

“十二五”国家重点图书出版规划项目



海河流域水循环演变机理与水资源高效利用丛书

流域水循环及其 伴生过程综合模拟

(第二版)

贾仰文 王浩等著



科学出版社

“十二五”国家重点图书出版规划项目



海河流域水循环演变机理与水资源高效利用丛书

流域水循环及其 伴生过程综合模拟

(第二版)

贾仰文 王浩 等著



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书介绍了流域水循环及其伴生过程综合模拟的原理、方法及应用。全书分上、下两篇,共由16章构成。上篇叙述了原理与方法,包括研究背景、目的与意义,二元水循环模型的总体结构,水循环过程、水环境过程和水生态过程的模拟方法,流域水资源调控与多目标决策方法,以及二元水循环模型的耦合与集成;下篇为海河流域应用,包括海河流域概况,基础信息采集与时空展布,水循环过程、水环境过程和水生态过程的模拟与验证,水循环及其伴生过程的历史演变分析、未来演变情景预估分析,水资源管理战略讨论,以及研究成果总结与展望。

本书可供水文、水资源及水环境等相关领域的科研人员、大学教师 and 研究生,以及从事流域水文分析、水资源与水环境规划及管理工作的技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

流域水循环及其伴生过程综合模拟 / 贾仰文等著. —2版. —北京: 科学出版社, 2014.6

(海河流域水循环演变机理与水资源高效利用丛书)

“十二五”国家重点图书出版规划项目

ISBN 978-7-03-039570-2

I. 流… II. 贾… III. 海河流域—水循环—流域模型—研究 IV. P339

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第011869号

责任编辑: 李 敏 张 菊 张 震 / 责任校对: 张小霞

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>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2012年1月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2014年6月第 二 版 印张: 23 1/2 插页: 2

2014年6月第一次印刷 字数: 700 000

定价: 120.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

《流域水循环及其伴生过程综合模拟》

主要撰写人员

贾仰文 王 浩 周祖昊 仇亚琴 牛存稳

雷晓辉 陆垂裕 杨贵羽 肖伟华 罗翔宇

游进军 甘治国 丁相毅 彭 辉 申宿慧

秦昌波 高 辉 郝春沔 王喜峰 王 康

总 序

流域水循环是水资源形成、演化的客观基础，也是水环境与生态系统演化的主导驱动因子。水资源问题不论其表现形式如何，都可以归结为流域水循环分项过程或其伴生过程演变导致的失衡问题；为解决水资源问题开展的各类水事活动，本质上均是针对流域“自然-社会”二元水循环分项或其伴生过程实施的基于目标导向的人工调控行为。现代环境下，受人类活动和气候变化的综合作用与影响，流域水循环朝着更加剧烈和复杂的方向演变，致使许多国家和地区面临着更加突出的水短缺、水污染和生态退化问题。揭示变化环境下的流域水循环演变机理并发现演变规律，寻找以水资源高效利用为核心的水循环多维均衡调控路径，是解决复杂水资源问题的科学基础，也是当前水文、水资源领域重大的前沿基础科学命题。

受人口规模、经济社会发展压力和水资源本底条件的影响，中国是世界上水循环演变最剧烈、水资源问题最突出的国家之一，其中又以海河流域最为严重和典型。海河流域人均径流性水资源居全国十大一级流域之末，流域内人口稠密、生产发达，经济社会需水模数居全国前列，流域水资源衰减问题十分突出，不同行业用水竞争激烈，环境容量与排污量矛盾尖锐，水资源短缺、水环境污染和水生态退化问题极其严重。为建立人类活动干扰下的流域水循环演化基础认知模式，揭示流域水循环及其伴生过程演变机理与规律，从而为流域治水和生态环境保护实践提供基础科技支撑，2006年科学技术部批准设立了国家重点基础研究发展计划（973计划）项目“海河流域水循环演变机理与水资源高效利用”（编号：2006CB403400）。项目下设8个课题，力图建立起人类活动密集缺水流域二元水循环演化的基础理论，认知流域水循环及其伴生的水化学、水生态过程演化的机理，构建流域水循环及其伴生过程的综合模型系统，揭示流域水资源、水生态与水环境演变的客观规律，继而在科学评价流域资源利用效率的基础上，提出城市和农业水资源高效利用与流域水循环整体调控的标准与模式，为强人类活动严重缺水流域的水循环演变认知与调控奠定科学基础，增强中国缺水地区水安全保障的基础科学支持能力。

通过5年的联合攻关，项目取得了6方面的主要成果：一是揭示了强人类活动影响下的流域水循环与水资源演变机理；二是辨析了与水循环伴生的流域水化学与生态过程演化

的原理和驱动机制；三是创新形成了流域“自然-社会”二元水循环及其伴生过程的综合模拟与预测技术；四是发现了变化环境下的海河流域水资源与生态环境演化规律；五是明晰了海河流域多尺度城市与农业高效用水的机理与路径；六是构建了海河流域水循环多维临界整体调控理论、阈值与模式。项目在2010年顺利通过科学技术部的验收，且在同批验收的资源环境领域973计划项目中位居前列。目前该项目的部分成果已获得了多项省部级科技进步奖一等奖。总体来看，在项目实施过程中和项目完成后的近一年时间内，许多成果已经在国家和地方重大治水实践中得到了很好的应用，为流域水资源管理与生态环境治理提供了基础支撑，所蕴藏的生态环境和经济社会效益开始逐步显露；同时项目的实施在促进中国水循环模拟与调控基础研究的发展以及提升中国水科学研究的国际地位等方面也发挥了重要的作用和积极的影响。

本项目部分研究成果已通过科技论文的形式进行了一定程度的传播，为将项目研究成果进行全面、系统和集中展示，项目专家组决定以各个课题为单元，将取得的主要成果集结成为丛书，陆续出版，以更好地实现研究成果和科学知识的社会共享，同时也期望能够得到来自各方的指正和交流。

最后特别要说的是，本项目从设立到实施，得到了科学技术部、水利部等有关部门以及众多不同领域专家的悉心关怀和大力支持，项目所取得的每一点进展、每一项成果与之都是密不可分的，借此机会向给予我们诸多帮助的部门和专家表达最诚挚的感谢。

是为序。

海河973计划项目首席科学家
流域水循环模拟与调控国家重点实验室主任
中国工程院院士



2011年10月10日

序

水是生命之源，生产之要，生态之基。随着人口的快速增长和经济社会的不断发展，流域自然水循环通量日益减小，社会水循环通量不断增大，引发了一系列资源、环境与生态问题。只有科学揭示人类活动对水循环及其伴生过程的影响机制，对其进行调控，才能促进资源、环境、生态和经济社会的协调发展。

流域水循环及其水环境、生态等伴生过程研究，受到国内外学者的广泛重视，但尚存在以下不足：流域自然水循环研究较为系统，但“自然-社会”二元水循环研究很少；变化环境下流域水循环与水资源演变规律及其归因分析研究尚待加强；从流域水循环角度进行的流域水环境与生态过程研究不够。

海河流域是我国北方最为典型的高强度人类活动区域。近年来，河川径流大幅减少，地下水超采严重，河流水质恶化，湿地面积萎缩。为诊断和解决海河流域水资源、水环境和生态问题，国家重点基础研究发展计划（973 计划）项目“海河流域水循环演变机理与水资源高效利用”中设立了由王浩院士主持的第四课题“海河流域水循环及其伴生过程的综合模拟与预测”，以求系统揭示变化环境下海河流域的水循环演变规律，并预测未来演变趋势，为流域水资源和水环境规划与管理提供科技支撑。

该课题组通过五年的联合攻关，在理论、方法和应用上都取得了重大突破。一是集成分布式水循环模型、水资源配置模型和多目标决策分析模型，并耦合气候模式，构建了高强度人类活动干扰下流域“自然-人工”二元水循环模型，有力推动了流域二元水循环理论与方法的发展；二是集成流域二元水循环模型、水质模型及生态模型，构建了流域水循环及其伴生过程综合模拟与预测平台，在研究大尺度的水循环、水环境和生态过程的数值模拟技术方面具有重大突破，为海河流域水资源、水环境和生态的综合调控提供了科学分析工具；三是系统分析了海河流域水资源及水环境、生态过程的演变规律，并基于指纹分析方法对流域水资源演变进行了系统的归因分析，具有重要的应用价值；四是定量预测了海河流域未来水资源及水环境、生态过程的演变趋势，为海河流域综合治理提供了有力的支撑。

我非常高兴地获悉，该课题相关成果已获 2012 年大禹水利科学技术奖一等奖。基于该课题研究的这一专著系统总结了所取得的创新性成果。相信该书显示的活跃学术思想和高水平的研究成果，将为推动水文水资源、水环境和生态及相关领域的研究发挥重要的作用。

是为序。



2013 年 5 月 15 日

前 言

随着人口增长和经济社会的发展,人类活动对流域水循环系统的影响不断增强,而全球气候变暖又使未来流域水资源的不确定性增加、干旱与洪涝出现的概率增大。土地利用变化、工业与城市发展、大规模水利工程建设等,已将许多流域的水循环从原来的“自然”模式逐渐转变为“自然-社会”(或“自然-人工”)二元耦合模式。流域水循环的“自然-社会”二元演化,使得地表径流、地下径流和河川径流等自然水循环通量日益减小,而取水量、用水量、耗水量及排污量等社会水循环通量不断增大,严重影响了流域水循环系统的水资源、水环境和水生态服务功能,引发了一系列的资源、环境与生态问题。同时,资源、环境与生态效应又反过来制约人类活动,对流域水循环过程形成反馈,因此,流域水循环过程与水生态及水环境过程存在相互作用关系。开展流域二元水循环模型研究,为水资源与水环境规划与管理实践提供科技支撑,对保护河流和地下水系统健康、实现水资源可持续利用、促进区域经济社会与生态环境的和谐发展具有十分重要的理论意义与应用价值。

近年来,流域水循环及其水生态、水环境等伴生过程研究受到国内外水文、水资源及相关领域学者的重视,特别是分布式水文模型、陆面水循环过程模型,从20世纪80年代以来得到很大发展及应用。但这些模型的优势是对自然水循环过程进行模拟,本身没有水资源的配置调度功能,在模拟社会(人工)水循环过程方面受到限制。水资源配置模型近年也得到广泛研究与应用,其优势在于对水资源的供需平衡和水库调度进行分析,但研究内容仅限于径流性水资源,缺少对包括蒸发、蒸腾在内的水循环全要素的平衡分析。而多目标决策分析模型的优点是将水资源分配与宏观经济和产业结构密切关联,但分析时空尺度往往过大,不能对小区域及河道断面的水循环过程进行调控分析。因此,需要将三类模型耦合起来,这样才能实现统筹考虑水资源、宏观经济与生态环境的流域水资源综合管理分析的功能。

海河流域面积为31.8万 km^2 ,涉及北京、天津、河北、河南、山东、山西、辽宁、内蒙古8个省(自治区、直辖市),2005年其人口、GDP和粮食产量分别占全国的10.2%、14.1%和9.9%,在国内各大流域中属于经济比较发达的流域。然而,海河流域也是我国最缺水的地区之一,自20世纪80年代以来,除了当地地表水的过度利用、地下水超采外,还每年从黄河引水约40亿 m^3 ,水污染及水生态问题也十分突出。受强烈人

类活动影响,海河流域水循环已呈现出明显的“自然-社会”二元特性,因此需要研究流域二元水循环机理与模拟方法,建立一个能够反映流域二元水循环特性的模型工具,用来诊断流域水资源的关键问题并对各种情景进行分析,为制定水资源管理战略提供支撑。

在国家重点基础研究发展计划(973计划)项目“海河流域水循环演变机理与水资源高效利用”第四课题“海河流域水循环及其伴生过程的综合模拟与预测”(2006CB403404)、全球环境基金(GEF)海河项目“知识管理(KM)流域级应用系统”(HW7-17)、国家自然科学基金创新研究群体基金项目“流域水循环模拟与调控”(51021006)和国家水体污染控制与治理科技重大专项课题(2008ZX07209-009)等的资助下,我们开展了流域二元水循环及其伴生过程的综合模拟研究探索,本书是对已取得的阶段研究成果的总结。流域二元水循环模型由分布式流域水循环及其伴生过程(水环境过程、水生态过程)模拟模型WEP-L、水资源合理配置模型ROWAS和多目标决策分析模型DAMOS三个模型耦合而成。该模型被定为GEF海河水资源水环境综合管理项目的核心模型,并支撑了八项战略研究(SS)、战略行动计划(SAP)制定与知识管理(KM)平台建设。

本书分上、下两篇,共由16章构成。上篇叙述原理与方法,包括第1~7章;下篇为海河流域应用,包括第8~16章。前言、第1章和第2章由贾仰文和王浩执笔,第3章由贾仰文、周祖昊、陆垂裕和丁相毅执笔,第4章由牛存稳、肖伟华和贾仰文执笔,第5章由彭辉和贾仰文执笔,第6章由游进军和甘治国执笔,第7章由雷晓辉执笔,第8章由杨贵羽、郝春沅和贾仰文执笔,第9章由周祖昊、罗翔宇、郝春沅和王康执笔,第10章由仇亚琴、雷晓辉、贾仰文、陆垂裕和秦昌波执笔,第11章由牛存稳、肖伟华、高辉和王喜峰执笔,第12章由彭辉、申宿慧和贾仰文执笔,第13章由仇亚琴、牛存稳、丁相毅和贾仰文执笔,第14章由杨贵羽、仇亚琴、牛存稳、彭辉和贾仰文执笔,第15章由贾仰文、游进军、杨贵羽和牛存稳执笔,第16章由贾仰文和王浩执笔。全书由贾仰文统稿。

在项目的完成和本书的写作过程中,得到科学技术部、水利部、环境保护部、海河水利委员会、河北省水利厅以及世界银行等有关单位的大力支持和帮助。刘昌明、陈志恺、郑春苗、高歌、许新宜、任光照、翁文斌、韩振中、王忠静、李彦东、董汉生、张希三、刘钰、徐宗学、刘斌、夏青、吴舜泽、余向勇、李蓓、张晓岚、蒋礼平、Douglas Olson、Peter Droogers、Richard Evans、Wim Bastiaanssen、Tim Bondelid、Edwin Ongley、Kuniyoshi Takeuchi、Nobuyuki Tamai、P. E. O'Connell等国内外知名专家,对本研究给予了许多指导与帮助。

受时间和作者水平所限,书中不足之处在所难免,恳请读者批评指正。

作者

2013年6月于北京

目 录

总序
序
前言

上篇 原理与方法

第1章 概述	3
1.1 研究背景与意义	3
1.1.1 流域水循环的“自然-社会”二元特征及其效应	3
1.1.2 研究意义	3
1.1.3 关键科学问题	4
1.2 国内外研究动态与趋势	4
1.2.1 变化环境下的水循环机理和演变规律研究	4
1.2.2 基于物理机制的分布式流域水文模型研究	5
1.2.3 水循环过程与水生态及水环境演变相互作用机制研究	6
1.2.4 大气过程-陆地水文过程耦合研究	6
1.2.5 社会水循环研究	7
1.3 研究目标	7
第2章 流域二元水循环模型总体结构	9
2.1 模型总体结构及功能	9
2.1.1 模型总体结构	9
2.1.2 模型功能	10
2.2 各模型简介	10
2.2.1 分布式流域水循环及其伴生过程模拟模型（WEP-L）	10
2.2.2 多目标决策分析模型（DAMOS）	11
2.2.3 水资源配置模型（ROWAS）	14

第3章 流域水循环过程模拟方法	16
3.1 大气过程模拟	16
3.1.1 大气环流模式（GCM）	17
3.1.2 海气耦合模式	20
3.1.3 陆面过程模式	21
3.1.4 区域气候模式	22
3.1.5 降尺度方法	23
3.2 陆地水循环过程模拟	24
3.2.1 蒸发蒸腾	24
3.2.2 入渗	27
3.2.3 地表径流	28
3.2.4 壤中径流	30
3.2.5 地下水运动、地下水流出和地下水溢出	30
3.2.6 坡面汇流和河道汇流	31
3.2.7 积雪融雪过程	32
3.2.8 空气动力学阻抗与植被群落阻抗	33
3.2.9 土壤水分吸力关系与非饱和导水系数	34
3.3 陆地能量循环过程模拟	34
3.3.1 地表能量平衡方程	34
3.3.2 短波放射	35
3.3.3 长波放射	36
3.3.4 潜热通量	37
3.3.5 显热通量	38
3.3.6 地中热通量	38
3.3.7 人工热排出量	38
3.4 平原区地下水数值模拟	38
3.4.1 潜水	39
3.4.2 承压水	39
3.4.3 模型数值求解	40
第4章 流域水环境过程模拟方法	42
4.1 污染量的估算	42

4.1.1	点源污染量的估算	42
4.1.2	非点源污染量的估算	44
4.2	基于水动力学的河湖水系水质模拟	46
4.2.1	河湖环境系统模拟基本方程	46
4.2.2	数值求解与联解	47
4.3	基于物质平衡原理的流域水质模拟	61
4.3.1	流域水质模型的基本要求	61
4.3.2	污染物入河量的估算	62
4.3.3	流域水质模型的实现	64
4.4	平原区地下水水质模拟	70
4.4.1	地下水溶质迁移转化方程	71
4.4.2	数值法求解	71
第5章	流域水生态过程模拟方法	72
5.1	概述	72
5.2	陆地生态水文模拟	72
5.2.1	BIOME-BGC 植被生态模型	72
5.2.2	植被生态模型与水文模型的耦合	80
5.3	作物生长模拟	81
5.3.1	WOFOST 作物生长模型	82
5.3.2	分布式作物生长模拟	84
第6章	流域水资源调控与多目标决策	87
6.1	水资源调控原则	87
6.2	多目标决策方法	87
6.2.1	主要原理	88
6.2.2	主要模块描述	88
6.2.3	多目标决策方法	94
6.3	水资源配置方法	97
6.3.1	水资源配置的概念	97
6.3.2	水资源配置的方法	97
6.3.3	水资源配置结果的评价	99

6.3.4 ROWAS 模型基本构架	100
第7章 流域水循环及其伴生过程综合模拟系统集成	103
7.1 二元水循环模型耦合关系	103
7.2 综合模拟系统集成	106
7.2.1 系统总体构架	106
7.2.2 系统的特点	107
7.2.3 关键技术	107
7.3 系统界面与功能	110
7.3.1 通用数据管理界面	110
7.3.2 系统界面及主要菜单	113
7.3.3 系统的创新点	122

下篇 海河流域应用

第8章 海河流域概况	125
8.1 自然地理与水文气象	125
8.2 高强度人类活动特点	125
8.3 主要水问题	128
第9章 基础信息采集与时空展布	131
9.1 基础信息分类与采集	131
9.1.1 信息分类	131
9.1.2 采集信息描述	131
9.2 计算单元划分	140
9.2.1 划分考虑因素	140
9.2.2 计算单元划分	141
9.3 水文气象信息时空展布	143
9.3.1 气象要素时空展布方法	143
9.3.2 降水插值结果	145
9.3.3 其他气象要素插值结果	146

9.4	土壤水动力学参数	147
9.5	社会经济信息时空展布	151
9.5.1	人口数据时间空间化	152
9.5.2	GDP 数据时间空间化	155
9.5.3	畜禽养殖量时间空间展布	157
9.6	用水信息时空展布	157
9.6.1	生活用水的时空展布	158
9.6.2	工业用水的时空展布	158
9.6.3	农业用水的时空展布	158
9.6.4	用水数据展布结果示例	161
9.7	水污染信息时空展布	165
第 10 章	水循环模拟与验证	168
10.1	参数敏感性分析与参数优化	168
10.1.1	模型优化参数	168
10.1.2	LH-OAT 全局参数敏感性分析方法在宽城以上流域的应用	169
10.1.3	SCE-UA 全局参数优化方法在宽城以上流域的应用	171
10.2	河道径流模拟验证	172
10.2.1	采用参数优化法对河道径流模拟结果的验证	172
10.2.2	采用试错法对河道径流模拟结果的验证	175
10.3	地下水模拟验证	177
10.3.1	研究区含水层组情况	178
10.3.2	含水层组的发育程度	179
10.3.3	地下水位动态特征	180
10.3.4	海河流域地下水系统	181
10.3.5	地下水系统补给、径流和排泄	182
10.3.6	海河平原地下水模型构建	183
10.4	基于遥感 ET 的数据同化	187
10.4.1	数据同化	187
10.4.2	遥感反演 ET 算法——SEBS	188
10.4.3	数据同化算法	189
10.4.4	数据同化结果分析	191

10.4.5 小结	193
第 11 章 水环境模拟与验证	194
11.1 流域水质模型验证与应用	194
11.1.1 污染源估算	194
11.1.2 水质模型校核与验证	195
11.2 河湖水动力学水质模型验证与应用	198
11.2.1 滦河流域概况	199
11.2.2 基础数据准备	201
11.2.3 模型的验证	201
11.2.4 模型的应用	205
11.3 流域地下水质模型	209
11.3.1 模型构建	209
11.3.2 模型率定	211
第 12 章 水生态模拟与验证	219
12.1 陆地生态水文模拟与验证	219
12.1.1 模型输入数据与参数	219
12.1.2 模拟结果验证	221
12.2 作物生长模型模拟与验证	222
12.2.1 冬小麦田间试验研究方法	222
12.2.2 模型参数调整方法与步骤	224
12.2.3 作物生长参数敏感性分析	225
12.2.4 模型参数率定	225
12.2.5 模型参数验证	227
12.2.6 流域模拟输入数据的整理	228
12.2.7 流域模拟结果验证	229
12.2.8 流域模拟结果分析	230
第 13 章 海河流域水循环及其伴生过程历史演变分析	233
13.1 水循环要素演变检测及下垫面变化分析	233
13.1.1 水循环要素演变检测	233

13.1.2	下垫面演变分析	244
13.1.3	社会经济与用水发展分析	246
13.2	流域水资源评价与演变规律	246
13.2.1	水资源评价	246
13.2.2	水资源演变驱动因子分析	247
13.2.3	水资源演变规律	249
13.3	流域水循环及水资源演变归因分析	257
13.3.1	基于指纹的归因方法	258
13.3.2	归因情景设置	258
13.3.3	海河流域水循环要素演变的归因分析	260
13.3.4	海河流域狭义水资源量演变的归因分析	266
13.4	流域水环境演变规律	269
13.4.1	海河流域水污染现状	269
13.4.2	海河流域污染源排放情况分析	270
13.4.3	海河流域地表水环境演变规律	276
13.4.4	海河流域地下水环境演变规律	280
13.5	流域生态演变规律	281
13.5.1	农业生态演变规律	281
13.5.2	自然植被生态演变规律	284
第 14 章	海河流域水循环及其伴生过程未来演变情景分析	288
14.1	气候变化预估	288
14.2	海河流域水循环与水资源演变预估	295
14.2.1	情景设定	295
14.2.2	水量调控下的水循环及水资源演变预估	299
14.2.3	气候变化下的水循环及水资源演变预估	306
14.3	海河流域水环境演变预估	308
14.3.1	未来水平年水环境承载能力预估	308
14.3.2	未来水平年水污染控制方案下水环境分析	311
14.3.3	未来水平年水污染控制方案	315
14.4	海河流域生态演变预估	316
14.4.1	作物生长演变预估	316