

变化环境下径流演变的研究方法进展

宋益涛^{1,2}, 王双涛^{1,2}, 罗平平^{1,2}, 查显宝^{1,2}, 徐承毅^{1,2}, 曹哲^{1,2}, 朱伟^{1,2}

(1. 长安大学 水利与环境学院, 陕西 西安 710054; 2. 长安大学 旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室, 陕西 西安 710054)

摘要: 气候变化和人类活动的双重影响使流域天然径流序列发生时空演变。对变化环境背景下径流序列演变规律、驱动因素的研究及在不同气候模式下对未来径流的预估对流域水资源管理和长期规划具有重要意义。为此对当前变化环境下径流演变趋势检验、径流变化归因分析及未来径流趋势预估的相关研究方法进行了全面的回顾, 并进行综合对比分析。结果表明: 采用多种检验方法组合优于单一检验, 其结果更为可靠; 气候变化和人类活动影响程度在不同流域、不同时期差异较大; 未来径流预估结果的不确定性源于气候模式、水文模型和降尺度方法等多个方面。研究结果可为变化环境下径流演变及其驱动因素的研究提供新思路 and 科学参考。

关键词: 径流演变; 变化环境; 定量分析; 气候模型; 可能影响; 不确定性

中图分类号: P333; TV121

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2022)02-0068-09

Advances in research methods of runoff evolution under changing environment

SONG Yitao^{1,2}, WANG Shuangtao^{1,2}, LUO Pingping^{1,2}, ZHA Xianbao^{1,2},
XU Chengyi^{1,2}, CAO Zhe^{1,2}, ZHU Wei^{1,2}

(1. School of Water and Environment, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 2. Key Laboratory of Subsurface Hydrology and Ecological Effects in Arid Region, Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

Abstract: Affected by the dual effects of climate change and human activities, the natural runoff series of river basins are experiencing spatial-temporal evolution. The study on the evolution of runoff series and its driving factors under the changing environment and the prediction of future runoff under different climate modes are of great significance to water resources management and long-term planning of river basins. The comprehensive and comparative study on the relevant research methods are carried out under the current changing environment, including the test of runoff evolution trend, the attribution analysis of runoff variation and prediction of future runoff trend. The results show that the combination of multiple test methods is better than any individual test, and the results of the combined test methods are more reliable. The impacts of climate change and human activities vary greatly in different river basins and different periods. The uncertainty of future runoff prediction results is caused by the choice of climate model, hydrological model and down-scaling method etc. The results can provide some new ideas and scientific references for the study of runoff evolution and driving factors under changing environment.

Key words: runoff evolution; changing environment; quantitative analysis; climate model; possible impact; uncertainty

1 研究背景

变化环境是指气候变化和人类活动双重影响下的环境。在变化环境下, 水文循环过程中的水量平衡

要素在时间、空间和数量上发生了不可忽视的变化^[2], 其带来的极端暴雨事件、洪涝水文效应和水资源问题受到国内外学者的广泛关注^[3-6], 针对变化环境下径流序列的演变研究进行系统性回顾尤为重要。

收稿日期: 2021-10-01; 修回日期: 2022-03-15

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFE0103800); 京都大学防灾研究所国际合作研究项目(2019W-02)

作者简介: 宋益涛(1996-), 男, 河南濮阳人, 硕士研究生, 研究方向为水文水资源、流域水文模拟。

通讯作者: 罗平平(1981-), 男, 湖南长沙人, 博士, 教授, 研究方向为水文水资源、流域水文模拟。

近些年,变化环境背景下径流演变规律及驱动因素的研究一直是水文学领域的研究热点,国内外围绕变化环境下流域径流序列演变的检测与归因分析展开了全面深入的探讨^[7-8],如变化环境对流域水文过程的影响研究、流域径流变化主要因子贡献率的量化与分离和气候变化对流域未来径流的可能影响及不确定性研究等。水文序列演变趋势的检验与归因分析正从统计模型检验向水文气候模型模拟以及物理模型与统计模型相结合的方向发展。气候变化对未来径流的可能影响向着多模式、多降尺度技术应用和多水文模型综合研究的方向发展。这些研究成果对我国水资源规划管理、水利水电工程规划设计、水资源评价及流域防洪减灾等工作具有重要的参考价值^[9-15]。

本研究针对变化环境下流域径流序列演变研究进展进行了系统性回顾,探讨了变化环境下径流序列时空演变的研究方法,归纳了当前最新研究方法,并进行综合对比分析,总结了相关方法的优缺点,同时提出未来的发展趋势。本文研究结果可为变化环境下径流演变规律和驱动因素的研究以及流域水资源管理与可持续水资源规划提供科学参考。

2 径流序列演变检验方法的发展与应用

2.1 检验方法发展历程

早期的检验方法是基于原始数据上的参数统计分析,该类检验法要求原始样本信息需满足最基本的正态分布和同质性假设条件,主要代表方法有累积距平法(cumulative departure)、线性回归法(linear regression)和滑动t检验法(moving t-test),为了减少对原始数据的限制,一些学者提出了非参数秩检验统计法,如斯皮尔曼秩检验(Spearman test)和曼-肯德尔检验(Mann-Kendall test),虽然非参数检验克服了对原始样本信息总体分布的限制,对变率突变的检测把握性较大,但无法避免由样本信息本身的相关性所带来的分析误差,在组合型突变检测中存在一定不确定性,因此小波理论被越来越多的学者引入到水文气象研究中。小波分析^[11]是由法国 Morlet 在 20 世纪 80 年代初提出的一种具有时频多分辨功能的信号处理方法,可以对信号内的瞬态、频率成分进行探测。水文系统中的小波分析主要应用于周期变化方面的研究^[12],通过小波变换,可以将水文时间序列分解成不同时间尺度的确定性序列和随机序列,运用方差分析,对确定性序列进行周期分析,从而获得水文序列的主周期。

2.2 径流序列的演变检验方法

在径流对变化环境的响应机制研究中,利用长序列历史资料分析径流演变的趋势、周期以及空间变异等特征有助于正确认识径流演变规律,为下一步的径流演变驱动因素分析奠定基础。基于现代数学和统计学理论,国内外研究人员对水文序列趋势检验和变异诊断开展了大量的研究工作^[13-15]。常用的径流序列演变检验方法按类型分类主要有下列 3 种:(1)趋势检验。目前趋势分析方法主要分为两大类,即参数统计法和非参数统计法。参数统计分析是对原始数据直接进行统计分析,而非参数统计方法是对基于原始数据所获得的秩进行统计分析,因此对样本数据没有限制要求,且不受少数异常数据值的干扰和影响^[16]。(2)周期性检验。由于气象和水文要素受多种因素综合作用,呈现出多时间尺度的变化特征,其水文序列在时间尺度上呈周期性变化。水文气象序列的周期性检验是水文分析中一项重要的工作,用于评估长期径流序列的周期性变化,可了解区域变化环境下水文序列的演变规律提供重要参考。主要检验方法有周期图法、连续谱分析法和小波分析法。(3)突变性检验。用于诊断一个水文气象序列在时间上是否发生变异和监测发生变异的时间点,突变性检验是径流演变趋势分析的关键,可根据突变点将径流序列划分为基准期和变化期。国内外有很多方法用于突变检验,如 Mann-Kendall、有序聚类分析、Hurst 系数、R/S 分析、双累积曲线法等。其中,有序聚类分析实质是寻求使总离差平方和最小的最优分割点;双累积曲线(double mass curve, DMC)法由 Merriam 提出,在水文气象要素的突变性检验中得到广泛应用,该方法简单且直观;R/S(rescaled range analysis)称为重标极差分析法,最早由 Hurst 于 1951 年提出,后经 Mandelbrot 完善,主要用于时间序列的分形特征和持续性检验。上述 3 种类型检验方法归纳于表 1。

2.3 检验方法的应用现状

近些年,参数和非参数检验方法得到广泛的应用。为了降低原始数据为满足统计要求而产生的误差,研究者对相关理论与方法进行了不断改进,但各个研究方法仍受到假设检验条件和其他因素的限制。因此,许多学者将多种方法综合应用进行分析,目的是使分析结果更具有准确性和说服力。如刘宇等^[14]采用 M-K 检验、滑动 t 检验和小波分析等方法分析了泾河流域近 70 年的水文气象要素变化特征;裴宏伟等^[15]利用有序聚类分析、小波分析和双

累积曲线等方法对清水河流域历史径流序列演变特征进行了分析。在实际研究中,应用组合检验方法进行趋势判断、突变检验和周期性分析,有助于更好

地把握变化环境下流域径流演变的规律。合理搭配多种检验方法能够使检验结果更加准确,从而更有效地判断突变点以划分基准期和影响期。

表 1 变化环境下径流序列常用检验方法

检验类型	功能	常用方法
趋势性检验	分析长期径流序列的演变趋势	参数统计分析:线性回归、累积距平和滑动 t 检验 非参数统计分析:M-K 检验、斯皮尔曼秩检验和 EMD 法经验模态分解
周期性检验	评估长期径流序列的周期性变化	周期图法,连续谱分析和小波分析
突变性检验	诊断长期径流序列的变异点	M-K 检验、序聚类分析、Hurst 系数、R/S 分析和双累积曲线

对于径流演变规律检验,当前已有多种检验方法得到了应用和发展,在方法逐渐成熟的基础上,未来研究中需要重点把握全方位的检验分析,即从时间和空间尺度上把握变化环境下径流演变的规律特征。当前大多研究主要集中在径流序列年尺度的变化特征,如刘星根^[17]应用小波分析和 R/S 分析方法分析了 1960–2010 年赣江流域年降雨量和年径流量的周期性;Alifujiang 等^[18]采用单调趋势检验和小波变换方法分析了伊塞克库湖流域(LIKB)水文气象变量的趋势性和周期性,探讨了该流域年内径流量的演变。目前以季节、月尺度及汛期与非汛期的径流演变分析研究较少,张永勇等^[19]采用 M-K 趋势检验对 1958–2005 年唐乃亥站、直门达站和昌都站 3 个水文站年际径流、汛期和非汛期径流过程进行了分析。

变化环境对流域径流的影响仍将持续,未来的检验分析研究应当重点分析流域径流序列的多尺度变化特征,将时间尺度与空间尺度相结合,以满足不同空间尺度的研究应用需求,这种多尺度、多方法组合检验分析可能会揭示一些新的发展和认识^[20]。

3 变化环境背景下径流演变归因分析

在变化环境影响下,径流序列发生了非一致性的演变。归因分析是径流演变驱动因素研究的关键内容,对于探讨变化环境下径流演变机理具有重要意义。流域径流演变归因研究表明,气候变化和人类活动为主要驱动力,在二者共同作用下,流域径流序列发生特异性变化。但不可将其演变成因单一地

归结为气候变化或人类活动,而应对径流演变结果进行定量分析,以评价和识别不同驱动因子对径流变化的贡献率^[21]。

3.1 径流变化贡献率的分析方法

目前对于径流变化贡献率分析应用较多的研究思路有两种:一是直接使用定量分析方法对径流演变序列进行分析,依据长时期历史径流序列突变时间划分天然时期和人类活动影响期,常见的方法有数理统计法和弹性系数法;二是采用基于水文模型的径流还原法^[22],该方法根据突变时间划分天然时期和人类活动影响时期,根据流域的具体条件选取适宜的水文模型。采用天然时期的气象和土地利用数据率定水文模型参数,将影响期的气象数据作为输入,模拟还原出影响期的天然径流量,天然与实测径流量差值即为人类活动对径流变化的贡献量,剩余部分为气候变化对径流变化的贡献量^[24]。基于水文模型的径流还原法研究框架如图 1 所示。

目前应用较为广泛的定量分析方法主要有 3 种,即数理统计分析法、弹性系数法和基于水文模型的径流还原法,将该 3 种分析方法的原理及优缺点等归纳于表 2。

3.2 径流演变归因定量分析方法应用现状

目前,关于变化环境下流域径流演变归因的定量研究已经取得了长足的进步^[22–25],多种方法得到广泛应用,定量分析方法也逐渐从数理统计法向水文模型模拟法、数理统计法与水文模拟法相结合的方向发展。表 3 为定量分析气候变化和人类活动对流域径流影响的部分相关研究统计。

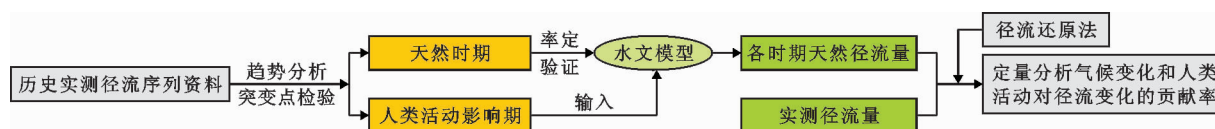


图 1 基于水文模型的径流还原法研究框架

表 2 气候变化和人类活动对流域径流影响的定量分析方法

类型	代表方法	原理	优点	缺点
数理统计 分析法	累计斜率变化率法 ^[24] (SCRAQ)	对长序列水文数据进行数理统计,通过绘制多年累积径流量、降水量和蒸散发量曲线求出突变前后拟合直线的斜率,再分别计算各水文要素在突变前后的斜率变化率,可得出气候变化和人类活动对径流演变的贡献率。	计算简便,仅需气候时间序列数据。通过使用累积量降低了数据年际变化导致的误差。	无物理基础、无法代表水文变化过程。
弹性系数法	Budyko 假设 ^[25]	假设给出 1 条描述流域多年平均降水量、潜在蒸散发量和实际蒸散发量之间定量关系的经验曲线。	具有物理基础、方法简便、不需要进行参数率定和校准。	潜在蒸散发量的准确性难以验证。
基于水文 模拟的径 流还原法	径流还原法 + SWAT 模型 或 VIC 模型、TOPMODEL 等分布式水文模型	通过改变气象、下垫面等条件输入,采用水文模拟法量化气候变化和人类活动对径流演变的影响程度。	物理机制强、可设置多参数、分析精度高。	对数据种类、精度要求高,需进行参数率定和校准。

表 3 定量分析气候变化和人类活动对流域径流影响的部分相关研究统计

作者	研究方法	研究流域	研究时段	主导因素	对径流的影响	贡献率/%
张调风等 ^[26] (2014 年)	累计斜率变化率法	湟水河流域	1966 – 2010 年	人类活动	减少	64.54
刘酌希等 ^[27] (2010 年)	径流还原法 + SWAT	洮河流域	1986 – 2020 年	气候变化	减少	58.9
杨倩等 ^[28] (2019 年)	Budyko 理论的 弹性系数法 + SWAT 模型	汉江流域	1960 – 2016 年	气候变化	减少	65.3 ~ 68.1
王晓颖等 ^[29] (2020 年)	Budyko 假设的 水量平衡法	白河流域	1980 – 2000 年 2001 – 2017 年	人类活动	减少	85.6 73.6
Wu 等 ^[30] (2020 年)	径流还原法 + VIC	伊逊河流域	1980 – 1989 年 1990 – 1999 年 2000 – 2016 年	气候变化 人类活动 人类活动	减少 增加 减少	69.9 69.5 73.8
Lian 等 ^[31] (2021 年)	径流还原法 + SWAT 模型	延河流域	1980 – 2012 年	气候变化	减少	65.64
Lei 等 ^[32] (2021 年)	线性回归模型	潘阳湖流域	1960 – 2015 年	气候变化	减少	57.0
Wu 等 ^[33] (2017 年)	累计斜率变化率法	银江流域	1984 – 1994 年 1995 – 2003 年 2004 – 2015 年	基准期 突变期 – 气候变化 测量期 – 人类变化	增加 减少	75.53 53.70

表 3 中的研究结果显示,气候变化和人类活动 对不同流域的影响程度存在明显差异,流域径流的

减少主要是由气候变化导致。如杨倩等^[28]采用 7 种基于 Budyko 理论的弹性系数法和 SWAT 模型定量分析了气候变化和人类活动对汉江流域径流变化的贡献率,研究表明气候变化是近 56 年径流减少的主要原因;Lian 等^[31]采用 SWAT 水文模型在不同模拟情景下研究了延河流域的关键水文过程,比较分析得出气候变化对径流演变的贡献率约为土地利用变化贡献率的两倍,表明小流域径流量减少的主要原因是气候因素,而植被恢复有利于小流域径流量的增加。

气候变化和人类活动的影响强度在不同流域和不同时期内是变化的。如 Li 等^[34]在一个 9 a 移动窗口中,采用基于 Budyko 的框架和随时间变化的流域特征参数 n ,研究了各因子对黄河中游 14 个子流域径流变化贡献的时空变化,结果表明 1982 – 2015 年气候变化引起的径流变化呈先增大后减小的趋势,与水土保持措施相关的人类活动对研究区北部影响较大。气候变化和人类活动因素对同一时期不同流域和同一流域不同时期的影响不同。如 Wu 等^[33]采用累积量变坡率比较法探讨了 1984 – 2015 年银江流域径流变化和径流对不同驱动因子的响应,研究结果表明,突变期人类活动的影响较弱,气候变化对流域径流变化的贡献占主导地位,而在测量周期内人类活动强度的影响增强。同一流域选用不同的定量分析方法其结果存在差异,主要与数据选取、模型参数设置和方法本身条件及适用范围有

关。另外,目前的研究主要采用水文模型模拟对各因素影响程度进行定量分离,将径流量的实测与模拟差值直接归于人类活动的影响,并没有说明人类活动以何种方式和多大程度地影响了径流量,从而使分析结果的可靠性偏低。在未来研究中需综合考虑人类活动和气候变化内部的各方面因素,以及两者之间的相互作用对径流变化的影响,从而有效分析两者对径流变化的具体影响因素和影响程度,提供较高可靠度的研究结果和理论依据。

4 未来气候情景下径流变化趋势研究

全球变暖引起了不同时空尺度的降水、土壤水、蒸散发、地表水和地下水等发生改变,进而使得流域径流在时空尺度上发生非一致性变化。未来气候情景对流域径流的影响分析是建立在气候变化预估研究的基础上,利用确定性分布式水文模型结合气候模型输出结果对径流变化趋势进行预估,为未来流域水资源管理规划以及应对流域水科学安全问题等提供理论科学依据。

目前,径流对未来气候模式的响应研究分析过程常遵循图 2 所示的模式^[35–36],即“未来气候情景设置 – 水文模拟 – 影响研究”模式。该方法一般可概括为 4 个步骤^[37–38]:(1)设计未来气候情景;(2)建立流域水文模型;(3)选择合适的降尺度方法对气候情景处理作为模型输入;(4)进行水文模拟,分析水文变量响应。

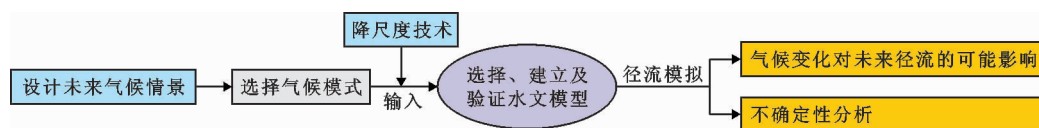


图 2 未来气候变化对径流的可能影响研究模式

4.1 气候变化对未来径流的可能影响分析

对于全球大部分流域,气候变化对流域水文过程的影响将在未来 50 ~ 100 a 内继续发挥重要的作用,在不同的气温及降水等条件下,其影响程度是不同的,且在不同流域间气候变化对未来径流的影响也存在较大差异。因此,通过降尺度技术对气候模型输出结果进行处理,并与确定性分布式水文模型相结合,开展气候变化对流域未来径流的可能影响分析是流域水资源管理的重要基础。近些年,研究者针对气候变化对流域未来径流的可能影响进行了大量的研究,部分相关研究统计见表 4。

表 4 中关于气候变化对未来径流的可能影响研究结果表明:(1)受气温、降水和蒸散发等气候因素

的影响,流域天然径流量将在未来气候模式下发生显著的变化。如黄金龙等^[45]采用 HBV 和 SWAT 模型对 RCP4.5 情景下长江上游流域的未来径流进行了预估,结果显示 2011 – 2040 年径流量将增大 14.2%,流域未来峰值流量也将进一步增大;Xing 等^[46]预测了中国 35 个流域未来径流的时空变化及其关键影响因素,结果显示在 4 个气候模式背景下整个研究区域年平均潜在蒸散发量均将增加,降水对径流变化的影响比潜在蒸散发对径流变化的影响更为显著,即降水是径流的主要驱动因素。(2)在不同的流域、时期和社会背景下,气候变化对未来径流的影响有显著差异。如陈婷等^[47]利用 DTVGM 模型对汉江上游流域未来时期(2011 – 2040 年、2041 –

2070 年和 2071 – 2099 年)的天然径流量进行了预测,模拟结果显示,未来 3 个时期的年均径流量均将减少,RCP4.5 情景下的径流量普遍小于 RCP8.5 情景下的径流量;张永勇等^[19]研究表明,气候变化背景下黄河源区未来 30 年的径流量与现状相比有所减少,长江源区径流量有显著增加趋势,澜沧江源区径流量大于现状径流量,气候变化对 3 个源区径流的影响程度排序为长江源区 > 黄河源区 > 澜沧江源区。(3)气候变化对未来径流的可能影响多采用气候模式与分布式水文模型相结合的研究方法,除此之外,还可采用气候模式与数理统计方法相结合对未来气候情景下流域径流进行预测,如 Xing 等^[46]在研究中为避免传统水文模型结构和参数化带来的复杂性和不确定性,提出了一种基于 Budyko 型方程的双参数气候弹性方法。

4.2 不确定性影响分析

在气候变化对未来径流的可能影响研究中,气候变化情景的设定与水文模型的模拟结果均存在一定的不确定性。不确定性主要来源于 3 个方面:(1)不同气候模式的选择。气候变化情景的选择直接影响着水文模拟结果,目前只能预估未来可能出现的气候情景,且不同气候模式之间存在着系统误差与缺陷。(2)不同降尺度技术的处理。选用相同的气候模式而采用不同的降尺度分析技术,则得到的降尺度结果有所不同,进而输入到水文模型所得出的模拟结果也不同。(3)水文模型参数、结构的不确定性。利用历史资料率定的参数对未来气候条件的不适应性将会影响模拟结果,另外,由于不同水文模型的结构有所不同,因而得出的模拟结果之间也存在一定的差异。

表 4 气候变化对未来径流的可能影响的部分相关研究统计

作者	使用模型		模型耦合 处理方法	气候变 化情景	研究流域	研究时段
	水文模型	气候模型				
田晶等 ^[39] (2020 年)	SWAT	BCC – CSMN、BNU – ESM	DBC	假定情景	汉江流域	2010 – 2050 年
张永勇等 ^[19] (2012 年)	SWAT	CSIRO、NCAR	插值	A1B 和 B1	长江源区 黄河源区 澜沧江源区	2010 – 2039 年
张利平等 ^[40] (2011 年)	SWAT	IPCC、SRES、WCRP	时间尺度 降解	A2、A1B、B1	漳卫河流域	2011 – 2099 年
曹丽娟等 ^[41] (2013 年)	LRM 模型	RegCM3	FvGCM	A2	黄河及长江 流域	2010 – 2030 年
董立俊等 ^[42] (2019 年)	SWAT	CanESM2	SDSM	RCP2.6/4.5/ 8.5	长江流域	2071 – 2100 年
郭静等 ^[43] (2016 年)	VIC	HadCM3	SDSM	A2、B2	雅砻江流域	2006 – 2100 年
周梦瑶等 ^[44] (2020 年)	栅格型新安江 水文模型	IPSL – CM5A_MR	统计降尺度 SDSM	RCP2.6/4.5/ 8.5	赣江上游区	2021 – 2050 年
黄金龙等 ^[45] (2016 年)	HBV 和 SWAT	CCLM 区域气候模型	动力降尺度 DBC	RCP4.5	长江上游流域	2011 – 2040 年
Xing 等 ^[46] (2018 年)	Budyko 型方程 的双参数气候 弹性方法	BCC – CSM1.1、MI- ROC – ESM – CHEM、 GFDL – ESM2M 和 HadGEM2 ES	增量变化法	RCP2.6/4.5/ 6.0/8.5	中国 7 个主要 气候类型中的 35 个流域	2040 – 2069 年
陈婷等 ^[47] (2019 年)	DTVGM 模型	CMIP5	多模式集合 平均结果	RCP4.5/8.5	汉江上游	2011 – 2040 年 2041 – 2070 年 2071 – 2099 年

一些学者已经选用不同的水文模型、降尺度技术对多种气候情景下径流模拟结果的不确定性进行了对比研究分析。如 Wambura 等^[48]选用 SWAT 模型对瓦米河次流域进行了未来径流模拟,评估了气候输入对未来径流预估产生的不确定性;Chen 等^[49]以汉江上游流域为研究区域,分别对同期的 CGCM3 和 HadCM3 的 A2 排放情景采用不同的统计降尺度技术(SSVM 和 SDSM)处理降雨数据输入到新安江和 HBV 水文模型,对水文模拟结果中的差异进行了严格的评价和比较,结果表明,在该流域气候变化对径流的影响研究中,基于相同的 GCMs 而使用不同的降尺度技术所提供的降雨作为模拟输入时,模拟径流结果差异很大,SDSM 在降尺度降雨方面的性能优于 SSVM,新安江模型的精度高于 HBV,CGCM3 比 HadCM3 更适合研究气候变化对该地区径流的影响;Prudhomme 等^[50]使用集总概念降雨-径流模型、3 个 GCM 和两个降尺度技术来研究气候变化对河流流量的影响;Zheng 等^[51]在采用 CMIP5 全球气候模型和水文模型预测南亚未来气候、径流的研究中,分别探讨了由降尺度方法和 GCMs 选择导致的预测不确定性,研究表明不同降尺度方法的径流预测差异小于 GCMs 降水选择带来的预测不确定性;李紫妍等^[52]基于构建的子午河流域 SWAT 模型,定量探究了参数不确定性对径流模拟的影响,研究结果表明,不同流量下参数不确定性对径流模拟的影响差异明显;Lee 等^[53]以切萨皮克湾流域为研究对象,对比分析了 SWAT 模型的 12 个参数集(PAR)和 3 种 RCP 下的 8 种 GCM 对应的径流模拟结果,对模型多参数、多 GCM 和多 RCP 模拟的不确定性进行了评估,结果表明 GCM 预测的可变性是最重要的单一因素,占总径流预测不确定性的 46%,其次是 PAR 和 RCP。在由气候模型产生的不确定性评估研究中,除了采用多模型评估外,还可以对气候模型内部不同参数产生的不确定性进行评估。如 Barria 等^[54]使用具有扰动物理的全球气候模式研究了 GCM 物理参数对径流模拟所产生的不确定性。

综合分析,在气候变化对未来径流可能影响的研究中,气候变化对未来径流的影响随着流域、社会背景和研究时期的不同存在较大差异,其模拟结果在上述 3 个方面均会产生一定程度的不确定性。如果只是用单一的全球气候变化模型来分析气候变化的影响,其结论是不可靠的,而多个气候模式对未来气候情景更具有代表性,同时多个气候模式集合分析也有可能在一定程度上减少模型对降水、径流模

拟的不确定性。不同降尺度技术和水文模型对于同一流域的径流模拟效果存在相对差异。为了更好地评估气候变化对未来的影响,应在实际研究中采用多气候模型、多降尺度技术和多水文模型进行综合比较,通过评估模拟结果选出对该区域可靠性较高的气候模型、降尺度技术和水文模型组合。

5 展 望

目前,国内外关于变化环境下流域径流演变规律及径流演变归因分析已经开展了大量研究,并取得大量成果。但还存在以下一些不足:

(1)研究尺度与方法单一化。关于水文序列的趋势检验大多集中在单一要素的单一尺度检验,而变化环境的影响作用于水文循环的每个过程,导致各水文要素发生了非一致性变化,为了深度探究径流序列演变特征,应当对水文气象多要素在季节、汛期和非汛期等多个尺度下全面探讨趋势变化。检测方法的提升和多尺度综合分析不但有助于全方位揭示水文气象序列的演变规律,也可能会有些新的发现和认识。

(2)数据获取存在局限性。数据的获取是变化环境对流域径流和极端水文事件等相关研究的基础,但目前还存在数据不易获取的问题,建议各相关部门相互合作,进行监测数据整合、加大流域监测站点的密度、开发新的监测手段和技术以提升数据监测精度,并建立数据云平台为用户提供下载渠道。

(3)气候模型与水文模型耦合精度尚待提高。在气候变化对未来径流的可能影响研究中,大尺度气候模型与流域尺度的水文模拟耦合精度问题尚待解决。目前多数研究中气候模型与水文模型并不是双向耦合,只是单项反馈。水文模型作为对变化环境下水文响应机理研究的最主要的手段之一,其模型的不确定性问题也一直是影响研究可靠性的重要因素。未来需引入机器学习、深度学习等技术,开发一些有效的研究方法,如开发更高效的降尺度方法、建立气候-水文双向耦合模型、加强监测数据对模型的训练等,从而提高气候模型与水文模型耦合的精度以增强模拟结果的可靠性。这不仅对水文模型提出了更高的要求,也激发了一系列有价值问题的探讨,未来在变化环境与流域水资源管理相关的研究中,水文学与气候学将实现更高水平的融合,发挥出学科交叉相辅相成的应用价值。

6 结 论

本文针对当前变化环境下径流的演变趋势检

验、径流变化归因分析及未来径流趋势预估的相关研究方法及其进展进行了综合对比论述,得出以下主要结论:

(1)对于变化环境下径流演变序列的趋势性检验、变异性诊断和周期性分析,不同检验方法在本质和原理上存在差异,导致其检验结果也有所不同。为避免由于方法原理相同或相似而带来的局限性,需运用多尺度、多种方法揭示序列的演变趋势,这样不但可以克服原数据本身带来的限制要求,而且可使分析结果更具可靠性。

(2)径流序列演变的归因分析是径流对变化环境响应研究的关键部分,气候变化和人类活动对径流变化贡献的定量分析结果受研究区域、研究时期和社会背景等因素的影响。不同的定量分析方法的结果存在差异,主要与气象及水文等数据的选取、模型相关参数的设置、方法本身存在的不确定性以及适用范围和条件相关。

(3)气候变化对未来径流可能影响预估的不确定性主要受气候模式、降尺度技术和水文模型3个方面的影响,不同气候模式、降尺度技术和水文模型的组合模拟结果存在差异。单一的气候模式、降尺度技术和水文模型组合的研究结果可靠性偏低。

参考文献:

- [1] IPCC. Climate change 2007: synthesis report[R]. Valencia, Spain: IPCC, 2007.
- [2] 汤秋鸿. 全球变化水文学: 陆地水循环与全球变化[J]. 中国科学: 地球科学, 2020, 50(3): 436–438.
- [3] IPCC. Special report on global warming of 1.5°C [M]. UK: Cambridge University Press, 2018.
- [4] 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.
- [5] WEI Xindong, WANG Ning, LUO Pingping, et al. Spatiotemporal assessment of land marketization and its driving forces for sustainable urban–rural development in Shaanxi Province in China[J]. Sustainability, 2021, 13(14): 7755.
- [6] 金炳琪, 袁鹏杰. 气候变化对水文水资源影响的研究分析[J]. 农业灾害研究, 2021, 11(5): 99–100+103.
- [7] 谢正辉, 陈思, 秦佩华, 等. 人类用水活动的气候反馈及其对陆地水循环的影响研究——进展与挑战[J]. 地球科学进展, 2019, 34(8): 801–813.
- [8] GARG V, NIKAM B R, THAKUR P K, et al. Human–induced land use land cover change and its impact on hydrology[J]. Hydro Research, 2019, 1: 48–56.
- [9] LUO Pingping, XU Chengyi, KANG Shuxin, et al. Heavy metals in water and surface sediments of the Fenghe River Basin, China: assessment and source analysis[J]. Water Science and Technology, 2021, 84 (10–11): 3072–3090.
- [10] ZHA Xianbao, LUO Pingping, ZHU Wei, et al. A bibliometric analysis of the research on Sponge City: Current situation and future development direction[J]. Ecohydrology, 2021, 14(7): e2328.
- [11] NAKKEN M. Wavelet analysis of rainfall–runoff variability isolating climatic from anthropogenic patterns[J]. Environmental Modelling & Software, 1999, 14(4): 283–295.
- [12] 黄强, 孔波, 樊晶晶. 水文要素变异综合诊断[J]. 人民黄河, 2016, 38(10): 18–23.
- [13] 赵雪花, 安莉莉, 袁旭琦. 基于HHT和R/S分析的黄河上游年径流序列演变模式分析[J]. 水电能源科学, 2013, 31(7): 9–12.
- [14] 刘宇, 管子隆, 田济扬, 等. 近70a泾河流域径流变化及其驱动因素研究[J]. 干旱区地理, 2022, 45(1): 17–26.
- [15] 裴宏伟, 杨佳, 张红娟, 等. 变化环境下清水河流域径流演变特征及驱动力[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2020, 18(2): 1–13.
- [16] NAFARZADEGAN A R, AHANI H, SINGH V P, et al. Parametric and non–parametric trend of reference evapotranspiration and its key influencing climatic variables (Case study: Southern Iran) [J]. Ecopersia, 2013, 1(2): 123–144.
- [17] 刘星根. 赣江流域年降雨和径流量的周期特征分析[J]. 人民珠江, 2019, 40(6): 54–60.
- [18] ALIFUJIANG Y, ABUDUWAILI J, GROLL M, et al. Changes in intra–annual runoff and its response to climate variability and anthropogenic activity in the Lake Issyk–Kul Basin, Kyrgyzstan[J]. Catena, 2021, 198: 104974.
- [19] 张永勇, 张士锋, 翟晓燕, 等. 三江源区径流演变及其对气候变化的响应[J]. 地理学报, 2012, 67(1): 71–82.
- [20] 姜瑶, 徐宗学, 王静. 基于年径流序列的五种趋势检测方法性能对比[J]. 水利学报, 2020, 51(7): 845–857.
- [21] 周波涛, 钱进. IPCC AR6 报告解读: 极端天气气候事件变化[J]. 气候变化研究进展, 2021, 17(6): 713–718.
- [22] JIANG Shanhu, REN Liliang, YONG Bin, et al. Analyzing the effects of climate variability and human activities on runoff from the Laohahe Basin in northern China [J]. Hydrology Research, 2012, 43(1/2): 3–13.
- [23] SHARIFI A, MIRABBASI R, NASR–ESFAHANI M A, et al. Quantifying the impacts of anthropogenic changes and climate variability on runoff changes in central plateau of Iran using nine methods [J]. Journal of Hydrology, 2021, 603(Part C): 127045.
- [24] LUO Pingping, MU Yong, WANG Shuangtao, et al. Ex-

- ploring sustainable solutions for the water environment in Chinese and Southeast Asian cities [J]. *Ambio*, 2022, 51: 1199–1217.
- [25] LI Fengping, ZHANG Guangxin, XU Yijun. Separating the impacts of climate variation and human activities on runoff in the Songhua River Basin, Northeast China [J]. *Water*, 2014, 6(11): 3320–3338.
- [26] 张调风, 朱西德, 王永剑, 等. 气候变化和人类活动对湟水河流域径流量影响的定量评估[J]. *资源科学*, 2014, 36(11): 2256–2262.
- [27] 刘酌希, 陈鑫, 管晓祥, 等. 变化环境下洮河流域径流变化归因[J]. *水土保持研究*, 2020, 27(5): 87–92+100.
- [28] 杨倩, 刘登峰, 孟宪萌, 等. 环境变化对汉江上游径流影响的定量分析[J]. *水力发电学报*, 2019, 38(12): 73–84.
- [29] 王晓颖, 宋培兵, 廖卫红, 等. 气候变化和人类活动对白河流域径流变化影响的定量研究[J]. *水资源与水工程学报*, 2020, 31(4): 50–56.
- [30] WU Liyu, ZHANG Xuan, HAO Fanghua, et al. Evaluating the contributions of climate change and human activities to runoff in typical semi-arid area, China – ScienceDirect[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 590: 125555.
- [31] LIAN Yingxin, SUN Miao, WANG Jichao, et al. Quantitative impacts of climate change and human activities on the runoff evolution process in the Yanhe River Basin[J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2021, 122(Parts A/B/C): 102998.
- [32] LEI Xiangyong, GAO Lu, WEI Jianhui, et al. Contributions of climate change and human activities to runoff variations in the Poyang Lake Basin of China [J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2021, 123(Parts A/B/C): 103019.
- [33] WU Luhua, WANG Shijie, BAI Xiaoyong, et al. Quantitative assessment of the impacts of climate change and human activities on runoff change in a typical karst watershed, SW China [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 601–602: 1449–1465.
- [34] LI Huijuan, SHI Changxing, SUN Pengcheng, et al. Attribution of runoff changes in the main tributaries of the middle Yellow River, China, based on the Budyko model with a time-varying parameter [J]. *CATENA*, 2021, 206: 105557.
- [35] 沈海, 杨绍峰. 全球气候变化对水文与水资源的影响研究[J]. *科学技术创新*, 2019(3): 23–24.
- [36] 张群智, 黄小平. 气候变化对水文水资源影响的研究进展[J]. *环境与发展*, 2019, 31(4): 220–221.
- [37] TROIN M, CAYA D, VELZ Q, ZQUEZ J A, et al. Hydrological response to dynamical downscaling of climate model outputs: A case study for western and eastern snowmelt-dominated Canada catchments [J]. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2015, 4(Part B): 595–610.
- [38] DOMÍNGUEZ – TUDA M, GUTIÉRREZ – JURADO H A. Global Analysis of the hydrologic sensitivity to climate variability [J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 12(Part A): 126720.
- [39] 田晶, 郭生练, 刘德地, 等. 气候与土地利用变化对汉江流域径流的影响[J]. *地理学报*, 2020, 75(11): 2307–2318.
- [40] 张利平, 曾思栋, 夏军, 等. 漳卫河流域水文循环过程对气候变化的响应[J]. *自然资源学报*, 2011, 26(7): 1217–1226.
- [41] 曹丽娟, 董文杰, 张勇. 未来气候变化对黄河和长江流域极端径流影响的预估研究[J]. *大气科学*, 2013, 37(3): 634–644.
- [42] 董立俊, 董晓华, 曾强, 等. 气候变化条件下雅砻江流域未来径流变化趋势研究[J]. *气候变化研究进展*, 2019, 15(6): 596–606.
- [43] 郭静, 王宁, 栗晓玲. 气候变化下石羊河流域上游产流区的径流响应研究[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2016, 44(12): 211–218.
- [44] 周梦瑶, 袁飞, 张利敏, 等. 未来气候变化对赣江上游区极端径流影响预估[J]. *水电能源科学*, 2020, 38(1): 5–8.
- [45] 黄金龙, 王艳君, 苏布达, 等. RCP4.5 情景下长江上游流域未来气候变化及其对径流的影响[J]. *气象*, 2016, 42(5): 614–620.
- [46] XING Wanqiu, WANG Weiguang, ZOU Shan, et al. Projection of future runoff change using climate elasticity method derived from Budyko framework in major basins across China [J]. *Global and Planetary Change*, 2018, 162: 120–135.
- [47] 陈婷, 夏军, 邹磊. 汉江上游流域水文循环过程对气候变化的响应[J]. *中国农村水利水电*, 2019(9): 1–7.
- [48] WAMBURA F J, NDOMBA P M, KONGO V, et al. Uncertainty of runoff projections under changing climate in Wami River sub-basin [J]. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2015, 4(Part B): 333–348.
- [49] CHEN Hua, XU Chongyu, GUO Shenglian. 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, 434–435: 36–45.
- [50] 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(1–2): 177–195.

(下转第84页)

- tem in Northwest China [J]. Sustainability, 2018, 10 (10): 3712.
- [15] 陈亚宁, 杨青, 罗毅, 等. 西北干旱区水资源问题研究思考[J]. 干旱区地理, 2012, 35(1): 1-9.
- [16] 张雪琪, 满苏尔·沙比提, 马国飞. 叶尔羌河平原绿洲气候变化对粮食生产的影响[J]. 干旱区研究, 2018, 35(3): 705-712.
- [17] FANG Gonghuan, CHEN Yaning, LI Zhi. Variation in agricultural water demand and its attributions in the arid Tarim River Basin [J]. The Journal of Agricultural Science, 2018, 156(3): 301-311.
- [18] 高明花. 新疆能源经济发展对策研究[D]. 延吉: 延边大学, 2015.
- [19] 吴业鹏, 袁汝华. 丝绸之路经济带背景下新疆水资源与经济社会协调性评价[J]. 水资源保护, 2016, 32(4): 60-66.
- [20] 吕娜娜, 白洁, 常存, 等. 近 50 年基于农作物种植结构的新疆绿洲农田蒸散发时空变化分析[J]. 地理研究, 2017, 36(8): 1443-1454.
- [21] 尹庆民, 吴益. 中国水-能源-粮食耦合协调发展实证分析[J]. 资源与产业, 2019, 21(6): 20-29.
- [22] 李成宇, 张士强. 中国省际水-能源-粮食耦合协调度及影响因素研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2020, 30(1): 120-128.
- [23] 毕博, 陈丹, 邓鹏, 等. 区域水资源-能源-粮食系统耦合协调演化特征研究[J]. 中国农村水利水电, 2018(2): 72-77.
- [24] 李元年. 基于熵理论的指标体系区分度测算与权重设计[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2008.
- [25] 任祁荣, 于恩逸. 甘肃省生态环境与社会经济系统协调发展的耦合分析[J]. 生态学报, 2021, 41(8): 2944-2953.
- [26] 廖重斌. 环境与经济协调发展的定量评判及其分类体系——以珠江三角洲城市群为例[J]. 热带地理, 1999, 19(2): 171-177.
- [27] 王淑佳, 孔伟, 任亮, 等. 国内耦合协调度模型的误区及修正[J]. 自然资源学报, 2021, 36(3): 793-810.
- [28] 谢乃明, 刘思峰. 离散 GM(1,1) 模型与灰色预测模型建模机理[J]. 系统工程理论与实践, 2005(1): 93-99.
- [29] 邓鹏, 陈菁, 陈丹, 等. 区域水-能源-粮食耦合协调演化特征研究——以江苏省为例[J]. 水资源与水工程学报, 2017, 28(6): 232-238.
- [30] 王丽川, 侯保灯, 周毓彦, 等. 城市水-能源-粮食耦合协调发展研究[J]. 水利水运工程学报, 2021(1): 9-17.
- [31] 陈曦, 包安明, 王新平, 等. 塔里木河近期综合治理工程生态成效评估[J]. 中国科学院院刊, 2017, 32(1): 20-28.
- [32] WANG Fei, CHEN Yaning, LI Zhi, et al. Assessment of the irrigation water requirement and water supply risk in the Tarim River basin, Northwest China [J]. Sustainability, 2019, 11(18): 4941.
- [33] FAN Xing, ZHANG Wen, CHEN Weiwei, et al. Land-water-energy nexus in agricultural management for greenhouse gas mitigation [J]. Applied Energy, 2020, 265: 114796.
- [34] 李玉朋, 陈亚宁, 叶朝霞, 等. 塔里木河下游输水 20 a 的生态响应[J]. 干旱区地理, 2021, 44(3): 700-707.
- [35] 蒲傲婷. 新疆水-能源-粮食系统安全评价及影响因素分析[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2020.
- [36] 张小霞. 基于投入产出模型的塔里木河流域社会经济系统水循环研究[D]. 兰州: 西北师范大学, 2016.
- [37] 张沛. 塔里木河流域社会-生态-水资源系统耦合研究[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2019.
- [38] 王玉宝, 蒲傲婷, 闫星, 等. 新疆水-能源-粮食系统安全综合评价[J]. 农业机械学报, 2020, 51(6): 264-272.
- [39] 祖米来提·吐尔干, 林涛, 严昌荣, 等. 地膜覆盖时间对新疆棉田水热及棉花耗水和产量的影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34(11): 113-120.
- [40] 张沛, 龙爱华, 海洋, 等. 1988-2015 年新疆农业用水时空变化与政策驱动研究——基于农作物水足迹的统计分析[J]. 冰川冻土, 2021, 43(1): 242-253.

(上接第 76 页)

- [51] ZHENG Hongxing, CHIEW F H S, CHARLES S, et al. Future climate and runoff projections across South Asia from CMIP5 global climate models and hydrological modelling [J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2018, 18: 92-109.
- [52] 李紫妍, 刘登峰, 黄强, 等. 定量评估参数不确定性传递对径流模拟的影响[J]. 水力发电学报, 2019, 38(3): 53-64.
- [53] LEE S, QI Junyu, MCCARTY G W, et al. Uncertainty assessment of multi-parameter, multi-GCM, and multi-RCP simulations for streamflow and non-floodplain wetland (NFW) water storage [J]. Journal of Hydrology, 2021, 600: 126564.
- [54] BARRIA P, WALSH K J E, PEEL M C, et al. Uncertainties in runoff projections in southwestern Australian catchments using a global climate model with perturbed physics [J]. Journal of Hydrology, 2015, 529 (Part 1): 184-199.