

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2023.01.015

# 气候变化下水文模拟不确定性若干问题讨论

张 力<sup>1</sup>, 赵自阳<sup>1</sup>, 王红瑞<sup>1</sup>, 杨亚锋<sup>1,2</sup>, 李晓军<sup>3</sup>

(1. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875; 2. 华北理工大学理学院, 河北 唐山 063210;  
3. 济南市水利工程服务中心, 山东 济南 250099)

**摘要:**在阐释水文不确定性定义的基础上,根据气候变化下水文模拟不确定性的分类,总结了气候变化情景、水文模型和评估过程方面不确定性研究的基本范式,概述了每种不确定性的来源及影响,综述了气候变化下水文模拟不确定性研究进展。指出了未来水文系统模拟不确定性研究的重点和方向:结合复杂网络,增强对极端气候事件预估的可靠性;科学处理数据时间窗问题和冗余性,为无资料地区径流预测提供支撑;揭示变化环境下非平稳异方差性水文序列的发生规律。

**关键词:**气候变化;水文系统;水文模拟;水文模型;评估过程;不确定性

**中图分类号:**TV124 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933-(2023)01-0109-10

**Discussion on several issues of uncertainty in hydrological simulation under climate change**// ZHANG Li<sup>1</sup>, ZHAO Ziyang<sup>1</sup>, WANG Hongrui<sup>1</sup>, YANG Yafeng<sup>1,2</sup>, LI Xiaojun<sup>3</sup> (1. College of Water Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. College of Sciences, North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, China; 3. Jinan Water Conservancy Engineering Service Center, Jinan 250099, China)

**Abstract:** Based on the definition of hydrologic uncertainty and the classification of hydrologic simulation uncertainty under climate change, the basic paradigms of uncertainty research in climate change scenarios, hydrological models and assessment processes are summarized. The sources and impacts of each uncertainty are summarized, and the research progress of hydrological modeling uncertainty under climate change is summarized. The emphasis and direction of future research on the uncertainty of hydrological system simulation are prospected, which includes combining complex networks to enhance the reliability of extreme weather event prediction, scientifically deal with the problem of data time window and redundancy to provide support for runoff prediction in areas without data, and to reveal the occurrence law of non-stationary heteroscedasticity hydrological series under changing environment.

**Key words:** climate change; hydrological system; hydrological simulation; hydrologic model; assessment process; uncertainty

气候变化和水文不确定性是 21 世纪最大的挑战之一,同时也是水文领域 23 个未决科学问题中的研究热点<sup>[1-2]</sup>。联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)在第六次评估报告中指出,到 21 世纪末降水模式和温度将发生显著变化,进一步加剧水循环速度,与之相关的水资源供应和需求方面的不确定性不断增加,为决策者统筹水资源管理系统带来了更为严峻的挑战<sup>[3-4]</sup>。然而,水资源系统内在的灰色、模糊以及随机属性为其组成和影响因素带来广泛不确定性<sup>[5]</sup>,这种不确定性及其相互作用可能导

致规划工作的额外复杂性,并影响后续决策过程。水资源系统的多周期、多层次和多目标特征也可能进一步放大这些不确定性,引发用水者之间的潜在冲突,加剧缺水危机<sup>[6-7]</sup>。在气候变化的背景下,预计到 2025 年将有 18 亿人生活在缺水国家或地区<sup>[8]</sup>,致使正确考虑不确定性已成为水资源系统规划的基础<sup>[9-10]</sup>。此外,联合国教科文组织在 2012 年发布的第四版《世界水资源发展报告》中强调,历史经验将不足以估计用水量与未来需求变化之间的关系,水资源调控需充分考虑环境影响中的风险和不确定

**基金项目:**北京师范大学博一学科交叉项目(BNUXKJC1214);北京市自然科学基金(8222057);国家自然科学基金(52279005);济南市水务科技项目(JNSWKJ202001)

**作者简介:**张力(1997—),男,博士研究生,主要从事水资源系统分析研究。E-mail: zhanglicws@mail.bnu.edu.cn

**通信作者:**王红瑞(1963—),男,教授,博士,主要从事水资源系统分析研究。E-mail: henrywang@bnu.edu.cn

确定性<sup>[11]</sup>。

倘若与水文模型相关的预测不确定性结果没有通过气候变化影响分析得到正式处理和传播,那么这些研究中得出的水文变化结论可能被夸大,从而误导水资源管理决策者<sup>[12]</sup>。现阶段在全球和区域范围内已发表许多有关水文系统不确定性主题的研究<sup>[13-14]</sup>,学者们也开发了多种数学规划方法用于处理水资源管理问题中的不确定性<sup>[15]</sup>。如金菊良等<sup>[16-17]</sup>分别采用投影寻踪权重优化、联系数和耦合协调度等方法,降低了水资源承载力评估中的不确定性风险;张金萍等<sup>[18]</sup>基于小波变换和集对分析研究了郑州市降雨-径流的不确定性关系,为该地区径流预测提供了理论支撑;王京晶等<sup>[19]</sup>应用 GLUE (generalized likelihood uncertainty estimation) 算法讨论了基流分割前后流量数据对城市雨洪模拟的不确定性影响。然而,不确定性分析在许多模型构建过程中仍然不是标准的做法,实际应用过程中向决策者们展示没有充分考虑不确定性限制结果的方式仍屡见不鲜<sup>[20-21]</sup>。鉴于已有研究的不足,本研究基于不确定性本质,从气候变化视角全面综述气候变化下水文系统模拟中的不确定性,进而展望该领域的未来研究方向,以期深入探究区域水循环机理、指导防灾减灾、加快推进韧性城市建设等提供参考。

## 1 不确定性的来源与分类

广义上,不确定性可以被视为信息的一种属性<sup>[22]</sup>。Knight<sup>[23]</sup>将不确定性定义为由于决策者认知不足而不能将概率分配给结果,在水文科学背景下,这个定义为水文领域研究者提供了标准。Funtowicz 等<sup>[24]</sup>将水资源系统中的不确定性描述为不准确、不可靠和近乎无知这 3 类信息不足的情况;Larry<sup>[25]</sup>将其定义为事件可能发生在可控范围之外,是水文水资源系统的基本属性。为了涵盖水文不确定性的所有维度,IPCC 第五次评估报告中将不确定性定义为:由于先验信息不足或对已知事物存在分歧而导致的一种不完整的认知状态。

地球上具有广阔的海洋面积和热容,全球平均表面温度的细微变化都需要大量的热能来驱动。与 1900—2000 年的平均地表温度相比,1880 年以来地表温度每 10 年上升 0.08℃,1981 年以来变暖速度进一步加快,每 10 年上升 0.18℃,2020 年是有史以来地表温度第二高的年份,陆地面积创下历史新高(图 1)。IPCC 第四次评估报告中指出这些额外的热量导致了区域性和季节性的极端温度,加剧了强降雨,改变了区域水文循环规律。在气候变化对水资源影响的量化中,研究者大多基于降尺度技术对

某一特定情景下的全球气候数据进行预处理,并应用其驱动水文模型来阐释水文过程的响应机理。而由于自然气候系统和流域水文循环过程具有不同时空尺度的非线性反馈,致使不确定性广泛存在于气候变化情景、评价模型以及评估过程中<sup>[26]</sup>。尽管气候变化下水文系统中的不确定性本质上难以量化,但是了解不确定性的来源和影响对于理性决策以及提高对水资源风险和可靠性的认知仍然十分重要<sup>[27]</sup>。

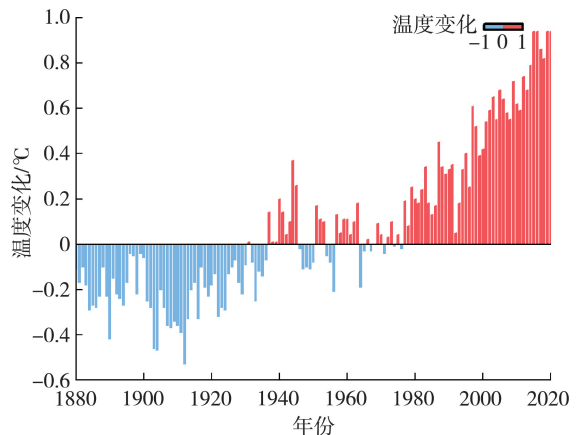


图 1 1880—2020 年地表温度变化

Fig. 1 Surface temperature change from 1880 to 2020

### 1.1 气候变化情景的不确定性

水文系统预测变化的不确定性源于气候系统的内部可变性。气候情景作为表征人类和环境相互作用系统中不确定性的手段,在结合水文模型和水资源评价模型的基础上,已经成为评估气候变化对水文过程影响的前沿方法<sup>[28]</sup>。现有气候情景可分为 4 类:增量情景、惯性情景、类比情景、GCMs (general circulation models) 情景。增量情景是假定到未来某一特定时期气候要素的变化量,特点是操作简单,但不具备气候、水文预测功能;惯性情景是假定未来气候变化延续已有变化趋势,特点是忽略了气候的不同周期及其组合;类比情景又称为古气候比拟法,基于分析千万年时间尺度下的气候数据进行类比,特点是难以获得可信资料,且人类活动对自然影响越来越大,难以准确衡量;GCMs 情景是利用全球气候模式模拟未来的气候变化情况,能反映地球系统各圈层复杂关系和温室气体排放响应。考虑到前 3 个气候情景的不足,将 GCMs 情景作为本文讨论的核心,造成其不确定的关键来源可从气候模式、情景设定以及降尺度方法方面考虑<sup>[29]</sup>。

#### 1.1.1 气候模式不完善性

GCMs 的结构、物质和能量交换过程和代表性浓度路径是影响气候模式模拟结果的主要不确定性因素<sup>[30]</sup>。GCMs 结构由于情景的参考运行和扰动运

行之间的差异多变,模型参数化处理难度增大,致使预测结果存在显著差异性<sup>[31]</sup>;海洋、大气与大陆三者间的物质和能量交换机制为评估过程带来不确定性,一些简单模式为了简化这些尺度上的物理过程,对海冰和大气运动进行粗糙处理造成误差;区域土地利用变化和气溶胶也可能复杂化不同尺度上的归因,造成一定误差<sup>[32-33]</sup>。因此,完善区域气候模式和全球海陆气耦合模型已成为现阶段精准预测全球或者区域变化的重中之重。在 IPCC 第六次评估报告中,尽管应用了更为全面的海洋-大气耦合环流模型(coupled ocean-atmosphere general circulation model, CGCM),提高了其模拟精度和参数优化方案,但与实际气候状况相比其模拟水平仍需优化改进。

### 1.1.2 情景设定不确定性

情景不确定性指由未来经济社会和人类活动的不可预测性导致未来温室气体(greenhouse gas, GHG)排放预测的不确定<sup>[34]</sup>。现阶段应用较为广泛的排放预测情景为 1992 年发布的 IS92 情景和后续提出的经济社会共享情景(shared socioeconomic pathways, SSPs),其中 SSPs 情景应用于 IPCC 第五、第六次评估报告。使用预测情景进行影响研究代表了一种自上而下的方法来解决,其对于真实反映气候变化下水文系统的脆弱性、敏感性来说至关重要。因此,目前影响气候变化评估可靠性的最大问题,即精准可靠地研发未来几十年甚至上百年的气候情景。水文模拟不确定性的另一关键是选择气候情景,单一气候变化情景下降尺度输出只能得出许多现实可能性中的单一轨迹。然而,这种单一的轨迹本身并不能完全代表未来复杂水文过程下的水文情景,更不足以用于准确预估气候变化带来的水文影响。因此,在影响评估中常采用系列情景而非单一的最佳猜测或者平均水平情景。Simonovic 等<sup>[35-36]</sup>指出,由于使用的未来排放情景存在差异,气候对防洪影响的研究尚存在不确定性,该研究利用 GCMs 的输出来评估防洪系统的有效性并得出结论,不同的气候情景提供了不同的水文参数估计值。

### 1.1.3 降尺度技术不确定性

早期情景不确定性的来源仅通过 GCMs 的结构差异或排放情景设定来解释<sup>[37]</sup>,气候模式降尺度方法的选择作为另一不确定性的来源,很少受到关注<sup>[38-39]</sup>。一般来说 GCMs 的空间尺度可达几百千米,时间上也是以年或月作为基本单位,相比较之下水文模型的时空尺度更为精细化。因此从时空分辨率的角度,GCMs 的输出数据与水文模型需求不一致,导致其不能用于模型驱动来源,无法科学支撑未

来水资源评价,亟须降尺度处理以满足气候模式和水文模型之间接口匹配性问题。目前已经开发了基于动态降尺度的区域气候模型(regional climate models, RCMs)和统计降尺度(statistical downscaling, SD)方法来满足这一要求<sup>[40]</sup>。RCMs 的开发基于动态公式,使用 GCMs 的初始和与时间相关的横向边界条件,以牺牲有限区域建模为代价实现更高的空间分辨率,主要缺陷是计算成本较大,仅适用于部分研究区。尽管有所改进,RCMs 的输出尺度对于某些实际应用来说仍然过于粗糙,例如小流域水文响应机制分析和田间农业影响研究,需要当地和特定地点的精细化气候情景。此外,根据不确定性爆炸理论,RCMs 建模中的每一部分都会对后续级联产生影响<sup>[41]</sup>。SD 方法通过将代表大尺度一些变量的状态与其他预测变量的状态联系起来,具有灵活性高、计算方法相对容易实现的优点,因此应用较为广泛<sup>[42]</sup>。然而,无论使用哪一种降尺度方法,计算结果中始终存在误差,如何对数据进行降尺度处理也是气候变化情景应用的不确定性根源之一。

## 1.2 评价模型的不确定性

在气候变化对水文过程影响的研究中,常用手段是借助率定好的水文模型,结合插值、区域气候因子空间降尺度转换等方法将气温、降水作为输入数据,获取水文模型的产汇流结果,进而分析气候变化对径流的贡献<sup>[43-44]</sup>。然而,评价过程中与水文模型相关的不确定性往往被忽略<sup>[45]</sup>。事实上,流域水文过程不仅受到降水、气温、日照、相对湿度等气候因子的影响,同时也受到地形地貌、植被覆盖等下垫面因子的影响。而流域水文模型通过模型结构、参数和输入数据的数学描述方式对这一复杂系统形成机理和变化规律进行概化,其计算过程和结果必然会衍生出一系列的不确定性。

### 1.2.1 模型结构不确定性

模型结构不确定性反映了仿真模型或设计程序无法精确表示系统真实的物理机制或过程(图 2),主要原因有两方面<sup>[46]</sup>:一是缺乏对变化环境下水文物理循环机制的足够认知,导致无法构建反映真实水循环机理的流域或区域水文模型。以下垫面变化显著的黄土高原地区为例,贺振等<sup>[47]</sup>认为该地区下垫面条件较差,无法有效滞留地表径流,因此得出黄土高原地区产流机制以超渗地面径流为主导这一共识。然而胡彩虹等<sup>[48]</sup>基于水文学原理和数理统计等方法,对黄河中游典型流域场次洪水的降雨径流特征进行了分析,初步表明蓄满产流以及混合产流模式可能存在于黄土高原地区,那么在该区域水

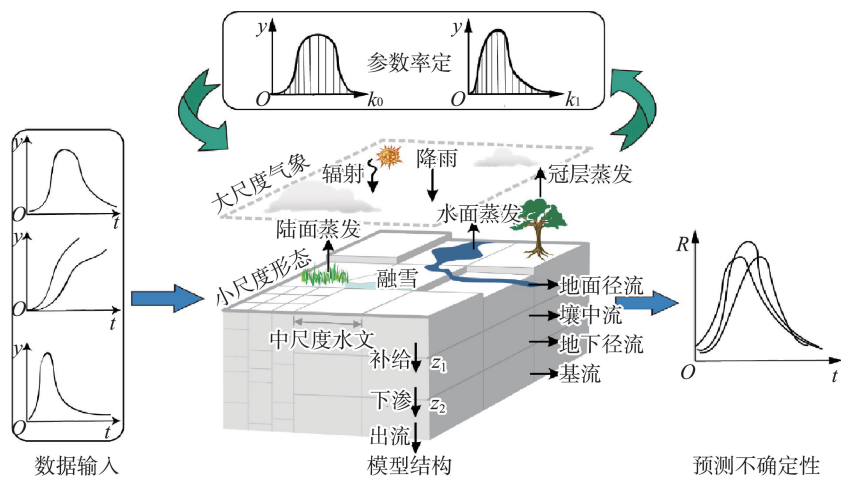


图2 模型结构不确定性示意图

Fig. 2 Schematic diagram of model structure uncertainty

文模型产流模块构建时,仅考虑一种产流机制将无法保证模拟结果的可靠性。二是由于水文过程极其复杂,包括截留、填洼、下渗、蒸散发等多个过程<sup>[49]</sup>,同时在气候因子和下垫面因子的共同影响下,加剧了精细刻画水文过程形成机理和认知变化规律的难度<sup>[50]</sup>。尽管部分学者认为,模型结构不确定性影响的重要性远不如气候变化<sup>[51-53]</sup>,然而这一结论可以部分归因于所使用的小样本量。通过量化对比结构和参数的不确定性,Højberg等<sup>[54]</sup>表明,结构不确定性对模型性能的影响占主导地位,并且无法通过优化参数不确定性补偿;Rojas等<sup>[55]</sup>也得出相似结论,结构不确定性可能占预测结果不确定性的30%以上。

### 1.2.2 模型参数不确定性

将特定的参数集作为概念简化结果,对于每个水文模型来说都是必要的<sup>[56]</sup>,但不是所有模型参数都能通过观测试验直接获取,参数不确定性是指在集成和概念化过程中无法估计这些有效参数的结果。在构建水文模型模拟时由于缺乏相应的观测数据而不得不借助参数估计的方法基于已有数据间接确定,给出满足模拟要求的模型参数取值<sup>[57]</sup>。参数不确定性也可能是水文系统空间异质性和观测误差的结果,例如某些参数(如水力传导率)可以在点尺度上进行测量,但它们的值在流域尺度上差异很大,尽管在操控模型时采用一套参数的模拟效果能获得令人满意的精度要求<sup>[58]</sup>,但是对整个流域做均一化处理,在物理意义方面势必会有所欠缺。有模型构建者提出基于现场观测试验和先验信息能够直接率定出合适的模型参数<sup>[59]</sup>,然而,纵使在高密度试验条件下得到某一特定时空尺度下的参数结果,往往也难以达到令人满意的模拟效果。另外,即便模型能够精细刻画水文循环过程,由于校准数据中的错

误,也可能产生参数不确定性。

### 1.2.3 模型输入不确定性

水文系统中模型的输入数据也是高度不确定的(图3),这种不确定性的影响分为3类:①测量误差。例如,水文模型中影响模拟结果最重要的输入资料是降水数据<sup>[60]</sup>,然而已有长时间序列降雨径流模拟研究中通常存在一个问题:由于20世纪60年代及以后的一段时间内,对降雨的观测技术还很落后,水文站一般是利用自制雨量筒结合刻度尺对降雨进行观测后编入当地水文年鉴,致使原始数据与实际降雨过程有较大出入。因此,基于这类数据得出的模拟结果可靠性不高。②观测站点空间布局无序,数据样本缺乏代表性。准确计算水文气象数据的空间分布值是复杂的,为了提高这些数据的质量,最好的办法是增加监测站点的密度,然而在高程、坡度等不规则的区域往往是难以实现的<sup>[61-62]</sup>,同样构成输入不确定性问题。③数据处理和转录误差<sup>[63]</sup>。水文建模通常涉及使用观测流量数据评估模型精度,然而实际河道中流量数据难以直接连续测量,而连续监测水位高度的方法较容易实现,所以通常只观测水位,流量则由水位-流量关系曲线转换得来<sup>[64]</sup>。这种转换不仅传播随机误差,还受到水位-流量关系曲线插值和外推等方法的影响<sup>[65]</sup>。已有研究表明,外推误差在传统水位-流量关系曲线计算

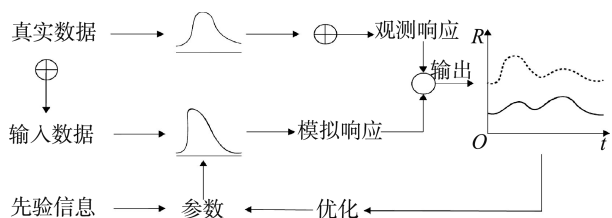


图3 模型输入不确定性示意图

Fig. 3 Schematic diagram of model input uncertainty

方法的不确定性中占据主导,导致流量数据的不确定范围为5%~25%<sup>[66-67]</sup>。

### 1.3 评价过程的不确定性

#### 1.3.1 人类活动影响不确定性

人类活动为气候变化提供了更多不稳定因素<sup>[68-69]</sup>。通常,气候变化会导致大气温度上升和降水模式的改变,而人类活动对水循环过程有直接(如取水)或间接(如土地利用变化和水利工程建设)的影响<sup>[70]</sup>。随着人口膨胀和经济社会发展,人类活动在水文过程中的重要性很可能超过气候变化<sup>[71]</sup>,因此,区分它们对水循环的驱动效应对于为水资源管理决策提供科学支撑来说非常重要。人类活动主要从3个方面影响区域水循环机理:①水土保持措施改变下垫面状况从而使原有产汇流范围和路径发生改变,坡面产流过程的糙率系数也随之改变,纵使气候因子不发生显著突变,未来的水文情势也会或多或少受其影响<sup>[72-73]</sup>;②跨流域调水、开采地下水等引水工程直接影响区域用水结构;③修建水利工程导致河网纵向连通性降低,影响河道汇流过程<sup>[74]</sup>。在实际过程中这三者共同作用且相互影响,评估其作用时应适当将其分割开来单独考虑,而不是将所有人类活动归为一个影响因子。

#### 1.3.2 概率分布函数不确定性

评估极端气候条件下流量的演变情势通常需要进行水文频率计算,因此需要考虑选取合适概率分布函数的不确定性。其不确定性主要来源于概率分布函数线型选择、分布参数的确定以及水文资料样本选取等。目前水文频率计算常用的概率分布函数有皮尔逊Ⅲ型分布、广义极值分布、三参数对数正态

分布等<sup>[75]</sup>(表1)。由于洪水产生的主导因素不同,各流域选取的分布线型也存在差异。参数估计方法包括矩法、适线法以及权函数法等,方法的选择会对结果产生显著影响<sup>[76]</sup>。此外,水文序列的长度、系列代表性及样本抽样方法对水文频率计算结果的影响也不容忽视。杜鸿等<sup>[77]</sup>应用4种抽样方法和2种极值统计模型,结合K-S(Kolmogorov-Smirnov)法分析淮河流域极端流量时空演变规律,表明两种统计模型均能较好地拟合极端流量,百分位阈值法的模拟精度优于其他超阈限峰值法。

#### 1.3.3 气象水文耦合技术不确定性

现有气象-陆面水文全耦合研究技术还有长足发展空间<sup>[78]</sup>,传统的气候水文耦合研究大多只考虑了大气和陆面过程单向反馈过程,采用不同类别的模型对大气或陆面过程单独进行研究,操作过程较为单一且应用简单,应用范围相对较广<sup>[79-80]</sup>。但流域水文要素变化与区域气候存在互馈机制,缺乏二者间双向耦合的理论方法与关键技术研究,对水文和气象两个基础学科的交叉融合造成阻隔,对研究成果的完整性和精确性也产生了一定误差。考虑到大气与水文之间存在互馈作用,一些学者通过将气候模式与水文模型协同编译运行并且不破坏二者间的独立性,进一步完善了陆面水文与气候全耦合技术。如Senatore等<sup>[81]</sup>以意大利南部的一个流域为研究区,通过集成气象研究预报模型(weather research and forecasting, WRF)和一套水文物理参数构建陆面水文-气候全耦合模型,并将模拟结果与原始非耦合模型横向对比,表明全耦合模型在观测降雨以及水循环模拟方面性能更好;Wagner等<sup>[82]</sup>采

表1 水文频率计算常用的概率分布函数

Table 1 Commonly used probability distribution functions for hydrological frequency calculation

分布线型	概率密度函数	特征
PT3	$f(x) = \frac{\beta\alpha}{\Gamma(\alpha)} (x - \xi)^{\alpha-1} \exp[-\beta(x - \xi)]$ ( $\alpha > 0, \beta > 0$ )	薄尾
LP3	$f(x) = \beta [\beta(\ln x - \xi)]^{\alpha-1} \frac{\exp[-\beta(\ln x - \xi)]}{x\Gamma(\alpha)}$ ( $\alpha > 0, \beta > 0$ )	厚尾
GLO	$f(x) = \frac{1}{\beta} \frac{\exp[-(1-k)y]}{[1 + \exp(-y)]^2}$ (当 $k \neq 0, y = k^{-1} \ln[1 - k(x - \xi)/\beta]$ ; 当 $k = 0, y = (x - \xi)/\beta$ )	厚尾
GEV	$f(x) = \frac{1}{\beta} \left[1 - \frac{k(x - \xi)}{\beta}\right]^{\frac{1}{k}-1} \exp\left\{-\left[1 - \frac{k(x - \xi)}{\beta}\right]^{\frac{1}{k}}\right\}$	混尾
Gumbel	$f(x) = \frac{1}{\beta} \exp\left[-\frac{x - \xi}{\beta} - \exp\left(-\frac{x - \xi}{\beta}\right)\right]$	混尾
Weibull	$f(x) = \frac{k}{\beta} \left(\frac{x - \xi}{\beta}\right)^{\alpha-1} \exp\left(-\frac{x - \xi}{\beta}\right)$	薄尾
LN3	$f(x) = \frac{1}{(x - \xi)\beta \sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{[\ln(x - \xi) - k]^2}{2\beta^2}\right\}$ ( $\xi < x < \infty$ )	混尾
LN2	$f(x) = \frac{1}{x\beta \sqrt{2\pi}} \exp\left[\frac{-\ln(x - k)^2}{2\beta^2}\right]$ ( $\xi < x < \infty$ )	混尾

注:  $\alpha, \beta, \xi, k$  分别为形状、尺度、位置、形状参数;线型 PT3 和 LP3 中,  $\Gamma(\alpha)$  为伽马函数;当  $k = 0$  时, GEV 分布即为 Gumbel 分布。

用气象与水文全耦合的方式,将 WRF 和 HMS 水文模型扩展为中尺度模型系统,在鄱阳湖流域进行应用和检验,结果表明全耦合模型系统能够实现地表和地下的侧向径流以及地下水、非饱和带、地表和大气之间的双向相互作用。

## 2 气候变化对水文过程影响不确定性的研究进展

### 2.1 敏感性分析法

敏感性分析用于量化模型参数调整或输入数据误差对运行结果的影响<sup>[83]</sup>,可分为局部和全局敏感性分析<sup>[84]</sup>。局部敏感性分析的核心思想是控制变量,即每次只修改单个输入参数,通过计算模拟结果的变化进而确定所选参数对分析结果不确定性的贡献。基于此,水文敏感性被定义为模型对已知气候变化因子的响应,即降水和温度的变化导致作物蒸散、径流和地下水补给的变化。这种方法简单易行,例如 Bao 等<sup>[85]</sup>通过假定气候影响下的降雨变化(以 2% 为步长,变化范围为 -20% ~ 20%)和温度变化(以 0.2℃ 为步长,变化范围为 -2 ~ 2℃),对淮河流域 4 个子汇水区的径流、蒸发和土壤湿度进行了敏感性分析,结果表明水文变量对降雨更为敏感,其次是温度,但其缺陷在于忽略了模型参数之间的内在相关性。全局敏感性使用不同 GCMs 的集合或者在参数略微改变的情况下多次运行来确定,优势在于可同时分析模拟结果对多个参数或输入因子的响应<sup>[86]</sup>。然而,GCMs 设计的结构差异,如大气和海洋的垂直和水平分辨率以及各种过程的参数化,为计算引入了更多的不确定性。

### 2.2 概率分析法

概率是研究者最为熟悉和应用最为广泛的量化气候变化下水文不确定性的手段。目前应用较广的概率分析方法有:基于贝叶斯理论的蒙特卡罗(Monte Carlo)随机模拟<sup>[87]</sup>、广义似然不确定性估计法(GLUE)<sup>[88]</sup>和方差分析(analysis of variance, ANOVA)法<sup>[89]</sup>。蒙特卡罗法不仅可以生成多种情景,同时可以从概率分析的角度来衡量不同情景的权重。Guo 等<sup>[90]</sup>曾使用该方法生成具有不同参数集的径流序列,并通过非参数方法估计径流的概率密度函数,然后针对不同的 GCM 输出和假设气候情景定量估计模型参数和径流不确定性。随后研究者又结合随机过程中的马尔可夫过程衍生出马尔可夫链-蒙特卡罗方法(Markov chain Monte Carlo, MCMC),极大地提高了蒙特卡罗方法的采样效率,成为水文气候科学领域不可或缺的工具<sup>[91]</sup>。GLUE 方法在似然函数的选取与阈值确定方面有着更高的

主观性和灵活性,是目前最常用于不确定性估计的经验频率方法。ANOVA 法将总的集合不确定性进一步分解为来自不同来源(情景、模型结构等)的贡献率以及它们之间的相互作用<sup>[92]</sup>,比其他概率分析方法所需要的假设更少,并且可以很容易地用于量化与模型-情景耦合相关的不确定性。Bossard 等<sup>[93]</sup>基于 ANOVA 法定量计算了气候模型、统计处理方法和水文模型对莱茵河近景和远景下水文模拟不确定性的贡献率,结果表明,总体不确定性不是由 3 个因素的个体不确定性累加而来,而三者之间的交互作用占总体不确定性的 5% ~ 40%。

### 2.3 气候模型和情景模拟分析方法

并非所有的不确定性都能以概率的形式描述。情景分析是目前气候影响研究中最依赖的技术,其通过组合能够模拟可能发生的不同情景,例如采用不同的气候模式、排放情景、降尺度方法和水文模型均可视为不同的情景。田焯<sup>[94]</sup>采用 4 种未来排放情景、3 种气候模式、3 种水文模型模拟未来情景下的最大径流,发现水文模型参数对未来极端径流不确定性的贡献作用最大,GCMs 的贡献作用仅次于水文模型参数,水文模型结构的贡献率最低;Jung 等<sup>[95]</sup>考虑了 GCMs 结构、未来 GHG 排放情景、土地利用变化情景、自然变化和水文模型参数这 5 种不确定性,采用两种温室气体排放情景下的两种未来土地利用条件来量化城市洪水频率变化的不确定性,结果表明流域洪水频率变化对气候变化的敏感性高于土地利用变化。然而,在情景分析中会不可避免地遇见两个问题:一是目前情景设定的发展略滞后于气候模型,研究者们应该致力于解决这一发展不平衡问题,以提供最新的影响评估情景;二是大多数气候情景构建方法是基于模型的气候变化估计与观测气候数据相结合,而由于观测数据集难以涵盖年代际尺度气候变化的全部范围,以及由于使用不同的方法将模式和观测气候数据结合起来,进一步将不确定性引入到气候情景中。在气候情景中,这些与使用观测气候数据有关的不确定性通常被忽略。

## 3 研究展望

不确定性仍然是可持续水资源管理的挑战,本研究从气候变化情景、水文模型和评价过程 3 方面讨论气候变化下水文模拟中的不确定性,概述了目前量化不确定性的主流方法,未来对于气候变化下水文模拟的不确定性应着重开展以下研究:

a. 极端水文事件研究。极端气候事件伴随着全球变暖频频发生,如 2021 年 7 月河南遭受强暴

雨,郑州及周边地区多个站点的日降雨量突破历史极值,造成严重的暴雨洪涝灾害。鉴于目前气候模式对极端气候事件的模拟效果不尽如人意,而复杂网络可对此类非线性演变特征进行深入剖析,可考虑应用其增强对极端气候事件预估的可靠性。

**b. 输入数据冗余性处理。**水文系统模拟中需要大量输入数据驱动模型,是否可以从不确定性人工智能角度中的贝叶斯网络出发,通过局部信息采集、特征识别、目标修正等技术达到整体认知,科学处理各种输入数据时间窗问题和冗余性,从而为无资料地区径流预测提供科学支撑是亟待解决的问题。

**c. 水文过程异方差性。**变化环境下流域水文序列存在波动集群效应,具有较强的异方差性和波动性。径流模拟过程中众多动态不确定性因素的累积传导效应会造成预测结果的不可靠,然而其在水文领域中并没有得到应有的关注。因此,基于异方差性波动模型揭示变化环境下非平稳异方差性水文序列的发生规律是解决当下水科学问题的现实需求。

## 参考文献:

[ 1 ] DAHRI Z H, LUDWIG F, MOORS E, et al. Climate change and hydrological regime of the high-altitude Indus basin under extreme climate scenarios [ J ]. Science of the Total Environment, 2021, 768: 144467.

[ 2 ] BLÖSCHL G, BIERKENS M F, CHAMBEL A, et al. Twenty-three unsolved problems in hydrology (UPH): a community perspective [ J ]. Hydrological Sciences Journal, 2019, 64(10): 1141-1158.

[ 3 ] IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [ R ]. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.

[ 4 ] TEUTSCHBEIN C, SEIBERT J. Regional climate models for hydrological impact studies at the catchment scale: a review of recent modeling strategies [ J ]. Geography Compass, 2010, 4(7): 834-60.

[ 5 ] 左其亭, 吴泽宁, 赵伟. 水资源系统中的不确定性及风险分析方法[ J ]. 干旱区地理, 2003 ( 2 ): 116-121. ( ZUO Qiting, WU Zening, ZHAO Wei. Uncertainties in water resources system and risk analysis method [ J ]. Arid Land Geography, 2003 ( 2 ): 116-121. ( in Chinese ) )

[ 6 ] WANG L, FANG L, HIPEL K W. Basin-wide cooperative water resources allocation [ J ]. European Journal of Operational Research, 2008, 190 ( 3 ): 798-817.

[ 7 ] LIU X, HUANG G, WANG S, et al. Water resources

management under uncertainty: factorial multi-stage stochastic program with chance constraints [ J ]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2016, 30(3): 945-957.

[ 8 ] WATER U. Coping with water scarcity-a strategic issue and priority for system-wide action [ M ]. Geneva: UN-Water, 2006.

[ 9 ] 王红瑞, 钱龙霞, 赵自阳, 等. 水资源风险分析理论及评估方法[ J ]. 水利学报, 2019, 50(8): 980-989. ( WANG Hongrui, QIAN Longia, ZHAO Ziyang, et al. Theory and assessment method of water resources risk [ J ]. Journal of Hydraulic Engineering. 2019, 50(8): 980-989. ( in Chinese ) )

[ 10 ] STEINSCHNEIDER S, POLEBITSKI A, BROWN C, et al. Toward a statistical framework to quantify the uncertainties of hydrologic response under climate change [ J ]. Water Resources Research, 2012, 48 ( 11 ): 011318.

[ 11 ] 钱龙霞, 王红瑞, 党素珍, 等. 一种水资源短缺风险评价耦合模型及其应用[ J ]. 系统工程理论与实践, 2021, 41 ( 5 ): 1319-1327. ( QIAN Longia, WANG Hongrui, DANG Suzhen, et al. A coupled model for evaluating water shortage risk and its application [ J ]. Systems Engineering-Theory & Practice. 2021, 41 ( 5 ): 1319-1327. ( in Chinese ) )

[ 12 ] STEINSCHNEIDER S, WI S, BROWN C. The integrated effects of climate and hydrologic uncertainty on future flood risk assessments [ J ]. Hydrological Processes, 2015, 29(12): 2823-2839.

[ 13 ] MONTANARI A, SHOEMAKER C A, VAN DE GIESEN N. Introduction to special section on uncertainty assessment in surface and subsurface hydrology: an overview of issues and challenges [ J ]. Water Resources Research, 2009, 45(12): 008471.

[ 14 ] HONTI M, SCHEIDEGGER A, STAMM C. The importance of hydrological uncertainty assessment methods in climate change impact studies [ J ]. Hydrology and Earth System Sciences, 2014, 18(8): 3301-3317.

[ 15 ] MIAO D, HUANG W, LI Y, et al. Planning water resources systems under uncertainty using an interval-fuzzy De Novo programming method [ J ]. Journal of Environmental Informatics, 2014, 24(1):11-23.

[ 16 ] 金菊良, 刘东平, 周戎星, 等. 基于投影寻踪权重优化的水资源承载力评价模型[ J ]. 水资源保护, 2021, 37 ( 3 ): 1-6. ( JIN Juliang, LIU Dongping, ZHOU Rongxing, et al. Evaluation model of water resources carrying capacity based on projection pursuit weight optimization [ J ]. Water Resources Protection, 2021, 37 ( 3 ): 1-6. ( in Chinese ) )

[ 17 ] 金菊良, 徐新光, 周戎星, 等. 基于联系数和耦合协调度的水资源空间均衡评价方法[ J ]. 水资源保护,

- 2021, 37 (1): 1-6. (JIN Juliang, XU Xinguang, ZHOU Rongxing, et al. Water resources spatial balance evaluation method based on connection number and coupling coordination degree [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(1): 1-6. (in Chinese))
- [18] 张金萍, 王宇昊. 郑州市降雨-径流关系不确定性分析 [J]. 水资源保护, 2021, 37 (6): 1-6. (ZHANG Jinping, WANG Yuhao. Uncertainty analysis of rainfall-runoff relationship in Zhengzhou City [J]. Water Resources Protection, 2021, 37 (6): 1-6. (in Chinese))
- [19] 王京晶, 徐宗学, 赵刚, 等. 基流分割对城市雨洪模拟不确定性分析的影响 [J]. 水资源保护, 2022, 38 (5): 65-71. (WANG Jinjing, XU Zongxue, ZHAO Gang, et al. Impacts of baseflow separation on the uncertainty of urban storm flood simulation [J]. Water Resources Protection, 2022, 38 (5): 65-71. (in Chinese))
- [20] PAPPENBERGER F, BEVEN K J. Ignorance is bliss: or seven reasons not to use uncertainty analysis [J]. Water Resources Research, 2006, 42(5): W05302.
- [21] ADDOR N, RÖSSLER O, KÖPLIN N, et al. Robust changes and sources of uncertainty in the projected hydrological regimes of Swiss catchments [J]. Water Resources Research, 2014, 50(10): 7541-62.
- [22] MONTANARI A. What do we mean by ‘uncertainty’? the need for a consistent wording about uncertainty assessment in hydrology [J]. Hydrological Processes: An International Journal, 2007, 21(6): 841-845.
- [23] KNIGHT F H. Risk, uncertainty and profit [M]. Houghton: Dover Publications, 1921: 187-189.
- [24] FUNTOWICZ S O, RAVETZ J R. Uncertainty and quality in science for policy [M]. Berlin: Springer Science & Business Media, 1990: 25.
- [25] MAYS L W. The role of risk analysis in water resources engineering [J]. Journal of Contemporary Water Research and Education, 2011, 103(1): 3.
- [26] HERMAN J D, QUINN J D, STEINSCHNEIDER S, et al. Climate adaptation as a control problem: review and perspectives on dynamic water resources planning under uncertainty [J]. Water Resources Research, 2020, 56 (2): e24389.
- [27] 刘永志, 唐雯雯, 张文婷, 等. 基于灾害链的洪涝灾害风险分析综述 [J]. 水资源保护, 2021, 37 (1): 20-27. (LIU Yongzhi, TANG Wenwen, ZHANG Wenting, et al. Review of flood disaster risk analysis based on disaster chain [J]. Water Resources Protection, 2021, 37 (1): 20-27. (in Chinese))
- [28] O’NEILL B C, CARTER T R, EBI K, et al. Achievements and needs for the climate change scenario framework [J]. Nature Climate Change, 2020, 10(12): 1074-1084.
- [29] WOLDEMESKEL F, SHARMA A, SIVAKUMAR B, et al. A framework to quantify GCM uncertainties for use in impact assessment studies [J]. Journal of Hydrology, 2014, 519: 1453-1465.
- [30] TAN M L, FICKLIN D L, IBRAHIM A L, et al. Impacts and uncertainties of climate change on streamflow of the Johor River Basin, Malaysia using a CMIP5 general circulation model ensemble [J]. Journal of Water and Climate Change, 2014, 5(4): 676-695.
- [31] KINGSTON D, THOMPSON J R, KITE G. Uncertainty in climate change projections of discharge for the Mekong River Basin [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2011, 15(5): 1459-1471.
- [32] LEJEUNE Q, DAVIN E L, GUDMUNDSSON L, et al. Historical deforestation locally increased the intensity of hot days in northern mid-latitudes [J]. Nature Climate Change, 2018, 8(5): 386-90.
- [33] THIERY W, VISSER A J, FISCHER E M, et al. Warming of hot extremes alleviated by expanding irrigation [J]. Nature Communications, 2020, 11(1): 1-7.
- [34] GHOSH S, MUJUMDAR P. Nonparametric methods for modeling GCM and scenario uncertainty in drought assessment [J]. Water Resources Research, 2007, 43 (7): W07405.
- [35] SIMONOVIC S P, LI L. Methodology for assessment of climate change impacts on large-scale flood protection system [J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2003, 129(5): 361-71.
- [36] SIMONOVIC S P, LI L. Sensitivity of the Red River Basin flood protection system to climate variability and change [J]. Water Resources Management, 2004, 18 (2): 89-110.
- [37] KUDO R, YOSHIDA T, MASUMOTO T. Uncertainty analysis of impacts of climate change on snow processes: case study of interactions of GCM uncertainty and an impact model [J]. Journal of Hydrology, 2017, 548: 196-207.
- [38] PRUDHOMME C, DAVIES H. Assessing uncertainties in climate change impact analyses on the river flow regimes in the UK. Part 1: baseline climate [J]. Climatic Change, 2009, 93(1): 177-195.
- [39] PRUDHOMME C, DAVIES H. Assessing uncertainties in climate change impact analyses on the river flow regimes in the UK. Part 2: future climate [J]. Climatic Change, 2009, 93(1): 197-222.
- [40] CHEN J, BRISSETTE F P, LECONTE R. Uncertainty of downscaling method in quantifying the impact of climate change on hydrology [J]. Journal of Hydrology, 2011, 401(3/4): 190-202.



- [41] FOLEY A. Uncertainty in regional climate modelling: a review [J]. *Progress in Physical Geography*, 2010, 34 (5): 647-70.
- [42] 张佳怡, 伦玉蕊, 刘浏, 等. CMIP6 多模式在青藏高原的适应性评估及未来气候变化预估[J]. *北京师范大学学报 (自然科学版)*, 2021, 58 (1): 1-13. (ZHANG Jiayi, LUN Yurui, LIU Liu, et al. CMIP6 evaluation and projection of climate change over Tibetan Plateau [J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2021, 58(1): 1-13. (in Chinese))
- [43] 李泽君, 黄本胜, 邱静, 等. 变化环境下韩江生态流量演变特征分析[J]. *水资源保护*, 2021, 37 (5): 22-29. (LI Zejun, HUANG Bensheng, QIU Jing, et al. Analysis on evolution characteristics of ecological flow of Hanjiang River under changing environment [J]. *Water Resources Protection*, 2021, 37 (5): 22-29. (in Chinese))
- [44] 邓鹏, 孙善磊, 黄鹏年. 气候变化对鄱阳湖流域径流的影响[J]. *河海大学学报 (自然科学版)*, 2020, 48 (1): 39-45. (DENG Peng, SUN Shanlei, HUANG Pengnian. Influence of climate change on runoff in Poyang Lake Basin [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2020, 48 (1): 39-45. (in Chinese))
- [45] THOMPSON J, GREEN A, KINGSTON D, et al. Assessment of uncertainty in river flow projections for the Mekong River using multiple GCMs and hydrological models [J]. *Journal of Hydrology*, 2013, 486: 1-30.
- [46] 王浩, 李扬, 任立良, 等. 水文模型不确定性及集合模拟总体框架[J]. *水利水电技术*, 2015, 46(6): 21-26. (WANG Hao, LI Yang, REN Liliang, et al. Uncertainty of hydrologic model and general framework of ensemble simulation [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*. 2015, 46 (6): 21-26. (in Chinese))
- [47] 贺振, 贺俊平. 近 32 年黄河流域植被覆盖时空演化遥感监测[J]. *农业机械学报*, 2017, 48(2): 179-185. (HE Zhen, HE Junping. Remote sensing on spatial-temporal evolution of vegetation cover in the Yellow River Basin during 1982-2013 [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48 (2): 179-185. (in Chinese))
- [48] 胡彩虹, 张力, 邬强, 等. 下垫面变化条件下孤山川流域产流模式辨析研究[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2020, 28 (3): 620-631. (HU Caihong, ZHANG Li, WU Qiang, et al. Discrimination and analysis of runoff generation pattern in Gushanchuan Basin under the condition of underlying surface change [J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2020, 28 (3): 620-631. (in Chinese))
- [49] 芮孝芳. 论流域水文模型[J]. *水利水电科技进展*, 2017, 37 (4): 1-7. (RUI Xiaofang. Discussion of watershed hydrological model [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2017, 37(4): 1-7. (in Chinese))
- [50] 徐宗学, 叶陈雷. 城市暴雨洪涝模拟: 原理, 模型与展望[J]. *水利学报*, 2021, 52(4): 381-392. (XU Zongxue, YE Chenlei. Simulation of urban flooding/waterlogging processes: principle, models and prospects [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2021, 52(4): 381-392. (in Chinese))
- [51] CHEN J, BRISSETTE F P, POULIN A, et al. Overall uncertainty study of the hydrological impacts of climate change for a Canadian watershed [J]. *Water Resources Research*, 2011, 47(12): 010602.
- [52] SORDO-WARD Á, GRANADOS I, MARTÍN-CARRASCO F, et al. Impact of hydrological uncertainty on water management decisions [J]. *Water Resources Management*, 2016, 30(14): 5535-5551.
- [53] DOHERTY J, WELTER D. A short exploration of structural noise [J]. *Water Resources Research*, 2010, 46(5): 1-14.
- [54] HØJBERG A, REFSGAARD J. Model uncertainty-parameter uncertainty versus conceptual models [J]. *Water Science and Technology*, 2005, 52(6): 177-186.
- [55] ROJAS R, FEYEN L, DASSARGUES A. Conceptual model uncertainty in groundwater modeling: combining generalized likelihood uncertainty estimation and Bayesian model averaging [J]. *Water Resources Research*, 2008, 44(12): W006908.
- [56] TSCHEIKNER-GRATL F, BELLOS V, SCHELLART A, et al. Recent insights on uncertainties present in integrated catchment water quality modelling [J]. *Water Research*, 2019, 150: 368-379.
- [57] LIU Y, LI Y, HUANG G, et al. A Bayesian-based multilevel factorial analysis method for analyzing parameter uncertainty of hydrological model [J]. *Journal of hydrology*, 2017, 553: 750-62.
- [58] HALWATURA D, NAJIM M. Application of the HEC-HMS model for runoff simulation in a tropical catchment [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2013, 46: 155-162.
- [59] 王书功. 水文模型参数估计方法及参数估计不确定性研究[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2010: 12.
- [60] FRAGA I, CEA L, PUERTAS J. Effect of rainfall uncertainty on the performance of physically based rainfall-runoff models [J]. *Hydrological Processes*, 2019, 33(1): 160-173.
- [61] 刘虹利, 王红瑞, 孙沁田, 等. HM-Bayes 网络降水空间插值模型的改进及其应用[J]. *系统工程理论与实践*, 2016, 36(11): 2964-2976. (LIU Hongli, WANG Hongrui, SUN Qintian, et al. Improvement of the HM-

- Bayes networks based precipitation model and application [J]. *System Engineering Theory and Practice*, 2016, 36 (11): 2964-2976. (in Chinese))
- [62] 陈华, 霍苒, 曾强, 等. 雨量站网布设对水文模型不确定性影响的比较[J]. *水科学进展*, 2019, 30(1): 34-44. (CHEN Hua, HUO Ran, ZENG Qiang, et al. Comparative study on the influence of rain-gauge network on the uncertainty of hydrological modeling [J]. *Advances in Water Science*, 2019, 30 (1): 34-44. (in Chinese))
- [63] MCMILLAN H, JACKSON B, CLARK M, et al. Rainfall uncertainty in hydrological modelling: an evaluation of multiplicative error models [J]. *Journal of Hydrology*, 2011, 400(1/2): 83-94.
- [64] 门玉丽, 夏军, 叶爱中. 水位流量关系曲线的理论求解研究[J]. *水文*, 2009, 29 (1): 1-5. (MEN Yuli, XIA Jun, YE Aizhong. Study of groundwater resources utilization and evaluation in Huaibei Region of Anhui Province [J]. *Journal of China Hydrology*. 2009, 29 (1): 1-5. (in Chinese))
- [65] 顾西辉, 张强, 陈晓宏, 等. 基于贝叶斯方法的水位流量关系-以东江干流为例[J]. *武汉大学学报(理学版)*, 2014, 60 (4): 356-362. (GU Xihui, ZHANG Qiang, CHEN Xiaohong, et al. Stage-discharge relationship based on Bayesian methods: a case study of East River [J]. *Journal of Wuhan University (Natural Science Edition)*, 2014, 60 (4): 356-362. (in Chinese))
- [66] DOMENEGHETTI A, CASTELLARIN A, BRATH A. Assessing rating-curve uncertainty and its effects on hydraulic model calibration [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2012, 16(4): 1191-1202.
- [67] DI BALDASSARRE G, MONTANARI A. Uncertainty in river discharge observations: a quantitative analysis [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2009, 13 (6): 913-921.
- [68] LIU J, ZHOU Z, YAN Z, et al. A new approach to separating the impacts of climate change and multiple human activities on water cycle processes based on a distributed hydrological model [J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 578: 124096.
- [69] 徐宗学, 任梅芳, 陈浩. 我国沿海城市洪潮组合风险分析[J]. *水资源保护*, 2021, 37 (2): 10-14. (XU Zongxue, REN Meifang, CHEN Hao. Analysis on urban flooding risk caused by flood tide combination in coastal cities [J]. *Water Resources Protection*, 2021, 37 (2): 10-14. (in Chinese))
- [70] 路洁, 王学风, 曹永强. 气候和人类活动对辽宁省植被变化的影响[J]. *水利水电科技进展*, 2022, 42(4): 7-14, 38. (LU Jie, WANG Xuefeng, CAO Yongqiang. Effects of climate and human activities on vegetation variation in Liaoning Province [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2022, 42(4): 7-14, 38. (in Chinese))
- [71] 白琪阶, 宋志松, 王红瑞, 等. 基于 SWAT 模型定量分析自然因素与人为因素对水文系统的影响[J]. *自然资源学报*, 2018, 33 (9): 1575-1587. (BAI Qijie, SONG Zhisong, WANG Hongrui, et al. Quantitative analysis of the impact of natural factors and human factors on hydrological system using the SWAT model: the Zhangweinan Canal Basin case [J]. *Journal of Natural Resources*, 2018, 33 (9): 1575-1587. (in Chinese))
- [72] GAO P, GEISSEN V, RITSEMA C, et al. Impact of climate change and anthropogenic activities on stream flow and sediment discharge in the Wei River Basin, China [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2013, 17(3): 961-972.
- [73] CHANG J, ZHANG H, WANG Y, et al. Assessing the impact of climate variability and human activities on streamflow variation [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2016, 20(4): 1547-1560.
- [74] 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. (SONG Xiaomeng, ZHANG Jianyun, ZHAN Chesheng, et al. Review for impacts of climate change and human activities on water cycle [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2013, 44 (7): 779-790. (in Chinese))
- [75] 叶长青, 陈晓宏, 张家鸣, 等. 变化环境下北江流域水文极值演变特征、成因及影响[J]. *自然资源学报*, 2012, 27 (12): 2102-2112. (YE Changqing, CHEN Xiaohong, ZHANG Jiaming, et al. Changing properties, causes and impacts of extreme stream flow under change environment in Beijiang River, China [J]. *Journal of Natural Resources*, 2012, 27 (12): 2102-2112. (in Chinese))
- [76] 谷洪钦, 刘开磊, 刘玉环, 等. 综合多源不确定性的洪水概率预报试验[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2021, 49 (2): 99-104. (GU Hongqin, LIU Kailei, LIU Yuhuan, et al. Experiences on flood probability forecasting accounting for multisource uncertainty [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2021, 49 (2): 99-104. (in Chinese))
- [77] 杜鸿, 夏军, 曾思栋, 等. 淮河流域极端径流的时空变化规律及统计模拟[J]. *地理学报*, 2012, 67(3): 398-409. (DU Hong, XIA Jun, ZENG Sidong, et al. Temporal and spatial variations and statistical models of extreme runoff in Huaihe River Basin [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67 (3): 398-409. (in Chinese))

势分析[D].合肥:合肥工业大学,2019.

- [40] 胡启玲,董增川,杨雁飞,等. 基于联系数的水资源承载力状态评价模型[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2019,47(5):425-432. (HU Qiling, DONG Zengchuan, YANG Yanfei, et al. State evaluation model of water resources carrying capacity based on connection number [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2019,47(5):425-432. (in Chinese))
- [41] 杨红梅,赵克勤. 偏联系数的计算与应用研究[J]. 智能系统学报, 2019,14(5):865-876. (YANG Hongmei, ZHAO Keqin. The calculation and application of partial connection numbers[J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2019, 14(5):865-876. (in Chinese))
- (收稿日期:2022-11-08 编辑:王芳)
- 
- (上接第 118 页)
- [78] 占车生,宁理科,邹靖,等. 陆面水文-气候耦合模拟研究进展[J]. 地理学报, 2018, 73(5): 893-905. (ZHAN Chesheng, NING Like, ZHOU Jing, et al. A review on the fully coupled atmosphere-hydrology simulations [J]. Acta Geographica Sinica, 2018, 73(5): 893-905. (in Chinese))
- [79] XU Y P, GAO X, ZHU Q, et al. Coupling a regional climate model and a distributed hydrological model to assess future water resources in Jinhua River Basin, East China [J]. Journal of Hydrology Engineering, 2015, 20(4): 04014054.
- [80] KRUK N S, VENDRAMÉ F, CHOU S C. Coupling a mesoscale atmospheric model with a distributed hydrological model applied to a watershed in southeast Brazil [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2013, 18(1): 58-65.
- [81] SENATORE A, MENDICINO G, GOCHIS D J, et al. Fully coupled atmosphere-hydrology simulations for the central mediterranean: impact of enhanced hydrological parameterization for short and long time scales [J]. Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 2015, 7(4): 1693-715.
- [82] WAGNER S, FERSCH B, YUAN F, et al. Fully coupled atmospheric-hydrological modeling at regional and long-term scales: development, application, and analysis of WRF-HMS [J]. Water Resources Research, 2016, 52(4): 3187-3211.
- [83] KUNDZEWICZ Z W, KRYSANOVA V, BENESTAD R, et al. Uncertainty in climate change impacts on water resources [J]. Environmental Science & Policy, 2018, 79: 1-8.
- [84] 刘艳丽,张建云,王国庆,等. 环境变化对流域水文水资源的影响评估及不确定性研究进展[J]. 气候变化研究进展, 2015, 11(2): 102. (LIU Yanli, ZHANG Jianyun, WANG Guoqing, et al. Review of impacts assessment of environmental change on hydrology and water resources and uncertainty in catchment scale [J]. Climate Change Research, 2015, 11(2): 102. (in Chinese))
- [85] BAO Z, ZHANG J, LIU J, et al. Sensitivity of hydrological variables to climate change in the Haihe River Basin, China [J]. Hydrological Processes, 2012, 26(15): 2294-2306.
- [86] WU J, YU F, CHEN Z, et al. Global sensitivity analysis of growth simulation parameters of winter wheat based on EPIC model [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(7): 136-142.
- [87] 贺新月,曾献奎,王栋. 融合 AR 模型和 MCMC 方法的水文模拟不确定性分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020, 48(2): 116-122. (HE Xinyue, ZENG Xiankui, WANG Dong. Uncertainty analysis of hydrological simulation with auto regressive model and MCMC method[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48(2): 116-122. (in Chinese))
- [88] BEVEN K, BINLEY A. The future of distributed models: model calibration and uncertainty prediction [J]. Hydrological Processes, 1992, 6(3): 279-298.
- [89] N6BREGA M T, COLLISCHONN W, TUCCI C E M, et al. Uncertainty in climate change impacts on water resources in the Rio Grande Basin, Brazil [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2011, 15(2): 585-595.
- [90] GUO S, YING A. Uncertainty analysis of impact of climate change on hydrology and water resources [J]. IAHS Publications-Series of Proceedings and Reports-Intern Assoc Hydrological Sciences, 1997, 240: 331-338.
- [91] NGUYEN D H, KIM S H, KWON H H, et al. Uncertainty quantification of water level predictions from radar: based areal rainfall using an adaptive MCMC algorithm [J]. Water Resources Management, 2021, 35(7): 2197-2213.
- [92] YIP S, FERRO C A, STEPHENSON D B, et al. A simple, coherent framework for partitioning uncertainty in climate predictions [J]. Journal of Climate, 2011, 24(17): 4634-4643.
- [93] BOSSHARD T, CARAMBIA M, GOERGEN K, et al. Quantifying uncertainty sources in an ensemble of hydrological climate-impact projections [J]. Water Resources Research, 2013, 49(3): 1523-1536.
- [94] 田焯. 气候变化对极端径流影响评估中的不确定性研究[D]. 杭州:浙江大学, 2013.
- [95] JUNG I W, CHANG H, MORADKHANI H. Quantifying uncertainty in urban flooding analysis considering hydroclimatic projection and urban development effects [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2011, 15(2): 617-633.

(收稿日期:2021-11-03 编辑:王芳)