

An aerial photograph of a city, likely Shanghai, showing a wide river (the Huangpu River) flowing through it. A large bridge crosses the river, and the city skyline is visible in the background. The foreground shows a green, landscaped area with a bridge and some buildings.

变化环境下南方湿润区 水文模拟与响应

林凯荣 著

水利水电



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

变化环境下南方湿润区 水文模拟与响应

林凯荣 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

· 北京 ·

内 容 提 要

本书是作者近 10 年来对变化环境下的水文水资源响应,尤其是南方湿润区环境变化下流域水文模拟方面研究成果的总结。全书共分八章,内容涉及流域水文模拟及其不确定性的控制与弱化,基于多重工作假说的流域水文建模方法,气候和土地利用变化下流域水文过程的响应,珠江三角洲水资源的演变趋势与驱动机理等。

本书可供水文水资源、水生态、水环境、水利工程、地理、资源等领域的研究生、工程技术人员与科研工作者参考。

图书在版编目(CIP)数据

变化环境下南方湿润区水文模拟与响应 / 林凯荣著

— 北京:中国水利水电出版社,2017.12

ISBN 978-7-5170-6195-3

I. ①变… II. ①林… III. ①湿润区—水文模拟—中国 IV. ①P334

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第326181号

书 名	变化环境下南方湿润区水文模拟与响应 BIANHUA HUANJING XIA NANFANG SHIRUNQU SHUIWEN MONI YU XIANGYING
作 者	林凯荣 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 (营销中心)
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 13.75印张 262千字
版 次	2017年12月第1版 2017年12月第1次印刷
印 数	001—800册
定 价	68.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

“白云山高，珠江水长；大禹治水，源远流长。”水文学是地球科学的一个重要分支，它是一门研究地球上水的起源、循环及分布，水与物理、生态环境之间的相互作用及水对人类活动的响应等规律，以及应用这些规律为人类服务的知识体系。水文学同其他学科一样，在人类长期实践过程中，经历了萌芽、发展、成熟等阶段。可以说，水文学是人类在长期水事活动过程中，不断地观测、研究水文现象及其规律性而逐步形成的一门科学。

由于客观世界的复杂性、广泛存在的不确定性以及人类认识上的局限性，水文学仍有许多难点问题（如不确定性问题、非线性问题等）在理论上和实际应用上未能很好解决。但随着现代科学技术的发展，水文学的诸多难题得到了解决。此外，多学科交叉也使得水文学不断发展、不断壮大。

近几年，由于全球气候变化和人类活动的影响，水文循环发生了一些变化，进而导致流域水文过程的变异，而水文过程的变异反过来又对人类社会的发展产生重要的影响。因此，研究变化环境下水文过程模拟与响应已逐步成为水文学科的热点。

本人1998年进入武汉大学（原武汉水利电力大学）学习，2002年获硕博连读资格继续攻读博士学位，一直在恩师郭生练教授的指导下从事水文模拟与预报的研究，期间有幸参加了由中国科学院刘昌明院士领衔的国家重点研发项目（973）“黄河流域水资源环境演化规律与可再生性维持机理”的重要成果HIMS系统的研发工作。2007年进入中山大学水资源与环境系工作，在水利工程学科带头人陈晓宏教授的引领下，一直专注于“变化环境下的水文水资源响应”的研究。2012—2013年受国家留学基金委资助到美国伊利诺伊香槟

分校访问学习，得到了连炎清、蔡喜明和 Vijay P. Singh 等教授的指导，拓展了在生态径流变化与响应方面的研究。从 2007 年至今，先后主持了“复杂环境系统下水文模拟与预测的不确定性研究”“华南地区水文模拟与预报的不确定性研究”“变化环境下广州东部水源东江水资源响应研究”“水文模拟与预报不确定性驱动因素贡献分解与对策研究”以及“基于多重工作假说的流域水文模拟方法与应用研究——以华南湿润区为例”等国家和省部级相关项目，对变化环境下华南地区的水文模拟与预测的不确定性、水文过程演变与响应等一系列科学问题开展了系统研究，并在国内外学术期刊发表了一系列学术成果，引起国内外学术界的普遍关注。

最近几年来，有不少老师与朋友强烈建议我总结以往的成果，出一本专著，作为对以前工作的系统总结。我一直以来都觉得专著的撰写需要具有较深厚的专业知识与学术沉淀，加上工作事务繁多，所以迟迟未能成行。今年在各位老师、同行以及学生的支持和帮助下，终于起笔著书。在成稿过程中得到了国家自然科学基金项目(51379223、50809078)以及广东省特支计划百千万工程青年拔尖人才计划的大力支持和资助；我的研究生何艳虎、黄淑娴、吕福水、翟文亮、林友勤参与了部分章节内容的研究和编写，我的博士研究生兰甜以及硕士研究生李文静、刘树壕和梁汝豪协助我对本书内容进行了整编与排版，并对书中的部分插图和文字做了进一步的完善与修订，在此一并表示衷心感谢！

我的家人在此书的撰写过程中也给予了我无私的帮助和支持。

此书涉及水文学的多个方面，可供水文学科的学生和科研人员参考。“路漫漫其修远兮，吾将上下而求索”，水科学的研究博大精深，由于编写时间仓促，加之编著者水平有限，缺陷和错漏在所难免，敬请读者批评指正。

林凯荣

2017 年 8 月于中山大学康乐园

目 录

MULU

前言

第一章 绪论 1

第一节 流域水文模拟与水文过程研究的学科发展与前沿问题 1

第二节 气候变化与下垫面变化对流域水文过程影响的研究 3

第三节 主要研究内容 5

参考文献 10

第二章 流域水文模拟及其不确定性 12

第一节 流域水文模拟不确定性的概念与内涵 12

第二节 流域水文模拟不确定性分析方法概述 13

第三节 现行流域水文模拟不确定性分析方法 16

第四节 流域水文模拟不确定性驱动因素辨识 43

参考文献 74

第三章 水文模拟不确定性的控制与弱化 79

第一节 水文过程聚类 79

第二节 分水源比较 87

第三节 内部节点验证信息 94

第四节 水文模拟与预报结果的可靠性评价 101

参考文献 103

第四章 基于多重工作假说的流域水文建模方法 104

第一节 多重工作假说理论 105

第二节 基于多重工作假说的水文模拟框架 109

参考文献 112

第五章 气候变化下流域水文过程的响应	115
第一节 不同设计气候情景下流域径流量的模拟	115
第二节 基于 SDSM - SWAT 模型的未来气候变化及其对径流的影响研究	122
参考文献	147
第六章 土地利用对流域水文过程的影响	150
第一节 土地利用变化对径流量的影响	150
第二节 未来气候下土地利用变化对水文循环影响	159
参考文献	168
第七章 气候变化和人类活动对流域水文过程影响的贡献分解	169
第一节 研究方法	170
第二节 模型参数的确定	171
第三节 土地利用及气候变化对径流影响量的分离	176
第四节 结论	178
参考文献	179
第八章 珠江三角洲水资源的演变趋势与驱动机理	180
第一节 珠江三角洲研究概况	180
第二节 气候因子趋势变化	184
第三节 基于秩序的河流生态流量特征变化评价	194
参考文献	206

第一章

绪 论

第一节 流域水文模拟与水文过程研究的 学科发展与前沿问题

一、地表水模型的发展过程

地表水模型的发展过程如下：18 世纪 50 年代，地表水模型的推导公式被提出；1932 年，谢尔曼提出了流域单位线等一系列概念（Sherman, 1932）；20 世纪 50 年代，Nash - Dooge 线性串联水库被提出（Nash, 1957）；在 60 年代集总式概念性水文模型以及时间序列分析随机模型相继地被水文学家所研究；80 年代，SHE 等分布式物理模型被用来解决空间变异性等问题，水文模拟的精度进一步被提高（王文志, 2010）；大尺度分布式水文模型及陆面过程成为 90 年代的研究热潮（Allen 等, 2002）。

二、环境变化及其水文响应

近些年，变化环境已成为水文学研究和发展的大背景，其主要包括气候变化和流域下垫面变化。气候变化和流域下垫面变化均又分为自然变率和由人类活动影响的异常变化。自 19 世纪以来，全球平均气温显著增高并以指数形式陡增，其中甄别自然变化通常需要很长的历史资料，由人类活动引起的下垫面异常变化又包括土地利用变化、城市化建设以及各种水利工程等（宋晓猛等, 2013）。环境变化的水文响应主要包含以下 3 个方面（许崇育, 2013）：①水文时间序列一阶矩的非平稳性，即均值的趋势变化，其直接影响到水资源的估算；②水文时间序列高阶矩的非平稳性，包括 C_v 、 C_s 、自相关系数、频率、概率分布等的变化，与现行的频率计算及水文设计息息相关；③水文关系的非

平稳性,如降水径流关系及其他水文要素关系的变化密切关系到环境变化与水文响应、水文预测以及水资源管理等。不难发现,过去 10 年水文学的研究主要集中在甄别和模拟水文气候资料的历史变化趋势。而近年来,水文学家就非平稳序列的水文设计开展了大量的研究,但水文序列趋势变化原因以及历史变化趋势和将来变化之间的关系有待进一步探究(郑泽权等,2001)。

三、水文模型的研究应用

当前的水文模型是建立在水文序列平稳以及降雨径流关系稳定的基础上,通过参数率定、分段检验等研究方法可实现资料插补、延长以及水文预报等。对于变化环境下的应用还有很多尚未解决的问题,例如:①气候变化和下垫面变化的水文响应,体现在非平稳序列的预测、非稳定的降雨径流关系等;②区域和全球尺度的水文模拟,所存在的问题主要包括无资料区域的水文模拟,气候和下垫面的空间异质性等;③水文模型和气候模型的耦合,主要有时间和空间尺度的不匹配以及参数率定等一系列问题。在过去的研究工作中,通过选择一个或多个水文模型,用历史资料作参数率定和模型检验;采用不同的方法构建将来的气候变化情景,输入至率定好的水文模型来模拟未来的水文情势。然而,问题在于不同的水文模型即便在率定期和检验期的结果相差无几,一旦用将来的气候变化情景作为水文模型的输入,所模拟的未来水文情景相差巨大。即使同一个模型用不同时期的历史资料率定的参数,所得结果也相差巨大(Beven 和 Binley, 1992)。

四、水文模型的不确定性

水文模型不确定性的研究是国际水文科学协会(International Association of Hydrological Sciences, IHAS)的 PANTA RHEI (Everything Flows) 新提出的国际水文十年计划(2013—2022 年)和国际水文集合预报试验计划(Hydrologic Ensemble Prediction Experiment, HEPEX)的重要研究内容。不确定性存在于水文模型的每一环节,大量的基于贝叶斯理论的研究方法被用于解决水文模拟的不确定性问题,但是对水文模拟中的不确定性进行源头分析仍具有挑战性的(梁忠民等,2010)。在水文模拟中的不确定性问题中,异参同效现象最为突出,即不同的参数模拟出同样的结果(杜新忠,2011),其主要原因包括:①模型结构过于复杂、模拟过程中的过参数化等问题;②现有资料不足,即仅依靠流量资料进行参数率定,但流量资料不足于约束所有参数;③资料误差,即系统误差造成水量平衡误差影响参数显著水平(李璐,2010)。

水文模型不确定性的来源存在于水文模拟过程中的每一步,主要归为输入不确定性、参数不确定性和结构不确定性三类,通过对总不确定性的源头进行分解,进一步控制并弱化水文模拟过程中的不确定性是当年的研究热点和重点

(熊立华等, 2009)。

第二节 气候变化与下垫面变化对流域水文过程影响的研究

近些年,“在变化环境下加强对水资源的预测能力以支持社会的可持续发展”已被反复的强调。事实上,国际水文科学协会在 2013 年已经提出了未来 10 年的研究主题是“水文与社会变化”,其目的在于倡导解决由于变化的环境和社会系统而引发的全球或区域的水问题的科学研究。所谓变化环境是指人类活动和自然演变过程的交织作用引起大气、地表以及水文循环等发生一系列变化。这些作用互相影响,直接或间接地改变着区域水文循环系统,人类活动以及气候变化对水文系统的作用如图 1-1 所示。

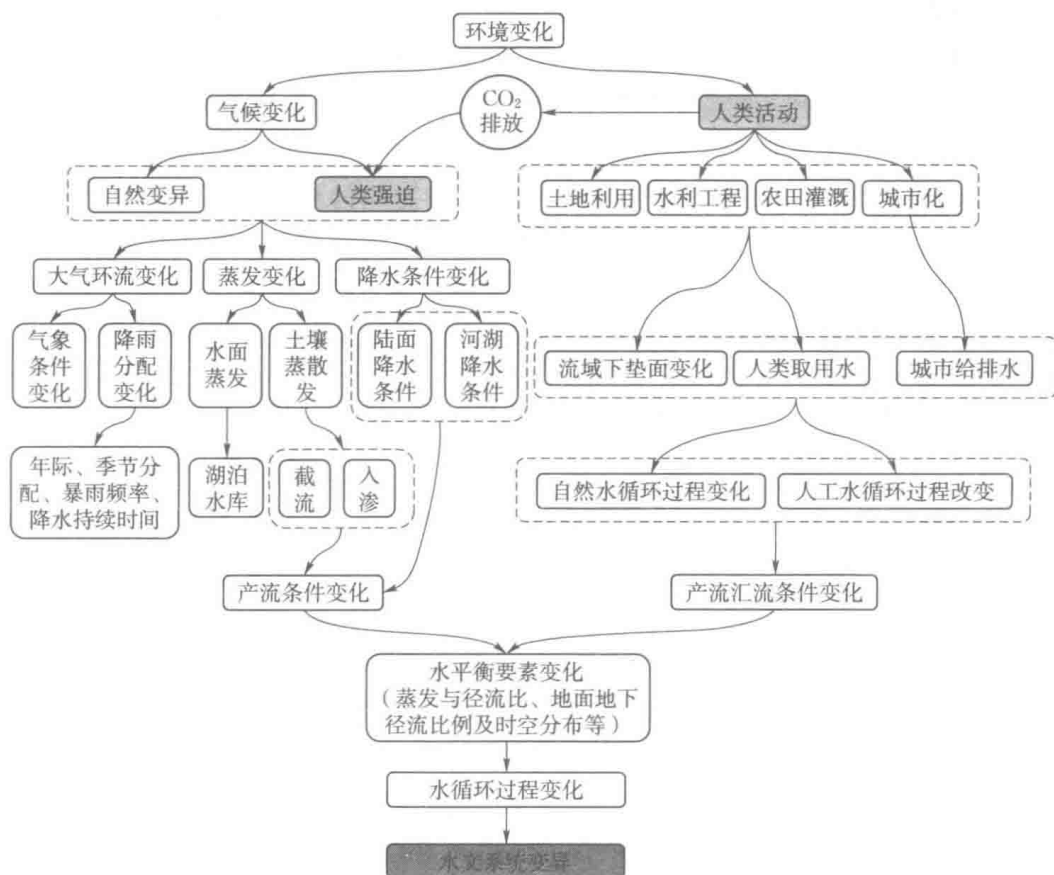


图 1-1 人类活动与气候变化对水文系统的作用 (宋晓猛等, 2013)

在变化环境下,新问题层出不穷,如何进行水文设计与计算,以往的设计

成果和运行策略是否存在潜在的风险,这些关乎水利工程安全的问题,越发引起关注,需要重新审视与论证。此外,许多水文模型的研究问题突出,其中包括对人类活动的演变预测。在重新思考水资源和社会之间的联系时,社会水文学的概念和理论衍生而出,其旨在提供水文与人类活动的综合建模(Sivapalan等,2012;丁婧祎等,2015)。

随着社会经济的发展以及科学技术的更新,人类活动对流域水循环的干预强度日益增大。人类活动引起的水文循环状况和水量平衡要素在时间、空间和数量上发生着不可忽视的变化。而土地利用方式的改变、在河流上兴修水工建筑物、大面积灌溉和排水以及都市化和工业化等活动,必然会在不同程度上改变土地的覆盖状态,进而影响到以土地为下垫面的水文循环和水资源形成过程,这就是人类活动——土地利用/覆盖变化(Land Use/Land Cover Change, LUCC)带来的水文水资源效应(万荣荣和杨桂山,2005;赵米金,2005)。气候变化是通过气温、降水等因素的改变来影响陆地水文循环系统,从而影响水文径流过程的。而人类活动对水文的影响,主要是通过土地利用、水土保持、雨水集蓄等方式改变了流域下垫面,使产流机制发生了变化。因此,开展气候变化和人类活动对水文的影响研究,对变化环境下的水资源规划管理与应用,具有十分重要的科学意义和应用价值。如何区分气候变化与人类活动(土地利用/覆盖变化)对径流变化的贡献率,是研究其影响的一个核心问题。针对气候变化和人类活动(土地利用/覆盖变化)两个驱动因素,本研究分别综述了气候变化、人类活动对水文过程的影响,并提出了气候变化和人类活动对流域水文过程影响贡献分解的研究方法,图1-2显示的是径流变化的驱动因素区分过程示意图。

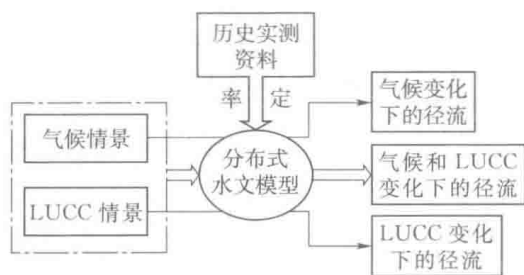


图 1-2 径流变化的驱动因素区分过程示意图

一、气候情景

目前,全球气候情景包括两部分:全球气候模式和排放情景(张雪芹,2008)。从排放情景反演出的浓度情景作为气候模式的输入数据,以计算气候预估结果。

气候模式是用来描述气候系统、系统内部各个组成部分以及各个部分之间、各个部分内部子系统间复杂的相互作用的,它已经成为认识气候系统行为和预估未来气候变化的定量化研究工具。随着全球气候变化研究的不断发展,世界各国已经研制了 40 多个全球气候模式(GCMs)(Dong,2012)。排放情景是指一种关于对辐射有潜在影响的物质(如温室气体、气溶胶)未来排放趋势的合理表述。它基于连贯的和内

部一致的一系列有关驱动力（如人口增长、社会经济发展、技术变化）及其主要相关关系的假设。目前，IPCC 提供了 4 种排放情景（Leggett 等，1992）：①A1 情景，即经济增长非常快，全球人口数量峰值出现在 21 世纪中叶，新的和更高效的技术被迅速引进；②A2 情景，即人口快速增长，经济发展缓慢，技术进步缓慢；③B1 情景，即全球人口数量与 A1 情景相同，但经济结构向服务和信息经济方向更加迅速地调整；④B2 情景，即人口和经济增长速度处于中等水平，强调经济、社会和环境可持续发展的局地解决方案。

二、人类活动情景

考虑人类活动主要以土地利用/覆盖变化为主，此处的人类活动情景也可以称为土地利用/覆盖变化情景。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。当人类活动较为复杂、资料不全的情况下，可以利用遥感系统（RS）和地理信息系统（GIS）的土地利用/覆盖图片来分析人类活动引起的土地利用/覆盖变化；然后保持分布式模型中的气象输入资料不变，将 LUCC 信息作为分布式模型的输入，得到 LUCC 影响下的径流变化；接着保持 LUCC 信息不变，将变化的气候资料作为输入，得到气候变化下的径流变化；最后，将 LUCC 和气候变化引起的径流变化比较，区分气候变化和人类活动对水文要素变异的贡献率（董磊华，2012）。

第三节 主要研究内容

本研究针对变化环境下南方湿润区水文模拟与响应问题（图 1-3），开展了水文模拟及其不确定性的研究，强调了流域水文模拟不确定性的概念与内涵，介绍了常见的不确定性的评估方法及相关的改进方法。然后，对常见的不确定性驱动因素进行识别，包括地形地貌、径流系数、似然函数以及模型参数等。本研究进一步地提出了水文模拟不确定性的估计与弱化方案，分别从水文过程聚类、分水源比较以及内部节点验证信息着手。针对水文模拟过程中水文模型结构的不确定，本研究提出了多重工作假说的流域水文建模方案，实现了从较单一水文模型结构到多组合的模块化水文模型，从较单一流量过程的评价体系到多重因子的诊断方法的转变，从而解决了变化环境下如何构建合适的水文模型的问题。在变化环境下流域水文模拟与评价方面，本研究分别探讨了气候变化和下垫面变化对流域水文过程的影响，并提出了气候变化和人类活动对流域水资源影响的贡献分解的计算方案。最后，探讨

了珠江三角洲水资源的演变趋势与驱动机理,介绍了珠江三角洲的水文变化基本情势,探究了影响蒸发皿蒸发量变化的潜在因素。最后,建立了考虑秩序的河流生态流量特征变化评价方法,基于周期改变度、趋势改变度和对称改变度3个指标,创新性地提出了改进的RVA方法,弥补了原有RVA方法的不足,本研究的结构框架见图1-3。基于上述一系列的研究和探索,初步实现了变化环境下南方湿润区更加科学准确的水文模拟与评价,为未来区域水安全调控提供支撑。

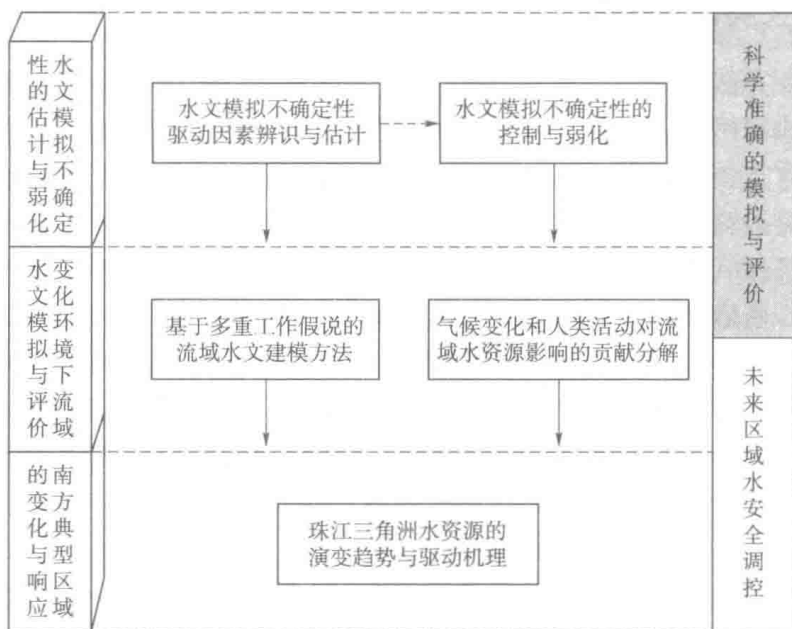


图 1-3 变化环境下南方湿润区水文模拟与响应研究框架

一、流域水文模拟及其不确定性

在不确定性估计方法方面,本研究发展了目前国际上较流行的 GLUE 不确定性估计方法,构建了考虑参数相关性的不确定性估计方法 (Copula - GLUE),从而更加全面地估计了水文模拟与预报的不确定性。Beven 和 Binley 在 1992 年基于 Horberger 和 Spear 的 RSA 方法提出了的 GLUE (general likelihood uncertainty estimation) 的模型参数不确定性估计方法 (Beven 和 Binley, 1992)。该方法易于理解,可以用于各种程度的复杂性和非线性的模型中,是目前水文模拟、水质模拟中主要的不确定性估计方法之一 (张质明, 2014; 黄国如和解河海, 2007)。然而该方法假定模型参数之间是相互独立的,从而有可能带来更多的认知不确定性。为此,在原有的 GLUE 方法的基础上,本研究引入 Copula 函数来描述模型参数之间的相关性,建立了基于 Copula -

Glue 的水文模型参数不确定性估计方法, 简称 CGLUE 方法。该方法的贡献在于: 它能够很好地考虑参数间的相关性, 从而避免了假设参数独立的采样方式有可能过大估计模型参数的不确定性的问题。不仅提高了计算效率, 并在一定程度上弱化了水文模拟与预报的不确定性。

在不确定性驱动因素方面, 开展了流域地形地貌、径流系数、模型参数和似然函数等因素对水文模拟与预报及其不确定性的影响分析, 尤其揭示了现有的参数不确定性分析方法通过调整参数的后验分布掩盖了 DEM 分辨率对流域水文模拟与预报的影响。研究发现了 DEM 分辨率对流域地形指数的计算有着很大的影响, 但由于现有的水文模拟主要依靠实测资料的拟合程度进行参数率定, 在一定程度上掩盖了不同 DEM 分辨率计算的地形指数的差别, 导致了 DEM 分辨率对最终模拟结果的影响不大。本研究从不同 DEM 分辨率得到的参数后验分布的形状基本一致, 但各个参数值所占的比例有所不同。换言之, 参数不确定性分析方法通过调整参数后验分布, 从而掩盖了不同 DEM 分辨率计算的地形指数的差别。

二、水文模拟不确定性的控制与弱化

弱化水文模拟与预报的不确定性的有效途径之一是充分利用已有数据, 同时引入新数据源。但很多流域没有条件引入新数据源, 尤其是缺资料地区。然而, 这种不确定性是可以通过充分挖掘已有数据信息来避免的。为此本研究提出了水文过程聚类、分水源比较和内部节点验证的新方法, 在一定程度上弱化水文模拟与预报中的不确定性。不确定性问题的深入研究必将进一步推动水文学进入精细模拟和精确预报的新阶段, 具有重要的基础理论研究价值和实际应用价值 (尹雄锐, 2006)。

首先, 引入模糊 C-均值聚类方法 (FCM) 对水文过程进行聚类分析, 结合 SCEMUA 方法, 建立基于 FCM-SCEMUA 的水文模型不确定性估计方法, 在一定程度上弱化了水文模拟与预报中的不确定性, 得到更加合理的预测区间 (Bezdek 等, 1984); 而且该方法只在率定期需要采用分类来获取更加合理的参数组, 而检验期是不需要用到聚类信息的, 也就是最后用于预报的参数组是适用于各个分类的, 因此该方法可以用于带有预见期的实时洪水预报, 从而为流域防汛和水资源管理决策提供更加可靠的依据。其次, 提出了分水源比较的弱化水文模拟的不确定性方法, 利用分水源信息, 进一步优化了水文模拟与预报的有效参数组, 从而弱化了水文模拟与预报中的不确定性。最后, 利用流域内部更多的节点信息, 进一步优化了水文模拟与预报的有效参数组, 从而弱化了水文模拟的不确定性, 可为控制和弱化未来更加精细化水文模拟可能带来的不确定性提供有效途径。

三、基于多重工作假说的流域水文建模方法

相对于观测数据和模型参数而言,基于现有科学认知体系构建的模型结构是建模过程中不确定性的另外一个主要来源。传统的单一工作假说更关注一个较为固定结构的水文模型的研究,而忽略其他可能更为科学合理的结构或者方法。针对该问题,本研究提出了基于多重工作假说的流域水文建模方法,该方法首先通过基于组件技术的模块化流域水文模型框架,结合研究流域的气候和下垫面信息,确定可供选择的相对合理的假说模型和参数;然后运用每个假说模型进行模拟试验;根据建立的基于贝叶斯理论的流域水文模拟多重因子评价诊断方法进行模型假说检验;最后,运用通过多重工作假设检验的水文模型进行实际的预报。

基于多重工作假说的流域水文模拟系统实现了从较单一水文模型结构到多组合的模块化水文模型,以及从较单一流量过程的评价体系到多重因子的诊断方法的转变,全面地、定量地检验流域水文模型的合理性与适用性,从而解决了变化环境下如何构建合适的水文模型的问题。这对于完善水文预报理论、改善预报精度以及为防洪调度提供科学的决策依据,具有重要的理论意义和实际应用价值。

四、气候变化下流域水文过程的响应

近百年来,全球气候变化特征以变暖为主,地球表面的平均温度在过去100年间(1906—2005年)增加了 0.74°C ,其中过去50年(1956—2005年)的增长速率约为过去100年的2倍(秦大河,2008);与此同时,全球降水也发生了显著变化。受全球变暖的影响,全球水文循环过程加剧,极端水文事件(如洪水、干旱等)频繁发生,而评估气候变化对水文流域水文循环的影响是当前的研究热点之一,水文学家越来越重视水量平衡要素观测到的变化中有多少是由于气候变化引起的(宋晓猛等,2013;Minville等,2008)。因此,本研究定量和定性地评估了不同设计气候情景模式下流域径流量的变化以及未来气候特征对径流的影响。

首先对东江流域21个气象站1959—2008年的逐年平均降雨、蒸发、日照时间、湿度及气温等气象要素序列进行趋势变化分析,然后分析了不同气象要素时间序列与径流序列的关联性,最后基于未来流域不同频率降雨量的变化,构建了未来气候变动的36种假设情景,运用改进的SCS月模型,分析了不同气候情景下各子流域对径流量的变化幅度。与此同时,本研究应用SDSM统计降尺度模型模拟HadCM3输出的A2和B2气候情景生成东江流域未来3个时段两种气候情景下的气温和降水序列,并作为SWAT模型的输入,分析了

未来气候情景下东江流域径流的变化。本研究开展了气候变化下水文响应研究,不仅对完善东江流域分析理论和方法具有重要的科学意义,而且对变化环境下流域水资源评价和管理具有重要的实践意义。

五、土地利用对流域水文过程的影响

在较长时间尺度上,气候变化对水文水资源的影响更加明显,但短期内,土地利用是水文变化的主要驱动要素之一。LUCC 改变了地表植被的截流量、土壤水分的入渗能力和地表蒸发等因素,进而影响着流域的水文情势和产汇流机制,增大了流域洪涝灾害发生的频率和强度。LUCC 水文效应的研究是未来几十年的一个热点问题,因此,本研究于第六章中探究了土地利用变化对流域水文过程的影响。首先,本研究利用改进的 SCS 月水量平衡模型,以东江流域顺天、蓝塘、九州及岳城 4 个子流域为例,对比了其土地利用的变化情势,并通过模拟人类活动时期的径流量,分析了土地利用变化对区域水资源的影响,进一步探讨了土地利用变化对区域水旱灾害风险影响;然后,本研究采用 SWAT 分布式水文模型分析了东江流域顺天、岳城、蓝塘子流域在未来气候变化下不同土地利用变化对水文循环的影响。通过已率定好的 SWAT 模型和天气发生器,生成未来 40 年的气象数据。基于未来的气候变化,构建了 3 种土地利用变化情景,分别是土地利用保持现状、实行“退耕还草”政策以及实行“退耕还林”政策,综合分析了不同土地利用变化情景下的水文响应情况。本研究通过对土地利用水文效应的研究,为探究南方湿润地区在变化环境下水文循环的发展提供了重要的理论贡献和实践价值。

六、气候变化和人类活动对流域水文过程影响的贡献分解

近些年,变化环境中水文循环与水资源的研究成为水利学科的主要研究热点之一,气候变化和人类活动是变化环境的重要体现和组成部分,其带来的水文水资源效应不同程度地改变着流域径流量的大小。因此,合理地分析气候变化和人类活动对区域水资源的影响显得尤为重要。本研究基于前人的工作,进一步地提出气候变化、土地利用及其他人类活动对流域径流影响的贡献分解方法;采用实际的土地利用和气象资料,分离出气候变化、土地利用及其他人类活动对东江流域径流影响的贡献程度。三者影响量的分离,有助于识别影响径流改变的主要因子,对流域水资源规划和调控、水灾害的防控有着重要意义。

七、珠江三角洲水资源的演变趋势与驱动机理

针对南方湿润区的环境变化,本研究从气候因子,再到下垫面的变化和水资源的演变及其评价方法进行了系统深入的研究,揭示了蒸发皿蒸发量的空间

变化规律及其下降的主要驱动因子；同时，建立了考虑秩序的河流生态流量特征变化评价方法，更加全面和准确地评价河流生态水文特征的变化，为评价河流生态水文特征变化提供更加科学的计算依据。

与此同时，本研究系统地分析了广东省过去 50 年间蒸发皿蒸发量、降水、气温、日照时间、相对湿度、风速、云量、水汽压的变化趋势，重点对“蒸发悖论”在广东省的规律进行分析（丛振涛等，2008）。与现有的其他成果相比，本研究采用聚类分析的方法在空间上对广东省蒸发皿蒸发量的变化进行了分类，揭示了蒸发皿蒸发的空间变化规律及其下降的主要驱动因子。再者，本研究深入分析了珠江三角洲径流的演变趋势和驱动机理，建立了考虑秩序的河流生态流量特征变化评价方法。与原有的主流 RVA 方法相比，本研究引入了水文时间序列的秩序改变度的新思路，创新性地提出了周期改变度、趋势改变度和对称改变度 3 个指标，弥补了原有 RVA 方法的不足，可以更加全面和准确地评价河流生态水文特征的变化，为评价河流生态水文特征变化提供更加科学的计算依据。

参 考 文 献

- [1] 丛振涛,倪广恒,杨大文,等.“蒸发悖论”在中国的规律分析[J].水科学进展,2008,19(2):147-152.
- [2] 丁婧祎,赵文武,房学宁.社会水文学研究进展[J].应用生态学报,2015,26(4):1055-1063.
- [3] 董磊华,熊立华,于坤霞,等.气候变化与人类活动对水文影响的研究进展[J].水科学进展,2012,23(2):278-285.
- [4] 杜新忠.流域水文模型的不确定性分析[D].长沙:长沙理工大学,2011.
- [5] 黄国如,解河海.基于GLUE方法的流域水文模型的不确定性分析[J].华南理工大学学报(自然科学版),2007,35(3):137-142.
- [6] 李璐.流域水文模型不确定性分析方法的理论和应用研究[D].北京:中国科学院大学,2010.
- [7] 梁忠民,戴荣,李彬权.基于贝叶斯理论的水文不确定性分析研究进展[J].水科学进展,2010,21(2):274-281.
- [8] 秦大河.对IPCC评估报告的理解[C].气候变化与科技创新国际论坛,2008.
- [9] 宋晓猛,张建云,占车生,等.气候变化和人类活动对水文循环影响研究进展[J].水利学报,2013,44(7):779-790.
- [10] 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.
- [11] 王文志,罗艳云,段利民.分布式水文模型研究进展综述[J].水利科技与经济,2010,16(4):381-382.