



水文水资源与水利工程科学国家重点实验室系列学术专著

环境变化与 水文过程模拟

Environmental Changes and Hydrological Processes Modeling

袁 飞 任立良◎著



河海大学出版社
HOHAI UNIVERSITY PRESS



水文水资源与水利工程科学国家重点实验室系列学术专著

环境变化与 水文过程模拟

Environmental Changes and Hydrological Processes Modeling

袁飞 任立良◎著



河海大学出版社
HOHAI UNIVERSITY PRESS

内 容 提 要

本书是一部关于变化环境条件下水文过程响应模拟的原理、方法及技术方面的专著。全书分三篇 13 章。上篇系统介绍采用多源信息融合技术定量表征环境要素变化的模拟和预测方法;中篇重点阐述模拟和预测环境变化对水文水资源极端干旱和洪水灾害影响程度多模式耦合方法;下篇详细介绍相关模型技术在我国气候、下垫面特性差异性较大的典型流域的应用案例;采用考虑植被作用的新安江模型架构,基于双源蒸散和混合产流的分布式水文模型,结合土地利用变化遥感影像解译信息,定量计算我国湿润区汉江流域和半干旱区老哈河流域水循环要素对土地覆被变化的响应过程。

本书可供水文、水利、地球科学、生态、环境等相关领域的专业研究人员和高等院校师生使用和参考。

图书在版编目(CIP)数据

环境变化与水文过程模拟 / 袁飞,任立良著.

—南京:河海大学出版社,2012. 12

ISBN 978-7-5630-3237-2

I. ①环… II. ①袁…②任… III. ①水文模拟

IV. ①P334

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 296976 号

书 名 / 环境变化与水文过程模拟

书 号 / ISBN 978-7-5630-3237-2/P·24

责任编辑 / 谢业保

封面设计 / 黄 煜

出版发行 / 河海大学出版社

地 址 / 南京市西康路 1 号(邮编:210098)

网 址 / <http://www.hhup.com>

电 话 / (025)83737852(总编室) (025)83722833(发行部)

经 销 / 江苏省新华发行集团有限公司

排 版 / 南京理工大学资产经营有限公司

印 刷 / 南京工大印务有限公司

开 本 / 710×1 000 1/16

印 张 / 21

字 数 / 511 千字

版 次 / 2012 年 12 月第 1 版

印 次 / 2012 年 12 月第 1 次印刷

定 价 / 43.00 元

前 言

独特的气候特征和地理位置决定了中国是一个水旱灾害频发的国度。目前因高强度的人类活动导致的全球和区域尺度气候变化已显著影响我国区域水循环过程,洪水和干旱等极端事件发生的频率和强度明显增加。环境变化与洪水、持续干旱现象加剧之间的动力机制问题,已成为一个亟需解决的科学问题。通过研究大气、陆面、地表水、地下水相互作用机理,构建适合于我国洪旱灾害预测的陆气耦合模型,揭示陆面水文过程与极端气候相互反馈作用机制,可以合理评估环境变化的水文效应。本书基于上述研究思路,总结了环境变化对流域水循环过程影响的相关研究成果,旨在为流域水旱灾害预警、气候变化和下垫面变化的水文响应及水资源评估提供相关计算方法和科学依据。

全书分三篇,共 13 章。上篇系统介绍多源信息融合技术对环境要素变化的定量解译方法:第 1 章概述了环境变化对流域水循环过程影响的模型技术及相关研究进展,由河海大学任立良教授和袁飞副教授撰写;第 2 章介绍多卫星遥感反演降水技术及其在径流模拟中的应用,由河海大学江善虎博士撰写;第 3 章介绍了双源蒸散发能力计算模型和遥感反演实际蒸散发模型等蒸散发定量估算方法,由河海大学袁飞、杨肖丽博士和刘懿硕士生撰写;第 4 章为土地利用变化的遥感定量解译方法,由河海大学方秀琴博士撰写。中篇重点阐述模拟和预测环境变化对水文水资源、洪水灾害和极端干旱影响程度多模式耦合方法:第 5 章介绍了数字流域水系构建,由任立良教授和马明卫博士生撰写;第 6 章介绍地形特征要素的空间尺度转换方法,由南京大学徐静博士撰写;第 7 章详细介绍分布式新安江模型,由袁飞和四川省交通规划设计院刘晓帆博士撰写;第 8 章为陆面-水文耦合模型 Noah LSM/HMS,由袁飞、海河水利委员会杨邦博士撰写。下篇详细介绍相关模型技术在我国气候、下垫面特性差异性较大的典型流域的应用情况:第 9 章、第 10 章和第 11 章由袁飞、方秀琴、杨邦、刘懿撰写,介绍了运用考虑植被作用的新安江模型,结合区域气候模式、全球植被动态模式,并融合遥感信息,定量评估气候变化和土地覆被变化对我国湿润区汉江流域水循环和影响;第 12、13 章由刘晓帆、徐静、方秀

琴撰写,介绍了基于双源蒸散和混合产流的分布式水文模型结合遥感影像信息,定量计算我国半干旱区老哈河流域水循环对土地覆被变化的响应过程,并探究植被变化与干旱的关系。全书由袁飞、任立良统稿。

本书内容是国家自然科学基金青年基金项目(50909033)、国家自然科学基金国际(地区)合作与交流项目(40911130507)和国家“973 计划”课题(2006CB400502)的研究成果之一,该研究还获得教育部高等学校博士学科点专项科研基金新教师基金课题(20090094120010)、水文水资源与水利工程科学国家重点实验室研究项目(2011585412、2009585412)的资助,并得到教育部和国家外专局“高等学校学科创新引智计划”项目(B08048)以及科技部科技基础性专项课题“水文学方法研究”(2009IM020104/2011IM011000)的支持。在此对上述基金的资助一并表示感谢。

作 者

2012 年 9 月

目 录

上篇 环境变化的定量解译

第 1 章 总论	003
1 变化环境下的水文过程模拟	003
2 分布式水文模型研究进展	006
3 土地利用/覆被变化的水文响应研究进展	008
4 气候变化对水循环影响研究进展	012
第 2 章 降水定量解译	019
1 概述	019
2 卫星和传感器	020
3 卫星降水反演算法	021
4 全球卫星降水反演产品	024
5 全球卫星降水产品应用情况	029
6 典型流域实例研究	031
7 结论和建议	047
第 3 章 蒸散发定量估算	051
1 概述	051
2 双源蒸散发能力计算模型及其应用	053
3 遥感反演蒸散发模型及其应用	073
4 结论和建议	085
第 4 章 土地利用变化遥感定量解译	091
1 概述	091
2 老哈河土地覆被变化遥感监测	096

3 结论与建议 105

中篇 水文过程响应模拟方法

第 5 章 数字流域水系的构建 115

1 概述 115

2 数字高程流域水系模型 DEDNM 115

第 6 章 地形特征要素的空间尺度转换 122

1 概述 122

2 尺度转换的常用方法 123

3 基于分形理论的地形特征空间尺度转换方法 125

4 实例分析 135

5 结论与建议 147

第 7 章 分布式新安江模型 151

1 概述 151

2 考虑植被作用的新安江模型及其应用 152

3 基于双源蒸散和混合产流的分布式水文模型及其应用 170

4 结论与建议 184

第 8 章 陆面-水文耦合模型 Noah LSM/HMS 188

1 概述 188

2 Noah LSM/HMS 及其应用 190

3 大气模式 WRF 与 Noah LSM/HMS 耦合 202

4 结论与建议 210

下篇 典型流域实例研究

第 9 章 汉江流域土地覆被变化的水文过程响应 215

1 概述 215

2 土地覆被变化情景的构建 216

3 土地覆被变化情景下的水文响应 218

4 结论与建议	231
第 10 章 汉江流域气候变化引起的水文响应	235
1 概述	235
2 汉江流域近 50 年气候变化分析.....	236
3 汉江流域气候变化对径流影响评估模型	242
4 汉江流域气候变化情景下的水文响应	248
5 结论与建议	261
第 11 章 汉江流域植被动力学机制及其水文过程响应	264
1 概述	264
2 LPJ 全球动态植被模型	265
3 汉江流域气候变化情景下的植被动力学机制	267
4 考虑植被动态变化的水文模拟	284
5 结论与建议	287
第 12 章 老哈河流域土地覆被变化的水文过程响应	290
1 概述	290
2 研究区及资料准备	291
3 土地覆被变化的水文响应数值模拟	294
4 结论与建议	305
第 13 章 老哈河流域植被变化及其对干旱的响应	308
1 概述	308
2 研究方法	309
3 实例分析	313
4 结论与建议	325

上 篇

环境变化的定量解译

第1章 总 论

世界一切都在变,只有 Change 这个词不变!既然环境变化了,水文过程的观测手段、认知方法也要适应这种变化。地球环境变化和人类活动改变了水文循环的路径,全球气候变化影响了水文循环过程的上边界,经济社会发展所致的高强度人类生产生活活动深刻地改变着水文过程的下边界。随着科技的不断发展,人们试图集成多重时空尺度上自然、生态、经济、社会的动态过程于一体的愿望愈来愈强烈,人们需要准确知悉这种变化哪里影响最严重、是由哪里哪个因素引起的?高强度人类活动改变了的下垫面对洪旱灾害的影响程度如何?水体富营养化与土地利用变化的关系如何?改变的水文条件和水质状况组合使得生态特征退化到什么程度?这些问题的回答都需要水文过程模拟途径和方法的创新。

003

1 变化环境下的水文过程模拟

水对改进民生、增加福祉、环境健康的影响举足轻重。水是天气系统、气候系统的决定性要素。水在自然界中的作用极其重要、无可替代:它是最好的溶剂;它有巨大的热焓来调节气温;液态与固态间特有的“热缩冷胀”性质丰富了地球生物多样性内涵。如果地球表面没有水汽和二氧化碳,则大气平均温度会降低 33 摄氏度,其中 30 度是归功于水汽分子的贡献,3 度是二氧化碳的作用。

水文循环是联系地球系统地圈—生物圈—大气圈的纽带,是研究全球变化三大主题——碳循环、水资源和食物纤维转化的核心问题之一。一个区域的水文循环既受气候系统的控制,又受陆面系统的影响。气候系统决定降水的范围、总量、年内分配和年际变化;陆面系统决定水资源的赋存环境、地表径流量、地下水资源量、河道枯季径流量以及河流水系特征。由于人口的膨胀、技术经济的发展,水文循环的自然过程不断受到两类人类活动的影响:一是通过排放温室气体改变大气辐射强迫条件,引起气候变暖,将使水循环加快,造成陆地降水分布不均匀,加剧旱涝等自然灾害;另一是通过土地利用的变化,如森林砍伐、农田开垦、植树造林、交通建设、矿产开采、城市化等土地利用活动直接改变流域下垫面特性,影响降雨的截留、下渗、蒸发等水文要素及其产汇流过程,进而影响流域出口断面的流量过程,改变流域洪涝、干旱等灾害发生的频率和强度。前者导致全球气候与水循环动力学特征发生变化,后者改变了区域水量平衡要素的时空分布特征。

人类对水循环的干扰改变了地球上水的动力作用和过程,水循环的各个阶段与状态是联系在一起的,人类对水循环某个方面的影响会转移至其他方面。认知水在地球系统的过去、现在、将来的物理效应已经成为水文学学科的核心任务之一。探究水循环,必须把人类活动视为一项重要因子。1991年美国科学院国家研究理事会出版《Opportunities in the Hydrologic Sciences》之后,2012年初该理事会又发布了《Challenges and Opportunities in the Hydrologic Sciences》,提出了未来十年水文学学科具有挑战性的三大关键科学领域或方向:①水循环——变化的动因;②水与生命;③为人类与自然提供清洁水源。传统意义上认为,气候变化、农业生产、城市化、交通建设、矿产开采、能源开发等驱动下地球要素的变化导致水文循环通量发生变化,其实还存在另一面:即水循环的变化致使地球生态系统发生了变化,譬如水流系统影响关键生态过程、水生生态系统生物类型的改变和消散。

全球和区域尺度的气候变暖及频繁的人类活动引起水文过程变化,气候变暖与洪水、持续干旱加剧之间的动力机制问题,已成为一个亟需解决的科学问题。继国际水文科学协会(IAHS)2003—2012年实施“无资料流域水文预报预测”(Predictions in Ungauged Basins,简称PUB)十年科学计划后,2011年7月澳大利亚墨尔本召开的国际大地测量学与地球物理学联合会(IUGG)第25届科学大会上,Sivapalan教授向IAHS倡议启动新一轮科学研究计划——变化环境下的水文预测(Predictions Under Change,简称PUC)^[1]。PUC指出深入理解和解决当今水问题需要科学预测淡水资源的动力过程、时空分布及水资源量^[2]。预测变化环境下的水循环动力学过程,需要理解当今水循环系统具有的三大特征:(1)流域具有非静态性,即流域结构(土地利用/覆被方式,河道与河岸、河道与湿地如何连接,流域内是否存在水工建筑物等)和流域外部驱动条件(如降水和气温条件)等均会发生变化;(2)水循环系统与其他生物、物理及社会系统紧密联系^[3];(3)水循环系统与人类社会相互反馈、相互作用^[4,5]。因此,预测变化环境下的水循环过程必须合理阐释流域结构、流域动力特征以及流域外部驱动条件的变化过程,必须考虑水循环与气候、地貌、生态、社会等要素的相互关联性,将人类社会与水循环系统紧密耦合,并融合水文学的“牛顿”方法(指基于系统的各个组成部分构建详细的水文物理过程模型,如西医诊断治疗方法或西装制作方法)和生态学“达尔文”方法(指运用机能整体性方法研究系统的变化方式和变化特征,如中医诊断治疗方法或日本的和服制作方法),发展新一代的、非静态的水循环系统演进模型。

2011年7月墨尔本IUGG第25届科学大会期间,大家普遍认为:IAHS启动的PUB十年计划非常成功,在世界范围内水文科学领域确实起到了引领作用,同时通过PUB计划也促进了协会自身建设,产生了一系列具有科学价值的成果。为延续这种引领角色,建议在2013年瑞典哥德堡IAHS第9届科学大会上发布IAHS未来十年(2013—2022)科学计划。IAHS执行局指使意大利博洛尼亚大学

Alberto Montanari 教授领衔成立 IAHS 新十年计划起草委员会,通过网络博客、2012 年 4 月奥地利维也纳召开的欧洲地球科学联合会(EGU)科学大会、同年 5 月河海大学召开的 IAHS 新十年科学计划国际研讨会、同年 10 月突尼斯国际水文水资源管理统计方法研讨会以及 Delft 技术大学举行的 IAHS 成立 90 周年纪念暨 PUB 计划总结大会等形式,确定 IAHS 新十年计划的主题为“水文系统变化与社会的相互作用”,宗旨是解读迅速变化的自然环境和人类系统驱动下水循环过程变化动力学,加强水文学科在社会发展中的作用。IAHS 新十年计划设有三项目标:(1)认知(Understanding)水文系统并不断更新之,着重是水文系统的变异性、非确定性、变化之响应、与人类活动的相互作用,特别要关注诸如山区(冰川)、城市、冲积扇、三角洲复杂系统以及与社会相互作用的其他系统;(2)估计与预测(Estimation and Prediction)水文系统的行为与模式,包括支撑风险评价的不确定性评估、变化条件下水文参数和设计变量的估计;(3)科学应用(Science in Practice),包括新技术新方法的实际应用、社会需求、政策制订等。新十年计划涉及五大科学问题:(1)怎样认知正在变化的水文系统的行为特征;(2)如何将最新的原理、知识、方法应用于非确定性模拟和不确定性评估,以提高预测精度;(3)怎样研制可靠、完好的科学模拟工具和软件;(4)在新一代模型里如何运用新观测数据和新信息技术;(5)怎样模拟水文过程(譬如地表水与地下水)相互作用的界面和复杂水文系统。

独特的地理位置和复杂多样的气候特征决定了中国是一个洪旱灾害频发的国度。中国的水多(洪涝)、水少(旱)、水脏(污染)、水浑(泥沙冲淤)问题是世界级的难题;另一方面,我国处于经济转型期和战略机遇期,是世界上近 20 年来变速最快、变化总量最大的国家。近年来,随着我国经济建设的迅猛发展和国家的“十一五”、“十二五”战略目标的实施,我国对变化环境下的水文水资源及其可持续利用的研究所提出的要求也越来越高。“加强全球环境公约履约对策以及对气候变化科学不确定性及其影响的研究”已列入了我国中长期科学技术发展规划纲要(2006—2020 年)的重点,而且“大尺度水文循环对全球变化的响应以及全球变化对区域水资源的影响”已成为“实施国家重大战略的必不可少的基础研究”。

流域水文过程非常复杂,水文现象存在必然性与偶然性,流域对降水过程的响应,具有确定性和不确定性,相应地模拟、预测水文过程的模型有物理概念性(演绎逻辑)和数理统计性(归纳逻辑)之分。总体而言水文过程有周期性,没有重复性,具相似性,没有相等性,因此水文研究方法论中不仅要采用演绎逻辑、归纳逻辑的思维方式,还要运用类比逻辑和相似准则,尤其要注重各类逻辑思维方式的组合。水文过程复杂性的根源,在于水文循环路径“组合”的多样性和变动性。由于背景环境的变化和不确定性的干扰,传统水文学途径的基础发生了动摇,水文学科摆脱困境之路是强化对“组合”的研究。

近 20 年来,宏观尺度上的卫星遥感技术和微观尺度上的化学分析仪器设备、

同位素技术的革新,为人类探究水文规律提供了前所未有的多源信息与多维数据,而高性能计算机能力的增加使水文模拟能力极大增强。水文科学发展到今天,已经成为地球科学中独特的、关键性的组成部分,它联结着大气、陆地、海洋的研究,同时支撑着对地球生命系统的研究。透过其本质,可以看出:水文科学处于包括大气科学、生态学、生物科学在内的地球科学的跨学科的界面上。无论从全球尺度还是局地尺度来看,人类对水的可持续性具有决定性的影响。美国的例证给我们启迪:20世纪90年代美国要求城市化后不能增加下游河道两岸的洪水风险;2000年以来要求城市化后不仅不能增加下游河道两岸的洪水风险,还要保持原有的局地水量平衡要素不变。由于组成自然界的各个部分相互作用,以及自然系统各种联系和作用的高度非线性,叠加人类活动的影响,使得宏观尺度的水文研究变得更加复杂,全球水危机将继续以不同方式显现出来,解决问题的途径不仅需要科学家和工程师之间的协同创新,还需要水文工作者与经济学家、社会学家、政治学家、心理学家的沟通合作。

2 分布式水文模型研究进展

陆面水文过程是高度非线性且时空不均匀变化的,它对大气强迫场、下垫面地形、土壤和植被等因素的时空变异性非常敏感^[6]。模拟变化环境的水文响应过程,必须深入研究陆-气耦合系统的物理机制,建立认识陆地水循环演化格局的空间信息支撑系统、陆地水循环过程变化的实验研究支撑系统、可定量描述变化环境影响的分布式水文模型^[7]。

分布式流域水文模型充分考虑水文过程、输入变量、边界条件和流域几何特征的空间差异性,通常可分为概念性分布式水文模型和具有物理基础的分布式水文模型。概念性分布式水文模型多为松散结构,即假设流域中各子流域或子单元的水文响应相互独立,整个流域的水文响应是通过对各子流域或子单元的水文响应进行叠加计算得到;具有物理基础的分布式水文模型具有紧密耦合的模型结构,即采用一组微分方程及其定解条件构成的定解问题描述流域产汇流规律^[8]。

国外对于分布式流域水文模型的研究始于1969年Freeze和Harlan发表的一篇名为《一个具有物理基础数值模拟的水文响应模型的蓝图》的论文^[9]。随后,Hewlett和Troenale于1975年研制了森林流域的变源面积模拟模型(简称VSAS),该模型分层模拟地下径流、分块模拟坡面径流。1979年Beven和Kirkby^[10]研制了以变源产流面积为基础的TOPMODEL模型(TOPgraphy based hydrological MODEL)。该模型基于数值高程模型DEM(Digital Elevation Model)计算地形指数,以此表征地形的空间变化对流域水文循环过程的影响,该模型参数具有物理意义,适用于无资料区域的水文过程模拟。但TOPMODEL并未考

虑降水、蒸发等要素的空间分布对流域产汇流的影响,因此,该模型不是真正意义上的分布式水文模型,可归类为半分布式水文模型。1980年以后,由丹麦、法国、荷兰及英国的水文学者联合研制的 SHE(European Hydrological System,法语缩写为 SHE)模型^[11, 12],是一个真正意义上的具有物理基础的分布式水文模型。该模型采用质量、能量或动量守恒的偏微分方程的差分形式描述主要水文物理过程。自 SHE 模型诞生以后,水文学者陆续研制了一系列分布式水文模型,如美国工程兵团研制的 CAS2D 模型即为一个典型的分布式水文模型,该模型利用 DEM 描述流域地形地貌^[13]。1994 年,Jeff Arnold 为美国农业部(USDA)农业研究中心(ARS)开发了 SWAT 模型(Soil and Water Assessment Tool)^[14]。SWAT 是一个具有全面物理机制的流域水文模型,可采用地理信息系统 GIS(Geographic Information System)和遥感 RS(Remote Sensing)提供的空间信息,模拟复杂流域的多种水文物理过程^[15]。

我国分布式水文模型的相关研究始于上世纪 90 年代。1995 年,沈晓东研究了降雨时空分布与下垫面自然地理参数空间分布的不均匀性对径流过程的影响,以此为基础研制了一种基于 GIS 的动态分布式降雨-径流模型,实现了基于栅格 DEM 的坡面产汇流与河道汇流的数值模拟。1997 年,黄平和赵吉国^[9]分析了国外一些具有物理基础的分布式水文数学模型,提出了流域三维动态水文数值模型的构想。2000 年,郭生练等^[16]建立了一个基于 DEM 的分布式流域水文物理模型,模拟小流域的降雨-径流时空变化过程。任立良^[17]进行了数字水文模型研究,并基于 DEM 考虑流域地形的空间差异性,在数字高程流域水系模型的基础上应用新安江模型构建了松散耦合型的分布式数字水文模型。2001 年,郭生练等^[18]建立了基于地理信息系统 GIS 的分布式月水量平衡模型。2002 年,俞鑫颖和刘新仁^[19]建立分布式冰雪融水雨水混合水文模型。夏军^[20]将时变增益非线性水文系统 TVGM 与 DEM 结合,开发了分布式时变增益水文模型 DTVGM。这些研究极大地促进了分布式流域水文模型的发展。

分布式水文模型考虑了降雨的空间变化、流域下垫面特性的空间变异性,如土壤质地、地形、土地覆被的空间分布,是深入探讨流域水文过程物理规律的有力工具。具有物理基础的分布式水文模型虽然较为充分和合理地描述了流域下垫面特性和水文物理过程,但多数模型只限应用于小尺度流域上。主要原因有:(1)具有物理基础的分布式水文模型通常基于小流域试验而建立,该模型对某些水文过程的描述和量化仅适用于较小的时空尺度,如下渗、蒸散发、坡面流和壤中流运动等^[17]。当把这些在小尺度上获得的规律应用较大尺度时,很可能会产生偏差,使模拟的产汇流过程在一定程度上失真。(2)目前模型输入信息的空间分辨率和精度还不能充分满足该类水文模型的要求,具有物理基础的水文模型所需的物理参数较多,且在目前的测量精度和测量范围内精确测量模型的物理参数较为困难,而

采用实测径流资料率定模型参数有可能增加参数的不确定性。虽然具有物理基础的分布式水文模型在实际中没有进一步地推广,但它具有详尽的物理机制,能描述流域内水文循环的时空变化过程;其分布式的结构易与大气环流模式(GCM)嵌套,适用于研究气候变化对水文循环的影响;基于数字流域建模,能合理模拟和预测人类活动和下垫面因素变化对流域水文循环过程的影响^[21],且随着遥感技术的不断应用,尤其是雷达测雨等新信息源的出现,以及计算机性能的提高,为具有物理基础的分布式水文模型提供了更为广阔的发展空间,因此具有物理基础的分布式水文模型是未来水文模型发展的方向,也是模拟变化环境中水文物理过程的有效工具。

3 土地利用/覆被变化的水文响应研究进展

土地利用/覆被变化(LUCC, Land Use and Cover Change)改变了流域下垫面物理特性,将显著影响流域、区域甚至全球尺度的水文过程^[22]。土地利用是指直接利用土地资源的人类活动,这种人类活动干预了决定土地覆被功能的生态物理过程^[23]。土地覆被是指地表的外观,受其土地利用方式、耕作方式和季节性特征影响。自然、经济或政治条件的变化使自然需求或人类需求发生改变,从而引起流域的土地利用和土地覆被发生变化^[24]。土地利用/覆被变化通常是一种人为的“系统干扰”,它直接或间接影响水文过程的第二个主要边界条件^[25]。LUCC改变了水循环过程中的地表蒸散发、土壤水分状况和地表植被的截留等,影响流域水量平衡的要素及其时空过程^[26]。在人类经济活动的驱动下,全球众多区域的森林植被不断受到农业活动和城市化进程的破坏,引起森林覆盖率不断降低。这些活动不仅破坏森林截留和涵养水源的能力,干扰了区域水循环系统,而且还可能不断增加下游洪水的发生频率和强度。

3.1 土地利用/覆被变化对蒸散发的影响

蒸散发是大气辐射、蒸发面可获得的水量、蒸发面与大气之间水汽输送及空气动力学因子在特定的土地利用/覆被条件下达到平衡的结果。土地利用/覆被变化会影响河道或湖泊的水面积、植物可利用的土壤水分状况以及地表植被的物候生理特性(叶面积指数、气孔响应)等要素,从而改变流域蒸散发的时空分布^[22]。受围湖造田或退湖还耕等人类土地利用活动的影响,流域自由水面的面积将减小或增大,从而影响流域蒸散发。由于森林植被较草地植被具有更深的根系,即使在土壤水分比较亏缺时,仍能从深层土壤中汲取水分,维持正常生物生理需求。由于森林植被的粗糙高度较大,其庞大的树冠有利于水汽的动力传输,与低矮植被相比,森林植被的空气动力学阻抗较小,因此森林植被的蒸散发率通常高于低矮植被。

Dunn 和 Mackay^[27]在英国 Tyne 流域的试验表明森林植被的蒸腾量要远大于低矮植被。

3.2 土地利用/覆被变化对截留的影响

截留是指植物枝叶拦截降雨的现象。降雨期间,植被叶面首先聚集离散的水珠,然后各水珠相连成为铺盖在叶面上的水层,水层不断增厚,终因水层的重力超过枝叶与水的附着力,一部分降水穿过枝叶间隙落到地面,另一部分沿枝干流至地面,只有留存在枝叶上的部分成为截留。截留量由两部分组成:(1)降雨过程中从冠层叶面蒸发的降雨量;(2)降雨终止时冠层叶面存留的水量,这部分也最终消耗于蒸发。在水文循环中,截留具有增加蒸发、减少到达地面的降雨,进而减少径流的作用。对一次洪水过程,特别是大洪水,截留对径流的影响并不显著,但对于年降水量而言,发育良好的树冠的年截留量可达年降水量的 10%~20%^[28]。截留量与植被类型紧密联系。Dickinson^[29]认为植被最大截留量近似等于 0.2 倍的叶面积指数(LAI),因此当冠层稠密的植被转换为冠层稀疏的植被时,通常会引起冠层截留量的减少。

3.3 土地利用/覆被变化对径流量的影响

在多雨区,森林可截留较多降水,森林的蒸散发通常高于其他土地利用区;在少雨区,由于森林根系较深,能充分吸收深层土壤水和地下水,森林的蒸散发损失通常高于其他作物^[30],因此多数研究表明无论在降水充沛还是较少的地区,砍伐森林会引起年径流量的明显增加。

森林与产流关系的研究最早开始于 1900 年瑞士 Emmental 山区的小流域对比试验,样本中一个流域为森林流域(森林覆盖率达 99%),另一个流域则以草本植被为主(占 69%,森林占 31%)。自 1927 年到 1956 年的观测资料表明,森林流域年径流量较草本植被为主的流域低 11%,主要原因为森林流域的土壤水分入渗能力较高和融雪速率较慢^[30]。Bosch 和 Hewlett^[31]分析了全球 94 个试验流域的水文资料,得出结论:将 10%的草地覆盖改变为松树和桉树,年径流深将减少 40 mm;将 10%的草地覆盖改变为落叶硬木或灌木覆盖,年径流深将减少 10~25 mm。根据 Bosch 和 Hewlett^[31]研究的 55 个流域,以及美国 Piedmont 南部的 10 个流域,Trimble 等^[32]采用回归关系确定了河川径流减少量 $Y(\text{mm})$ 与森林覆盖的变化百分数 X 的关系为: $Y=3.26X$ 。Cadler^[33]研制了一种计算土地覆被变化对径流量影响的半经验模型,并应用于英国苏格兰高地地区,结果表明该地区森林流域的年蒸散发量是草地流域的 2 倍以上,年径流深为草地流域的 80%~85%。刘