

虞畅, 金君良, 王国庆, 等. 黄河源区典型流域水文要素演变及其对气候变化的响应[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2024, 22(5): 845-855. YU C, JIN J L, WANG G Q, et al. Evolution of hydrological elements in typical watersheds of the Yellow River source area and their response to climate change[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2024, 22(5): 845-855. (in Chinese)

# 黄河源区典型流域水文要素演变及其对气候变化的响应

虞畅<sup>1,2,3,4</sup>, 金君良<sup>2,3,4,5</sup>, 王国庆<sup>2,3,4,5</sup>, 李杨<sup>6</sup>

(1. 河海大学水文水资源学院, 南京 210098; 2. 长江保护与绿色发展研究院, 南京 210098; 3. 水利部应对气候变化研究中心, 南京 210029; 4. 河海大学水安全与水科学协同创新中心, 南京 210098; 5. 南京水利科学研究院水灾害防御全国重点实验室, 南京 210029; 6. 内蒙古自治区水利事业发展中心, 呼和浩特 010020)

**摘要:**以黄河源区白河流域为研究对象, 采用 Mann-Kendall 方法分析水文要素的演变特征, 利用 RCCC-WBM 水量平衡模型(monthly water balance model developed by research center for climate change)模拟探究流域生态水文要素对气候变化的敏感性。结果表明: 1981—2020 年白河流域气温增加趋势显著, 气温递升率为 0.45 °C/(10 a), 潜在蒸散发年际变化不明显, 而降水和径流呈现先减少后增加的阶段性变化特征; RCCC-WBM 水量平衡模型对白河流域具有较好的月尺度径流模拟效果, 率定期和验证期的纳什效率系数(Nash-Sutcliffe efficiency coefficient,  $E_{NS}$ )分别为 0.69 和 0.62; 在假定的气候变化情景下, 降水量增加 40% 且气温变化-4 ~ 4 °C 时对应的径流量变化范围为 20.2% ~ 84.4%, 实际蒸散发量为 1.4% ~ 51.0%, 即随着降水量的增多, 流域气温和蒸散发变化对径流的影响越来越显著。研究结果可为黄河源区的水循环演变规律的揭示提供参考。

**关键词:**黄河源区; 气候变化; 水文要素; RCCC-WBM 模型; 敏感性

**中图分类号:** TV212.4; P467 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbqk.2024.0084

气候变化被定义为主要由温室气体排放引起的气候模式的转变, 是 21 世纪重要的生态和社会挑战之一, 了解气候变化对人类和自然系统的严重影响以及风险和脆弱性是理解当前气候紧急状态的重要起点<sup>[1]</sup>。随着地球演化进入以人类为主的“人类世”, 全球气候变化背景下水循环系统正在发生快速变化, 极端事件灾害日益频繁, 冰冻圈萎缩、地下水水位下降、水环境恶化和水资源短缺等问题日益突出, 水文循环是这些问题的核心<sup>[2]</sup>。

长期历史数据分析是了解气候变化对水文循环影响的基础, 而遥感可以提供长期的大规模水文要素数据<sup>[3]</sup>; 计算机技术的进步提高了水文模型开发的能力, 且大数据分析、人工智能和机器学习等技术在循环过程分析中的应用正在不断增长<sup>[4-5]</sup>。黄河源区是“中华水塔”的重要组成, 具有水源涵养

和补给、调节当地区域气候等功能, 其水循环过程对区域乃至全球气候变化具有高度敏感性。许多学者对黄河源区部分水文要素变化趋势及影响因素进行了研究, 揭示气候变化对水资源的直接影响, 进而为评估全球气候变化趋势提供重要依据。Jiang 等<sup>[6]</sup>探讨了黄河源区不同地点从短期到长期的多尺度极端降水变率, 包括季节、年度和年际变化, 结果表明: 极端降水的季节模式并不总是与总降水的季节模式一致, 极端强降水在高海拔地区呈上升趋势, 在低海拔地区呈下降趋势。Zhang 等<sup>[7]</sup>基于 SPHY 模型和多年径流观测数据对径流成分变化进行研究, 结果表明: 降雨径流占黄河源区径流系统的主导地位(48%~56%); 随着气温和降水量的增加, 源区温暖湿润的下游径流增幅小于寒冷干燥的上游径流; 而随着大气变暖和冻土融化, 基流在

收稿日期: 2024-06-18 修回日期: 2024-09-20 网络出版时间: 2024-09-25

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/13.1430.TV.20240925.0917.002>

基金项目: “十四五”国家重点研发计划项目(2021YFC3201100); 国家自然科学基金项目(U2243228; 52121006); 中央院所基金(Y524007)

作者简介: 虞畅(2001—), 女, 天津人, 主要从事水文水资源方面的研究。E-mail: [yc20010429@163.com](mailto:yc20010429@163.com)

通信作者: 王国庆(1971—), 男, 山东成武人, 正高级工程师, 主要从事气候变化及水文水资源方面的研究。E-mail: [gqwang@nhri.cn](mailto:gqwang@nhri.cn)

以冻土为主的上游发挥越来越重要的作用。

目前关于黄河源区对气候变化的响应研究大多以大范围流域和单一气象水文要素为对象,对黄河源区典型流域的水文要素间的机理研究相对有限,而子流域尺度下水文过程的变化对于未来水资源的规划和管理至关重要<sup>[8]</sup>。本文依据收集整理的黄河源区白河流域气象水文资料,采用水文序列分析方法分析水循环要素的年际变化过程,利用 RCCC-WBM 水量平衡模型(monthly water balance model developed by research center for climate change)模拟白河流域的水循环过程,并分析水循环要素对白河流域气候变化的敏感性,以期为更大尺度流域范围的水循环过程研究提供更精细的视角,为整个黄河源区甚至整个黄河流域的生态保护和水资源管理提供具体参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究流域

白河发源于红原县壤口乡与刷经寺镇之间,位于四川北部阿坝藏族羌族自治州内,北流入若尔盖县,在距唐克镇北 7 km 左右处入黄河;干流全长为 270 km,流域面积为 5 398 km<sup>2</sup>,位于 32°20'N ~ 33°30'N, 102°11'E ~ 103°20'E 范围内,为黄河源区的一级支流。白河流域地处平均海拔 3 400 m 以上的高寒地带,年平均气温 0.7 ~ 1.1 °C,气候特征鲜明,冰雪融水和大气降水是该地区地表径流的主要补

给来源。区域年降水深约为 600 ~ 750 mm,流域内地势相对低洼且植被良好,沼泽密布,水土流失较弱,是黄河源区地表径流最为丰富的地方,年径流量为  $1.84 \times 10^9 \text{ m}^3$ 。

白河流域的独特优势在于丰沛的降水量,使之成为黄河源区典型湿润区域之一。这一现象主要归因于孟加拉湾暖湿气流沿青藏高原东侧横断山脉河谷北上,与青藏高原冷锋相遇,产生切变和低涡形成降雨,进而促进了区域性的强降水事件。在黄河流域的众多一级支流中,白河流域的径流量位列第 10,其年径流量甚至超越了中游的汾河、沁河及无定河等河流。流域内地貌特征独特,属于高原湖沼地貌,其下垫面的特殊性显著影响了洪水过程,与典型河流的陡涨缓落模式不同,白河流域主要表现为缓涨缓落。流域地下水资源尤为丰富,其主要补给机制以降水为主,形成了复杂的地表水-地下水相互作用体系,河道本身成为地下水排泄的重要途径。白河流域地形平缓、落差有限,这在一定程度上限制了大型水利工程的开发潜力,促进了小型水电站的建设与发展,有效服务于当地乡镇的生产生活需求<sup>[9]</sup>。因此,对白河流域的深入研究,不仅有助于深化对黄河源区复杂水循环规律的认知,还对区域水资源管理与可持续利用策略的制定具有重要的学术与实践价值。黄河源区白河流域图及所需资料站点分布情况见图 1。

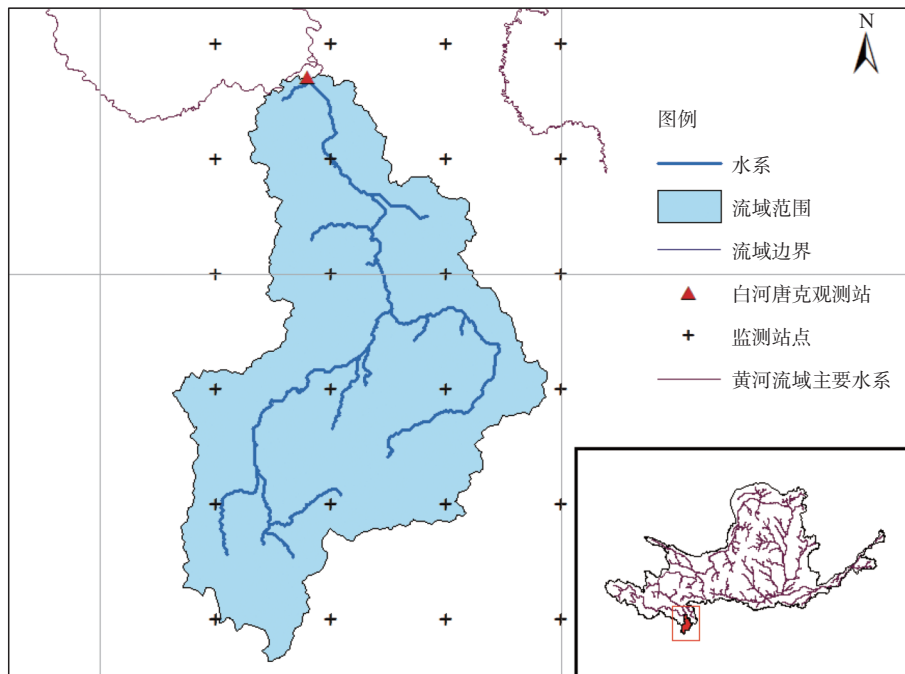


图 1 黄河源区白河流域水系监测站点分布

Fig. 1 River system and location of the meteorological grid points and hydrometric monitoring station in the Bai River basin

采用的径流数据取自黄河流域水文年鉴,数据时间序列为 1981—2020 年的逐日径流资料;气温和降水资料采用国家气候中心(<http://www.ncc-cma.net/>)发布的 CN05.1 数据集, CN05.1 气象数据由全国 2 400 多个气象站的资料插值生成,空间分辨率为 0.25°,时间序列为 1981—2020 年,时间分辨率为月;潜在蒸散发资料采用国家青藏高原科学数据中心(<https://data.tpdc.ac.cn/>)发布的中国 1 km 逐月潜在蒸散发数据集,时间序列为 1981—2020 年,空间分辨率统一为 0.25°。

## 1.2 研究方法

### 1.2.1 水文要素演变特征分析方法

Mann-Kendall 趋势检验法是一种用于分析时间序列数据趋势的非参数统计方法,用于检测数据中的单调趋势,而不依赖于数据的具体分布形式,通过计算数据点对之间的符号差异来判断趋势的存在及其显著性。主要步骤包括:首先计算每对数据点的差值,如果前一个数据点的值大于后一个,则记为正差,反之则记为负差;之后统计所有正负差的数量,计算统计量  $S$ ,并通过标准化得到  $Z$  值,以评估趋势的显著性,若  $Z$  值绝对值较大,则表明趋势显著。Mann-Kendall 秩次相关检验法广泛应用于气候变化和水文等领域,用于探讨数据随时间的变化趋势,具有方法简单、适用范围广等优点<sup>[10]</sup>。

Mann-Kendall 突变检验法用于识别时间序列数据中突变点,基于 Mann-Kendall 趋势检验,该方法扩展了对时间序列数据趋势分析的能力,特别是在检测数据中存在的突变或结构性变化方面。该方法的基本思想是通过分析数据点对之间的符号差异和序列的累积和,检测趋势的变化,并确定突变点的显著性。主要步骤包括:计算数据中所有点对的差值,并检验这些差值是否随着时间的推移发生系统性变化。通过计算检验统计量,并结合其分布特征,可以识别出时间序列中的潜在突变点。该方法对数据的分布要求较低,适用于气候研究和水资源管理等领域中对突变点进行分析<sup>[11]</sup>。

### 1.2.2 RCCC-WBM 模型

RCCC-WBM 模型是一个大尺度水文模型,具有较强的物理解释产流机制<sup>[12-13]</sup>。降水  $P_i$  根据该月的月平均气温值分为降雨  $P_{ri}$  和降雪  $P_{sni}$  两部分;地表径流量  $Q_{si}$  是与土壤含水量  $S_i$  和降水  $P_i$  成正比的,地下径流  $Q_{gi}$  的计算基于线性水库理论;融雪径流

$Q_{sni}$  与积雪量  $S_{Ni}$  成正比;一层蒸散发模型即可满足实际蒸散发  $E_i$  的模拟精度:

$$P_{sni} = \frac{T_H - T_i}{T_H - T_L} P_i \quad (T_H = 4^\circ\text{C}, T_L = -4^\circ\text{C}) \quad (1)$$

$$P_{ri} = P_i - P_{sni} \quad (2)$$

$$Q_{si} = k_s \frac{S_{i-1}}{S_{\max}} P_{ri} \quad (3)$$

$$Q_{gi} = k_g S_{i-1} \quad (4)$$

$$Q_{sni} = \begin{cases} 0 & T_i \leq T_L \\ k_{sn} \cdot e^{\frac{T_i - T_L}{T_H - T_L}} \cdot S_{Ni} & T_L < T_i < T_H \\ S_{Ni} & T_i \geq T_H \end{cases} \quad (5)$$

$$S_{Ni} = S_{Ni-1} + P_{sni} \quad (6)$$

$$E_i = K_c \frac{S_{i-1}}{S_{\max}} E_{601i} \quad (7)$$

$$Q_i = Q_{si} + Q_{gi} + Q_{sni} \quad (8)$$

$$S_i = S_{i-1} + P_i - Q_i - E_i \quad (9)$$

式(1)~(9)中:  $S_{\max}$  为流域土壤含水量,是  $S_{i-1}$  的上限值, mm;  $k_s$ 、 $k_g$ 、 $k_{sn}$  分别表示地表径流、地下径流、融雪径流的汇流系数;  $K_c$  为蒸散发折算系数;  $E_{601i}$  为第  $i$  个月的 E601 蒸发皿观测蒸发量, mm;  $P_i$ 、 $E_i$ 、 $Q_i$ 、 $S_i$  为第  $i$  个月的降水量、蒸散发量、径流量和土壤含水量, mm<sup>[14-16]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 白河流域水文要素演变规律

利用线性回归法和滑动平均法<sup>[17]</sup> 分析白河流域长期以来水循环要素的年际变化及趋势,图 2 绘出了白河流域年平均气温、年降水量、年潜在蒸发量和年径流深的变化和 5 a 滑动平均过程。

由图 2 可以看出:白河流域多年平均气温为 1.19 °C,其中:1981—1997 年气温相对较低,多年均值在 0.7 °C 左右;进入 21 世纪后,年均气温基本都超过了 1 °C,稳定在 1~2 °C。1981—2020 年流域平均气温的线性倾向率为 0.04 °C/a,总体呈上升趋势,这与全球变暖的背景相吻合。流域年降水量变化趋势大致呈递升趋势,线性倾向率为 3.60 mm/a,年降水量的多年均值为 665.1 mm;从 5 a 滑动平均过程来看,1997—2010 年降水量相对较少,特别是 2002 年,降水量为 487.5 mm,仅为多年平均的 73.3%;2010 年以来,年降水量开始增加,其中 2012—2015 年增幅明显,2020 年降水量最大,为 1 012.7 mm,约为多年均值的 1.52 倍。1981—

2020 年流域潜在蒸散发量过程总体呈小幅上升趋势, 线性倾向率为  $0.83 \text{ mm/a}$ , 多年平均潜在蒸散发量为  $765.2 \text{ mm}$ 。从 5 a 滑动平均过程来看, 在 2001 年之前, 年潜在蒸散发量值偏低, 其中: 1989 年潜在蒸散发量最低, 为  $727.5 \text{ mm}$ , 为多年平均的 95%; 2001 年之后年际间波动较大, 但潜在蒸散发量相对偏高, 其中 2002 年、2006 年和 2016 年的量值均在  $810 \text{ mm}$  附近, 约为多年平均值的 1.06 倍。1981—

2020 年白河流域年径流深变化呈下降趋势, 线性倾向率为  $-0.94 \text{ mm/a}$ , 多年均值为  $369 \text{ mm}$ ; 从 5 a 滑动平均过程来看, 除了 1988—1993 年出现径流的小幅增加, 1981—2010 年总体的径流深下降幅度较大, 年最大值在 1983 年, 为  $672 \text{ mm}$ ; 年最小值在 2002 年, 为  $141 \text{ mm}$ ; 2001—2008 年存在一定程度上的枯水期; 2010 年之后径流量出现回升, 其多年均值维持在  $370 \text{ mm}$  左右。

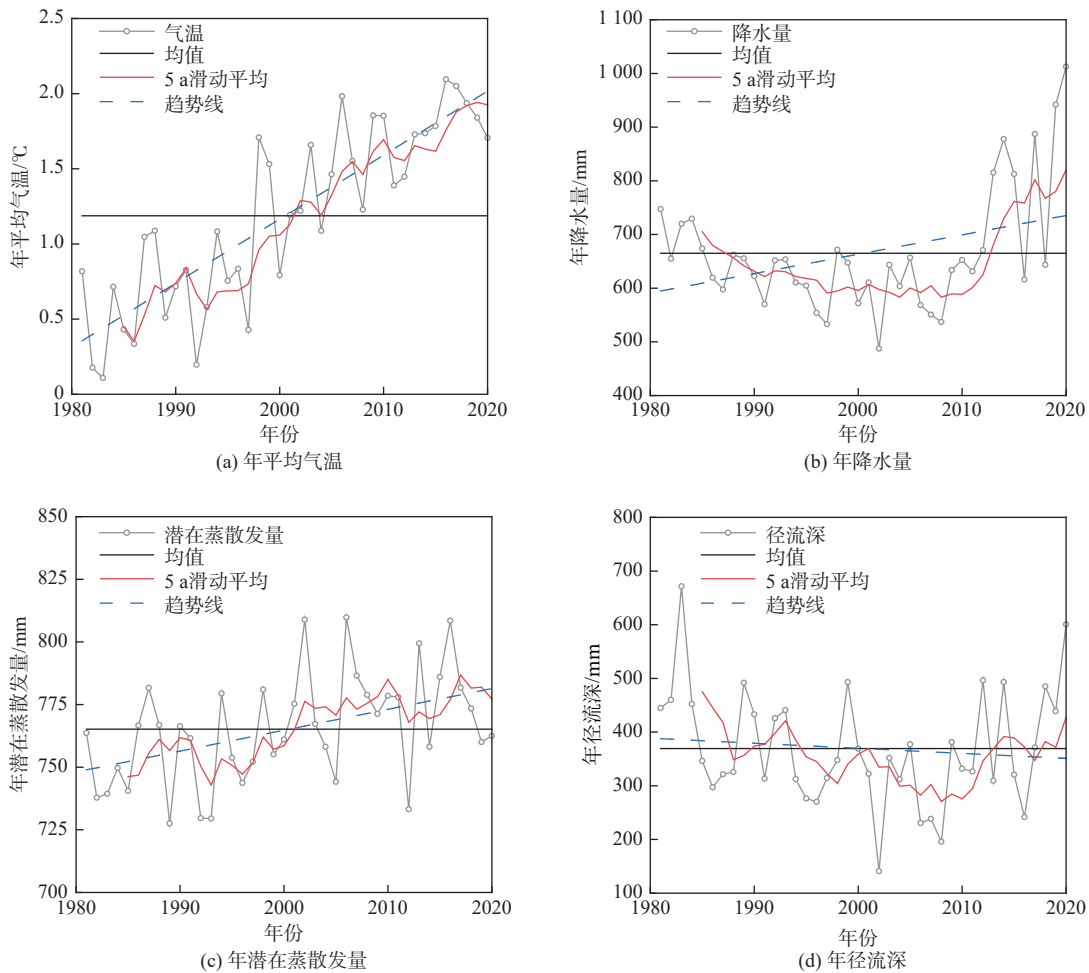


图 2 白河流域各水文要素变化及其 5 a 滑动平均过程

Fig. 2 Changes in the elements of the water cycle in the Bai River basin and its 5-year sliding average process

利用 Mann-Kendall 趋势检验法对流域水文要素进行趋势诊断, 检测结果表明: 白河流域年平均气温的统计量  $|U|$  为 4.55, 大于置信水平为 0.05 时的相应临界值 1.96, 且平均每 10 a 的气温递升率为  $0.45 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , 由此说明, 流域在 1981—2020 年气温上升趋势变化显著。而流域的年降水量、年潜在蒸散发量和年径流深的统计量  $|U|$  分别为 1.79、0.89 和 1.01, 均低于 1.96, 表明流域内其他水文要素的变化趋势并不显著。利用 Mann-Kendall 突变检验法对白河流域各水文要素进行突变诊断, 本文突变检验的显

著性水平  $\alpha$  取 0.05, 对应的临界值为 1.96。图 3 绘出了流域年平均气温、年降水量、年潜在蒸散发量和年径流深的 Mann-Kendall 统计量时程变化。由图 3 可以看出: 白河流域的年平均气温和年潜在蒸散发的变化趋势相似, 而年降水量和年径流深的变化趋势较为一致。白河流域的年平均气温可能在 2000 年发生突变, 年降水量可能在 1981 和 2020 年发生突变, 年潜在蒸散发量可能在 2000 年左右发生突变, 年径流量可能在 1982 年左右发生突变。已有研究<sup>[18]</sup>表明, 黄河源区在 20 世纪 60—80 年代降水偏丰,

90年代之后降水偏少,进入21世纪后气温显著上升,气温和蒸散发逐渐显现出替代降水成为黄河源

区产流过程主要影响因子的趋势。

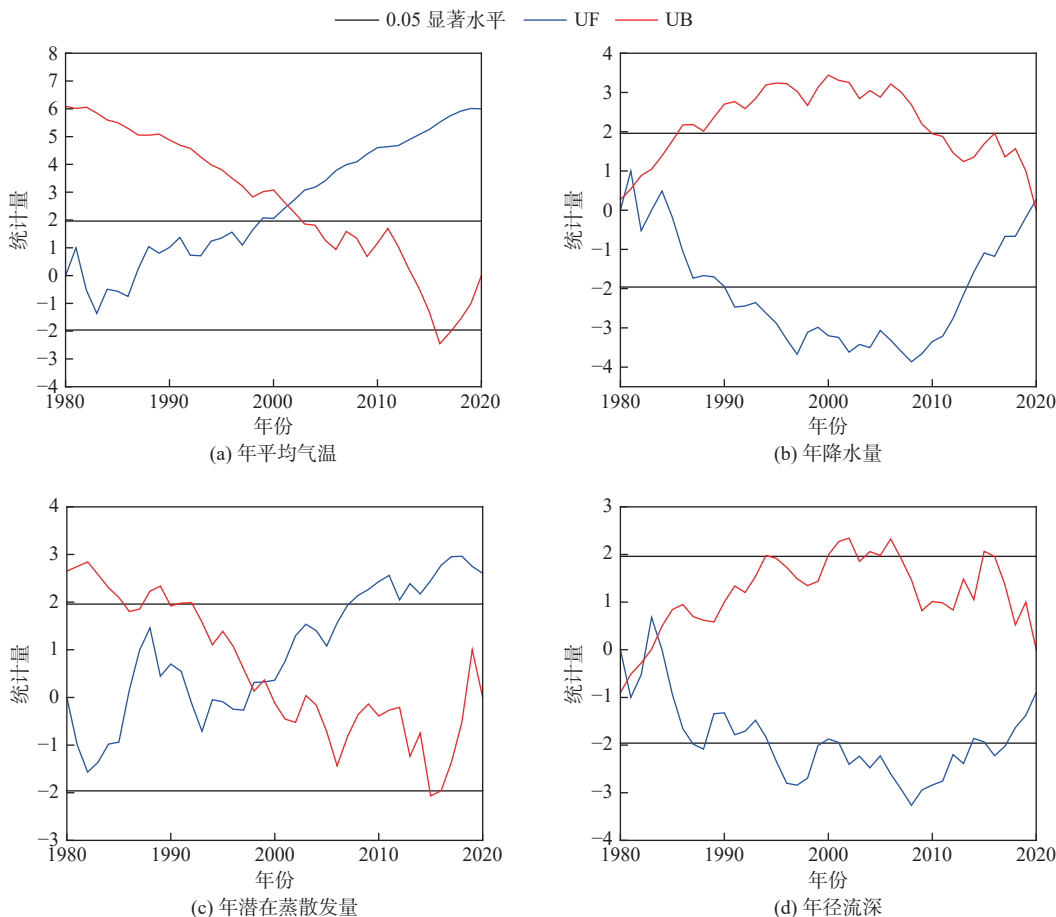


图3 白河流域各水文要素的 M-K 统计量时程变化

Fig. 3 Time-course variation of M-K statistics for various water cycle elements in the Bai River basin

图4(a)给出了白河流域月尺度气温、降水、潜在蒸散发和径流的变化过程,可以看出流域年内气温变化幅度较大:7月和8月气温最高,可以达到10℃左右;1和12月最低,接近-10℃。白河流域降水受东亚和西南季风影响较明显,东南暖湿气流到达流域的位置有很大的季节变化,因而降水年内分布不均匀,且呈现出双峰型特征,分别在6月和9月各有一个峰值出现,6月降水峰值(115.8 mm)较高于9月峰值(100.4 mm)。流域潜在蒸散发的年内分配差异较大:7月水面蒸发能力最大,为126.2 mm;1月最小,为15.9 mm。同年内降水分配现象一致,流域径流季节分配也存在双峰型特征,也分别在7月和9月各有一个峰值出现,分别为67.5 mm和48.2 mm,但径流年内变化较降水更为平缓。在冬季期间会出现流域径流量会大于降水量的情况,说明白河流域地下径流较为充沛,流域调蓄作用使得冬季径流量大于降水量<sup>[19]</sup>。

天然流域的降水-径流关系不管是丰水年、平水年还是枯水年大多数都遵循着一定的规律。各种人类活动或者自然因素都会对降水-径流关系产生一定的影响并且造成关系曲线的波动。由图3可知,在2000年左右白河流域的气温和潜在蒸散发可能发生较为显著的突变,且在20世纪90年代后期降水和径流出现大幅度减少,因此选择2000年为分割点,分为1981—2000年和2001—2020年2个阶段来分析比较流域的降水-径流关系变化。图4(b)绘制了这2个阶段的降水-径流关系,可以发现,白河流域的降水-径流关系具有较为明显的阶段性特征,2000年之前的降水-径流点群总体偏高,21世纪以来降水-径流点群相对偏低,说明由于当地生产生活的水资源利用量增加和小型水利工程建设等影响,同样降水条件下后期产流量低于前期<sup>[20-21]</sup>。

## 2.2 RCCC-WBM 模型水文过程模拟

基于白河流域逐月气温、降水、蒸发的格点数

据和实测径流值的站点数据,以 Nash-Sutcliffe 效率系数  $E_{NS}$  和相对误差  $E_R$  为衡量标准进行 RCCC-WBM 模型的参数率定和水文过程模拟。由于 1990 年之前人类活动对于流域径流的影响相对较弱<sup>[22]</sup>,因此选择 1981 年为预热期,1982—1990 年为率定期,1991—2000 年为验证期。白河流域的参数

率定见表 1,模型模拟效果见表 2。可以发现:RCCC-WBM 模型能够较好地模拟出白河流域的径流过程,适应性比较理想;率定期和验证期的 Nash-Sutcliffe 模型效率系数  $E_{NS}$  分别为 0.69 和 0.62,相对误差  $E_R$  分别为 5.51% 和 8.41%。

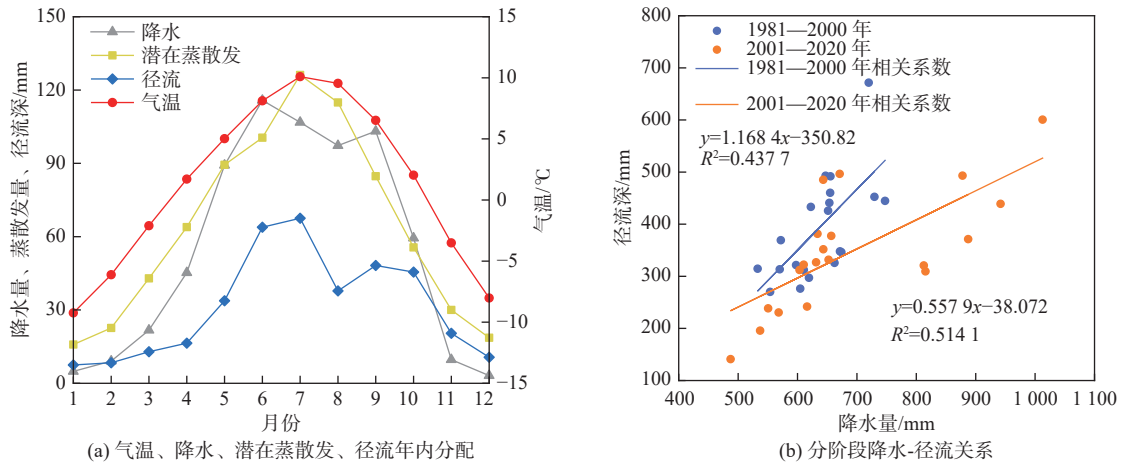


图 4 白河流域水文要素年内分配及降水-径流关系

Fig. 4 Intra-annual distribution of hydrological elements and precipitation-runoff relationship in the Bai River basin

表 1 RCCC-WBM 模型参数

Tab. 1 RCCC-WBM model parameters

参数	$S_{max}$	$K_s$	$K_g$	$K_{sn}$
参数值	233	0.682	0.401	0.146

表 2 径流模拟结果验证

Tab. 2 Validation of runoff simulation

资料年限	参数		
	$E_{NS}$	$E_R/\%$	
率定期	1982—1990	0.69	5.51
验证期	1991—2000	0.62	8.41

由于图 4(b)表明 1981—2000 年和 2001—2020 年的降水-径流关系有变化,因此继续沿用分阶段的方式来比较 RCCC-WBM 模型模拟白河流域的径流过程,见图 5。可以发现:(1)从总体来看,实测值和模拟值拟合程度较高,但是仍在峰值和谷值处存在较大误差,且峰值处的误差大于谷值处的误差。(2)有出现模拟值流量的峰值和实测流量的峰值存在错开的情况;白河流域的实测径流过程大都呈现双峰型,而模拟径流过程的双峰形状可能会存在差异。(3)在峰值处,大多是实测值大于模拟值;在谷值处,大多是模拟值大于实测值。说明在白河流域以  $E_{NS}$  或  $E_R$  为目标函数时,对多数中等流量模拟效果较好,对于个别高值和低值流量模拟效果未必最佳<sup>[23]</sup>。(4)

对比图 5 的(a)和(b)可以发现,在 1981—2000 年阶段,RCCC-WBM 模型模拟的径流洪峰的年际差异相对较小,其变化范围为 70.8~107.3 mm,而在 2001—2020 年模拟径流洪峰的年际差异则偏大,其变化范围为 58.9~176.9 mm;可能是因为 2010 年之后白河流域降水量普遍增多,而模型倾向于放大流域径流值的波动过程<sup>[24]</sup>。

### 2.3 水文要素对气候变化的响应

为了进一步分析白河流域各水文要素对气候变化的敏感性特点,本文利用模型来模拟不同气候变化情景下径流、土壤含水量以及流域蒸散发的变化。水文要素对气候变化的敏感性研究主要采用流域水文模型模拟的方法<sup>[25]</sup>,即通过假定气候情景的不同变化,找到对气候变化敏感的区域以及区域水文过程能够发生显著变化对应的条件阈值,以此来分析区域水文对气候变化的响应机理。IPCC 在第六次评估报告中综合指出:在全球变暖的宏观框架下,天气系统中水蒸气含量的显著提升,倾向于导致湿润季节的降水量进一步加剧,并增强极端降水事件的强度;具体而言,全球变暖每增加 1 °C,近地面大气持水能力即增加约 7%,这一增幅直接关联于强降水事件的潜在增强程度,二者之间展现出高度的正相关性<sup>[26]</sup>。综合考虑中国未来气候变化可能趋势,在敏感性分析中采用的假定气候变化方案为气候

变化 $-4 \sim 4 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 和降水 $-40\% \sim 40\%$ 的不同假设气候情景组合,利用 RCCC-WBM 模型来模拟流域的径流量、实际蒸散发和土壤含水量的变化。分别绘制

白河流域的径流、实际蒸散发、土壤含水量变化与降水和气温这两者改变之间的关系,见图 6。

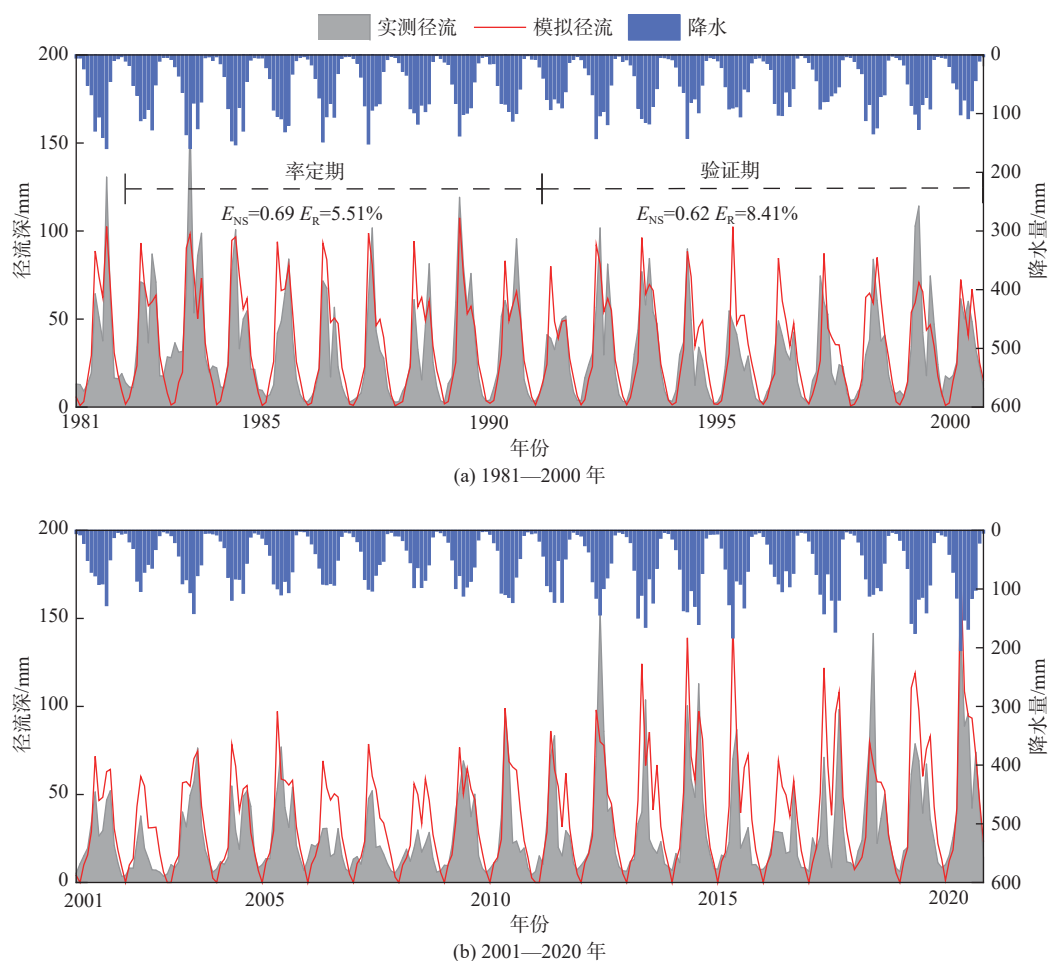


图 5 白河流域月径流实测与模拟的分阶段过程

Fig. 5 A staged process for measuring and modelling monthly runoff in the Bai River Basin

由图 6(a)可以看出:在降水量不变的情况下,当气温升高  $4 \text{ }^{\circ}\text{C}$  时径流量会减少  $18.9\%$ ,而当气温下降  $4 \text{ }^{\circ}\text{C}$  时径流量会增加  $28.6\%$ ,即相同降水量情况下,气温升高会导致流域径流量减少,且气温下降相较于上升来说对流域径流量变幅的影响更大。在气温不变的情况下,当降水量增加  $40\%$  时径流量会增加  $46.2\%$ ,当降水量减少  $40\%$  时径流量会减少  $43.1\%$ ,即降水量增加相对于减少来说,更能放大降水量对流域径流量变化影响的效果。在降水量减少  $40\%$  的情景下,气温变化  $-4 \sim 4 \text{ }^{\circ}\text{C}$  时对应的径流量变化范围为  $-54.1\% \sim -24.8\%$ 、极差为  $29.3\%$ ;而在降水量增加  $40\%$  的情景下,气温变化  $-4 \sim 4 \text{ }^{\circ}\text{C}$  时对应的径流量变化范围为  $20.2\% \sim 84.4\%$ 、极差为  $64.2\%$ ,即随着降水量的增加,径流量曲线之间越来越发散,说明随着降水量的增多,白河流域的径流对气候变化的敏感度逐渐增大。

流域蒸散发量通常由多年平均降水量与径流量的差值求得,是水文计算中必不可少的水循环以及水量平衡要素,目前主要是通过水文模型模拟流域实际蒸散发来计算区域水量的损失值<sup>[27]</sup>。由图 6(b)可以看出:在降水量减少  $40\%$  的情景下,气温变化  $-4 \sim 4 \text{ }^{\circ}\text{C}$  时对应实际增蒸散发量的变化范围为  $-19.1\% \sim -41.6\%$ 、极差为  $22.5\%$ ,而在降水量增加  $40\%$  的情景下,气温变化  $-4 \sim 4 \text{ }^{\circ}\text{C}$  时对应实际蒸散发量的变化范围为  $1.4\% \sim 51.0\%$ 、极差为  $49.6\%$ ,即随着降水量的减少,蒸散发量曲线簇趋于收敛,而随着降水量的增加,蒸散发量曲线簇趋于发散,说明气温对白河流域的实际蒸散发量的影响越来越显著。在气温不变的情况下,当降水量增加  $40\%$  时径流量会增加  $20.0\%$ ,当降水量减少  $40\%$  时径流量会减少  $31.4\%$ ,即每条曲线的斜率也在减小,说明单位降水变化引起的实际蒸散发的变化率反而在减小。

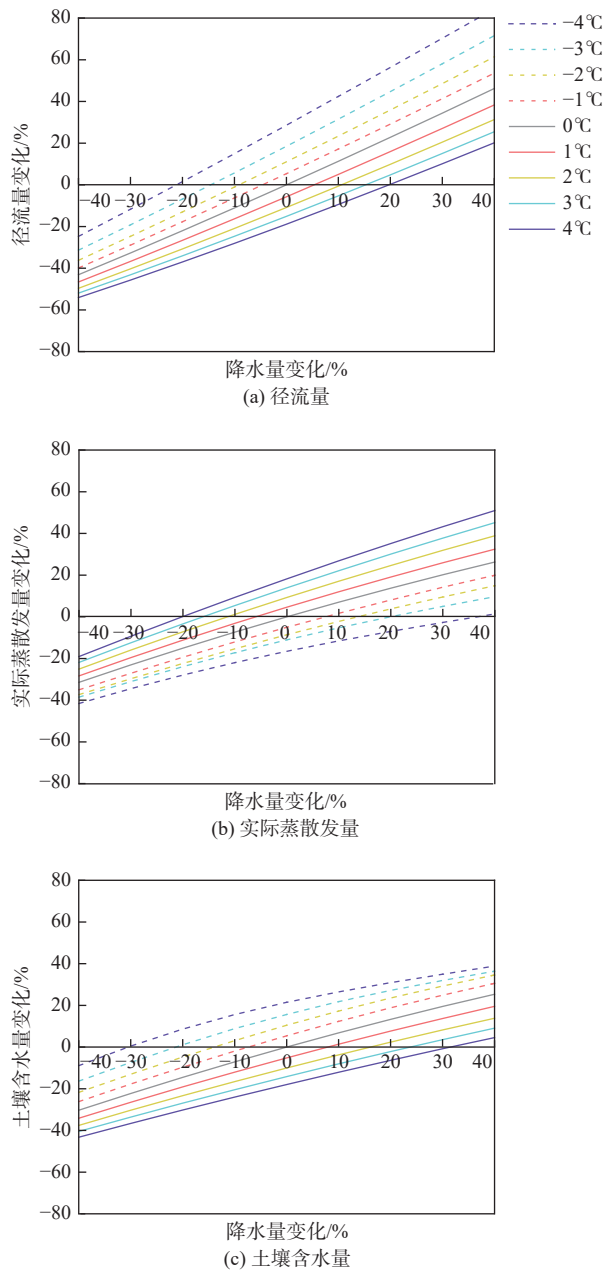


图 6 白河流域水文要素对气候变化的响应

Fig. 6 Responses of hydrological elements to climate change in the Bai River basin

目前土壤含水量的实测资料较难获取,但可以通过水文模型来模拟流域水文过程,其中也包含了关键要素土壤含水量的动态变化<sup>[28]</sup>。由图 6(c)可以看出:在降水量减少 40% 的情景下,气温变化  $-4 \sim 4\text{ }^{\circ}\text{C}$  时对应土壤含水量的变化范围为  $-43.3\% \sim -8.9\%$ 、极差为 34.4%,而在降水量增加 40% 的情景下,气温变化  $-4 \sim 4\text{ }^{\circ}\text{C}$  时对应土壤含水量的变化范围为  $4.6\% \sim 38.9\%$ 、极差为 34.3%,即土壤含水量曲线有上部收敛的趋势但不明显。在气温不变情况下,降水量从 0 到增加 20% 时,对应的土壤含水量变化为 13.3%,降水量从增加 20% 到增加 40%

时,对应的土壤含水量变化为 12.1%,即在降水量较多的情况下,单位降水引起的土壤含水量变化较小。

### 3 讨论

RCCC-WBM 模型不仅可以模拟白河流域天然径流量过程,还可以模拟流域土壤含水量和实际蒸散发量的变化。保持模型参数不变,利用 1981—2020 年的实测资料,分阶段模拟 1981—2000 年和 2001—2020 年白河流域的土壤含水量和实际蒸散发的年内变化。图 7 是由 RCCC-WBM 模型得到的分阶段降水、蒸发、径流和土壤含水量的年内分配过程。可以发现:除了 2 和 3 月,白河流域的径流量是大于实际蒸散发量的,汛期(5—10 月)径流深和实际蒸散发量的差值较大,最大差值在 6 月,2000 年之前和之后分别为 36.6 mm 和 40.8 mm;而非汛期时的差值较小,最小值在 2 月,分别为 0.3 mm 和 0.1 mm。土壤含水量在 1—2 月呈现微小衰退特征,该时期降水较少,土壤含水量得不到及时补充而减少;在 3—4 月由于降水增加,土壤含水量开始增多,并在 5 月达到峰值,分别为 120 mm 和 126 mm,之后由于实际蒸发量较大,土壤含水量有小幅的减少;7 月的降水补充使土壤含水量再次增加在 9 月达到第二个次峰值,分别为 94.4 mm 和 99.3 mm;9 月之后又开始逐月减少。这说明土壤含水量的变化与流域降水、蒸发、径流的变化密切相关。对具体的月份来分析,在 7 月约 90% 的蒸发和径流都来自降水供给,而 12 月约 20% 的蒸发和径流来自于降水供给,则地下径流和融雪径流替代降水成为补充蒸发和径流消耗的主要水源。因此,降水主要负责补充汛期的径流和蒸发消耗,而地下径流和融雪径流主要负责补充非汛期径流和蒸发消耗<sup>[29]</sup>。对比图 7(a)和(b)可以发现,2001—2020 年阶段的降水、蒸发、径流和土壤含水量基本都高于前期的同类量值,其中:降水在 5 月增加最多,为 17.3 mm,但在 7 月和 12 月分别减少 0.3 mm 和 0.1 mm;蒸发在 5 月增加最多,为 4.2 mm,在 3 月和 12 月分别减少 0.3 mm 和 0.1 mm;土壤含水量在 4 月增加最多,为 11.4 mm,在 6 月和 7 月分别减少 2.1 mm 和 1.3 mm;径流在 5 月增加最多,为 9.9 mm,在 7 月和 8 月分别减少 1.8 mm 和 0.4 mm。这说明在 2000 年之后白河流域汛期前期的水文要素值增幅相对较大,相反地在汛期后期和非汛期水文要素值可能会出现减少的情况。



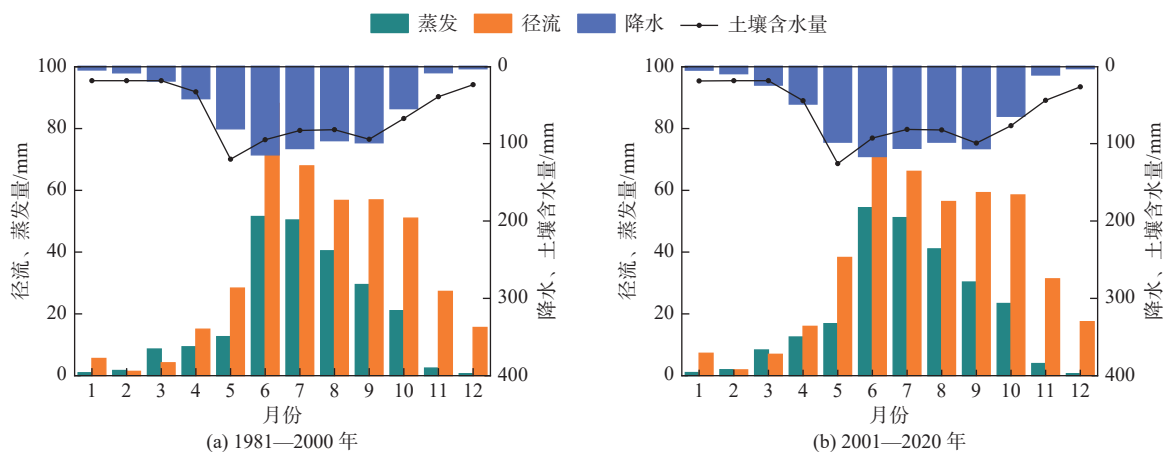


图7 白河流域降水、蒸发、径流和土壤含水量的年内分配过程分阶段对比

Fig. 7 Comparison of intra-annual distribution processes of precipitation, evaporation, runoff and soil water content in the Bai River basin in stages

#### 4 结论

全球气候变化对环境、生态和经济社会系统具有深远的影响。黄河源区白河流域位于青藏高原东北边缘,对气候变化响应敏感,其水循环过程发生了显著变化。本文通过对白河流域1981—2020年的水循环变化过程进行模拟,分析流域水循环演变规律及其对气候变化敏感性。研究表明:

1981—2020年白河流域多年平均气温总体呈显著上升趋势,平均每10a的气温递升率为 $0.45\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,与全球变暖背景相吻合;年降水量在1997—2010年较少,2010年之后有回升的趋势,但不明显;年潜在蒸散发量变化趋势与年平均气温较为相似但总体上升趋势并不显著;年径流深年际变化呈不显著的下降趋势,2001—2008年存在一定程度上的枯水期。白河流域降水分别在6月和9月各有一个峰值出现,径流同降水一样也存在双峰型特征,但时间上相对滞后。

RCCC-WBM模型利用气象水文数据进行月尺度模拟,能够较好地模拟出白河流域的径流过程,率定期和验证期的纳什效率系数 $E_{NS}$ 分别为0.69和0.62。在假定的气候变化情景下,降水量增加40%且气温变化 $-4\sim 4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时对应的径流量变化范围为20.2%~84.4%,实际蒸散发量变化范围为1.4%~51.0%,即随着降水量的增多,流域气温和蒸散发变化对径流的影响越来越显著。气温不变时降水量变化 $0\sim 20\%$ 时,对应的土壤含水量变化幅度为13.3%,而降水量变化 $20\%\sim 40\%$ 时,土壤含水量变化幅度为12.1%,即随着降水量的增多,土壤含水量也会随之增加,但单位降水引起的土壤含水量变化越来越小。

RCCC-WBM模型模拟白河流域1981—2000年和2001—2020年不同阶段水文要素年内分配过程,7月约90%的蒸发和径流都来自降水供给,而12月只有约20%的蒸发和径流来自降水供给,此时主要依靠地下径流和融雪径流来补充蒸发和径流消耗。与前期相比,2001年之后的流域水文要素主要在4月和5月有增加趋势,而在7月和12月可能存在减少趋势。

#### 参考文献:

- [1] WANG X, LIU L. The impacts of climate change on the hydrological cycle and water resource management[J]. *Water*, 2023, 15(13): 2342. DOI: 10.3390/w15132342.
- [2] YANG D, YANG Y, XIA J. Hydrological cycle and water resources in a changing world: A review[J]. *Geography and Sustainability*, 2021, 2(2): 115-122. DOI: 10.1016/j.geosus.2021.05.003.
- [3] YANG Y, ZHANG S, RODERICK M L, et al. Comparing Palmer drought severity index drought assessments using the traditional offline approach with direct climate model outputs[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2020, 24(6): 2921-2930. DOI: 10.5194/hess-24-2921-2020.
- [4] RAJIB A, KIM I L, GOLDEN H E, et al. Watershed modeling with remotely sensed big data: MODIS leaf area index improves hydrology and water quality predictions[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(13): 2148. DOI: 10.3390/rs12132148.
- [5] CHAWLA I, KARTHIKEYAN L, MISHRA A K. A review of remote sensing applications for water security: Quantity, quality, and extremes[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 585: 124826. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.124826.
- [6] JIANG P, YU Z, YUAN F, et al. The multi-scale tem-

- poral variability of extreme precipitation in the source region of the Yellow River[J]. *Water*, 2019, 11(1): 92. DOI: 10.3390/w11010092.
- [7] ZHANG T, LI D, LU X. Response of runoff components to climate change in the source-region of the Yellow River on the Tibetan Plateau[J]. *Hydrological Processes*, 2022, 36(6): e14633. DOI: 10.1002/hyp.14633.
- [8] YANG J, WANG T, YANG D, et al. Insights into runoff changes in the source region of Yellow River under frozen ground degradation[J]. *Journal of Hydrology*, 2023, 617: 128892. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2022.128892.
- [9] 李芳, 邹松兵, 陆志翔, 等. 气候变暖背景下黄河源区白河和黑河流域径流变化归因分析[J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2020, 56(1): 56-64. DOI: 10.13885/j.issn.0455-2059.2020.01.007.
- [10] 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. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20200066.
- [11] 杜婷婷, 郭梦京, 张晋梅, 等. VIC模型在西江流域的水文模拟及其应用[J]. *水土保持研究*, 2021, 28(5): 121-127. DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.2021.05.015.
- [12] 王国庆, 乔翠平, 王婕, 等. 全球变化下澜沧江-湄公河流域水量平衡模拟[J]. *大气科学学报*, 2020, 43(6): 1010-1017. DOI: 10.13878/j.cnki.dqkxxb.20200921010.
- [13] 翟然, 刘志武, 戴会超, 等. 长江流域径流历史演变特征及未来预估[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2023, 54(6): 87-97. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2023.06.008.
- [14] 管晓祥, 刘悦, 张成凤, 等. RCCC-WBM模型区域适用性及参数敏感性分析[J]. *水文*, 2020, 40(2): 55-61. DOI: 10.19797/j.cnki.1000-0852.20180372.
- [15] GUAN X, ZHANG J, YANG Q, et al. Evaluation of precipitation products by using multiple hydrological models over the upper Yellow River basin, China[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(24): 4023. DOI: 10.3390/rs12244023.
- [16] GUAN X, ZHANG J, ELMAHDI A, et al. The capacity of the hydrological modeling for water resource assessment under the changing environment in semi-arid river basins in China[J]. *Water*, 2019, 11(7): 1328. DOI: 10.3390/w11071328.
- [17] 岳伟鹏, 张合理, 陈峰, 等. 中亚瓦赫什河上游源区气候水文要素演变特征[J]. *水资源保护*, 2020, 36(5): 57-64. DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2020.05.009.
- [18] 王道席, 田世民, 蒋思奇, 等. 黄河源区径流演变研究进展[J]. *人民黄河*, 2020, 42(9): 90-95. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2020.09.017.
- [19] 孙永寿, 刘毅, 李燕. 黄河源区降水径流一致性及其影响因素分析[J]. *人民黄河*, 2021, 43(10): 51-55. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2021.10.010.
- [20] 商滢, 江竹. 黄河源区降水径流变化特征及响应分析[J]. *中国农村水利水电*, 2021(2): 106-112. DOI: 10.3969/j.issn.1007-2284.2021.02.019.
- [21] 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. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2020.11.005.
- [22] 姚名泽, 尹军, 刘思敏, 等. 气候变化下长江黄河源区水循环变化及生态效应[J]. *人民长江*, 2024, 55(3): 74-82. DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2024.03.011.
- [23] 贾何佳, 李谢辉, 文军, 等. 黄河源区径流变化模拟及未来趋势预估[J]. *资源科学*, 2022, 44(6): 1292-1304. DOI: 10.18402/resci.2022.06.15.
- [24] 冯平, 张立斌, 李建柱, 等. 目标函数对滦河流域SWAT模型径流模拟不确定性的影响[J]. *水资源保护*, 2023, 39(2): 17-24. DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2023.02.003.
- [25] 张建云, 王国庆, 金君良, 等. 1956—2018年中国江河径流演变及其变化特征[J]. *水科学进展*, 2020, 31(2): 153-161. DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2020.02.001.
- [26] 姜大膀, 王娜. IPCC AR6报告解读: 水循环变化[J]. *气候变化研究进展*, 2021, 17(6): 699-704. DOI: 10.12006/j.issn.1673-1719.2021.160.
- [27] 王莺, 王劲松, 武明, 等. 土地利用和气候变化对嘉陵江流域水文特征的影响[J]. *水土保持研究*, 2019, 26(1): 135-142. DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.2019.01.019.
- [28] 李平. 基于神经网络的土壤含水量模拟研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2020.
- [29] 包青岭, 丁建丽, 王敬哲, 等. 基于VIC模型模拟的干旱区土壤水分及其时空变化特征[J]. *生态学报*, 2020, 40(9): 3048-3059. DOI: 10.5846/stxb201905060916.

## Evolution of hydrological elements in typical watersheds of the Yellow River source area and their response to climate change

YU Chang<sup>1,2,3,4</sup>, JIN Junliang<sup>2,3,4,5</sup>, WANG Guoqing<sup>2,3,4,5</sup>, LI Yang<sup>6</sup>

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Yangtze River Protection and Green Development

*Institute, Nanjing 210098, China; 3. Centre for Climate Change Research, Ministry of Water Resources, Nanjing 210029, China; 4. Collaborative Innovation Centre for Water Security and Water Science, Hohai University, Nanjing, 210098, China; 5. The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 6. Inner Mongolia Autonomous Region Water Resources Development Centre, Hohhot 010020, China )*

**Abstract:** The source area of the Yellow River is an important component of the “Chinese Water Tower”, which has the functions of water conservation and recharge, regulating the local regional climate, and plays a positive role in maintaining the water resources and ecological environment of the Yellow River basin. Meanwhile, as a "sensitive area" of climate change, the hydrological situation of the Yellow River source area on the Tibetan Plateau has attracted much attention. Currently, most of the studies on the response of the Yellow River source area to climate change are based on large-scale watersheds and single meteorological and hydrological elements, and there are relatively limited studies on the mechanisms between hydrological elements in typical watersheds in the source area, while the changes in hydrological processes at the sub-basin scale are crucial for future water resources planning and management. Based on the meteorological and hydrological data collected and collated from 1981 to 2020 in the Bai River basin of the Yellow River headwaters area, the hydrological sequence analysis method was used to analyze the interannual change process of hydrological elements; the parameters of the RCCC-WBM model were rate-set, and the runoff of the Bai River basin was simulated in phases for the years from 1981 to 2000 and from 2001 to 2020, respectively. The parameters of the RCCC-WBM model were calibrated to simulate the changes of runoff, actual evapotranspiration (ET) and soil water volume in from 1981 to 2000 and from 2001 to 2020 in the Bai River basin in stages; finally, the sensitivity of runoff, actual ET and soil water volume to climate change in the Bai River basin was analyzed by moderating the changes of precipitation and temperature on the basis of the available data.

From 1981 to 2020, the average annual temperature in the Bai River basin showed a significant increasing trend, with an average temperature increase rate of 0.45 °C per decade, consistent with the background of global warming. Annual precipitation was relatively low from 1997 to 2010, with a slight rebound trend after 2010, although it was not significant. The annual potential evapotranspiration trend was similar to the annual average temperature, but the overall increasing trend was not significant. The interannual variation of annual runoff depth showed a non-significant decreasing trend, with a period of drought from 2001 to 2008. Precipitation in the Bai River basin peaked in June and September, and runoff, like precipitation, also exhibited a bimodal pattern, albeit with a time lag.

The RCCC-WBM model, using meteorological and hydrological data, effectively simulated the runoff process in the Bai River basin, with Nash-Sutcliffe model efficiency coefficients ( $E_{NS}$ ) of 0.69 during the calibration period and 0.62 during the validation period. Under assumed climate change scenarios, with a 40% increase in precipitation and temperature change ranging from -4 °C to 4 °C, the corresponding runoff change ranged from 20.2% to 84.4%, and actual evapotranspiration change ranged from 1.4% to 51.0%. This indicated that with increased precipitation, the impact of temperature and evapotranspiration changes on runoff became more significant. With constant temperature, when precipitation changed from 0 to 20%, the change in soil moisture was 13.3%, while with precipitation changes of 20% to 40%, the change in soil moisture was 12.1%. This showed that as precipitation increased, soil moisture also increased, but the change in soil moisture per unit of precipitation became smaller.

The RCCC-WBM model simulated the annual distribution of hydrological elements in the Bai River basin for the periods from 1981 to 2000 and from 2001 to 2020. In July, approximately 90% of evaporation and runoff were derived from precipitation. In December, only about 20% of evaporation and runoff came from precipitation, with the remainder supplemented by groundwater runoff and snowmelt runoff. Compared to the earlier period, after 2001, there was an increasing trend in hydrological elements primarily in April and May, while July and December showed a decreasing trend.

**Key words:** Yellow River source area; climate change; hydrological element; RCCC-WBM model; sensitivity