

国家重点基础研究发展规划项目(编号G1999043605及2003CB716807)

国家自然科学基金重点项目(编号 50239020)

黄河流域水资源可再生性 基本理论与评价

杨志峰 沈珍瑶 李春晖 著
夏星辉 刘绿柳 杨晓华



黄河水利出版社

内 容 提 要

本书是有关黄河流域水资源可再生性理论与评价的专著,主要包括六个部分:(1)流域水资源可再生性基本理论及研究方法;(2)黄河流域水资源量可再生性变化特征及其影响因素;(3)黄河流域水质特征分析及水资源的水质水量综合评价;(4)黄河流域及其主要城市水资源可再生性综合评价;(5)黄河流域水体交换规律及水文模拟;(6)黄河流域水资源可再生性维持阈值。本书以全新的视角探讨黄河流域水资源的可持续利用问题,在系统探讨黄河流域水资源的水量再生、水质恢复、自然再生、社会再生的基础上,建立了流域水资源可再生性的基本理论体系,开展了黄河流域水资源可再生性评价,探讨了流域水资源的可再生能力,确定了水资源可再生性维持的阈值。本书研究成果对于实现黄河流域水资源的可持续利用具有重要的指导意义,也可对其他流域水资源管理提供借鉴。

本书可供流域管理部门、科研技术人员参考使用,也可供有关大专院校师生阅读。

图书在版编目(CIP)数据

黄河流域水资源可再生性基本理论与评价/杨志峰
等著. —郑州:黄河水利出版社,2005. 11

ISBN 7-80621-980-3

I. 黄… II. 杨… III. 黄河流域—水资源:再生
资源—研究 IV. TV213

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 140422 号

策划组稿编辑:岳德军 0371-66022217 dejunyue@163.com

出版社:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市金水路 11 号 邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话:0371-66026940 传真:0371-66022620

E-mail: yrep@public. zz. ha. cn

承印单位:河南省瑞光印务股份有限公司

开本:787 mm×1 092 mm 1/16

印张:21.25

字数:490 千字

印数:1—3 000

版次:2005 年 11 月第 1 版

印次:2005 年 11 月第 1 次印刷

书号:ISBN 7-80621-980-3 / TV·429

定价:68.00 元

前 言

水是生命之源,是人类生存与发展的命脉。水多为患,水少成灾,水脏贻害。解决好水的问题,是实现社会经济可持续发展的关键之一。因此,流域水资源评价、管理工作历来是研究关注的重点。

其研究工作最早可追溯到 1840 年美国开展的密西西比河河川径流量统计,此后,前苏联开展的《国家水资源编目》和《苏联水册》也对河川径流量进行了统计分析。20 世纪 60~70 年代,美国、西欧、日本、印度等国在重点分析可供水量和供水需求的基础上,相继开展了水资源评价、管理研究。我国于 1979 年开始第一次水资源评价工作,较为全面地评价了全国地表水及地下水资源数量、质量、分布规律和水资源总量以及开发利用现状及供需情况。20 世纪 80 年代,随着可持续发展思想的提出,水资源评价不仅是水量评价,还包括对水质、水资源保护、供需状况、水资源管理等进行综合评价。尽管水资源评价技术相对成熟,但随着研究的深入,水资源评价中的一些重要问题也凸显出来,如水质水量割裂评价、未考虑生态需水和流域的整体特性等。20 世纪 90 年代以来,基于水资源的自然流域特性实施水资源统一管理已为世界所公认,其核心是以健康河流为目标,维持流域水资源的可再生性。因此,从水资源可再生性进行水资源评价成为水资源评价的必然。但迄今为止,有关水资源可再生性的系统研究还未见报道。

黄河流域是我国人均占有水资源量很低而水资源开发利用程度极高的地区之一。黄河的水患治理和水资源开发利用虽已经取得了举世瞩目的成就,但许多新的问题又不断产生,主要表现为水资源短缺、水环境污染和生态环境恶化三大问题相交织。寻求维持黄河水资源可再生性的途径,提出缓解黄河水资源短缺的方法,是解决黄河流域所面临的水资源危机的关键,也是维持黄河河流系统健康的关键。

本书将流域水资源可再生性的理论研究和实例应用相结合,试图以全新的视角对黄河流域水资源可持续利用进行探讨,在系统研究黄河流域水资源的水量再生、水质恢复、自然再生、社会再生的基础上,建立了流域水资源可再生性的基本理论体系,开展了水资源可再生性评价,探讨了流域水资源的可再生能力,确定了水资源可再生性维持的阈值。本书具有以下特点:概念上,系统地提出了水资源可再生性、水资源可再生性维持阈值等概念,同时亦提出水资源功能容量、水资源功能亏缺、水环境功能容量、水环境功能亏缺等概念;理论上,建立了水资源可再生性基本理论、水资源可再生性维持阈值理论、水资源可再生性综合评价理论等;方法上,提出了水质水量联合评价水资源的方法、自然水体水质恢复能力的评价方法、水资源可再生性评价综合方法等,形成了完整的水资源可再生性评价方法;应用上,获得的水资源开发利用阈值计算成果等。上述成果将为黄河流域水资源持续利用和综合管理提供支撑,有助于黄河流域社会、经济、生态与环境的可持续发展。

本书是在北京师范大学环境学院所承担的国家重点基础研究发展规划项目“黄河流域水资源可再生性理论与评价”(G1999043605)、国家自然科学基金重点项目“流域生态

需水规律及时空配置研究”(50239020)及国际合作项目“基于多种模拟、优化模型与高新技术的一体化流域管理系统”(2003CB716807)的研究成果基础上完成的,是集体智慧的结晶。以上三个项目(课题)的负责人杨志峰教授指导、策划并最终审定了本书。全书各章撰写的分工如下:第一章:杨志峰、李春晖;第二章:杨志峰、沈珍瑶;第三章:李春晖、杨志峰;第四章:李春晖、杨志峰;第五章:夏星辉、杨志峰;第六章:夏星辉、杨晓华;第七章:沈珍瑶、李春晖;第八章:杨晓华、沈珍瑶;第九章:杨志峰、刘绿柳;第十章:刘绿柳、杨志峰;第十一章:沈珍瑶、夏星辉。

在此书稿完成之际,向在课题研究中给予我们大力支持的刘昌明先生、李国英主任、陈效国总工以及参与课题研究工作的郝芳华教授、崔保山教授、曾维华教授、刘静玲教授、王烜副教授、程红光副教授、张科利教授、孙涛副教授、陈国谦教授、李东高级工程师、崔树彬高级工程师等表示由衷的感谢。北京师范大学环境学院的博士及硕士研究生张远、尹民、郭乔羽、隋欣、赵欣胜、张学青、周劲松、祝捷、余晖、张曦、张雪松、任希岩、孙强、李英华、王然等也参与了课题的研究,贡献了他们的聪明才智,在此一并表示感谢。

由于作者水平所限,以及黄河问题研究的复杂性,难免出现疏漏和错误,不当之处谨请批评指正。

作 者

2005年8月于北京师范大学

目 录

前言

第一章 绪论	(1)
第一节 研究背景和意义	(1)
第二节 黄河流域水资源评价研究进展	(2)
第三节 研究目的和本书结构	(5)
第二章 流域水资源可再生性基本理论	(8)
第一节 水资源可再生性基本特征	(8)
第二节 水资源可再生性基础理论体系	(13)
第三节 水资源可再生性评价的内容	(19)
第三章 黄河流域水资源量自然可再生变化	(21)
第一节 黄河流域概况	(21)
第二节 评价分区与评价数据获取	(25)
第三节 黄河流域水资源量自然可再生变化与预测	(34)
第四章 黄河流域水资源量可再生的影响因素分析	(74)
第一节 黄河流域水资源可再生的气候背景	(74)
第二节 地理位置对水资源可再生性的影响	(76)
第三节 蒸发与河道水量补损对地表水资源的影响	(77)
第四节 降水与非降水因素对天然径流量衰减的作用	(87)
第五节 气温—降水—径流的相关关系	(95)
第六节 土地利用/植被覆盖与水资源可再生的关系	(97)
第七节 人类取用水对径流量的影响	(107)
第八节 太阳活动对黄河流域水资源的影响	(116)
第九节 气候变化对黄河流域水资源的影响	(120)
第十节 黄河流域污染物排放分析	(126)
第五章 黄河流域水质水量综合评价	(130)
第一节 黄河流域水体污染特征	(130)
第二节 从水质水量相结合的角度评价黄河水资源	(143)
第六章 黄河流域水质恢复能力评价及水质恢复机理研究	(153)
第一节 黄河流域水质恢复能力评价	(153)
第二节 黄河流域水质恢复机理	(160)
第七章 黄河流域主要城市水资源社会可再生性评价	(169)
第一节 城市水资源社会可再生性	(169)

第二节	黄河流域典型城市水资源社会可再生性评价·····	(171)
第八章	黄河流域水资源可再生性综合评价·····	(177)
第一节	水资源可再生性评价指标体系的建立·····	(177)
第二节	指标体系的筛选·····	(179)
第三节	水资源可再生性评价标准的建立·····	(184)
第四节	不同评价方法的评价结果·····	(185)
第九章	黄河干流典型河段水体交换与传输特征评价·····	(217)
第一节	水体交换与传输的基本理论·····	(217)
第二节	黄河干流典型河段更替周期及平均传输时间变化趋势分析·····	(225)
第十章	基于水文模型的黄河流域水资源模拟·····	(234)
第一节	绪言·····	(234)
第二节	水文模型的构建·····	(243)
第三节	模型率定与验证·····	(263)
第四节	变化环境下径流预测·····	(302)
第十一章	黄河流域水资源可再生性维持阈值·····	(320)
第一节	水资源可再生性维持阈值基本理论·····	(320)
第二节	维持生态系统健康的最小生态环境需水量阈值·····	(320)
第三节	人类可以利用的最大水资源开发利用阈值·····	(321)
第四节	维持一定水环境功能的污染物排放阈值·····	(329)
第五节	控制社会经济关键要素的发展阈值·····	(332)

第一章 绪 论

第一节 研究背景和意义

水是生命之源,是人类赖以生存和发展的物质基础,也是生态环境的控制因素之一。没有水资源,人类的生存与发展将无从谈起。因此,水资源是区域、国家甚至是全球环境与发展的关键。由于水文循环的无限性,人们以为水资源是“取之不尽,用之不竭”的,因而不注意节约使用和保护,以致出现水资源短缺局面。特别是近年来随着人口的增加、经济的发展,人类对水资源的开采程度和破坏程度不断增强,水文循环受到严重扰动,水资源自然循环的途径和通量发生改变,其可再生能力也遭到不同程度的改变,出现了一系列水资源、水环境问题,如水资源短缺、河道断流、水质污染等现象,不但严重影响流域内人们正常的生产和生活需水,还影响区域长期可持续发展。因此,水资源问题成为世界关注的焦点之一。

Falkenmark(1989)^[1]对水压力度进行分级,认为每人每年再生水资源拥有量少于 $1\,700\text{m}^3$,就有“水资源压力”,少于 $1\,000\text{m}^3$ 则“水资源稀缺”,少于 500m^3 则该地区注定生活在“水贫困线以下”,甚至有“巨大水资源压力”。黄河作为我国西北、华北地区的主要水源,其地表水资源量少,人均 $593\text{m}^3/\text{年}$,属于水资源稀缺地区。黄河流域水资源开发程度一般在 $20\%\sim 40\%$ 之间,下游甚至达到 70% ,大多数河段远远超过国际公认的地表水合理开发标准(30%)和极限标准(40%),再加上近年黄河流域天然降水量减少,导致黄河下游频繁断流,水质逐渐恶化,严重影响沿黄地区工农业用水需求、加剧黄河流域原本脆弱的生态环境。特别是 20 世纪 70 年代以来,由于水资源不合理的利用,下游断流日趋严重,供需矛盾逐渐尖锐,造成严重的经济损失和生态环境破坏。黄河问题已经引起社会各界的广泛关注。

水资源具有可再生性,它的可再生性是由水文循环决定的。国际上水文水资源基础研究的热点之一是“研究地球水循环的数量、质量、力和能量及化学生物过程影响的作用机理和量化”(IHP)。水资源可再生性研究主要是研究水资源循环过程中水资源再生的数量和质量及其演变规律,它把水资源的自然再生和社会再生、水量再生和水质恢复有机结合起来^[2~4]。水资源可再生理论的提出不但丰富和发展了水文学水资源学的基础理论,也使水资源水质水量联合评价成为可能。流域水资源可再生性评价就是对流域水资源可再生性及其影响因素的变化规律进行全面、科学、定量的认识,为水资源可再生性维持提供科学依据。

21 世纪,我国实施西部大开发战略,黄河水资源短缺和水体污染将成为流域乃至西部大开发的制约因素。为了对黄河流域水资源有合理的认识,必须从水资源的天然特性和社会特性——可再生性来探讨黄河流域水资源的演变规律及其可再生维持。对黄河流

域水资源可再生性进行客观评价,这是可持续发展的根本要求,也是时代的需要,又是合理开发黄河流域水资源的基础,对促进黄河流域和西北、华北地区的社会经济可持续发展和生态环境的改善具有重要的战略意义。

第二节 黄河流域水资源评价研究进展

一、水资源评价研究进展

早期,人们因为工作的需要,常以流域为单位进行水量统计工作,如美国在 1840 年对密西西比河进行河川径流量统计,后来苏联编写的《国家水资源编目》和《苏联水册》也主要是对河川径流量进行统计^[5]。这些可以看做是初期的水资源评价活动。

20 世纪 60 年代,由于水资源问题的出现和大量水资源工程的建设,加强对水资源开发利用的管理和保护被提到议事日程。1965 年美国开始全美水资源评价,并于 1968 年完成评价报告,报告对美国水资源现状和展望进行了评价分析。1978 年又进行了第二次水资源评价,重点在分析可供水量和供水需求上^[6]。1975 年西欧、日本、印度等国家相继提出水资源评价成果^[7]。

联合国教科文组织(UN ESCO)等国际组织积极促进国际间水资源评价工作协调与交流。1977 年联合国在马德普拉塔(MAR DEL PLATA)召开的世界水会议决议中指出,“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”,强调水资源评价是保证水资源持续开发和管理的的前提,是进行与水有关的活动的基础。会议要求各国积极开展国家级水资源评价。1988 年联合国教科文组织和世界气象组织(WMO)给水资源评价的定义是,“水资源评价是对水资源的源头、数量范围及其可依赖程度、水的质量等方面的确定,并在此基础上评估水资源利用和控制的可能性”。水资源评价活动的内容包括评价区内全部水资源量及其时空分布的变化幅度及特点、可利用水资源量估计、各类用水的现状 & 前景、水资源供需状况及预测与可能解决途径、工程措施的效益评价以及政策性建议等。1990 年的《新德里宣言》、1992 年的《都柏林宣言》和《里约热内卢宣言》都强调了水资源评价的重要性,联合国环境与发展大会(UN CED)《21 世纪议程》的第 18 章专门讨论了水资源评价问题。自此,水资源评价进入全球性评价阶段^[5,8,9]。

我国于 1979 年开始进行第一次水资源评价工作,较为全面地评价了全国地表及地下水资源数量、质量、分布规律和水资源总量以及开发利用现状及供需情况。1985 年原水电部提出全国评价成果,出版了《中国水资源评价》(主要反映天然水资源状况),1985 年以后,全国许多地方又继续进行了一系列不同规模、不同深度的水资源分析评价工作,内容包括地表水资源量、地下水资源量、总水资源量、水质及降水、蒸发、干旱指数等。1989 年出版了《中国水资源利用》(主要反映水资源开发利用情况及分析成果)。以后各地区又相继开展了水资源评价的区域性和专题性研究,如 1996 年出版的《中国水资源质量评价》。1999 年颁布水资源评价导则,对全国水资源评价进行技术指导^[10,11]。

在水资源评价中,水资源量的评价主要根据水量转化规律(三水或四水转化)和水量平衡进行,如全流域水量平衡、河段水量平衡^[12,13]。在流域地表水资源评价中,水文模型

发挥着重要作用,如降水—径流模型、分布式水文模型、月水量平衡模型等^[14~17]。在评价技术上,有限元模拟、人工神经网络(ANN)、地理信息系统(GIS)、遥感技术(RS)和同位素示踪技术等得到广泛的应用,使水资源评价的精度和可操作性大大提高^[18~23]。水资源质量评价也由单一指标评价发展为多指标综合评价,评价方法也不断发展和改进,技术上也相对成熟^[24,25]。

随着可持续思想的深入,水资源评价的内涵和内容有了新的扩展,已由 20 世纪 80 年代主要对资源量及其时空分布特征进行评价发展到在可持续发展思想的指导下,不仅进行水量评价,还包括水质、水资源保护、供需状况、水资源管理等水资源可持续利用的综合评价。研究的基本方法是建立与水资源相关的多层次指标体系进行综合评价,目的是寻求流域、区域水资源可持续利用途径。综合评价的主要内容有水资源持续利用评价、全球变暖情景下水资源脆弱性评价、水资源生态持续评价、水资源承载力评价、水资源集成评价、水资源丰富度评价和水质恢复能力评价等^[26~31]。

王浩等^[32]结合可持续发展理念从水资源评价过程的有效性、可控性和再生性准则,把水资源评价统一起来,从而从理论上界定了现代水资源的评价范围。

二、黄河流域水资源评价现状

我国对黄河流域多次进行水资源基础评价,主要成果有《黄河水资源合理利用》、《黄河流域片水资源评价》和《黄河水资源》等^[33~35]。其中水资源基础评价主要有以下几个成果:

(1)1919~1975 年天然径流量系列。黄河水利委员会(以下简称黄委)1976 年对黄河流域天然径流量进行还原计算,得到 56 年天然径流量系列,其中三门峡站为 498.4 亿 m^3 ,花园口站为 559.2 亿 m^3 ,加上黄河下游支流 21 亿 m^3 ,全河年天然径流量为 580 亿 m^3 。1986 年完成的《黄河流域水资源合理利用》对黄河流域天然径流量进行了补充研究,得到 1919~1980 年天然径流量系列,其中三门峡站为 503.8 亿 m^3 ,花园口站为 563.4 亿 m^3 。可见 1919~1975 年天然径流量系列是比较合理的。1987 年的《关于黄河可供水量分配方案的报告》、1997 年的《黄河治理开发规划纲要》和 2000 年的《黄河的重大问题及对策》都采用了该研究成果。

(2)1956~1979 年天然径流量系列。1986 年黄委编制的《黄河流域片水资源评价》报告^[35],按照全国第一次水资源评价统一布置,采取 1956~1979 年 24 年径流量系列,得到三门峡站是 564.6 亿 m^3 ,花园口站是 629.9 亿 m^3 ,黄河流域为 659 亿 m^3 。这是首次采取分区还原累加法(产水量法)计算。这次成果没有考虑沿途蒸发渗漏,成果偏大,但分区天然径流量的计算为了解黄河流域水资源区域差异奠定了基础。

(3)1952~1990 年天然径流量系列。黄委 1992 年开展了《黄河历年水文基础资料审查评价及天然径流量计算》,评价结论是三门峡站为 540.6 亿 m^3 ,花园口站为 601.7 亿 m^3 ,利津站为 611.5 m^3 。

(4)1919~1997 年天然径流量系列。1999 年《黄河的重大问题及对策》中提出了 78 年径流量系列,结论是三门峡站为 507.8 亿 m^3 ,花园口站为 561.9 亿 m^3 。

这几次水资源评价成果略有不同,主要原因在于评价系列长短不同,其中分区评价

累积得到的天然径流量可能偏大,这是方法和目的不同引起的。

水资源综合评价方面,马滇珍等^[36]建立综合评价指标体系对黄河流域水资源进行了综合评价,把黄河河段水资源缺水程度分为一般缺水、严重缺水、基本平衡,把缺水类型分为工程型、资源型和水质型等。近年来,全球气候变暖对水资源的影响成为水资源研究的热点之一,我国也对在全球气候变化情景下黄河流域水资源的变化进行了评价研究^[37,38]。

三、水资源可再生性评价研究进展

尽管水资源评价技术相对成熟,研究内容丰富多样,对区域社会经济和生态环境可持续发展具有重要的指导作用。但是,随着研究的深入,水资源评价中的一些重要问题也凸显出来,如水质水量割裂评价、不考虑生态需水等,因此从水资源可再生性进行水资源评价成为水资源评价的必然。

在传统水文学中一般所谓再生水资源是指通过水文自然循环更新的那部分淡水资源。水资源的可再生性是通过水文循环实现的,水文循环的过程及各要素变化决定水资源可再生的大小和速率。水文更新时间或更新速率是水资源可再生的基本衡量指标之一,国内外对此做了大量的基础研究^[39]。国外近年来对深海、湖泊和水库的水体更新、交换和滞留时间以及更新过程数值模拟做了很多工作^[40,41],目的是通过水体的更新过程了解水体中污染物迁移、扩散、滞留的规律。

水资源利用是对水文自然循环过程加入人为的调控,通过改变水分的流向和通量来满足人类的水资源需求。在水资源利用中,人类可以通过循序利用、循环利用、污水处理等增加水资源的实际使用量,从某种意义上使水资源得到再生。因此,水资源可再生性的内涵进一步扩大,则包括自然再生和社会再生。

水资源可再生思想已经成为水资源利用的理论依据之一,国际上一致认为水资源最大利用量不能超过其再生更新量,对河流的自然水量更新而言,认为河川径流量最大利用率在再生量的40%以下时才不会对生态环境造成影响。在流域管理中,法国把水资源的可再生性作为流域管理的主要原则之一。20世纪90年代末,美国在“淡水资源紧迫性研究议程”中提出三个中心内容,其中之一是水资源的可再生性,指出需要维持水资源数量和质量的可再生性。水资源的社会再生也是水资源有效利用的重要手段,水资源的社会再生性是水资源可再生的重要研究内容,主要研究污水资源化、循环利用等。目前,在发达国家,水资源的社会再生程度较高,如以色列、日本等。

我国学者提出关于单元水体再生指数、再生周期等概念,从微观角度研究水资源的可再生性,并建立包含更新速率、循环系数等指标的评价指标体系,对黄河马莲洼小流域水资源的可再生性进行初步评价^[42-44]。杨志峰等^[4]初步构架了水资源可再生性的理论体系,包括基本概念、研究内容和概念模型。沈珍瑶等^[45-48]在水资源可再生概念、更新速率(周期)、综合评价等方面开展了一系列工作,取得一定进展。水资源可再生理论的提出丰富了水资源学的研究内容,具有重要的理论价值。

第三节 研究目的和本书结构

水资源可再生性是由水量再生、水质恢复、自然再生和社会再生等构成的复杂系统,本书从流域水文循环过程入手,详细介绍了流域水资源可再生性的基本概念和基本理论体系,并对黄河流域水资源可再生性进行了具体研究。

本书主要包括六个部分:

- (1)流域水资源可再生性基本理论及研究方法。
- (2)黄河流域水资源量可再生性变化特征及其影响因素。
- (3)黄河流域水质特征分析及水资源的水质水量综合评价。
- (4)黄河流域及其主要城市水资源可再生性综合评价。
- (5)黄河流域水体交换规律及水文模拟。
- (6)黄河流域水资源可再生性维持阈值。

第一部分(第二章)简要介绍水资源可再生性基本理论,包括水资源可再生性的基本概念、特征和主要理论体系及流域水资源可再生性评价等。

第二部分(第三章和第四章)将黄河流域划分为 16 个区域,分别对各区域的水资源量的演变规律,如时间变化、不均匀性、趋势性、持续性、突变性、周期性和空间结构等进行了分析。然后对影响水资源量可再生的主要因素进行了评价,如对气候背景、人类活动、植被覆盖、取水用水以及太阳活动等对水资源量变化的影响进行了分析。

第三部分(第五章和第六章)对黄河流域水体污染特征进行分析,从水质水量的角度联合评价黄河水资源;提出水质恢复能力概念并对黄河流域水质恢复能力进行评价。影响黄河流域水质的因素众多,如泥沙对河水耗氧性有机物污染参数的影响、水体颗粒物对石油类污染物生物降解和对硝化的影响等,本书还将对这些影响黄河水质恢复的机理进行分析。

第四部分(第七章和第八章)建立水资源可再生性综合评价指标体系,分别对黄河流域主要城市水资源社会可再生性进行评价,研究主要城市水资源社会可再生性水平、存在问题和建议。然后建立综合评价指标体系,采用多种方法对黄河流域各省区的水资源可再生性进行综合评价。

第五部分(第九章和第十章)在传统研究的基础上,深化了水体更替周期和传输时间的概念和计算方法,并对黄河干流典型河段水体交换周期和传输特征进行了评价。还建立了分布式水文模型,对大通河流域、兰州以上流域水文更新进行模拟。

第六部分(第十一章)阐述了流域水资源可再生性维持阈值的基本理论,并计算了由维持生态系统健康的最小生态环境需水量阈值、人类可以利用的最大水资源开发利用阈值、维持一定水环境功能的污染物排放阈值及控制社会经济一定规模的关键要素的发展阈值等组成的黄河流域水资源可再生性维持阈值。

参 考 文 献

- [1] Falkernmark M. The Massive Water Scarcity Now Threatening Africa-Why is not it Being Addresses? Ambio, 1989,18(2):114~115
- [2] 曾维华,杨志峰,蒋勇. 水资源可再生能力刍议. 水科学进展,2001,12(2):276~279
- [3] 沈珍瑶,杨志峰,刘昌明. 水资源的天然可再生能力及其与更新速率之间的关系. 地理科学,2002,22(2):162~165
- [4] 杨志峰,沈珍瑶,夏星辉,等. 水资源可再生性基本理论及其在黄河流域的应用. 中国基础科学,2002(5):4~7
- [5] 陈家琦,王浩. 水资源学概论. 北京:中国水利水电出版社,1996.86~132
- [6] 赵珂经. 美苏水资源评价工作介绍. 水资源研究,1991(1):1~8
- [7] 焦得生,石玉波. 我国水资源评价现状与展望. 中国水利,1998(3):10~11
- [8] G. Bjorklund. The comprehensive freshwater assessment and how it relates to water policy worldwide water policy.1998(1): 267~282
- [9] UN ESCO and WMO. Water Resources Assessment Activities: Handbook. For National Evaluation. Genva WMO Secretariat,1988
- [10] 水利水电部水文司. 中国水资源评价. 北京:水利电力出版社,1987
- [11] 水利部水资源水文司. 中华人民共和国行业标准——水资源评价导则(SL/T238—1999).1999
- [12] 贺伟程. 区域水资源评价原理和方法. 见:张海仑,金光炎,等. 平原地区水资源研究. 上海:学林出版社,1985.26~33
- [13] 张明泉,曾正中. 水资源评价. 兰州:兰州大学出版社,1994.10~12
- [14] Servat E.,Dezetter A.Rainfall-runoff modelling and water resources assessment in northwestern Ivory Coast. Tentative extension to ungauged catchments.Journal of hydrology,1993, Vol.148, No.1/4, pp.231
- [15] CHONG-YU XU. Application of Water Balance Models to Different Climatic Regions in China for Water Resources Assessment. Water Resources Management,1997 (11): 51~67
- [16] Jonathan I. Matondo. Water resources assessment for the Zambezi River Basin. Water international, 1998,23(4):256~262
- [17] Wessenu A.M..Water resources assessment within the main rift and fluoride concentration mapping in the lake region.Isotopes in water resources management,1996,Vol. 2,490~493
- [18] 魏文秋,于建营. 地理信息系统在水文学水资源管理中的应用. 水科学进展,1997,8(3):10~16
- [19] 张建云. 地理信息系统及其在水文水资源中的应用. 水科学进展,1995,6(12):290~296
- [20] 刘九夫,张建云. GIS在水资源评价应用中的关键技术研究. 水文,2002,22(6):11~15
- [21] 刘志伟. 有限元在傍河水源地水资源评价中的应用. 电力勘测,2000(2):33~35
- [22] 胡铁松,袁鹏. 人工神经网络在水文水资源中的应用. 水科学进展,1995,6(1):76~81
- [23] Shin S.C.,Sarasota M, Shim S.B., Choir Y.S. Assessment of water balance distribution based on remote sensing.Proceedings of the seventh international conference on computing in civil and building engineering 1997.Vol.1~4, 1771~1776
- [24] 申献辰,邹晓雯,杜霞. 中国地表水资源质量评价的方法研究. 水利学报,2002,12:63~67
- [25] 王本德,于义彬,王旭华,等. 考虑权重折衷系数的模糊识别方法及在水资源评价中的应用. 水利

学报,2004,1:6~10

- [26] 左东启,戴树声. 水资源评价指标体系研究. 水科学进展,1996,7(4):367~374
- [27] 卞建民,杨建强. 水资源可持续利用评价的指标体系研究. 水土保持通报,2000,20(4):43~45
- [28] 黄奕龙,张殿发. 区域水资源可持续利用的生态经济评价. 水文水资源,2000,21(3):11~13
- [29] 马滇珍,张象明. 水资源综合评价指标. 水利规划设计,2001(1):42~47
- [30] 唐国平,李秀彬,刘燕华. 全球气候变化下水资源脆弱性及其评价方法. 地球科学进展,2000,15(3):313~317
- [31] 夏星辉,沈珍瑶,杨志峰. 水质恢复能力评价及其在黄河流域中的应用. 地理学报,2003,58(3):458~463
- [32] 王浩,汪建华,秦大庸,等. 现代水资源评价及水资源学学科体系研究. 地球科学进展,2002,17(1):12~17
- [33] 席家治. 黄河水资源. 郑州:黄河水利出版社,1996
- [34] 孙广生,乔西现,孙寿松. 黄河水资源管理. 郑州:黄河水利出版社,2001
- [35] 水电部黄河水利委员会水文局. 黄河流域片水资源评价. 1986
- [36] 马滇珍,张象明. 水资源综合评价指标. 水利规划设计,2001,(1):42~47
- [37] 刘春蓁. 气候变化对水文水资源的影响. 见:丁一汇. 中国的气候变化与气候影响研究. 北京:气象出版社,1997. 482~488
- [38] 张国胜,李林,时兴合,等. 黄河上游地区气候及其对黄河水资源的影响. 水科学进展,2000,11(3):277~283
- [39] 刘昌明,任鸿遵. 水量转换——试验与计算分析. 北京:科学出版社,1988. 3~21
- [40] You Yuzhu. Implications of the deep circulation and ventilation of the Indian Ocean on the renewal mechanism of North Atlantic Deep Water. Journal of geophysical research. Oceans, 2000, 105(10): 23895
- [41] Hoppema, M. et al. Prominent renewal of Weddell Sea Deep Water from a remote source. Journal of Marine Research, 2001,59(2): 257~279
- [42] 王中根. 水资源量可再生性水文学基础与理论研究:[博士论文]. 武汉大学,2001
- [43] 夏军,王中根,刘昌明. 黄河水资源量可再生性问题及量化研究. 地理学报,2003,58(4):534~541
- [44] 王中根,夏军,刘昌明. 水资源量可再生性量化方法研究. 资源科学,2003,25(4):31~36
- [45] 沈珍瑶,杨志峰. 水资源的可再生性与持续利用. 中国人口. 资源与环境,2002,12(5):77~78
- [46] 沈珍瑶. 水资源可再生性初探. 见:中国博士后科学基金会. 2000年中国博士后学术大会论文集(土木与建筑分册). 北京:科学出版社,2001. 60~62
- [47] 沈珍瑶. 黄河流域水资源可再生性若干问题(报告). 北京:北京师范大学,2001. 8~10
- [48] 沈珍瑶,杨志峰. 黄河流域水资源可再生性评价指标体系与评价方法. 自然资源学报,2002,17(2):188~197

第二章 流域水资源可再生性基本理论

水资源的形成、演化和再生遵循自然规律,但是强烈的人类社会经济活动已使天然水循环发生了显著变化,引发了尖锐的水资源供需矛盾,导致了一系列环境和生态方面的劣变过程,造成了某些地区,如黄河流域,面临水资源短缺、洪水灾害加剧和生态环境恶化的严峻局面。其中水资源短缺是此三大问题的关键,而水资源再生,目前和将来都是解决水资源短缺这一核心问题的关键。

第一节 水资源可再生性基本特征

一、基本概念与内涵

美国地质调查局 1894 年最早使用水资源的概念,但是关于水资源的定义尚未形成统一的认识,各种定义的内容和范围都不一致。广义上,水资源是指地球上水的总体,即“全部自然界任何形态的水,包括汽态、液态和固态水”(《中国大百科全书》)^[1]。联合国教科文组织(1997)定义水资源为“可资利用或有可能被利用的水源,它应该有足够的数量和质量,并能在某一地点为满足某种用途而可被利用”;若考虑时间上的变化,则可定义为“在一定时间段内,存在于河流、湖泊、水库和含水层等内,在现有手段和经济合理的条件下可以被人们开发利用的那部分资源,就是该时间上的水资源量”^[2]。狭义上,水资源是指与生态环境保护和人类生存发展相关的可以利用,而且逐年恢复和更新的淡水,其补充来源是大气降水。我国学者认为水资源应该具有以下特性:①可以按照社会需要提供或可能提供的水量;②这个水量有可靠的来源,且可以通过水文循环得到不断的更新补充;③这个水量可以由人工控制;④这个水量及其水质能够满足人类的用水需要^[3]。显然,由于认识不同,水资源定义的范围也不尽相同。

(一)再生水资源的概念

Sandra L. 等(1996)^[4]认为,可再生水资源是指通过水文循环过程得到的淡水资源。不可补充的地下水(地质时期形成)虽然可以开采,但像石油一样不可再生。对陆面而言,再生水资源量是降水量减去蒸散发量和入海量之后的径流量(地表和地下径流)。事实上,由于没有工程控制、地势复杂、远离人口区等多种因素影响,人类可以稳定利用的可再生水资源仅占河川径流量的 27% 左右,大约 $11\ 100\text{km}^3$,主要形式是再生地下水和河川基流。其余的约 $29\ 600\text{km}^3$ 多为洪水,仅有部分($3\ 500\text{km}^3$)通过水库大坝工程可以被利用。人类直接和间接利用的可再生水资源量为径流量的 54%,也就是说人类可得再生水资源量是指河川径流量中可以被利用的部分。图 2-1 是人类可以利用的再生水资源量示意图。

联合国粮农组织(UN FAO)则认为某区域总的自然再生水资源包括再生的地表水资

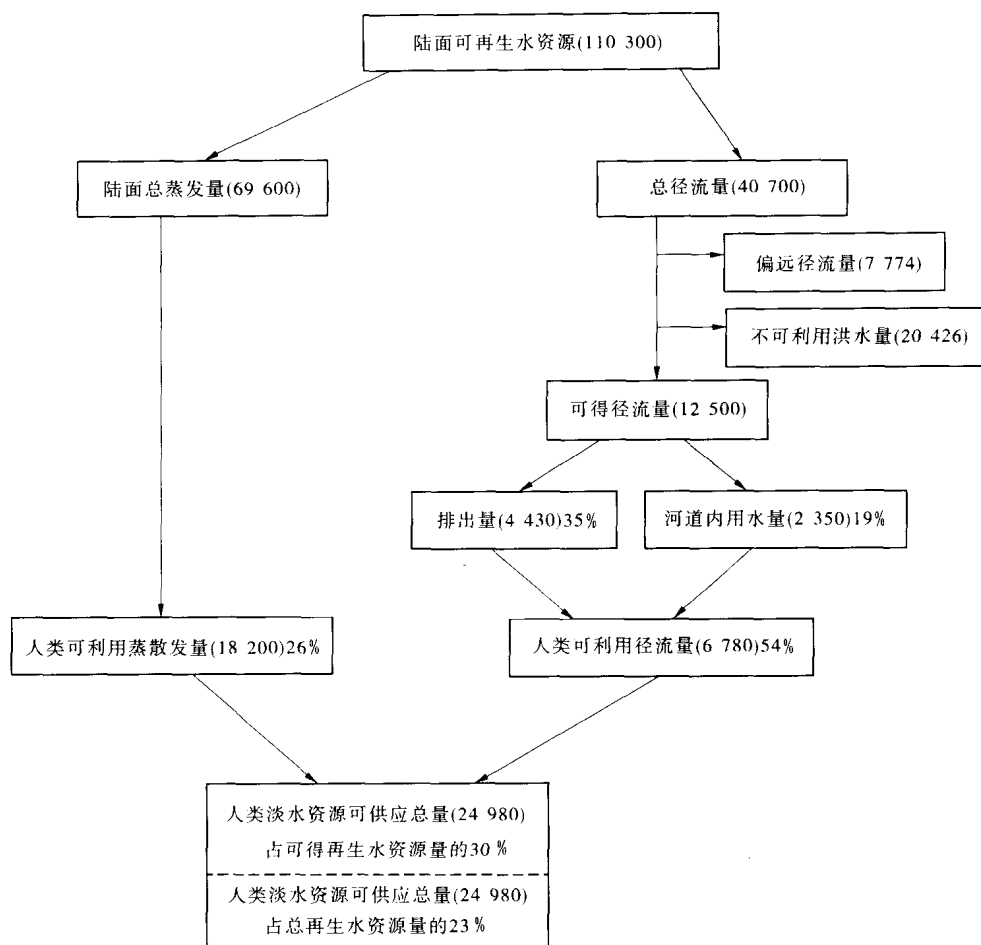


图 2-1 全球人类可利用再生淡水资源水量示意图(单位:km³/年)

源、再生的地下水资源和相邻区域流入的水量。王浩等^[5]根据水资源的有效性、可控性和再生性准则对水资源从层次上进行划分,认为再生水资源是指可控径流量中国民经济用水(见图 2-2),即扣除生态用水后的可控径流量。

比较一致的看法是水资源的可再生量即水资源的年可更新量(Renewable),地表径流通过降水得到补充更新,主要是淡水资源的可更新。例如,在统计更新水量时,分为地表水更新水量(地表径流)、地下水更新量(地下径流)和总更新量(地表径流+地下径流-重复计算量),可见可更新(再生)水量与径流量的概念是一致的。这种通过水文自然循环每年得以更新的水资源称为自然再生水资源。

在水资源利用中,通过人工净化处理使水资源得以循环利用或循环利用,这部分水资源也使水资源的量和质的功能得到利用,或者通过节水措施得到更多水资源,这些都扩大了水资源的实际使用量。因此,这部分水也属于再生水资源,即社会再生水资源,是自然再生水资源的延伸。

自然界的水资源在流动过程中,水中污染物不断得到稀释、降解,即水体具有天然自净能力;人类在利用水资源的过程中可以通过化学、生物和工程措施等改善水质。这些水

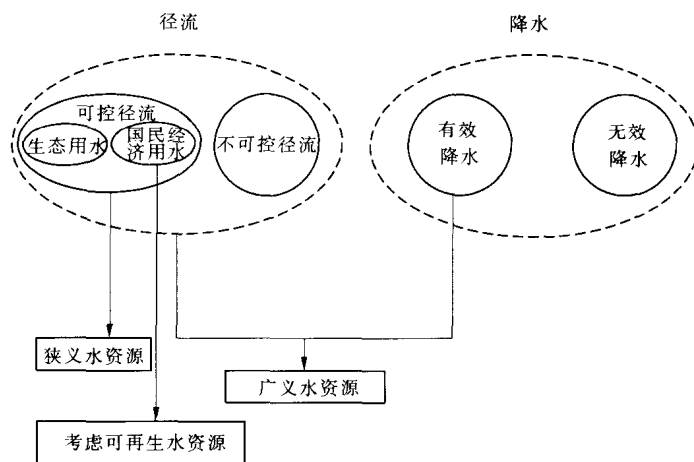


图 2-2 水资源层次划分示意图

质恢复在一定程度上增加了水资源的使用量和使用功能。因此,自然或社会的水质恢复也是水资源再生的一种类型。

综上所述,将传统再生水资源的定义和内涵进行延伸,本研究定义再生水资源为“在一定的时间内,能通过水文自然循环连续不断地补充或净化,或者通过社会循环得以水质恢复和重复利用的那部分水资源”,其中,自然循环得到的再生水资源量,即径流量(地表和地下径流),由降水得到;社会循环得到的水资源量,即处理后可以循环利用的那部分水资源量。其中自然再生水资源是再生水资源的主体和基础。

(二)水资源可更新、可再生与可再生性的概念

本书定义水资源可更新、可再生与可再生性三个概念如下:

水资源可更新 指传统意义上水资源量通过自然循环每年得以更新补充。

水资源可再生 指广义上的通过自然循环和社会循环,使水资源的量不断得到更新,水质不断得到改善。显然,水资源可再生包含传统意义上的水资源(量)可更新。因此,水资源可更新是水资源可再生的一部分,在描述自然水量再生时二者是一致的。但是,水资源可再生还包括水量社会可再生以及水质自然恢复或社会恢复。

水资源可再生性 水资源可再生性是水资源通过天然作用或人工经营能为人类所反复利用的特性,即水资源通过自然循环和社会循环使水量不断得到更新补充、水质得到恢复的特性和能力,它是一个综合的概念。由于水资源可再生包含着自然再生和社会再生,因此水资源可再生性也分为自然可再生性和社会可再生性。

根据上述定义,水资源可再生性的概念具有以下两大涵义:第一,水资源是可以为人类所反复利用的资源,是可再生资源,因此水资源可再生性研究的落脚点是水资源的持续利用;第二,水资源的这种可再生性是可以通过天然作用或通过人工经营达到的,因此水资源的可再生性具有天然特性、社会特性及天然—社会复合特性。

二、基本特征

(一)水资源可再生的类型、结构、尺度和层次

类型:从性质上,水资源可再生分为水质恢复和水量再生。水质恢复包括自然净化引

起的水质恢复和人工处理净化的水质恢复;水量再生包括自然循环的水资源量再生和社会循环的水资源量再生(如采取污水处理回用等措施增加水资源可使用量形式)。自然再生的水量是再生水资源的主体,社会再生的水量是水资源利用的有效补充。从属性上讲,水资源可再生分为自然再生和社会再生,前者通过自然循环得到,后者通过社会循环得到。

结构:水资源可再生的水量再生和水质恢复、自然再生和社会再生相互交叉、相互联系,构成一个耦合系统(见图 2-3)。水资源的社会可再生作为水资源可再生系统中的重要环节,它是通过人工措施使水量增加、水质改善,达到水资源有效利用量的增加。显然,水资源的社会可再生是水资源利用中的重要组成部分。

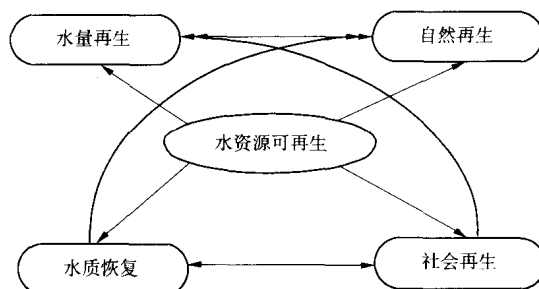


图 2-3 水资源可再生类型、结构图

尺度:尺度问题是水文循环研究中重要课题,不同尺度上的水文循环机理各不相同。不同尺度的研究对象,其水资源可再生过程、评价内容和方法也不相同。水资源可再生性研究可以划分为微观尺度(单元水体)、中观尺度(河段、水库或湖泊)和宏观尺度(流域或区域甚至全球水循环系统)三个层次。

层次:水资源可再生在时间维、空间维和形式上各不相同,也就是说存在水资源可再生的时空多维层次性。

因此,水资源可再生是由自然再生、社会再生、水质恢复和水量再生四种类型构成的复杂耦合系统,具有多维层次性。

(二)水资源可再生性的概念模型

图 2-4 给出了水资源可再生性的概念模型。图 2-4 表明,对于一个水资源系统,其水资源可再生的途径主要有两条:一是对应于天然情况,水循环是水资源再生的驱动力,系统中 Q_{in} 与 Q_{out} 的变化,可反映该系统水资源可再生能力的强弱;二是对应于人为作用情况,除人类活动影响到水资源的形成与存储方式外,人们在利用水资源的过程中采取广义节水措施(节水与回用),也增强了该系统的水资源可再生能力。当然,该系统中水质的改善,无论是天然情况的自净作用还是人为对水质差的水进行处理,均可以使水资源可再生性得到加强。

(三)水资源可再生性变化的一般特征

1. 无限性和有限性

由于水文循环的无限性,所以说水资源的可再生是无限的。但水文循环在一定时间内的循环能力是有限的,所以水资源不是“取之不尽,用之不竭”的,而是具有再生的有限性,即在一定时间内水资源再生的量是有限的,水质恢复的能力也是有限的。水资源可再生是有限的和可变的,其有限性主要表现为时空尺度性和多功能统一性,其可变性受区域变化和人为因素的影响。

2. 时空不均匀性

水资源可再生具有时空不均匀性。由于受各种因素的影响,水资源在时间维上表现出不均匀变化的特征,如年内不均匀性和年际不均匀性变化;在空间维上,水资源可再生