

农业节水技术丛书

废水的 农业资源化利用

● 马耀光 马柏林 主编



化学工业出版社
环境科学与工程出版中心

农业节水技术丛书

废水的农业资源化利用

马耀光 马柏林 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

废水的农业资源化利用/马耀光, 马柏林主编. —北京:
化学工业出版社, 2002. 4
(农业节水技术丛书)
ISBN 7-5025-3786-4

I. 废… II. ①马…②马… III. 废水综合利用-农业
IV. X703

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 020318 号

农业节水技术丛书

废水的农业资源化利用

马耀光 马柏林 主编

责任编辑: 麻雪丽

责任校对: 李 林

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

北京市彩桥印刷厂印刷

北京市彩桥印刷厂装订

开本 787×1092 毫米 1/16 印张 11¼ 字数 266 千字

2002 年 4 月第 1 版 2002 年 4 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-3786-4/X · 182

定 价: 22.00 元

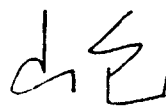
版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

序

我国的西北部和内蒙古的大部地区属于干旱、半干旱气候类型，华北则主要处于半湿润易旱地带，缺水是影响这些地区农业生产发展的一个主要限制因素。特别是近年来，随着社会的进步和经济的快速发展，用水量日益增大，对水的浪费和污染也越来越严重，再加上干旱灾害加剧，解决水资源短缺的问题也就更加紧迫，如何节约用水提高水的利用率和利用效率已成为当前普遍关注的一个焦点，也是国家正谋求解决的重大战略问题之一。

国家节水灌溉杨凌工程技术研究中心通过自己辛勤努力，在节水技术研究、节水设备开发及灌溉监控方法等方面取得了不小的成绩，为我国的节水事业做出了应有的贡献。他们结合自己的研究成果及国内外节水灌溉经验，组织相关人员编写了“农业节水技术”丛书一套，包括《节水灌溉与自动控制技术》、《废水的农业资源化利用》和《现代高效节水灌溉设施》。该丛书从节水灌溉的发展概况到自动化节水灌溉技术的理论与方法；从常规节水灌溉技术到现代高效节水灌溉技术；从有限灌溉水的利用技术到再生水的资源化利用等多个方面深入细致地介绍了我国节水农业取得的成就与发展前景，内容翔实，深入浅出，颇具特色，相信该丛书的出版对推动我国节水农业、特别是节水灌溉的发展，对促进我国全民节水意识的提高以及普及节水灌溉科学知识都具有重要的现实意义。



2001年11月

前言

现代工业文明的使命和人类不懈地追求富裕与提高生活品质的要求，就是为人们创造美好生活所需的丰足的物质财富；同时，也产生了更多的生产和生活废弃物。近百年来，随着工业发展规模的快速增长和人口的膨胀与都市化，生产和生活废物的大量产生已使水体和生态环境不堪重负，也使人类生存环境遭受到严重的威胁，其中废水对水资源的毁损和生态环境的污染最为严重。

从生态学的观点看，社会综合生态系统的健康演进，必须保持生态系统结构的完整和系统功能的正常运行，主要表现为物质流动和能量循环的稳定和持续运行。现代社会所面临的水资源危害和生态环境破坏的主要原因，就是社会综合生态系统的食物链结构不完善和物能循环功能阻滞，即缺少分解者和分解功能阻断，造成了废物和垃圾不能及时地分解并回归自然，破坏了社会综合生态系统的生态平衡。要解决废水造成的水资源危害和生态环境污染问题，就必须增强分解功能。废水的农业资源化利用就是充分利用废水的物质和能量资源、分解和消化污染物、恢复社会综合生态系统功能和保护环境的有效途径。

沧浪之水清，可以濯吾首；沧浪之水浊，可以濯吾足。解决废水的水资源和环境污染问题，首先要对废水进行分质、分流加以管理利用，还应从用水和废水产生的全过程进行水量控制、污染控制、水质处理与再生利用和科学管理，其主要途径就是节约用水、清洁生产、废水的资源化利用和废水的系统环境管理。本书的编写就是试图从工业生态系统的角度认识 and 解决废水的农业资源化利用问题，为工业生产的生态化、水资源的可持续利用、水资源和水环境保护提供一种综合思路。

本书由西北农林科技大学、中国科学院水利部水土保持研究所和国家节水灌溉杨凌工程技术研究中心组织撰写，由马耀光编写第1章、第2章、第3章（3.1节）、第6章（6.2～6.5节），马柏林编写第3章（3.2，3.3，3.5～3.11节）、第4章（4.1、4.3～4.6节）、第5章（5.1节），梁淑芳编写第3章（3.4节）、第4章（4.2节）、第5章（5.2至5.8节），宋孝玉编写第6章（6.1节），马耀光、马柏林负责全书的统编定稿；李书琴和张宝林参加了本书的编图。

本书的编写得到了中国科学院水土保持研究所牛文全博士的热情关心与支持，西北农林科技大学的马孝义教授和曹红霞博士为本书提供了大量的宝贵资料，在此表示诚挚的感谢。特别感谢中国工程院院士山仑研究员对本书的关怀并为之作序。

由于编者水平所限，许多问题的讨论自嫌不足，书中错误和纰漏之处在所难免，敬请同行专家批评指正。

编者

2002年3月于杨凌

内 容 简 介

本书系统地介绍了废水的水质特征及其环境效应，节约用水与清洁生产的主要途径，工业废水及生活废水在农业灌溉、水产养殖、地下水人工回灌、有机肥料加工及农业能源利用等方面的资源利用途径和方法，废水资源化利用及无害化处理的基本方法和废水排放的环境管理等相关内容；注重废水资源化利用的综合实效和环境目标管理。

可供企业管理、城镇规划、水资源开发利用及环境保护等方面的工作人员和相关专业的大专院校师生参考使用。

目 录

第 1 章 废水的产生及其环境效应	1
1.1 水资源开发利用与社会经济发展.....	1
1.1.1 自然界的水与水资源	1
1.1.2 世界与中国的水资源状况	3
1.1.3 人类用水的历史	5
1.1.4 现代社会对水的需求	5
1.2 废水的排放与利用.....	8
1.2.1 废水的产生	8
1.2.2 废水的排放	9
1.2.3 废水的利用.....	10
1.3 废水的物质特征	11
1.3.1 废水的分类.....	11
1.3.2 废水的物质组成.....	11
1.3.3 废水的水质特征.....	12
1.4 废水的环境效应	14
1.4.1 废水的排放环境.....	14
1.4.2 废水的水环境效应.....	16
1.4.3 废水的土壤环境效应.....	17
1.4.4 废水的生态效应.....	17
1.4.5 废水污染对人体健康的影响.....	18
1.4.6 典型的水污染及其危害.....	19
1.5 废水资源化的重要性	22
1.5.1 面对水资源短缺的挑战.....	23
1.5.2 废水的资源特征.....	24
1.5.3 废水资源化利用对环境保护的意义.....	26
参考文献.....	26
第 2 章 节约用水与清洁生产	27
2.1 节约用水及其环境效应	27
2.1.1 节约用水及其意义.....	27
2.1.2 节约用水的主要途径.....	28
2.1.3 节约用水效益.....	31
2.1.4 节约用水的评定与潜力.....	31
2.2 清洁生产的基本原理	34
2.2.1 清洁生产的概念.....	34
2.2.2 工业生产系统与工业生态学.....	35

2.3	清洁生产的评价	36
2.3.1	清洁生产的评价指标	36
2.3.2	清洁生产的评价方法	37
2.3.3	产品生命周期评估	37
2.3.4	产品的环境标志	39
2.4	清洁生产的途径	39
2.4.1	产品的生态设计	39
2.4.2	工业污染的全过程控制与综合防治	40
2.4.3	实行清洁生产的主要措施	41
2.4.4	清洁生产的审计	42
2.4.5	清洁生产的环境管理体系	42
	参考文献	44
第3章	工业废水的农业资源化利用	45
3.1	废水农业资源化利用的主要途径	45
3.1.1	废水农业资源化利用的基本原则	45
3.1.2	废水的农业资源化利用途径	46
3.2	工业废水的水质	47
3.2.1	工业废水的分类与特征	47
3.2.2	工业废水的水质指标	48
3.3	在生产过程中利用废水资源	49
3.3.1	清污分流 合理用水	49
3.3.2	企业内部的废水资源化	49
3.3.3	企业之间的废水资源化	49
3.3.4	废水在外环境的资源化	50
3.4	工业废水中生产原料的回收利用	50
3.4.1	鞣革含铬废液中铬的回收利用	50
3.4.2	含油废水中浮油的回收利用	53
3.4.3	含汞废水中汞的回收利用	55
3.4.4	含酸废水中酸的回收利用	57
3.5	对工业废水的无害化处理工艺设计	58
3.5.1	废水处理的基本方法和系统	58
3.5.2	工业废水无害化处理工艺选择	60
3.6	工业废水用于农田灌溉	61
3.6.1	农田灌溉对水质的要求	62
3.6.2	农田对污水的净化特点	63
3.6.3	工业废水灌溉的特点	64
3.6.4	灌溉用水的协调与管理	64
3.6.5	污水灌区环境质量控制	65
3.7	废水用于水产养殖	66
3.8	废水用于地下水回灌	67

3.8.1	回灌的必要性	67
3.8.2	对回灌水水质的要求	67
3.8.3	对回灌水的净化处理要求	68
3.9	工业废水污泥用于肥料	69
3.9.1	工业废水污泥组成	69
3.9.2	工业废水污泥处理	69
3.9.3	工业废水污泥用于肥料	70
3.9.4	工业废水污泥对土壤环境的影响	71
3.10	工业废水的环境管理	72
3.10.1	现状与存在问题	72
3.10.2	建立强有力的环境管理机构, 实行水资源和水环境的综合管理	72
3.10.3	强化环境管理, 逐步提高技术管理水平	72
3.10.4	借鉴、利用成熟的管理手段和经济手段	73
3.11	特质工业废水的资源化利用问题	73
3.11.1	乳制品工业废水资源化	73
3.11.2	啤酒业废水资源化	74
3.11.3	酒精与白酒工业废水资源化	76
3.11.4	制糖工业废水资源化	78
	参考文献	79
第4章	生活废水的农业资源化利用	80
4.1	生活废水的水质特性	80
4.2	无害化处理生活废水工艺设计	81
4.2.1	生活废水无害化处理工艺选择原则	81
4.2.2	生活废水无害化处理典型工艺	81
4.2.3	生活废水处理新工艺简介	83
4.3	生活废水用于农业灌溉	84
4.4	生活废水用于农业能源和肥料	84
4.4.1	生活废水用于沼气生产	84
4.4.2	生活废水用于肥料	90
4.5	生活废水用于农业养殖	93
4.5.1	生活废水用于养鱼	94
4.5.2	沼渣养蚯蚓	96
4.5.3	沼渣喂猪	98
4.5.4	沼肥养殖螺旋藻	98
4.6	对生活废水的环境管理	99
4.6.1	建立分类收集和处理系统	99
4.6.2	发展生活污水资源化的生态模式	99
4.6.3	生活废水资源化治理的对策	100
	参考文献	101
第5章	农业废水资源化利用中的处理方法与新技术	102

5.1	水质与水质目标·····	102
5.1.1	生活废水水质·····	102
5.1.2	工业废水水质·····	102
5.1.3	农业用资源化废水的水质目标·····	102
5.2	有毒物质的去除·····	102
5.2.1	非金属无机毒物的去除·····	102
5.2.2	金属无机毒物的去除·····	108
5.2.3	易分解有机毒物的去除·····	112
5.2.4	难分解有机毒物的去除·····	114
5.3	耗氧有机物的去除·····	115
5.3.1	活性污泥处理·····	115
5.3.2	厌氧生物处理·····	117
5.3.3	生物膜处理·····	118
5.3.4	基因菌处理·····	120
5.3.5	植物处理·····	121
5.4	除盐·····	123
5.4.1	电渗析法·····	124
5.4.2	反渗透法·····	125
5.4.3	离子交换法·····	125
5.5	混凝与沉淀·····	126
5.5.1	混凝剂的使用·····	126
5.5.2	沉淀分离体系·····	128
5.6	生产原料的回收处理方法·····	129
5.6.1	化学沉淀·····	129
5.6.2	膜法·····	131
5.7	消毒·····	132
5.7.1	水中的微生物和生物性污染·····	132
5.7.2	污水的生物学指标与消毒要求·····	133
5.7.3	消毒方法与消毒剂·····	134
5.7.4	消毒的动力学及影响消毒的因素·····	135
5.7.5	氯化消毒·····	136
5.7.6	臭氧消毒·····	137
5.8	化学氧化与还原·····	138
5.8.1	基本原理·····	138
5.8.2	氧化法处理工业废水·····	138
5.8.3	还原法处理工业废水·····	140

参考文献·····	141
-----------	-----

第6章 废水排放的环境管理·····	142
---------------------------	------------

6.1 节约用水管理·····	142
-----------------	-----

6.1.1 中国节约用水现状·····	142
---------------------	-----

6.1.2	节约用水的发展趋向及目标	144
6.1.3	促进和保障节水发展的主要措施	146
6.2	环境水质评价与废水资源化利用途径评估	148
6.2.1	环境水质评价	148
6.2.2	废水的资源化利用途径评估	152
6.3	按环境要求排放废水	156
6.3.1	生产过程废水的排放	157
6.3.2	废水资源化利用的废水排放	160
6.3.3	废水的最终处置与排放	161
6.4	废水排放的水质规划与环境管理	162
6.4.1	废水排放的水质规划	162
6.4.2	废水排放的环境管理	164
6.5	污染水体的水资源利用问题	164
6.5.1	污染水体的基本特点	165
6.5.2	污染水体的恢复性治理	165
6.5.3	污染水体的水资源利用方式	166
参考文献		166

第 1 章 废水的产生及其环境效应

水是地球表面最主要的天然组成物质，水是生命的源泉，是人类社会最重要的自然资源，它已成为现代文明社会的血液；水还是自然环境中最活跃的地质作用营力，山河壮丽，万木葱郁，芳草萋萋，皆水之功；生命从水中诞生，古人傍水而居，市井文化开始了人类的都市文明，水利农业使人类首次富足，至今仍需 80% 的水资源滋养农业；水维系着生命，滋润着空气，滋养着植被，清洁着人类，洗涤着文明，维持着生态平衡，水使整个世界充满无限生机与活力。

随着现代人类社会的快速发展，除了具有重要的资源属性外，水已具有了同等重要的环境属性、社会属性和经济属性。水资源的日益短缺和人类污染对水质的严重威胁，使水已成为新世纪的主题，“珍惜我们的生命之源”已成为新世纪的最强音。

水一直洗涤着人类的身体、生活和社会，现代社会大规模多样化的用水产生的大量废水流向原野和江河湖海，使水资源和水环境遭受严重的污染和破坏，使本已面临严重水荒的现代人临江受渴。废水的任意排放，既浪费了资源，又污染了水源，破坏了生态平衡，恶化了人类的生存环境，加剧了水资源的日益紧张。

如何处理废水和人类垃圾一直是倍受污染之苦的现代社会和人们深思的问题，经过近一个世纪的艰苦探索，人类已经找到了解决废水问题的有效途径，那就是节约用水、清洁生产和废水的资源化利用，其中废水的资源化利用将成为人类最终处置废水和解决水污染问题的主要途径，废水的利用程度和水平将成为 21 世纪社会发展和社会文明的重要指标之一。

1.1 水资源开发利用与社会经济发展

水作为人类社会最重要的自然资源广泛地使用于能源开发、生产资料、生活资料、优化环境和维持生态繁育与生态平衡方面。水作为资源的基本特征包括水量和水质两个方面，不可分割，水量是指水体中蕴藏的水的数量多少，当水量的丰度能够满足最基本的利用和开发需求时，才能体现出其资源特性；水质是指水与其中所含所有物质及其物理化学特质，对于所有可能的用水目的适用性和重要性的综合特征。没有量的质和没有质的量都没有资源意义。

1.1.1 自然界的水与水资源

1.1.1.1 自然界的水

水是地球上分布最广的自然物质，它作为地球上较轻的物质，在几十亿年的重力分异过程中集中分布于地球的表面，在逐渐趋冷的地表环境中以液态和固态形式存在，覆盖着地球表面的 70.8%。就其水量而言，若将所有的水均匀分布于地表，地球表面的平均水深将达到 2 800m，其总量约为 13.86 亿 km^3 ，其中海水占 96.5%，地下水占 1.71%，冰雪水占 1.74%，河湖水仅占 0.014%，其中淡水只占总水量的 2.527%（表 1-1）。

就全球的总水量而言，全球人均可占有 2.3 亿 m^3 ，但由于水质、分布、技术和经济因素的限制，目前对海水、深层地下淡水、极地及山地冰雪固态淡水、盐湖水等仍不能被直接开发利用，人力可及的淡水资源储量约占地球总水量的十万分之三^[1]，人均不足 1 万 m^3 。

表 1-1 自然界水的分布

水体类型	总水量/km ³	比例/%	淡水量/km ³	比例/%
海水	1 338 000 000	96.50	0	0
冰雪水	24 064 100	1.74	24 364 100	68.70
地下水	23 716 500	1.71	10 846 500	30.96
湖泊水	176 400	0.013	91 000	0.26
沼泽水	11 470	0.0008	11 470	0.033
河流水	2 120	0.0002	2 120	0.006
大气水	12 900	0.001	12 900	0.037
生物水	1 120	0.0001	1 120	0.0032
总计	1 385 984 610	100	35 329 210	100

不仅如此，由于淡水资源在时间和空间上的分布极不均匀，在时空分布上可以控制、在技术经济上允许的可利用淡水资源就更为有限了。

1.1.1.2 自然界的水循环

水在海洋、大气和陆地之间永不停息地运动称为水循环。依水循环的范围不同可将其分为两种类型，一是海洋与陆地之间全球范围的水分运动，称为大循环或海陆循环，它是陆地水资源形成和赋存的基本条件，是海洋向陆地输送水分的主要作用；二是仅发生在海洋或陆地范围内的水分运动，称为小循环，其中内陆循环是陆地水分自交替运动的主要作用，它可以增加陆地水资源的动储量。自然界水分的循环和运动是陆地淡水资源形成、存在和永续利用的基本条件。

自然界水分的循环和运动，取决于下列 4 个方面的自然因素和作用。①水的相态变化特性和液态水与水气的流动性是自然水循环的前提条件，在地表常温下水可以发生三相态的相互转化，使水的运动和海陆传输成为可能；②太阳辐射热和地球引力对水的热力和重力效应是水分循环运动的源动力，它们为水的运动提供了不竭的能源，使水得以吸热而飞升，失热而凝坠；③空气的流动和大气环流的方向和强度影响着水分运动的方向和强度，影响着降水的分布及其特征和气象万千的气候现象；④地表形态、地表地质结构、土壤的类型和性状、植被的发育特征等自然环境条件影响着降水与表流的下渗及地表与地下径流的运动和转化过程。这些因素的综合作用，控制着自然界水分的循环、运动、分布、赋存和转化的基本特征，从而决定了水资源的时空分布和利用条件。

在各种自然因素作用下，自然界的水分循环主要通过以下几种方式进行。

(1) 水的蒸发作用 在太阳热力作用下，各种自然水体及土壤和生物体中的水分产生汽化进入大气层中的过程统称为蒸发作用，它是海水、地下水和低位地表水获得能量并向高位运移的主要作用，是海洋向陆地进行水分传输的必要条件，是大循环和陆地淡水形成的主要作用。

(2) 水汽流动 由于太阳热力作用的变化和区域差别产生大范围的空气流动和大气中水汽压力差产生的渗透，是水汽流动的两种主要作用。湿润的海风将海水蒸发形成的大量水分子源源不断地送往大陆，是自然界水分大范围循环的关键环节；季风和大气环流是水分异地传输的主要载体，是海洋向陆地传输水分的惟一途径。

(3) 凝结与降水过程 大气中的水汽在水分增加或温度降低时达到饱和，便以大气中的各种颗粒物质或尘粒为凝结核而产生凝结作用，并以雨、雪、冰、霜、露、雾等形式的水粒降落地表而形成降水。只有降水才使来自海洋和异地的水分最终转化为陆地水，它是陆地淡水资源形成的主要途径和惟一方式，降水的丰匮决定了陆地水资源的数量和质量特征。

(4) 地表径流 在降水过程中, 由于地形及地表岩土性状等自然条件的影响, 降水的一部分在地表蓄满或超渗的情况下形成地表面流, 经过区域汇流形成河流或湖泊等地表水体, 并在重力作用下从高处流向低处, 最终汇入海洋或封闭湖泊形成地表径流, 河流是主要的地表径流水体, 也是人类主要的水源水体。

(5) 水的下渗和地下径流 降水的另一部分通过岩土层空隙系统渗入地下并在岩土层中缓慢运动形成地下径流, 地下径流或与地表径流相互转换最终流入海洋, 或在岩土层中长期滞流形成地下水体, 成为陆地水资源又一重要赋存形式。

1.1.1.3 水资源及其分布特征

陆地上的水由于处在积极的水循环过程中, 才使其具有宝贵的可更新水资源特征, 陆地河槽、湖盆及地下含水层中储存的水是很有限的, 而其循环更新的强度和数量却使水体永续存在, 为水资源的持续利用创造了条件。陆地上各种水体, 如降水、地表河湖、地下水库及山地冰雪层等都是水循环过程中的调节器, 其水资源丰度应以其更新能力或调节的强度和数量来衡量。全球每年约有 57.7 万 km^3 的水参与水循环。大气水约 8 天可更新一次, 河川水约 16 天更新一次, 湖泊水要需 16 年才可更新一次, 浅层地下水则需要数月或数年, 山地冰川则需要 1 600 年才能更新一次。对于人类控制的可用水资源量的确定, 至今仍以地表水和浅层地下水的可更新量来计算, 即水文年内的总水资源量 (表 1-2)。

表 1-2 全球水量平衡估算

区 域	面积/ 10^6 km^2	水平衡项	水量/ 10^4 km^3	区 域	面积/ 10^6 km^2	水平衡项	水量/ 10^4 km^3
海 洋	3.61	蒸发量	50.5	外流陆区	0.32	出流量	4.7
		降水量	45.8	内流陆区		蒸发量	0.9
		入流量	4.7			降水量	0.9
外流陆区	1.17	蒸发量	6.3	全 球	5.10	蒸发量	57.7
		降水量	11.0			降水量	57.7

陆地上的淡水资源由于受纬度、海缘地域、地形、大气环流特征、地质环境及区域气候等因素的综合影响, 区域水资源在时间和空间上的分布极不均匀。泰国曼谷的年平均降水量为 4 122mm, 而非洲的撒哈拉大沙漠及中国的塔里木盆地的腹地几乎不降水。降水量的多少决定了区域水循环的交替强度和区域水资源的丰匱, 有些缘海地区降水充沛, 陆地水资源极其丰富, 甚至饱受洪涝之苦; 而许多陆内地区降水稀少, 气候干旱, 水资源极缺, 甚至生物绝迹, 沙海茫茫, 因此水资源在空间区域上的分布极不均衡, 对人类社会和经济的发展具有决定性的影响。另一方面, 水资源的分布在时程上也存在很大的差异, 尤其是降水及其直接转化的地表径流在时程分布上变化很大, 年降水量变差系数 C_v 在相对干旱的地区可达 0.7 以上, 最大年降水量与最小年降水量之比 K 可大于 10, 日最大最小降水量比值甚至大于 100。河流年径流变差系数 C_v 在一些地区可达 1.0~1.5。时间和空间上的分布不均, 极不利于水资源的持续利用, 暴雨及洪水期洪涝成灾, 大量的可用优质水难以调节利用, 而旱季和枯水期严重缺水反成旱灾和水荒。地域的水资源分布与用水地区需水的矛盾也大幅度地增加了水资源的开发成本, 甚至有大量的水资源因遥不可及而白白流逝。

1.1.2 世界与中国的水资源状况

1.1.2.1 世界水资源总量

在全世界陆地上分布的可更新的水资源量为 4.7 万 km^3 , 从地表径流和地下径流的形式产出, 约占全球总水量的十万分之三点四, 1971 年人均占有 1.29 万 m^3 , 2000 年人均占有

0.78 万 m³。由于水资源时空分布上的局限和技术经济条件的限制，能被人们利用的水量还不到五分之一，如美国的水资源利用率为 17.6%，中国为 17.8%。全世界可利用水资源总量及其地区分布见表 1-3^[1]。

表 1-3 世界可利用水资源总量

地区	水量/km ³	比例/%	面积/10 ³ km ²	径流模数/ LS ⁻¹ (km ²) ⁻¹	(1971)人口/ 10 ⁶	人均水量/ 10 ³ m ³ ·a ⁻¹
亚洲	14 410	31	43 475	10.5	2 162	6.7
欧洲	3 210	7	10 500	9.7	654	4.9
北美洲	8 200	17	24 200	10.7	327	25.1
南美洲	11 760	25	17 800	21.0	185	63.6
非洲	4 570	10	30 120	4.8	290	15.8
大洋洲	2 388	5	8 950	52.54	19.8	314.4
南极洲	2 310	5	13 980	5.2	0	—
全世界	46 848	100	149 000	10.0	3 637	12.9

1.1.2.2 中国的水资源状况

中国的水资源总量为 28 124.4 亿 m³，其中多年平均地表径流量为 27 115 亿 m³，年均地下水资源量为 8 288 亿 m³，除去重复计算量 7 279 亿 m³，2000 年人均水资源占有量仅 2 163m³，约占世界人均水资源量 7 808m³ 的 27.7%，水资源相当贫乏（表 1-4）^[2]。

表 1-4 中国水资源总量及其分布

流域分区	地表水资源量 /10 ⁸ m ³	地下水资源量 /10 ⁸ m ³	重复计算量 /10 ⁸ m ³	水资源总量 /10 ⁸ m ³	产水模数 /10 ⁴ m ³ ·km ⁻²
东北诸河	1 652.9	624.9	349.3	1 928.5	15.45
海河	287.8	265.2	131.8	421.2	13.24
淮河	741.3	393.0	173.4	960.9	29.19
黄河	661.5	405.8	323.6	743.7	9.36
长江	9 513.0	2 464.2	2 363.9	9 613.3	53.16
华南诸河	4 685.0	1 115.5	1 092.4	4 708.1	81.08
东南诸河	2 557.0	613.1	578.4	2 591.7	108.08
西南诸河	5 853.1	1 543.8	1 543.8	5 853.1	68.75
内陆诸河	1 163.7	862.2	722.0	1 303.9	3.86
北方区	4 507.2	2 551.1	1 700.1	5 358.2	8.83
南方区	22 608.1	5 736.6	5 578.8	22 766.2	65.41
全国	27 115.3	8 287.7	7 278.6	28 124.4	29.46

由于受自然条件的影响，中国水资源的分布在空间上极不均衡。全国平均降水量为 648mm，而北方地区年降水量不足 400mm 的干旱半干旱地区面积占国土总面积的 47%；小于 200mm 降水量的地区面积占国土总面积的 29%，只占全国降水总量的 5.3%；占国土面积 63.5% 的北方地区只拥有全国水资源总量的 19%，产水模数只有南方地区的 13.5%。

中国水资源在时间上的分布也极不均衡。在广大的北方和西部地区，降水多集中于一年的 6~9 月份，约占年降水总量的 70% 以上，而其他季节降水稀少，气候干旱。年际变化也非常明显，北方地区的降水量年际变化有时相差 5~8 倍以上，淮河年径流量极值比 K_p 可达 19.5。

水资源在区域和时程上分布的极不均衡，不仅严重影响水资源的持续利用，加剧缺水地区水资源的紧缺状况，大幅度地增加异域调水和水资源工程调节的困难和成本，甚至频发大面积的水旱灾害，对水资源的合理利用和社会经济的可持续发展极为不利。

1.1.3 人类用水的历史

1.1.3.1 依水为生

在漫长的人类启蒙时期，人们以狩猎和采撷野果为食，其生存的命脉就是水。狩猎者蛰伏在河流或水坑附近的树林和草丛中，等待着捕杀或擒获前来饮水的野生动物，水源被当作吸引猎物 and 群猎最安全、最有效的食物来源。原始人类傍水而居，从最原始的方式直接获取饮食水源，无数古人类生活的遗迹都分布在水边的山洞或谷地，这种依水而居、逐水而徙的生活方式延续了无数个世纪，直到人们发现了利用土地栽培植物为止。

人们在平坦开阔的农地上耕作，可能远离了天然的水坑和河岸，但是，相对群居的小村落和聚居区的选择无疑是以可靠的流泉和水井为前提，半农半牧的部落社会和经济活动仍然是依水为生。

1.1.3.2 历史的转折

古人从狩猎、采集和放牧的生活方式逐渐被固定在农地上来从事耕种，一个关键的因素使人类历史发生了重大的转折，进入了一个全新的富裕的阶段，那就是灌溉。人们发现泉流和引水灌溉可以极大地提高粮食产量和农业生产的稳定性，从此，人类从仅能维持生存走向了出现粮食剩余的首次富裕。社会的分工、生活品的贸易、社会组织形式和真正的文化活动开始产生。

在距今五千至一万年的新石器时代，古老中国的仰韶文化时期，黄河流域及西北地区的许多河谷和近河地带，先民们即在肥沃的河谷土地上从事农业种植和专养家畜，山西夏县的西阴村遗址面积近半个平方公里。人们有石刀、石斧、骨锄、骨针、石纺车从事种植、缝纫、纺织、陶器制作等多种农业生产活动，谷物已成为重要的食物，社会分工已相当明显和多样化。引水灌溉已是农业发展的重要条件，乃至有专门的部落首长管理农业和水利。舜举八恺使主管后土，地平天成；舜陶于河滨；“卑宫室而尽力乎沟洫。禹，吾无闲然矣！”（论语·泰伯）；伯益凿井；仪狄作酒。这些都说明远古的中国先民引水凿井，从事农业使生产力明显提高，并有余粮作酒的史实。

至四千年前的夏初，社会发展已进入私有制，“今大道即陷，天下为家”，“城郭沟池以为固，礼义以为纪，以正君臣，”废“禅让”立“小康”（礼记·礼运），古人在发展引水灌溉的基础上，已能引水设沟池以固城邑。至三千年前的周代，农田灌溉已经成为有系统的群众性工程，沟洫制度已使田野中分布着不同等级渠道形成的灌溉系统。东周秦汉以晚，芍陂灌溉工程、引漳十二渠、都江堰、郑国渠、邗沟、灵渠等大型的农业灌溉和水运工程相继建成，大者灌地数百万亩，长者贯通两大水系；许多古代工程至今发挥着巨大的作用，泽被中华两千余年，在中国社会经济的发展中起着重要的推动作用。之后的各个历史时期，中国的水利事业方兴未艾，长盛不衰，水利工程的利用功能不断扩展，以农业灌溉、航运、城市供水为直接功用的水资源开发利用推动着农业的发展、社会生产力的提高、城市的形成和都市化、科学技术的进步和社会经济文化的全面发展，历史学家们将其概括为“水力文化”。

凿井取水灌溉在中国也有五千多年的历史，新疆人在干旱的内陆地区发明了科学的坎儿井取水技术，用于灌溉和供水。

1.1.4 现代社会对水的需求

人类社会发至16世纪的近代，西方国家先后兴起工业革命，科学技术和社会生产力空前发展，工业区和城市规模迅速扩大，社会生产和都市生活对水资源的需求也迅速膨胀，水资源利用的功能也不断增加，人类社会进入需水型社会。同时，用水量的不断增加，使人

们几近掠夺式地索取水资源，并随意地排放用过的弃水，未顾及或不愿正视水资源和水环境的自然特性，相继产生了水源枯竭、水质污染、土壤盐渍化、地面沉降乃至城市洪水、气候异常和生态退化等环境问题，水资源的不足和人类对水的需求之间的矛盾成为现代社会可持续发展的更具影响力的主动因素，更深刻地影响着人类社会发展的历程。

1.1.4.1 水资源的主要用途

现代社会中水的用途随着人类社会经济活动快速地多样化而日益广泛，除传统的农业灌溉和生活饮用以外，还有各种方式的工业用水、城市供水、畜禽用水、牧草灌溉、林业繁育、生态及环境用水、水力发电、航运、渔业、工程及河道冲淤等。此外，大规模的蓄、引水和调水工程的水资源利用不仅具有多功能用途，还具有水资源时空分布调控、改变区域生态与水环境特征、改变水质、旅游及景观水体和区域生态环境保育等特殊功能。其中农业用水仍然是最主要和用水量最大的用水部门。

在天然水资源日益短缺，水环境污染日益严重的情况下，人类废水的资源化利用及水源的重复利用也具有日益重要的经济、社会、环境和资源意义。

1.1.4.2 水资源开发利用现状

中国水资源的南北分布及流域环境条件差别较大，水资源开发利用程度和各行业用水量相差较大。中国1980年一些流域实际用水情况和2000年水资源供需情况见表1-5和表1-6^[3]。

表 1-5 中国 1980 年实际用水情况 (水量/10⁸ m³)

流域分区	地表水 供水量	地下水 供水量	供水 总量	工业用 水量	城镇生活 用水量	灌溉用 水量	农业人畜 用水量	其他农业 用水量	农业用水 总量
东北诸河	269.78	84.86	354.64	63.86	9.47	244.41	11.57	24.41	280.39
海 河	179.50	202.44	381.94	48.69	10.72	309.91	14.97	0.59	324.47
淮 河	402.33	128.93	531.26	38.42	5.30	454.61	27.20	5.73	487.54
黄 河	273.96	84.81	358.37	27.93	6.03	314.35	10.05	1.0	324.40
长 江	1 286.25	67.02	1 353.27	208.76	22.34	1 044.65	74.84	2.68	1 122.17
华南诸河	653.40	6.12	659.52	45.86	9.47	551.24	53.82	0.25	605.31
东南诸河	188.05	5.09	193.14	16.03	2.14	166.14	8.84	—	174.97
西南诸河	39.46	0.67	40.13	0.74	0.22	39.47	3.49	—	42.96
内陆诸河	520.53	39.52	560.05	7.03	2.02	532.55	7.84	9.29	549.68
北方区	1 614.10	540.16	2 154.26	185.93	33.52	1 854.81	71.73	40.02	1 966.48
南方区	2 167.16	78.90	2 246.06	271.39	34.17	1 801.52	140.77	2.93	1 945.41
全国	3 813.26	619.06	4 432.32	457.32	67.69	3 656.33	212.62	42.95	3 911.89
占总用水量/%				10.3	1.5	82.5	4.7	1.0	88.2

表 1-6 中国 2000 年水资源供需情况 (P=75%) (水量/10⁸ m³)

流域分区	可供水量	地表水可 供水量	地下水可 供水量	工业需 水量	城镇生活 需 水 量	农业需 水量	需水总量	缺水量
东北诸河	677.93	491.71	186.22	173.90	30.47	535.06	739.43	61.50
海 河	399.29	223.68	175.61	100.15	22.87	399.56	522.58	123.29
淮 河	745.78	585.28	160.50	144.31	19.48	659.80	823.59	77.81
黄 河	409.97	320.09	89.88	78.70	10.63	343.09	432.42	22.45
长 江	2 437.93	2 362.17	75.76	578.10	99.39	1 839.56	2 517.05	79.12
华南诸河	953.87	949.77	4.10	128.03	25.16	840.10	993.29	39.42
东南诸河	324.59	314.54	10.05	67.49	5.90	272.79	346.18	21.59
西南诸河	65.92	65.25	0.67	3.80	1.10	63.93	68.83	2.92
内陆诸河	662.69	548.00	114.69	27.70	3.97	649.12	680.79	18.10
北方区	2 895.65	2 168.76	726.90	524.76	87.42	2 558.66	3 170.84	275.19
南方区	3 782.32	3 691.73	90.58	777.42	131.55	3 016.38	3 925.35	143.03
全国	6 677.97	5 860.49	817.48	1 302.18	218.97	5 575.04	7 096.19	418.22
占总需水量/%				18.3	3.1	78.6	100	