

多闸坝流域

水文环境效应研究及应用

张永勇 夏军 程绪水 张翔 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

本书得到国家水体污染控制与治理科技重大专项课题（2009ZX07210-6）、国家自然科学基金面上项目（青年基金）（40901025）以及中国博士后科学基金特别资助（201003151）的资助

多 闸 坝 流 域 水文环境效应研究及应用

张永勇 夏军 程绪水 张翔 著

内 容 提 要

本书全面阐述了目前流域开发背景下,复杂流域水循环及水质模拟、水利工程影响评价及调度等方面研究进展的基础上,系统介绍了多闸坝调控河流水文环境效应的理论基础、研究体系、量化方法和应用研究成果,主要内容包括三部分:第一部分是系统提出了闸坝水文环境效应的理论基础和研究体系;第二部分是淮河流域为例,详细研究了闸坝群调控对流域径流演变、水质过程及河流生态系统的影响;第三部分是以北京市温榆河流域为例,探讨了闸坝群水量水质联合优化调度方法和应用。本书提出的闸坝调控河流水文环境效应量化方法及应用,对正确认识流域开发与水资源可持续利用关系、河流污染治理与提高水资源利用效率等提供了重要的科技支持和参考。

本书可为水资源、水环境、水利工程、地理、资源、环境及有关专业科技工作者和管理人员使用和参考。

图书在版编目(CIP)数据

多闸坝流域水文环境效应研究及应用 / 张永勇等著

— 北京:中国水利水电出版社,2011.12

ISBN 978-7-5084-9385-5

I. ①多… II. ①张… III. ①水闸—影响—流域—水文环境②挡水坝—影响—流域—水文环境 IV. ①P343.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第281496号

书 名	多闸坝流域水文环境效应研究及应用
作 者	张永勇 夏军 程绪水 张翔 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	三河市鑫金马印装有限公司
规 格	170mm×240mm 16开本 14印张 275千字
版 次	2011年12月第1版 2011年12月第1次印刷
印 数	0001—1000册
定 价	45.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

流域合理开发利用、水利工程建设是当前国内外资源、生态、环境保护研究中争论的热点问题之一。闸坝在控制洪水、提供饮水、灌溉农田、水力发电、水产养殖和旅游娱乐等方面起着重要的作用,在一定时期内推进了全球区域经济社会的迅速发展,但是过多闸坝工程建设使流域内下垫面发生了较大变化,闸坝切断了河流,导致河流生态与环境恶化、生物多样性减少等。流域水利工程建设对河流径流演变、生态环境系统的影响研究是新时期国际上生态水文学领域研究中的前沿性问题之一,是流域综合管理中面临的带有普遍性的重要问题,同时也是一项极为复杂和紧迫的任务。

我国是世界水利工程最多的国家,所建闸坝占全球的50%以上。目前我国水利工程对河流生态与环境的影响研究主要集中在水利水电工程建设立项论证和水利水电工程建设的后评价两个方面。在水利工程立项论证方面我国都对水利水电工程环境影响评价有明确的标准和规范。但对于水利工程的后评估方面处于起步阶段,缺乏比较完备的影响评价体系和方法。而且研究主要还集中在单一工程对河流生态与环境的胁迫研究方面,对于高强度人类活动地区从流域尺度上探索闸坝群对流域内水文水环境的影响还有待加强。

本书结合国家水体污染控制与治理科技重大专项(编号:2009ZX07210-6)“淮河—沙颍河水质水量联合调度改善水质关键技术研究”、国家自然科学基金面上项目(青年基金)(编号:40901025)“多闸坝重污染流域闸坝群水文及水环境效应量化研究”、第三批中国博士后科学基金特别资助(编号:201003151)“淮河流域径流演变及闸坝的效应分析”、水利部专题“淮河闸坝对河流生态与环境的影响评估”、“淮河闸坝对河道径流影响评估”和“淮河流域重点水域水生物调查监测与评

价”；北京市科技计划课题“温榆河流域水资源利用水质水量调控技术研究”等多项国家、部委及地方项目，以分析变化环境下流域径流演变为基础，研究了闸坝群影响下河流量水质的变化机理，提出了基于流域水循环过程认识和模拟的闸坝对河流量水质影响评价体系和量化方法，探讨闸坝的联合调度模式，分析流域生态环境问题的成因，客观认识闸坝的功能、流域整治和修复新技术的途径，同时也为生态水利工程的评价提供了理论基础和技术支撑。

全书分为3篇共10章，其中第1篇为多闸坝河流水文环境效应研究基础（第1~第3章），详细阐述了闸坝调控对河流形态、径流、流速、蒸发下渗等水文循环各个要素的影响；由此引起的河流水温、泥沙、水质以及纳污能力的改变；探索了闸坝工程对河流量水质影响研究的理论基础及评价体系。并通过室内实验初步认识了闸坝调控下河流量水质的时空变化，探索了入河污染负荷、闸坝调控和河流量水质变化之间的复杂关系，为流域闸坝运行环境下河流量水质模拟，揭示人工调控河流水文水环境变化机制提供了基础和技术支撑；第2篇为淮河流域应用研究（第4~第9章），采用野外调研、统计检测、数值模拟、情景分析等多种技术手段，系统探讨了闸坝群影响下淮河流域径流演变和污染物运移过程模拟、水文环境效应及生态系统健康等，量化了淮河流域闸坝群的水文环境效应；第3篇为温榆河流域应用研究（第10章），以流域水循环为基础，从流域尺度上探讨了温榆河流域闸坝的水量水质联合调度模式，分析了多种情景下流域重点闸坝的优化调度方式。

本书第一篇是张永勇博士、夏军教授、张翔教授撰写；第二篇由张永勇博士、夏军教授、程绪水教授撰写；第三篇由张永勇博士、夏军教授撰写；全书由张永勇博士统稿，夏军教授、程绪水教授、张翔教授审阅。在研究工作中，得到了淮河水利委员会、淮河流域水资源保护局、淮河水利委员会水文局、中水淮河规划设计研究有限公司、北京市水利科学研究所、中国科学院地理科学与资源研究所、武汉大学、郑州大学、南京水利科学研究院、华东师范大学等单位领导、专家和工作人员的大力支持和指导。特别感谢淮河流域水资源保护局姜永生局长、张延

斋总工、杨刚处长、万一处长、贾利处长等，淮河水利委员会水文局钱明开副局长、徐时进处长、陈红雨工程师、杜久芳工程师、王凯博士等，以及中水淮河规划设计研究有限公司沈宏处长、王德智博士等提供大量基础资料支持和无私的指导；感谢参与相关课题的王纲胜博士、左其亭教授、宋献方教授、刘敏教授、王中根副教授、陈军锋副教授、陆敏副教授、赵长森博士、叶爱中博士、蒋艳博士、乔云峰博士、张亮博士、刘鑫博士、林啸博士、权瑞松博士、彭欢博士等的合作和帮助。感谢澳大利亚 CSIRO Mathematics, Informatics and Statistics 研究所邵全喜研究员、Griffith 大学河流研究所 Stuart E. Bunn 教授、Angela H. Arthington 教授、Stephen Mackay 博士、Mark Kennard 博士、Rob Rolls 博士在统计分析、河流分类、生态系统分析等方面的悉心指导。本书也参考了《淮河流域及山东半岛水资源综合规划报告》（淮河水利委员会，2008），《淮河流域闸坝对河道径流影响评估》（中国科学院地理科学与资源研究所、中水淮河工程有限责任公司，2006）、《淮河流域闸坝对河流生态与环境影响评估》（中国科学院地理科学与资源研究所、淮河流域水资源保护局，2006）、《淮河流域重点水域水生物调查监测与评价》（中国科学院地理科学与资源研究所、淮河流域水资源保护局，2008）、《温榆河流域水资源利用保障体系课题——水资源利用水质水量调控技术研究》（中国科学院地理科学与资源研究所，2009）等多项研究报告，成果涉及的研究人员较多，不能一一列举，敬请谅解，特此向以上所有成果的完成单位和个人表示衷心感谢！同时也感谢中国水利水电出版社为本书出版付出的辛勤劳动。

由于闸坝调控对河流水量水质作用机理极为复杂，同时涉及水文学、环境学、生态学、水工学等多学科知识，理论研究与实践仍处于探索阶段，再加上作者水平有限，书中的一些科学研究结论可能与生产实际存在不一致，今后还需要进一步加强研究，如有不妥之处，敬请广大读者批评指正！

著者

2011 年 11 月

目 录

前言

第 1 篇 多闸坝河流水文环境效应研究基础

第 1 章 绪论	3
1.1 引言	3
1.2 相关研究进展	5
第 2 章 研究框架	20
2.1 河流的特性与闸坝建设	20
2.2 闸坝的水文环境效应	22
2.3 理论基础	31
2.4 研究内容	33
2.5 技术手段	34
第 3 章 实验分析	40
3.1 实验方案	40
3.2 实验结果	43
3.3 建模分析	46
3.4 本章小结	61

第 2 篇 淮河流域应用研究

第 4 章 淮河流域概况和评价对象	65
4.1 流域概况	65
4.2 流域水资源与水环境状况	68
4.3 研究对象和范围	71
第 5 章 淮河流域径流演变检测	73
5.1 数据与方法	73
5.2 结果与分析	78

第 6 章 淮河流域闸坝影响下水量水质耦合模型	91
6.1 SWAT 模型原理	91
6.2 模型的建立和改进	97
6.3 参数的选取和率定	103
6.4 结果与分析	105
6.5 本章小结	116
第 7 章 淮河流域河流分类及闸坝的水文效应	118
7.1 数据与方法	118
7.2 河流分类结果	123
7.3 闸坝的水文效应	129
7.4 本章小结	138
第 8 章 淮河流域闸坝的环境效应	140
8.1 闸坝对河流水质的主要影响和评价指标	140
8.2 闸坝对河流水环境的影响评价	143
8.3 本章小结	154
第 9 章 淮河流域河流生态健康和影响因素分析	156
9.1 淮河流域河流生态系统健康评价	156
9.2 河流生态系统的环境影响因子检测	165
9.3 本章小结	169

第 3 篇 温榆河流域应用研究

第 10 章 基于流域水循环的水量水质联合调度	173
10.1 研究区简介	173
10.2 思路与方法	174
10.3 闸坝调控对河流水量水质的影响	182
10.4 多情景方案下闸坝优化调度模式	185
10.5 本章小结	196
第 11 章 后记	198
参考文献	200

第 1 篇

多闸坝河流水文环境 效应研究基础

在多闸坝控制流域内，大量水利工程的修建及调控、人类取水量的增加、污染物的大量排放等剧烈的人类活动已严重干扰了流域自然的水文循环特征和污染物质迁移转化过程，河道内水量和污染物质运移均受人类活动的控制。闸坝影响下流域水循环系统是一个复杂的非线性系统，存在许多不确定性。目前闸坝对河流水量水质影响研究还是一个全新的研究方向，其理论和方法尚在探索之中。本篇系统地阐述了多闸坝河流水文环境效应研究体系中所涉及方向的研究进展，包括变化环境下流域水循环、生态水文学及生态水利工程、闸坝联合调度等方面；提出了闸坝对河流水量水质影响研究的基础和量化体系，其中第 2 章重点分析了闸坝的修建对河流形态、水文情势和水环境的影响，探讨了闸坝对河流水量水质影响研究的理论基础和量化方法；第 3 章借助于室内实验和数值模拟，初步认识了闸坝调控下河流水量水质的沿程变化，探索了入河污染负荷、闸坝调控和河流水量水质变化之间的关系。这将为闸坝影响下河流水量水质模拟和闸坝的影响评估等研究提供了理论基础和技术支撑。

1.1 引言

河流是珍贵而且可更新的自然资源。河流孕育了人类文明，推动了人类历史的进程和社会经济的发展。在许多国家地区里，河流都是人们及其他生物赖以生存的主要水资源。

20 世纪中期，随着全球经济的复苏、人口的膨胀以及城市化进程的加快，人类生产生活用水量急剧增加。为了满足人类日益增长的对水资源的需求，人们加大了对河流的开发力度，在河道内修建了大量闸坝工程。闸坝在防汛抗旱、蓄水发电、水产养殖、交通运输和休闲旅游等方面起着举足轻重的作用，促进了全球经济的迅速发展。闸坝的数量成为当时衡量一个国家和地区发达程度和人类改造自然能力的重要标志之一。全球闸坝数量急剧增加，到 20 世纪 70 年代达到顶峰，全球每天平均约有两三座大坝竣工。目前，世界上 60% 以上的河流均已被水利工程截断。估计到 2025 年，这一数字将达到 70%（Postel 等，1996；Revenga 等，1998）。据国际大坝委员会（ICOLD）统计，1998 年在统计的全球 140 多个国家中，建成的大坝（坝高超高 15m 或库容超过 300 万 m^3 ）已达到 49248 座，水闸至少有 80 万座（McCully 1996；Tharme, 2003），其中发展中国家约占总数的 2/3。世界水资源所调查表明在全世界 106 个流域中，46% 的流域至少拥有一座大坝。大坝控制了美国和欧盟领土的 60%~65% 的河流。在亚洲，近一半的河流受到闸坝影响，而且不止一座（WCD, 2000）。

但是河流过度的开发利用，大量水利工程的建设切断了河流，极大地改变了河流的自然状态，造成泥沙淤积，河床加高，加剧了河流水体的污染，破坏了上下游生境、切断了洄游鱼类的鱼道、导致生物多样性减少等（索丽生，2005），严重威胁着河流健康。闸坝对河流生态与环境带来的负面相应逐渐显现。20 世纪 70 年代竣工的阿斯旺大坝过去一直是埃及的骄傲。然而近年来人们发现，它破坏了尼罗河流域的生态平衡，引发一系列灾难：两岸土壤盐渍化、河口三角洲收缩、血吸虫病流行等。类似的弊端也出现在肯尼亚的姆韦亚水电站、中国台湾

的美浓水库等很多地方(胡少华, 2004)。黄河筑坝导致下游断流和泥沙淤积现象严重。1972~1999年, 黄河下游共22年发生断流。1995年、1996年断流时间分别长达118d和136d, 1997年则更是创下跨年度段里的新纪录(李小五, 2005)。三门峡水库、青铜峡水库因泥沙淤积损失库容分别为57%和78%, 严重影响了汛期上游洪峰下泄, 危急上游居民的生命财产安全(王兆印等, 2003)。三峡大坝的修建和蓄水导致水体自净能力下降、部分支流和库湾发生水华的频率增大(索丽生, 2005)、上下游生物栖息地破坏严重而且切断了中国鲤鱼和一些珍稀物种(江豚、白鳍豚等)的产卵洄游的鱼道, 这直接导致鱼类产卵数量和幼苗的减少, 珍稀物种濒临灭绝(Wu等, 2003; Richard, 2008)。在美国Glen Canyon大坝调控减弱了下游河岸更新能力, 同时使下游河流水温寒冷, 这严重减少了Grand Canyon地区当地鱼类数量, 甚至导致当地鱼类的消失, 但引入了外类物种; 如白鲑在过去的20年里从估计的8000多尾减小到2000多尾。但发现了褐鲑鱼、虹鳟鱼和鲑鱼这些非当地鱼类, 其中虹鳟鱼的数量甚至接近25万尾(Powell, K., 2002)。淮河流域是我国闸坝数量最多而且污染最严重的流域。为了防汛抗旱的需要, 淮河流域已兴建1.1万余座闸坝。流域内过多闸坝的建设和不合理的调控导致河流水文情势发生了较大变化, 加之入河污染负荷逐年上升, 水污染逐渐加剧, 突发性水污染事故频频发生。截至目前, 全流域共发生较大水污染事故近200起, 直接经济损失达数十亿元, 河流生态系统遭到严重的破坏。2005年我国环境状况公报显示, 淮河流域水质为Ⅳ类及以上的河流仍占83%, 居七大流域之首(国家环保总局, 2005)。2006年流域生态调查表明, 淮河流域水域生态系统健康状态也已不容乐观, 64%的调查站点已处于亚健康或者是不健康状态(赵长森等, 2008)。

1997年, 在巴西库里提巴召开第一次世界反水坝大会, 成立了世界水坝委员会。并将每年的3月14日定为世界反水坝日。2003年年底在泰国召开的第二次大会对水坝利弊提出了全球性的质疑。目前, 整个欧洲要求对数以千计的20世纪50年代以前兴建的水库进行重新审核。法国已开始拆坝行动以恢复鲑鱼栖息地, 复苏渔业及解决严重的淤沙等。加拿大于2000年2月底宣布拆除1956年建成的希尔多西亚水坝。美国以“山地俱乐部”领导的反坝运动由来已久, “让河流自由流淌”的呼声越来越高。2001年, 位于威斯康星前的巴拉博河上的一系列水坝被拆除, 115km长的河流被还以原状。自1900年以来美国已拆除了578座水坝, 1999~2003年底共拆坝168座。在亚洲, 为了保护生态环境, 韩国于2000年6月取消了永越水坝的工程计划。日本长野县于2000年10月冻结8处计划兴建中的水库, 并于2001年2月发表了“摆脱水库宣言”。2001年6月, 日本国土交通省提出“冻结有关大型水库工程建成计划的新的勘测项目”。据报道, 已有92座水库面临终止计划。泰国为了保护生态环境和防治水污染, 则放

弃水坝的设计功能,完全开放水闸,让河水自由流动,尽量恢复自然生态环境。在非洲,乌干达位于维多利亚尼罗河上富有争议的布扎加里水库被制止,拯救了闻名世界的布扎加里瀑布。2001年10月,加纳政府宣布搁置布尔水坝工程(潘家铮,2004;李小五,2005;林学初,2005)……

目前我国水资源正面临洪涝灾害、水资源短缺、水土流失生态恶化、水污染四大挑战(汪恕诚,2006)。据统计我国流域水资源开发利用率仅为20%,远远低于国际上认可的40%的警戒线,而且水能开发率为31.6%,远远低于美国(71.8%)、加拿大(65.3%)、日本(80.9%)、法国(89.72%)等发达国家水平(WCD,2000)。为了进一步开发利用流域水资源,加大对洪水的抵御能力,国家大力倡导修建水利工程,三峡大坝、小浪底工程、南水北调工程等相继动工实施和竣工。2011年中央一号文件也强调对流域的开发和整治。面对大量水利工程修建与河流生态、环境日益恶化等问题,如何正确处理流域开发与生态环境保护,分析闸坝影响下流域径流演变,客观评价闸坝对生态与环境的影响,是我国流域开发中面临的亟待解决的科学问题之一,同时也是一项全新的任务、意义重大。

本书从河流的自然特性入手,剖析了闸坝工程修建和调控引起的水文水环境效应,探讨了闸坝对河流水量水质影响评价的基础,以室内实验和数值模拟为基础,提出了基于流域水循环过程认识和模拟的闸坝影响量化体系和分析方法。选取淮河流域为例,探讨了流域闸坝工程影响下河流水量水质变化机制,评价了流域内主要水系重点闸坝对河流水文水环境的影响程度,为指导淮河流域水资源开发利用和水污染治理提供了科学依据。此外还以温榆河流域为例,基于耦合闸坝系统的分布式水量水质模型,探讨了闸坝的水量水质联合调度模式,研究将为指导多闸坝调控流域水资源开发利用和水污染治理提供了科学依据,为我国实现流域综合管理,社会经济可持续发展奠定了基础。

1.2 相关研究进展

1.2.1 变化环境下流域水循环研究

水文循环是联系地球系统地圈—生物圈—大气圈的纽带,是认识地球系统水循环运动的自然科学规律的水文学科核心。因此,水文循环科学研究是水资源评价、水资源持续利用、水环境分析与评价等的重要科学基础。传统的水文循环只要考虑降水、截留、蒸发、下渗、产流和汇流等水量的自然变化,但随着人类活动的日益加强和全球气候的变化,传统水文循环的研究已经不能完全描述现代水文循环的各个环节,不能考虑全球变化以及人类活动等方面对水循环的影响。对于变化环境下流域水循环研究主要集中在流域水文模型的研究和变化环境对流域

水文循环影响研究两个方面。

1.2.1.1 流域水文模型

流域水循环是指流域中的各种形态的水在太阳辐射、地心引力等作用下,通过蒸发、水汽输送、凝结降水、下渗以及径流等环节,不断地发生相态转换和周而复始运动的过程(刘昌明等,2006)。采用一系列数学方程对流域水循环的各个环节进行描述和模拟是研究流域水循环的有效途径之一。1856年达西(Darcy)通过实验提出了描述渗流运动的达西定律,1871年圣维南(St. Venant)提出了描述明渠不稳定流动运动规律的圣维南方程,1932年谢尔曼(Sherman)提出了单位线,1933年霍顿(Horton)提出了入渗理论,1938年麦卡锡(MacCarthy)提出了马斯京根洪水演进算法,1948年彭曼(Penman)提出了蒸发理论(芮孝芳,2004)。从20世纪50年代以来,随着科学技术的发展和计算机的出现,为同时模拟流域水循环中的各个环节奠定了基础,涌现了一大批著名的集总式流域水文模型,如SSARR模型、HSPF模型、Sacramento模型、Tank模型、HEC-1模型、SCS模型和API模型等,在国内也出现了新安江模型和陕北模型等。但是由于传统流域水文模型在许多环节上采用概念性元素的模拟或经验函数关系的描述,忽略了流域内参数的空间分布特征。随着人类改造大自然的能力日益增强,高强度的人类活动已完全改变了流域内土地利用方式、河道形态等,自然流域水循环受到了严重的人为干扰。在如何准确描述变化环境下流域水循环以及科学分析人类活动流域水循环的影响等方面,传统流域水文模型的弊端逐渐显现。

20世纪80年代后期,水文学家们把目光逐渐从传统水文模型转移到分布式水文模型。分布式水文模型在研究土地利用变化的影响、气候变化影响、人类活动影响以及水资源评价、节水灌溉、土壤侵蚀、地表水地下水污染、洪水实时预报、无资料或资料缺乏地区的径流预测等方面较传统集总式水文模型有着不可比拟的优势(Abbott等,2003;熊立华、郭生练,2004;贾仰文等,2005;王纲胜,2006;叶爱中,2007)。自1969年Freeze和Harlan发表的《一个具有物理基础数值模拟的水文响应模型的蓝图》的文章,首次提出分布式水文模型的概念和框架以来,相继出现了许多经典的分布式水文模型,并成功运用在科学研究和生产实践中。

1979年,Beven和Kirkby提出了一个以地形为基础的基于物理意义的半分布式流域水文模型TOPMODEL(Beven等,1979)。该模型基于DEM推求地形指数 $\ln(a/\tan b)$,利用地貌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。模型结构简单、优选参数少、物理概念明确。但TOPMODEL并未考虑降水、蒸发等因素的空间分布对流域水循环的影响,因此,它不是严格意义上的分布式水文模型,属于半分布式水文模型。

20 世纪 80 年代出现的 SHE 模型 (System Hydrologic European) 被公认为是最早而且应用比较广泛的分布式水文模型之一 (Abbott 等, 1986)。该模型由丹麦、法国及英国的水文学者联合研制开发的, 并在欧洲、中国、美国等得到了广泛的应用。模型采用数值分析来建立相邻网格单元之间的时空关系, 对蒸散发、地表径流、壤中流等水文过程的模拟主要采用质量、动量和能量守恒偏微分方程的有限差分表示, 具有较强的物理机制, 因此这类模型被称为具有物理基础的分布式水文模型。SHE 模型为研究人类活动对于流域的产流、产沙及水质等影响问题提供了理想的工具。但是 SHE 模型中参数均具有较强的物理机制, 需要通过大量的实测数据来率定, 因此通常只能应用在资料比较齐全、面积较小的流域。

此外, 国外比较常见的分布式水文模型还有 SWAT (Soil and Water Assessment Tool) (Arnold 等, 1998)、IHDM (Institute of Hydrology Distributed Model) (Morris, 1980)、USGS 模型 (Dawdy 等, 1970)、WATFLOOD 模型 (Kouwen 等, 1993)、VIC 模型 (Liang 等, 1994) 等。

在国内, 对于分布式水文模型的研究与应用起步较晚。

李兰 (1997) 根据山坡水文学、流域的界面和水动力学理论建立了 LI-全分布式水文模型。该模型基于能量平衡和水循环, 提出了变动综合产流模式; 基于水动力学、达西定律和连续方程等推导建立了坡面流、回归流、饱和壤中流、地下径流汇流模式, 建立了能够反映流域坡地单宽入流过程的河网汇流对流扩散方程; 同时研制了分布水文参数反问题模型、单宽入流和上游入流联合反演、水动力学实时校正反问题模型和数值计算技术。LI-全分布式水文模型已经在我国 15 个流域洪水预报、水库防洪调度、水库和灌区水资源管理中有实际应用。

刘昌明等 (1999) 从科学研究和水资源管理的实际需要, 首次研发国内基于模块化的分布式水文模拟系统, 并提出了“信息化水文模拟系统 (HIMS)”。HIMS 是一个以水循环信息平台为基础, 基于组件式结构设计的开放式综合水循环模拟系统, 侧重于分布式水文过程的模拟与应用。HIMS 的水文模型方法库系统集成成了水文过程方法库和多种水文模型, 并提供定制水文模型的功能。HIMS 的提出发展了水文模型理论和建模技术, 拓宽了国内分布式水文模型的研究思路。

夏军通过世界不同地区的 40 多个流域的实测水文资料分析, 利用水文非线性系统理论, 建立了时变增益的水文非线性系统模型 (Time Variant Gain Model, TVGM), 通过实际检验, 其水文过程模拟的效率明显优于线性水文系统模型 (Xia 等, 1997、2005)。王纲胜、夏军等将 TVGM 与 GIS、遥感信息等结合, 在系统水文学方法与物理水文学方法相结合的基础上, 建立了分布式时变增益水文模型 (DTVGM)。该模型应用于华北地区半湿润半干旱潮白河流域, 定

量研究了气候变化及人类活动对密云水库入库径流的影响(王纲胜, 2006)。叶爱中、夏军等对 DTVGM 产汇流部分进行了改进, 部分参数赋予了明确的物理意义, 并扩展了 DTVGM 侵蚀产沙模块, 开发了月、日、时三个尺度子模型。通过该模型分析了黄河山沟无定河流域的降雨—径流—土壤湿度的关系以及其空间分布规律, 量化了黄土高原水保工程——淤地坝对流域水沙的影响(叶爱中, 2007)。

郭生练(2000)提出了一个基于 DEM 的分布式流域水文物理模型, 该模型将流域划分为网格单元, 详细描述了网格单元的截留、蒸散发、下渗、地表径流、地下径流、融雪等水文物理过程, 在每一个网格上用 DEM 来建立地表径流之间的关系。该模型结构严谨, 参数物理意义明确, 并能给出一些水文要素的空间分布和变化过程。

任立良等(2000)基于数字高程流域水系模型 DEDNM, 考虑流域空间的变异性, 采用新安江模型、马斯京根方法和 TOPMODEL 地形指数空间累积分布曲线, 建立了分布式新安江三水源降雨径流模型。通过淮河史灌河流域实例研究表明: 该数字模型不仅可以很好地模拟流域出口断面的径流过程, 而且能够模拟土壤水分的变化过程, 还可十分方便地输出水文要素和状态变量的空间分布。这对充分利用现有观测信息进行水文数据的深层次挖掘奠定了基础。

贾仰文等(2005)系统研究了流域水循环的所有要素过程, 研发了流域水循环模型 WEP (Water and Energy transfer Process)。该模型综合了分布式流域水文模型与 SVATS 模型的各自优点, 即耦合模拟了水循环过程与能量循环过程, 对植被和各类下垫面的蒸发蒸腾进行了详细计算, 具有物理概念强、计算精度高和速度快等特点, 已在日本谷田川和中国黄河、海河和黑河等多个流域得到验证。

此外国内还有其他学者根据研究目的和研究区的不同, 也建立了一些不同的分布式水文模型。如: 黄平(2000)根据森林坡地的降雨下渗特性, 并结合坡地的地貌条件, 建立了描述森林坡地饱和与非饱和带水流运动规律的二维分布型降雨下渗数学模型, 揭示森林坡地降雨下渗和产流过程的特点与时空分布。杨大文(2004)建立了使用大格网的黄河流域分布式水文模型, 分析了黄河流域水资源演变规律。王中根、郑红星等(2004)面向流域水资源管理, 提出了一个基于 GIS/RS 的流域分布式水文模型。模型的大部分参数与输入信息可以利用 GIS 和 RS 技术获取, 能够对气候变化和人类活动对下垫面的改变, 做出快速的模拟与响应。

1.2.1.2 变化环境下流域水循环研究

国内外对于变化环境下流域水循环研究主要集中在土地利用/覆被变化对水循环的影响、气候变化对流域水循环的影响两个方面。土地利用及覆被变化主要

是指：一种是纯粹的土地覆被变化，如森林火灾、森林砍伐及恢复、城市化和农业布局的变化等，导致该区域的蒸散发强度改变；另一种则是由于引水灌溉、水库洼地蓄水、河道闸坝修建、水保工程和人畜饮水等所导致的净消耗水量。以上两种方式都以有效或无效蒸散发的方式使陆面水资源的消耗发生变化，从而改变径流量（王纲胜，2006）。而气候变化主要包括全球气候变暖、温室气体浓度上升等（王书功等，2004）。

自 1970 年以来，一些国际组织先后开展了土地利用/覆被变化的水文水资源效应研究，如国际地球—生物圈计划（IGBP）的核心项目（GAIM、BAHC、GCTE、LUCC）就是把土地利用/覆被变化的水文水资源效应作为全球变化的重要研究内容之一。Onstad 和 Jamieson（1970）最先尝试运用水文模型预测土地利用变化对径流的影响。Fohrer N. 等（2005）采用 TOPAZ、SUSAT、SWATGRASS、SWAT-G 和 OUTGRASS 模型分析了德国 Aar 流域（60km²）不同土地利用类型的水文效应，提出了一套评估体系，为土地的可持续利用提供了技术支撑。Niehoff 等（2002）联合应用 LUCK 模型和基于物理的分布式水文模型 WaSIM-ETH，预测土地利用空间转换趋势，以及由此对洪水的影响。王浩、贾仰文等（2005）应用 WEP 模型初步分析了人类活动影响下的黄河水资源演化规律。通过典型年的评价结果与历史系列结果比较表明：黄河流域在强烈的人类活动影响下，水资源量及其构成均发生了显著变化，地表水资源量衰减，而不重复地下水量增加。袁艺、史培军（2001）以深圳市为例，应用 SCS 流域水文模型对该市部分流域进行降雨—径流过程的模拟，分析了土地利用变化对流域降雨—径流关系的影响。万荣荣，杨桂山（2004）分析了土地利用/覆被变化对雨水截留、下渗、蒸发等水文要素及其产汇流过程的影响，加大了流域洪涝灾害发生的频率和强度，深入研究了土地利用/覆被变化对洪涝灾害的影响。

在“变化环境下的水文循环研究”中另外一个核心是气候变化对水文循环的影响研究。目前此项研究主要采用大气陆面模式与分布式水文模型耦合，将大气模型模拟的降水、气温等气象要素的变化输入分布式水文模型中，模拟分析气候变化对水文循环的影响。如：苏凤阁、谢正辉（2003）以 VIC 模型为基础，构建了气候变化对中国径流影响评估模型的框架。郭生练，李兰等（1995）以蓝塘和花园两流域为例，应用 Monte Carlo 和非参数方法研究了区域水文评价模型参数和径流的不确定性估计。结果表明径流对降水的变化要比对气温升高敏感；径流系数较小的流域，其变化幅度反而大。王建等（2001）选择祁连山黑河流域作为中国西北地区山区积雪流域的典型代表，利用 SRM 融雪径流模型和卫星遥感数据模拟气温上升框架下的融雪径流变化情势。郝振纯、王加虎等（2006）利用气候模型 GCMs 结果和大尺度分布式水文模型评估黄河源区未来 100 年内水资源的可能变化；对南水北调西线工程的需水量进行了简单评估。