

中国水论坛 No.12

China Water Forum
No.12

变化环境下的水科学 与防灾减灾

陈兴伟 陈莹 高路 刘梅冰 主编



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

中国水论坛 No.12

变化环境下的水科学 与防灾减灾

陈兴伟 陈莹 高路 刘梅冰 主编



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书为第十二届中国水论坛论文集，全书共分 3 个部分，即变化环境下水循环、变化环境下水资源可持续发展、水与灾害。全书汇集 58 篇论文，百余位水资源等领域专家就“变化环境下的水科学与防灾减灾”进行了探讨和成果展示，为中国水问题的解决提供了一些方法、思路和措施，以期在经济、社会、环境科学发展过程中的水支撑研究提供科学依据和智力支持，具有一定的学术价值。

本书适合流域/区域气候变化、水资源与环境、水文过程与技术、农业与生态及城市规划等方面的专家、学者以及相关高等院校、科研工程人员参考。

图书在版编目（C I P）数据

变化环境下的水科学与防灾减灾 / 陈兴伟等主编
． -- 北京：中国水利水电出版社，2015.6
（中国水论坛；12）
ISBN 978-7-5170-3499-5
I. ①变… II. ①陈… III. ①水文学—文集②水灾—
灾害防治—文集 IV. ①P33-53②P426.616-53

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第185925号

书 名	中国水论坛 No.12 变化环境下的水科学与防灾减灾
作 者	陈兴伟 陈莹 高路 刘梅冰 主编
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
经 售	电话：（010）68367658（发行部） 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	北京三原色工作室
印 刷	北京九州迅驰传媒文化有限公司
规 格	184mm×260mm 16 开本 24.5 印张 812 千字
版 次	2015 年 6 月第 1 版 2015 年 6 月第 1 次印刷
定 价	88.00 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

第十二届中国水论坛论文集
《变化环境下的水科学与防灾减灾》
编委会

顾问：王 浩 刘昌明 张建云 郭生练 王光谦

夏 军 汪文顶 杨玉盛 林国庆

主编：陈兴伟 陈 莹 高 路 刘梅冰

委员：（按姓氏拼音顺序）

陈 芬 方艺辉 郭晓英 黄 婕 林 峰

林木生 林志东 冉建波 王 壬 吴道祥

吴杰峰 张德健 钟科元

第十二届中国水论坛及本书的出版得到了

“国家基础科学人才培养基金项目(福建师范大学地理学基地科研训练及科研能力提高项目)”和“中国科协-学会能力提升专项优秀科技社团奖项目”的资助

前 言

2014年10月31日至11月2日,第十二届中国水论坛在福建省福州市召开。本届水论坛由中国自然资源学会水资源专业委员会、中国可持续发展研究会水问题专业委员会、中国水利学会水资源专业委员会、中国水利学会水文专业委员会、中国地理学会水文地理专业委员会主办,福建师范大学、福建省水利学会、湿润亚热带山地生态省部共建国家重点实验室培育基地、福建省陆地灾害检测评估工程技术研究中心等单位共同承办。来自27个省(直辖市、自治区)的80多所高校、科研机构及相关企事业单位的300多名代表包括台湾大学、香港中文大学的专家,出席了本届水论坛。这是一次两岸三地水科学领域专家学者的盛会。

本届中国水论坛以“变化环境下的水问题与防灾减灾”为主题,分为变化环境下流(区)域水循环、变化环境下区域水资源可持续发展、水与空间信息科学、水与灾害等4个主要专题。刘昌明院士、王浩院士和夏军教授等作了大会特邀、主题报告,100多人在4个分会场和特设的青年会场报告了各自的研究成果。这些成果从水循环机理出发,科学解释变化环境对水科学、水灾害的影响;并从管理、现代技术出发,从多学科交叉、多学科视野探讨了防灾减灾问题,为经济、社会、环境科学发展过程中的水支撑研究提供科学依据。

本次会议共收到参会论文和摘要200多篇,其中通过会议报告与专家组评议,评选出10篇优秀青年论文,由中国自然资源学会颁发证书,中国水利水电出版社颁发奖金;58篇优秀论文由中国水利水电出版社结集出版。

中国水利水电出版社的编辑为本论文集的出版付出了辛勤的工作，在此特别致谢！

由于编者水平有限，论文集难免存在不足甚至错误之处，敬请广大专家读者不吝赐教。

编 者

2015 年 3 月

目 录

前言

变化环境下水循环

气候变化及人类活动下水文水资源影响研究综述	郭靖, 王航, 郭富强, 刘金华 (2)
半干旱半湿润流域模型结构与流域特性的联结分析	李致家, 姜婷婷, 黄鹏年 (8)
泾河东川近期水沙变化对高强度人类活动的响应	冉大川, 焦鹏, 姚文艺, 李晓宇 (15)
气候变化对干旱区作物生产和耗水的影响	杨艳敏, 杨永辉, 韩淑敏, Ian Macadam, De Li Liu (23)
暖湿化背景下南北疆水分收支平衡变化的差异研究	郑子彦, 马柱国, 李明星 (32)
基于小波变换的修文县多年降水变化特征	陈学凯, 张泽中, 商崇菊, 古今用 (41)
太湖流域平原河网地区水系分布格局时空演变	邓晓军, 许有鹏, 韩龙飞, 杨柳 (50)
安庆市降雨变化规律和空间分布关系研究	时召军, 朱梅, 许良元 (57)
黑河流域极端降水概率分布特征分析	李占玲, 李占杰, 王月华, 赵韦 (63)
石羊河流域极端降水概率分布拟合及其分析	王月华, 晏西军, 李占玲, 赵韦 (72)
石羊河流域极端降水的广义 Pareto 拟合	赵韦, 韩泽, 李占玲, 王月华 (79)
金钱河流域径流序列变化分析	田开迪, 韩颖, 沈冰, 黄玲梅, 常肖杰, 蒋春宇 (87)
小尺度试验田土壤盐分研究	常肖杰, 董樑, 张晓龙, 田凯迪, 沈冰 (94)
无定河流域暴雨定点定面关系分析	蒋春宇, 黄领梅, 沈冰, 张晓龙 (98)
人工湿地植物蒸散量的试验研究	张倩, 沈冰 (101)
广州市降水量的乘积季节模型研究	银磊, 陈志和, 朱志华 (106)
基于基尼系数的龙川站洪水过程均匀度变异分析	陈海健, 谢平, 谢静红, 李彬彬, 雷旭, 张波 (111)
长江大通站径流序列多尺度变异特征及归因分析	陈广才, 高华斌, 许斌 (116)
基于分布式水文模型的子牙河平原冬小麦夏玉米轮作体系水分利用率模拟研究	潘登, 任理 (121)

变化环境下水资源可持续发

基于人水和谐理念的三条红线量化研究	张志强, 左其亭 (128)
洞庭湖三口河系地区水资源合理配置初探	曾祥攀, 莫淑红, 肖伟华 (137)
基于协同学原理的区域水资源系统可持续性评价——以广东省中山市为例	陈志和, 位帅 (144)
基于评价-模拟-优化的区域水资源系统可持续性研究	王壬, 陈兴伟 (150)
河湖水系连通与经济社会发展典型相关分析	臧超, 左其亭 (157)
气候变化影响下海河流域未来水资源脆弱性及适应性对策研究	石卫, 夏军, 陈俊旭, 雒新萍, 洪思, 宁理科 (164)
江苏省南水北调东线受水区水资源配置研究	曾春芬, 杨树滩, 王腊春, 张静超, 宋丹丹 (172)

渭河流域水生态分区指标构建及一、二级分区	于松延, 徐宗学, 刘星才, 武玮 (180)
陕西卤泊滩水盐动态监测试验与模拟研究初探	董樑, 权全, 沈冰, 张晓龙, 潘延鑫, 韩霁昌 (188)
文安县工业新区可供水水源探析	覃琳, 莫淑红 (195)
东湖流域水资源承载力变化特征分析	汪嘉杨, 宋培争, 徐源蔚, 王卓 (199)
变化环境下北方渠井结合灌区地下水调蓄与管理问题研究	魏晓妹, 降亚楠, 赵孟哲, 李萍 (203)
城市水资源配置中退水问题研究初探	李析男, 赵先进, 周娅, 杨荣芳, 郝志斌 (208)
突泉县水资源可持续发展策略分析	杨春花, 董耀华, 常福宣 (212)
建立流域的生态补偿横向转移支付机制	彭贤则, 张李啦 (218)
南四湖流域水资源供需平衡分析	董洁, 张庆华, 刁艳芳, 庞志平 (222)
水与空间信息科学随机天气生成器: 从单站点到多站点模型	陈杰, 赵姹, François P. Brissette (227)
利用微波遥感数据计算土壤含水量方法对比研究	张成才, 李红斌 (241)
不同目标函数对洪水预报精度的比较研究	揭梦璇, 陈华, 许崇育 (244)
作物水分状况高光谱遥感监测研究进展	姚付启, 孙金伟, 涂人猛, 乔伟 (250)
无资料地区洪水预报模型参数区域化方法研究及应用	万蕙, 夏军, 宋霁云, 余敦先 (255)
DHSVM 模型改进及在乌鲁木齐河源径流模拟中的应用	崔玉环, 王杰, 刘友存 (262)
新安江模型在湘江流域水文极值模拟的应用及分析	曾强, 陈华, 许崇育 (272)
灌区三维地理信息系统的关键技术研究	孙喜梅, 余洋 (281)
流域离散化对分布式水文模型不同时间尺度径流和泥沙模拟的影响	钟科元, 陈兴伟, 陈莹 (285)

水与灾害

基于小波分析的威宁县非一致性干旱频率分布规律研究	李彬彬, 谢平, 梁志杰, 陈丽 (292)
气候变化与人类活动对流域水文干旱的影响评估——以海河北系为例	翟家齐, 赵勇, 裴源生, 蒋桂芹, 肖伟华 (297)
湿地演替带氮污染时空分布特征及影响因子分析	李章平, 周念清, 刘晓群 (303)
游程理论在黄河干流上中游干旱特征分析中的应用	魏婷, 宋松柏 (311)
水电站最大过水能力概念及其规律分析	刘蕊鑫, 纪昌明 (316)
灰关联评估方法在水质评价中的应用	王超, 夏军 (323)
基于 LID 措施的城市排水管网能力提升研究	朱志华, 陈志和, 银磊, 姜传勇 (331)
典型滨海流域水利工程联合调度研究——以浙江省永宁江流域为例	余文公, 陈小芳, 陈吉江, 王玉琼, 黄剑 (339)
湖泊湿地生态系统水动力水生态数学模型	王生愿, 张万顺, 杨寅群, 王永桂, 刘浩, 曾子龙 (347)
基于 MIKE FLOOD 的城市排水能力与洪水危险性评估	初祁, 张志果, 徐宗学, 彭定志 (352)
丹江口水库突发性水污染事件预警系统的开发及应用	杨司嘉, 彭虹, 王永桂 (359)
多变量洪水重现期计算研究	史黎翔, 宋松柏 (364)
基于 GIS 的城市湖泊流域水文水动力学模拟	洪林, 陈浩, 梅超, 赖永明, 曾子悦 (370)
基于高分影像分析矿产开采对区域地表水环境的影响——以安徽省马鞍山矿区为例	王杰, 崔玉环, 晏实江, 陆胤昊 (378)

变化环境下水循环

气候变化及人类活动下水文水资源影响研究综述*

郭靖¹, 王航², 郭富强³, 刘金华¹

(1. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 杭州 310014; 2. 吉林省气象服务中心, 长春 130062; 3. 福建水口发电集团有限公司, 福州 350004)

摘要: 气候变化和人类活动对水文水资源及其伴生过程的影响日趋明显, 已成为水科学研究中的热点。本文针对气候变化和人类活动两个驱动因素, 分别综述了气候变化、人类活动和两者综合对水文水资源影响的研究进展; 介绍了气候变化情景、降尺度技术、土地利用/覆被变化情景; 阐述区分气候变化和人类活动对水文要素影响的研究方法。最后提出当前研究中存在的问题, 并展望未来研究趋势。

关键词: 气候变化; 人类活动; 水文水资源; 综述

1 引言

水资源是人类生存的生命线, 是世界经济可持续发展、人类社会进步和生态环境良性循环最基本的物质支撑条件。自工业革命以来, 大气中的二氧化碳浓度从 280×10^{-6} 增加到 1989 年的 355×10^{-6} , 2013 年已超过 400×10^{-6} , 并仍以近 $1.8 \times 10^{-6}/\text{a}$ 的速度在继续增长。再加上其他一些温室气体也在缓慢增加, 大气成分和辐射强迫发生改变, 气候系统的能量平衡遭到破坏, 使自然环境的演化过程发生了巨大的变化。气候变化将加剧水循环过程, 驱动降水量、蒸发量等水文要素的变化, 改变区域水量平衡, 影响区域水资源分布。同时, 伴随着人类社会工业化进程的逐步推进, 人类活动对流域水循环的干预强度日益增大^[1]。人类活动(如水利工程、灌溉、排水及城市化和工业化等)以土地利用/覆被变化(LUCC)的形式改变了地表植被的截留量、土壤水分的入渗能力和地表蒸发等因素, 影响流域产汇流机制, 进而影响流域水资源时空分布。相关研究结果表明: 较长时间尺度上, 气候变化对水资源的影响更加明显, 但短期内土地利用/覆被变化为代表的人类活动是水资源变化的主要驱动因素之一^[2]。

气候变化和人类活动作为变化环境的两个重要体现和组成部分, 其带来的水文效应问题受得各国学者的广泛关注, 成为水科学研究中的热点, 如政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)、世界气候研究计划(World Climate Research Programme, WCRP)、国际地球生物圈计划(International Geosphere-Biosphere Programme, IGBP)、国际水文计划(International Hydrological Programme, IHP)和全球水系统计划(Global Water System Programme, GWSP)等。通过开展以上研究工作, 旨在从全球、流域(区域)尺度探讨变化环境下水循环及相关资源环境问题。我国作为一个水资源时空分布不均, 洪涝干旱灾害严重, 水资源供需矛盾突出的国家, 也积极开展一系列的科学研究, 探讨变化环境下水文水资源演变机理, 系统评价各种驱动因子的相对作用与贡献。这些工作不仅对我国变化环境下的流域水资源规划管理具有十分重要的科学意义和应用价值; 同时, 对于保证流域社会经济可持续发展、维护河流健康生命, 实施最严格水资源管理制度, 制定各地区产业结构及产业发展规划和政策, 缓解我国水资源短缺, 保障水资源可持续利用和国民经济可持续发展也具有重要参考价值。总体来说, 国内外学者

* 基金项目: 基于气候变化及人类活动的未来流域水资源演变趋势预估研究(国家自然科学基金, 编号: 41401018)。

第一作者简介: 郭靖(1982—), 男, 陕西榆林人, 博士, 高级工程师, 研究方向为气候变化下水资源开发利用研究。

E-mail: guojingking@163.com

在该领域开展了大量的研究工作,并取得了丰硕成果,但仍然存在较多的问题有待进一步深入研究。

本文主要从气候变化、人类活动及两者综合等方面总结对水文水资源影响的研究进展,同时提出目前研究存在的难点问题,并对该领域研究方向进行展望。

2 气候变化对水文水资源影响研究

2.1 气候变化情景生成及尺度降解技术

由于目前还没有可以直接利用和可靠的区域气候变化预测方法,因此在气候变化对区域水资源影响的研究过程中,总是利用不同方法间接得到未来的气候变化情景。主要采用的是所谓 What-if-Then 模式^[3],即假定气候发生某种变化情景,将其作为流域水文模型的输入,研究流域内水循环各个分量在该种情景下的变化情况。

由于区域气候变化的复杂性和不确定性,以及 GCMs 对水文、陆地表面过程参数的定量过分简化,气候学家还难以准确地预测未来区域气候变化。因此,在气候变化影响评价中,采用“情景”(Scenario)一词来描述未来气候变化状态^[4]。目前,生成未来气候变化情景的方法主要有任意情景设置、时间序列分析和基于 GCMs 输出等 3 种基本方法,其中基于 GCMs 输出方法是探讨气候变化对水文水资源影响最为常用的方法^[5]。考虑全球气候模式的现有分辨率,直接应用于区域尺度上难以满足实际需求。对于区域尺度,气候变化不仅受到区域内部各种相关因子的影响,在相当程度上受到全球气候影响,其不确定性更大,所以必须将 GCMs 输出降解到区域尺度上,作为水文模型的输入条件以便开展相关研究^[6]。

目前全球气候模式尺度降解技术主要包括动力降尺度法、统计降尺度法及统计与动力相结合的降尺度法等 3 种^[7]。动力降尺度方法由于物理意义明确,对观测资料依赖小,应用前景较好,但由于计算复杂,现阶段实际应用受到较大的制约;统计降尺度计算相对简单,目前多采用该方法进行研究的较多^[8-9]。此外,统计和动力学相结合的降尺度方法兼顾了统计降尺度和动力降尺度的有点,但目前仍处于探索阶段,理论和应用仍需要进一步完善^[10]。常用的统计降尺度方法有转换函数法,环流分型技术和天气发生器^[9]。随着统计降尺度方法技术的完善,融合多种方法的混合降尺度模型得到发展,如由 Wilby 等结合多元线性回归和天气发生器特点研制的 SDSM (Statistical Downscaling Model) 模型^[11-13]和 Hessami 等开发的基于 MATLAB 环境的 ASD (Automated Statistical Downscaling model) 模型^[14-16]等。

目前统计降尺度方法相对较多,各国学者们对不同的统计降尺度方法做出了比较研究^[17-19]。综合学者们得到的结论不难看出:不同的统计降尺度方法各有其优缺点,在不同区域、不同的情形下,选用不同的统计降尺度法模拟效果会不同。如何评价不同方法的使用条件,适用范围及其对不同模拟对象(均值、极端值、干湿天天数等)降尺度的优势和不足是今后研究的重点。需要建立统一的方法评价标准,以便用户可以结合不同的气候条件、研究区域、研究对象和时间尺度选择合适的方法。

2.2 气候变化情景下水文要素影响模拟及定量评估研究

结合全球气候变化模式,通过降尺度方法和水文模型耦合,对不同气候变化情景下流域尺度水文要素影响进行模拟,定量评价气候变化对水循环过程的影响,预估未来的水文水资源情势。选用水文模型时主要考虑以下几个因素:模型内在的精度、模型结构及参数、模型的通用性和与 GCMs 的兼容性等几方面内容^[2]。目前用于模拟区域水循环对环境变化响应的水文模型主要有经验统计模型、概念性水文模型和分布式水文模型。经验统计模型主要根据径流、降水与气温等观测资料,建立要素之间的相关关系,模拟和评价径流的变化^[20]。概念性水文模型建立在水量平衡的基础上的,描述降雨,经过蒸发、入渗、产流等过程在流域出口断面产生的径流量。目前应用的概念性流域水文模型主要有:SIMHYD^[21]、HBV^[22]、Sacramento^[23]等,国内有新安江模型^[24]、两参数水量平衡模型^[25]等。分布式水文模型按流域地形、植被、土壤、土地利用和降水等的不同,将流域划分为若干个水文响应单元,在不同单元用不同参数反映该单元的流域特性,其格网特性更适合与 GCMs 耦合。目前应用的具有代表性的分布式水文模型有 SWAT^[26]、Mike-SHE^[27]、DHSVM^[28]及 VIC^[29]等。总结以上研究可知采用流域水文模型研究气候变化对流域水文水资源影响方面有两个明显的趋势:①从统计模型向概念性水量平衡模型和基于物理过程描述的分布式流域水文模型转化,水文水资源特征对气候变化的响应机理更清楚;②在模型的计算时段上,也从较大的时间

尺度(月)向小的时间尺度(日)转化,便于了解流域水文水资源特征的实时变化。

3 人类活动对水文水资源的影响研究

由于人类活动的水文效应具有双向性,定量计算人类活动对水文的影响具有相当大的难度。人类活动对水文的影响一般只能估算,有时甚至只能作定性分析。估算人类活动对水文的影响常用方法大致分3类:①根据长期水文观测资料,使用统计方法进行对比分析和估算^[30];②根据水量平衡原理,建立水量平衡的物理或数学模型,变动模型中某项因素,估算该项因素受人类活动影响的单独效应^[31];③流域水文模拟法,该方法用人类活动影响之前的资料率定流域水文模型参数,然后用率定后的模型来推求人类活动影响之后的流域水文过程,并与实测资料进行对比^[32]。但是,人类活动具有高度的不确定性,这些方法得到的结果可信度不高。如果从人类活动的一个主要方面(例如土地利用/覆盖变化)来计算对水文的影响,计算中的不确定性因素就会得到有效控制^[33]。

目前,国内外都有许多关于土地利用/覆盖变化对水文的影响研究。Onstad等^[34]最先尝试运用水文模型法预测土地利用变化对径流的影响。目前国内外多应用SWAT^[35-36]、VIC^[37]、Mike-SHE^[38]、SCS^[39]等模型研究LUCC对径流变化的影响。水文模型法不仅能考虑流域综合因素对水文过程的影响,而且可以灵活地调整土地利用/覆被方面的个别或多个参数,从而有效地研究LUCC的水文效应^[1]。

由于人口、经济、技术发展等因素对土地利用变化有着直接的影响,土地利用/覆盖变化情景将充分考虑这些变化驱动因素^[40]。常用的土地利用/覆盖变化情景分析方法有参照对比法、历史反演法、模型预测法、极端土地利用法和土地利用空间配置法^[41]。其中参照对比法是以过去某一时间土地利用与研究区相似且未发生土地利用明显变化的邻近流域为参照进行对比分析^[42];历史反演法以过去土地利用/覆被状况作为当前或未来的土地利用情景进行研究^[43];模型预测法根据区域土地利用变化受到区域既定的自然、社会经济和政策条件的约束确定土地利用变化趋势^[44];极端土地利用法是假定研究区域仅有1种土地覆被类型,即通过极端情景的设计来分析研究区域水文响应的可能变动范围^[45];土地利用空间配置法是考虑土地利用变化的空间配置关系和相邻关系进行研究。以上方法均未将土地利用/覆盖变化与未来气候相结合^[46]。Rounsevell等^[47]提出了基于IPCC排放情景所描述的发展模式,融合生物物理和社会经济等驱动因素的土地利用/覆盖变化情景,把它成功应用于欧洲,并讨论了建立土地利用/覆盖变化情景的技术和概念难点。

4 气候变化和人类活动对水文水资源的综合影响和区分

水文要素变异主要受两类因素影响:气候变化驱动因素和人类活动驱动因素。气候变化对水文的影响主要是通过降水和蒸发的变异来实现,而人类活动主要通过下垫面土地利用/覆被变化以及取水用水的变异来实现。在过去的50年里,全球气候变化和人类活动对全球的水文水资源都产生了深远的影响。如何综合考虑及区分两种驱动因素对水文水资源系统的影响是今后研究的重点。

4.1 气候变化和人类活动对水文水资源的综合影响研究

在对气候变化和人类活动给水文资源带来的综合影响研究方面,Barlage等^[48]应用气象模型研究气候变化与土地利用变化对于流域降雨与径流的影响;郭华^[49]利用信江流域DEM、土壤、2000年土地利用资料及近50年气象、水文资料结合SWAT模型模拟并分析在不同气候和不同土地覆被情景下径流的产生及变化情况;Franczyk等^[50]利用基于不同未来经济、人口等发展速度下的2040年的气候变化和土地覆盖综合情景,采用半分布水文模型AVSWAT来分析气候变化和不同土地覆盖变化对平均年径流深的影响;Ma等^[51]考虑气候变化(A₂和B₂)情景和4种土地变化情景组合情况下,利用SWAT模型模拟了喜马拉雅山东部Kejie流域径流变化情况。综合以上研究可以看出,目前研究主要通过假设不同的气候及土地利用/覆被变化情景作为流域水文模型的输入条件研究它们对径流的影响;或者通过水文模型与全球气候模式(GCMs)的直接耦合,再考虑一定的土地覆盖变化情况进行研究。

4.2 气候变化情景下水文要素影响模拟及定量评估研究

在区分过去气候变化和人类活动对水文的影响研究方面,主要包括分项调查法和流域水文模拟法^[33]。

其中流域水文模拟法作为是量化气候变化和人类活动对河川径流影响的重要手段应用广泛。流域水文模拟法首先推估人类活动影响下水文气象序列的显著转折点,并以此点为界将水文序列划分为“近似天然阶段”和“人类活动影响显著阶段”。利用“人类活动影响显著前”的实测水文、气象资料率定水文模型的参数,然后保持模型参数不变,将人类活动影响显著期间的气象要素输入到水文模型,延展计算相应时期的“近似天然径流量”。通过对比实测径流量和延展的“近似天然径流量”,分离出气候变化对径流变化的影响^[2]。其中,对水文要素变异点的识别方法主要集中在一些统计方法上,如序列滑动平均法、有序聚类法、Mann-Kendall、Spearman、小波分析、Bayesian 检验等^[52-54]。

目前区分未来气候变化和人类活动对水文的影响,基本上也采用流域水文模拟法。未来的气候情景可以通过 IPCC 的气候模式和排放情景得到,未来的人类活动情景,可以通过假设不同人口、经济、城市发展模式,估计相应模式下的土地利用/覆盖变化情景^[55]。

5 存在问题及展望

综上所述,国内外在气候变化和人类活动对水文水资源影响方面取得了比较丰富的成果,在气候变化情景及其降解技术、土地利用/覆盖变化情景、流域水文模拟技术等方面的成果与方法可供借鉴。但是目前还是缺少能够集成 GCMs 及其尺度降解、SRES 排放情景下土地利用/覆盖变化等前沿技术,并与分布式水文模型耦合进行系统研究二者对水文水资源的影响,评估各驱动因素的贡献率。为了科学的预估未来变化环境下流域水资源系统的演变趋势,亟须开展集成各种方法的评估模式研究,更加科学的量化各驱动因素影响的不确定性,解释相互之间的分歧,来综合评价未来气候变化和人类活动对水文的影响,以期对流域水资源管理及社会经济发展规划提供依据和科学支撑。应用以上多种方法融合技术将是未来研究气候变化和人类活动对水文水资源影响的关键点和趋势。

参 考 文 献

- [1] 张建云, 王国庆. 气候变化对水文水资源影响研究[M]. 北京: 科学技术出版社, 2007.
- [2] 李丽娟, 姜德娟, 李九一, 等. 土地利用/覆被变化的水文效应研究进展[J]. 自然资源学报, 2007, 22(2): 211-224.
- [3] Working Group II of IPCC. Technical Guidelines for Assessing Climate Impacts and Adapting [R]. 1994.
- [4] IPCC. Climate change 1995: A Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. IPCC, Geneva, Switzerland, 1995.
- [5] 郭靖. 气候变化对流域水循环和水资源影响的研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2010.
- [6] 陈晓宏, 房春艳, 张云. 气候变化的水文水资源效应研究进展[J]. 气候变化研究快报, 2012 (1): 96-105.
- [7] 刘昌明, 刘文彬, 傅国斌, 等. 气候影响评价中统计降尺度若干问题的探讨. 水科学进展, 2012, 23(3): 427-437.
- [8] Fowler H. J., Blenkinsop S., Tebaldib C. Linking climate change modelling to impacts studies: recent advances in downscaling techniques for hydrological modeling [J]. International Journal of Climatology, 2007, 27(2):1547-1578.
- [9] 范丽军. 统计降尺度方法的研究及其对中国未来区域气候情景的预估 [D]. 北京: 中国科学院研究院, 2006.
- [10] Hellström C., Chen D. Statistical downscaling based on dynamically downscaled predictors: Application to monthly precipitation in Sweden [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2003, 20(6): 951-958.
- [11] Wilby R.L., Dawson C.W., Barrow E.M. SDSM-a decision support tool for the assessment of regional climate change impacts [J]. Environmental and Modelling Software, 2002(17): 147-159.
- [12] 赵芳芳, 徐宗学. 黄河源区未来地面气温变化的统计降尺度分析[J]. 高原气象, 2008, 27 (1): 153-161.
- [13] Chu J.T., Xia J., Xu C.-Y., Singh V.P. Statistical downscaling of daily mean temperature, pan evaporation and precipitation for climate change scenarios in Haihe River of China. Theoretical and Applied Climatology, 2010(99):149-161.
- [14] Hessami M., Gachon P., Ouara T.B.M.J., St-Hilaire A. Automated regression-based Statistical Downscaling tool [J]. Environmental Modelling and Software, 2008(23): 813-834.
- [15] 郭家力, 郭生练, 郭靖, 等. 鄱阳湖流域未来降水变化预测分析[J]. 长江科学院院报, 2010, 27 (8): 20-24.

- [16] Guo J., Chen H., Xu C.Y., Guo S.L., Guo J.L, Prediction of variability of precipitation in the Yangtze River basin under the climate change conditions based on statistical downscaling [J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2012, 26(2): 157-176, 2012.
- [17] Khan M.S., Dibike Y. Uncertainty analysis of statistical downscaling methods [J]. *Journal of Hydrology*, 2006, 319: 357-382.
- [18] Zhang Y.G., Nearing M.A., Zhang X.C., Xie Y., Wei H. Projected rainfall erosivity changes under climate change from multimodel and multiscenario projections in Northeast China [J]. *Journal of Hydrology*, 2010(384): 97-106
- [19] Liu Z.F., Xu Z.X., Charles S.P., Fu G.B., Liu L. Evaluation of two statistical downscaling models for daily precipitation over an arid basin in China [J]. *International Journal of Climatology*, 2011, 31(13): 2006-2020.
- [20] Arnell N.W., Reynard N.S. Estimating impacts of climatic change on river flows: Some examples from Britain [C]. *Proc. Conference on Climate and Water*, 1989, Helsinki, 1: 413-425.
- [21] Chiew F.H.S., Kirono D.G.C., Kent D.M., Frost A.J., Charles S.P., Timbal B., Nguyen K.C., Fu G. Comparison of runoff modelled using rainfall from different downscaling methods for historical and future climates [J]. *Journal of Hydrology*, 2010, 387(1-2): 10-23.
- [22] Dibike Y.B., Coulibaly P. Validation of hydrological models for climate scenario simulation: the case of Saguenay watershed in Quebec [J]. *Hydrological Processes*, 2007, 21(23): 3123-3135.
- [23] Teng J., Chiew F., Timbal B., Vaze J., Wang Y., Wang B., Evans A., Kent D., Kirono D., Post D. Assessing historical and future runoff modelled using rainfall from the analogue downscaling method [C]. *19th International Congress Modelling and Simulation*, Perth, Australia, 12-16 December, 2011: 2789-2795.
- [24] Chen H., Xu C.Y., Guo S.L. Comparison and evaluation of multiple GCMs, statistical downscaling and hydrological models in the study of climate change impacts on runoff [J]. *Journal of Hydrology*, 2012(434): 36-45.
- [25] 郭靖, 郭生练, 陈华, 等. 丹江口水库未来径流变化趋势预测研究[J]. *南水北调与水利科技*, 2008, 6 (4): 78-82.
- [26] Bekele E.G., Knapp H.V. Watershed modeling to assessing impacts of potential climate change on water supply availability [J]. *Water Resources Management*, 2010, 24(13): 3299-3320.
- [27] Sunyer M.A., Madsen H., Yamagata K. On the use of statistical downscaling for assessing climate change impact on hydrology [C]. *International Workshop ADVANCES IN STATISTICAL HYDROLOGY*, May 23-25, 2010, Taormina, Italy: 1-11.
- [28] Dickerson S.E., Mitchel R. Modeling the effects of climate change forecasts on streamflow in the Nooksack River Basin, Northwest Washington [J]. *Hydrological Processes*, 2013, DOI: 10.1002/hyp.10012.
- [29] Guo S.L., Guo J., Zhang J., Chen H. VIC distributed hydrological model to predict climate change impact in the Hanjiang Basin [J]. *Science in China Series E: Technological Sciences*, 2009, 52(11): 3234-3239.
- [30] 许炯心, 孙季. 嘉陵江流域年径流量的变化及其原因[J]. *山地学报*, 2007, 25 (2): 153-159.
- [31] 王渺林, 郭生练. 基于月水量平衡模型的黄河中游径流变化分析[J]. *西北水资源与水工程*, 1999, 10 (2): 1-6.
- [32] 程春田, 王本德. 考虑人类活动影响的流域水文模型参数的确定[J]. *大连理工大学学报*, 1995, 35 (3): 400-404.
- [33] 董磊华, 熊立华, 于坤霞, 等. 气候变化与人类活动对水文响的研究进展[J]. *水科学进展*, 2012, 23 (2): 278-285.
- [34] Onstad C.A., Jamieson D.G. Modelling the effects of land use modifications on runoff [J]. *Water Resources Research*, 1970, 6(5): 1287-1295.
- [35] 欧春平, 夏军, 王中根, 等. 土地利用/覆被变化对 SWAT 模型水循环模拟结果的影响研究—以海河流域为例[J]. *水力发电学报*, 2009, 28 (4): 124-129.
- [36] Baker T.J., Miller S.N. Using the Soil and Water assessment Tool (SWAT) to Assess Land Use Impact on Water Resources in an East African Watershed [J]. *Journal of Hydrology*, 2013(486): 100-111.
- [37] 余增鑫, 邓家泉, 刘诚. VIC 模型在东江流域城市化水文响应研究中的应用[J]. *水资源研究*, 2014, 3 (1): 78-83.
- [38] Wijesekara G.N., Farjad B., Gupta A., Qiao Y., Delaney P., Marceau D.J. A Comprehensive Land-Use/Hydrological Modeling System for Scenario Simulations in the Elbow River Watershed, Alberta, Canada. *Environmental Management*, 2014, 53(2): 357-381.
- [39] Liu X.Z., Li J.Z. Application of SCS model in estimation of runoff from small watershed in Loess Plateau of China [J]. *Chinese Geographical Science*, 2008, 18(3): 235-241.

- [40] Veldkamp A., Verburg P.H. Modelling land use change and environmental impact [J]. *Journal of Environmental Manage*, 2004(72): 1-3.
- [41] 万荣荣, 杨桂山. 流域 LUCC 水文效应研究中的若干问题探讨[J]. *地理科学进展*, 2005, 24 (3): 25-33.
- [42] 刘昌明, 钟俊襄. 黄土高原森林对年径流量影响的初步分析[J]. *地理学报*, 1978, 33 (2): 112-126.
- [43] 王美荣. 数字流域平台上多源信息在水文模型中的应用研究[D]. 南京: 河海大学, 2003.
- [44] Niehoff D., Fritsch U., Bronstert A. Land-use impacts on storm-runoff generation: scenarios of land-use change and simulation of hydrological response in a meso-scale catchment in SW-Germany [J]. *Journal of Hydrology*, 2002, 267(1-2): 80-93.
- [45] Dunn S.M., Mackay R. Spatial variation in evapotranspiration and the influence of land use on catchment hydrology [J]. *Journal of Hydrology*, 1995, 171(1-2): 49-73.
- [46] 陈军峰, 李秀彬. 土地覆被变化的水文响应模拟研究[J]. *应用生态学报*, 2005, 15(5): 833-836.
- [47] Rounsevell M.D.A., Ewert F., Reginster I., Leemans R., Carter T.R. Future scenarios of European agricultural land use: II. Projecting changes in cropland and grassland [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2005, 107(2-3): 117-135.
- [48] Barlage M.J., Richards P.L., Sousounis P.J. Impacts of climate change and land cover use change on runoff from a Great Lakes watershed [J]. *Journal of Great Lakes Research*, 2002, 28(4): 568-582.
- [49] 郭华. 气候变化及土地覆被变化对鄱阳湖流域径流的影响[D]. 南京: 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 2007.
- [50] Franczyk J., Chang H. The effects of climate change and urbanization on the runoff of the Rock Creek in the Portland metropolitan area, Oregon, USA [J]. *Hydrological Processes*, 2009, 23(6): 805-815.
- [51] Ma X., Xu J.C., Noordwijk M.V. Sensitivity of streamflow from a Himalayan catchment to plausible changes in land cover and climate [J]. *Hydrological Processes*, 2010, 24(11): 1379-1390.
- [52] Yang Y.h., Tian F. Abrupt change of runoff and its major driving factors in Haihe River Catchment, China [J]. *Journal of Hydrology*, 2009(374): 373-383.
- [53] 谢平, 窦明, 朱勇, 等. 流域水文模型: 气候变化和土地利用 / 覆被变化的水文水资源效应[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [54] 陈晓宏, 涂新军, 谢平, 等. 水文要素变异的人类活动影响研究进展[J]. *地理科学进展*, 2010, 25 (8): 800-811.
- [55] Choi W. Catchment-scale hydrological response to climate-land-use combined scenarios: A Case Study for the Kishwaukee River Basin, Illinois [J]. *Physical Geography*, 2008, 29(1): 79-99.

半干旱半湿润流域模型结构与流域特性的联结分析*

李致家, 姜婷婷, 黄鹏年

(河海大学水文与水资源学院, 南京 210098)

摘要: 概念性水文模型数量庞大种类繁多, 如何选择合适的水文模型, 仍是未解的难题。本文选取 6 种概念性水文模型, 以板桥、马渡王、志丹这 3 个产汇流特征差异巨大的半干旱半湿润流域为研究区域, 探讨模型结构与流域特性之间的关系, 分析流域地理气候条件和地貌特征对模型模拟结果的影响, 从模型结构等多个角度评价模型的适用性。研究表明, 在半干旱半湿润流域, 地下水位 (不是指地下径流) 不宜纳入降雨-径流模拟; 抛物曲线不但适合于模拟蓄满产流蓄水容量空间分布, 而且适合于模拟超渗产流下渗能力空间分布; 即使在干旱流域, 模型模拟也不应只考虑地面径流。结果同样表明, 流域地形及植被对产汇流过程有重要影响, 由于局部产流现象严重, 河道坡度影响大于流域平均坡度。半干旱半湿润流域产流、坡面汇流及河道汇流 3 个过程差异明显, 建模时需充分考虑。

关键词: 半湿润半干旱; 概念性水文模型; 降雨径流关系; 地形指数

现在国内外的概念性水文模型数量庞大, 构思也各有千秋。自从斯坦福模型首次应用之后, 各种概念性水文模型被科学研究者开发出来^[1]。在以往的洪水预报中, 各种水文模型广泛应用于湿润半湿润流域, 尤其是经典的概念性水文模型, 都能得到很好的应用。而针对干旱流域的水文模型很难开发, 进展困难, 因此出现了许多灵活构架的模型^[2], 比如在经典的概念性模型中加入超渗模块, 以便更好地适用于干旱流域。

本文选取了 6 种概念性水文模型, 分别是萨克拉门托模型^[3-4] (简记为 M1)、TOPMODEL 模型^[5] (简记为 M2)、新安江模型 (简记为 M3)、超渗产流模型 (即 GREEN-AMOT 下渗模型, 简记为 M4)、先超后蓄模型^[6] (简记为 M5) 以及增加超渗产流的新安江模型^[7] (简记为 M6), 在半湿润半干旱地区应用这六种模型。特别是流域在地理位置上相近, 降雨量相差不大, 但是区域内地理地貌特征不同产生不同的产汇流特性, 分析模型模拟结果是否有差别, 针对模型的模拟结果, 结合模型结构、精度标准等角度分析, 讨论模型的适用性。

1 模型简介

1.1 萨克拉门托模型 (M1)

该模型的特点是将流域分为不透水面积、透水面积和变动不透水面积三部分, 产流计算部分中有土壤上下层水之分, 且都含有自由水和张力水的概念, 汇流计算分为坡面汇流和河网汇流两部分。该模型有 17 个参数, 是经典模型之一, 发展较为成熟。

1.2 TOPMODEL 模型 (M2)

TOPMODEL 是基于物理基础的半分布式流域水文模型, 该模型的特点是以地形指数的空间变化来模

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (41130639, 51179045)。

第一作者简介: 李致家 (1986—), 男, 山西运城人, 博士, 教授, 主要从事水文预报和流域水文模型研究。

Email: zhijia-li@vip.sina.com