

Bianhua Huanjingxia De Xiaoliuyu Dibiao JingliuMoni Yubao
Ji Baku Gongneng Zhuanhuan Yanjiu

变化环境下的小流域地表径流 模拟预报及坝库功能转换研究

李娟 / 著



中国矿业大学出版社

变化环境下的小流域地表径流 模拟预报及坝库功能转换研究

李 娟 著

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

水资源是人类赖以生存和发展的基础性和战略性资源。随着气候变化和受人类活动的影响,水资源形势也随之发生变化。变化环境下的水资源模拟预报及高效利用,是应对水资源短缺、缓解水资源供需矛盾、可持续利用的基础。

宁夏南部山区位于宁夏回族自治区南部,是宁夏降水相对丰沛的地区。区域所处的六盘山地区是西北黄土高原唯一的绿岛和天然氧吧,是维护西北地区生态安全的天然屏障,更是黄土高原地区气候变化和响应最为敏感和强烈的地区。区域坝系建设较为完善,有限的地表径流被分散拦蓄并消耗于无效蒸发及深层渗漏,导致水资源短缺地区的水资源利用率不高。

选择位于宁南山区的好水川流域为研究靶区,在区域水资源开发利用评价及径流转化机理分析的基础上,对降水及土地利用变化下的地表径流进行了模拟分析,提出了库坝功能定位划分指标并构建了库坝功能转换的理论技术体系,增加区域水资源可利用量,为坝系水资源的高效利用提供指导。

图书在版编目(CIP)数据

变化环境下的小流域地表径流模拟预报及坝库功能转换研究 / 李娟著. — 徐州:中国矿业大学出版社,
2016.10

ISBN 978 - 7 - 5646 - 3304 - 2

I. ①变… II. ①李… III. ①小流域—地面径流—模拟—预报—研究—隆德县 IV. ①P331.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 253129 号

书 名 变化环境下的小流域地表径流模拟预报及坝库功能转换研究
著 者 李 娟
责任编辑 杨 洋
出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司
(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)
营销热线 (0516)83885307 83884995
出版服务 (0516)83885767 83884920
网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com
印 刷 江苏徐州中矿大印刷科技有限公司
开 本 787×1092 1/16 印张 8 字数 200 千字
版次印次 2016 年 10 月第 1 版 2016 年 10 月第 1 次印刷
定 价 32.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)



前 言

水资源是人类赖以生存和发展的基础和战略性资源,水资源评价是水资源活动与管理中一项十分必要和重要的任务,也是流域水资源高效利用、科学配置及可持续利用的基础。

随着气候与下垫面条件的变化,流域水资源的演变规律也随之发生了改变。宁南山区所处的六盘山地区,是黄土高原唯一的绿岛和天然氧吧,更是黄土高原地区气候变化最为敏感和强烈的区域。本书选择位于宁南山区的宁夏隆德县好水川流域为研究区域,通过现场调查、资料分析、定位观测等方法对降水及土地利用变化下的流域地表水资源进行了模拟及预报,主要内容分为五部分。

第一部分为研究区概况的分析。通过现场调研及资料收集与分析,对流域的自然地理、水文气象、土地利用、水土流失、水资源开发利用、相关工程运行等状况进行了分析与阐述,并提炼总结了流域水资源开发利用中存在的问题。

第二部分为降水资源的评价与时空预报。分析了研究区降水年内年际分布、变化趋势、丰枯状况等规律。选择了1951~2010年降水观测资料,结合马尔科夫与周期外延叠加预报方法,对流域汛期降水量进行了预报并绘制了降水量等值线图,定量分析了汛期降水量的空间分布规律。

第三部分为流域径流转化机理分析。通过流域降水及包气带特性分析,确定流域属超渗产流模式,产流类型为超渗地面径流类型,影响因素为降雨量、降雨强度及土壤初始含水量。

第四部分为降水及土地利用变化下的流域地表径流模拟分析。在分布式的数字流域模型构建基础上,选择了具有物理基础、符合超渗产流模式的CASC2D模型进行了相关参数的率定与地表径流的模拟。通过设计不同的降雨条件与土地利用方式,定性分析降雨及土地利用变化对地表径流的影响,为流域的水资源及土地利用规划提供指导和依据。

第五部分为基于降水等级分析的地表径流预报。选择了适用于流域的 SCS 集总式模型,结合降水预报成果,建立了适用于本地区的形象直观的地表径流预报模型,为流域地表水资源趋势分析与研究提供基础依据。

在以上模拟研究基础上,构建了坝库功能转换的理论与技术体系并建立了坝库功能定位划分指标,对有必要和条件的工程进行功能转换,从而提高区域水资源可利用量,为坝系水资源高效利用提供指导。

本书的出版得到了教育部“长江学者和创新团队发展计划”项目“旱区现代农业水资源高效利用”(IRT1067)和宁夏对外科技合作项目“变化环境下六盘山地区降雨径流响应及风险研究”的资助,在此一并表示感谢。

作 者

2016 年 6 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 问题的提出	1
1.2 研究目的及意义	1
1.3 相关研究背景及综述	2
1.4 研究内容与方法、技术路线	15
第 2 章 研究区概况	19
2.1 研究区的选择	19
2.2 流域概况	20
2.3 流域水资源开发利用状况	26
2.4 本章小结	28
第 3 章 降水资源评价及时空预报	29
3.1 降水资源评价	29
3.2 降水时间预报	33
3.3 降水空间预报	49
3.4 本章小结	54
第 4 章 降雨径流转化机理分析	56
4.1 地表径流及其影响因素	56
4.2 降雨径流转化机理描述	57
4.3 流域内地表径流减少的主要成因分析	62
4.4 本章小结	67
第 5 章 降水及土地利用变化下的流域地表径流模拟分析	68
5.1 分布式水文模型的发展及选择	68
5.2 CASC2D 模型的原理及建模	73
5.3 好水川流域 CASC2D 分布式模型的建模与验证	76
5.4 变化环境下的地表径流模拟	90
5.5 本章小结	92
第 6 章 基于降水等级分析的流域地表径流预报	93
6.1 地表径流预报模型与参数的选择	93

6.2	流域地表径流预报模型的建立、修正与验证	95
6.3	流域地表径流预报	101
6.4	本章小结	102
第 7 章	变化环境下的坝库功能转换研究	103
7.1	坝库功能转换理论与技术体系的提出	103
7.2	坝库功能转换理论与技术体系的构建	104
7.3	坝库功能转换的定位划分指标	106
7.4	本章小结	110
第 8 章	结论及展望	111
8.1	研究结论	111
8.2	主要创新点	112
8.3	今后工作的展望	112
参考文献	114

第1章 绪 论

1.1 问题的提出

水资源是人类赖以生存、不可替代的基础自然资源,是自然界不可或缺的控制性因素之一,同时又是社会经济发展进步所必需的战略经济资源,是一个国家综合国力的有机组成部分^[1]。水资源短缺、水环境恶化已经成为21世纪全球资源环境的突出问题,直接威胁着人类的生存和发展^[2]。世界上已有一半的陆面面积、遍及一百多个国家和地区缺水,20亿人饮水困难,而且人类正以每15年增加1倍的淡水需求消耗着有限的水资源。据预测,到2025年,全球将有30亿人遭遇水危机。

我国是一个干旱缺水严重的国家。依据水利部第二次水资源评价结果,我国多年平均水资源总量2.8万亿 m^3 ^[3]。尽管我国水资源总量在全球排名第六位,但是由于我国人口数量巨大,因此人均淡水资源量及人均可利用的水资源量非常低。我国水资源时空分布极不均衡,水资源的分布与人口、耕地及矿产资源的分布极不匹配,而且水资源利用率低。随着社会经济的发展,城市化、工业化进程加快和生态恢复与建设的迫切需求,水资源需求量迅速增大,水资源污染加剧,水资源供需矛盾日益突出。与此同时,全球气候变化与人类活动密切地影响着自然界的水文循环与水资源的演变与发展,因而变化环境下面向用户的水资源评价显得尤为重要。

黄土高原地区是世界上最大的黄土堆积区,东面为太行山,西达日月山东麓,北自阴山,南至秦岭伏牛山,包括山西、宁夏、陕西、甘肃、青海、内蒙古、河南等省区,总面积64万 km^2 。区域生态环境脆弱敏感,水土流失严重,水资源十分匮乏,且蒸发量大,降水量相对稀少且时空分布极不均匀,水资源利用率较低。六盘山地区是黄土高原地区保护水土、涵养水源、调节径流和气候的高原绿岛和天然氧吧,是维护我国西北地区生态安全的天然绿色屏障,具有战略性的生态地位,同时也是黄土高原地区气候变化最为敏感和强烈的区域,因而六盘山地区的水资源评价就成为黄土高原地区水资源科学评价、合理配置和高效利用及管理的前提与基础,与区域水资源利用与西北地区生态建设息息相关。

1.2 研究目的及意义

依据降水分布特点和区域地貌单元,宁夏分为北部引黄灌区(降水量小于200 mm)、中部干旱带(降水量为200~400 mm,又称为中部干旱风沙区)和南部山区(降水量大于400 mm,简称宁南山区)。

宁南山区位于宁夏回族自治区南部,人均占有当地可利用水量仅为 51 m^3 ,区域性、季节性缺水严重,对生态建设、区域经济和社会发展的制约较为严重。在干旱缺水的同时,宁

南山区又是区内降水量相对丰沛的区域,全区 70% 的自产水来自这里。同时,位于此区域的六盘山地区,既是国家级的贫困地区,又是黄土高原气候变化最为敏感和强烈的地区,具有极强的典型性、代表性和极其重要的生态地位,是清水河、泾河、葫芦河的发源地。

本书选择位于宁夏六盘山地区的好水川流域为研究区域,流域面积 102 km²,流域内生态、生活、生产用水皆依靠当地水资源。流域内有土石山区、黄土丘陵沟壑区和河谷川道区三种地貌类型,已建成水库 1 座、水土保持治沟骨干工程 11 座、中小型淤地坝 31 座。在全球气候变化的大背景下,随着下垫面条件的变化,水库、淤地坝工程内的蓄水量减少,淤积速率降低,淤地坝非汛期的运行水位多低于卧管最低高程而无法调度使用,导致水资源紧缺地区极其宝贵的水资源在很大程度上消耗于无效的水面蒸发和深层渗漏,因而探讨实现淤地坝防洪拦沙基础上的蓄水供水功能(坝库功能转换),提高区域水资源可利用量和利用效率,是黄土高原地区已建和即将建设的数量众多的淤地坝可持续发展的必经之路,而淤地坝内水沙规律的演变、水资源的动态评价与模拟则是坝库功能转换的基础和必备研究。

本书以好水川流域为例,对无资料的小尺度地区的水资源演变机理、评价理论及方法进行探讨,对面向用户、降水和下垫面条件动态变化下的地表水资源进行模拟评价,为黄土高原地区坝库功能转换与后续的流域水资源配置、调度和高效利用提供理论依据和可靠数据支撑,为水资源的可持续发展奠定基础。

1.3 相关研究背景及综述

1.3.1 水资源及其分类

(1) 水资源概念

水资源名词最早出现于正式设立的机构名称,是 1894 年美国地质调查局的水资源处,指出水资源是陆面地表水和地下水的总称。《大不列颠百科全书》中,苏联加里宁撰写了“水资源”条目,将自然界中液态、气态和固态等各种形态的水定义为水资源;1963 年,英国国会通过的《水资源法》中,定义水资源是“具有足够数量的可用水源”,也就是自然界中水的特定部分;1988 年,联合国教科文组织(UNESCO)和世界气象组织(WMO)给出的水资源定义是“作为资源的水应当是可供利用,具有足够数量和可用质量,并可适合某地水需求而长期供应的水源”^[4];1992 年,联合国教科文组织与世界气象组织出版了《国际水文学词汇》,定义水资源为:“在一个地区和一个时期内,可以满足某种特定需求的、有足够数量和质量的可用水量或可以被开发利用的水量”^[5]。

在我国,水资源名词也广泛流行,只是由于研究的目的和侧重点的不同,对水资源的定义、评价与计算方法各有不同^[6]。《中国大百科全书》(大气科学·海洋科学·水文科学卷)中对水资源的定义是:“地球表层可供人类利用的水,包括水量(质量)、水域和水能资源”,而在水利卷中,定义水资源为“自然界各种形态的天然水”,并把可供人类利用的水作为“供评价的水资源”。

综上所述,水资源作为维持人类社会生存和发展的重要资源之一,应当具有以下功能:有可靠的水量来源且可通过自然界的水文循环不断得以更新和补充,能够依据需要提供需要提供水量并可进行人工控制,同时水量和水质必须能够适应人类的用水要求^[7]。综合专

家学者的提法认为:所谓水资源,是指对人类具有使用价值,且在当前科技水平和社会经济条件下,能够开发利用的水^[8]。

(2) 水资源分类

水资源通常分为广义水资源和狭义水资源。

狭义水资源是指人类能够直接使用的淡水。具体来讲,就是自然界水循环过程中的大气降水降落到地面上形成径流,流入江河、湖泊和水库中的地表水及渗入地下的地下水,常用来满足工业、农业及生活用水,是径流性水资源,通常以径流量来表示其数量^[9]。

广义水资源是指人类能够直接或间接使用的各种水和水中物质,能作为生产资料和生活资料的天然水,在社会生产中具有使用价值和经济价值的水都可称为水资源。贾仰文等定义认为“广义水资源”是相对传统的径流性水资源而言的,既包括地表水及地下水,也包括植被和作物等生态系统利用的土壤水、冠层与地表的降水截留,但是不包括未被生态系统利用的裸地、沙漠和裸露岩石等蒸发量。

广义水资源又分为“蓝水”和“绿水”。“蓝水”和“绿水”的概念是由瑞典斯德哥尔摩国际水资源研究所水文学 Malin Falkenmark 教授于 1993 年首次提出的。她为了区别贮存于地表和地下的液态形式的水,将自然入渗的土壤水称为绿水,后来又进一步延伸为从植被返回大气的蒸汽水。她在国际科学院组织(IAP)2000 年东京大会指出,在谈及水的时候,多数人认为是液态水,但作为植物生产环节之一的蒸气流又回到大气的绿水往往被忽视。同时,在考虑地区土地利用和食物生产时,由于水体自身的流动性,将产生“绿水”的上游人类活动同下游的机会与问题联系起来,所以决不能忽视绿水,应当权衡考虑上下游的得失和权益^[10]。

在我国,“蓝水”是指包含看得见的地表径流和地下径流在内的径流性水资源^[11],其循环主要供给水生生态系统的人类的用水需求,约占全球总降水的 35%;“绿水”则是生态系统利用的雨水,降水后绿水表现为土壤水和林冠层的截留,降水结束后则消耗于蒸散发,其循环主要供给陆生生态系统,尤其在雨养农业区是非常重要的水资源,共占全球总降水的 65%。

蓝水及绿水概念的提出,在拓宽传统水资源的范畴的同时,更新了水资源的思维,引发了科学界对水资源概念和水文功能的重新思考。在水资源日益匮乏的严峻形势下,从“绿水”概念出发,可以看出水土保持概念的全面性,也更加明确了保水的思路和方法,也就是说,水土保持中“保水”的对象就是绿水。

同时,20 世纪 90 年代,相关学者专家提出了“虚拟水”的概念,特指生产产品和服务所需要的水资源^[12],它是以“虚拟”的形式包含在产品或服务内的看不见的水,因此又称为“嵌入水”和“外生水”,目前国际国内已开展了大量的虚拟水研究,但是对我国全面水资源更深入和系统的虚拟水研究还有待于进一步加深^[13]。

1.3.2 水资源的属性

根据自然资源的特点,通常可将资源划分为可更新资源(如生物资源)和不可更新资源(如矿产资源)。另外,人类生存、繁衍和发展过程中利用的物质、能量和空间等自然资源、环境和生态系统均属于生态资源。水资源也是生态资源中极其重要的组成部分,是可更新的资源,它作为社会经济发展重要的、不可替代的自然基础资源和战略资源,有着其独有的特

征和属性。

(1) 水资源的可再生性及流动性

水是少数几种可再生资源之一。水资源的可再生性也被称为循环性,主要通过水文循环得以实现。水循环是一个庞大的天然水资源系统,大气中的水分主要来自于海洋蒸发,蒸发的水汽经过大气输送、冷却凝结等过程后随降水落至地面,再经过地面或者地下汇流,最终从河网汇入海洋,再经过太阳辐射蒸发回到大气层中。如此周而复始,使得地表和地下的淡水资源处于水循环的大系统中,不断获得大气降水的补给,从而源源不断供给人类利用和满足生态环境平衡发展的需要。

尽管水资源具有循环补给和可再生性,但是由于补给量有限,只有适度开发的地表、地下水才可得到大气降水的补给。因此,为维持生态平衡和保护自然环境,一般不宜动用地表水和地下水的静态水量。

水资源在整个水文循环过程中具有流动性。在地球表面,水活动在天然的河流流域内汇聚形成河网,而流域就成为淡水世界的基本单元。河源河段的水,流经全河最终达到河口汇入海洋,其特性最终会传输到下游而不会发生反向传输。水的流动通常限于流域范围内,除了跨流域调水外,某个流域的水流情况通常不会影响另一流域。

(2) 水资源储量的有限性及不可替代性

尽管水资源在水文循环过程中可以不断更新,得到补给,但是地球上可用的淡水资源非常有限。地球表面约有 71% 的面积被水所覆盖。其中海洋湖泊等咸水大约占 97.5%,淡水仅占 2.7%。淡水中 77% 以上是人类难以利用的极地冰帽、高山冰川以及永冻地带的冰雪,约 22% 为地下水及壤中水,其余的分布在湖泊沼泽、大气和江河中。人类真正能够使用的水资源是江河湖泊以及地下水中的一部分,仅占地球总水量的 0.25%。因此,随着人口增长、工业发展带来的不断增长的供水需求而言,可利用的水资源量是极其有限的。更为重要的是,水资源在生物圈、人类生活、水环境中的作用是其他任何资源都不可替代的。

(3) 水资源时空分布的不均匀性

有限的水资源在时空分布上非常不均匀。

水资源循环过程在自然界中具有一定的时间和空间分布。全球河川径流量中,亚洲占径流总量的 31%,南美洲占 25%,北美洲占 17%,非洲占 10%,大洋洲和南极洲各占 5%。我国的径流总量小于巴西、苏联、加拿大、美国和印度尼西亚,居世界的第 6 位,人均水资源占有量仅为世界平均水平的 1/4。

我国水资源在地区上的分布极不均匀。从总的形势来看,东南多,西北少;沿海多,内陆少;山区多,平原少。即使在同一地区,不同时间的分布也不均匀。仅以黄土高原地区来讲,汛期降水量占全年降水总量的 60%~70%,而在作物生长关键的春季降水稀少。

另外,水资源演变规律受到水文现象的随机影响,不同时段的水量会发生变化。通过频率计算,有丰、平、枯水年,且会出现连丰、连枯年份或时段。

(4) 水资源利与害的双重性

水资源在供人类开发利用、满足人类生产生活需求、支撑人类巨大发展进步的同时,也可能引发一定的灾害,因而水资源就具有了经济上的双重性,而这个双重性主要是由降水和径流的时空分布不均匀所造成的。

洪涝灾害是水资源灾害最为明显的表现,人们经常把超过江河、湖泊、水库、海洋等容水

场所承纳能力,造成水量剧增或水位急涨的水文现象称为洪水灾害。洪水灾害直接威胁着群众的生产、生活安全,带来巨大的经济损失。2010年是近10年来最严重的水灾,造成直接经济损失达2 000多亿元,死亡和失踪人数超过2 000人。

除了洪水形成的自然灾害外,水资源开发利用不当,也会引发人为灾害,如垮坝事故、次生盐碱化、水质污染、环境恶化等。

针对水资源利害双重性,水资源综合开发和合理利用,应达到兴利除害的双重目的。

(5) 水资源开发利用的整体性和综合性

针对一个特定的流域范围,地表水体之间是互相连通的,地表水、土壤水和地下水之间也可以互相转化。从利益角度出发,水资源又具有综合的多种功能,水资源开发往往要求满足多种经济、社会发展、生态良性循环和保护等多种功能及目标,因此水资源开发利用需考虑其整体性及综合性。

1.3.3 国内外水资源问题

1972年,联合国第一次人类环境会议发出“水将导致严重的社会危机”后,水资源问题不仅没有得到解决,而且日益严重。世界银行1995年8月发表的报告中声称,全球有40%的人口面临水资源危机,发展中的国家有近10亿人口存在饮水安全,17亿人没有良好的饮水卫生设施,80%的疾病皆由水污染引发,并造成每年约有2 500人死亡^[14]。

在过去的50多年里,世界淡水使用量增加了4倍,全世界有一半以上的国家和地区缺乏饮用水。尤其严重的是,数量极为有限的淡水资源正受到日益严重的污染。联合国有关机构的检测结果表明,全球高达10%的河流受到了不同程度的污染^[15]。

面对日益紧张的水资源供需矛盾,世界各国正在致力于水资源安全问题的解决,建设节水防污型社会,建立高效、公平、统一的水资源管理体制就成为了解决当前水资源危机的主要方向^[16]。

(1) 国际水资源现状

由于世界各国地区和地理环境不同,所拥有的水资源数量差别也非常大。

从各大洲水资源的分布来看,年径流量亚洲最多,其次为南美洲、北美洲、非洲、欧洲、大洋洲。从人均径流量的角度看,全世界河流径流总量按人平均,每人约有10 000 m³。在各大洲中,大洋洲人均径流量最多,其次为南美洲、北美洲、非洲、欧洲、亚洲。

如果按照水资源总量进行排名,排在前几位的国家分别是巴西、俄罗斯、加拿大、美国、印度尼西亚、中国和印度。

巴西国家水资源委员会于2012年公布了其水资源报告。报告声称,巴西拥有世界上12%的淡水资源,是世界上水资源最丰富的国家,人均水资源占有量为3 600 m³。但是,其中80%的淡水资源分布于巴西北部人口密度非常小的亚马逊河流域,而在人口集中的发达城市和东北部地区污水处理率低,面临着干旱缺水的困境。

俄罗斯水资源蕴藏量也较为丰富,其多年平均降水量为590 mm,年内可再生的水资源量为43 130亿m³(其中多年平均河川径流量为42 700亿m³)^[17],人均占有水资源为29 115 m³,同时也存在水资源分布不均、洪涝灾害严重等问题,因此在水资源管理、水量分配调度、城市供水、农业灌溉供水等方面存在很多困难。

美国水资源总量丰富,据估计达29 702亿m³,其中北部五大淡水湖为美国东部提供了

丰富的淡水资源,人均水资源占有量较大。然而,水资源东多西少,西部 17 个州为干旱和半干旱地区,年降水量低于 500 mm;东部是湿润与半湿润地区,年降水量介于 800~1 000 mm。美国海洋、农业和大气管理部曾发布了《干旱观测》,在水资源评估中提到,美国陆地有三分之一的国土面积处于干旱或者缺水状况,因而水资源分布不均匀、西南部淡水储量不足就成为其突出的水资源问题。

以色列干旱少雨、水资源短缺且水质较差。整个以色列受地中海气候的影响,冬季湿润多雨,夏季高温干旱。从 11 月至来年 3 月为雨季,随后而来的是连续 7 个月的干旱。降水量稀少且分布极不均匀,多年平均降水量北部 700~800 mm,中部平原 400~600 mm,南部沙漠地区年降水量不足 20 mm 且蒸发极其强烈,这也是南部地区地下水多为矿化度较高的咸水的主要原因,整个国家年降水量低于 180 mm 的面积超过国土面积的一半。全国约有淡水资源 20 m³,人均水资源量不足 307 m³,是目前国际上公认的水资源最为匮乏的国家,主要通过使用冬季多余径流、再次利用工业废水及生活污水、淡化海水、增加降雨、节约用水等途径缓解水资源供需矛盾。

(2) 我国水资源现状及特点

我国是一个水资源极其短缺的国家,人均水资源可利用量较低,城市供水严重不足。

根据水利部第二次水资源评价结果,我国多年平均水资源总量 2.8 万亿 m³,并且地区分布十分不均衡^[18]。

我国水资源在分布及开发利用中有以下特点:

① 水资源总量丰富,人均水资源量较低。

在评价水资源时,国际上多将年河川径流量视为动态的水资源量。我国河川径流量约占全球总量的 5.8%,居世界第 6 位,水资源总量较为丰富。

但是我国人口众多,人口数量约占全球的 22%,因此人均水资源数量极为有限,人均水资源量为 2 137 m³^[19],仅为世界人均水平的 25%,是联合国列出的贫水国家之一。目前,有 16 个省(区、市)人均水资源量低于严重缺水线(1 000 m³/人),有 6 个省、区(宁夏、河北、山东、河南、山西、江苏)人均水资源量低于极度缺水线(500 m³/人)。并且随着人口的增加和社会经济的高速发展,水资源供需矛盾进一步加大。根据我国水资源公报数据显示,2003~2010 年,年用水量由 5 320 亿 m³ 增加为 6 022 亿 m³。

② 水资源时空分布极不均匀。

我国水资源年际变化大且降水量多集中在 6~9 月,占全年降水量的 60%~80%。如黄河在过去几十年中曾出现过连续 9 年(1943~1951 年)的丰水期,也曾出现过连续 28 年(1972~1999 年)的少水期,其中 21 年还出现断流的情况。

中国水资源的地区分布很不均匀,北方水资源贫乏,南方水资源较丰富具有南方多、北方少的特点。南方地区国土面积占全国的 36.6%,耕地面积占全国耕地总面积的 34.8%,人口总量占全国的 3/5;北方地区国土面积占全国总面积的 63.4%,耕地面积占全国的 65.2%,人口总量占全国的 2/5,而水资源量仅占全国水资源总量的 19%,导致水土与人口资源极不匹配的矛盾。

据水利部水资源调查评价结果,我国各省、自治区和直辖市的水资源量中,最多的是西藏、四川、云南和广西等省区,每年拥有的水资源量均在 1 800 亿 m³ 以上,宁夏、天津、上海、北京、山西、河北、甘肃等省市,每年拥有的水资源量均在 280 亿 m³ 以下,其中宁夏最低,

年水资源量仅 10 亿 m^3 。此外,水资源年际年内变化很大,旱涝灾害频繁,水资源供需矛盾突出。水资源地区分布不均匀,是我国北方和西北许多地区出现资源型缺水的根本原因;而水资源年际分配不均匀,则是我国半干旱、半湿润地区发生季节性缺水的原因。

③ 水资源利用率低,供需矛盾突出。

在正常年份,全国每年缺水量近 400 亿 m^3 ,北方地区缺水量更大。据预测,到 2030 年我国人口增加至 16 亿,人均水资源量仅为 1 750 m^3 ,逼近国际公认的人均 1 700 m^3 的用水紧张线^[20],全国总需水量将达到 10 000 亿 m^3 ,缺水总量将高达 4 000 亿~4 500 亿 m^3 ^[21]。

在水资源短缺的同时,水资源利用率及效益较低。我国农业灌溉水的利用效率仅为 40%~50%,而发达国家可达 70%~80%;全国平均单方水实现的 GDP 仅是世界平均水平的 1/5,单方水粮食产量为世界水平的 1/3,而工业万元产值用水量却高达发达国家的 5~10 倍。同时由于用水结构的不合理及管理体制的欠缺,流域水资源供需矛盾日益突出。

④ 水污染加剧、水资源开发过度导致“水质型缺水”问题突出。

按照地表水国家标准,2005 年对七大水系的 175 条河流和 345 个断面的监测数据显示:Ⅰ~Ⅲ类水质占 46.7%,Ⅳ~Ⅴ类水质占 28.4%,劣Ⅴ类水质占 28.4%,主要污染物是高锰酸盐、氨氮和石油类。

我国江河湖泊普遍受污染,其中黄河、辽河为中度污染,海河为重度污染,全国 75% 以上的湖泊出现了不同程度的富营养化,90% 的城市水域污染严重。对我国 118 个大中城市的地下水调查数据显示,有 115 个城市地下水受到污染,其中重度污染约占 40%,大大降低了水体的使用功能。近 20 年来,我国水污染从局部河段发展到区域及流域,从地表水扩散至地下水,从单一型污染发展为复合型污染,水污染的扩散速度加大,水环境破坏程度加重,在很大程度上加剧了水资源水质型短缺和供需矛盾,成为当前我国水危机中最严重和紧迫的问题。

在水体污染的同时,水资源过度开发也导致一系列问题的出现。大量研究表明,径流量利用率超过 20% 就会对水环境产生较大的影响,超过 50% 则会产生严重的影响。目前,我国水资源开发利用率已达到 19%,且水资源短缺程度越大,开发利用率越高。随着水资源的过度开发,西北内陆河流域荒漠化面积扩大,华北地区和部分沿海城市地下水超采导致地下水降落漏斗的形成及扩大、地面沉降、海水入侵和倒灌等问题,进而导致区域生态环境的恶性循环。

我国水资源除存在上述问题外,还在全球变暖和人类活动的作用下表现出强烈的敏感性和脆弱性,因而水资源的相关监测、形成转化研究、综合管理及开发利用新技术就成为水资源研究的主要趋势。

1.3.4 水资源评价与方法

一般的水资源评价是对于评价范围内的水资源的数量分布、年际年内变化、质量等方面的确定,并评估水资源利用和控制的可能性,包括基础评价、利用评价、灾害评价及水环境影响评价,是水资源可持续开发利用的前提,是科学规划水资源的基础,也是保护和管理水资源的重要依据,是进行所有与水有关活动的基础工作。

1992 年,联合国教科文组织和世界气象组织联合出版了《国际水文学词汇》将水资源评价定义为:“为了利用和控制而进行的水资源的来源、范围、可靠性以及质量的确定”。在我

国,水资源评价是指按流域或地区对水资源的数量、质量、时空分布特征和开发利用条件、水供需状况等做出全面的分析评估,是水资源规划、开发、利用、保护和管理的基础工作,为国民经济和社会发展提供决策依据^[22]。

(1) 各国水资源评价进展

美国在 1840 年对俄亥俄河和密西西比河进行了河川径流量的统计,在 19 世纪末 20 世纪初编写了《纽约州水资源》、《科罗拉多州水资源》、《联邦东部地下水》等专著,是水资源评价的最初成果。1965 年美国国会通过了水资源规划法案并成立了水资源理事会,开始进行全美国的水资源评价工作并于 1968 年完成了评价报告,即《国家水资源》。报告对美国水资源的现状和展望进行了研究分析,比较了水资源的供需状况,并且评价了水资源的专门问题,讨论了缺水地区的情况及问题,划分了主要的水资源分区,进行了约 50 年的需水预测。1978 年美国开展了第二次水资源评价活动,经历了全国性分析、特定分析及全国性问题的分析,完成了《1975~2000 年国家水资源评价》的最终报告,重点分析了可供水量和用水要求,并对局部地区地表水供水不足、地下水超采、水质污染、饮用水质量、洪水及泥沙灾害、海湾河口沿岸水质变差等问题提出了可能的解决途径。同时,针对水资源系统的动态性变化和条件及制约因素的不断变化,指出每 5~10 年进行一次全国水资源评价是很有必要的。

苏联把国家水资源登记和国家水册作为国家的水资源评价。自 1930 年开始编制了国家水资源编目,1960 年开始了国家水册的第二次修订。此次修订分为三部分:第一部分《水文知识卷》,包括已整编的水文站网的观测资料和野外勘察资料;第二部分《主要水文特征值卷》,主要计算了观测期内水文资料的统计特征值;第三部分是手册形式的《苏联地表水资源卷》,包括水文图集、水文要素情势、有关水文要素计算方法的图表及说明等。同时,建立了国家自动化信息系统,内嵌地表水、地下水和水资源开发三个子系统,提高了水资源评价为生产建设服务的效率。

联合国教科文组织等国际组织也加强了水资源评价的国际协调与交流工作。1977 年,联合国在马德普拉塔举行了第一届世界水会议,提出了《马德普拉塔行动计划》,第一项决议中明确指出“没有对水资源的综合评价,就谈不上对水资源的合理规划与管理”,号召各国要开展以一次专门的国家水平的水资源评价活动,要求各国建立水资源评价机构并开展国际合作^[23]。1988 年,联合国教科文组织和世界气象组织共同提出的文件中指出:水资源评价是指对水资源的源头、数量范围及其可依赖程度、水的质量等方面的确定,并在其基础上评估水资源利用和控制的可能性^[24]。1990 年发表的《新德里宣言》、1992 年发表的《都柏林宣言》及联合国环境与发展大会的《里约热内卢宣言》和《21 世纪议程》以及 1997 年第一届世界水论坛等都强调了水资源评价的紧迫性与必要性,水资源评价工作从此进入了全球性的阶段。

20 世纪 60 年代以来,随着大量水资源工程的出现及人口的快速增长,水资源问题日益突出,水资源约束日益趋紧,各国加强对水资源开发利用的管理和保护被迅速提上日程。

我国自 20 世纪 50 年代进行各大河流域的规划时,对有关大河的全流域河川径流量进行了系统的统计。中国科学院地理研究所曾在 20 世纪 50 年代提出我国东部入海大江大河的年径流量统计成果。1963 年,水利水电科学研究院通过系统整编全国的水文资料,编制并出版了《全国水文图集》,对全国的降水、河川径流、蒸散发、水质、侵蚀泥沙等要素的天然

情况统计特征进行了分析计算,编制了各类等值线图、分区图表等,是我国第一次全国性水资源评价的雏形,带动了各省区(直辖市)、各地区水文图集的编制工作,很大程度上推动了水资源评价工作的开展。1980年前后,在中国农业区划工作的带动下,全国开展了水资源调查评价以及水资源开发利用的调查分析与评价工作,基本查明了全国各地地表水资源的数量及其时空分布特性,研究了降水、蒸发及径流三要素的平衡关系,为全国各个地区水资源评价、水利规划及区划提供了重要的科学依据。1985年国务院批准建立了全国水资源协调小组,于1987年提出了《中国水资源概况和展望》成果,包括了水资源量及其特点、水质、泥沙、水能、水资源利用概况及存在的问题和水土保持、水能利用、水源污染等若干方面,并提出了有关水资源开发和管理的政策性建议。随着水文循环过程的发展变化,同时气候变化及人类活动对水资源活动产生了较大的影响,区域水资源平衡发生了较大变化,加之第一次水资源评价资料系列短、侧重为农业及水利服务,因此我国于2002年开展了第二次水资源评价工作,全面评价了我国水资源的数量、分布情况与特征。并且制定了水资源总体规划,作为今后一段时期内水资源开发利用与管理活动的重要依据。

(2) 水资源评价方法

从各国及各地区水资源评价工作的进展来看,水资源评价的内容不断增加,方法也愈加多样化。早期的水资源评价主要是统计天然情况下河川径流量及其时空分布特性,随后增加了为水资源及相关工程规划设计所需的水文特征值计算方法及参数统计,继而增加了为水资源工程管理及水资源保护的内容,特别是水资源供需情况的分析以及展望,以及在此基础上的水资源开发前景逐渐成为水资源评价中的重要内容。同时,气候变化、人类活动引发的水资源及环境影响评价也正在成为关注的新焦点。

依据水资源评价的定义,水资源评价应包括对评价范围内全部水资源量及其时空分布特征的统计与分析、可利用水资源的估算、各种用水的现状 & 前景分析、全区及其分区水资源供需状况及预测、可能的解决供水矛盾的途径、为控制水量采取的工程措施效益评价等,因此水资源评价活动应包括水资源基础评价、水的利用评价、水灾害评价、水环境评价。不同地区,地表水资源评价、地下水资源评价及水资源其他评价活动方法各不相同。

水资源评价过程中,由于各国采用水资源的定义不同,水资源量的确定也有所不同。我国进行水资源评价时,将年河川径流量和浅层地下水相加后扣除重复计算的部分作为水资源的总量。

《水资源:国家能力评估手册》中将水资源评价方法归为三类:常规技术、水量管理平衡和计算机模型。

早期的水资源评价方法主要是基于水资源的统计方法(常规技术),利用河流流量资料确定历史最大和最小流量、平均流量,以及通过使用历时曲线,估算河流水位超过或低于某一特定水位的频率(统计方法),用来评估在没有附加水库调蓄的情况下,河流满足目前和预期引水的能力。对于不同的区域,由于统计方法的不同,水资源量的计算结果会产生较大差异。对于一个区域而言,水资源量只计算当地的地表径流量,不计区域外的河川径流量。美国第一次水资源评价、我国第一次和第二次水资源调查评价都采用了该原则,并在此基础上将地下水资源量计入水资源总量。

随后水量平衡法作为一种新兴的评价方法得到了广泛的发展。一个流域的基本方程为:入流量+初始蓄水量-用水量-出流量=期末蓄水量,研究时段为年、月等;我国水资源

中通常将河川径流量作为水资源量,评价方法主要是采用水量均衡法,通过“实测—还原—修正”的评价思路,剔除人类活动影响,将实测的水循环通量还原到天然状态,以此作为水资源评价量,还原方法有参数修正法、投影寻踪法、神经网络及遗传算法等^[26-28],但是还原过程存在较大的任意性,还原结果可能存在较大失真且还原标准较难确定^[29]。

为保证各国水资源评价的一致性、提高水文资料在流域和全球范围内的可用性,联合国粮农组织提出了基于GIS的水质均衡模型,借助降水、土壤、植物需水、灌溉条件等生成基于DEM的数字水文网格。模型分为垂直平衡模型与水平平衡模型。随后水文模型法得到了较迅速的发展。从20世纪80年代末,我国的水资源评价模型逐步发展起来,如郝振纯研制的基于新安江流域水文模型和地下水动力学的地面—地下水联合评价模型、谢新民等通过概念性水文模型与地下水动力学模型有机结合研制的平原区二元耦合模型^[30];熊立华等提出了两参数月水量平衡模型,用以评估气候变化对水资源的影响,并应用于赣江、汉江等流域^[31],杨井等在此基础上发展出基于GIS的分布式月水量平衡方法^[32],王浩等提出的基于二元水循环模式的水资源评价理论与方法,将分布式水循环模拟模型和集总式水资源调配模型进行耦合,实现了水资源的动态评价^[33]。李建峰、凌敏华、张久川等尝试了基于GIS的水资源评价方法并进行了系统开发,利用GIS在管理和分析空间数据上的强大能力,以及高效的图形显示和分析系统对区域水资源进行评价分析^[34-36]。同时,水资源评价模型从传统的概念性模型及集总式模型,逐步发展到分布式模型,如SWAT(Soil and Water Assessment Tools)、SHE(System Hydrologique European)和VIC(Variable Infiltration Capacity)模型等。分布式水文模型是具有物理机制的分布式降雨径流模型,利用数学物理方程描述水分在地表和土壤中的运动,计算得到暴雨的降雨径流关系。国外具有代表性的分布式水文模型有1979年提出的TOPMODEL模型,是基于DEM推求地形指数来反映下垫面的空间变化对流域水文循环过程的影响,但未考虑降雨、蒸发等空间分布对产汇流的影响^[19];由SHE模型发展起来的MIKE SHE模型应用数值分析来建立相邻网格单元之间的时空关系^[20];美国农业部1995年开发的SWAT模型具有很强的物理基础,目前在我国应用较广^[37-40];TOPKAPI模型假定土壤及地表网格内侧向水流运动可用运动波模型来模拟,将建立空间上的假设在一定空间尺度上进行积分,从而把初始的线性微分方程转换成非线性水库方程,最后求取数值解,它也可以应用DEM、土地利用和土壤等信息来模拟较大空间尺度的流域水文情况,不影响模型和参数的物理意义。

(3) 水资源评价的尺度

目前水资源评价主要为大尺度,多以行政区域或大型流域为评价单元。如国家水资源评价、流域水资源评价(黄河流域、长江流域、赣江流域、黑河流域、海河流域、石羊河流域)^[41-43]、各省区水资源评价(辽宁、河北、山西、浙江、江苏、安徽、新疆、湖北、宁夏等)等,通过各种水资源评价方法对区域或流域水资源及其开发利用状况进行了综合评价,中小尺度水资源评价较少^[44-46]。

1.3.5 地表水资源评价及模拟

地表水资源是指由降水形成的河流、湖泊、冰川等地表水体可以逐年更新的动态水量,是水资源中极其重要的组成部分,通常用还原后的多年平均河川径流量表示,故而传统的地表水资源评价即指河川径流量的分析计算。