而北方的亩均水量约为 454m³，相差 9 倍多，可见我国的水资源分布与人口、耕地的分布极不适应。

正是这种水资源与人口、耕地的分布不相适应的特点，使得我国各地对水资源的开发利用程度差别较大，南方多水地区的水的利用程度较低，而北方干旱少水地区的地表水、浅层地下水的开发利用程度较高。

1.1.2 水资源危机及解决对策

1.1.2.1 水资源危机原因

联合国早在 1977 年 2 月就向全世界发出警告“水不久将成为一个重要的全球性危机”。如今，全世界面临水资源危机，产生的原因主要包括用水量急剧增加，水污染、水资源开发不合理，浪费严重等几个方面。

随着社会的迅速发展和文明的不断进步，特别是人口的急剧增加，人类对水的依赖程度越来越高，世界用水量急剧增加。如今世界人口已超过 60 亿，地球上的人口净增 10 亿多，而世界淡水消耗的增长速度比人口的增长速度还要高出 2 倍多。现在人类平均每天提取的淡水水量约为 10km³，年均 3500km³，是 200 年前世界工业初期时的 36 倍多，近半个世纪，淡

水的提取量以每年 4%~8% 的速度递增。

在水资源的消耗中,用水量最大的是农业,其中灌溉用水一般占农业用水的 90% 左右,平均每生产 1t 粮食用水 2500t 水。由于世界粮食需求量不断增加,耕地面积迅速增加,从 1900 年的 4000 多万公顷剧增到 1990 年的 2.5 亿公顷。我国农业总用水量已超过 4000 多亿立方米,占全国总用水量的 70% 多,其中农业灌溉用水量就达 3600 亿立方米,目前世界平均农业用水量约占总用水量的 69%,而工业用水约占 23%,公共生活用水约占 8%。

目前全世界每年仅排入水体的污水量有 7000 亿立方米,被污染的水量达 85000 亿立方米。我国污水排放量大,水体水质总体上呈恶化趋势,水环境问题仍十分严重。由于我国废水处理率低,大部分废水都未经处理而直接排入水体,构成水体污染。全国 532 条河流多数受到不同程度的污染,流经全国 42 个大城市的 44 条河流,已有 93% 受到污染,其中污染严重的占 79%。水体污染破坏生态平衡,其直接后果是水源的可利用程度下降,可利用水量减少,从而加剧了水资源的紧张状况。

我国水资源利用水平低下,水资源开发利用不平衡,各地区水资源开发利用程度差异大,地下水开采过量,也是导致我国水资源出现危机的重要原因。我国辽河、海河的地表水资源的开发利用程度为 60% 左右,珠江、长江的开发利用程度仅为 15% 左右。海河流域地下水资源的开发利用率为 90%,辽河流域约为 60%,珠江、长江流域地下水资源的开发利用率仅有百分之几。在我国北方地区,常因地表水量不够,造成地下水开采过量。据统计,我国北方 10 个省、自治区和市,由于地下水过量开采,地下水形成降落漏斗 50 余个,漏斗面积约 30000km³。而在全国范围内,已形成了 164 个地下水超采区,部分地区出现地面沉降,地下水位下降与海水入侵等问题。

另外,我国用水浪费严重,水资源利用效率较低。目前,我国农业水利用率仅为 40%~50%,灌溉用水有效利用系数只有 0.4 左右。不少地区种植业采用大水漫灌,用水定额高达 15000m³/(km²·a)。例如西北地区达 16500m³/(km²·a) [最大可达 32500m³/(km²·a)],东北地区达 12000m³/(km²·a) [采用喷灌技术耗水量为 3000~3150m³/(km²·a),滴灌耗水量为 2040m³/(km²·a)]。工业方面,工业用水重复利用率低,仅为 20%~40%,单位产品用水定额高,目前我国工业万元产值用水量是发达国家的几倍以上。因此,虽然我国国民生产总值低于美国和日本,但取水量却超过美国和日本,我国取水量 5000 亿立方米,是美国的 1.08 倍和日本的 5.6 倍。城市生活用水方面,供水管网和卫生设备的漏水是形成浪费的主要原因,我国城市供水管网的漏水量约占全部供水量的 10%。

此外,我国产业结构不合理,高耗水量行业发展集中,生产管理水平低,生产用水浪费严重;人们思想认识模糊,缺乏危机感,节水意识差,城市生活用水、家庭用水浪费现象普遍;缺少全局控制,违反生态规律发展,出现掠夺式开发、浪费式利用、混乱式管理;水的重复利用率低,相关法律、制度不健全等,都是我国水资源危机出现的原因。

1.1.2.2 水资源危机的解决对策

水已经是影响世界经济发展和人民生活水平提高的重要因素,水资源缺乏问题是当前和今后我国社会经济可持续发展最突出的问题之一。面临越来越严峻的形势,如何从其长期困扰我国社会经济状况中,找出一条合理可行的解决水资源危机问题的出路,已是当前亟待解决的重要课题。根据我国各方面的客观情况,解决水资源紧张问题应采取以下几方面的措施。

(1) 转变观念 水不是取之不尽,用之不竭的,水是一种资源,淡水更是一种极其有限的资源,需要给予足够的重视和保护。加强环境教育,培养个人良好节水习惯,避免用水浪费。另外控制世界人口的增长,也是缓解人类对水需求紧张形势的必然选择。

(2) 改善生态环境,提高水资源的可利用率 植树造林,扩大森林覆盖率,可提高水源