

Review and Assessment of Interaction between Watershed Hydrology and Society System

Shenglian Guo, Chongyu Xu, Hua Chen, Dedi Liu

State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan Hubei
Email: slguo@whu.edu.com

Received: Dec. 11th, 2015; accepted: Dec. 28th, 2015; published: Jan. 4th, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

The “Panta Rhei” scientific plan (2013-2022) proposed by IAHS is “Change in Hydrology and Society”. The non-stationary rainfall-runoff relationship and its identification methods under changing environment, spatial and temporal variation rule of hydrology parameters, distributed hydrological model based on time-dependent runoff yield and confluence, hydrological process response in a changing environment, optimal water resources allocation model based on the internet of water, and conceptual model of hydrology and society coupling systems are reviewed, and the existing problems and limitations are pointed out. The main research contents and scientific goals of interaction between hydrology and society are proposed. It will be a great contribution to the IAHS scientific plan and lift up the academic level and international influence of Chinese hydrologists by the successful implementation of this study.

Keywords

Changing Environment, Rainfall-Runoff, Hydrological Response, Water Resources Allocation, Interaction between Hydrology and Society

流域水文水资源与社会耦合系统研究进展与评价

郭生练, 许崇育, 陈 华, 刘德地

武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉
Email: slguo@whu.edu.com

收稿日期: 2015年12月11日; 录用日期: 2015年12月28日; 发布日期: 2016年1月4日

作者简介: 郭生练(1957-), 男, 二级教授, 主要从事水文学和水资源开发利用研究。

文章引用: 郭生练, 许崇育, 陈华, 刘德地. 流域水文水资源与社会耦合系统研究进展与评价[J]. 水资源研究, 2016, 5(1): 1-15.
<http://dx.doi.org/10.12677/jwrr.2016.51001>

摘要

国际水文科学协会Panta Rhei (2013~2022)科学计划主题是变化中的水文与社会。本文综述国内外变化环境下的非稳定降雨径流关系识别、水文参数的时空变异特性、基于时变产汇流机理的分布式水文模型、变化环境下的水文响应过程、基于水联网技术的水资源优化配置和水文与社会耦合系统的概念模型等方面的研究进展,指出存在的问题和不足,建议开展流域水文水资源与社会耦合系统研究的内容和科学目标,提高我国水文学及水资源学科的水平 and 国际影响力,为国际水文科学计划顺利实施做出应有的贡献。

关键词

变化环境, 降雨径流, 水文响应, 水资源配置, 水文与社会耦合系统

1. 引言

随着社会经济的快速发展,人类活动对水文水资源系统的干预越来越强烈,人类活动与自然水文水资源系统之间的相互关系日趋紧密,动摇了传统水文水资源学科理论和方法的科学基础,基于历史长系列数据的水文模拟分析和水资源管理面临严峻的挑战。国际地圈-生物圈研究计划(IGBP)和全球水系统计划(GWSP)已将气候变化和人类活动对水循环产生的影响作为重点研究问题之一;联合国教科文组织的国际水文计划第七阶段(IHP-VII)任务中,把气候变化对水文循环和水资源的影响以及提高变化环境下水资源管理能力作为研究的重点领域[1]。国际水文科学协会(IAHS)2013年正式启动Panta Rhei (2013~2022)科学计划[2],主题是变化中的水文与社会(Change in Hydrology and Society),该计划提出了6个科学问题,即:①人们认知水文变化的主要差距在哪?②水文系统变化如何通过水文过程驱动与自然、社会系统相互作用和反馈?③什么是水文系统变化的外部驱动力和内部系统特征?④怎样运用水文和社会耦合系统新知识来提升预测能力,包括预测结果的不确定性计算、可预测性评价?⑤如何增强水文监测和数据分析能力、以便预测和管理水文过程变化?⑥怎样考虑水文自然变化与人类活动影响的相互反馈和不确定性,支撑经济社会发展适应这些变化条件?通过对上述6个科学问题进行研究探讨,以实现科学认知、预测评估、实际应用三大目标,构成水文科学研究的整体平台,应对处于正在变化中的环境系统和经济社会发展的需求。

我国人多水少、水资源时空分布严重不均,洪涝灾害、水资源短缺、水污染严重、水生态恶化等问题十分突出,已成为制约经济社会可持续发展的主要瓶颈。国务院2012年发布《关于实行最严格水资源管理制度的意见》[3],确立水资源开发利用控制、用水效率控制和水功能区限制纳污“三条红线”,实施包括用水总量控制、用水效率控制制度、水功能区限制纳污制度和水资源管理责任和考核制度在内的“四项制度”,从制度上推动经济社会发展与水资源、水环境承载能力相适应[4]。

可以看出,国际国内社会近年来对如何应对未来可能发生的环境变化,改变现有水文模拟预测理论方法和资源管理方式,以及提出相关适应性对策等方面的研究给予了很大的关注。因此,针对水文循环和水资源系统动态演化,开展以水循环模拟为基础的区域动态水资源安全评价、水资源可持续利用和适应性管理等重大需求的科学研究,也必然成为当前水文水资源科学研究的前沿与热点问题。

2. 国内外研究现状与进展

变化环境下水文水资源与社会耦合系统的研究是一个新的多学科交叉的研究领域。它包括水文系统变化规律研究、水文过程与自然、社会系统相互作用和反馈,水文和社会耦合系统的建立,水资源优化配置

与管理等等。与其相关的研究包括变化环境下水文水资源分析、计算与模拟的理论和方法，水文模型与气候模型的耦合可能性与挑战，水文水资源和社会耦合系统的概念与模型，等。下面首先综述国内外研究现状与进展。

2.1. 变化环境下水文分析与模拟

除地球系统自然条件的变化外，流域或区域内经济快速发展、人类活动影响加剧、水利工程的兴建、地下水的开发、林业植被、矿山开采、坡地治理、河道采砂等人类活动导致下垫面条件不断改变，使流域降雨径流等关系发生了巨大变化。张建云等[5]研究发现：近 50 年我国六大江河(长江、黄河、珠江、松花江、海河、淮河)的实测径流量都呈下降趋势，水文特征值发生了显著改变，径流下降幅度最大的是海河流域，径流组成及年内分配均发生了一定程度的变化。流域水文预测预报通过建立降雨径流的数学关系定量模拟径流过程，研究和探讨降雨径流关系是否稳定是水文预测预报非常关键的一步，目前主要的分析手段有统计学方法和建立流域水文模型两种。统计学方法所包含的分析方法较广泛，其原理通常是假设研究变量为随机变量，通过计算样本的均值、标准差、方差、径流系数、变异系数和显著性检验以及年际变化绝对比率、不均匀系数、年径流和年降水距平百分率的变化等指标来描述降雨径流关系[6] [7]。任立良等[8]对中国北方的黄河、海河、辽河、松花江流域的长时间系列观测资料进行分析，认为这些流域的径流都存在不同程度减少，其中上游水库拦蓄和人类取水增加是造成径流减少的主要原因，计算发现 1980s~1990s 相同量级的降水量产生的径流量比 1950s~1960s 减少了 20%~50%。冯平等[9]对潘家口水库 1956~2003 年的入库径流变化趋势及影响因素进行了分析，通过数据分析，认为下垫面变化是导致径流减少的主要原因。李慧赟等[10]采用模糊聚类的方法对 1942~2005 年年降雨序列聚类分析，研究不同时间分布类型的降雨下人类活动对流域水文效应的影响。结果表明，人类活动的影响是造成流域径流减少的主要原因，并且降雨量越小，年内分布越分散，流域径流受人类活动影响越剧烈。李致家等[11]以湿润、半湿润、半干旱以及干旱地区的 15 个典型流域为研究对象，分别建立其 $P + P_a \sim R_s$ 相关关系，然后对其中 3 个嵌套流域的 $P + P_a \sim R_s$ 相关关系进行分析与验证，比较各流域嵌套前后的 $P + P_a \sim R_s$ 相关关系变化，对不同自然地理条件下降雨径流相关关系的区域性规律进行探讨，李二辉等[12]应用 Mann-Kendall 秩次相关检验、流量历时曲线法、双累积曲线法等方法对黄河干流陕县站和河口镇站 1919~2010 年径流量演变过程进行了分析。结果表明：区域面平均降水量趋势性变化不显著，而上游及中游年径流量自 1985 年以来呈显著减少趋势，中游径流量的降幅高于上游，并定量分析了降水和人类活动对径流量的影响，上游和中游人类活动对径流量减少的影响程度分别占 88.1%和 84.9%，水利水保工程、生产生活用水等人类活动是引起黄河径流量减少的主要因素。

流域水文模型在水文预报和解决生产实际问题中起着重要的作用，如防洪减灾、水资源可持续利用、水环境和生态系统保护等。流域水文模型还是分析研究气候变化和人类活动对洪水，水资源和水环境影响的有效工具，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，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。陈利群和刘昌明[13]利用 2 个分布式水文模型(SWAT 和 VIC)模拟了黄河源区土地覆被变化与气候波动对径流的影响，并区分两者的影响贡献率。王忠静等[14]分析了 1957~2000 年期间永定河官厅水库以上流域的还原水量与入库水量，并采用 GBHM 模型模拟了 1990 和 2000 年两期土地利用下的流域径流，分析了下垫面变化对径流的影响。权全等[15]运用 DRAINMOD 水文模型模拟了 1988~2007 年西安市城市土地利用变化对降雨径流产生的影响，探讨了降低城市地表径流、增加雨水入渗的调控措施，结果表明土地利用类型、土壤入渗能力以及降雨强度是影响城区降雨 - 径流关系的重要因素。史晓亮等[16]以滦河流域为研究区，利用 1985 和 2000 年土地利用数据，结合 SWAT 分布式水文模型定量评价了流域土地利用/覆被变化的水文效应，并分析了流域地表径流变化与主要景观类型的响应关系。贺瑞敏等[17]利用 VIC 模型，在海河流域选取了 6 个典型流域资料来率定 VIC 模型的参数，通过模型参数移植技术，建立了全流域的径流模拟平台，

根据假定的气候变化情景,分析了海河流域河川径流对气候变化的响应机理。许崇育等[18]全面回顾总结了水文模型发展的历史,取得的成就和存在的问题,重点讨论了环境变化下水文模拟的几个主要问题:①水文过程和降雨-径流关系的非稳定性问题;②水文模型在无资料流(区)域的应用问题;③水文模型在变尺度(时间和空间)情况下存在的问题;④水文模型与气候模型耦合的可能性问题。在讨论问题的同时提出了作者独到的观点和想法。

许多水文学家对如何甄别水文序列的变化和探讨其变化原因做了大量的研究工作,也得出了不同的结论[19]-[21]。Zhang 等[22]初步研究和比较了中国九大流域的降雨和流量近 50 年(1956~2005)的变化趋势以及降雨径流关系的变化规律。结果表明,在中国北方干旱和半干旱地区(黄河,海河,塔里木河,松辽河),降雨和径流明显呈现出不一致的变化趋势,导致了降雨径流关系的非平稳性。而在中国南方湿润地区(长江,珠江,岷江,及西南诸河),虽然降雨和径流都有不同程度的变化,但降雨和径流的变化趋势基本一致,说明南方诸河的降雨径流关系趋于稳定。

2.2. 变化环境下水文模型结构和参数随时间和空间转移的可能性

在水文序列和降雨径流关系稳定的前提下建立的水文模型,被广泛用来模拟气候变化和土地利用变化情景下的水文响应。一般的计算方法和步骤是:①通过历史资料对模型参数进行率定;②利用不同的方法和模型建立未来气候和土地利用变化情景;③将第二步产生的情景,作为第一步率定好模型的输入信息和资料,模拟生成变化环境下的径流和其它水量平衡项。现有研究中存在的核心问题是水文模型的结构和参数是否具备在变化环境下的转移应用能力,而大量的研究表明:大多数的水文模型并不具备这个功能[23]-[26]。主要表现在即使是非常相似的模型,而且其在率定期模拟结果相差无几,一旦把变化环境下非稳定性水文序列作为模型的输入,其结果相差巨大[27]。

如何才能得到变化环境情景下较为客观的水文响应结果?最简单的也是最常用的方法就是采用多个水文模型的结果加以平均,也就是简单的集合预测方法。该方法虽然能在一定程度上降低单一模型的不确定性,但由于它不能确定不同模型的优劣,导致了它们的平均值仍可能有很大的不确定性,而且这个不确定性的程度是未知的。Young [28]发现模型参数随率定时段的不同而发生显著变化。也就是说,如果用不同时期资料率定的模型参数,模拟环境变化情景下的水文响应将得出不同的结果。Merz 等[29]在奥地利选择 273 个流域,用 41 年的资料对 HBV 模型每 5 年率定一次,结果发现不管是模型的效率系数还是模型参数值都随时间发生明显变化。由于未来的情景是不可测的,环境变化下水文预测预报的结果也无法检验。国际水文科学协会(IAHS)前主席 Klemes [30]提出了利用历史资料检验水文模型模拟变化环境下水文响应的方法,即 differential-split sample 检验,不能通过这个检验的模型不适合用来做这方面的应用。Xu [31] [32]采用 WASMOD 模型开展了类似检验的研究,但由于流域个数和序列长度有限,还有待对其它模型在不同区域的应用效果作进一步的验证。Li 等[33]利用 differential-split sample 检验法研究了 DWBM 和 SIMHD 模型参数在非稳定气候条件下移植可能性,结论是不同气候条件下率定的参数在交叉应用时将产生显著误差。Refsgaard 等[34]比较了几种在气候变化情景下水文模型参数转移的方法,得出通过 differential-split sample 检验的模型要优于其它模型的结论。

无(缺)资料流(区)域模型参数是需要通过移用有资料流域的参数来实现的。因为每个流域的气候和下垫面条件不完全相同,所以无(缺)资料流(区)域水文模拟也属于变化环境下的水文模拟问题。预测同一个流域土地利用变化下的水文响应可以认为是其中一种特殊的情景。无(缺)资料流(区)域的水文模拟经历自有水文模型以来的多年探索,特别是国际水文科学协会(IAHS)2002 年启动的无(缺)资料流域的水文预测(Prediction in Ungauged Basin, 简称 PUB) (2003~2012)研究计划。该计划实施 10 余年来,取得了一些重要的理论和应用成果[35] [36]。无(缺)资料流(区)域的模型参数估算目前常见的方法是多元回归法[37]-[39]、流域空间邻近法和流域物理特性相似法[40]-[42]、全局平均法[43] [44]和多目标区域率定法[45] [46]。

2.3. 水文模型和气候模型耦合的问题

为延长水文预报的预见期, 20 世纪 90 年代以来, 越来越多的水文气象学者将数值天气预报模式与水文模型进行耦合研究, 根据水文模型的输出结果是否对数值天气预报模式形成反馈, 可将耦合方法分成两类: 单向耦合和双向耦合。Lin 等[47]采用双向耦合(MC2/CLASS*/GUH)系统成功地重现了一场暴雨洪水过程线, 显示了大气水文耦合模式预报暴雨洪水的能力, 并能提供较长的预见期; Seuffert 等[48]将中尺度数值天气预报系统 LM 和陆面水文模型 TOPLATS 双向耦合, 用 TOPLATS 取代了 LM 中土壤模块, 克服了未考虑土壤侧向水流及汇流过程的不足, 在同一个交互界面上实现了两个模式的在线耦合, 提高了大气模式对陆气之间的能量通量和降水的预报能力。Anderson 等[49]采用单向的方法耦合了中尺度预报模式 MM5 与 HEC-HMS 水文模型, 并对 Calaveras 流域 3 日的 1 小时连续流量过程进行了预报, 同时用图示法比较了 MM5 降水预报与实测值的差别, 指出其降雨预报精度还有待提高; Karsten 等[50]将 5 个数值天气预报模式和一个陆面分布式水文模型 WaSiM-ETH 分别作了单向耦合, 研究耦合模式在洪水预报中的应用, 他们指出耦合预报的结果因数值预报模式和挑选场次洪水不同而不同, 预报降水的位置和雨量即使只有相对较小的误差, 也将导致流量预报的巨大误差, 耦合模式的改进将主要依靠大气模式的改进; Walter Collischonn 等[51]用中尺度数值预报模式 ARPS 模拟预报了连续 167 天的 3 种不同空间分辨率下的降水资料, 以此驱动分布式水文模型模拟预报径流过程, 并与零降雨输入、完美预报输入(即实测降雨)、实测径流过程三种情况进行了比较, 但未对 ARPS 的降水预报进行评定; 陆桂华等[52]利用加拿大中尺度数值模式 MC2 模拟的降水驱动半分布式新安江模型, 建立了降雨预报评价标准, 进行了产汇流计算, 结果显示耦合模型能成功的预报研究场次的暴雨和洪水过程, 且能有效的延长洪水预见期。郭生练等[53]建立了中尺度数值预报模式 MM5 和水文模型 VIC 的单向耦合预报系统, 并采用汉江流域汛期水文资料对模型预报效果进行了验证。高冰等[54]采用新一代中尺度数值天气模式 WRF 和分布式水文模型 GBHM, 开展了基于气象水文耦合的三峡入库洪水预报研究, 结果表明, 基于数值天气预报的三峡入库洪水预报具有一定精度, 并且能够显著延长洪水预报的预见期。

2.4. 水资源优化配置模型与水文模型的耦合

20 世纪 90 年代以来, 为推动水资源系统规划的发展与应用, 国外开发了一系列水资源系统模拟软件, 如: 丹麦水利与环境研究所(DHI)的 Mikebasin、美国 Brigham Young 大学与陆军工程兵团共同开发的 WMS、奥地利环境软件与服务公司开发的流域综合管理软件 Waterware、以美国农业部(USDA)为主开发的流域水资源模拟模型 Aquarius、澳大利亚研制的 ICMS (Interactive Component Modeling System)水资源系统管理模型等, 水资源配置对象从单纯的水量配置逐步发展为考虑水质因素的水资源配置。与此同时, 国内水资源配置研究始于 20 世纪 60 年代以水库优化调度为手段的水资源分配研究, 经过一系列的国家科技攻关、自然科学基金等项目的研究以及生产实践的推动, 水资源配置理论体系逐步丰富与完善。黄强等[55]以西安市水资源系统为对象, 建立多水源、多目标水资源配置模型, 提出了相应的求解方法, 获得了系统有限水量在不同用水部门的优化分配方案。陈晓宏等[56]以大系统分解协调理论作为技术支持, 运用逐步宽容约束法及递阶分析法, 建立东江流域水资源优化调配的实用模型, 并对该流域特枯年的水资源量进行了优化配置和供需平衡分析。王浩等[57]在“黄淮海水资源合理配置研究”中, 首次提出水资源“三次平衡”的配置思想, 系统地阐述了基于流域水资源可持续利用的系统配置方法, 其核心内容是在国民经济用水过程和流域水循环转化过程两个层面上分析水量亏缺态势, 并在统一的用水竞争模式下研究流域之间的水资源配置问题。刘建林等[58]以系统分析理论为基础, 对跨流域多水源多目标多工程调水所涉及的水资源问题进行研究, 建立了南水北调东线工程联合调水仿真模型, 为实际应用提供了决策平台。刘丙军等[59]针对南方地区水资源利用特点, 以东江流域为例, 建立了以水资源合理利用为目标, 综合考虑防洪、供水、河道生态等约束的水资源合理配置多目标分析模型, 并运用大系统“分解协调”原理提出了相应算法。王德智等[60]针对动态规划在供水库群优化调度中存在“维数灾”, 且难以获得真正最优解的问题, 将改进的加速递

传算法应用到水库群的水资源优化配置之中。金菊良等[61]为确定区域水资源合理配置各评价指标的权重、有效处理区域水资源分配过程中的模糊性和随机性,提出了基于信息熵原理的模糊模式识别模型与基于加速遗传算法的模糊层次分析法相耦合,进行各子区域水资源量合理配置的新模型(EFPR-FAHP)。辛芳芳和梁川[62]在多目标线性规划求解中引入模糊数学中的隶属度概念,建立以目标隶属度最大为目标的数学模型,应用于都江堰灌区水资源合理配置中。陈卫宾等[63]提出基于记忆梯度混合遗传算法用于灌区水资源优化配置。耿福明等[64]根据水资源价值、边际机会成本、最优化数学等理论,基于水资源净效益最大化的水资源优化配置思想,以水资源承载力、用水部门生存条件、用水公平性及可持续发展约束等水资源开发利用约束为准则,建立了基于水资源净效益最大化的水资源优化配置模型,并将该模型应用于南水北调受益区。王福林和吴丹[65]基于区域产业结构发展趋势及其演变规律,以保障区域生活用水需求与生态环境用水需求为前提,在区域水资源可供总量与产业发展用水需求量的约束条件下,建立基于水资源优化配置的区域产业结构动态演化模型。陈春林、郑垂勇等(2010)针对传统权重确定方法的不足,提出了一种新的确定权重的方法(ANP方法),将该方法应用于南水北调工程受水区水资源优化配置。陈强等[67]利用改进的 SWAT 模型多水源灌溉模块,将水资源配置模型的农业灌溉用水分布到改进后的 SWAT 模型中,实现二模型的松散式耦合,这种分布式水文模型与配置模型的耦合为流域水资源管理提供了一种新的途径。张礼兵等[68]采用对数平均迪氏指数法(LMDI)建立了工业用水恒等式,将工业用水影响效应划分为工业节水效应、经济规模效应、产业结构效应和用水强度效应,对安徽省 2003~2011 年总体及逐年的工业行业用水变化分别进行因素分解计算和分析。左其亭等[69]从和谐论的观点出发,把和谐平衡定义为“利益相关者考虑各自利益和总体和谐目标而呈现的一种相对静止且相关者各方暂时都能接受的平衡状态”,提出了基于和谐论的和谐平衡计算方法,确定了实现河南省水资源与经济社会和谐平衡的条件。张守平等[70] [71]构建了供需平衡、耗水平衡和基于水资源优化配置的水质模拟系统,提出基于水功能区纳污能力的污染物总量分配优化模型,分析分质供水的实现方式以及不同模块之间的耦合关系。李昱等[72]根据水库群的拓扑结构和共同供水目标的分布情况,分层构建了两个虚拟聚合水库及其联合调度图;并根据水库自身属性以及供水任务,联合使用分水比例法和补偿调节法两种方法分配共同供水任务;同时设置补给限制线以避免过度补偿,以此构建水库群联合调度模型,并采用改进遗传算法对模型进行优化求解,得到相应联合调度规则。

综上所述,水资源配置研究主要表现在[73]-[75]: ① 配置研究的水源范围上,从最初的地表水量分配为主,发展到地表水、地下水联合调度配置,再到对常规水源和非常规水源的统一调配,从一次性水资源到再生性水资源的配置; ② 配置目标上,从单一的供水效益最大化发展到对流域水资源管理目标的多属性识别; ③ 配置对象上,从供水量的配置发展到对取水量与耗水量的统一分配,从水量分配到考虑水量水质的联合分配; ④ 配置指导思想,从“以需定供”和“以供定需”到基于宏观经济的水资源配置,再到面向可持续发展配置; ⑤ 配置方式上,从单一的工程措施扩展到采用经济、协商等多种手段并用的配置方式; ⑥ 配置模型构建上,从“还原论”为基础的组合模型方法到整体模型方法,系统动力学、大系统分解协调、多目标规划与决策技术等都引入到模型的构建和分析中; ⑦ 配置模型求解技术上,根据所构建模型特点,已从线性规划、动态规划发展到多目标求解技术以及各种启发式智能算法,如模拟退火算法(SA)、蚁群算法(ACO)、遗传算法(GA)、粒子群算法(PSO)、人工免疫算法、人工鱼群算法、和声算法、多目标广义演化免疫算法(MEMOIA)、第二代非支配排序遗传算法(NSGA-II)等。

2.5. 流域水循环“自然-社会”二元变化的驱动机理与模拟

随着社会经济的快速发展,人类活动对流域水文循环过程和水资源演变规律的影响逐渐加剧,引发了一系列严重的水问题和水危机,其主要原因是流域水循环的驱动力、循环结构、循环参数在人类活动的影响下发生了二元演变效应,呈现出明显的“自然-社会”二元特性,并导致了径流性水资源衰减、水体污染和环境污染、天然生态退化等各种不良后果[76] [77]。因此,流域水文循环过程的模拟不仅仅要研究变化环境下的流域降雨径

流关系,更需要研究人类活动影响下的流域水文效应和人类活动对水循环要素变异的驱动机理。王浩等[78]归纳了流域水循环“自然-社会”二元特性主要表现在:一是循环驱动力的二元化,即流域水循环的内在动力已由过去一元自然驱动演变为现在的“自然-社会”二元驱动;二是循环结构的二元化,即人类聚集区的水循环过程往往由自然循环和人工侧支循环耦合而成,两大循环之间保持动力关系,通量之间此消彼涨;三是水资源服务功能的二元化,即水分在其循环转化过程中,同时支撑了同等重要的经济社会系统和生态环境系统。贾仰文等[79][80]针对高强度人类活动作用下海河流域水循环的“自然-社会”二元特性,开发了流域二元水循环模型,该模型由分布式流域水循环模型(WEP)、水资源合理配置模型(ROWAS)和多目标决策分析模型(DAMOS)3个模型耦合而成,针对各模型的优势与不足,提出了两层耦合的技术路线,以实现统筹考虑水资源、宏观经济与生态环境的流域水资源综合管理分析的功能。刘家宏等[81]以海河流域为原型对象,分析了二元水循环的关键要素、平衡方程以及演变历程,应用建立的二元水循环模式理论,研究了海河流域二元水循环十项关键要素的演化规律。王浩等[82]在全面剖析流域水循环演变“自然-社会”二元特性的基础上,构建海河流域二元水循环及其伴生过程综合模拟平台,并以此为工具通过基于气候模式预测结果与水量控制条件的情景设置,对水资源、水生态和水环境的未来演变情势进行了预估。刘佳嘉等[83]提出一种基于分布式水文模型的分解气候变化和人类活动对流域水循环过程影响的方法,用于对多个因素进行影响量分解。该方法能综合考虑不同因素之间的相互作用,使得单因素影响量之和恰好等于所有因素综合影响量,并从理论和应用两个方面对此进行论证。总体来看,通过一个时期的探索,“自然-社会”二元水循环的耦合研究已形成了诸多的知识点[84]。

3. 主要存在的科学技术问题

3.1. 降雨径流的非稳定性关系

目前几乎所有模型的应用都是建立在稳定降雨径流关系假设的基础上,针对非稳定的降雨径流关系,建立和应用水文模型来模拟降雨径流关系的专门研究还不够深入。已有的研究在处理非稳定方面存在很大的缺陷,大多数都是针对其中的一个方面,缺乏系统性的理论和技术方法研究。因此,变化环境下的降雨径流非稳定性关系模拟所面临问题和挑战很多,包括模型参数和结构随时间(变化的气候)转移的问题;模型参数和结构随空间(不同的流域)转移的问题;上述两种情况的组合,即变化环境下无资料流域水文响应的模拟;水文模型和气候模型耦合的可能性等。环境变化下带来的这些问题,导致了现有水文模型存在着重大的理论缺陷,如果不及时解决和突破,水文模型应用结果的可靠性和精确性就值得商榷和怀疑。

国内外许多水文学家对如何甄别水文序列的变化和探讨其变化原因做了大量的研究工作,但对于如何甄别各水文序列相互关系的稳定性,分析各水文过程之间关系的稳定性以及非稳定原因和模拟等方面,还缺少成熟的理论和方法[85]。

3.2. 水文模型参数的时空尺度转化

变化环境下水文模型参数转移问题到现在还没有很好的解决方法,主要表现为不同的研究不能得出统一的结论,有时甚至是相反的结论。原因是因为所用的模型及流域的类型和数量各不相同,大部分研究都表示在该领域还需要做大量深入的研究。特别是模型参数和结构同时随时间(不同的时期和时间尺度)和空间(不同的区域和空间尺度)转移的问题。该问题已成为当前和今后水文模型研究的关键和前沿问题之一,迫切需要在充分论证和比较已有方法的基础上,创建一些新的理论和方法,该领域的研究应该引起全世界水文学家的高度重视[86][87]。

3.3. 水文模型与气候模型的耦合

国内外的水文气象学家为水文气候模型的耦合做了大量的研究工作并取得了一些进展,但真正成功耦合(双

向耦合并完全按照气候模型的时间和空间尺度运行)仍局限于气候模型与陆面过程模型的耦合。而陆面过程模型并不是传统意义上的水文模型,它本来就是气候模型的一部分或者专门为气候模型开发的以能量平衡为核心的垂直过程模式。传统的水文模型以水量平衡为基础、以土壤含水量的时空变化为核心,具有较高的模拟精度。但传统水文模型的基本结构、时空尺度和无能量平衡模块等特点决定了其在近期内还不能与气候模型双向耦合。该领域的研究重点和难点在于除了为水文模型增加能量平衡模块外,更重要的是研究传统水文模型的结构和参数在空间尺度(由流域到区域甚至全球)和时间尺度(由日到小时再到 15 分钟(气候模型时间步长))的转换可能性和转换规律。在变化环境下的水文水资源影响研究中,水文模型参数随时间步长的变化以及如何变化的问题,一直没有得到重视、研究和解决。针对不同时间步长,水文模型结构和参数如何演绎需要进一步深入研究。Littlewood 等[88]针对水文模型的参数随时间步长变化的问题,做了些探讨和研究,结论是水文模型参数的率定值随模拟时间步长变化显著。然而目前大部分的水文模型都没有进行水文模型结构和参数随时间步长变化的比较研究。

3.4. 水文模型与水资源优化配置模型的耦合

国内外在水文模拟预测和水资源配置模型进行了较为深入的研究,但由于变化环境下水文机理的复杂性、流域的多样性、资料的限制和模型的局限性等种种原因,许多科学和技术难题并未解决,尚未将水资源系统动态演化和系统内各单元之间相互联系之间进行耦合,也未考虑动态演化条件下优化配置模型求解算法。因此,十分有必要开展降雨径流非稳定性关系的模拟理论与方法研究,建立一套客观公正的方法体系来应对变化环境下的水文模拟预报、水资源供需动态模拟和水资源优化配置研究,这不仅会丰富发展水文水资源学科理论,而且也是研究变化环境下水资源系统适应性及其对策的基础[89] [90]。

3.5. 水文水资源与社会耦合系统

目前的研究对于“自然-社会”耦合系统的内在联系、驱动机制、演进规律和反馈机制的系统认知还没有形成,亟待加大研究和创新力度,建立和完善“自然-社会”相互作用的二元水循环科学体系,通过研究水资源随人类社会经济系统发展而演化的科学机理,实现对社会水循环系统有效科学的调控和水资源可持续利用,保障经济社会的可持续发展。

4. 研究内容以及关键科学问题

4.1. 变化环境下非稳定性降雨径流关系及识别方法

不同历史时期的人类活动和气候变化是导致降雨径流关系非稳定性的主要原因。而水文模型通过确定参数来模拟降雨径流关系,通过分析降雨径流序列的变化同模型参数的变化是否存在相关,通过模型参数的变化来反映降雨径流关系非稳定性的变化规律,同时通过模型参数和变化环境的关系来诊断降雨径流关系非稳定性的成因,建立由水文模型参数的稳定性来识别降雨径流关系稳定性的方法。但是,由于水文机理的复杂性、流域的多样性、资料的限制和模型的局限性等原因,模型参数的时间和空间移用尚有很多未解决的难题。现有模型的率定,流量资料是唯一的标准,但是在模型中大部分参数同流量资料并无直接关系,用流量资料率定模型无法确保所有的参数的合理性。通过分析模型“异参同效”的原因、模型参数间的相互关系,以及模型参数和下垫面的关系,分析得到不同模型的参数在时间和空间的演绎规律及成因。

4.2. 考虑时间变化的降雨径流产汇流机理

流域的产流,主要决定于非饱和带地下水运动的机理、特性与运动规律。现有水文模型的基本理论依据是将非饱和带地下水运动基本微分方程组中的连续方程简化为水量平衡方程,仅仅考虑了质量守恒而未考虑能量

守恒,从数学上讲,是不能求解的,但是该法将时间视为常数,从静态去研究流域产流,即不考虑时间变量,因而可以求解。考虑时间变化的降雨径流产汇流计算由非饱和带地下水运动基本微分方程推导流域产流方程,导出地表、地下径流产流时刻的计算公式,并以此建立一个将下渗能力曲线、不稳定雨强(随时间而变的)和前期土壤含水量有机地联系起来的流域产流计算方法,从而解决利用下渗能力曲线计算流域产流量的途径。

4.3. 基于时间变化产汇流机理的分布式水文模型

变化环境影响研究中,不同的模型存在时空尺度差异,水文模型时间步长较大,气候模型时间步长小。现有的水文模型是静态产流过程,无法满足小步长的计算要求。因此,探讨水文模型产汇流机制的改进,研究水文模型结构和参数随时间步长的变化规律,以满足所建立的水文模型能适应不同时间步长的计算要求。并同区域气候模型进行耦合,分析变化环境下的水文过程响应。

4.4. 基于水联网技术的水资源优化配置模型

水联网技术包括物理水网(现实的河湖连通及供水通道系统)、虚拟水网(物理水循环通路及其边界的信息化表达)和市场水网(水资源供需的市场信息、优化调配机制及交互反馈)。物理水网以水资源分区为基础,根据蓄水、引水、提水和调水工程等之间的水力联系,虚拟水网是构建面向对象的水循环通路及其边界的信息模型和信息服务,市场水网是在水资源需求量预测模型的基础上,建立不同部门、不同区域、不同时段用水主体之间相互联系的定量表示,并与虚拟水网、物理水网相耦合,在不同层次、不同区域上建立水资源的供水关系模型,从而构建出既考虑当代的发展,又要照顾到后代可持续发展的需要;既要照顾到发达地区的发展现实,又要求发达地区的今后发展不应以损害欠发达地区的可持续发展能力为代价;既要追求以提高水资源总体配置效率为中心的优化配置模式,又要注意效益在全体社会成员之间的公平分配的水资源配置模型。

4.5. 流域水文水资源与社会系统耦合概念模型及应用

流域水文水资源与社会系统耦合概念模型能对水文气象信息、土地利用变化及各种水资源信息等流域进行空间分析管理,模拟变化环境下水文响应过程,从流域/区域角度研究水文气象变化、土地利用格局变化、水资源开发利用等过程对流域水文过程的综合影响。流域水文水资源与社会系统可实现统筹考虑水文水资源、宏观经济与生态环境的流域水资源综合管理分析功能的目标。不同的模型存在时空尺度差异,如水文模型结构和参数的时间特性,能适应气候模型或者气象模型时间步长小的特点,同样的问题也存在于多目标决策模型与水资源优化配置模型之间、分布式水文模型与水资源优化配置模型之间。因此流域水文水资源与社会系统耦合概念模型模拟的关键问题为以基于可变下渗能力曲线的分布式水文模型为核心嵌套模型之间的尺度转换问题。

5. 结论

以国际水文科学协会 Panta Rhei (2013~2022)科学计划中提出的科学问题为研究方向,结合我国实行最严格水资源管理制度的试点流域为研究对象,开展水文水资源与社会耦合系统研究,分析探讨流域水文模拟预测和水资源优化配置与管理中存在的科学技术问题,研究提出水文水资源与社会耦合系统的新理论和新方法,为流域防洪减灾及经济社会可持续发展提供技术支撑,为国际水文科学计划做出我国应有的贡献,对提高我国水文水资源学科的水平和国际影响力,具有重大的理论价值和现实意义。

探索并揭示流域水文水资源与社会耦合系统的外部驱动因素和内部变化规律以及相互作用和反馈机制。具体的科学目标包括:①识别降雨径流的非稳定性关系,分析现有水文模型随时间和空间变化的演绎规律及内在成因;②通过对非饱和带地下水运动的机理与特性分析,建立能反映时间特性的降雨径流产汇流计算方程,实现变化环境下的水文过程响应;③研究和实现考虑了大气-植被-土壤之间物理交换过程的分布式水文模型,反映土壤、植被、大气中水热状态变化和水热传输;④考虑社会经济发展变化,建立能适应社会经济动态演化

的水资源优化配置模型；⑤建立流域水文水资源与社会系统耦合概念模型，以流域为目标区域，实现水资源合理配置和科学管理的目标。

基金项目

国家自然科学基金重点项目(51539009)资助。

参考文献 (References)

- [1] 郭生练, 熊立华, 刘攀. 变化环境下水问题与对策[M]. 武汉: 汉斯出版社, 2012.
GUO Shenglian, XIONG Lihua and LIU Pan. Water problems and countermeasures in changing environment. Wuhan: Hans Publishers, 2012. (in Chinese)
- [2] MONTANARI, A., YOUNG, G., SAVENIJE, H. H. G., et al. “Panta Rhei—Everything Flows”: Change in hydrology and society—The IAHS Scientific Decade 2013-2022. *Hydrological Sciences Journal*, 2013, 58(6): 1256-1275.
<http://dx.doi.org/10.1080/02626667.2013.809088>
- [3] 国务院. 关于实行最严格水资源管理制度的意见(国发[2012]3号)[Z]. 2012.
Chinese State Council. Advice on applying the strictest water resources management system (2012, No. 3). 2012. (in Chinese)
- [4] 胡四一. 水资源管理要严守“三条红线”[J]. *决策与信息*, 2012(10): 40-42.
HU Siyi. Water resources management should strictly abide by the “three red lines”. *Decision and Information*, 2012(10): 40-42. (in Chinese)
- [5] 张建云, 王金星, 李岩, 章四龙. 近 50 年我国主要江河径流变化[J]. *中国水利*, 2008(2): 31-34.
ZHANG Jianyun, WANG Jinxing, LI Yan and ZHANG Silong. Study on runoff trends of the main rivers in China in the recent 50 years. *China Water Resources*, 2008(2): 31-34. (in Chinese)
- [6] 李道峰, 田英, 刘昌明. GIS 支持下的黄河河源区降水径流要素变化分析[J]. *水土保持研究*, 2004, 11(1): 144-147.
LI Daofeng, TIAN Ying and LIU Changming. Analysis of rainfall-runoff factor change of the source regions of the Yellow River with supporting of GIS. *Research of Soil and Water Conservation*, 2004, 11(1): 144-147. (in Chinese)
- [7] 孙宁, 李秀彬, 冉圣洪, 李子君. 潮河上游降水 - 径流关系演变及人类活动的影响分析[J]. *地理科学进展*, 2007, 26(5): 41-47.
SUN Ning, LI Xiubin, RAN Shenghong and LI Zijun. The changes of rainfall-runoff relationship and the impacts of human activities in the upper of Chao Watershed. *Progress in Geography*, 2007, 26(5): 41-47. (in Chinese)
- [8] 任立良, 张炜, 李春红, 王美荣. 中国北方地区人类活动对地表水资源的影响研究[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2001, 29(4): 13-18.
REN Liliang, ZHANG Wei, LI Chunhong and WANG Meirong. Impacts of human activities on river runoff in north China. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2001, 29(4): 13-18. (in Chinese)
- [9] 冯平, 李建柱, 徐仙. 潘家口水库入库水资源变化趋势及影响因素[J]. *地理研究*, 2008, 27(1): 213-220.
FENG Ping, LI Jianzhu and XU Xian. Analysis of water resources trend and its causes of Panjiakou Reservoir. *Geographical Research*, 2008, 27(1): 213-220. (in Chinese)
- [10] 李慧赞, 张弛, 王本德, 曹明亮. 基于模糊聚类的丰满上游流域降雨径流变化趋势分析, *水文*, 2009, 29(3): 28-31.
LI Huiyun, ZHANG Chi, WANG Bende and CAO Mingliang. Analysis of changing trend of rainfall and runoff in upstream of Fengman watershed based on fuzzy clustering. *Journal of China Hydrology*, 2009, 29(3): 28-31. (in Chinese)
- [11] 李致家, 于莎莎, 李巧玲, 姚成, 余钟波, 颜梅春, 芮孝芳. 降雨 - 径流关系的区域规律[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2012, 40(6): 597-604.
LI Zhijia, YU Shasha, LI Qiaoling, YAO Cheng, YU Zhongbo, YAN Meichun and RUI Xiaofang. Regional pattern of rainfall-runoff relationship. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2012, 40(6): 597-604. (in Chinese)
- [12] 李二辉, 穆兴民, 赵广举. 1919-2010 年黄河上中游区径流量变化分析[J]. *水科学进展*, 2014, 25(2): 155-163.
LI Erhui, MU Xingmin and ZHAO Guangju. Temporal changes in annual runoff and influential factors in the upper and middle reaches of Yellow River from 1919-2010. *Advances in Water Science*, 2014, 25(2): 155-163. (in Chinese)
- [13] 陈利群, 刘昌明. 黄河源区气候和土地覆被变化对径流的影响[J]. *中国环境科学*, 2007, 27(4): 559-565.
CHEN Liqun, LIU Changming. Influence of climate and land-cover change on runoff of the source regions of Yellow River. *China Environmental Science*, 2007, 27(4): 559-565. (in Chinese)
- [14] 王忠静, 杨芬, 赵建世, 何杉. 基于分布式水文模型的水资源评价新方法[J]. *水利学报*, 2008, 39(12): 1279-1285.
WANG Zhongjing, YANG Fen, ZHAO Jianshi and HE Shan. New approach for water resources assessment based on distributed hydrological model. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2008, 39(12): 1279-1285. (in Chinese)

- [15] 权全, 罗纨, 沈冰, 贾中华, 唐双成. 城市化土地利用对降雨径流的影响与调控[J]. 水土保持学报, 2013, 27(1): 46-50.
QUAN Quan, LUO Wan, SHEN Bing, JIA Zhonghua and TANG Shuangcheng. Rainfall-runoff reduction measures by land use patterns of Xi'an. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, 27(1): 46-50. (in Chinese)
- [16] 史晓亮, 杨志勇, 严登华, 李颖, 袁喆. 滦河流域土地利用/覆被变化的水文响应[J]. 水科学进展, 2014, 25(1): 21-27.
SHI Xiaoliang, YANG Zhiyong, YAN Denghua, LI Ying and YUAN Zhe. On hydrological response to land-use/cover change in Luanhe River basin. *Advances in Water Science*, 2014, 25(1): 21-27. (in Chinese)
- [17] 贺瑞敏, 张建云, 鲍振鑫, 严小林, 王国庆, 刘翠善. 海河流域河川径流对气候变化的响应机理[J]. 水科学进展, 2015, 26(1): 1-9.
HE Ruimin, ZHANG Jianyun, BAO Zhenxin, YAN Xiaolin, WANG Guoqing and LIU Cuishan. Response of runoff to climate change in the Haihe River basin. *Advances in Water Science*, 2015, 26(1): 1-9. (in Chinese)
- [18] 许崇育, 陈华, 郭生练. 变化环境下水文模拟的几个关键问题和挑战[J]. 水资源研究, 2013, 2(2): 85-95.
XU Chongyu, CHEN Hua and GUO Shenglian. Hydrological modeling in a changing environment: Issues and challenges. *Journal of Water Resources Research*, 2013, 2(2): 85-95. (in Chinese)
- [19] WANG, Y. Q., ZHOU, L. Observed trends in extreme precipitation events in China during 1961-2001 and the associated changes in large-scale circulation. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(9): Article ID: L09707.
- [20] ZHANG, Z., WAGENER, T., REED, P. and BHUSHAN, R. Reducing uncertainty in predictions in ungauged basins by combining hydrological indices regionalization and multiobjective optimization. *Water Resources Research*, 2008, 44(12): Article ID: W00B04.
- [21] GAO, P., GEISSEN, V., RITSEMA, C. J., MU, X. M. and WANG, F. Impact of climate change and anthropogenic activities on stream flow and sediment discharge in the Wei River basin, China. *Hydrology and Earth System Science*, 2013, 17(3): 961-972. <http://dx.doi.org/10.5194/hess-17-961-2013>
- [22] ZHANG, Z. X., CHEN, X., XU, C. Y., YUAN, L. F., YONG, B. and YAN, S. F. Evaluating the non-stationary relationship between precipitation and streamflow in nine major basins of China during the past 50 years. *Journal of Hydrology*, 2011, 409(1-2): 81-93. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.07.041>
- [23] BOORMAN, D. B., SEFTON, C. E. Recognizing the uncertainty in the quantification of the effects of climate change on hydrological response. *Climatic Change*, 1997, 35(4): 415-434. <http://dx.doi.org/10.1023/A:1005372407881>
- [24] PANAGOULIA, D., DIMOU, G. Linking space-time scale in hydrological modelling with respect to global climate change. Part 1. Models, model properties, and experimental design. *Journal of Hydrology*, 1997, 194(1-4): 15-37. [http://dx.doi.org/10.1016/S0022-1694\(96\)03220-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0022-1694(96)03220-9)
- [25] PANAGOULIA, D., DIMOU, G. Linking space-time scale in hydrological modelling with respect to global climate change. Part 2. Hydrological response for alternative climate. *Journal of Hydrology*, 1997, 194(1-4): 38-63. [http://dx.doi.org/10.1016/S0022-1694\(96\)03221-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0022-1694(96)03221-0)
- [26] EREGNO, F. E., XU, C. Y. and KITTEROD, N. O. Modeling hydrological impacts of climate change in different climatic zones. *International Journal of Climate Change Strategies and Management*, 2013, 5(3): 344-365. <http://dx.doi.org/10.1108/IJCCSM-04-2012-0024>
- [27] JIANG, T., CHEN, Y. D., XU, C. Y., CHEN, X. H., CHEN, X. and SINGH, V. P. Comparison of hydrological impacts of climate change simulated by six hydrological models in the Dongjiang Basin, south China. *Journal of Hydrology*, 2007, 336(3-4): 316-333. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.01.010>
- [28] YOUNG, P. C. The estimation of continuous-time rainfall-flow models for flood risk management. *Proceedings of the BHS Third International Symposium, Managing Consequences of a Changing Global Environment*, Newcastle, 19-23 July 2010. <http://dx.doi.org/10.7558/bhs.2010.ic41>
- [29] MERZ, R., PARAJKA, J. and BLOÖSCHL, G. Time stability of catchment model parameters: Implications for climate impact analyses. *Water Resource Research*, 2011, 47(2): Article ID: W02531. <http://dx.doi.org/10.1029/2010WR009505>
- [30] KLEMES, V. Operational testing of hydrological simulation models. *Hydrology Science Journal*, 1986, 31(1): 13-24. <http://dx.doi.org/10.1080/02626668609491024>
- [31] XU, C. Y. Climate change and hydrologic models: A review of existing gaps and recent research developments. *Water Resources Management*, 1999, 13(5): 369-382. <http://dx.doi.org/10.1023/A:1008190900459>
- [32] XU, C. Y. Estimation of parameters of a conceptual water balance model for ungauged catchments. *Water Resources Management*, 1999, 13(5): 353-368. <http://dx.doi.org/10.1023/A:1008191517801>
- [33] LI, C. Z., ZHANG, L., WANG, H., ZHANG, Y. Q., YU, F. L. and YAN, D. H. The transferability of hydrological models under nonstationary climatic conditions. *Hydrology Earth System and Science*, 2012, 16(4): 1239-1254. <http://dx.doi.org/10.5194/hess-16-1239-2012>
- [34] REFGAARD, J. C., MADSEN, H., AndréAssian, V., et al. A framework for testing the ability of models to project climate change and its impacts. *Climatic Change*, 2014, 122(1-2): 271-282. <http://dx.doi.org/10.1007/s10584-013-0990-2>

- [35] HRACHOWITZ, M., SAVENIJE, H. H. G., BLÖSCHL, G., et al. A decade of predictions in ungauged basins (PUB)—A review. *Hydrological Sciences Journal*, 2013, 58(6): 1198-1255. <http://dx.doi.org/10.1080/02626667.2013.803183>
- [36] BLÖCHL, G., SIVAPALAN, M. and WAGENER, T. *Runoff prediction in ungauged basin, synthesis across process, place and scale*. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [37] MERZ, R., BLOSCHL, G. Regionalisation of catchment model parameters. *Journal of Hydrology*, 2004, 287(1-4): 95-123. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2003.09.028>
- [38] XU, C. Y. Operational testing of a water balance model for predicting climate change impacts. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1999, 98-99(1-4): 295-304. [http://dx.doi.org/10.1016/S0168-1923\(99\)00106-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0168-1923(99)00106-9)
- [39] XU, C. Y. Testing the transferability of regression equations derived from small sub-catchments to large area in central Sweden. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2003, 7(3): 317-324. <http://dx.doi.org/10.5194/hess-7-317-2003>
- [40] VANDEWIELE, G. L., ELIAS, A. Monthly water balance of ungauged catchments obtained by geographical regionalization. *Journal of Hydrology*, 1995, 170(1-4): 277-291. [http://dx.doi.org/10.1016/0022-1694\(95\)02681-E](http://dx.doi.org/10.1016/0022-1694(95)02681-E)
- [41] PARAJKA, J., BLOSCHL, G. and MERZ, R. Regional calibration of catchment models: Potential for ungauged catchments. *Water Resources Research*, 2007, 43(6): Article ID: W06406. <http://dx.doi.org/10.1029/2006WR005271>
- [42] PARAJKA, J., MERZ, R. and BLOSCHL, G. A comparison of regionalisation methods for catchment model parameters. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2005, 9(3): 157-171. <http://dx.doi.org/10.5194/hess-9-157-2005>
- [43] KIZZA, M., GUERRERO, J. L., RODHE, A., XU, C. Y. and NTALE, H. K. Modelling catchment inflows into Lake Victoria: Regionalisation of the parameters of a conceptual water balance model. *Hydrology Research*, 2013, 44(5): 789-808.
- [44] LI, L., NGONGONDO, C. S., XU, C. Y. and GONG, L. Comparison of the global TRMM and WFD precipitation datasets in driving a large-scale hydrological model in Southern Africa. *Hydrology Research*, 2013, 44(5): 770. <http://dx.doi.org/10.2166/NH.2012.175>
- [45] HUNDECHA, Y., OUARDA, T. B. M. J. and BARDOSSY, A. Regional estimation of parameters of a rainfallrunoff model at ungauged watersheds using the “spatial” structures of the parameters within a canonical physiographic-climatic space. *Water Resources Research*, 2008, 44(1): Article ID: W01427. <http://dx.doi.org/10.1029/2006WR005439>
- [46] EFSTRATIADIS, A., KOUTSOYIANNIS, D. One decade of multi-objective calibration approaches in hydrological modelling: A review. *Hydrological Sciences Journal*, 2010, 55(1): 58-78. <http://dx.doi.org/10.1080/02626660903526292>
- [47] LIN, C. A., WEN, L., BéLard, M. and CHAUMONT, D. A coupled atmospheric-hydrological modeling study of the 1996 Ha! Ha! River basin flash flood in Québec, Canada. *Geophysical Research Letters*, 2002, 29(2): 13/1-13/4.
- [48] SEUFFERT, G., GROSS, P., SIMMER, C. and WOOD, E. F. The influence of hydrologic modeling on the predicted local weather: Two-way coupling of a mesoscale weather prediction model and a land surface hydrologic model. *Journal of Hydro-meteorology*, 2002, 3(5): 505-522. [http://dx.doi.org/10.1175/1525-7541\(2002\)003<0505:TIOHMO>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1525-7541(2002)003<0505:TIOHMO>2.0.CO;2)
- [49] ANDERSON, M. L., CHEN, Z. Q., KAVVAS, M. L. and FELDMAN, A. Coupling HEC-HMS with atmospheric models for prediction of watershed runoff. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2002, 7(4): 312-318. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(2002\)7:4\(312\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(2002)7:4(312))
- [50] JASPER, K., GURTZ, J. and LANG, H. Advanced flood forecasting in Alpine watersheds by coupling meteorological observations and forecasts with a distributed hydrological model. *Journal of Hydrology*, 2002, 267(1-2): 40-52. [http://dx.doi.org/10.1016/S0022-1694\(02\)00138-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0022-1694(02)00138-5)
- [51] COLLISCHONN, W., HAAS, R., ANDREOLLI, I. and Tucci, C. E. M. Forecasting River Uruguay flow using rainfall forecasts from a regional weather-prediction model. *Journal of Hydrology*, 2005, 305(1-4): 87-98. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.08.028>
- [52] 陆桂华, 吴志勇, 雷文, 张建云. 陆气耦合模型在实时暴雨洪水预报中的应用[J]. *水科学进展*, 2006, 17(6): 847-852. LU Guihua, WU Zhiyong, LEI Wen and ZHANG Jianyun. Application of a coupled atmospheric-hydrological modeling system to real-time flood forecast. *Advances in Water Science*, 2006, 17(6): 847-852. (in Chinese)
- [53] 郭生练, 张俊, 郭靖, 陈桂亚, 陈华. 基于气象模式的汉江流域洪水预报系统[J]. *水利水电科技进展*, 2009, 29(3): 1-5. GUO Shenglian, ZHANG Jun, GUO Jing, CHEN Guiya and CHEN Hua. Flood forecasting system of Hanjiang Basin based on meteorological model. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2009, 29(3): 1-5. (in Chinese)
- [54] 高冰, 杨大文, 谷湘潜, 许继军. 基于数值天气模式和分布式水文模型的三峡入库洪水预报研究[J]. *水力发电学报*, 2012, 31(1): 20-26. GAO Bing, YANG Dawen, GU Xiangqian and XU Jijun. Flood forecast of Three Gorges reservoir based on numerical weather forecast model and distributed hydrologic model. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2012, 31(1): 20-26. (in Chinese)
- [55] 黄强, 王增发, 畅建霞, 梁柱, 田峰巍. 城市供水水源联合优化调度研究[J]. *水利学报*, 1999(5): 57-62. HUANG Qiang, WANG Zengfa, CHANG Jianxia, LIANG Zhu and TIAN Fengwei. Study on joint optimal operation of municipal water supply. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1999(5): 57-62. (in Chinese)

- [56] 陈晓宏, 陈永勤, 赖国友. 东江流域水资源优化配置研究[J]. 自然资源学报, 2002, 17(3): 366-372.
CHEN Xiaohong, CHEN Yongqin and LAI Guoyou. Optimal allocation of water resources in Dongjiang River Basin. Journal of Natural Resources, 2002, 17(3): 366-372. (in Chinese)
- [57] 王浩, 秦大庸, 王建华, 罗琳, 裴源生. 黄淮海流域水资源合理配置[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
WANG Hao, QIN Dayong, WANG Jianhua, LUO Lin and PEI Yuansheng. Rational allocation of water resources in Huang-Huai-Hai watershed. Beijing: Science Press, 2003. (in Chinese)
- [58] 刘建林, 马斌, 解建仓, 赵勇. 跨流域多水源多目标多工程联合调水仿真模型—南水北调中线工程[J]. 水土保持学报, 2003, 17(1): 75-79.
LIU Jianlin, MA Bin, XIE Jiancang and ZHAO Yong. Simulation model of multi-reservoir and multi-consumer and multi-workfor water unite regulation of cross-drainage basin. Journal of Soil and Water Conservation, 2003, 17(1): 75-79. (in Chinese)
- [59] 刘丙军, 陈晓宏, 张灵, 刘德地. 中国南方季节性缺水地区水资源合理配置研究[J]. 水利学报, 2007, 38(6): 732-737.
LIU Bingjun, CHEN Xiaohong, ZHANG Ling and LIU Dedi. Optimal deployment of water resources for seasonal water shortage area in South China. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(6): 732-737. (in Chinese)
- [60] 王德智, 董增川, 童芳. 基于 RAGA 的供水库群水资源配置模型研究[J]. 水科学进展, 2007, 18(4): 586-590.
WANG Dezhi, DONG Zengchuan and TONG Fang. Optimal operation of feeding reservoir group based on RAGA. Advances in Water Science, 2007, 18(4): 586-590. (in Chinese)
- [61] 金菊良, 王文圣, 程吉林, 黄诗峰. 区域水资源合理配置的模糊模式识别-模糊层次分析法的熵耦合模型[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2007, 39(2): 9-13.
JIN Juliang, WANG Wensheng, CHENG Jilin and HUANG Shifeng. Entropy coupled model of fuzzy pattern recognition and FAHP for reasonable allocation of water resources to region. Journal of Sichuan University(Engineering Science Edition), 2007, 39(2): 9-13. (in Chinese)
- [62] 辛芳芳, 梁川. 基于模糊多目标线性规划的都江堰灌区水资源合理配置[J]. 中国农村水利水电, 2008(4): 36-38.
XIN Fangfang, LIANG Chuan. Rational allocation of Dujiangyan irrigation area water resources based on fuzzy multi-objective linner programming. China Rural Water and Hydropower, 2008(4): 36-38. (in Chinese)
- [63] 陈卫宾, 董增川, 张运凤. 基于记忆梯度混合遗传算法的灌区水资源优化配置[J]. 农业工程学报, 2008, 24(6): 10-13.
CHEN Weibin, DONG Zengchuan and ZHANG Yunfeng. Optimization the allocation of irrigated areas water resources based on memory gradient hybrid genetic algorithm. Transactions of the CSAE, 2008, 24(6): 10-13. (in Chinese)
- [64] 耿福明, 薛联青, 吴义. 基于净效益最大化的区域水资源优化配置[J]. 河海大学学报自然科学版, 2007, 35(2): 149-152.
GENG Fuming, XUE Lianqing and WU Yi. Optimal allocation of regional water resources based on maximization of net benefit. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2007, 35(2): 149-152. (in Chinese)
- [65] 王福林, 吴丹. 基于水资源优化配置的区域产业结构动态演化模型[J]. 软科学, 2009, 23(5): 92-96.
WANG Fulin, WU Dan. Regional industrial structure dynamic evolutionary model based on water resource optimal allocation. Soft Science, 2009, 23(5): 92-96. (in Chinese)
- [66] 陈春林, 郑垂勇. ANP 方法在南水北调工程水资源优化配置中的应用[J]. 水利经济, 2010, 28(2): 25-27.
CHEN Chunlin, ZHENG Chuiyong. Application of analytic network process (ANP) in optimal allocation of water resources for South-to-North water transfer project. Journal of Economics of Water Resources, 2010, 28(2): 25-27. (in Chinese)
- [67] 陈强, 秦大庸, 苟思, 周祖昊, 桑学锋. SWAT 模型与水资源配置模型的耦合研究[J]. 灌溉排水学报, 2010, 29(1): 19-22.
CHEN Qiang, QIN Dayong, GOU Si, ZHOU Zuhao and SANG Xuefeng. Research of the coupling of SWAT model and water allocation model. Journal of Irrigation and Drainage, 2010, 29(1): 19-22. (in Chinese)
- [68] 张礼兵, 徐勇俊, 金菊良, 吴成国. 安徽省工业用水量变化影响因素分析[J]. 水利学报, 2014, 45(7): 837-843.
ZHANG Libing, XU Yongjun, JIN Juliang and WU Chengguo. Analysis of influence factors of regional industry water use in Anhui province. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(7): 837-843. (in Chinese)
- [69] 左其亭, 赵衡, 马军霞. 水资源与经济社会和谐平衡研究[J]. 水利学报, 2014, 45(7): 785-792.
ZUO Qiting, ZHAO Heng and MA Junxia. Study on harmony equilibrium between water resources and economic society development. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(7): 785-792. (in Chinese)
- [70] 张守平, 魏传江, 王浩, 侯丽娜, 毕彦杰, 周翔南. 流域/区域水量水质联合配置研究 I: 理论方法[J]. 水利学报, 2014, 45(7): 757-766.
ZHANG Shouping, WEI Chuanjiang, WANG Hao, HOU Lina, BI Yanjie and ZHOU Xiangnan. Basin/region water quality and quantity allocation I: Theory and method. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(7): 757-766. (in Chinese)
- [71] 张守平, 魏传江, 王浩, 侯丽娜, 毕彦杰, 周翔南. 流域/区域水量水质联合配置研究 II: 实例应用[J]. 水利学报, 2014, 45(8): 938-949.
ZHANG Shouping, WEI Chuanjiang, WANG Hao, HOU Lina, BI Yanjie and ZHOU Xiangnan. Basin/region water quality and quantity allocation II: Application. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(8): 938-949. (in Chinese)

- [72] 李昱, 彭勇, 初京刚, 周惠成, 张弛. 复杂水库群共同供水任务分配问题研究[J]. 水利学报, 2015, 46(1): 83-90.
LI Yu, PENG Yong, CHU Jinggang, ZHOU Huicheng and ZHANG Chi. Common tasks allocation problem of water supply for a complex multi-reservoir system. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(1): 83-90. (in Chinese)
- [73] 王浩, 游进军. 水资源合理配置研究历程与进展[J]. 水利学报, 2008, 39(10): 1168-1175.
WANG Hao, YOU Jinjun. Advancements and development course of research on water resources deployment. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(10): 1168-1175. (in Chinese)
- [74] 郭生练, 陈炯宏, 刘攀, 李雨. 水库群联合优化调度研究进展与展望[J]. 水科学进展, 2010, 21(4): 85-92.
GUO Shenglian, CHEN Jionghong, LIU Pan and LI Yu. State-of-the-art review of joint operation for multi-reservoir systems. Advances in Water Science, 2010, 21(4): 85-92. (in Chinese)
- [75] 陈晓宏, 刘德地, 刘丙军, 王兆礼. 湿润区变化环境下的水资源优化配置——理论方法与东江流域应用实践[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2011.
CEHN Xiaohong, LIU Dedi, LIU Bingjun and WANG Zhaoli. Optimal allocation of humid area water resources in changing environment: Theory method and application in Dongjiang river basin. Beijing: China Water and Power Press, 2011. (in Chinese)
- [76] 王浩, 王建华, 秦大庸. 流域水资源合理配置的研究进展与发展方向[J]. 水科学进展, 2004, 15(1): 123-128.
WANG Hao, WANG Jianhua and QIN Dayong. Research advances and direction on the theory and practice of reasonable water resources allocation. Advances in Water Science, 2004, 15(1): 123-128. (in Chinese)
- [77] 秦大庸, 陆垂裕, 刘家宏, 王浩, 王建华, 李海红, 褚俊英, 陈根发. 流域“自然-社会”二元水循环理论框架[J]. 科学通报, 2014, 59(4-5): 419-427.
QIN Dayong, LU Chuiyu, LIU Jiahong, WANG Hao, WANG Jianhua, LI Haihong, ZHU Junying and CHEN Genfa. Theoretical framework of dualistic nature-social water cycle. Chinese Science Bulletin, 2014, 59(4-5): 419-427. (in Chinese)
- [78] 王浩, 王建华, 秦大庸, 贾仰文. 基于二元水循环模式的水资源评价理论方法[J]. 水利学报, 2006, 37(12): 1496-1502.
WANG Hao, WANG Jianhua, QIN Dayong and JIA Yangwen. Theory and methodology of water resources assessment based on dualistic water cycle model. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(12): 1496-1502. (in Chinese)
- [79] 贾仰文, 王浩, 周祖昊, 等. 海河流域二元水循环模型开发及其应用——I 模型开发与验证[J]. 水科学进展, 2010, 21(1): 1-8.
JIA Yangwen, WANG Hao, ZHOU Zuhao, et al. Development and application of dualistic water cycle model in Haihe River Basin: I. Model development and validation. Advances in Water Science, 2010, 21(1): 1-8. (in Chinese)
- [80] 贾仰文, 王浩, 周祖昊, 等. 海河流域二元水循环模型开发及其应用——II 水资源管理战略研究应用[J]. 水科学进展, 2010, 21(1): 9-15.
JIA Yangwen, WANG Hao, ZHOU Zuhao, et al. Development and application of dualistic cycle model in Haihe River Basin: II. Strategic research and application for water resource management. Advances in Water Science, 2010, 21(1): 9-15. (in Chinese)
- [81] 刘家宏, 秦大庸, 王浩, 王明娜, 杨志勇. 海河流域二元水循环模式及其演化规律[J]. 科学通报, 2010, 55(6): 512-521.
LIU Jiahong, QIN Dayong, WANG Hao, WANG Mingna and YANG Zhiyong. Dualistic water cycle pattern and its evolution in Haihe river basin. Chinese Science Bulletin, 2010, 55(6): 512-521. (in Chinese)
- [82] 王浩, 贾仰文, 杨贵羽, 周祖昊, 仇亚琴, 牛存稳, 彭辉. 海河流域二元水循环及其伴生过程综合模拟[J]. 科学通报, 2013, 58(12): 1064-1077.
WANG Hao, JIA Yangwen, YANG Guiyu, ZHOU Zuhao, QIU Yaqin, NIU Cunwen and PENG Hui. Integrated simulation of the dualistic and its processes in the Haihe River Basin. Chinese Science Bulletin, 2013, 58(12): 1064-1077. (in Chinese)
- [83] 刘佳嘉, 周祖昊, 贾仰文, 王浩. 水循环演变中多因素综合影响贡献量分解方法[J]. 水利学报, 2014, 45(6): 658-665.
LIU Jiajia, ZHOU Zuhao, JIA Yangwen and WANG Hao. A new method to quantitatively separate the effects of multi-factors on the water cycle evolution. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(6): 658-665. (in Chinese)
- [84] 龙爱华, 王浩, 于福亮, 王建华. 社会水循环理论基础探析 II: 科学问题与学科前沿[J]. 水利学报, 2011, 42(5): 505-513.
LONG Aihua, WANG Hao, YU Fuliang and WANG Jianhua. Study on theoretical method of social water cycle II: Scientific topics and discipline frontier. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42(5): 505-513. (in Chinese)
- [85] MILLY, P. C. D., BETANCOURT, J., FALKENMARK, M., HIRSCH, R. M., KUNDZEWICZ, Z. W., LETTENMAIER, D. P. and STOUFFER, R. J. Stationarity is dead: Whither water management? Science, 2008, 319(5863): 573-574.
<http://dx.doi.org/10.1126/science.1151915>
- [86] 熊立华, 郭生练. 分布式流域水文模型[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004.
XIONG Lihua, GUO Shenglian. Distributed watershed hydrological model. Beijing: China Water and Power Press, 2004. (in Chinese)
- [87] 张文华, 郭生练. 流域降雨径流理论与方法[M]. 武汉: 湖北科学技术出版社, 2007.
ZHANG Wenhua, GUO Shenglian. Theory and method of watershed rainfall-runoff relationship. Wuhan: Hubei Science and

Technology Press, 2007. (in Chinese)

- [88] Littlewood, I. G., Croke, B. F. W. Data time-step dependency of conceptual rainfall-streamflow model parameters: An empirical study with implications for regionalization. *Hydrology Science Journal*, 2008, 53(4): 685-695.
<http://dx.doi.org/10.1623/hysj.53.4.685>
- [89] 王浩, 严登华, 贾仰文, 胡东来, 王凌河. 现代水文水资源学科体系及研究前沿和热点问题[J]. *水科学进展*, 2010, 21(4): 481-489.
WANG Hao, YAN Denghua, JIA Yangwen, HU Donglai and WANG Linghe. Subject system of modern hydrology and water resources and research frontiers and hot issues. *Advances in Water Science*, 2010, 21(4): 481-489. (in Chinese)
- [90] 刘德地, 郭生练, 郭海晋, 洪兴骏. 实施最严格水资源管理制度面临的技术问题与挑战. *水资源研究*, 2014, 3(3): 179-188.
LIU Dedi, GUO Shenglian, GUO Haijin and HONG Xingjun. Technique controversies and challenges of applying the strictest water resources control system. *Journal of Water Resources Research*, 2014, 3(3): 179-188. (in Chinese)