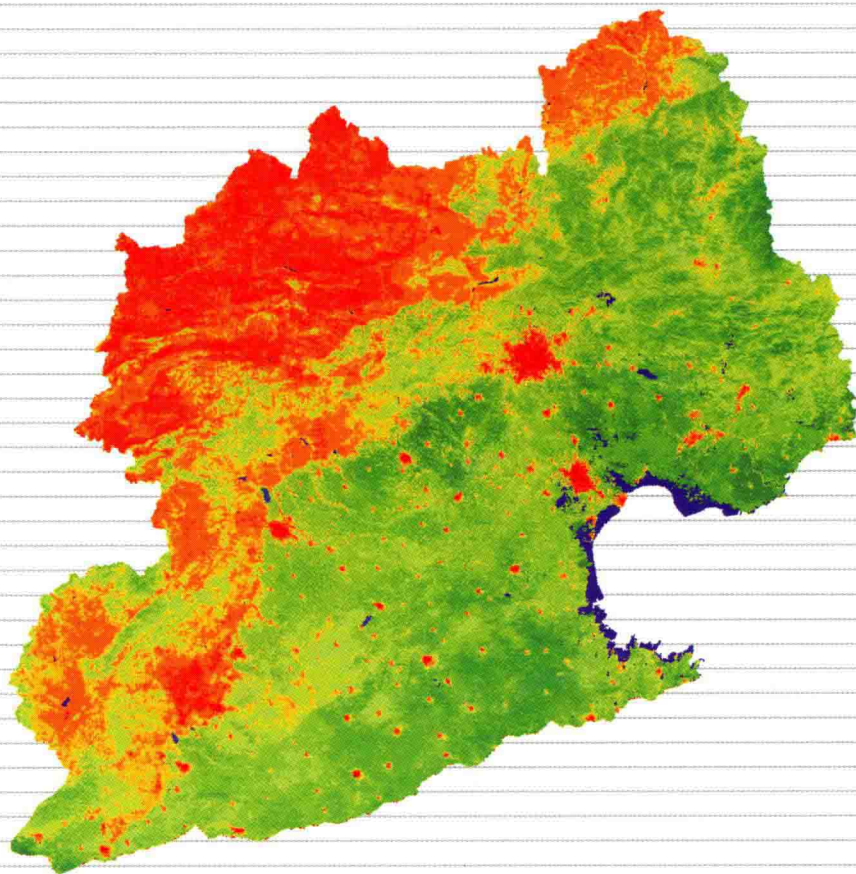


流域耗水管理 方法与实践

任宪韶 吴炳方 著



科学出版社

流域耗水管理方法与实践

任宪韶 吴炳方 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是针对水资源匮乏流域的耗水管理方法及其应用的基础理论著作。全书共八章,第一、二章阐述了现行水资源管理的方法、特征、措施以及存在的不足,并就全世界典型缺水地区管理水资源的经验与教训进行了总结,说明实施耗水管理的必要性;第三至七章阐述了耗水管理的相关概念、地表蒸散遥感监测手段——ETWatch、流域耗水管理的应遵循的原则,存在的方法、措施与实践,从理论与实践上说明了水资源匮乏地区实施流域耗水管理的可行性与方法;第八章为流域耗水管理的展望,在已有的流域耗水管理的基础之上,对其还需要发展的方向进行了阐述。

本书具有基础性和前沿性的特点,可供水资源规划、管理、遥感应用等学科的科研人员、专业技术人员与管理人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

流域耗水管理方法与实践/任宪超,吴炳方著. —北京:科学出版社, 2014. 6

ISBN 978-7-03-040684-2

I. ①流… II. ①任… ②吴… III. ①流域-耗水率-水资源管理-研究-中国 IV. ①TV213.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 103561 号

责任编辑:韦 沁 韩 鹏 / 责任校对:钟 洋

责任印制:钱玉芬 / 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京通州皇家印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014 年 6 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2014 年 6 月第一次印刷 印张:16 1/2

字数:391 000

定价:118.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

序

水危机已经成为 21 世纪人类发展中的最大挑战之一。2009 年 3 月 12 日,联合国教科文组织发布的《世界水资源开发报告》指出,随着世界人口数量急剧上升、全球气候变化以及各国发展的需求,水资源的供应将日趋紧张,到 2030 年,全球将有近半数人口用水高度紧张。水危机已经成为全球性的严重问题,也对科技界提出了更高的要求。

为应对水资源危机,人类采取了各种应对措施,但危机并没有得到有效的缓解,局部地区还有加剧的趋势。在缺水的中东地区,人们预言 21 世纪中东将为水而战。在中国、印度与美国西部等地区,尽管采取了大量的节水措施,但都存在严重的地下水超采和湖泊萎缩现象,甚至出现越节水、越超采的恶性循环。

京畿之地的海河流域是我国的政治、经济与文化中心,由于常年的地下水超采,海河流域已经形成了世界上最大的“漏斗区”,伴随而来的是地表下沉、水质恶化与生态环境破坏等一系列的问题。“有河皆枯,有水皆污”已是海河流域水资源的真实写照。水资源已经成为制约华北地区经济发展、城市化与社会和谐稳定的重要因素。

纵观水循环的整个过程,只有水的蒸散发才是水资源的真正消耗,因此,削减水资源的消耗是遏制地下水超采的唯一途径,是促进区域水资源可持续利用的重要举措。在世界银行 GEF 海河流域水资源与水环境综合管理项目和中国科学院知识创新工程重大工程生态环境效应遥感监测与评估重大项目的支持下,作者在实践中摸索与总结了一套先进的流域耗水管理方法,丰富与完善了水资源管理方法。

作为一名遥感领域的老兵,我非常关注遥感技术在解决国家重大需求方面的作用,并极力推动遥感技术与行业需求的紧密结合。在阅读该书的过程中,我欣喜地看到海河水利委员会任宪韶和中国科学院吴炳方密切合作共同作出的努力,特别是看到我曾经工作过的单位——中国科学院遥感与数字地球研究所的吴炳方博士积极参与了海河流域耗水管理方法与实践的探索,并利用蒸散遥感监测为流域耗水管理提供了可操作的工具与平台所作出的贡献,甚感欣慰与鼓舞。

衷心的祝愿该书的出版能够推动遥感与行业需求的紧密结合,发展遥感应应用新方法,促进水资源管理方法的创新,为水资源的可持续发展贡献智慧与力量。

中国科学院院士

任宪韶

2014 年 4 月 25 日

前 言

水是生命之源、生产之要、生态之基。我国是一个水资源匮乏的国家,缺水已成为制约经济发展、影响社会和谐稳定的重要因素。随着经济社会用水的增加,地下水开采强度不断加大、地表水工程大量修建和全球气候变化的影响,在缺水地区引发河道干涸断流、含水层枯竭、地下水污染、地面沉降、地裂缝发育等一系列生态环境恶化问题。

开展节水是维持水资源可持续利用、改善生态环境恶化的一项有效举措。我国的节水任务非常繁重,尤其是在华北、西北、东北等干旱半干旱地区。这些地区已开展了多年的节水,节水水平居全国前列,并且积累了很多有效的成果和成功经验。如何在缺水严重地区,同时又是节水相对先进地区开展更为适合的水资源管理模式,是对我国现行水资源管理模式的严峻挑战。纵观水循环的整个过程,不论是降水、地表水还是地下水,其仅改变了水资源存在的形式与贮存的场所,只有蒸散发才是水资源的真正消耗。因此,只有控制消耗才能真正节水。

2003~2011年,世界银行在中国启动“GEF 海河流域水资源与水环境综合管理”项目(以下简称“GEF 海河项目”),目的是通过项目的开展和实施减少流域(区域)的耗水和污染,以改善渤海湾的水环境。本项目在水资源管理方面,将传统水资源“供需平衡”管理理念进行了延伸,依据水量平衡原理开展了流域、区域“供耗平衡”管理的理论研究和实践,并明确提提出取水量的减少并不意味着同等水资源量的节约,只有减少水资源的消耗量才能真正节水。衡量节水要以是否减少流域(区域)的蒸腾蒸发、提高水分生产率、减少地下水开采(地下水水位上升)、满足流域(区域)生态发展的适宜入海水量为标准。

本书是在“GEF 海河项目”开展的基础上编制完成的。针对流域水资源管理的多样性与复杂性,结合水资源管理的需求,采用理论与实践相结合的方法,结合作者长期从事流域水资源管理、遥感应用研究和教学等工作以及其他研究者的先进经验与技术,参阅了大量国内外优秀成果,从流域的角度全面系统的阐述开展耗水管理的理论、方法、必要性、可行性、措施与实践。我们希望本书的问世,将有助于读者对基于遥感监测的流域耗水管理有清晰而系统的认识,为建立并实施耗水目标控制、定额管理、落实“三条红线”控制的最严格水资源管理制度提供科学依据。

全书共八章,第一章至第二章阐述水资源管理。重点阐述水资源管理的发展历程、成就、经验、特点、采取的主要措施及存在问题,选取世界典型缺水地区管理水资源进行阐述,说明实施耗水管理的必要性。第三章至第七章为流域耗水管理。重点探讨了耗水管理的概念、理念、依据的原理、方法、应遵循的原则、耗水管理的评价以及采取的措施,并从流域以及区域两个角度介绍了水资源耗水管理的方法和工具以及应用实践,重点推荐了采用 ETWatch 进行地表耗水监测的方法、结果以及验证方法,从理论与实践上说明了水资源匮乏地区实施流域耗水管理的紧迫性、可行性与必要性。第八章为流域耗水管理的展望。

中国科学院遥感与数字地球研究所的闫娜娜、曾红伟、王浩、朱伟伟,水利部海河水利委员会的李彦东、王立卿、宋秋波、朱晓春、李建新、韩瑞光、付晓亮、孟宪智、王志良、张俊霞、黄学伟、王永刚等,水利部中国灌溉排水发展中心韩振中、刘斌、孙敏章和顾涛在本书相关章节的编写、资料素材收集、文本整理等方面付出了辛勤劳动,借此机会,特向他们表示衷心的感谢。

本书的出版得到了“GEF 海河项目”、中国科学院知识创新工程重大项目“重大工程生态环境效应遥感监测与评估项目”的资助。

水资源的耗水管理是一项复杂的系统工程,许多的理论和实践还处于研究阶段,由于作者水平有限,难免会有疏漏之处,敬请读者批评指正。

作 者

2013 年 3 月 10 日

目 录

序

前言

第一章 水资源管理	1
第一节 水资源	1
第二节 水资源管理	4
一、水资源需求	4
二、水资源管理	7
三、水资源管理的特性	11
第三节 水资源管理的主要对策	12
一、控制需求	12
二、节约用水,提高用水效率	13
三、跨流域调水,调节区域间水资源不平衡	14
四、开发非常规水源,实现供水多元化	15
参考文献	17
第二章 水资源管理经验与教训	18
第一节 全球水危机	18
一、水资源的压力	18
二、地下水危机	18
第二节 海河流域水资源开发与管理	22
一、水资源现状	22
二、水资源开发利用	22
三、节水管理	23
四、水资源管理存在的问题	23
五、水资源开发过度导致的后果	25
第三节 美国科罗拉多河流域水资源开发与管理	26
一、流域概况	26
二、水资源面临的主要问题	27
三、水资源管理方面的行动	28
第四节 澳大利亚墨累-达令流域水资源管理	32
一、墨累-达令流域	32
二、水资源管理措施	32
三、水权制度的缺陷	33
四、水权制度引发的新问题	33

第五节 伊朗水资源管理	34
一、伊朗水资源管理	34
二、地下水超采的严重后果	35
第六节 印度水资源管理	37
一、用水现状	37
二、水资源管理	38
三、水资源危机	38
参考文献	40
第三章 流域耗水管理概念	42
第一节 耗水管理术语	42
一、耗水的类型	42
二、蒸散的基本概念	43
三、耗水的可控性	46
四、耗水的有效性	49
五、机会 ET	51
第二节 耗水管理的理念	51
一、耗水管理的起因	51
二、耗水管理的理念	54
三、耗水管理的特色	57
四、节水管理与耗水管理的案例	60
第三节 耗水管理的行政监督	64
一、与我国现行的水资源管理制度的衔接	65
二、面向新形势流域水资源管理的未来方向	67
第四节 耗水管理的保障措施	68
一、采取基于耗水管理的综合节水措施	68
二、建立 ET 与可调控用水指标之间的关系	68
三、完善现有水资源管理机制	69
第五节 耗水管理的技术支撑	69
参考文献	71
第四章 地表蒸散遥感监测	73
第一节 蒸散遥感监测方法	73
第二节 ETWatch 蒸散遥感估算模型	76
一、ETWatch 参数化方法	77
二、ETWatch 参数标定	81
第三节 ETWatch 系统	87
一、遥感数据源	87
二、遥感数据预处理	88
三、气象数据获取及处理	89

四、蒸散遥感监测	91
五、系统业务集成	94
第四节 蒸散遥感监测结果	94
一、流域尺度结果	94
二、水资源三级区尺度结果	100
三、地块尺度结果	101
第五节 遥感蒸散产品的精度验证	104
一、土壤水平衡	105
二、蒸渗仪	108
三、涡度相关系统(EC)	109
四、北京师范大学的独立验证	110
五、流域尺度水平衡	111
六、精度评价总结	112
参考文献	113
第五章 流域耗水管理方法	118
第一节 流域耗水平衡	119
一、流域水平衡原理	119
二、流域蓄变量	121
三、流域人类可持续耗水量	122
四、可控 ET 计算	125
五、目标 ET	126
第二节 水分生产效率评价方法	128
一、基于遥感的水分生产率估算	128
二、水分生产率提高方法	130
三、基于 ET 的灌溉需水量估算方法	133
第三节 节水效果监督和管理	134
参考文献	136
第六章 流域耗水管理措施	139
第一节 水资源模型	139
一、水资源配置模型的功能与作用	139
二、现有的水资源配置模型	141
第二节 耗水管理模型	146
一、模型功能与作用	146
二、耗水模型的内容	147
三、代表性的耗水管理模型雏形	150
第三节 耗水量预测	154
一、灌溉农业耗水量预测	154
二、工业耗水量的预测	155

三、生活耗水量预测	156
四、畜牧业耗水量预测	157
第四节 GEF 海河项目耗水管理工具	157
一、县域耗水资源管理工具	157
二、农田耗水管理工具	172
第五节 耗水管理政策、法规和制度	190
一、建立与耗水管理相适应的行政体制	190
二、建立基于耗水管理的水权制度	191
三、制定与耗水管理相适应的政策法规	191
参考文献	192
第七章 流域耗水管理实践	194
第一节 海河流域耗水平衡分析	194
一、基于耗水平衡的蓄变量分析	194
二、保证耗水平衡的方法与措施	198
第二节 人类可持续耗水量分析及对策	199
一、人类可持续耗水量	199
二、农业降低 ET 的基本思路及推荐采取的农业节水措施	200
三、城镇降低耗水的措施	202
第三节 海河流域平原区水分生产率分析	202
一、平原区冬小麦的水分生产率	202
二、水分生产率提高的意义和对策	207
三、节水潜力分析	207
第四节 海河流域基于 ET 灌溉需水量分析	208
一、灌溉需水量时空格局	208
二、降水对灌溉需水量的影响	211
三、种植结构对灌溉需水量的影响	211
第五节 大兴区综合节水效果评价	215
一、评价基准值和监测指标	216
二、评价结果分析	216
第六节 GEF 海河项目流域耗水管理实践	217
一、规划水平年的耗水平衡分析	217
二、馆陶县基于 ET 的水资源管理实践	219
参考文献	234
第八章 流域耗水管理展望	236
第一节 控制 ET 是缺水地区水资源管理的必然选择	236
一、干旱半干旱地区水资源的主要消耗—— ET	236
二、水资源管理应由供需管理向耗水管理转变	237
第二节 科技进步推动 ET 管理理念的提出	239

第三节 建立以控制 ET 为目标的水权制度	240
一、水权及水权体系	241
二、以控制 ET 为目标的水权制度	241
三、与现行管理制度的关系	242
第四节 节水型社会建设要以控制 ET 为基础	243
一、节水型社会的内涵	243
二、贯彻 ET 管理理念,推进资源性节水	243
三、生态环境建设要考虑水资源支撑能力	246
第五节 需要进一步探索的问题	246
一、建设天地协同的 ET 集成系统	246
二、建立流域耗水清单	247
三、向耗水管理转变	248
参考文献	249

第一章 水资源管理

水,生命的摇篮,是人类生存与发展不可替代的重要自然资源,是环境生态中最活跃物质,其与土壤、空气、阳光构成了生物圈的基本物质。如果没有足够数量和清洁的水,人和动物就不能生存,植物就不能生长,没有水,一切生命都将停止。地球之所以是太阳系中我们所认识的所有生物的唯一家园,就是因为这个星球有水。

在太阳辐射和地球引力的推动下,地球上的水以不同的相态周而复始的运动着,构成全球范围内水的大循环,并使各种水体形成一个统一、运动的整体,如图 1.1 所示。蒸腾蒸发是水循环的重要环节之一,海洋表面的水在太阳能作用下,形成水汽进入大气,并随大气运动,一部分进入陆地上空,在一定的条件下,形成雨、雪。大气降水到达地面,部分转化为地下径流和地表径流,最终又回到海洋。降水大部分被植物蒸发蒸腾或地表和水面蒸发,返回大气中,遇适当条件又形成降水,周而复始,为动植物和人类的生存和发展源源不断提供水资源。据统计,全球陆域年降水 11.9 万 km^3 ,形成地表和地下径流总量约 4.6 万 km^3 ,7.3 万 km^3 被自然蒸发蒸腾,返回到大气中。

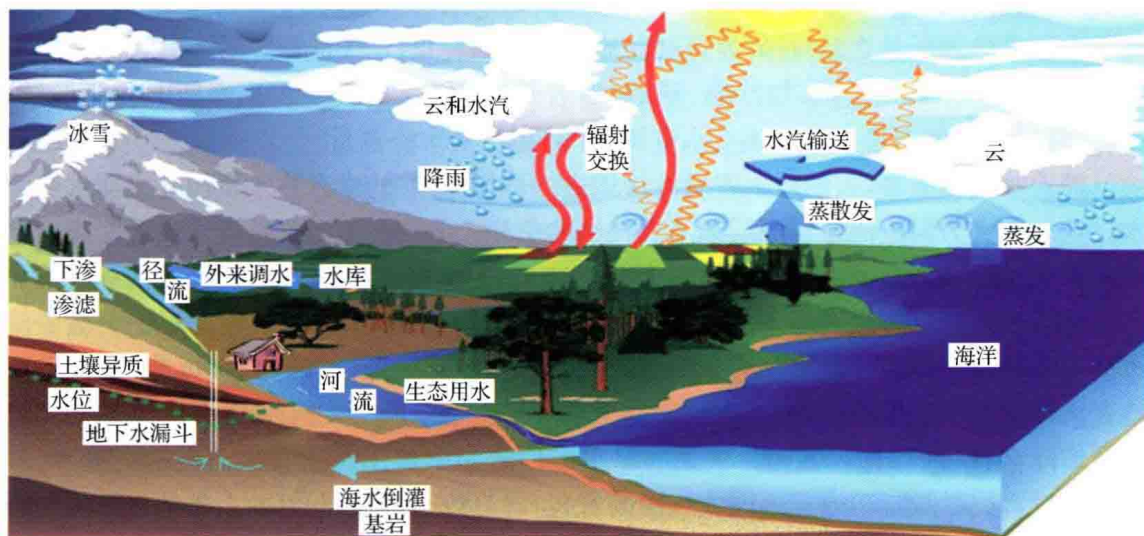


图 1.1 水循环是联系地球系统地圈-生物圈-大气圈的纽带
据 US Climate Change Science Program, US Global Change Research Program

第一节 水 资 源

水资源指全球水量中可为人类生存、发展所利用的水量,主要是指逐年可以得到更新的那部分淡水量。年降水量和河流的年径流量是最能反映水资源数量与特征,而年径流量不仅包含降水时产生的地表水,而且还包括地下水的补给,因此,世界各国通常采用多

年平均径流量表示水资源量。

黄万里(1989,1992)将水资源分为主水资源、客水资源。对于一个地区而言,主水资源包括当地的降水、当地地下的潜流;客水资源指上游下来过境的河中水流与有压潜流。

王浩等(2002)定义水资源为即所有为经济社会和生态系统利用的大气降水,既包括地表水和地下水,又包括植被、作物等生态系统利用的土壤水以及冠层与地表的降水截留,但不包括未被生态系统利用的沙漠、裸地、裸露岩石等下垫面上的蒸发。

$$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{i=N} P_i = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{i=N} R_{s_i} + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{i=N} R_{g_i} + \frac{1}{N} \sum_{i=1, j=1}^{i=N, j=M} EI_{ij} + \frac{1}{N} \sum_{i=1, j=1}^{i=N, j=M} ET_{ij} + \frac{1}{N} \sum_{i=1, j=1}^{i=N, j=M} ES_{ij} + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{i=N} ED_i + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{i=N} \Delta S_i \quad (1.1)$$

$$W_r = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{i=N} R_{s_i} + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{i=N} R_{g_i} \quad (1.2)$$

$$W = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{i=N} R_{s_i} + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{i=N} R_{g_i} + \frac{1}{N} \sum_{i=1, j=1}^{i=N, j=M} EI_{ij} + \frac{1}{N} \sum_{i=1, j=1}^{i=N, j=M} ET_{ij} + \frac{1}{N} \sum_{i=1, j=1}^{i=N, j=M} ES_{ij} \quad (1.3)$$

式中, i 为计算年; N 为长系列总年数; j 为生态系统类型(如农田、林地、草地、居民与工业用地等); M 为生态系统总分类数; P 为降水量; R_s 为地表水资源量(实测径流量); R_g 为与地表水不重复的地下水资源量(即降水入渗补给地下水量扣除地下水出流,或潜水蒸发与地下水开采净消耗量之和); EI 为冠层及地表截留蒸发量; ET 为蒸腾量; ES 为棵间土壤蒸发量; ED 为未利用土地(如沙漠、裸地、裸岩等)及稀疏植被中大片裸地上的蒸发量; ΔS 为流域水分蓄变量; W_r 为狭义水资源量; W 为广义水资源量。

随着时代的进步,人们对水资源的认识进一步加深,有的学者将水资源分成蓝水和绿水。蓝水定义为河流流量和深层地下水补给的总和。蓝水实质上是传统水文和工程中定义的水资源。绿水,源于降水的自然下渗,越来越被看作一种可管理的水资源。Falkenmark等(2006)区分了两种绿水组成:绿水资源和绿水流。绿水资源等于土壤中的水分,而绿水流等于实际蒸发(无效部分)和实际蒸腾(有效部分)的和。Liu指出,蓝水为地表水体和地下水中的水;绿水本质上是植物产生生物量所直接消耗的降水,即渗到非饱和区的降水(Liu *et al.*, 2009)。狭义的绿水可理解为植被生长所直接消耗的土壤水分,并最终通过蒸腾(绿水流)方式返回大气中的水分,即有效蒸散发部分;而广义的绿水可理解为植被生长地区的土壤水,并最终通过蒸发和蒸腾(绿水流)的方式返回大气。贾仰文和王浩等(2006)将绿水定义为生态系统利用的雨水,其中间贮存形式是土壤水及冠层截留,最终形式是蒸散发后返回大气的蒸气流。绿水是静态的,绿水流是动态的。绿水流可分为 E 和 T , E 为无效蒸发, T 为有效蒸腾。现绿水已越来越受到重视,并纳入到水资源规划和管理中(Falkenmark *et al.*, 2006)。

如何计算一个地区水资源量,学术界存在争议。传统的水资源评价中,通常以流域或三级区为单元分别对地表水资源量和地下水资源量核算;认为地表水资源量是指地表水体的动态水量,即天然河川径流量,地下水资源量是指源于降水和地表水体补给的动态地下水量。由于地表水和地下水相互联系、相互转化,河川径流量中包括一部分地下水排泄

量,地下水补给量中有一部分来源于地表水体的入渗,故不能简单地将地表水资源量与地下水资源量相加作为水资源总量,而应扣除相互转化的重复部分。由水资源评价可知,一个地区水资源量的大小包括流经该地区的所有河川径流,即所有的客水资源都是该地区的水资源。

黄万里先生则持反对意见。其观点认为,自然存在的客水资源只有被人们利用时才能算作该地区的水资源。自然存在的客水资源量可能很多,远大于地区或流域的需要量,或大于需引用的水量;客水资源也可能很少,不够使用,例如华北地区日益扩大的农业用水使客水不够用。只有在水资源不够的地区,自然存在的水资源量等于水资源可利用量。在水资源丰富的地区,人们需要估计的利用量小于自然存在的水资源量。

河川径流是地区用水剩余下来的,排向下游,最终出海包括洪流在内的水流。当然它还可部分抽起来利用,但在通航河道里必须保留部分水流以维持航运通行,在不通航的河道里必须保留少量的释污流水,汛期内的洪流是无法调蓄而废弃的水流。通过地区下游末端河流断面的径流量代表这地区及其上游已经用掉后剩余下来的水资源。却不能单独地代表本地区的水资源。一条河的出口径流也只能代表这条河水用剩后的水资源,却远非该河流的可用水资源。例如长江出口平均年流量多达 1 万亿(10^{12}) m^3 ,这是上游整个流域剩下来的水量,决不能看作流域的水资源(黄万里,1989,1992)。这里的用水剩余实际是耗水剩余。

估算一个地区的水资源,在较小的面积(如 1 万 km^2)内,可以依据当地有效雨量、灌溉和抽井水量推算。但在大面积的流域里,沿河灌排水有出有入,逐段推算十分繁琐,宜按全流域各水文因素平均年水量的平衡方程推算:

$$P\downarrow - E\uparrow - (\bar{R} - r) = S \quad (1.4)$$

式中, P 为降水量; E 为非利用水的地面水面蒸发量; R 为川流量; r 为从河中取用的扣除排回的实际用水量; S 为所利用的水资源量。由此可见,在一定的降水量 P 和蒸发量 E 下,河中剩余水流 $R - r$ 越多,则利用的水资源量 S 反而越少。所以把河中水流作为水资源是错误的(黄万里,1989,1992)。从上列平衡方程式(1.4)可知,所利用的水资源量 S 必小于降水量 P ,也必小于扣除川流量 $R - r$ 后剩余的水量: $S < P - R + r$ 。可见水资源不可能单从川流量 R 或其降水量 P 决定。某一地区的主客水资源,其来源并不限于本流域,也可以从其他流域调拨,只要工程措施合乎经济效益,都可作为本地区的水资源,当然不得大于本地的水资源需求。所以水资源含有经济因素的概念,不像降水、川流纯属水文因素(黄万里,1989,1992)。

王浩等(2002)定义的水资源与传统水资源差别在于它增加了有效降水项,即生态系统对降水的有效利用量(有效蒸发)。传统的水资源评价口径只侧重于径流性的水资源,认为只有径流性的水资源可通过水利工程等措施被人类控制并利用,而忽略了土壤水资源的评价(王浩等,2009,2010)。随着人类认识的进步,虽然土壤水不能直接为人类利用,但能被植被、农田等生态系统就地直接利用于生物量生产,且每年都能通过降水得到更新,因此也应作为水资源进行考虑。Falkenmark 指出土壤水在农业生产中的用水比例可高达 2/3,是农业生产的重要水量来源(Falkenmark *et al.*, 2006)。在干旱地区,由于水资源的紧缺,与人类密切相关的农业生产越来越依赖于土壤水,因此越来越多的国内外学者

将土壤水作为水资源的一部分进行评价(Gerten *et al.*, 2005; Jewitt, 2006; Liu *et al.*, 2009)。

抛开水资源量评估方法的差异,就某种方法而言,随着人类扰动的日益增强,如何精确的计算水资源量也面临着巨大挑战。就河川径流量而言,在自然状态下,天然径流量可由径流测站观测得到,但在人类扰动作用下,河川上游的径流大部分被大坝拦截,或者被人类大量的取走用于满足各种用水需求,例如,农田灌溉、居民生活用水、工厂用水、维持生态环境用水等。在这种情况下,测站径流已不能代表河川的天然径流量。为了得到准确的地表水资源量,需对测站径流进行水量还原,但由于缺乏必要的监测设备,有些取水量和排水量数据无法获得,如山区农民修建大量的小型水库、池塘、集水池来收集降水用于农田灌溉等,因此精确的还原水量十分困难。地下水资源量根据水文和水文地质参数计算获得,但水文地质参数的获得带有很强的经验性,且依赖于水文分区的准确性,此外,河川上游的人类用水活动的加剧,会导致河川径流量的减少,从而减少下游地表水对地下水的补给。

第二节 水资源管理

人类社会从早期的择水而居,到水害控制、发展水利,从大河文明到现代水利,人类社会的发展一直伴随着对水资源的开发利用,而且水在经济社会发展中的地位越来越重要,对其依赖性越来越强烈。随着社会发展,人们通过修建水利工程,提高水的利用程度抵制各种水灾害;人类社会越发展,技术水平越高,对水的开发程度就越高。

经济社会发展的各行各业,如农业、工业、发电、航运、城镇生活等,都需要充足而可靠的供水。水给人类带来了极大的恩惠,从水资源开发利用中获得了显著效益,灌溉农业的发展,为人类提供了丰富食品,世界 17% 的灌溉耕地为人类提供了 40% 的粮食(张启舜, 2000)。没有水就没有社会经济的发展与进步。但是,水也不是取之不尽的,在一定的地区、一定时间水总是有限的,当社会生活和生产的耗水量达到或超过当地水资源可利用量时,就会导致产生危害人类社会本身的生态环境问题,进而制约人类经济社会的发展和进步。

一、水资源需求

地球上水的总量为 13.86 亿 km^3 ,其中 96.5% 为海水,淡水资源只占 2.53%,其中大部分又以固态形式储存于冰川、雪山,可被人们开发利用的仅是其中很少一部分。

尽管我国水资源总量丰富,但人均水资源量却很少。若以河川径流量计算,我国淡水资源 28000 亿 m^3 ,占全球水资源的 6%,仅次于巴西、加拿大、俄罗斯,居第四位。但按目前人口,人均只有 2000 m^3 ,仅为世界平均水平的 1/4,在世界上名列 121 位,是全球人均水资源最贫乏的国家之一。

此外,我国水资源在空间上分布极端不平衡,8140 亿 m^3 可利用水资源量大部分在南方丰水地区。由于我国工业化、城市化进程加快,以及确保粮食安全的需要,对水资源的供给保证率提出更高要求,对水资源的压力越来越大。据相关研究表明,我国每年因供水不足

造成工业产值的损失上千亿元。农业用水因城市和工业的发展而被大量占用,每年有 700 万 hm^2 耕地因水源不足而无法灌溉,估计仅此一项就少生产粮食 150 亿~200 亿 kg 。与此同时,我国用水方式还没有完全按照科学发展的要求来实现,现在的用水还是比较粗放的、浪费的,也为我们国家水资源的开发利用保护带来了巨大的压力,维系生态环境系统基本功能的水量被挤占,使生态系统失去平衡。城乡大量废污水排放,又使环境受到污染,水资源问题矛盾重重,已经成我国经济、社会进一步发展的主要障碍。

(一) 城市化对水的需求

城市发展对水的需求表现为城市人口数量增加以及生活水平提高对水的需求增加。城市发展不但要保证居民日常生活用水,还要为城市的建设、工业生产、商业活动、旅游、休闲娱乐活动以及美化环境提供水源,对供水保证率和水质要求也较高。

就全球而言,近年来,城市化进程加速,人口压力不断增大,人类每年用掉的水资源越来越多,如何保障用水的安全,已经成为人类面临的严重挑战。目前,全世界 70 亿人口中有一半人口生活在城市,2011~2050 年的未来 40 年的时间里,全球人口将增长 23 亿,而城市居民将增长 26 亿。由于城市配套设施的发展远远落后于城市化进程,清洁的用水与卫生设施对城市贫民已经构成了直接威胁。目前,全球水资源短缺地区有超过 1 亿的人正在遭受缺水的折磨,全球有 12 亿人得不到干净的饮用水,24 亿人在生活中没有完善的污水处理设施。在第三世界国家,每年大约有 1 万名 5 岁以下的儿童死于与用水不洁相关的疾病(UNDESA,2013)。

改革开放以来,我国城镇建设进入快速发展时期,1978 年,我国城市数量 193 个,到 2000 年增长到 663 个,其中 100 万~200 万人口特大城市 24 个,还有 13 个城市人口超过 200 万,除此之外,还有 20312 个建制镇。1978 年城镇人口 17245 万,占全国人口的 17.9%,至 1998 年,城镇人口增加到 41608 万,占全国总人口的 33.35%。2008 年,城镇人口已达 60667 万,30 年间净增 43422 万,相当于 1978 年的 3.5 倍(刘勇,2011)。在城镇人口迅速增长的同时,城镇生活用水快速增长。1998 年,全国城镇用水 254 亿 m^3 ,2008 年增加到 469 亿 m^3 ,平均每年以 6% 的速度递增。一方面是因为城镇化率不断提高,大量农业人口进入城镇,城镇人口迅速增加,另一方面是人们生活水平不断提高,用水定额有所增加。

与此同时,随着社会主义新农村建设的不断推进和民生水利实施,不但要解决好 3.2 亿人口的供水安全和饮水困难问题,还要基本实现农村生活自来水化。不论城市还是农村,居民生活用水量均会较快增长。

(二) 农业用水

农业用水是人类用水大户,其水资源不仅受制约于经济与水文条件,还取决于下列三种自然条件:①可耕地的面积;②本地区无霜期内气温、湿度和日照等气候条件;③这期间的有效雨量和能够利用的客水量。这就是人们熟知的外来谚语:“良好的耕地、气候与雨水的配合是农作高产的条件”。

目前,全球农业用水量约为 28500 亿 m^3 ,占全球总用水量的 70%(高占义,2012),不

断增加的人口与粮食结构的变化对有限的水资源造成了巨大压力。目前,全球人口已经达到 70 亿,其中有 16 亿人生活在绝对缺水的地区,2050 年,全球人口将高达 90 多亿。据统计,要生产一个人每天所需要的食物,大概需要 2000~5000L 水。由于生活水平的提高,人类的饮食结构也发生了变化,2000~2050 年,每人年肉食品消费量预计从 37kg 增长至 50kg,生产 1kg 谷物需要消耗 1500L 水,而生产 1kg 肉食品消耗的水资源量是谷物的 10 倍。由于人口的增长,在未来的 25~30 年的时间里,世界人口对粮食的需求将会增长 70%~100%,而普遍的观点认为在增长的粮食需求部分中,有 80%~90%将来自现在的耕地,只有 10%~20%来自新开垦的耕地,然而,由于城市化、沙漠化和盐碱化的影响,世界耕地正在减少。目前,全世界的总耕地面积为 15 亿 hm^2 ,其中 11 亿 hm^2 为雨养耕地,4 亿 hm^2 有灌排设施,其中 2.1 亿 hm^2 耕地有灌溉设施,0.6 亿 hm^2 耕地有灌溉和排水设施,有 1.3 亿 hm^2 耕地有排水设施。尽管有灌排设施的耕地只占总耕地面积的 27%,但生产了全世界 55%的粮食;而雨养耕地占总耕地面积的 73%,但生产的粮食仅占世界粮食总产量的 45%。而气候变化导致的极端干旱和洪涝事件在显著增加,今后需增加的粮食产量当中的 80%~90%将来自有灌排设施的耕地,只有 10%~20%来自雨养农业。此外,随着工业化与城市化进程的加快,不同行业之间水资源的争夺日趋激烈,农业用水将会被进一步挤压。

我国是一个人口大国,粮食安全关系到国民经济发展和社会稳定的全局,我国又是一个自然灾害较多的国家,洪涝旱等自然灾害始终困扰着农业这一弱质产业。随着工业化、城镇化发展,人口增加和人民生活水平的提高,粮食消费需求呈刚性增长,同时耕地减少、水资源短缺、气候变化等因素对粮食生产的约束日益突出,我国粮食供需将长期趋于紧平衡状态,粮食安全保障面临严峻挑战。新中国成立以来,农业灌溉用水量持续增加,保障了粮食产量不断增长。1949 年农业灌溉用水 1001 亿 m^3 ,到 1997 年增长到 3920 亿 m^3 ,50 年间翻了两番(沈坤卿,1999),同期粮食产量从 2262 亿斤^①增加到 9883 亿斤,增加了 3.6 倍。粮食产量与灌溉用水量的变化趋势基本一致,灌溉对保障粮食安全具有举足轻重的地位。据统计,我国农田灌溉率 53%,灌溉农田提供的粮食产量占粮食总产量的 74%,灌溉耕地粮食单产与旱地单产之比为 2.3~5.4。近年来,节水灌溉力度不断加大,渠系水利用系数不断提高,在灌溉供水量变化不大的情况下,灌溉面积不断扩大,水分生产率也在不断提高,为粮食产量不断增长提供了条件。

对于中国这样的人口大国,粮食必须依靠国内粮食保障供给,使粮食自给率稳定在较高水平上,在 2005 年粮食总产量达到 9680 亿斤的基础上,又保持连续 7 年增产,自 2007 年以来,粮食产量一直稳定在 10000 亿斤以上。未来,预计到 2030 年前,我国人口还将持续增加,对粮食需求也将进一步增加,粮食安全面临巨大压力。在全国耕地保有量不低于 18.0 亿亩,基本农田不减少的前提下,根本措施是要继续抓好大型商品粮基地建设,继续扩大农田灌溉面积,增加粮食单产。预计到 2030 年灌溉面积将扩大到 6667 万 hm^2 ,农业灌溉总用水量将达到 4500 亿 m^3 。因此在增加农业供水的同时,不断提高水分生产率,才能实现粮食安全的目标。

^① 1 斤=500g。