

现 代 水 资 源 从 书

黄河流域二元水循环 要素反演研究

王建华 江 东 著



科学出版社
www.sciencep.com

现代水资源丛书

黄河流域二元水循环 要素反演研究

王建华 江 东 著

本书受 973 课题“黄河流域水资源演变规律与二元演化模型
(编号: G1999043602)”资助

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书在讨论人类活动对于流域水循环影响分析的基础上,针对流域二元水循环过程模拟的需求,全面综述了现代空间信息技术在流域水循环模拟中的应用情况。进而以黄河流域为例,综合利用空间信息技术对自然水循环中的降水和蒸散发等要素信息进行了精细反演,为现代环境下的流域水循环要素信息的获取提供了新的技术途径。然后还对包括人口、GDP等黄河流域社会经济要素和社会经济用水信息进行了空间化,从而使流域水循环二元信息的耦合成为可能。在此基础上构建了黄河流域二元水循环空间信息平台,为流域水循环分布式模拟提供了完整的信息基础。

本书可供水文水资源、空间信息技术等相关专业的科研人员、大专院校教师 and 研究生等阅读。

图书在版编目(CIP)数据

黄河流域二元水循环要素反演研究/王建华,江东著. —北京:科学出版社,2006

(现代水资源丛书)

ISBN 7-03-016590-X

I. 黄… II. ①王 ②江… III. 黄河流域-水循环-研究 IV. P344.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 146066 号

责任编辑:谢洪源 刘 华/责任校对:鲁 素

责任印制:钱玉芬/封面设计:王 浩

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>

源海印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2006年1月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2006年1月第一次印刷 印张:11 1/2

印数:1—2 000 字数:258 000

定价:38.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈环伟〉)

序

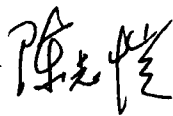
迈入 21 世纪以来,社会系统对于水循环过程中的兴利和减灾提出了更高要求,同时人类活动对于水循环的影响日益凸现,给流域水循环模拟带来许多新的课题与挑战。随着信息技术和计算技术的快速发展,现代水循环研究主要集中在三方面系统展开:一是致力于实现水循环各分项过程的综合研究;二是重视人类活动对于水循环过程的影响的研究;三是充分引入和利用各类新技术,并采取有物理机制的分布式模拟方法。

水循环过程是一种多因素相互作用的复杂过程。根据水循环路径的不同,将地表水循环过程分为天然主循环和人工侧支循环两类,天然主循环和人工侧支循环二者之间存在紧密的水力联系,循环通量相互依存,此消彼长。在人类活动作用下,流域水循环的要素信息也表现出二元化结构,即不仅包括降水、蒸发、径流等自然水循环要素信息,而且还包括供水、用水、耗水、排水等人工水循环要素信息。目前无论是通过建立抽象模型近似去模拟水循环现象,还是通过其他途径寻求水循环原型规律,其中一个最主要的影响因素就是模型所需要基础信息的采集、加工和检验体系的准确与翔实程度。进行流域二元水循环信息的有效采集、处理和融合,是实现流域水循环及伴生过程演化内在机制与规律科学认知的基本前提。

正是基于这样的认识,中国水利水电科学研究院的王建华博士、中国科学院地理科学与资源研究所的江东博士,以人类活动影响为切入点,选择自然和人工二元水循环过程中部分典型的流域水循环要素,深入探讨了基于 3S 技术的流域水循环要素反演的思路与方法;依据黄河流域的自然、社会经济特点,构建了流域自然要素反演模型和社会经济要素空间化模型,生成了长时间序列的流域水循环要素空间数据集,并利用同步的地面数据进行了多方位的校验工作。

空间信息技术与传统水文水资源学的交叉、碰撞,是新思维和新学科的生长点。两位年轻人通过扎实的努力和不断的思考,形成了《黄河流域二元水循环要素反演研究》一书,挂漏难免,勇气可嘉。期望这本很有理论和实践价值的著作,能够获得学术界和有关同仁的关注和指正。

中国工程院院士



2005 年 9 月 6 日

前言

随着社会生产力的发展,为满足社会的各方面需求,人类不可避免地各类自然过程进行人工干预,从而改变了天然状态下的自然规律,流域水循环过程与规律也不例外。现代环境下,大规模的人类活动从循环的主体、环境和能量三方面改造了天然的流域水循环系统,流域水循环及其伴生的相关生态、环境演化规律也因此发生了次生演化,在人类活动集中地区,这种次生演化过程对于社会经济系统的反作用已经不容忽视,科学认识自然与人工双重作用力下的流域水循环及水资源的演变规律,并制定符合自然规律和经济规律的有效调控措施,是当前水资源科学研究的主要内容。

水循环过程是一种多因素相互作用的复杂过程。目前无论是通过建立抽象模型近似去模拟水循环现象,还是通过其他途径寻求水循环原型规律,其中一个最主要的影响因素就是模型所需要基础信息的采集、加工和校验体系的准确与翔实程度。在人类活动作用下,流域水循环的要素信息也表现出二元化结构,即不仅包括降水、蒸发、径流等自然水循环要素信息,而且还包括供水、用水、耗水、排水等人工水循环要素信息。进行流域二元水循环信息的有效采集、处理和融合,是实现流域水循环及伴生过程演化内在机制与规律科学认知的基本前提。

传统的流域水循环要素信息的采集手段,主要通过站网实际观测或采取试验实验等途径获取,信息处理也主要以数值方法为主。以流域为单元的水循环要素信息两大基本特性在实践中具有特别的意义,一是要素的面状信息,二是要素信息的空间特性。对于流域水循环来说,人们在生产实践中所关注的各类问题都是水循环要素信息在一定时空域上的积分量,如洪水、水资源量、水污染问题等,但另一方面流域水循环要素信息存在明显的时空分异特性,传统将站点水循环要素信息按照某种数学关系演绎展布的处理方法不可避免地会造成一定尺度的信息丢失或失真。与此同时,传统的信息处理和融合方法也存在着信息滞后、存储受限、提取分析速度慢等诸多局限,从而造成流域水文过程模拟落后于水文物理机制的认知。

20世纪80年代以来,以遥感(RS)技术、地理信息系统(GIS)技术和全球定位系统(GPS)技术为核心的空间信息技术的发展及其在水科学研究中的应用,极大地发展了传统水文科学研究的基础信息体系,给流域水循环研究注入了新的活力,其中有物理机制的分布式水循环模型的迅速发展就是其有力的佐证。在流域水文水资源研究中,3S技术应用极为广泛,本书不可能也不打算去全面研究和描述3S技术应用的过程与结果,而是试图以人类活动影响为切入点,选择自然和人工二元水循环过程中部分典型的流域水循环要素信息,以集中体现3S技术在流域水循环过程信息反演的强大功效。

需要特别指出的是,形成本书的基础研究和主要成果均依托于作者所参加的国家重点基础研究(973)发展规划项目“黄河流域水资源演化规律与可再生性维持机理”第二课题“黄河流域水资源演变规律与二元演化模型”,因此本书的主要研究思路是在课题负责

人王浩教授和秦大庸教授指导下形成的,同时研究中的许多技巧与方法与课题的相关研究是密不可分的,在这里要对全体 973 课题组成员所付出的辛勤劳动表示感谢和由衷敬意,特别要提及的人员有贾仰文教授、罗翔宇工程师、赵勇博士、周祖昊博士和严登华博士等。此外,本书“人口、社会经济要素空间化”部分,是中国科学院知识创新工程项目“国家资源环境数据库建设与数据共享研究”第四课题“人口、社会经济数据库空间集成”研究成果在黄河流域的应用和拓展,得益于课题负责人杨小唤研究员的指导及王乃斌研究员、熊利亚研究员、庄大方研究员、刘红辉副研究员等的支持和帮助。

本书共由九部分组成,前言主要对本书形成的背景进行了简要介绍,主要由王建华和江东撰写,第一章主要叙述了流域二元水循环及其过程模拟研究的概况及其信息需求,主要由王建华撰写,第二章较为全面地论述 3S 技术在流域水循环模拟中的应用情况,主要由王建华和江东编写,第三章和第四章以黄河流域为例,分别论述了遥感技术在流域降水和蒸散发信息反演中的应用,主要由王建华和江东撰写,第五章和第六章则重点讨论了 3S 技术在黄河流域社会经济要素和社会经济用水信息空间化过程中的应用研究,主要由江东、罗翔宇和王建华撰写,第七章主要叙述了黄河流域二元水循环空间信息平台建设过程与结果,主要由江东和王建华撰写。

本书的主要作者王建华和江东,曾在一个寝室度过了他们一生中最富有朝气的四年大学时光,后来相约一同考入中国科学院自然资源综合考察委员会攻读博士学位,又砥足而眠三年有余。虽然博士毕业后各自在不同科研领域发展,但共同的志趣最终促使了水资源学和信息学的有机交叉与融合,同时也促成了本书的形成和出版,并见证着那岁月流逝下不变的友情。

利用空间信息技术研究现代环境下的流域水循环与水资源问题,其前景与方向都毋庸置疑的。“板凳要坐十年冷,文章不写一字空”,先哲的教诲言犹在耳,作者也审慎努力以期准确表达自己在本领域研究工作中的心得体会,但因问题的复杂性、时间和作者水平的限制,书中难免会有许多片面、遗漏甚至于错误的地方,希望能在批评、讨论和争鸣的气氛下不断改进。

作者:王建华 江东

2005 年 4 月于京城

目 录

序

前言

第一章 人类活动影响下的流域水循环及模拟	1
第一节 流域水循环及其研究概况	1
第二节 人类活动影响下的流域水循环系统演变	6
第三节 流域二元水循环模拟的信息技术支持	12
第二章 空间信息技术在流域水循环研究中的应用	16
第一节 现代空间信息技术基础	16
第二节 RS 技术在流域水循环研究中的应用	27
第三节 GIS 技术在流域水循环研究中的应用	38
第三章 黄河流域降水信息的遥感反演	43
第一节 CEWBMS 与降水遥感反演原理	43
第二节 黄河流域概况及其特点分析	50
第三节 黄河流域降水遥感反演	54
第四节 系统校验与完善	68
第四章 黄河流域蒸散信息的遥感反演	77
第一节 流域蒸散遥感反演原理与方法	77
第二节 黄河流域蒸散的遥感反演	85
第三节 蒸散反演结果的多源校验	96
第四节 黄河流域蒸散的时空分布规律	101
第五章 黄河流域人口、社会经济要素空间化	105
第一节 空间分布模型构建原理	105
第二节 流域人口、社会经济要素空间分布模型构建	108
第六章 黄河流域社会经济用水空间分布模型构建	129
第一节 社会经济用水及其空间分布	129
第二节 用水信息空间化的国内外研究进展	129
第三节 用水信息空间化的技术路线	130
第四节 用水信息空间化模型及其应用	131
第七章 黄河流域二元水循环空间信息平台建设	147
第一节 二元信息平台的总体结构与设计	147
第二节 平台主要功能模块分析	152
第三节 平台建设的关键技术与特色	164
主要参考文献	169

第一章 人类活动影响下的流域水循环及模拟

第一节 流域水循环及其研究概况

一、水循环及其系统划分

(一) 水循环系统

地球地壳表层约有 $1.386 \times 10^9 \text{ km}^3$ 的水，分别以液态、固态和气态的形式赋存于海洋、陆地、大气和生物体内，各种水体共同构成浩瀚的水圈，与地球的岩石圈、大气圈和生物圈共同组成地球的自然圈。常温条件下，水圈中的水分在地球引力、热力、毛细管作用力等外力作用下，通过蒸发、水汽输送、降水、下渗、径流等水文过程，在气、液、固三相之间循环转化和不断运移的过程，即为水循环，又称水文循环（图 1-1）。水循环过程不仅紧密联系着地球水圈的各个子系统，而且是联系水圈和地球其他自然圈层的纽带，并形成了许多彼此耦合的子系统（刘国纬，1997）。伴随着生生不息的水循环过程，地球表面同时进行着周而复始的其他物质与能量循环，同时不断对地面环境进行塑造。

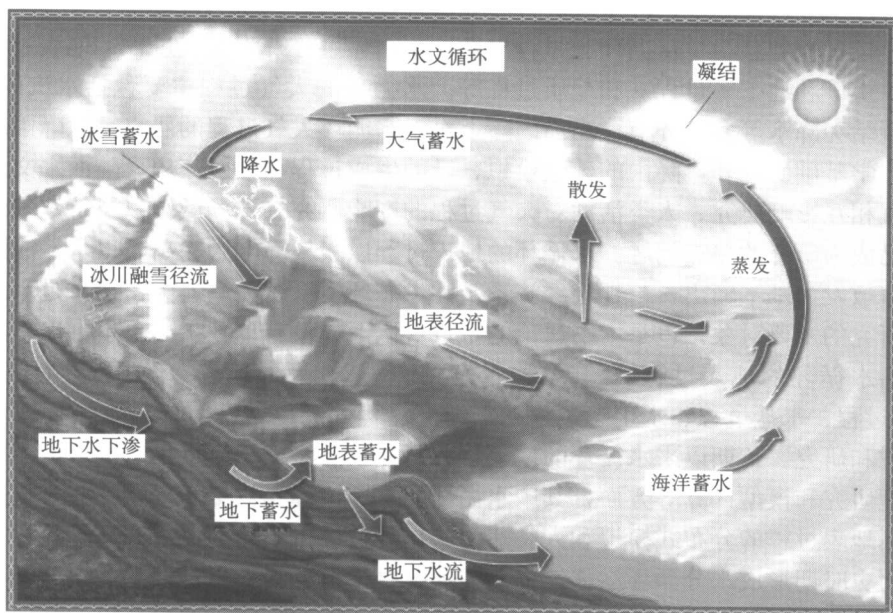


图 1-1 水文循环过程示意

水循环系统由三大基本要素构成,即水分、介质和能量,其中水分是循环系统的主体,介质是循环系统的环境,能量是循环系统的驱动力。对于与人们关系最为密切的陆面水循环,降水是水分的基本来源,下垫面、土壤和浅层岩石是其循环的主体环境,重力势能和太阳能是循环的主要能量源。

(二) 水循环系统划分

水循环系统划分的口径有多种,常见的包括以下几类:

(1) 按尺度划分 从循环的尺度出发,有全球水循环、陆地水循环、流域水循环、区域水循环和局地水循环等,其中全球尺度下的水循环常常分为大循环和小循环,其中大循环是指海陆水文循环,它起始于海洋,海水蒸发产生水汽,被气流带到大陆上空,在运移过程中遇到冷空气凝结,以雨、雪等降水形式降落到地面,一部分形成地表水,一部分渗入地下形成地下水,地表水和地下水在径流、越流和转化过程中一部分被蒸发,一部分通过地表径流和地下潜流回归海洋,从而完成一个大循环过程;小循环是指在陆地和海洋进行的局部循环,因此可以划分为海洋小循环和陆地小循环,其中陆地水循环还可能包括许多更小的水循环,受下垫面和人类活动的影响,陆地水循环较海洋系统相对要复杂的多;流域是陆地地表具有自然边界的集水域,因此流域尺度的水循环过程直接影响着区内社会经济活动和生态环境演替,流域水循环也成为陆地水文学研究的主要对象,也是水资源学科的基础;另外依据其他一些区域尺度划分规则,如山地和平原、行政区等尺度的水循环系统。

(2) 按过程划分 从循环全过程出发,水循环可分解为大气过程、地表过程(包括地面、土壤和地下等过程)和地质过程等。水循环的大气过程主要包括水汽的上升、输送、凝结和降水等多项环节,当前国际上对于水循环大气过程的研究,除降雨的微物理和动力学基础研究外,降雨的数值模拟、云的生成过程和辐射作用,陆面水文过程与大气过程相互影响研究、人类活动对大气过程的影响研究、外场试验以及特殊气候事件研究等已成为研究的热点问题。水循环的地表过程以大气降水为输出,以水平向的径流和垂向蒸散发为基本输出,与社会经济系统和生态环境系统关系最为密切,是水文水资源学科研究的主要对象,也是本书讨论的重点(以下如没有单独指出,本书以下所提水循环则指水循环的地表过程),其结构示意图见图 1-2。另外地表水分循环的伴生过程(如水沙过程、水盐过程、水生态过程和水经济过程等)也常常需要与水循环地表过程统一考虑和研究。长期以来水循环的地表过程研究主要集中于流域尺度的产汇流以及蒸散发机理研究和模型计算等方面,其中水循环的土壤过程相对更为复杂一些,目前研究重点包括地表过程的分布式模拟和人类活动影响定量分析等方面。水循环的地质过程是指地质历史时期形成水分循环运移过程,主要赋存于地下深部,与气圈、土壤圈和生物圈无直接关系,运动方式受控于深部地质构造特征,运动方式主要以缓慢的垂向分异迁移和围岩作用为主(张宗祜, 2001)。

(3) 按路径划分 目前国内外有关学者根据水循环路径的不同,将地表水循环过程分为天然主循环和人工侧支循环两类(王浩, 2003),其中天然主循环主要针对天然

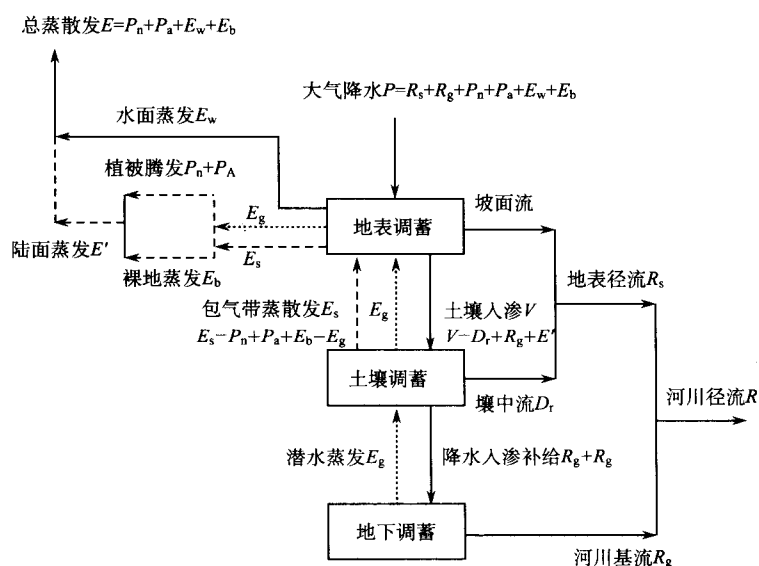


图 1-2 地表水循环过程示意

的降水坡面产流和河道汇流而言，包括降水、入渗、产流、汇流和蒸发等环节，人工侧支循环则主要指人工取水所形成的以“取水—输水—用水—排水—回归”为基本环节的循环圈，天然主循环和人工侧支循环两者之间存在紧密的水力联系，循环通量相互依存，此消彼长。另外有关学者还提出人工循环是天然主循环的嵌套侧支循环（刘春蓁，2002）。

二、水循环研究概述

（一）早期研究

早期水循环研究主要体现在对于水循环各个过程的系统描述和认知。对天然状态下的流域水循环，古代先哲早已有了相当深刻的认识。成书于公元前 239 年的《吕氏春秋·圜道篇》，对此作了生动的描述：“云气西行云云然，冬夏不辍；水泉东流，日夜不休；上不竭，下不满，小为大，重为轻，圜道也”。其中，“云气西行”指出了流域水循环的补给来源是大气降水，是更大尺度水循环的有机组成部分；“水泉东流”说明了地球重力作用下河流的方向，以及径流方向上地表水-地下水的相互转化；“上不竭，下不满”反映了流域的补给-排泄特性，上游区依靠降水有再生性补给，下游区汇入大海或散失于尾间湖泊；“小为大，重为轻”，一是指径流形成区内水平方向上由小及大的产汇流过程，二是指与产汇流同时存在的垂直方向上的蒸发过程。“冬夏不辍”、“日夜不休”、“圜道也”，则着重强调了降水-蒸发、产流-汇流、补给-排泄等流域水文过程的循环转化特征，较同期希腊哲学家柏拉图（Plato）和亚里士多德（Aristotle）提出的

“地下循环说”要科学得多。1674年法国人佩劳特(P. Perrault)发表《泉之源》论文,论述了泉水的来源是降水,泉水流入海,产生蒸发,又成为降水来源,该论文于1974年被联合国科教文组织认作是“水文循环学说的创始”,并作为“科学水文学”的开始进行纪念活动。

在水循环要素测定和研究上,约公元前22世纪,大禹治水已“随山刊木”以观测水位,以后都江堰的“石人”,隋朝的石刻水则,宋代的水碑,明代的“乘沙量水器”等相继出现,表明我国水循环要素的观测不断进步,另外《吕氏春秋》、《水经注》等古代著作,系统记载了我国各大河流的源流和水情,并提出水循环的初步概念和相关知识。

(二) 近代研究

在20世纪30年代之前,水循环研究基本属于经验科学甚至于经验行为范畴,20世纪30年代以来,是水文科学在理论和研究方法两方面快速发展成熟时期,它历经了推理阶段、理论化阶段,并开始步入计算机化阶段(Dooge, 1999)。

近代水循环研究的基本特征是采用数学方法对水循环过程进行描述,即通过构建水循环模型,对水文资料不充分区域和时段进行水文预报和水文计算,以及估计人类活动的影响以及进行水质控制等方面。由于水循环系统的复杂性,Vijay. P. Singh评述道:“……可以认为所有的水文问题起初均是黑箱子问题,即只有很少一部分因素能被认识。随着能认识因素的逐渐增加,出现了模型,并形成了不同层次,从相对简单到高度概括的模型,至更为复杂完备的理论模型……”(Vijay. P. Singh, 1992)。这是对水循环模拟发展过程的高度综合和概括,水循环过程模拟就是按照这一过程发展的,例如产流过程模拟理论的发展过程最初是1933年Horton提出超渗坡面流的径流形成理论,随着观察手段的不断改进,Whipkey提出壤中流的概念,这常常是小河道洪峰的主体;后来Kirby和Chorey通过对壤中流的深入研究,导出了部分面积流和饱和坡面流的概念;Freeze也指出,在紧邻河道的坡地地带和透水层较强的表土层较薄的地方,容易产生饱和坡面流;另外Hewlett和Hibbert在对壤中流实验研究过程中,还发现了另外一种形式的壤中流,即非饱和壤中流。在我国产流机理的观点主要有三种,即蓄满产流、超渗产流和景观产流,与之相对应的代表性产流模型有新安江模型、陕北模型和华南喀斯特产流模型。

从时段划分来看,近代水循环研究大致分为三个时期:一是水文数学模型的早期形式阶段(20世纪30年代初~50年代初),该时期代表性成果如谢尔曼的单位线理论、霍顿下渗曲线、Nash瞬时单位线和马斯京根方法等;二是水文模型研制阶段(50年代初~70年代中后期),在这一时期,系统模拟的概念和方法逐步被引入到水文过程研究后,计算机技术的飞速发展为其提供了强有力的实现手段,一大批现代水文数学模型涌现出来,1975年世界气象组织(WMO)从世界百余种模型中选出10种著名模型进行比较检验和评定,进一步推动了模型研制的深入;三是模型实时校正应用阶段(70年代中后期至今),这一阶段水文模型的发展主要集中在模型的实时(Real-time)校正方

面,以系统动态识别(参数自适应估计)和卡尔曼滤波(Kalman filterling wave)为典型代表方法。

从系统论的观点来看,水循环研究始于单一水文系统研究,并无能力考虑整个区域水循环过程,如地表水系统、地下水系统等研究;随着人们对系统间物质与能量交换认识的不断深化,区域水循环的研究突破了传统单一水文系统研究的局限,开始着眼于整个水循环过程,其发展过程大致经历了“三水转化-四水转化-SPAC系统-GSAPC系统研究”等阶段;在研究水循环的整体过程当中,人们发现水从一个系统向另外一个系统过渡的界面过程最能有效反应开放系统间的物质与能量交换信息,因此界面过程将成为水循环过程研究的关键问题(刘昌明,1993)。而今水循环研究的重点不仅在于系统间物质能量通过界面的传输,而且对于界面内部本身能量与物质的运移规律正逐渐引起人们的重视,如土壤与大气界面其植被体内的水分传输和能量的转移、地下水和地表水界面中土壤水运移规律的研究等。

(三) 现代研究

20世纪80年代以来,社会系统对于水循环过程中的兴利和减灾提出了更高要求,同时人类活动对于水循环的影响日益凸现,给流域水循环模拟带来许多新的课题与挑战。随着信息技术和计算技术进入快速发展,现代水循环研究主要集中在三方面系统展开:一是致力于实现水循环各分项过程的综合研究;二是重视人类活动对于水循环过程的影响的研究;三是充分引入和利用各类新技术,并采取有物理机制的分布式模拟方法。

随着信息获取和过程模拟技术的提高,将水循环的地面、土壤和地下过程,以及将水循环的地表和大气过程综合研究和考虑已逐渐成为可能,目前国内外相关典型的研究如将流域水文模型与全球气候模式(GCMs)或是区域气候模式(RCM)相耦合,以模拟温室效应对于流域水循环影响,如1998年日本启动的“地球前沿研究系统计划(FRONTIER)”中,第一阶段(1999~2003年)实施的“东亚水循环观测试验(JSOWSE)”观测的内容就包括海-陆-气相互作用的全过程,另外我国“九五”攻关项目中也专门开展了相关研究。

其次,随着人类活动进一步加剧,不断影响着水循环各个环节,在人类活动频繁、水循环通量较小的地区这种影响所带来的次生效应更是日益显著。目前,国内外围绕着这一重大科学命题开展了一系列研究计划,国际水文计划(IHP)在1990~1995年以及1996~2001年连续两期分别以“变化环境中水文和水资源的持续发展”以及“脆弱环境中水文和水资源的持续发展”为主题展开研究,其核心问题是人类活动为内在驱动的环境演变条件下的水资源持续利用问题,同时强调了水资源的科学管理。国内对此也开展了一系列重大研究,包括两期黄河水沙基金,重点对流域下垫面变化条件下的水资源演变规律的研究,2002年7月在北京香山召开了以“全球变化与中国水循环前沿科学问题”为主题的香山科学会议第187次学术讨论会,讨论的核心就是人类与自然二元驱动的水文循环,以及二元驱动影响下的水资源可再生性调控。

总的来说,自 20 世纪 80 年代以来,水循环研究表现出向着信息化、专业化和集成化三大方向的发展趋势。信息化方面,随着信息论学科的发展、计算机技术和 3S 技术的提高,将流域水循环模拟技术与地理信息系统 (GIS)、数字高程模型 (DEM) 和遥感、航测和雷达技术相结合,建设以流域水循环过程模拟为核心的数字化流域是当前水循环基础研究的重要方向;专业化方面,随着对于流域水循环和水资源开发利用机理与规律科学认知尺度的加深,在流域水循环和水资源的模拟、调控与管理方面的研究趋于更加专业化,如目前的水循环模拟已经开始从水分和能量两大循环过程的分布式模拟着手;集成化方面,当前水循环和水资源研究,已经不单就水论水,而是将“水-社会经济-生态环境”作为一个复杂的巨系统,综合研究水循环系统演变与社会经济和生态环境系统的互动关系,决策目标一方面考虑水资源可再生性的维护,另一方面对水资源的社会经济价值和生态环境价值进行统一权衡,以维护水资源的全属性功能。决策过程中,广泛应用了多目标群决策技术,大量基于规则和专家知识的决策支持系统被开发和投入使用。

第二节 人类活动影响下的流域水循环系统演变

随着社会生产力的发展,人类活动范围不断拓宽,活动深度不断加剧,不可避免地影响着流域天然水循环过程,在人类活动密集的区域甚至超过了自然作用力的影响,今后这种趋势将进一步延续甚至得到加强。科学估计人类活动对不同尺度水循环情势所产生的影响,已经成为水资源研究领域中的一个重要的研究方向。

一、人类活动对流域水循环影响分类

在人类活动对流域水循环影响方式的分类上,国内外学者也进行了有益的探索。有的学者从影响水循环过程的紧密程度出发将其分为直接影响和间接影响两大类,其中直接影响是指人类活动使区域水循环要素的量、质以及时空分布直接发生变化,如水库的修建、提引水工程、跨流域调水工程、排污泄污等都将直接使水循环系统结构和方式不断改变;间接影响是指人类活动改变了下垫面状况或是局部及整体气候,从而以间接方式影响水循环诸要素,如森林砍伐、土地利用、城市都市化、温室气体排放等(张虎,1991)。刘昌明院士从人类行为方式的角度出发,将人类活动分为与土地利用有关的人类活动和与影响气候变化有关的人类活动(刘昌明,1997)。另外还有依据影响尺度可以分为对微观水循环的影响和对宏观水循环的影响。

综合人类活动的影响种类以及国内外相关研究,人类活动对于流域水循环及水资源演变的类型基本可以分为三大类:

(一) 全球气候变化影响

目前,愈来愈多的观测和研究证明人类活动已经并且继续影响着大气中温室气体浓

度, 从而造成全球尺度的气候变化。人类活动对大气温室气体浓度的影响主要表现为两个方面: 一是直接向大气排放温室气体和大气气溶胶, 例如工业生产过程中的石化燃料燃烧和生物质燃烧直接向大气大量排放 CO_2 , CH_4 , N_2O , CFCs, 硫酸气溶胶以及一些小颗粒等; 二是人类活动改变了大气温室气体的源和汇, 例如森林砍伐直接减少了 CO_2 的汇, 农业活动改变了土地利用状况而增加大气 CH_4 和 N_2O 的源, 大气污染排放降低了 CH_4 的汇等^①。

经典物理和辐射物理能够准确地证明, 地球表面如果没有温室气体, 全球平均地表温度将比现在实际测到的全球地表平均温度低 33° 。一个正确而直接的推理是大气温室气体浓度增加将会使全球地表温度升高, 即通常所说的全球气候变暖。为了准确计算大气温室气体浓度增加引起的地表升温量, 在过去 30 多年里人们已进行了大量的研究, 所使用的工具是数值模拟。综合当今主要模式的结果, 有如下一些结论:

- 大气 CO_2 加倍, 平衡态气候变化为全球地表平均温度升高 $1.5\sim 3.5^\circ\text{C}$, 考虑到海洋的巨大作用, 如果人类不采取任何控制措施, 则 21 世纪全球地表温度变化速率将是 $0.1\sim 0.3^\circ\text{C}/10$ 年。用海-气耦合模式进行的温室气体浓度渐变实验也得到与此相同的结论。

- 最近几年来人们开始注意到, 人类活动造成大气气溶胶 (主要是硫酸气溶胶) 和大气小颗粒浓度上升, 将会使地表温度降低, 可部分抵销温室气体增加引起的温室效应。考虑到气溶胶的降温作用, 21 世纪人为活动造成的气温变化速率可能只有 $0.05\sim 0.2^\circ\text{C}/10$ 年。

不断增强的温室效应加速了大气循环过程, 包括水汽循环过程, 从而对全球和区域降水量及降水过程也带来一些影响, 根据 IPCC 最近的一次评价报告, 气候变化对于全球降水系统的潜在影响有如下结论:

- 降水的时间过程和区域态势将有所改变, 强降水日数可能增加。
- GCMs 模拟结果表明, 全球气温上升 $1\sim 3.5^\circ\text{C}$ 将导致全球降水增加 $3\%\sim 15\%$ 。
- 在多数地区, 洪水频率将可能增加。

面对种种确凿的证据, 人类活动引起全球气候变化已经成为人们普遍接受的事实, 而全球气候变化对流域水循环过程的影响也是确定的, 因此流域水资源转化和演变过程不再延续原有一元自然力驱动作用下的原生规律。正如世界银行代表在防治地球温室效应京都会议 (COP3) 上指出“现在的问题不是气候是否会变化”, 而是“什么时候、在哪里、如何变化, 以及这些变化将产生什么样的影响”。

概括来说, 温室效应对于流域水循环影响主要包括直接影响和间接影响两类, 具体包括以下几方面:

- 增强温室效应对于流域降水有一定的直接影响, 包括降水量、雨型、降水的年内分配和空间分布等多方面, 从而直接改变流域水循环的输入。如国家气候中心依据 IPCC 数据分发中心提供的 5 个全球海-气耦合模式, 考虑最新的全球排放情景 (SRES)

^① 王明星, 中国可持续发展研究会'98 第二次战略研讨会, 气候变化报告之二, 关于全球气候变暖问题的评述, 1998. 2。

的模拟结果,对黄河流域 21 世纪降水变化趋势进行预测,21 世纪的初期、中期和后期整个黄河流域区域平均的年平均降水都呈增加的趋势,其中四个季节中春季和冬季的降水增加幅度最大(徐影,2003)。

- 增强温室效应将导致流域气温出现不同幅度的升高,从而改变了流域能量输入和平衡过程,造成流域蒸发能力加大,可能导致河川径流量减少。如相关研究表明对于黄河流域,气温升高 1°C ,黄河径流量将减少 $3\%\sim 7\%$ (王国庆,2000)。

- 受降水和气温变化影响,流域地表覆被状况和社会经济需水情况也会发生相应变化,从而间接影响流域水循环过程。

需要指出的是,由于目前“全球变暖”问题在科学上的不确定性非常巨大,对于这种过程和结果的定量描述就更为困难,主要在三方面:

- 温室气体浓度变化预测的不确定性。到目前为止,世界上还没有做出关于未来温室气体浓度变化的有严格科学意义的“预测”。全球气候变化研究的依据是建立在一系列假定条件基础上的对未来温室气体浓度变化的一系列“推测方案”,而这些“设想方案”之间往往存在很大差别。严肃的科学家都强调指出,关于未来温室气体浓度变化的这些推测方案不是关于未来大气温室气体浓度变化的科学预测。

- 气候变化数值模拟的不确定性。目前对温室气体浓度变化引起的气候变化的预测主要靠数值模拟,现在世界上已经发展了几十个气候模式,特别是最近,已经出现了一些较好地海-气耦合模式,这些模式大都能较好地模拟当代气候。在给定未来 CO_2 浓度变化条件下,大多数模式给出的未来全球平均地表温度的变化是大约一致的,但不同模式给出的温度变化的区域分布差异很大,而且不同模式给出的降水变化之间差别更大,加上温室气体浓度预测的不确定性,使人们不仅怀疑模式结果的实用价值,而且产生了对当代气候模式正确性的怀疑。

- 气候变化的影响评价体系的不确定性。到目前为止,对于气候变化影响的评价还没有形成统一客观的科学评价体系,在建立与气候模式耦合的水文模型来模拟气候变化对流域水资源影响方面就遇到多种障碍,加上气候变化预测结果的巨大不确定性,因此气候变化对于流域水循环以及水资源影响的定量分析始终难以纳入到流域规划范畴当中。

(二) 下垫面变化影响

下垫面(underlayer)是水文学专业术语之一,一般意义的下垫面是指地表各类覆盖物所组成的,并能影响水量平衡及水文过程的一个综合体,包括地表面的岩石、土壤、植被和水域等各种要素。影响流域地表水循环过程的下垫面要素包括地质、地貌、覆被和人为建筑物等四类,其中地质类要素指地表覆盖物中的各类岩石、土壤、地层、构造和各类水体等,主要影响水循环的下渗率、蒸发量、流域蓄水量、地表地下水的转换;地貌类因素对水循环的影响体现在区域绝对高度对降雨的影响、地面坡度对汇流的影响等方面;覆被对水循环过程的影响是多方面的,包括截流、下渗、蓄水、蒸散发等;而人为建筑物包括各类房屋、道路、场院、水库、梯田等,它改变了原有下垫面水

文特性,如原有岩性、地面坡度、植被等的改变,原有水文界限的改变等许多方面。

为系统深入刻画人类活动对流域水循环过程的影响,在此从产流机制统一化理论出发,对流域下垫面的涵义进行有效的拓展。产流机制统一理论认为,无论是超渗地表径流、饱和地面径流,还是地下径流、壤中流,任何一种径流成分都是在两种不同透水性介质的界面上产生的,而且上层介质的透水性必须好于下层介质的透水性(芮孝芳,1991)。如大气层可以认为是绝对透水的,因此它和包气带的界面(即地面)就具备了产流的条件,这就是超渗地面径流产生的基本条件;在包气带内部,当存在两种不同透水性土壤的界面,较强透水性的土壤位于界面以上时,就提供了壤中流产生的基本条件。如果包气带相对不透水面上形成的临时饱和带逐渐发展到地面,地面成为大气层与包气带的界面,就成为饱和地面径流产生的基本条件,即蓄满产流机制(芮孝芳,1996)。

基于上述产流机制统一化理论,我们可以将仅仅影响地表产汇流的下垫面外延进行有效拓展为能够影响地表径流、壤中流和地下径流的连续有效界面,即广义下垫面的概念。不难发现,人类活动对于下垫面的作用与改变是全方位的,具体表现在:

- 对于传统的四类下垫面(即大气层与包气带的界面)中,地质类要素受人类影响的主要是水体,如地表水体开发(补充)和人工水体湖泊(水库)的修建等;对于地貌类要素,人类活动可能会在对局部地貌进行改造,如坡改梯、地形平整等;覆被变化是下垫面变化的最重要的因子,包括土地利用的变化、水土保持工程、荒漠化、森林砍伐和过渡放牧等;人为建筑物改变包括城市化面积的扩大、道路渠系和水库的修建、梯田的改造等。

- 人类活动对于包气带不同土壤介质界面的改变相对较弱,影响壤中流的形成和汇集最主要的途径就是农田耕作,切断了壤中流的汇集路径,从而加大了包气带的持水能力。

- 对于包气带与饱和带的界面(即地下径流产生的下垫面)来说,人类活动最主要的影响是通过地下水的开采(或回补)、地表水的拦蓄和利用、土壤持水能力的加大等手段,不断改变(主要是降低)饱和带的水位高程,从而影响地下径流的形成和运移。

以上因人类活动导致的下垫面变化对于流域水循环过程影响是全面而深刻的,不仅改变了流域水循环中的地面流、壤中流和地下径流等各径流成分比例与径流量,而且全面改变了流域水循环的产流特性、汇流特性、蒸散发特性,甚至局地的降雨特性,因此对于因人类活动引起的下垫面变化对于流域水循环过程影响的定量研究成为现代水文学和水资源学研究的一个重点方向。

(三) 人工取用水影响

人工取用水包括区域内取用水和跨区域调水两类,它对于流域水循环过程的影响主要包括两方面:其一,由于社会经济取用水量较大,人们通常都要利用相应的工程来实现水资源的取用异地问题,因此取水、输水、用水以及排水工程不可避免地改变着天然

流域水循环过程、规律和相关特性,这一部分影响可纳入到下垫面变化影响中考虑;其二,水资源开发利用在天然水循环的大框架内,形成了由“取水—输水—用水—退水”为基本过程的人工侧支水循环圈,改变了流域四水转化的天然水循环过程,从而使得流域水循环具有明显的“二元”结构(图 1-3)。流域二元水循环结构的形成对于流域水循环过程的影响是显而易见的,首先人工侧支水循环通量与河道主循环通量存在此消彼涨的动态互补关系,人工取耗水量的增加直接导致下游断面实测径流量的减少,甚至有可能改变江河湖泊联系;其次人类“取水—输水—用水—排水”过程中产生的蒸发渗漏,改变了天然条件下的地表水和地下水转化路径,给流域水循环过程中各环节项带来了相应的附加项,从而影响了流域水循环转化过程和要素量。

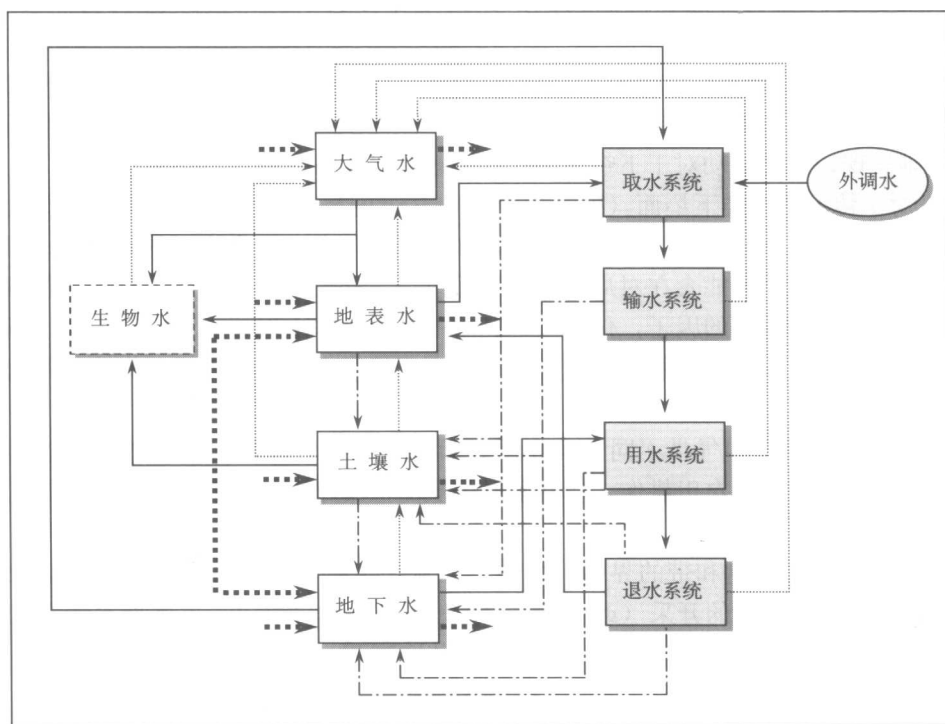


图 1-3 二元水循环结构示意图



跨流域调水对于流域水循环影响较为明显,它除不与本流域河道主循环通量上发生此消彼涨的互补关系,其中水量调入直接补给本流域,“输水—用水—排水”对本流域水循环有着直接影响,调出则属于净扣除项,“取水—输水”过程对本流域水循环有着直接影响。