

基于区域水平衡理论和 SWAT 模型的沁河流域 水收支平衡演变分析

邱曦¹, 马军霞^{1,2}, 左其亭^{1,2}, 张羽¹

(1. 郑州大学水利与交通学院, 河南 郑州 450001; 2. 河南省水循环模拟与水环境保护国际联合实验室, 河南 郑州 450001)

摘要:基于区域水平衡理论和 SWAT 模型,提出了分布式水收支平衡模型的构建思路及水收支平衡计算方法,对人类活动和未来气候变化情景下的沁河流域水收支平衡状况进行模拟,并通过皮尔逊相关系数和 Mann-Kendall 检验方法分析了水收支平衡的关键影响要素及其演变规律。结果表明:2010—2016 年沁河流域蓄水总量呈下降趋势,降水量及出口径流量为沁河流域水收支平衡相对关键的影响要素;未来多气候情景下蓄水总量呈上升趋势,多年平均降水量及出口径流量两个关键影响要素的总体变化情况与辐射强迫水平呈正相关关系;典型气候情景 SSP2-4.5 下降水量及出口径流量在 2037—2041 年、2061—2063 年可能存在突变。

关键词:区域水平衡;水收支平衡;SWAT 模型;气候变化;沁河流域

中图分类号:TV213

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2024)01-0009-07

Evolution analysis of water budget balance in Qinhe River Basin based on regional water balance theory and SWAT model//QIU Xi¹, MA Junxia^{1,2}, ZUO Qiting^{1,2}, ZHANG Yu¹(1. School of Water Conservancy and Transportation, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Henan International Joint Laboratory of Water Cycle Simulation and Environmental Protection, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: Based on regional water balance theory and SWAT model, the construction idea of distributed water budget balance model and calculation method of water budget balance were proposed. The water budget balance of the Qinhe River Basin was simulated under human activities and future climate change, and the main factors affecting the water budget balance and its evolution patterns were analyzed with the Pearson correlation coefficient and Mann-Kendall test method. The results show that the total water storage in the Qinhe River Basin decreased from 2010 to 2016, and precipitation and outlet runoff are the key factors affecting the water budget balance in the Qinhe River Basin. In the future, the total water storage will increase under multiple climate scenarios, and the overall changes of annual mean precipitation and outlet runoff are positively correlated with the radiative forcing level. Under the typical climate scenario SSP2-4.5, the precipitation and outlet runoff may have abrupt changes from 2037 to 2041 and from 2061 to 2063.

Key words: regional water balance; water budget balance; SWAT model; climate change; Qinhe River Basin

近年来我国水资源形势日益严峻,尤其是在气候变化、人类活动等变化环境下,水资源短缺、水环境污染、水生态损害、水灾害多发等新老水问题交织,严重制约了环境质量的提升,阻碍了经济社会持续健康发展。复杂水问题的根源在于水的不平衡性,包括各类水循环要素的收支不平衡、可用水资源量与经济生态要素突出的不匹配性等。因此,如何有效提升水平衡状态、缓解水矛盾、排除水源之危,成为亟待解决的问题。2020 年 8 月,“如何优化变

化环境下中国水资源承载力,实现健康的区域水平衡状态”作为十大前沿科学问题由中国科协发布^[1],以有效措施实现区域水平衡成为国家实现现代化的重大需求。

广义区域水平衡包括水收支平衡、经济社会与生态用水平衡、经济社会供需水平衡与人和和谐平衡四个方面^[2]。其中,水收支平衡是区域水平衡的基础,也是最具普适性的水平衡状态。在研究水收支平衡的过程中,由于水循环过程十分复杂、涉及的

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFC3200201);国家自然科学基金项目(52279027);河南省重大公益性科技专项(201300311500)

作者简介:邱曦(1999—),男,硕士研究生,主要从事水文水资源研究。E-mail:hbhsqx@163.com

通信作者:左其亭(1967—),男,教授,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail:zuoqt@zhu.edu.cn

水循环要素众多,传统的集总式模型方法很难适应变化环境下的水收支平衡分析。因此,需要引入 SWAT 模型等分布式水文模型来研究不同尺度下的水平衡及其在变化环境下的演变状态。Frederiksen 等^[3]利用 SWAT 与 SWAT-MODFLOW 模型评估了不同地下排水方案对农业集水区水文过程及水平衡的影响;Ayivi 等^[4]使用 SWAT 模型对美国北卡罗来纳州某流域在不同的土地利用变化情景下的水量平衡状态及产水量进行了综合分析;骆月珍等^[5]基于 CMADS 驱动 SWAT 模型对富春江水库控制流域的水量平衡状况进行了模拟;代俊峰等^[6-7]提出了基于 SWAT 模型的灌区分布式水文模型并对漳河灌区进行了实例分析。

现有研究中既有利用 SWAT 模型对所选流域进行水平衡分析,又有基于 SWAT 模型提出具有较强针对性的分布式模型方法,但基于 SWAT 模型开展人类活动与不同气候变化情景下的水收支平衡状况及其要素演变规律的研究仍有待深入。本文以区域水平衡理论为基础,探究基于 SWAT 模型的水收支平衡研究方法,分析人类活动及气候变化等变化环境下的沁河流域水收支平衡状态及其演变规律,以为流域水资源统筹管理与协调配置提供参考。

1 研究区概况

沁河发源于山西省沁源县西北太岳山东麓的二郎神沟,是黄河三门峡至花园口区间的黄河一级支流,自北向南流经山西、河南 2 省 17 个县市,并于武陟县方陵村汇入黄河。沁河干流全长 485 km,流域总面积 13 535 km²,其中山西境内占 90.54%,河南境内占 9.46%^[8]。沁河支流众多,其中较大支流有丹河、龙渠河、沁水河等。流域多年平均气温约为 8℃,且呈北低南高态势,多年平均降水量为 613.1 mm,且集中在夏季,年内分配极不均匀,沁河径流主要由降雨形成。流域干流现有水文测站 5 处,从上至下依次为孔家坡、飞岭、润城、五龙口和武陟。引沁入汾及引沁入丹两大调水工程是沁河流域水资源开发利用的重要组成部分^[9],马连圪塔水库和张峰水库是其主要的工程枢纽。沁河流域河道及主要水文站、水库位置见图 1。

2 数据与方法

2.1 数据来源及处理

2.1.1 SWAT 模型相关数据

SWAT 模型的输入数据主要包括数字高程 (DEM) 数据、土壤数据、土地利用数据、气象数据和用于模型率定的水文站逐月径流数据。DEM 数据

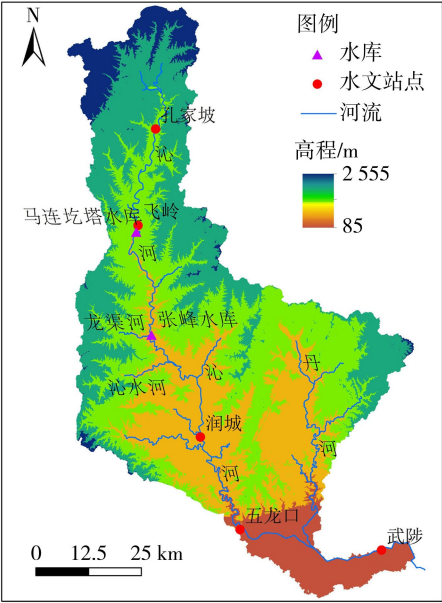


图 1 沁河流域概况

为 30 m×30 m 的 ASTER GDEM 数据,可用于提取数字河网、划分子流域以及水文响应单元 (HRU);土壤数据来源于世界土壤数据库 (HWSD),其中中国境内数据源为第二次全国土地调查南京土壤所提供的 1:100 万土壤数据,后续进行裁剪并重分类土壤类型;土地利用数据采用 30 m×30 m 精度的中国 2015 年土地利用数据;气象数据基于中国大气同化驱动数据集 (CMADS V1.1 2008—2016 年) 处理而来,内置天气发生器的建立基于 CFSR 世界天气数据库数据;径流数据选取了润城站和五龙口站 2008—2016 年逐月径流数据。另外,为了刻画以调水工程为代表的人类活动的影响,将马连圪塔水库和张峰水库等重要水资源配置工程数据引入模型中。各项数据详情及来源见表 1。

表 1 研究数据及来源

数据类型	规格	数据来源
DEM 数据	ASTER GDEM 数据 (空间分辨率 30 m×30 m)	地理空间数据云 (http://www.gscloud.cn)
土壤数据	HWSD (空间分辨率 1 km×1 km)	国家青藏高原科学数据中心 (http://westdc.westgis.ac.cn/)
土地利用数据	2015 年 (空间分辨率 30 m×30 m)	中国科学院资源环境科学数据中心 (http://www.resdc.cn/)
气象数据	CMADS 数据集 (空间分辨率 0.25°×0.25°)	寒区旱区科学数据中心 (http://westdc.westgis.ac.cn)
水文水资源数据	2008—2016 年逐月径流数据及重要水资源配置工程数据	黄河水利委员会

2.1.2 CMIP6 系列数据

近年来,国际耦合模式比较计划 (CMIP) 被广泛用于分析评估气候变化及其影响的研究中,气候模式模拟能力评估以及未来气候变化的情景预估是其

主要研究内容,目前已推进到第六次比较计划,其采用了共享社会经济路径(SSPs)与典型浓度路径(RCPs)组合情景以使模拟结果更符合实际^[10]。基于此,本文从世界气候研究计划(WCRP)国际耦合模式第六次比较计划(CMIP6)官网(<https://esgf-node.llnl.gov/projects/cmip6/>)下载对中国模拟情况较好的BCC-CSM2-MR和MRI-ESM2-0气候模式^[11-12]下SSP1-2.6(低等排放强迫情景)、SSP2-4.5(中等排放强迫情景)、SSP3-7.0(中等至高等排放强迫情景)、SSP5-8.5(高等排放强迫情景)的未来气象数据。为了解决CMIP6不同气候模式下的数据与实测值间的系统偏差问题,采用反距离权重法将不同气候模式空间分辨率统一处理为 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$,采用等距累积分布函数法对模拟数据进行统计偏差校正^[13-15],并取两种气候模式的平均值作为最终结果,进而分析不同发展模式下的未来气候演变。对统计偏差校正后的结果进行分析可知,沁河流域多年平均降水量、温度、风速实测值分别约为613.1 mm、8℃、2.3 m/s,多种气候模式集成模拟的多年平均值分别为626.6 mm、9.3℃、2.5 m/s。因此,将处理后的CMIP6系列数据导入SWAT模型中以研究沁河流域未来气候变化特征具有较好的参考价值。

2.2 基于SWAT模型的分布式水收支平衡模型

2.2.1 模型构建

在区域水平衡研究中,尝试引入SWAT模型,并结合其内置功能构建流域分布式水收支平衡模型,以探究不同尺度下的水收支平衡状态及其在变化环境下的演变规律,从而实现水收支平衡综合分析。

本文构建沁河流域分布式水收支平衡模型,包括以下步骤:①土壤数据库构建过程中,从HWSD属性数据库中查询获取大多数参数,其他参数通过SPAW软件或其他经验公式计算得到^[16];②土地利用类型参考LUCC分类体系,在18个二级类的基础上将土地利用类型重分类为6类,分别为:耕地、草地、林地、水域、建设用地及未利用地;③气象数据库的建立主要包括实测气象数据的输入和天气发生器的建立^[17],采用分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 的中国大气同化驱动集(CMADS V1.1),将其按照SWAT模型的格式进行处理,时间尺度为2008—2016年,并采用CFSR数据库作为其输入数据;④研究区被划分为33个子流域,考虑研究区实际情况,设定土壤、土地利用及坡度的最小面积百分比阈值均为10%,将研究区划分为218个HRU;⑤通过SWAT模型内置的模块,添加一系列水库运行及引调水工程相关数

据,并通过气象数据库参数的调整实现CMIP6系列模式的对比分析。

SWAT模型可基于所构建的数据库及其相关信息,单独计算每个HRU的内部循环,并在子流域进行累计汇总^[16]。在流域水收支平衡研究中,需要从SWAT模型模拟结果中筛选出降水量、实际蒸发量、出口径流量,再结合流域调入、调出水量及水量平衡基本原理,得出流域蓄水变量,并通过对SWAT模型数据库及其参数的修改,结合多种数值分析方法,研究在变化环境下的水收支平衡及其要素的演变状况。图2为基于SWAT模型的分布式水收支平衡模型构建思路。

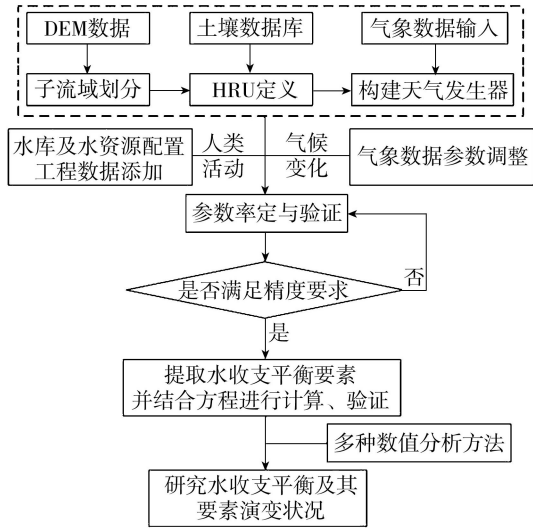


图2 模型构建思路

2.2.2 计算方法

对于流域尺度的水收支平衡,应分非闭合流域和闭合流域两类进行讨论,非闭合流域应考虑时段内地面径流和地下径流流入量,而对于闭合流域其值可以忽略不计。闭合流域水收支平衡方程为

$$R = P - E - \Delta S \quad (1)$$

式中: R 为时段内流域出口断面的总径流量; P 为时段内降水量; E 为时段内的流域净蒸发量; ΔS 为蓄水变量。

然而,在实际应用过程中,大多数流域是不闭合的,而且很多流域存在着很显著的水循环空间异质性,即产、汇流的下垫面情况和气象条件明显不同,水资源的时空分布极其不均匀^[18]。同时,跨流域调水的实施、闸坝水库的修建等频繁的人类活动也改变了自然的水循环过程,加大了流域水平衡分析的复杂性。对于一个复杂的自然流域系统,为了深入调控其径流、蒸发、河道调蓄等过程,可以根据下垫面情况将其分解为若干子流域,子流域之间通过河网进行连接。依此,可构建基于分布式思想的流域总的水收支平衡方程:

ΣΔS=ΣP-ΣE-R+ΣQ_{in}-ΣQ_{out} (2)

式中:ΣΔS、ΣP、ΣE 分别为时段内所有子流域的蓄水变量、降水量、蒸发量之和;ΣQ_{in}、ΣQ_{out}为时段内流域外的调入与调出水量,不包括流域内部子流域间的水量交换。

对于蓄水变量ΣΔS,其值为正时流域年内水量呈盈余状态,为负时呈亏损状态,在研究包含若干个丰水年和枯水年的较长时间序列时,流域历年蓄水变量应正负相抵,趋近于0,即蓄水变量多年平均值应近似为0。因此,在较长时间序列上,蓄水变量的增减趋势应近似反映水收支平衡水平的变化情况,研究其他水收支平衡要素与蓄水变量在一定时间序列上的相关性水平可以有效反映不同水收支要素对水收支平衡的影响程度。本文采用皮尔逊相关系数r量化各水收支要素与蓄水变量间的线性相关性,r越大,说明该水收支要素在一定时间序列上的变化趋势与蓄水变量越相近,从而对水收支平衡状态的影响程度也越大。

3 结果与分析

3.1 模型率定结果与分析

以润城站和五龙口站的实测逐月径流数据为参照,利用 SWAT-CUP 工具中的 SUFI-2 算法对 SWAT 模型输出结果进行率定及验证。根据参数与研究的相关性及其敏感性分析结果,选取 13 个参数,并在确定参数和选定参数初始范围后采用内置算法进行 200 次迭代计算。根据所收集到的水文站实测数据,以 2008—2009 年作为模型的预热期,其余实测逐月径流数据分为两个部分,其中 2010—2015 年部分用于模型率定,2015—2016 年部分用于模型验证。本文选用纳什效率系数 NSE 和确定系数 R²来评价模型的适用性,具体计算结果见表 2,所选取的两个典型水文站点的率定期和验证期流量的对比曲线见图 3。从表 2 和图 3 可以看出,模型模拟结果较好,R²均大于 0.78,NSE 均大于 0.74,达到模型精度要求。

表 2 典型水文站点率定期和验证期拟合结果的精度评价

站点	率定期		验证期	
	R ²	NSE	R ²	NSE
润城站	0.89	0.78	0.78	0.74
五龙口站	0.89	0.87	0.82	0.79

3.2 人类活动影响下的水收支平衡分析

沁河流域水资源开发利用历史悠久,随着经济社会的加速发展,流域及邻近地区的用水需求也不断增长。目前,沁河流域已建成大量水资源配置工程,引沁入汾及引沁入丹工程是其中的重要代表,跨

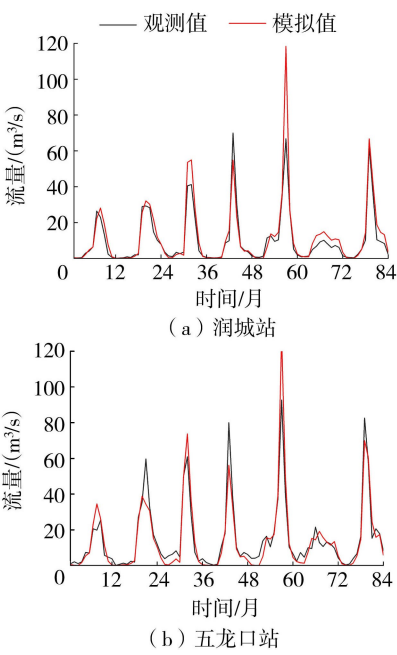


图 3 典型水文站点率定期和验证期流量对比

流域调水工程的建设可以提高沁河水资源调节水平,有效缓解沁河流域及邻近地区缺水形势。这些水利设施在沁河的治理与开发中发挥了重要作用,也影响着沁河流域的水收支平衡状态。利用所建立的 SWAT 模型,根据张峰水库及马连圪塔水库相关运行数据及以其为枢纽的两大调水工程的年际引调水数据,对人类活动影响下的沁河流域水收支平衡状况进行综合计算分析,结果见表 3。

表 3 沁河流域水收支平衡分析结果 单位:亿 m³

年份	降水量	实际蒸发量	外调水量	出口径流量	蓄水变量
2010	64.41	62.79	2.64	5.59	-6.61
2011	76.73	61.03	2.71	8.37	4.62
2012	66.04	69.72	2.73	8.57	-14.98
2013	58.05	60.08	2.75	5.81	-10.59
2014	91.75	69.78	2.87	12.22	6.88
2015	60.76	69.83	2.81	4.99	-16.87
2016	84.98	70.50	2.78	10.52	1.18
平均	71.82	66.25	2.76	8.01	-5.19

从水收支平衡分析结果来看,2010—2016 年沁河流域平均蓄水变量为负值,即蓄水总量呈下降趋势。对降水量、实际蒸发量、外调水量、出口径流量等各分量与流域蓄水变量作皮尔逊相关分析可得:降水量及出口径流量与蓄水变量的相关系数相对较大,分别为 0.87、0.74,且在 0.05 水平上显著相关。降水量及出口径流量与蓄水变量有较强相关性,对沁河流域水收支平衡状态的影响程度也相对较大,在研究水收支平衡时需重点考虑并加以调控。另外,蒸发量是沁河流域的主要耗水项,因此要实现流域的水收支平衡,必须降低实际蒸发量,提高水分利用效率,以缓解近年来流域蓄水总量的下降趋势。

具体措施包括推行新型农业节水模式和以减少蒸发量为目的优化灌溉方式并调整农业结构,减少无效蒸发。同时,需要加快现有水源工程的改造与配套工作,严格控制外调水量上限,以缓解流域缺水形势和水资源供需矛盾,提升水资源可持续利用水平,实现健康平衡状态。

3.3 未来气候变化情景下的水收支平衡分析

3.3.1 多气候情景下的水收支平衡演变

对多气候情景下的沁河流域 2024—2064 年水收支平衡状况进行分析,由式(2)计算得出各情景下历年的流域蓄水变量变化情况,如图 4 所示。总体而言,各情景蓄水总量呈上升趋势。SSP5-8.5 情景的平均蓄水变量最大,达到 5.03 亿 m³,平均蓄水变量最小的 SSP2-4.5 情景,也达到了 3.76 亿 m³。对降水量、实际蒸发量、出口径流量等各分量与流域蓄水变量作皮尔逊相关分析可得:SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP3-7.0、SSP5-8.5 情景的降水量与蓄水变量的相关系数分别为 0.79、0.75、0.77 和 0.66,表现出较强的相关性,出口径流量与蓄水变量的相关系数分别为 0.49、0.41、0.51 和 0.38,表现出中等程度相关性,实际蒸发量等与蓄水变量相关性较弱,同时降水量及出口径流量与蓄水变量在 0.01 水平上显著相关。因此,在多气候情景下,降水量及出口径流量对沁河流域水收支平衡状态的影响程度相对较大,该结果与人类活动影响下的水收支平衡分析结果一致。

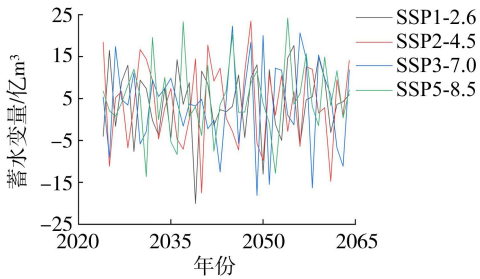


图 4 多气候情景下蓄水变量变化情况

对多气候情景下的关键影响要素降水量与出口径流量的变化情况进行分析,结果如图 5 所示。SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP3-7.0、SSP5-8.5 情景的多年平均降水量分别为 801.39、772.48、791.05、869.63 mm,多年平均出口径流量分别为 64.64、57.87、68.99、85.67 m³/s。从长期序列来看,不同的气候模式对降水量及出口径流量的影响效果类似,即除 SSP1-2.6 情景外,降水量及出口径流量总体均随着辐射强迫水平的提升而不断增加,降水量增长率分别为 2.4% 和 9.9%,出口径流量增长率分别为 19.2% 和 24.2%,可以看出同等条件下多年平均出口径流量增长的幅度更大。对于降水量及出口

径流量而言,多年变化幅度最大的分别是 SSP3-7.0 和 SSP5-8.5 情景,其变化量分别达到了 789.59 mm 和 213.77 m³/s。

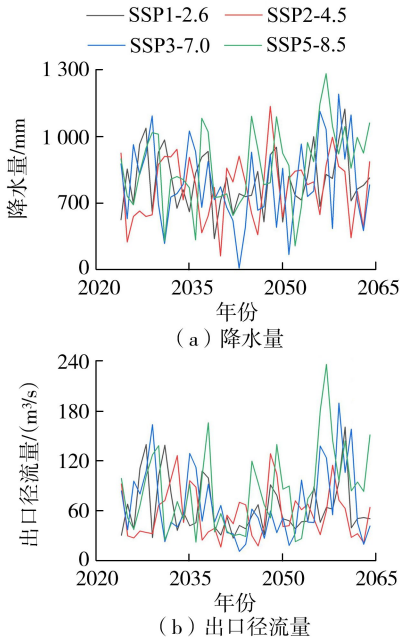


图 5 多气候情景下降水量及出口径流量变化情况

将研究期划分为 3 个时段:近期(2024—2038 年)、中期(2039—2053 年)和远期(2054—2064 年),并计算在不同气候情景下不同时段降水量与出口径流量的变化率结果(表 4)。在近期预测阶段,降水量除 SSP3-7.0 情景外均呈增长趋势,但增长率均小于 4 mm/a,中期预测阶段降水量增长率大幅提升,其中 SSP2-4.5、SSP3-7.0 情景均超过了 8 mm/a,到远期预测阶段,降水量均呈下降趋势,除 SSP5-8.5 情景外,下降幅度随辐射强迫水平的提升而不断增加。出口径流量的变化率浮动趋势与降水量类似,在中期预测阶段的 SSP2-4.5 情景下达到最大的增长率 2.32 m³/(s·a),在远期预测阶段的 SSP3-7.0 情景下达到最大的下降率 2.59 m³/(s·a)。就总体变化率趋势而言,降水量

表 4 多气候情景下降水量及出口径流量变化率计算结果

时段	情景	降水量变化率/(mm/a)	出口径流量变化率/(m ³ /(s·a))
近期	SSP1-2.6	3.77	0.84
	SSP2-4.5	2.88	1.32
	SSP3-7.0	-0.22	-0.11
	SSP5-8.5	3.14	1.54
中期	SSP1-2.6	7.69	1.26
	SSP2-4.5	9.62	2.32
	SSP3-7.0	8.49	0.94
	SSP5-8.5	3.94	1.98
远期	SSP1-2.6	-5.46	-0.65
	SSP2-4.5	-7.28	-2.26
	SSP3-7.0	-11.03	-2.59
	SSP5-8.5	-6.48	-1.72

与出口径流量均在 SSP5-8.5 情景下达到最大增长率,其值分别为 5.19 mm/a 和 $1.35\text{ m}^3/(\text{s}\cdot\text{a})$,两者的总体增长率与辐射强迫水平呈现出较强的相关性。

3.3.2 典型气候情景下的水收支平衡要素突变

在处理后的 CMIP6 系列多模式集合数据中, SSP2-4.5 情景是一个结合了中间社会脆弱性和中间强迫水平的情景,较为符合现实状况^[19],可作为典型气候情景对沁河流域水收支平衡状况进行分析。根据 3.3.1 节中的相关分析结果,降水量及出口径流量对沁河流域水收支平衡状态的影响程度相对较大,而极端的降水量与出口径流量不仅会影响水收支平衡水平,还会给流域尤其是其下游造成严重的洪涝威胁。因此,分析流域降水量及出口径流量等重要水收支平衡要素序列,并进行突变点诊断识别,对明确沁河流域水收支平衡要素的一致性变化情况及其周期变化规律具有重要意义,有助于提升流域水收支平衡水平及水生态健康状况^[20-21]。

本文采用 Mann-Kendall 突变检验方法^[22-24]对 SSP2-4.5 情景下的沁河流域 2024—2064 年的降水量及出口径流量进行分析(图 6),并分别生成 UF 和 UB 两个统计序列。由图 6(a)可知,沁河流域降水量 UF 和 UB 统计曲线在置信区间内存在明显交叉的年份主要为 2037 年、2041 年、2061 年和 2063 年,这也是沁河流域降水量可能发生突变的年份,且除 2041 年外,其余突变年份降水量均呈上升趋势。由图 6(b)可知,沁河流域出口径流量的 UF 和 UB 统计曲线在置信区间内存在明显交叉的主要

有 4 个年份,有检验统计意义,2039 年、2041 年、2062 年是沁河流域出口径流量可能发生突变的年份。从突变年份上看,降水量与出口径流量的未来变化趋势具有一定的一致性,在 2037—2041 年、2061—2063 年均可能存在突变。因此,在调控沁河水收支平衡状态及防御潜在的突发洪涝灾害事件时,这些年份应重点关注。

4 结 论

a. 基于 SWAT 模型可以实现区域水平衡理论框架下的水收支平衡演变分析。所构建的分布式水收支平衡模型中选用的 HWSO 世界土壤数据库及 CMADS 气象数据集具有较强的适用性,模拟结果良好,其中五龙口站的率定结果较好,率定期和验证期的 R^2 和 NSE 值均满足模拟要求。

b. 在考虑以跨流域调水工程为主的人类活动影响下,2010—2016 年沁河流域平均蓄水变量为负值。降水量及出口径流量对沁河流域水收支平衡状态的影响程度相对较大,在研究水收支平衡时需重点考虑并加以调控。

c. 在未来多气候情景下,蓄水总量呈上升趋势,且降水量及出口径流量对沁河流域水收支平衡状态的影响程度相对较大。除了 SSP1-2.6 情景外,流域多年平均降水量及出口径流量均随着辐射强迫水平的提升而增加。在近期预测阶段,降水量与出口径流量除 SSP3-7.0 情景外均呈增长趋势,中期预测阶段增长率大幅提升,而在远期预测阶段,均呈下降趋势。在典型气候模式 SSP2-4.5 情景下,沁河流域降水量在 2037 年、2041 年、2061 年和 2063 年可能发生突变,而 2039 年、2041 年、2062 年是出口径流量容易发生突变的年份,降水量与出口径流量在突变周期上体现了一定的相似性。

参考文献:

[1] 2020 十大前沿科学问题[J]. 中国科技奖励,2020(9): 68-71. (Top 10 frontier science questions for 2020[J]. China Awards for Science and Technology, 2020(9): 68-71. (in Chinese))

[2] 左其亭,吴青松,金君良,等. 区域水平衡基本原理及理论体系[J]. 水科学进展,2022,33(2): 165-173. (ZUO Qiting, WU Qingsong, JIN Junliang, et al. The basic principle and theoretical system of regional water balance [J]. Advances in Water Science, 2022, 33(2): 165-173. (in Chinese))

[3] FREDERIKSEN R R, MOLINA-NAVARRO E. The importance of subsurface drainage on model performance and water balance in an agricultural catchment using

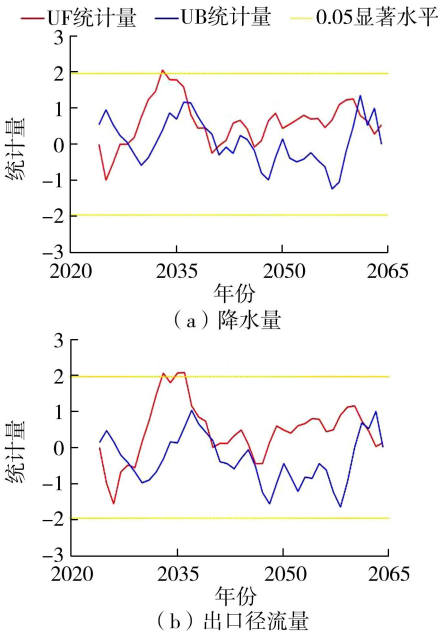


图 6 典型气候情景下降水量及出口径流量 Mann-Kendall 突变检验

- SWAT and SWAT-MODFLOW [J]. Agricultural Water Management, 2021, 255: 107058.
- [4] AYIVI F, JHA M K. Estimation of water balance and water yield in the Reedy Fork-Buffalo Creek Watershed in North Carolina using SWAT [J]. International Soil and Water Conservation Research, 2018, 6(3): 203-213.
- [5] 骆月珍, 顾婷婷, 潘娅英, 等. 基于 CMADS 驱动 SWAT 模型的富春江水库控制流域水量平衡模拟[J]. 气象与环境学报, 2019, 35(4): 106-112. (LUO Yuezheng, GU Tingting, PAN Yaying, et al. Simulation of basin water balance controlled by Fuchunjiang Reservoir watershed based on SWAT model driven by CMADS [J]. Journal of Meteorology and Environment, 2019, 35(4): 106-112. (in Chinese))
- [6] 代俊峰, 崔远来. 基于 SWAT 的灌区分布式水文模型: I. 模型构建的原理与方法[J]. 水利学报, 2009, 40(2): 145-152. (DAI Junfeng, CUI Yuanlai. Distributed hydrological model for irrigation area based on SWAT: I. principle and method [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(2): 145-152. (in Chinese))
- [7] 代俊峰, 崔远来. 基于 SWAT 的灌区分布式水文模型: II. 模型应用[J]. 水利学报, 2009, 40(3): 311-318. (DAI Junfeng, CUI Yuanlai. Distributed hydrological model for irrigation area based on SWAT: II. model application [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(3): 311-318. (in Chinese))
- [8] 纪义虎, 左其亭, 马军霞. 基于 Tapio 和 LMDI 模型的沁河流域碳排放与水资源利用脱钩关系分析[J]. 水资源保护, 2023, 39(4): 94-101. (JI Yihu, ZUO Qiting, MA Junxia. Analysis of decoupling relationship between carbon emissions and water resources utilization in the Qinhe River Basin based on Tapio and LMDI models [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(4): 94-101. (in Chinese))
- [9] 李英明, 潘军峰. 山西河流 [M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [10] 姜彤, 吕嫣冉, 黄金龙, 等. CMIP6 模式新情景 (SSP-RCP) 概述及其在淮河流域的应用[J]. 气象科技进展, 2020, 10(5): 102-109. (JIANG Tong, LYU Yanran, HUANG Jinlong, et al. New scenarios of CMIP6 model (SSP-RCP) and its application in the Huaihe River Basin [J]. Advances in Meteorological Science and Technology, 2020, 10(5): 102-109. (in Chinese))
- [11] 王予, 李惠心, 王会军, 等. CMIP6 全球气候模式对中国极端降水模拟能力的评估及其与 CMIP5 的比较[J]. 气象学报, 2021, 79(3): 369-386. (WANG Yu, LI Huixin, WANG Huijun, et al. Evaluation of CMIP6 model simulations of extreme precipitation in China and comparison with CMIP5 [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2021, 79(3): 369-386. (in Chinese))
- [12] 向峻文, 张利平, 邓瑶, 等. 基于 CMIP6 的中国主要地区极端气温/降水模拟能力评估及未来情景预估[J]. 武汉大学学报(工学版), 2021, 54(1): 46-57. (XIANG Junwen, ZHANG Liping, DENG Yao, et al. Projection and evaluation of extreme temperature and precipitation in major regions of China by CMIP6 models [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2021, 54(1): 46-57. (in Chinese))
- [13] LI Haibin, SHEFFIELD J, WOOD E F. Bias correction of monthly precipitation and temperature fields from Intergovernmental Panel on Climate Change AR4 models using equidistant quantile matching [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2010, 115(D10): D10101.
- [14] 杨肖丽, 郑巍巍, 林长清, 等. 基于统计降尺度法和 SPI 的黄河流域干旱预测[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2017, 45(5): 377-383. (YANG Xiaoli, ZHENG Weifei, LIN Changqing, et al. Prediction of drought in the Yellow River based on statistical downscale study and SPI [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2017, 45(5): 377-383. (in Chinese))
- [15] 左其亭, 李佳伟, 马军霞, 等. 新疆水资源时空变化特征及适应性利用战略研究[J]. 水资源保护, 2021, 37(2): 21-27. (ZUO Qiting, LI Jiawei, MA Junxia, et al. Study on spatio-temporal variation characteristics and adaptive utilization strategy of water resources in Xinjiang [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(2): 21-27. (in Chinese))
- [16] 刘家威, 蔡宏, 郑婷婷, 等. 基于 SWAT 模型的赤水河流域径流年内分配特征及其对降水的响应研究[J]. 水土保持通报, 2022, 42(3): 180-187. (LIU Jiawei, CAI Hong, ZHENG Tingting, et al. Annual distribution characteristics of Chishui River Watershed runoff and its response to precipitation based on SWAT model [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(3): 180-187. (in Chinese))
- [17] 陈沛源, 李金文, 俞巧, 等. 基于 SWAT 模型的泾河流域地下水分布特征与水资源评价[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(12): 102-109. (CHEN Peiyuan, LI Jinwen, YU Qiao, et al. Evaluating groundwater resource and its distribution in Jinghe Basin using the SWAT model [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(12): 102-109. (in Chinese))
- [18] 左其亭, 吴青松, 马军霞, 等. “双碳”目标下水资源行为调控研究框架及展望[J]. 水资源保护, 2023, 39(1): 8-14, 56. (ZUO Qiting, WU Qingsong, MA Junxia, et al. Research framework and prospect of water resource behavior regulation under carbon peak and carbon neutrality goals [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(1): 8-14, 56. (in Chinese))

(下转第 22 页)

Sinica,1987,19(Sup1):30-37. (in Chinese))

[12] CHEN Bo, LUO Lin, LI Jia, et al. Salt-fingering of pollutant vertical mixing in static thermal-stratified water [J]. Journal of Hydrodynamics,2010,22(3):430-437.

[13] 陈铂,彭梦辉,王华. 静态温度分层水体中点源羽流云团垂向运动规律[J]. 水利水电科技进展,2020,40(1):37-41. (CHEN Bo, PENG Menghui, WANG Hua. Vertical motion characteristics of thermal in static thermal-stratified water[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2020,40(1):37-41. (in Chinese))

[14] TURNER J S. Salt fingers across a density interface[J]. Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts,1967,14(5):599-611.

[15] TURNER J S. The coupled turbulent transports of salt and and heat across a sharp density interface[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer,1965,8(5):759-767.

[16] TURNER J S. Buoyancy effects in fluids[M]. Cambridge: Cambridge University Press,1979.

[17] 张曦,郑凯. 糖盐双扩散对流系统的研究[J]. 物理与工程,2016,26(3):73-77. (ZHANG Xi, ZHENG Kai. Research of sugar and salt double diffusion convection system[J]. Physics and Engineering,2016,26(3):73-77. (in Chinese))

[18] GRIFFITHS R W, RUDDICK B R. Accurate fluxes across a salt-sugar finger interface deduced from direct density measurements[J]. Journal of Fluid Mechanics,1980,99(1):85-95.

[19] STERN M. Maximum buoyancy flux across a salt finger interface[J]. Journal of Marine Research,1976,34(1):95-110.

[20] HOWARD L N, VERONIS G. The salt-finger zone [J]. Journal of Fluid Mechanics,1987,183:1-23.

[21] SCHMITT R W. Flux measurements on salt fingers at an interface[J]. Journal of Marine Research,1979,37(3):419-436.

[22] TAYLOR J, BUCENS P. Laboratory experiments on the structure of salt fingers[J]. Deep Sea Research Part A: Oceanographic Research Papers,1989,36(11):1675-1704.

[23] LINDEN P F. On the structure of salt fingers[J]. Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts,1973,20(4):325-340.

[24] LAMBERT R B, DEMENKOW J W. On the vertical transport due to fingers in double diffusive convection[J]. Journal of Fluid Mechanics,1972,54(4):627-640.

[25] POLYAKOV I V, PNYUSHKOV A V, REMBER R, et al. Mooring-based observations of double-diffusive staircases over the Laptev Sea slope [J]. Journal of Physical Oceanography,2012,42(1):95-109.

[26] SIREVAAG A, FER I. Vertical heat transfer in the Arctic Ocean: the role of double-diffusive mixing[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans,2012,117(C7):C07010.

[27] MCDOUGALL T J, TAYLOR J R. Flux measurements across a finger interface at low values of the stability ratio [J]. Journal of Marine Research,1984,42(1):1-14.

[28] 周从直,杨琴,龙向宇. 环境流体力学[M]. 重庆:重庆大学出版社,2010.

[29] RADKO T. Double-diffusive convection[M]. Cambridge: Cambridge University Press,2013.

(收稿日期:2023-01-26 编辑:俞云利)

(上接第15页)

[19] O'NEILL B C, TEBALDI C, VAN VUUREN D P, et al. The scenario model intercomparison project (ScenarioMIP) for CMIP6 [J]. Geoscientific Model Development,2016,9(9):3461-3482.

[20] 张献志,汪向兰,王春青,等. 黄河源区气象水文序列突变点诊断[J]. 人民黄河,2020,42(11):22-26. (ZHANG Xianzhi, WANG Xianglan, WANG Chunqing, et al. Diagnosis of abrupt change point of the meteorological and hydrological series in the source area of the Yellow River [J]. Yellow River,2020,42(11):22-26. (in Chinese))

[21] 左其亭. 国家多层次生态健康保障体系构建[J]. 水利学报,2021,52(11):1347-1354. (ZUO Qiting. National multi-level guarantee system for the water ecological health [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2021,52(11):1347-1354. (in Chinese))

[22] 张京,金晓媚,张绪财,等. 格尔木河流域土壤湿度时空变化及其影响因素研究[J]. 水文地质工程地质,2019,46(2):66-73. (ZHANG Jing, JIN Xiaomei, ZHANG Xucai, et al. Spatial and temporal variations of soil moisture and its impact factors in the Golmud River Basin [J]. Hydrogeology & Engineering Geology,2019,46(2):66-73. (in Chinese))

[23] 杨素英,孙凤华,马建中. 增暖背景下中国东北地区极端降水事件的演变特征[J]. 地理科学,2008,28(2):224-228. (YANG Suying, SUN Fenghua, MA Jianzhong. Evolvment of precipitation extremes in northeast China on the background of climate warming [J]. Scientia Geographica Sinica,2008,28(2):224-228. (in Chinese))

[24] 胡光伟,毛德华,李正最,等. 60年来洞庭湖区进出湖径流特征分析[J]. 地理科学,2014,34(1):89-96. (HU Guangwei, MAO Dehua, LI Zhengzui, et al. Analysis on the runoff characteristics in and out Dongting Lake in recent 60 years [J]. Scientia Geographica Sinica,2014,34(1):89-96. (in Chinese))

(收稿日期:2023-01-15 编辑:俞云利)