



国家出版基金项目

ZHONGGUO SHUIZIYUAN

“十二五”国家重点图书出版规划项目

中国水资源

胡四一 王 浩 主编



黄河水利出版社



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

“十二五”国家重点图书出版规划项目

中国水资源

胡四一 王 浩 主编



黄河水利出版社
· 郑州 ·

内 容 提 要

本书是一部中国水资源综合性著作,包括上、下篇,上篇共9章,涉及中国水资源现状、问题、配置、节约、保护、调度和管理等各个领域;下篇共6章,包括气候变化对水资源的影响、农业水资源配置、河湖生命健康、水生态补偿机制、水资源环境经济、智慧流域等当前水资源研究的热点问题。

本书可供水资源、水文、环境、生态等领域的科研、管理和教学人员阅读,也可供水资源相关管理人员、关心中国水资源问题的社会公众等参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

中国水资源/胡四一,王浩主编. —郑州:黄河水利出版社,2016.9

ISBN 978-7-5509-1560-2

I. ①中… II. ①胡… ②王… III. ①水资源-研究-中国 IV. ①TV211

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 233581 号

组稿编辑:岳德军 电话:0371-66022217 E-mail:dejunyue@163.com

出版社:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市顺河路黄委会综合楼14层 邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话:0371-66026940、66020550、66028024、66022620(传真)

E-mail:hhsclbs@126.com

承印单位:河南瑞之光印刷股份有限公司

开本:787 mm × 1 092 mm 1/16

印张:36.5

字数:840千字

版次:2016年9月第1版

印数:1—2 000

印次:2016年9月第1次印刷

定价:180.00元

前 言

水是生命之源、生产之要、生态之基,事关人类生存、经济发展和社会进步。我国是世界主要经济体中受水资源胁迫程度最高的国家。人多水少,水资源时空分布不均,与耕地、能源、矿藏分布不匹配是我国基本水情。20世纪80年代以来,受气候变化和人类活动的综合影响,我国水资源整体朝着不利的方向演变,水资源问题日益凸显,正常年份全国缺水500亿 m^3 ,水资源与能源、环境并列为影响经济社会可持续发展的三大制约性因子,成为经济社会发展的主要瓶颈。如何实现中国水资源的可持续利用、水资源的保护已引起全社会广泛关注,当前以及未来一段时期,中国的水资源能否满足庞大人口规模的食物供应需求,能否支撑社会经济的平稳快速发展,能否维系水生态系统的健康良性运行,能否有效应对气候变化的影响,这些科学问题已经成为国际学术前沿热点。

中国历来高度重视水资源问题,2011年发布了中央一号文件《中共中央 国务院关于加快水利改革发展的决定》,明确了新形势下水利的战略要求,着力加快发展农田水利建设,推动水利实现跨越式的发展,把水利工作摆上党和国家事业发展更加突出的位置。2012年《国务院关于实行最严格水资源管理制度的意见》发布,对水资源管理的目标和任务提出了明确要求。2014年,习近平总书记提出了“节水优先、空间均衡、系统治理、两手发力”的新时期治水思路,成为新时期治水兴水的科学指南。针对中国的基本国情、水情,结合新形势下中国水资源管理的战略要求,考虑强人类活动和气候变化对中国水资源演变的影响,开展中国水资源演变机制、开发利用、节约保护、系统调控研究,已经成为事关国计民生的重大事情。

本书是对水资源基础科学问题和前沿热点问题的系统总结,全书分上、下两篇,共15章。其中,上篇从中国的基本国情出发,对水资源的基础条件与开发利用情况进行了评价,系统识别了中国水资源面临的突出问题,在此基础上,研究提出了中国水资源供需情势与战略选择,并进一步从中国水资源配置、水资源节约、水资源保护、水生态修复、水资源调度、水资源管理等方面开展了研究,系统总结了近年来水资源研究的理论、技术与实践创新成果。该篇由9章构成,第1章由贾仰文、牛存稳撰写;第2章由仇亚琴、卢琼、张象明、张海涛、郝春沣撰写;第3章由赵勇、何凡、翟家齐、王庆明撰写;第4章由游进军、褚俊英撰写;第5章由王建华、李海红、秦长海、王丽珍撰写;第6章由唐克旺、杨爱民撰写;第7章由王芳、高晓薇、王琳、孙赫英、何婷、慕星撰写;第8章由雷晓辉、蒋云钟撰写;第9章由王建华、胡鹏、蒋云钟、彭文启、汪党献撰写。下篇针对当前中国水资源研究的热点问题,如全球气候变化的水资源响应及其应对、粮食安全与农业水资源配置、河湖生命健康、流域水生态补偿机制、水资源环境经济核算、智慧流域开展了专项研究,该部分注重理论联系实际、深入浅出,揭示各专题研究的最新进展。该篇由6章构成,其中,第10章由严登华、杨志勇撰写;第11章由汪林、贾玲撰写;第12章由徐志侠、易建军、王兴勇、秦景、毛远意撰写;第13章由张春玲、许凤冉撰写;第14章由甘泓、秦长海、卢琼、张象明、杜霞撰

写;第15章由蒋云钟、冶运涛撰写。全书由胡四一、王浩、王建华统稿。

本书注重多学科交叉融合,凝聚了作者长期从事水文水资源科研与管理实践的最新进展,对于科学认识中国水资源的基本特征与演变趋势,指导中国水资源的利用与保护实践具有一定的理论和实践指导意义。本书编撰充分考虑以下6方面的特点:一是系统性,力争通过本书,让读者系统把握我国水资源整体概貌,同时对中国水资源的现状、问题、配置、节约、保护、调度和管理等具体问题也能够有系统的认识。二是时代性,反映当前中国水资源存在的主要问题和薄弱环节,全面体现新时期治水思路,以及水资源配置、节约、保护、调度和管理等实践工作中的新举措。三是理论性,对水资源基本概念、理论、方法进行科学、权威的阐述,理清并统一对水资源相关基础问题的认知。四是实践性,紧密结合我国水资源节约、保护、配置、调度和管理等实践,尤其是充分反映近十几年来我国水资源管理和实践的重大行动与举措。五是科普性,本书的主要对象是水资源相关管理人员和社会公众,尽量做到通俗易懂。六是前瞻性,突出新时期我国水资源的前沿和热点问题,研判未来一段时期水资源配置、节约、保护、调度和管理等重点和方向。

在本书研究和写作过程中,得到了张建云院士、王超院士、康绍忠院士、高而坤教授、任光照教授、张德尧教授、徐子恺教授、陈敏建教授、王忠静教授、汪党献教授、沈大军教授等专家的大力支持和帮助,在此表示衷心的感谢。

受时间与作者水平限制,书中难免存在疏漏之处,敬请读者不吝批评赐教。

作 者

2016年6月

目 录

前 言

上篇 中国水资源的基本问题

第1章 水、水循环与水资源	(3)
1.1 水	(3)
1.2 水循环	(8)
1.3 水资源	(16)
第2章 中国水资源及其开发利用状况	(34)
2.1 水资源调查评价	(34)
2.2 水资源开发利用评价	(48)
2.3 面临的主要水资源问题	(64)
第3章 我国水资源供需态势及其战略选择	(71)
3.1 我国城乡供水保障成就	(71)
3.2 我国缺水现状及影响	(75)
3.3 水需求主要驱动因子演变趋势	(79)
3.4 供需态势综合分析	(81)
3.5 我国水资源战略选择	(85)
第4章 水资源配置	(90)
4.1 水资源配置及其历史沿革	(90)
4.2 水资源配置的技术方法	(98)
4.3 中国水资源配置的格局	(111)
4.4 中国水资源配置的典型案例	(119)
4.5 水资源配置的前沿动态	(136)
第5章 水资源节约利用	(151)
5.1 水资源节约利用的必要性	(151)
5.2 水资源节约利用的概念	(152)
5.3 我国节水发展历程、现状及问题	(153)
5.4 节水途径与方式	(157)
5.5 我国分区域节水模式	(167)
5.6 区域节水型社会建设典型案例	(171)
5.7 我国水资源节约工作的未来发展趋势	(181)

第6章 水资源保护	(183)
6.1 我国水资源保护的形势	(183)
6.2 水资源保护的理论基础	(190)
6.3 水功能区划	(198)
6.4 水污染特征	(210)
6.5 地下水超采现状及治理对策	(220)
6.6 水土流失现状与防治策略	(227)
第7章 水生态修复	(239)
7.1 我国水生态系统概况与保护格局	(239)
7.2 水生态系统修复基础	(249)
7.3 水生态修复的重要单项措施	(255)
7.4 中小流域水生态修复的综合措施	(261)
7.5 水生态保护与修复的对策建议	(263)
第8章 水资源调度	(271)
8.1 水资源调度形势	(271)
8.2 水资源调度理论	(273)
8.3 水资源调度的技术体系	(277)
8.4 水资源调度实践典型案例	(281)
8.5 未来发展趋势	(289)
第9章 水资源管理	(293)
9.1 水资源管理基础	(293)
9.2 水资源管理体制	(297)
9.3 水资源行政管理制度	(302)
9.4 水资源市场管理机制	(310)
9.5 水资源管理能力建设	(321)
9.6 我国水资源管理发展趋向	(327)

下篇 中国水资源的重大专题

第10章 气候变化对我国水资源的影响	(347)
10.1 气候变化历史事实	(347)
10.2 气候变化对我国水资源的影响	(354)
10.3 气候变化情景下未来水资源演变趋势	(359)
10.4 水资源应对气候变化对策	(365)
第11章 粮食安全与农业水资源配置	(372)
11.1 粮食安全与农业用水现状	(372)
11.2 我国粮食需求与生产前景分析	(376)
11.3 作物需水与灌溉需求	(379)
11.4 农业水资源合理配置	(389)

11.5 对策与措施	(396)
第 12 章 河湖生命健康	(401)
12.1 河流健康概述	(401)
12.2 河流健康评价	(403)
12.3 湖泊健康	(426)
12.4 河湖健康保护和修复的对策建议	(446)
第 13 章 流域水生态补偿机制	(448)
13.1 流域水生态补偿的概念与需求	(448)
13.2 流域水生态补偿的理论与方法	(453)
13.3 我国流域水生态补偿探索与实践	(455)
13.4 我国流域水生态补偿机制	(457)
13.5 新安江流域水生态保护共建共享补偿	(465)
第 14 章 水资源环境经济核算	(476)
14.1 研究背景与意义	(476)
14.2 国内外研究进展	(480)
14.3 SEEAW 主要内容	(485)
14.4 我国水资源环境经济核算体系	(488)
14.5 水资源环境经济核算发展方向	(500)
第 15 章 智慧流域	(502)
15.1 智慧流域起源与时代背景	(502)
15.2 智慧流域体系架构和关键技术	(521)
15.3 智慧流域展望和应用设想	(541)
参考文献	(565)

上篇 中国水资源的基本问题

第 1 章 水、水循环与水资源

1.1 水

1.1.1 水的性质

1.1.1.1 水的物理性质

在常态下,水是无色无味的液体,并且具有“三态”(固、液、气)物理变化特性。水的密度在温度 3.98 ℃ 时最大,为 1 kg/L;当温度在 3.98 ℃ 以上时,水的密度随温度升高而减小;当温度在 0 ~ 3.98 ℃ 时,水的密度随温度的升高而增大。标准大气压时,水的冰点为 0 ℃,沸点为 100 ℃,水的比热容较其他物体的大,液态水的比热容为 1 cal/(g · ℃),冰的比热容约为 0.5 cal/(g · ℃)。在 100 ℃ 和一个标准大气压情况下,水的汽化热为 539 cal/g,在常温常压下,水的汽化热为 584 cal/g,当水汽凝结成液态时放出相同的热量。在 0 ℃ 和一个标准大气压情况下,冰的溶解热为 79.7 cal/g,当水冻结成冰时放出相同的热量。水的导热性较其他液体的小,在 20 ℃ 时,水的热导率为 0.001 43 cal/(s · cm · ℃),冰的热导率为 0.005 4 cal/(s · cm · ℃)。水对一般固体的附着力较水的内聚力大,所以水一般都能湿润各种固体。水的表面张力较大,常温下表面张力系数为 0.073 N/m。在附着力和表面张力的共同作用下,水能沿毛细管上升,称为毛细管现象。水的压缩力很小,一般认为不可压缩。水的运动黏度在 20 ℃ 时为 1.010×10^{-6} m²/s。纯水几乎是不导电的,天然水有微弱的导电性。光在水中的传播速度为 2.25×10^8 m/s,是在空气中的 3/4。声波在水中的传播速度为 1 483 m/s(《中国大百科全书·水文科学》编辑委员会,1992)。

1.1.1.2 水的化学性质

水的热稳定性很高,当水蒸气被加热到 2 000 K 以上时,也只有极小部分离解为氢和氧。在一定条件下,水能同多种比较活泼的金属以及少数非金属发生反应,放出氢气;凡是能溶于水的酸性氧化物或碱性氧化物,都能与水反应,生成相应的含氧酸或碱。水分子中两个氢原子与一个氧原子形成的结构,使整个水分子正负电荷不相重合而显有极性,所以水分子是极性分子。水分子的极性使分子互相吸引形成氢键,氢键导致分子之间彼此结合,形成聚合的水分子(H₂O),而不引起水的化学性质改变,这种现象称为水分子的缔合。水的许多特性可用水分子的缔合来解释。气态水由几乎彼此独立的水分子组成。固态水的全部水分子结合在一起,成为一个巨大的缔合分子,冰的结构具有极大的空隙。液态水中既有复杂程度不等的缔合分子,又有简单的水分子。水是一种很好的溶剂,不但能溶解离子型化合物,而且能溶解某些单质和某些分子型化合物。自然界,水中通常溶有氧气和二氧化碳等气体,钾、钠、钙、镁等金属离子和生物原生质中的氮、磷、硅、铁等。纯水具有极微弱的导电能力,能电离出极少量的氢离子和氢氧根离子。纯水在 22 ℃ 时,正、负离

子浓度相等,为 $1 \times 10^{-7} \text{ g/L}$ 。水溶液的酸碱性的用 pH 表示, pH 等于水溶液中氢离子浓度的负对数, pH = 7 为中性, pH 越小, 酸性越强; pH 越大, 碱性越强。天然水的 pH 一般为 6.8 ~ 8.5, 其数值大小主要取决于溶于水中的游离二氧化碳、碳酸盐和碳酸氢盐相互之间含量关系《中国大百科全书·水文科学》编辑委员会, 1992)。

1.1.1.3 水的资源性质

水作为一种自然资源, 具有如下性质(李广贺, 2010)。

1. 循环再生性

水作为资源具有循环再生性, 这是它与其他固体资源的本质区别, 它是在循环中形成的一种动态资源。在全球大气环流和陆地水循环运动作用下, 水处在不断开采、补给和消耗、恢复的循环再生之中, 不断地供给人类活动和生态系统。

2. 储量有限性

水作为资源, 处在不断的消耗和补充过程中, 具有恢复性强的特征, 但实际上全球淡水资源的储量是十分有限的。全球的淡水资源仅占全球总水量的 2.5%, 大部分储存在极地冰帽和冰川中, 真正能够被人类直接利用的淡水资源量仅占全球总水量的 0.8%。可见, 水循环过程是无限的, 水资源的储量是有限的。

3. 利害两重性

水既可造福于人类, 又可危害人类生存, 具有利害两重性。《荀子·王制》提到: 水则载舟、水则覆舟, 说明古人对水的利害两重性有着清醒的认识。水的时空分布均匀且质量适宜, 将会促进区域经济发展、自然环境的保护和修复以及人类社会进步。否则, 可能会产生旱涝灾害与污染事故。

4. 用途多样性

水是人类活动中被广泛利用的资源, 不仅广泛应用于农业、工业和生活, 还用于发电、水运、水产、旅游和环境改善等。在各种不同的用途中, 消耗性用水与非消耗性或消耗很小的用水并存, 表现出一水多用的特征。用水目的不同对水质的要求各不相同。

5. 时空分布不均匀性

水作为资源, 时空分布的不均匀性是它的又一特性。全球水的分布表现为极不均匀性, 如亚洲的径流模数为 $10.5 \text{ L/(s} \cdot \text{km}^2)$, 大洋洲的澳大利亚的径流模数仅为 $1.3 \text{ L/(s} \cdot \text{km}^2)$, 而大洋洲除澳大利亚外各岛的径流模数高达 $51.0 \text{ L/(s} \cdot \text{km}^2)$, 最高的和最低的相差数倍或数十倍。我国水资源在区域上分布极不均匀, 总体上表现为东南多、西北少, 沿海多、内陆少, 山区多、平原少。在同一地区中, 受大气过程的影响, 降水存在很大的年际变化和季节变化特征, 水在不同时间的分布差异性很大。

1.1.2 水的功能

水作为一种重要的自然资源, 具有很多对自然环境和人类社会都至关重要的功能(姜弘道, 2010), 主要包括以下几个方面。

1.1.2.1 水是生命之源

首先, 水对于地球上生命的诞生和发展起到了至关重要的作用。关于生命是如何产生的, 至今仍有许多尚未弄清的问题, 但是从有机质水溶液中产生原始生命的看法, 原则

上已被许多学者所接受。一些科学家认为,在地球上出现生命和生物演化之前,经历了长期化学演化阶段和由最简单的化学元素形成可能产生生命物质的有机化合物的阶段。1953年,美国物理学家斯·米列尔通过对气体混合物(氢分子 H_2 、甲烷 CH_4 、氨 NH_3 和水汽 H_2O)放电,合成了一系列氨基酸,用实验证明在地球出现生命之前的主导条件下产生复杂有机化合物的可能性。这些化合物在落入某一水体之后,由于水层的保护,避免了强烈的太阳辐射作用。随后,进一步经历了复杂含碳化合物的合成过程。

可以完全合乎逻辑地推测,生命应该是在连续覆盖着地球表面的水介质中孕育和进化的,生命最初出现在海中,只是后来才到达陆地。上到岸上的两栖类生物把诞生地——海水中的一些物质留在其体内,逐渐地转入血液中。人血中溶解的化学元素的相对含量非常接近于海水,如表 1-1 所示,表明至今人体内还保留着从海洋中起源的痕迹。

表 1-1 海水和人血中溶解的化学元素的相对含量 (%)

元素	氯	钠	氧	钾	钙	其他
海水	55.0	30.6	5.6	1.1	1.2	6.5
人血	49.3	30.0	9.9	1.8	0.8	8.2

注:资料来源于夫·弗·杰尔普戈利茨,1971年。

水也是一切有机体最主要的组成部分。地球上所有生物或多或少都含有水,平均含量为 80%。也就是说,有机体几乎 $4/5$ 的质量是水。据估计,地球上所有的动植物含有近 11 200 亿 t 水,相当于同时灌满世界上所有河槽水量的一半。可以通俗地说,在人类和动物的血管里,在植物的根、茎、叶中,流动着地球所有河槽水量的一半。

水还是任何生物新陈代谢过程不可缺少的媒质。人体中的消化作用、物质交换、血液循环、组织的合成,都是在水溶液中完成的,并都有水的参与。人体中的有毒残余物质随水排出,约 140 g 的肾在一昼夜中通过和纯化约 2 m^3 的血液。换句话说,一昼夜通过肾的血液量是全部人血量的 360 倍,约 41 min 轮换一回。由汗腺析出及由皮肤表面散失的水,调节了人体的温度。水是眼泪的主要成分(占 99%),不停地湿润眼睛,冲洗眼睛中的灰尘,人一昼夜要耗费 0.5~1 mL 眼泪。心脏每分钟要泵出 3.5~5.5 L 血液。一个活到 60 岁的人,心脏压出的血液近 $150\,000\text{ m}^3$,相当于一个深 2 m、直径近 300 m 的湖水量。如果人体中水量失去正常,减少 1%~2% (0.5~1 L) 就会感到口渴;减少 5% (2~2.5 L),皮肤就会开始起皱纹,口腔就会“干涸”,意识模糊;当失水 14%~15% (7~8 L) 时,人将死亡。没有食物,人能存活近一个月,而没有水连一个星期都活不到。人为了维持生命,每昼夜需要摄入折合为 1.5 L 水的饮料或食物。从原始植物出现到现在的 6 亿年中,由于光合作用从水中摄取的水量约为 170 亿 km^3 。水是连接着地球上一切生命的链条,生物所需的各种物质借助于水在生态系统中无止境地流动。

此外,水还是大气圈中氧的源泉。水分子和二氧化碳(CO_2)在植物(包括海藻)光合作用下,克服了氢、氧原子的结合力,分解出氧,排入空气中,留下碳(C)和氢(H)用于植物生长。这是地球上最大的生物化学过程之一。在补充大气圈的氧的过程中,起重要作用的不是高等地面植物,而是聚集于海洋表面的细小的藻类植物——浮游植物。植物在光合作用中输送到大气中的氧,每年约有 1 500 亿 t。

1.1.2.2 水是生产之要

水是最重要的资源,农业生产和工业生产均依存于水。在人类发展历史中,除日常生活中用水外,水最早用于灌溉,发展农业。其次是利用水能,如古代的水车、水磨,现在的水电站等。全球河流水能蕴藏量约 50.5 亿 kW,海洋潮汐能量 10 亿多 kW。水还由于具有独特的性质,被工业广泛用作能量转化和力的传递介质,例如热电厂、水压机和各种冷却装置。水域利于交通和旅游,水运是现代世界的主要运输形式之一。人类每年从河、湖、海洋中获取大量动植物,提取重要的矿物和元素。此外,水还具有重要的医疗意义。随着世界经济的发展和人口的增长,水作为资源已日趋短缺。水能兴利,也能为害,洪水常给人们造成严重损失。随着人类文明的不断进步,人与水的关系不断发展。古代,人类被动地适应水而生存,人与水的关系表现为趋利避害。近代,人类兴建大量工程,控制水害,开发水利,人与水的关系表现为兴利除害。现代,人类把兴利除害提高到新的水平,认识到水资源短缺和水作为环境要素被污染对人类生存和社会发展产生的严重影响,开始自觉地调整人和水的关系。

1.1.2.3 水是生态之基

水是生物新陈代谢过程不可缺少的物质,并通过蒸发蒸腾过程为生态系统保持适宜的温度。同时,水调节着地球环境,为生态系统保持一个适宜的外部条件。

首先,水是地球气候的调节器。由于水的特大热容量,世界大洋成为一个巨大的恒温器,使世界范围内气温标准化,调节了世界的气候。

大气中的水汽能拦阻地球辐射热量的 60%,使之不向宇宙空间散失,保证地球不致冷却。据计算,若大气圈中的水蒸气含量减少一半,地球表面的平均温度将降低 5℃ 左右,从 14.3℃ 降到 9℃。水汽的这种作用称为温床效应。海洋和陆地水体在夏季吸收和积累大量热量,使气温不致过高,在冬季把热量缓慢地释放出来,使气温不致过低,这种调节作用在白天和夜间也同样存在,从而使地球上的气候变得温和。倘若大洋表层水的温度场发生突变,气候便发生异常。冰融化和水蒸发时消耗热量以及冻结和凝结时放出潜热,对气温也起到了调节作用。

水圈除通过调节气温影响气候外,陆地上水量分布的不均匀也是造成各地气候不同的重要因素。匈牙利水文学家 Szeszlay (1965) 提出一种气候分区法,用蒸发量和降水量的比值作为一个地区的气候指标,定义为干旱系数 α :

$$\alpha = E_0/P \quad (1-1)$$

式中: E_0 为平均年蒸发能力; P 为平均年降水量。

根据气温和干旱系数 α , 全球陆地分为 9 类,即按照 $\alpha > 2$ 、 $0.5 \leq \alpha \leq 2$ 和 $\alpha < 0.5$ 将湿润程度分出干旱(A)、中等(M)和湿润(H)三个等级,按照月平均气温的最高值 $T_{\max}$ 和最低值 $T_{\min}$ 的变化范围($T_{\max} < 0^\circ\text{C}$ 、 $T_{\min} \leq 0^\circ\text{C} \leq T_{\max}$ 和 $T_{\min} > 0^\circ\text{C}$),将温暖程度分出寒冷(C)、中等(M)和温暖(W)三个等级,由此构成 9 类地区,见表 1-2。9 类地区中有 4 类地区,即 MM、MH、WM 和 WH 能产生地表径流,占陆地总面积 1.5 亿 km^2 的 62% 左右,其余 38% 为无径流区,其中 CA 为冷原荒漠;CM 和 CH 为极地冰盖和冰川;MA 和 WA 为沙漠和半沙漠区。

表 1-2 气候分区

$\alpha = E_0/P$	月平均气温 T		
	$T_{\max} < 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 寒冷, C	$T_{\min} \leq 0\text{ }^{\circ}\text{C} \leq T_{\max}$ 中等, M	$T_{\min} > 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温暖, W
$\alpha > 2$ 干旱, A	CA	MA	WA
$0.5 \leq \alpha \leq 2$ 中等, M	CM	MM	WM
$\alpha < 0.5$ 湿润, H	CH	MH	WH

水在整个地球范围内还起着塑造地球面貌的作用。水的冷热变化使岩石崩裂,形成土壤;雨水、小溪、河流冲刷着山脉形成深切的峡谷,并搬运了大量疏松物质,形成宽阔的冲积平原,冰川削平了山谷,留下了冰蚀丘陵和湖泊;地下水对灰岩和其他岩石的溶蚀,造成了喀斯特地貌;淋滤了岩石的地下水,每年把 30 亿 t 可溶物质带到海洋。

据估计,世界所有河流每年带入海洋的固态物质(淤泥、沙等)有 220 亿 t,平均每年每平方千米侵蚀 150 t 左右,我国黄河陕县以上的侵蚀量为 2 280 t/(km²·年)。地质学家斯·马·格里戈里也夫估计,按照现今被风和水破坏的速度,若没有不断地地壳运动,陆地表面在 11 000 万年内将全部夷为与世界大洋水面一样平的平地。水的地球化学作用在于,它一方面破坏了地壳中元素的共生组合,使部分元素迁移、分散和积聚;另一方面又形成了新的元素共生组合。

1.1.3 水的分布

地球表面积为 5.1 亿 km²,水圈(地壳表层、表面和围绕地球的大气层中气态、液态和固态的水组成的圈层)内全部水体总储量达 13.86 亿 km³。海洋面积 3.61 亿 km²,占地球总表面积的 70.8%;含盐量为 35 g/L 的海洋水量为 13.38 亿 km³,占地球总储水量的 96.5%。陆地面积为 1.49 亿 km²,占地球总表面积的 29.2%;水量仅为 0.48 亿 km³,占地球水储量的 3.5%(李广贺,2010)。

在陆地存储的水体中并不全是淡水。据统计,陆地上的淡水量仅为 0.35 亿 km³,占陆地水储量的 72.9%,其中的 0.24 亿 km³(占淡水储量的 69.6%)分布于冰川、多年积雪、两极和多年冰土中,在现有的经济技术条件下很难被人类所利用。人类可利用的淡水资源量只有 0.11 亿 km³,占淡水总量的 30.4%,主要分布在 600 m 深度以内的含水层、湖泊、河流、土壤中。地球上各种水的储量见表 1-3。

地球上水的储量巨大,但可供人类利用的淡水资源在数量上极为有限,不到全球水总储量的 1%。即使如此,有限的淡水资源分布极不均匀。世界各地淡水资源分布差异较大,最丰富的是大洋洲各岛(除澳大利亚外)和南美洲,其中尤以赤道地区的水资源最为丰富。水资源较为缺乏的地区是中亚南部、阿富汗、阿拉伯和撒哈拉。西伯利亚和加拿大北部地区因人口稀少,人均水资源量相当高。

表 1-3 地球上水的储量

种类	总储量 (× 10 ³ km ³)	占总水量的 百分比(%)	占淡水总量的 百分比(%)
海水	1 338 000	96.5	
地下水	23 400	1.70	
(咸水)	12 870	0.94	
(淡水)	10 530	0.76	30.1
土壤水(淡水)	16.5	0.001	0.05
冰川(淡水)	24 064	1.74	68.7
永久冻土底冰(淡水)	300	0.022	0.86
湖水	176.4	0.013	
(咸水)	85.4	0.006	
(淡水)	91	0.007	0.26
沼泽水(淡水)	11.5	0.000 8	0.03
河川水(淡水)	2.12	0.000 2	0.006
生物体中的水(淡水)	1.12	0.000 1	0.003
大气水(淡水)	12.9	0.001	0.04
合计	1 386 000	100	
合计(淡水)	35 029.2	2.53	100

数据来源:World Water Resources at the Beginning of the 21st Century, UNESCO。

1.2 水循环

1.2.1 水循环动力与基本过程

1.2.1.1 水循环及其动力

1. 自然水循环

地球上各种形态的水,在太阳辐射和地心引力等的作用下,通过蒸发、水汽输送、凝结降水、下渗以及径流等环节,不断地发生相态转换和周而复始运动的过程,称为水循环(或水文循环),示意图见图 1-1。水循环是地球上一个重要的自然过程,因此又称自然水循环。它通过降水、截留、入渗、蒸散发、地表径流、地下径流等各个环节,将大气圈、水圈、岩石圈和生物圈相互联系起来,并在它们之间进行水量和能量的交换,是自然地理环境中最主要的物质循环。

形成水循环的内因是水的物理特性,即水的“三态”(固、液、气)转化,它使水分的转移与交换成为可能。水循环的外因是太阳辐射和地心引力。其中,太阳辐射是水循环的

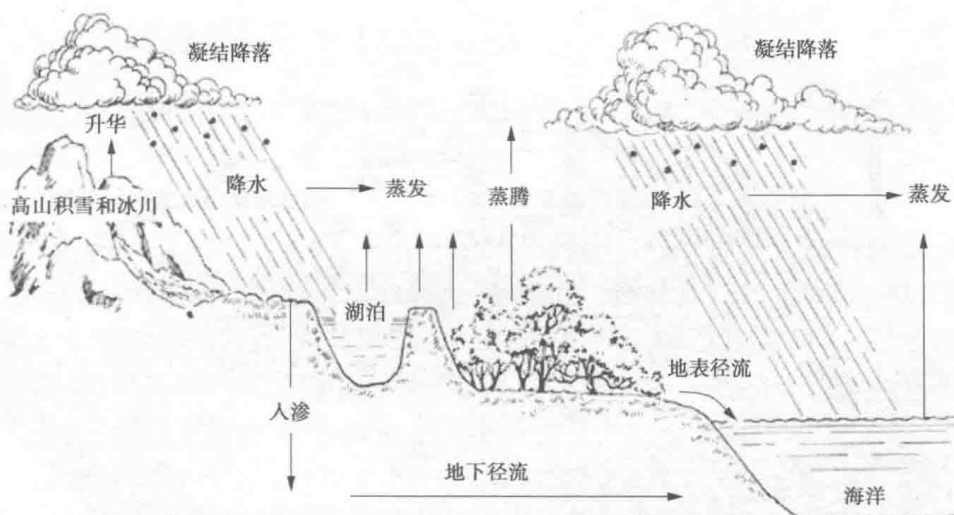


图 1-1 自然水循环示意图

原动力,它促使冰雪融化、水分蒸发、空气流动等;地心引力能保持地球的水分不向宇宙空间散逸,使凝结的水滴、冰晶得以降落到地表,并使地面和地下的水由高处向低处流动。

2. “自然-人工”二元水循环

水是人类生存和经济社会发展的重要基础资源。人类活动的加剧,如水利工程的兴建和城市化的发展,打破了自然水循环系统原有的规律和平衡,极大地改变了水循环的降水、蒸发、入渗、产流、汇流等过程,使原有的水循环系统由单一的受自然主导的循环过程转变成受自然和人工共同影响、共同作用的新的水循环系统,这种水循环系统称为“自然-人工”(或“自然-社会”)二元水循环系统(陈家琦等,2001;王浩等,2001),如图 1-2 所示。

随着人类改造自然能力的增强,先后通过傍河取水、修建水库取水、开采地下水、跨流域调水等措施,极大地改变了原有的自然水循环模式,因此二元水循环除原有的太阳辐射和地心引力两种天然驱动力外,还增加了人工动力系统这种新的驱动力。

1.2.1.2 水循环基本过程

自然界的水循环基本过程包括蒸发、水汽输送、降水、下渗以及径流等环节。

1. 蒸发

蒸发是水分通过热能交换从固态或液态转换为气态的过程,是水分从地球表面和水体进入大气的过程。蒸发过程是水循环的重要环节,陆地上年降水量的 66% 是通过蒸发返回大气的。需要说明的是,此处所指的蒸发包括水面蒸发、陆地蒸发和植物蒸腾。影响蒸发的因素很多,包括太阳辐射的供应、水汽梯度,以及水温、气温、风、气压等。

2. 水汽输送

水汽输送是指大气中的水汽由气流挟带着从一个地区上空输送到另一个地区的过程。陆地和海洋表面的水经蒸发后,如果不经过水汽输送就只能降落到原地,不会形成地区间或全球水循环。而实际上,蒸发返回大气中的水分通过水汽输送可能会降落到其他地方,增加了水循环的复杂性和多样性。大气中的水汽是全球水循环过程中最活跃的成分。