

“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

面向对象模块化的水文模拟模型 ——MODCYCLE设计与应用

陆垂裕 王浩 王建华 肖伟华 等著



科学出版社

国家重点基础研究发展计划 (973计划) 项目 (2006CB403401)

国家自然科学基金创新研究群体基金项目 (50721006)

国家自然科学基金课题 (50809076)

资助

中国工程院重大咨询项目 (2012-ZD-13-6)

国家科技支撑计划课题 (2006BAB04A15)

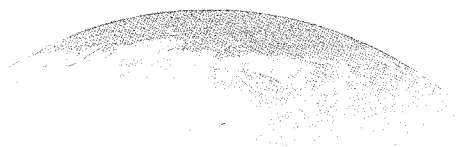


国家出版基金项目
NATIONAL PUBLISHING FOUNDATION

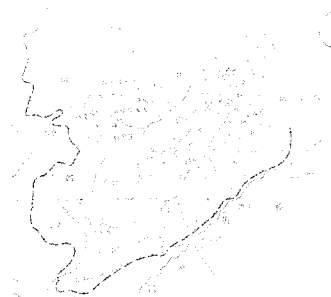


海河流域水循环演变机理与水资源高效利用丛书

面向对象模块化的水文模拟模型 ——MODCYCLE设计与应用



陆垂裕 王浩 王建华 肖伟华 等著



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书介绍了面向对象模块化的水文模拟模型 MODCYCLE 的相关内容。该模型可详细反演流域/区域“四水转化”过程并具有较强的物理机制,能考虑多种人类活动对水循环的影响。在架构上该模型采用面向对象的方式模块化开发,并以数据库作为模型的数据管理平台,提高了模型功能扩展的灵活性和组织数据的高效性,还具有并行运算,地表-地下水联合模拟等功能特色。该模型在适应高强度人类活动影响下的流域水循环模拟方面具有一定优势,目前已在海河流域不同尺度单元上开展了多个实例模拟研究应用,并取得了较好的应用效果。

本书可供水文、水资源等相关领域的科研人员、管理人员及相关专业院校师生,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

面向对象模块化的水文模拟模型: MODCYCLE 设计与应用 / 陆垂裕等著.
—北京: 科学出版社, 2016. 1

(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 978-7-03-045572-7

I. 面… II. 陆… III. 海河-流域-水文模拟-水文模型 IV. P334

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 207524 号

责任编辑: 李 敏 吕彩霞 / 责任校对: 钟 洋

责任印制: 肖 兴 / 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

*

2016 年 1 月第 1 版 开本: 787×1092 1/16

2016 年 1 月第一次印刷 印张: 15 1/4 插页: 2

字数: 510 000

定价: 128.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

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

在气候变化和人类活动的干扰下,现代水循环在循环结构、循环路径、循环参数等方面越来越明显地表现出二元特性,原来考虑坡面产汇流过程和河道演算的水文模型已不能完整地描述这些地区的水文循环过程,深入研究和考虑水分在流域中的各种循环转化,以及人类活动影响在模型中的表达成为模型发展的必然需求。此外,随着地理信息系统和遥感等技术的发展,以及水文科学逐渐与环境、生态、气象等学科的深度交叉融合等,水文模型正涉及越来越海量的数据信息管理,面临不断增长的模拟功能扩展和运行效率问题,这些均对水文模型的开发提出了更高的要求。

在973计划课题“海河流域二元水循环模式与水资源演变机理”(2006CB403401)等项目的支持下,课题组开发的MODCYCLE (An ObjectOriented Modularized Model for Basin Scale Water Cycle Simulation)模型为适应这种发展趋势而建立的一个分布式水文模型。在模型原理方面,该模型定位于长时间尺度的流域/区域水量平衡分析,详细刻画了流域/区域“四水转化”过程并具有较强的物理机制,并能考虑多种人类活动对水循环的影响,能够适应复杂的水文模拟条件。在模型架构设计方面,为提高模型功能扩展的灵活性和模型数据组织的高效性,该模型以C++为基础,通过面向对象(object-oriented-programming, OOP)的方式进行了模块化开发,并以数据库作为模型的数据管理平台;在模型运行效率方面,利用面向对象模块化良好的数据分离/保护及模型的内在模拟机制,该模型还实现了水文模拟的并行运算,大幅提高了模型的计算速度。此外该模型还具有较为完善的水量平衡校验机制,可为用户和模型开发者使用和开发提供便利。该模型自研制以来,已经在海河流域不同尺度单元开展了多个实例模拟研究应用,并取得了较好的应用效果,验证了该模型工具的实用性。

相信该书的出版,将推动流域分布式水文模型的发展。希望课题组在今后的开发应用过程中,进一步完善模型和计算软件,为解决更多地区和流域的水与生态环境问题提供技术支撑服务。

中国工程院院士

张健云

2015年8月

前 言

从20世纪50年代到目前,水文模型的发展已历时半个多世纪。早期水文模型的主要研究目标是模拟流域尺度水循环的地表径流过程,产/汇流机制是水文模型的精髓。在模型的模拟要素上,主要是洪峰流量和洪水过程线,应用层面多在于防洪设计和防洪调度。由于洪水发生过程具有短时间内发生和间断性特征,而且与降雨强度的联系较大,早期水文模型多以模拟短时期(洪水期)的水文过程为主。在模拟的时间步长上,一般都需要日内甚至分钟级的时间步长,以匹配暴雨在时间频率和分布上的强烈变化。

近年来,水资源可持续理念的深入和强化,以及人类活动干预的逐渐增强导致流域水资源数量的显著衰减和水资源质量的持续恶化,人们逐渐从关心洪水过程转向关心水资源的形成、利用与管理的问题上。近年来,人类活动干扰对水循环的影响、变化环境下的水循环/水环境演变等新学科命题成为当今水科学界的重大研究方向。水文模型也从初期产/汇流模拟预报逐渐发展成为兼顾各种微观水文过程的丰满体系,并形成与环境、生态、气象等学科领域的深度交叉融合。后期发展的一些水文模型,如SWAT、WEP等,其模型理念已经逐步脱离了传统水文模型研究产-汇流机制为主的框架,转向重点研究流域或区域不同形态和介质中水分的循环转化机制。虽然这类模型仍源自水文模型,但水循环研究的味道在模型中体现得越来越浓厚。可以把这类模型称为以水循环模拟为主的水文模型或水循环模型。由于研究目的与早期的水文模型有显著差异,水循环模型在模拟时期上拓展到了长时期多年尺度,模拟时间步长上也多以日尺度为主。在水循环过程的模拟上,虽然产-汇流机制仍是模型的重要方面,但其他过程如蒸发蒸腾机制、土壤水-地下水的转化、积雪-融雪过程、作物生长作用等过程在模型中的整合和刻画也越来越细致,注重的是水循环系统内部各分项过程相互作用的整体效果。另外,人类活动如作物种植、收割、土地翻耕、人工灌溉、水库蓄滞、河道-水库间调水、人工退水等在传统水文模型中很难刻画的过程,在水循环模型中却得到了长足的发展。由于水循环模型在时间尺度上的扩展,模拟具体洪水过程时的精度会产生一些损失,但其突出优势是可以对流域长时间尺度的水量平衡状况进行系统性的评价。更符合实际的物理机制和人类活动等因素的考虑,则可以使研究者审视流域水循环的整体过程及水循环系统内部的相互联系,以及人类大规模水土资源开发利用情况下的流域水循环系统响应。这些新的发展为当前研究人类活动对水循环的影

响这一水文/水资源学科的重要专题提供了强大的分析工具。

在 973 计划项目“海河流域水循环演变机理与水资源高效利用”第一课题“海河流域二元水循环模式与水资源演变机理”(2006CB403401)、国家自然科学基金创新研究群体基金项目“流域水循环模拟与控制”(50721006)、国家自然科学基金课题“南方平原地区水资源高效利用调控模式与评价体系研究”(50809076)、国家科技支撑计划课题“南水北调工程若干关键技术研究与应用”(2006BAB04A15)等项目的资助下,笔者从水文水资源学科的前沿研究动态出发,对流域水文模型当前的研究进展进行了归纳与总结,并以中国水利水电科学研究院自主研发的水循环模拟模型 MODCYCLE 的开发应用为例,对该水循环模型的建模理念、水循环模拟结构、各水循环子系统间水力联系及耦合机制、人类活动处理、模型应用过程等进行了一定程度的说明。此外,目前的水文/水循环模型在输入信息量、模拟过程的复杂程度、数据管理的高效性、运行效率等上的要求也越来越高,这些内容也在 MODCYCLE 中进行了有针对性的考虑和处理。在本书的模型应用实例部分,通过将 MODCYCLE 模型应用于海河流域农田尺度典型单元、海河流域南系及海河流域北系两个不同水文特性的区域尺度典型单元,对 MODCYCLE 模型的应用过程和应用效果进行了展示。

本书所介绍的 MODCYCLE 模型,其特点主要包括 3 个方面。

1) 在模型应用能力方面。①水循环模拟能力比较完善。MODCYCLE 模型为日尺度物理分布式水循环模拟模型,各水文过程的数学描述多采用有物理基础的计算方法,不仅具有较高的模拟精度,同时水循环模拟路径较为完整和清晰,具备刻画流域尺度近 70 项水分通量的循环转化关系的能力。②充分考虑了多种人类活动对水循环的影响。MODCYCLE 模型针对目前水循环模型体现人类活动影响不足的问题进行了大幅改进,不仅较为全面地刻画了流域天然的“四水转化”过程,且能够在模型中显式体现十余种典型人类活动对水循环的影响和控制,对于不同复杂程度和类型的人类活动干扰下的流域水循环研究均有很强的适用能力,可适应水资源研究的实践需求。

2) 在模型开发设计方面。①完全模块化开发方式。MODCYCLE 以 C++语言为基础,以面向对象(OOP)的方式进行模块化开发。就目前而言,在水文水循环领域采用面向对象模块化方法进行复杂分布式水文模型开发工作的十分少见,多数以结构化的 FORTRAN 或 C 语言开发。面向对象的开发方式可使整体模型高度模块化,在模型功能扩展和二次开发方面具有一般结构化语言开发的模型所不具有的灵活性。②以数据库作为数据管理平台。在水循环模拟涉及越来越庞大和繁杂输入信息的当前,需要在模型开发阶段充分考虑对模型输入输出的有效管理。MODCYCLE 以大型数据库作为平台统一进行数据管理,一是显著提高了输入/输出数据的易读性;二是使模型数据结构化,避免数据冗余;三是可借用数据库平台强大的检索和分析能力对模型数据进行整理挖掘,使得

MODCYCLE 在数据管理方面具有方便易用的特点。③支持多线程并行运算。在模型运算效率方面, MODCYCLE 吸收了当前高性能计算领域的并行运算理念, 利用面向对象模块化的优势, 结合水循环模拟计算原理进行了多线程并行运算开发, 利用了现代计算机系统的多核化硬件发展趋势。

3) 在模型功能方面。①具备原生地下水数值模拟能力。MODCYCLE 模型实现了水循环模拟与地下水数值模拟的无缝衔接。当前的水循环模型多数对地下水侧向流动刻画不足, 难以在地下水开发利用为主的流域/区域应用, 本模型在此方面进行了改进。②地表积水机制模拟。在人类活动干预强烈的农业区, 某种意义上传统降水入渗-产流模拟算法对于农田环境已经不能合理刻画。本模型提出的地表积水机制模拟, 能够较好地适应田间灌溉情况和平原区降水产流的特点。③农业灌溉自动模拟识别。MODCYCLE 模型开发出自动灌溉识别功能, 可结合具体作物的灌溉制度、日降水情况、指定土深以上土壤墒情状态进行自动灌溉判别。不仅使模拟过程中对农业用水的时空分布处理得更加合理, 降低了模型的使用难度, 还可用于农业灌溉需水预测等方面。此外, MODCYCLE 模型还具有三层次水平衡分析校验体系, 可对流域水平衡收支状况进行精细分析。

本书分为六章。第1章为绪论, 由陆垂裕、王浩和王建华执笔; 第2章为MODCYCLE 开发设计与模型原理, 由陆垂裕、王浩、王建华、肖伟华、孙青言、秦韬、李慧执笔; 第3章为MODCYCLE 模型农田单元尺度研究应用, 由孙青言、王润东、梁清华、刘家宏、葛怀凤、郭迎新、苟思执笔; 第4章为MODCYCLE 模型区域尺度研究应用——海河南系农业典型单元水循环模拟, 由陆垂裕、毕雪、李慧、高学睿、徐凯、盖燕如、韩婧怡、邢学成执笔; 第5章为MODCYCLE 模型区域尺度研究应用二——海河北系城市典型单元水循环模拟, 由张俊娥、秦韬、张伟、陈根发、刘淼、陈强执笔; 第6章为主要结论与展望, 由陆垂裕、王浩执笔。全书由陆垂裕统稿。此外在MODCYCLE 开发设计初期, 秦大庸老师对该模型的总体设计、模型结构、模型功能等提出了很多有创见性的思路和建议, 并在该模型的具体编程和应用上付出了大量的时间和精力, 本书的方方面面也凝聚着秦老师的心血。秦老师英年早逝, 实是模型开发团队的不幸和重大损失, 谨以此书向秦老师致以崇高敬意。

最后, MODCYCLE 模型是一个通用性较好的模型, 该模型可为研究人类活动对水循环的影响这一水文/水资源学科的重要方向提供实用的分析工具, 同时在不同类型和气候区的流域均具有良好的推广应用前景, 本书对其进行较为系统的原理和应用说明, 为同领域研究人员提供一定研究参考。

作者

2015年6月

目 录

总序

序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 水文科学研究的发展前沿	1
1.2 人类活动对水循环的影响	4
1.2.1 温室气体排放对气候和大气环流过程产生影响	4
1.2.2 改造下垫面性状对水循环的陆面过程产生影响	5
1.2.3 人工大规模取用水直接干预水循环路径	5
1.3 变化环境下的水循环研究挑战	6
1.4 流域水文模型研究进展概述	7
1.4.1 水文研究与水文模型	8
1.4.2 水文模型的分类及特点	11
1.4.3 分布式水文模型与 GIS	12
1.4.4 分布式水文模型与 DEM	13
1.4.5 分布式水文模型与遥感技术	15
1.4.6 国内外主要分布式水文模型简介	16
1.5 目前水文模型热点问题和进展方向	19
1.5.1 水文尺度效应	19
1.5.2 不确定性研究	21
1.5.3 不同系统的耦合	22
1.5.4 缺资料地区水文模拟	30
1.5.5 并行运算研究	31
1.5.6 城市区水文模拟	33
1.6 发展趋势总结	35
第 2 章 MODCYCLE 开发设计与模型原理	37
2.1 MODCYCLE 模型的总体设计	37

2.1.1	流域离散方式	37
2.1.2	模拟结构与水循环路径	39
2.1.3	面向对象的模块化	41
2.1.4	数据库支持	43
2.1.5	层次化的水量平衡校验机制	44
2.1.6	并行运算支持	45
2.1.7	模型的概念性和物理性	47
2.1.8	模型的自然-人工二元特色	47
2.2	MODCYCLE 的水循环模拟原理	48
2.2.1	基础模拟单元水循环	48
2.2.2	浅层地下水循环	66
2.2.3	深层地下水循环	69
2.2.4	河道水循环	69
2.2.5	水库水循环	72
2.2.6	池塘/湿地水循环	74
2.2.7	植物生长模拟	77
2.2.8	人工过程模拟	83
2.2.9	地表/地下水耦合模拟	89
2.3	本章小结	94
第3章	MODCYCLE 模型农田单元尺度研究应用	96
3.1	研究目的	96
3.2	试验设置与思路	97
3.2.1	试验区情况	97
3.2.2	试验观测项目	97
3.3	试验数据分析	100
3.3.1	土壤参数实测数据	100
3.3.2	生育期内气象情况	101
3.3.3	生育期分层土壤含水率变化	102
3.3.4	降雨前后土壤水分运移变化	103
3.3.5	土壤含水率随土壤深度变化	104
3.4	田间尺度水循环模拟验证	104
3.4.1	埋深2m 以上土壤含水量对比验证	105
3.4.2	土壤剖面分层含水率对比验证	105
3.4.3	叶面积指数和株高对比验证	106

3.5 田间水循环规律分析	107
3.5.1 土壤水循环通量分析	107
3.5.2 降雨/灌溉量与土壤含水率响应定量分析	108
3.5.3 生育期蒸散发定量分析	109
3.6 本章小结	110
第4章 MODCYCLE 模型区域尺度研究应用一	111
4.1 区域自然及社会概况	111
4.1.1 自然地理	112
4.1.2 气象水文	112
4.1.3 水利工程	115
4.1.4 社会经济	115
4.2 区域水资源状况	117
4.2.1 地表水资源量	117
4.2.2 出入境水量	117
4.2.3 地下水资源量	118
4.2.4 东部平原地下水动态及漏斗分布	119
4.3 区域水循环模拟构建	120
4.3.1 空间数据及其处理	121
4.3.2 主要水循环驱动数据	126
4.4 模型率定与验证	138
4.4.1 匡门口断面径流量验证	138
4.4.2 出境水量验证	139
4.4.3 浅层地下水位变化过程验证	139
4.4.4 关键水资源特征量对比	141
4.4.5 水量平衡检验	143
4.5 基于水循环模拟的邯郸市水循环规律分析	144
4.5.1 降水量年际变化	144
4.5.2 ET 量空间分布	145
4.5.3 地表产流量空间分布	146
4.5.4 土壤蓄变与地下水埋深变化	147
4.5.5 山区平原水循环通量规律分析	149
4.6 变化环境下邯郸市水循环响应预测	151
4.6.1 变化环境因子识别	151
4.6.2 预测方案设置	153

4.6.3	区域总水量平衡特征	154
4.6.4	水循环要素变化特征	155
4.6.5	平原区地下水补排分析	157
4.6.6	地下水位响应	158
4.6.7	地表径流量响应	159
4.7	本章小结	160
第5章	MODCYCLE 模型区域尺度研究应用二	162
5.1	区域概况及现状分析	162
5.1.1	区域概况	162
5.1.2	区域水资源情况	170
5.2	区域水循环模拟构建	175
5.2.1	空间数据及其处理	175
5.2.2	主要水循环驱动	183
5.3	模型率定与验证	196
5.3.1	水量平衡检验	197
5.3.2	关键水资源量对比	198
5.3.3	出境流量验证	198
5.3.4	ET 量对比	199
5.3.5	产量对比	200
5.3.6	浅层地下水位验证	202
5.4	基于水循环模拟的天津市水循环规律分析	203
5.4.1	降水量年际年内变化规律	203
5.4.2	区域蒸散发分析	204
5.4.3	地表产流量空间分布	210
5.4.4	蓄变量年际分布	211
5.5	本章小结	211
第6章	主要结论与展望	214
6.1	研究工作总结	214
6.2	存在的问题和研究展望	214
参考文献		216
索引		230

第 1 章 | 绪 论

水资源问题直接关系到国计民生和社会经济的可持续发展,水资源时间与空间的变化又直接取决于对水循环规律的认识。近几十年来,由于全球气候的变化和人类活动的加剧,地球上的水循环和水资源状况发生了深刻的改变,很多地区发生了严重的水问题和水危机。在很多国家和地区,水问题已经成为严重制约社会经济发展的重要因素,因此对变化环境的水循环研究是 21 世纪水科学一个十分重要的发展方向。

1.1 水文科学研究的发展前沿

水资源安全是国际水资源研究的热点问题,它不仅与水循环有直接联系,而且关系到人类及其生存环境对水资源的基本需求、生态环境需水要求、国家粮食安全、水的价值及水的科学管理问题(陈家琦和王浩,1996;夏军和朱一中,2002)。因此,对受人类活动影响剧烈地区的水循环与水资源安全研究,是 21 世纪国际、国内资源环境学科领域一个十分重要的方向性问题。水资源是基础性的自然资源和战略性的经济资源,国家已将水资源列为与粮食、石油资源并列的三大战略资源之一。中国目前人均水资源量只有 2300m^3 ,约为世界人均水量的 $1/4$,是全球人均水资源量最缺乏的国家之一。我国 81% 的水资源集中在南方地区,而北方地区只占有 19% 的水资源,且受季风气候的影响,大气降水的季节分布也极不均匀,因而水资源利用率较低。目前全国 300 多个城市缺水,缺水量超过 54 亿 m^3 。水循环是联系地球系统“地圈-生物圈-大气圈”的纽带,是全球变化三大主题“碳循环、水循环、食物纤维”中的核心问题,受自然变化和人类活动的影响,水循环决定水资源的形成及与水相关的生态系统与环境的演变规律(夏军和朱一中,2002;高彦春和王长耀,2000)。因此,研究我国目前的水循环状况,对于合理开发和利用水资源就显得尤为重要。

在国际上,特别是 20 世纪 90 年代以后国际有关组织实施了一系列国际水科学计划,如国际水文计划(IHP)、世界气候研究计划(WCRP)、国际地圈生物圈计划(IGBP)等,目的是从全球、区域和流域不同尺度,通过交叉学科途径,探讨环境变化下的水循环及其相关的资源与环境问题(刘苏峡和刘昌明,1997)。

IGBP 代表国际地球科学发展前沿,水文循环的生物圈方面(biosphere aspects of hydrological cycle, BAHC)是 IGBP 的核心之一。进入 20 世纪 90 年代末,变化环境(即全球变化与人类活动影响)中的水文循环与水资源的脆弱性研究成为热点。前沿问题突出反映在:水文循环的生物圈方面,人类活动影响下的水资源演变规律,水与土地利用/覆被变化、社会经济发展之间的相互作用,水资源可持续利用与水安全等。变化环境下的水