

黑河上游出山径流演变多时间尺度归因分析

邹星怡^{1,2}, 杨林山¹, 贺王含^{1,2}, 王婧茹^{1,2}, 卢调雪^{1,2}, 夏鸿华^{1,2}

(1. 中国科学院西北生态环境资源研究院干旱区生态安全与可持续发展全国重点实验室;
2. 中国科学院大学资源与环境学院)

摘要:基于黑河上游山区 1980—2022 年水文气象观测数据,采用 Mann-Kendall 检验与 Yamamoto 方法识别水文气象要素的趋势及突变特征,构建耦合融雪模块的 ABCD-snow 模型,并结合任意时间尺度的 Budyko 水热耦合平衡框架,在考虑多因子耦合作用基础上,拓展敏感性归因方法,量化了突变前后气候与下垫面因子对黑河上游径流年、季、月等多时间尺度演变的影响。结果表明:研究时段黑河上游径流在 1997 年发生突变,突变前年径流量呈不显著下降趋势,夏秋季降幅最大,突变后年径流量呈显著上升趋势,除夏季增幅不显著外,其余季节均呈显著增长态势;ABCD-snow 模型可有效提升对寒区关键水文过程的刻画能力,率定期 Kling-Gupta 效率系数由 0.75 提高至 0.90,较好地再现了春季径流融雪补给特征;1980—1997 年,夏秋季降水量减少与蒸散发增强导致径流减少,尤其体现在 6 月、8 月、9 月,1998—2022 年,降雨与融雪增加成为径流增加的主要影响因素,潜在蒸散发增长趋势减缓与归一化植被指数增强进一步促进了流域产流;径流过程对气候变化响应愈发敏感,其相对贡献率由突变前的 56.9% 升至 70.7%,多因子协同效应普遍低于 1.1%。

关键词:径流演变;ABCD-snow 模型;Budyko 水热耦合平衡框架;多时间尺度;归因分析;黑河上游

Multi-time-scale attribution analysis of runoff evolution at mountain outlet of the upper Heihe River//Zou Xingyi^{1,2}, Yang Linshan¹, He Wanghan^{1,2}, Wang Jingru^{1,2}, Lu Tiaoxue^{1,2}, Xia Honghua^{1,2} (1. State Key Laboratory of Ecological Safety and Sustainable Development in Arid Lands, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences; 2. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences)

Abstract: Taking mountainous area of the upper Heihe River as study area, this paper uses Mann-Kendall test and Yamamoto mutation test to identify trend and mutation characteristics of hydrometeorological factors based on hydrometeorological observation data from 1980 to 2022. ABCD-snow model coupled with a snowmelt module is established. Combined with Budyko coupled hydrothermal equilibrium framework at arbitrary time scales and considering coupling effect of multiple factors, an improved sensitivity attribution method is adopted to quantify impacts of climatic and underlying surface factors on multi-time-scale (annual, seasonal and monthly) evolution of runoff in the upper Heihe River before and after the mutation. The results show that runoff in the upper Heihe River experienced an abrupt change in 1997 over past 40 years. Before the mutation, annual runoff presented an insignificant decreasing trend with the largest decline in summer and autumn. After the mutation, annual runoff increased significantly; all seasons showed a remarkable growth trend except summer with an insignificant increase. ABCD-snow model effectively improves simulation performance of key hydrological processes in cold regions. Its efficiency coefficient during calibration period rose from 0.75 to 0.90, which well reflects snowmelt recharge characteristics of spring runoff. From 1980 to 1997, decrease of rainfall and rise of reference evapotranspiration in summer and autumn led to runoff reduction, especially in June, August and September. From 1998 to 2022, increased rainfall and snowmelt dominated runoff growth, while slowdown of reference evapotranspiration and improvement of normalized difference vegetation index (NDVI) further promoted watershed runoff generation. Runoff became more sensitive to climate change, with relative contribution rate rising from 56.9% to 70.7% before and after mutation, and synergistic effect of multiple factors was generally lower than 1.1%.

Key words: runoff evolution; ABCD-snow model; Budyko coupled hydrothermal equilibrium framework; multiple time scale; attribution analysis; the upper Heihe River

基金项目:国家自然科学基金项目(52522901,52379030);中国科学院 B 类先导项目(XDB0720202);甘肃省科技计划项目(24JRRA079);中国科学院青年创新促进会会员项目(2022435)

作者简介:邹星怡(2002—),女,硕士研究生,主要从事寒区水文水资源研究。E-mail:zouxingyi24@mails.ucas.ac.cn

通信作者:杨林山(1989—),男,研究员,博士,主要从事寒旱区生态水文研究。E-mail:yanglsh08@lzb.ac.cn

在全球气候持续变暖的背景下,水循环格局正发生着深刻的变化。我国西北内陆河流域因水资源时空分布不均、生态系统脆弱,已成为对气候变化响应最为敏感的区域之一。尤其在高寒山区,径流过程受气温、降水及下垫面特征等多因子共同驱动,呈现显著的时空异质性与非线性响应特征^[1]。黑河作为我国西北第二大内陆河,其上游地区发育典型的冰川冻土-生态圈-水文过程耦合系统,水文过程对气候变异高度敏感^[2]。崔延华等^[3]研究表明,祁连山区气温每升高1%,莺落峡水文站年径流量将增加约0.16%,其响应强度显著高于全球平均水平。气温升高引起积雪加速消融、冻土退化等冰冻圈要素变化,通过影响地表反照率与土壤水文属性,进一步调节产流机制与汇流路径,改变流域径流过程。近年来,黑河上游已出现春季融雪提前、年际径流波动增强和丰枯年差异加剧等现象,增加了中下游水资源调控与生态系统维系的难度与复杂性。因此,识别高寒流域水文主控因子及其在不同时间尺度下的响应特征,不仅有助于深化对高寒区水文过程气候响应规律的认识,也对提升流域水资源管理与生态保护能力具有重要的科学价值与现实意义。

分布式水文模型作为当前水文模拟的主流工具,因其物理机制清晰、空间刻画精细,被广泛应用于气候变化情景下的水文过程模拟。部分模型如WEB-DHM^[4]、GBEHM^[5]等已集成冰冻圈模块,提升了对高寒区降水、积雪与冻土等复杂过程的模拟能力。然而,该类模型对高分辨率气象数据和物理参数的依赖度较高,在高海拔区域,由于观测资料稀缺,参数可转移性差,难以实现稳定推广应用^[6-7]。因此,在高寒区域的径流归因分析中,统计方法与区域水平衡模型仍占据主导地位^[8-10]。其中,Budyko水热耦合平衡框架^[11]因其结构简洁、理论基础明确、参数需求较少,是定量评估气候因子与下垫面对水文过程影响的有效手段,已广泛应用于年尺度归因研究^[12-13]。但传统Budyko水热耦合平衡框架多基于水文要素的长期平均状态,较难反映积雪融化、土壤储水变化等动态过程,亦难以揭示气候与下垫面因子之间潜在的非线性耦合效应。为弥补这一不足,近年来有研究尝试将过程模拟模型与Budyko水热耦合平衡框架相结合,提升归因分析的物理解释能力。ABCD模型作为典型的概念性水文模型,结构简明、参数稳定性好,可动态模拟实际蒸散发、土壤储水变化与径流等关键水文变量,适用于数据匮乏地区的水文模拟^[14]。该模型还具备良好的模块拓展性,易于嵌入积雪融化等寒区关键水文过程^[15],在高寒区域的水文建模与归因研究中展现出

了广泛的适应性。

针对黑河上游降水和融雪共同驱动以及受人类活动影响较小的水文特征^[16],本文提出一种面向高寒地区的多时间尺度动态归因分析框架。采用Mann-Kendall趋势检验与Yamamoto方法识别黑河上游1980—2022年水文气象要素的变化趋势与突变特征,构建耦合融雪模块的ABCD-snow模型模拟月尺度关键水文过程变量,在考虑多因子耦合作用的基础上,拓展敏感性归因方法,以量化突变前后气候及下垫面因子对黑河上游径流在年、季、月等多时间尺度演变的影响。该框架为理解高寒区复杂水文过程的响应机制与气候驱动规律提供了方法支撑。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

黑河上游干流地处青藏高原东北缘祁连山腹地,是河西走廊重要的水源涵养区。流域西以托勒南山为界,东至冷龙岭,北抵走廊南山,南接柴达木盆地北缘,经莺落峡水文站汇入河西走廊冲积平原(图1)。流域面积约1.0万km²,占黑河流域总面积7%,年均径流量达15.89亿m³。研究区属典型高寒山地气候,降水季节集中,3—10月以降雨为主,占年总降水量约85%;11月至次年2月以降雪为主,冬季最大积雪覆盖率可达68%^[17]。降水、冰雪融水及地下水共同为山区的水资源提供补给^[18]。

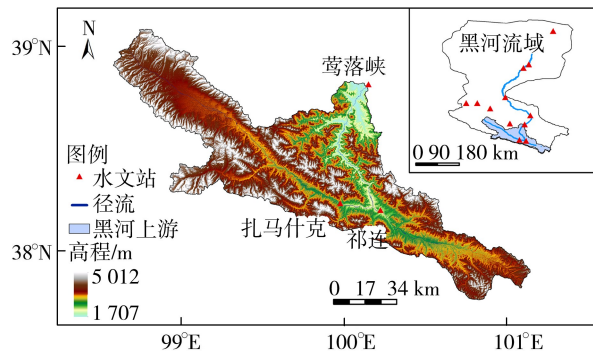


图1 研究区概况

Fig. 1 Overview of study area

1.2 数据来源

本文所用数据包括降水量(P)、潜在蒸散发量(E_p)、径流量(R)和归一化植被指数(NDVI)等。数字高程模型(DEM)来自地理空间数据云,月径流数据采用甘肃省水文局莺落峡水文站的实测数据;气象驱动数据均通过流域边界裁剪,采用算术平均法进行空间聚合;降水数据采用欧盟与欧洲中期天气预报中心联合发布的ERA5-Land 0.1°逐月再分析数据集^[19],该产品在青藏高原及祁连山的月尺度相关系数可达0.97^[20];潜在蒸散发数据采用国家青

藏高原数据中心的“中国 1 km 逐月潜在蒸散发数据集 (1901—2024)” (<https://data.tpdc.ac.cn/home>), 该数据集基于中国 1 km 月均气温、最高气温与最低气温数据集, 采用 Hargreaves 公式计算得到^[21]; 研究区内降水、蒸散发及径流量的单位统一采用 mm, 以确保水量平衡解析的物理一致性。逐日气温数据来自美国国家海洋和大气管理局 (NOAA) 国家环境信息中心 (NCEI) (<https://www.ncei.noaa.gov/data/global-summary-of-the-day/archive/>), 经反距离权重插值得到; 逐日 NDVI 数据为由 NOAA 发布的气候数据记录 (CDR) 原始产品经有效像元识别与时空插值重建的无间隙日尺度数据集, 该数据集由西北工业大学秦岭生态智能监测与保护重点实验室等单位发布^[22] (<https://figshare.com/s/16f1fbaff259272249f1>)。

2 研究方法

2.1 ABCD-snow 水文模型

在经典 ABCD 水文模型^[23]的基础上, 耦合融雪模块构建 ABCD-snow 模型, 模型结构如图 2 所示。该模型通过设置气温阈值 T_1 实现雨雪分离。当气温低于 T_1 时, 降水视为降雪。采用温度指数法动态模拟积雪融化过程, 将雪水当量变化与土壤水储量耦合, 模拟不同降水形态对地表产流、地下渗漏及蒸散发过程的调控作用, 该方法已被应用于高寒区径流模拟^[15]。

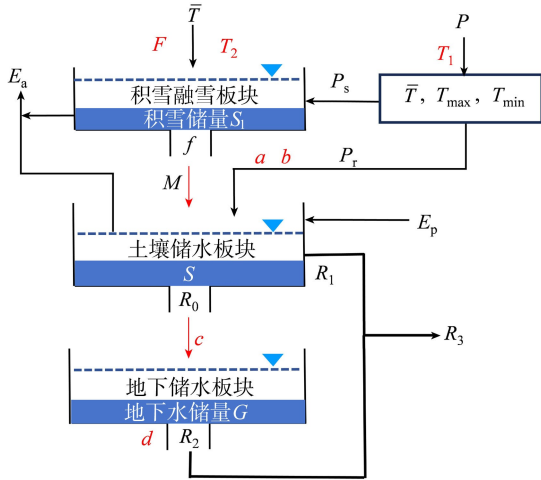


图 2 ABCD-snow 模型

Fig. 2 ABCD-snow model

时段 i 可供分配的总水量 W_i 由外部降水输入与前期土壤储水共同决定:

$$W_i = P_i + S_{i-1} + M_i \quad (1)$$

式中: S 为根区土壤水储量, S_{i-1} 为前一时段末根区土壤水储量初值; M_i 为时段 i 的融雪量。

进入蒸散发与深层入渗过程的有效活动水量

Y_i 采用非线性关系进行表达:

$$Y_i = \frac{W_i + b}{2a} - \sqrt{\left(\frac{W_i + b}{2a}\right)^2 - \frac{bW_i}{a}} \quad (2)$$

式中: a 为土壤饱和前径流发生的倾向系数; b 为实际蒸散发量与土壤含水量之和的上限值。基于 Y_i , 进一步将余量划分为地表径流量 R_1 与根区入渗补给量 R_0 :

$$R_1 = (1 - c)(W_i - Y_i) \quad (3)$$

$$R_0 = c(W_i - Y_i) \quad (4)$$

式中: c 为径流量与地下水补给量的分配比例。 R_0 进入地下水库, 第 i 时段末的地下水库蓄水量 G_i 及最终地下水产流量 R_2 的计算公式分别为:

$$G_i = \frac{c(W_i - Y_i) + G_{i-1}}{1 + d} \quad (5)$$

$$R_2 = dG_i \quad (6)$$

式中: d 为地下水滞留时间的倒数。流域的总模拟径流量 R_3 最终由 R_1 与 R_2 汇流叠加构成。

积雪融雪量的估算采用基于温度指数的度日模型^[24], 假设日融雪量 M_d 与当天气温呈线性正相关关系:

$$M_d = \begin{cases} F(T - T_2) & (T > T_2) \\ 0 & (T \leq T_2) \end{cases} \quad (7)$$

式中: F 为度日因子, 表示单位正气温持续 1 d 所能融化的雪水当量; T 为气温; T_2 为融雪临界温度, 表示积雪开始消融的温度阈值。将度日模型扩展至月尺度, 月总融雪量 (M) 为当月各逐日融雪量 ($M_{d,i}$) 的累加之和:

$$M = \sum_{i=1}^m M_{d,i} = Fm \left(\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m M_{d,i} \right) \quad (8)$$

式中: m 为当月的天数。

引入流域月平均气温 (\bar{T}) 近似替代逐日气温的累积效应:

$$M = \begin{cases} mF(\bar{T} - T_2) & (\bar{T} > T_2) \\ 0 & (\bar{T} \leq T_2) \end{cases} \quad (9)$$

积雪储量及变化遵循水量平衡原理, 设定最大融雪比例 f , 用于限制一次时间步长内融雪释放量不得超过雪水当量的一定比例, 本文取 0.3^[25-26]。采用单临界气温法^[27]对降水成分进行划分:

$$P_s = \begin{cases} P & (T_1 \geq T_{\max}) \\ P \left(1 - \frac{T_{\max} - T_1}{T_{\max} - T_{\min}} \right) & (T_{\min} \leq T_1 < T_{\max}) \\ 0 & (T_1 < T_{\min}) \end{cases} \quad (10)$$

$$P_r = P - P_s \quad (11)$$

式中: P_r 为月降水量; P_s 为月降雪量; T_{\max} 、 T_{\min} 分别为月最高气温和月最低气温。对于积雪层, 存在水量平衡方程:

$$S_{1,i-1} + P_{s,i} = S_{1,i} + M_i \quad (12)$$

式中: $S_{1,i-1}$ 、 $S_{1,i}$ 分别为上月、当月积雪储量。当 $M > S_{1,i-1} + P_{s,i}$, 则 $M_i = S_{1,i-1} + P_{s,i}$, 否则 $M_i = M$, 同时更新当月积雪储量。

在 ABCD 模型原有 4 个参数的基础上, 本文新增了融雪相关参数 F 、 T_1 与 T_2 , 共 7 个待率定参数, 采用遗传算法进行全局优化。遗传算法基于种群搜索并结合选择、交叉与变异机制, 能够有效避免陷入局部最优解^[28]。同时设置时间长度为 12 月的预热期以降低初始条件影响。优化目标为纳什效率系数^[29](NSE)。模型性能从过程模拟与水量平衡两方面进行评估。过程模拟指标包括 NSE 与 Kling-Gupta 效率系数(KGE)^[30], 理论最优值为 1; 水量平衡指标包括水量平衡误差^[31]、均方根误差^[32]和相对偏差^[33], 最优值为 0。

2.2 任意尺度水热耦合平衡方程

基于杨汉波等^[34]提出的任意时间尺度水-能平衡框架, 采用拓展的 Budyko 水量平衡方程表征总可用水量、可用能量、下垫面属性与实际蒸散发(E_a)之间的非线性关系:

$$E_a = \frac{W_2 E_p}{(C + W_2^n + E_p^n)^{1/n}} \quad (13)$$

式中: W_2 为有效供水量; C 为无量纲参数; n 为反映下垫面状况的参数, 包括地形、土壤和植被等。

传统年尺度 Budyko 弹性系数法常忽略土壤与地下水通量变化, 在季节尺度归因分析中易造成系统偏差。为提高归因精度, 参考 Du 等^[35]提出的非稳态 Budyko 修正思路, 将 ABCD-snow 模型输出结果引入 Budyko 水热耦合平衡框架, 并重构 W_2 :

$$W_2 = P_r + M - \Delta S \quad (14)$$

式中: ΔS 为土壤水分变化量, 由浅层储水变化与深层渗漏共同构成。 R 的估算方程可表示为:

$$R = P_r + M - \Delta S - \frac{(P_r + M - \Delta S) E_p}{[(P_r + M - \Delta S)^n + E_p^n]^{1/n}} \quad (15)$$

此外, 模型中参数 C 仅在浅层地下水区域或极端干旱场景需保留, 一般月尺度水文模拟过程省略 C 不影响模型的可靠性^[34-36]。

2.3 基于敏感性方法的径流趋势归因分析

采用二阶泰勒公式中的混合偏导项作为气候及下垫面因子对径流耦合作用的近似量化^[37], 同时在水热耦合平衡方程中引入 NDVI 作为 n 的组成部

分。根据式(15), 可得到 R 关于 P_r 、 E_p 、 M 、 ΔS 和 n 的表达式, 记为:

$$R = f(P_r, E_p, M, \Delta S, n) = P_r + M - \Delta S - \frac{E_p}{[(P_r + M - \Delta S)^n + E_p^n]^{1/n}} (P_r + M - \Delta S) \quad (16)$$

二阶泰勒展开量化:

$$\Delta R \approx \sum_{i=1}^n \frac{\partial R}{\partial x_i} \Delta x_i + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \frac{\partial^2 R}{\partial x_i^2} (\Delta x_i)^2 + \sum_{i=1}^n \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \frac{1}{2} \frac{\partial^2 R}{\partial x_i \partial x_j} \Delta x_i \Delta x_j \quad (17)$$

式中: x_i 为影响径流的因子, 各因子趋势响应计算公式为:

$$\Delta R_{x_i} = \frac{\partial R}{\partial x_i} \Delta x_i + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 R}{\partial x_i^2} (\Delta x_i)^2 \quad (18)$$

因子间交互作用 ΔR_{int} 通过二阶交叉导数表征:

$$\Delta R_{\text{int}} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \frac{\partial^2 R}{\partial x_i \partial x_j} \Delta x_i \Delta x_j \quad (19)$$

植被变化可通过线性调控参数 n 影响产流过程^[38-39]:

$$\Delta n_l = k \Delta I \quad (20)$$

式中: Δn_l 为由 NDVI 变化引起的 n 的变化量, 即 NDVI 对曲线形状参数的附加调整; I 为 NDVI; k 为通过遗传算法优化得到的调节系数, 用以量化 NDVI 趋势对 n 的放大或缩减效应; ΔI 为 NDVI 的线性拟合斜率。由此推导出 NDVI 的贡献项:

$$\Delta R_l = k \frac{\partial R}{\partial n} \Delta I + \frac{1}{2} k^2 \frac{\partial^2 R}{\partial n^2} (\Delta I)^2 \quad (21)$$

3 结果与分析

3.1 水文气象要素趋势变化特征及突变检验

采用 Mann-Kendall 检验法^[40-41]和线性趋势法综合分析 1980—2022 年黑河上游 R 、 P 、 E_p 、NDVI 的变化趋势, 通过 Yamamoto 方法^[42]识别, 显示在 1997 年前后多项变量存在突变, 该结论与李秋菊等^[16]基于滑动 T 检验确定的黑河上游水文突变年份一致。

3.1.1 径流趋势变化特征

1980—2022 年黑河上游实测径流量多时间尺度分时段变化趋势见图 3、图 4 (图中 *、** 分别表示统计显著性水平为 $p < 0.1$ 、 $p < 0.05$, 下同)。年径流量在 1980—1997 年呈不显著下降趋势 ($p = 0.26$), 斜率为 -1.39 mm/a , 主要受夏秋季径流减少的影响, 其中夏季下降速率为 -0.87 mm/a , 秋季为 -0.5 mm/a , 尤以 6、7、9 月下降最为明显, 速率均超出 -0.3 mm/a 。此外, 该时段内, 春季径流量以

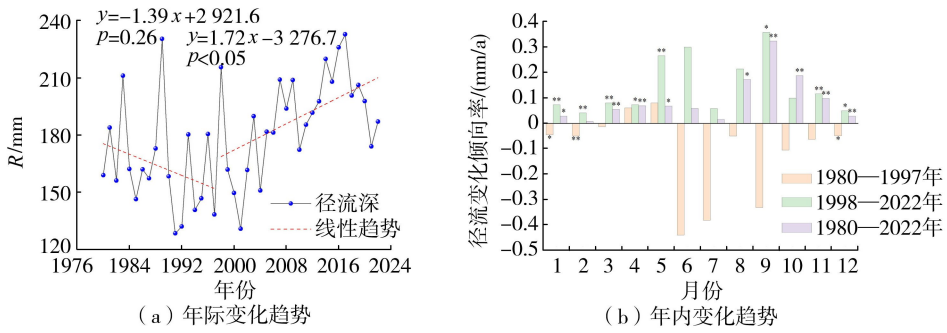


图3 黑河上游径流年际和年内变化趋势

Fig. 3 Interannual and intra-annual runoff trends in the upper Heihe River

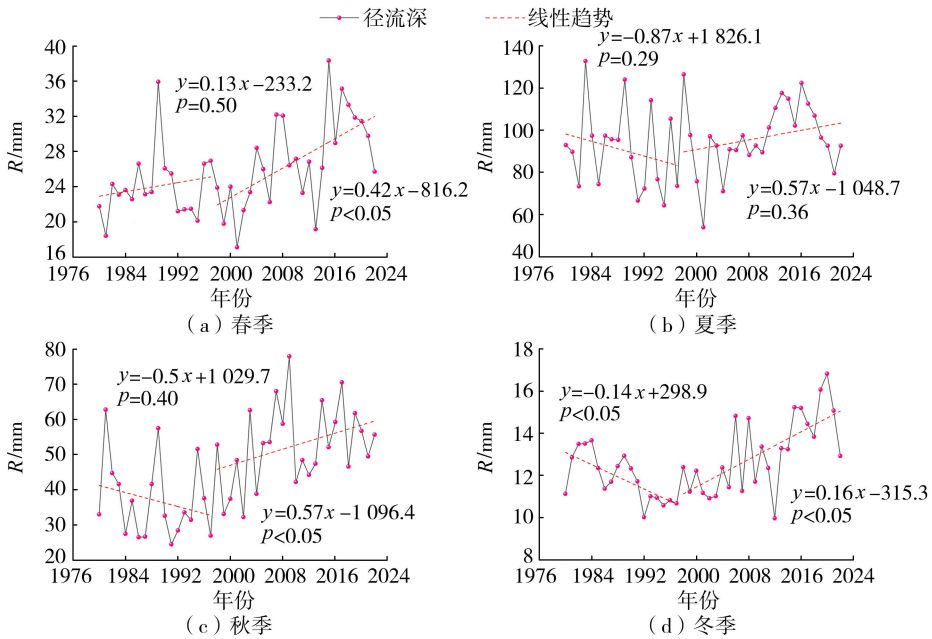


图4 黑河上游径流季节变化趋势

Fig. 4 Seasonal runoff variations in the upper Heihe River

0.13 mm/a 的速率缓慢增加,增量集中在4—5月,4月增长速率为0.06 mm/a,5月为0.08 mm/a;冬季径流量呈显著下降趋势(-0.14 mm/a, $p < 0.05$)。

突变后,年径流量转为显著增加趋势(1.72 mm/a, $p < 0.05$),各季节的年径流量均呈增长态势。其中春、秋、冬季径流量增速分别为0.42、0.57、0.16 mm/a,均达到显著水平($p < 0.05$),5、9月增速显著,均大于0.2 mm/a;夏季径流量增速较快但不显著(0.57 mm/a, $p = 0.36$)。

3.1.2 气象及植被要素趋势变化特征

1980—2022年黑河上游降水、潜在蒸散发、NDVI多时间尺度分时段变化趋势见表1。

a. 降水。突变前,降水在年尺度上呈下降趋势(-1.4 mm/a),夏季下降(-1.01 mm/a)最为突出,8月降速(-1.16 mm/a)最大。突变后,降水整体转为上升趋势(1.03 mm/a),春季(0.93 mm/a)和冬季(0.34 mm/a)增加明显,其中,4月和11月增速最为显著(分别为0.62、0.39 mm/a)。

b. 潜在蒸散发。突变前,潜在蒸散发呈持续增加(0.66 mm/a)趋势,春、夏、冬季均有所上升,夏季增速(0.5 mm/a)较大,其中6月(0.28 mm/a)最为明显;秋季呈微弱减小(-0.03 mm/a)趋势,10月达显著性水平(-0.16 mm/a, $p < 0.1$)。突变后,潜在蒸散发增速(0.25 mm/a)趋缓,春季、秋季呈增加(分别为0.24、0.11 mm/a)趋势,3月增速(0.32 mm/a)较快;夏、冬季则呈现微弱下降趋势(分别为-0.08、-0.01 mm/a),其中6月降速(-0.18 mm/a)明显,蒸散发主导的水分亏缺压力降低。

c. NDVI。1980—1997年,NDVI呈缓慢增加(0.03 mm/a)趋势,春季增速(0.0003 mm/a)较慢,秋冬季增加明显,10月和1月增速较快(分别为0.0024、0.0031 mm/a);夏季下降明显(-0.0032 mm/a)。1998—2022年,NDVI总体增长(0.0006 mm/a)进程加快,夏、秋季增势明显(分别为0.0014、0.001 mm/a),8、9月增速均超过0.0021 mm/a,下垫面条件持续改善。

表 1 黑河上游降水、潜在蒸散发、NDVI 多时间尺度变化趋势

单位: mm/a

Table 1 Variation trends of precipitation, potential evapotranspiration and NDVI at multiple timescales in the upper Heihe River

unit: mm/a

时间	降水			潜在蒸散发			NDVI		
	突变前期	突变后期	所有时段	突变前期	突变后期	所有时段	突变前期	突变后期	所有时段
年	-1.40	1.03	1.31**	0.66	0.25	0.66**	0.0003	0.0006	0.0011**
春季	0.14	0.93	0.61**	0.17	0.24	0.36**	0.0003	0.0001	0.0009**
夏季	-1.01	0.02	-0.11	0.50	-0.08	0.20*	-0.0032	0.0014	0.0009**
秋季	-0.44	-0.26	0.63*	-0.03	0.11	0.04	0.0021	0.0010	0.0018**
冬季	-0.10	0.34	0.17	0.02	-0.01	0.04	0.0021	-0.0003	0.0007
1月	0.03	0.20	0.09	-0.03	0.02	0.00	0.0024	-0.0004	0.0006
2月	-0.12	0.18	0.09	0.04	-0.03	0.05*	0.0025	0.0001	0.0008
3月	0.71**	0.21	0.01	0.06	0.32**	0.17**	0.0016	-0.0002	0.0009
4月	-0.03	0.62*	0.30**	-0.07	-0.05	0.16**	0.0004	0.0001	0.0010**
5月	-0.53	0.09	0.30	0.18	-0.03	0.04	-0.0010	0.0005	0.0009**
6月	-0.72	0.77	0.04	0.28	-0.18	0.07	-0.0036	0.0007	0.0004**
7月	0.88	-1.05	-0.27	0.03	0.02	0.08	-0.0045	0.0008	0.0005**
8月	-1.16	0.30	0.13	0.18	0.08	0.05	-0.0017	0.0026*	0.0017**
9月	-0.75	-0.97	0.36	0.24	0.09	0.04	0.0012	0.0021**	0.0021**
10月	0.17	0.32	0.12	-0.16*	0.01	0.01	0.0031	0.0014	0.0021**
11月	0.14	0.39**	0.14*	-0.10	0.01	0.00	0.0021	0.0004	0.0011
12月	-0.02	-0.03	-0.01	0.01	0.00	-0.01	0.0015	-0.0003	0.0006

3.2 基于 ABCD-snow 模型的水文过程模拟

为评估模型在黑河上游的适用性与径流模拟能力,将 1980—2000 年设为率定期,2001—2022 年设为验证期,以评估 ABCD-snow 模型模拟径流的性能。

ABCD-snow 模型在黑河上游总体表现出良好的径流模拟效果。水文模拟性能上,NSE 率定期和验证期分别为 0.88 和 0.87,拟合精度较高,而 ABCD 模型分别为 0.88 和 0.86;ABCD-snow 模型的 KGE 在率定期和验证期分别达到 0.90 和 0.82,较 ABCD 模型(0.75 和 0.76)显著提升,表明 ABCD-snow 模型保持了趋势拟合能力,整体拟合性能更强。

水量模拟误差方面,ABCD-snow 模型的水量平衡误差在率定期和验证期分别为-0.04 和 0.04,在率定期略低估、验证期略高估实测径流,整体守恒性较好;相对偏差分别为 3.66 和-4.01,两期之间存在一定的差异,这与黑河上游不同时段实际径流变化幅度较大、降水与融雪年际波动特征有关。尽管模型存在一定的系统性偏差,对部分年份的月径流峰值捕捉能力较低(图 5),但整体模拟精度和稳定性仍优于 ABCD 模型,能较为稳定地反映高寒区的复杂水文过程。

为揭示降雪-融雪过程对黑河上游径流月际分配的影响,基于 ABCD-snow 模型,在保持参数一致的前提下设置剔除融雪模块的对比试验(图 6)。结果表明,两类模型整体性能相当,但在春夏交替阶段,ABCD-snow 模型模拟径流显著偏高。这可能源

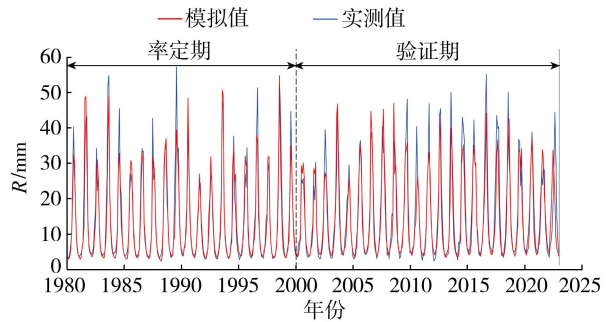


图 5 ABCD-snow 模型径流模拟效果对比

Fig. 5 Comparison of runoff simulation performance of ABCD-snow model

于融雪模块显式引入固态降雪的消融过程,使得部分原本在 ABCD 模型中被分配至下渗或深层渗漏的水量转化为地表径流,从而在融雪时段增加了径流模拟值。可见,融雪模块主要改变了产流路径与时序分配,而非整体水量收支。ABCD-snow 模型不仅较好地再现了春融期径流的动态响应过程,且与实测值吻合度更高。尽管融雪对年总径流的贡献有限,但在月尺度上对暖季径流过程的调节作用不可忽视,融雪模块的引入提升了模型在气候变暖背景下对寒区水文过程的刻画能力。

3.3 多时间尺度径流演变归因

为验证敏感性归因方法在黑河上游的适用性,对径流变化的归因拟合效果进行评估,并进一步对比了参数 n 与 NDVI 的时空一致性(图 7)。在突变前阶段,通过综合考虑 P_r 、 E_p 、 ΔS 、 M 及 NDVI 等多元因子的定量贡献,重构的径流变化趋势与实测径流具有较好的一致性($R^2=0.71$)。同时,NDVI 与 n

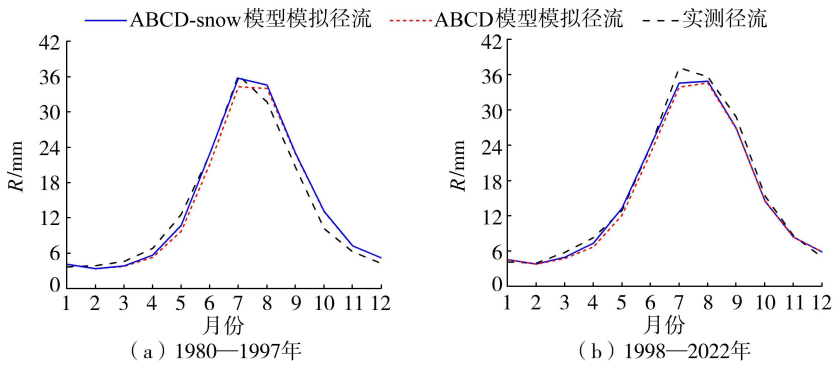


图6 ABCD模型耦合融雪模块前后径流模拟效果对比

Fig. 6 Comparison of runoff simulation performance of ABCD model before and after coupling with snowmelt module

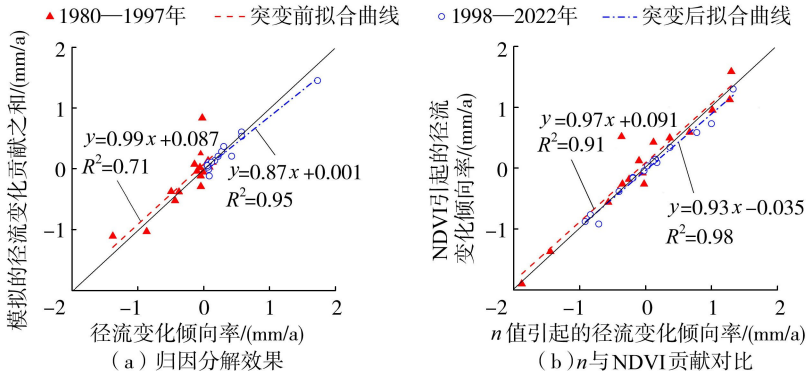


图7 黑河上游径流演变归因效果

Fig. 7 Attribution of runoff evolution in the upper Heihe River

之间呈现明显的正相关 ($R^2 = 0.91$), 表明 NDVI 可有效表征该阶段的下垫面变化, 具有良好的归因指示性。突变后, 径流变化的归因拟合精度进一步提升 ($R^2 = 0.95$), 且 NDVI 与 n 的相关性增强至 $R^2 = 0.98$, 表明本文所运用的敏感性归因分析方法在植被快速增长背景下, 能够反映下垫面的演变特征, 从而更为准确地刻画该流域的气候与下垫面水文响应。

各因子对黑河上游不同时间尺度及阶段径流演变趋势的相对贡献见表 2 和图 8。单因子贡献率基于变化趋势归一化计算并保留符号 (正/负效应); 气候因子和下垫面因子的汇总贡献通过绝对值加总后归一化, 以反映主导类型。

表 2 年、季尺度各影响因子对黑河上游径流演变趋势的相对贡献

Table 2 Relative contributions of various influencing factors to runoff evolution at annual and seasonal scales in the upper Heihe River

时间	相对贡献/%									
	降水量		潜在蒸散发		土壤储水变化量		NDVI		融雪量	
	1980—1997年	1998—2022年	1980—1997年	1998—2022年	1980—1997年	1998—2022年	1980—1997年	1998—2022年	1980—1997年	1998—2022年
年	-17.29	38.54	-30.12	-20.86	23.18	-11.66	19.88	17.55	-9.47	11.33
春季	45.91	52.08	-8.22	-14.67	-20.68	-19.55	-20.49	-13.43	4.52	-1.59
夏季	-28.04	5.63	-18.00	24.01	28.69	10.83	14.51	-16.41	-10.55	43.09
秋季	-60.57	-31.19	4.78	-10.33	5.93	15.82	28.67	40.81	0.00	1.79
冬季	0.00	49.54	-40.41	9.68	24.90	-36.15	39.92	-5.66	0.00	1.73

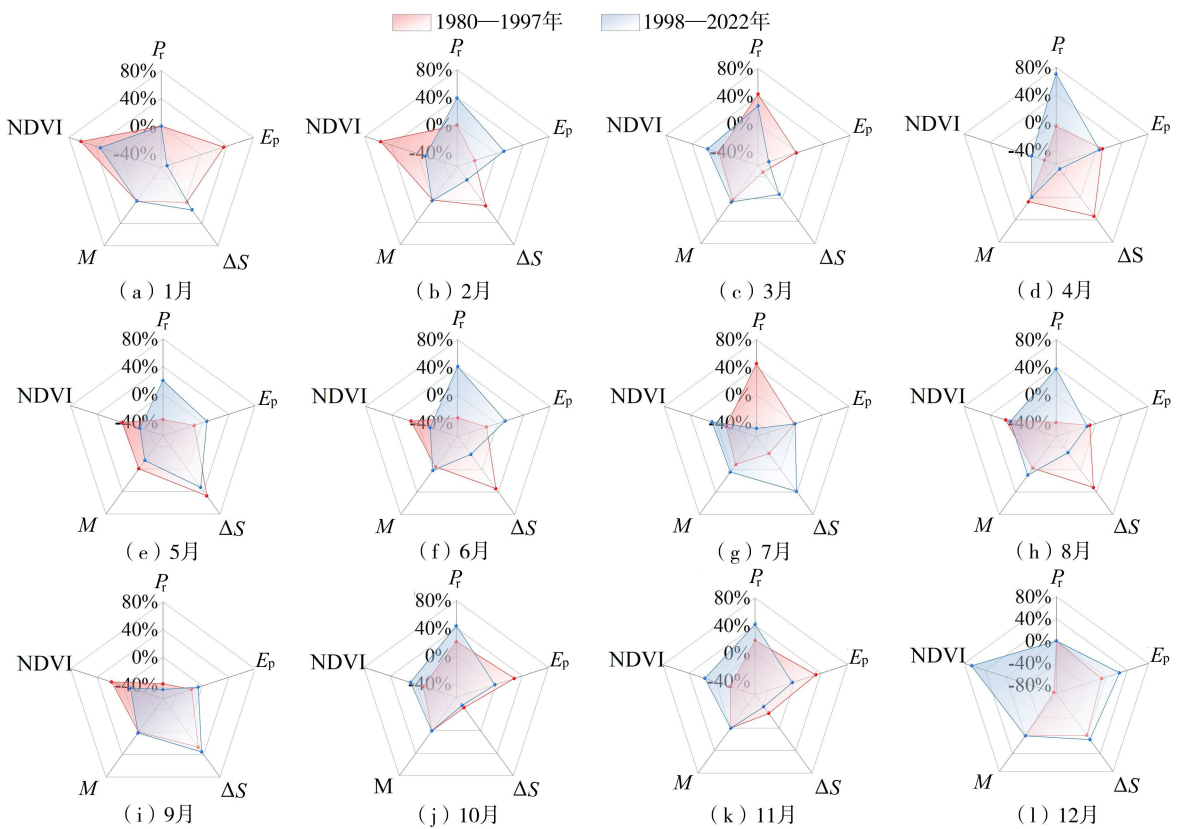


图 8 月尺度各影响因子对黑河上游径流演变趋势的相对贡献

Fig. 8 Relative contributions of various influencing factors to runoff evolution at monthly scale in the upper Heihe River

献;秋季降雨持续下降(-60.57%),9月贡献达-38.54%,造成年径流量的减少;冬季则以蒸散发的负效应最为突出(-37.17%),其中2月贡献达-33.09%,但NDVI在冷季发挥了显著正向作用(39.92%),其中1、2月贡献分别高达61.99%、56.39%,对基流维持具有重要意义。

b. 1998—2022年。年际径流显著上升,气候因子主导作用进一步增强(贡献为70.73%)。其中,降雨增加贡献38.54%,是径流恢复的首要驱动力,融雪贡献上升至11.33%,体现了升温背景下的正反馈效应;潜在蒸散发的负效应减弱至-20.86%。季节上,春季降雨增加最为突出(52.08%),4月贡献高达70.24%,但 ΔS 在此时转为强负效应(-51.00%),显示土壤蓄水功能下降削弱了调蓄能力;夏季融雪贡献增加显著(43.09%),同时6月潜在蒸散发表现为正向作用(12.14%);秋季NDVI对径流恢复的作用明显(40.81%);冬季降雨贡献占48.06%,12月潜在蒸散发(25.20%)和NDVI(66.22%)共同作用,使冷季径流得到维持, ΔS 在冬季的负效应(-36.15%)也较为突出。

尽管存在多因子协同作用,突变前后各时间尺度的耦合贡献率整体偏低(图9)。年、季节尺度贡

献率均低于0.3%,多数月份低于1.1%;仅冬至至春初(1—5月)气温波动、植被快速响应阶段贡献率略有抬升,其中突变前3月相对贡献最高,达5.26%。上述结果表明,黑河上游径流变化主要受气候与下垫面因子的独立作用驱动,因子间协同效应对径流演变的整体影响较弱。从径流演变过程来看,研究区突变前后径流总体变幅较小,月尺度波动尤为平缓,使得归因分析中各单因子及因子协同作用的绝对贡献值均处于低位。

4 讨论

在气候变暖背景下,黑河上游径流年内演变呈现先减后增的阶段性特征,反映出高寒区水文系统对气温变化的敏感响应。显式引入融雪模块的ABCD-snow模型可较好再现春季产流峰值,说明了升温加速积雪消融对径流时序重构的影响^[43],未考虑融雪过程的ABCD模型在春末夏初对径流量出现低估,这与青藏高原北缘观测到的规律一致,即升温驱动早期集中融雪成为春季径流的重要因素^[44]。Barnett等^[45]研究指出,变暖现象将使冬季降水更多以雨代雪、积雪融化提前,从而导致径流峰值从夏秋向冬末春初发生提前。从黑河上游径流演变归因结

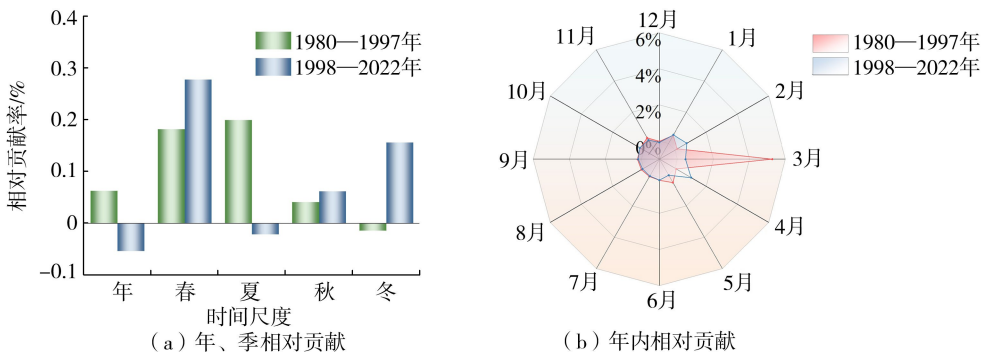


图9 耦合作用对黑河上游径流趋势演变的相对贡献

Fig. 9 Relative contributions of coupling effects to runoff evolution in the upper Heihe River

果来看,气候因子的主导性依然显著增强。1997年后,各季节降雨和融雪增强共同驱动径流增长,其相对贡献由56.9%升至70.7%,这一以气候因子独立贡献为主、多因子协同作用偏弱的模式在西北内陆河流域的研究中得到进一步验证。例如,在疏勒河与叶尔羌河流域,冰川融水被证实是出山径流变化的绝对主导因素^[46],凸显了寒旱区水文响应以单一天然气候-冰冻圈要素为主导的共性特征^[47-48]。而在人类活动强烈的湿润流域,研究发现降水增加和下垫面改变共同成为径流增加的主要驱动力,贡献率相当^[49]。不同流域的驱动模式对比证实,黑河上游以气候因子主导为特征的水文响应模式,可归因于其人类活动微弱、下垫面均一的特有流域属性。此外,冬季径流变化不大,但多年冻土退化造成的隔水层削弱可能增强地下水补给^[50],且冻结-融化过程可通过调节土壤水储量影响春季产流过程。

通过将NDVI与Budyko水量平衡方程中的参数 n 建立经验关联,有效量化了植被变化对径流演变趋势的影响。突变前二者显著相关($R^2=0.91$),表明在稳定气候背景下NDVI可有效调节径流,这与Ji等^[51]研究结论一致。突变后相关性进一步增强($R^2=0.98$),归因模型拟合精度同步提升($R^2=0.95$),说明在植被加速增长背景下,NDVI能够更好地反映下垫面演变特征,并在水文响应过程中展现出较强的解释力。

尽管本文构建了融合多时空尺度的水文归因框架,在提升径流变化机理认识方面取得了一定成效,但仍存在一些不确定性:①参数 n 缺乏明确的物理指向性,其动态变化机制可能受多种气候与下垫面因子的耦合作用所驱动,目前仅以NDVI为代表的单因子驱动方式虽总体效果令人满意,但尚不够全面反映其演变规律^[52],且二阶泰勒展开虽能定量因子间交互作用,但对复杂非线性反馈的表征有限,实际的非线性耦合效应可能未被完整刻画。②模型尚

未显式刻画冻土退化与冰川融水过程。Triplet等^[50]研究表明,冰川融水可贡献黑河上游年径流量的3%~10%。③地下水过程目前仅通过深层渗漏项间接反映,对裂隙水补给及地表-地下水交换的描述仍显不足,可能低估了其对冬季及早春阶段的实际径流贡献。未来研究可通过引入冻土-冰川与地下水动力耦合模块,结合高分辨率遥感与加密监测网络,以提升对寒区复杂水文过程表征能力和模型预测精度。

5 结论

a. 1980—2022年黑河上游径流在1997年发生突变,突变前年径流量呈不显著下降趋势,夏秋季减幅明显;同期降水减少,潜在蒸散发持续增强,NDVI呈缓慢增加趋势。突变后年径流量显著增加,除夏季外,其余季节呈显著增长态势;降水转为上升趋势,潜在蒸散发量增幅趋缓,NDVI增势加快,下垫面条件持续改善。

b. 引入融雪模块提升了模型的径流模拟精度。相比原始ABCD模型,ABCD-snow模型在率定期的KGE由0.75提升至0.90,验证期由0.76提升至0.82,更好地再现了春季降水量与融雪时序叠加引发的径流放大效应,纠正了原模型对春末夏初径流的系统性低估,突出了融雪过程在高寒区产流模拟中的关键作用。

c. 1980—1997年径流持续衰减主要归因于夏秋季(尤其是6月、8月、9月)降雨不足与潜在蒸散发量增强为主导,尽管下垫面因子在部分时段发挥了缓冲作用,但不足以扭转整体趋势;1998—2022年径流增加则由春冬季(尤其是2月、4月、11月)降雨回升和夏季融雪增强主导,下垫面因子在不同季节表现为放大或削弱效应,气候因子的主导性进一步凸显,由突变前的56.9%提升至突变后的70.7%。多因子协同作用整体偏弱,普遍低于

1.1%,仅在冬末春初表现相对明显,径流变化仍以单一气候因子或下垫面要素主导。

参考文献:

- [1] 王玉洁,秦大河. 气候变化及人类活动对西北干旱区水资源影响研究综述[J]. 气候变化研究进展,2017,13(5):483-493. (Wang Yujie, Qin Dahe. Influence of climate change and human activity on water resources in arid region of northwest China: an overview [J]. Climate Change Research,2017,13(5):483-493. (in Chinese))
- [2] 夏鸿华,杨林山,冯起,等. 西部高寒山区气候变化对径流影响的研究进展[J]. 盐湖研究,2025,33(4):12-25. (Xia Honghua, Yang Linshan, Feng Qi, et al. Progress of research on the impact of climate change on hydrological processes in cold regions in alpine mountains of western China [J]. Journal of Salt Lake Research, 2025, 33(4): 12-25. (in Chinese))
- [3] 崔延华,宋悦,粟晓玲. 祁连山区气候变化对黑河出山径流的影响[J]. 人民黄河,2017,39(5):15-20. (Cui Yanhua, Song Yue, Su Xiaoling. Impacts of climate change in Qilian Mountain area on runoff in Heihe River Basin [J]. Yellow River, 2017, 39(5): 15-20. (in Chinese))
- [4] Wang Lei, Koike T, Yang Kun, et al. Frozen soil parameterization in a distributed biosphere hydrological model[J]. Hydrology and Earth System Sciences,2010,14(3):557-571.
- [5] Gao Bing, Yang Dawen, Qin Yue, et al. Change in frozen soils and its effect on regional hydrology, upper Heihe Basin, northeastern Qinghai-Tibetan Plateau [J]. The Cryosphere,2018,12(2):657-673.
- [6] Miles E, Mccarthy M, Dehecq A, et al. Health and sustainability of glaciers in high mountain Asia[J]. Nature Communications,2021,12(1):2868.
- [7] Wang Ning, Liu Wenbin, Wang Hong, et al. Improving streamflow and flood simulations in three headwater catchments of the Tarim River based on a coupled glacier-hydrological model [J]. Journal of Hydrology, 2021, 603: 127048.
- [8] Barnhart T B, Molotch N P, Livneh B, et al. Snowmelt rate dictates streamflow [J]. Geophysical Research Letters, 2016,43(15):8006-8016.
- [9] Liu Wenbin, Sun Fubao, Li Yanzhong, et al. Investigating water budget dynamics in 18 river basins across the Tibetan Plateau through multiple datasets [J]. Hydrology and Earth System Sciences,2018,22(1):351-371.
- [10] Xu Min, Kang Shichang, Wang Xiaoming, et al. Understanding changes in the water budget driven by climate change in cryospheric-dominated watershed of northeast Tibetan Plateau, China [J]. Hydrological Processes,2019,33(7):1040-1058.
- [11] Budyko M I. Climate and life[M]. New York: Academic Press, 1974.
- [12] 王宣宣,刘欢,胡鹏,等. 基于水量平衡原理和 Budyko 假设的强人类活动干扰下西辽河流域径流衰减归因分析[J]. 水资源保护,2024,40(6):165-172. (Wang Xuanxuan, Liu Huan, Hu Peng, et al. Attribution analysis of runoff attenuation in the Xiliao River Basin under significant human interference based on water balance principle and Budyko hypothesis [J]. Water Resources Protection, 2024, 40(6):165-172 (in Chinese))
- [13] 尹振良,朱睿,方春爽,等. 基于 Budyko 假设的昌马河流域径流变化归因分析[J]. 中国沙漠,2024,44(6):110-121. (Yin Zhenliang, Zhu Rui, Fang Chunshuang, et al. Attribution analysis of runoff variation in the Changma River Basin based on Budyko hypothesis [J]. Journal of Desert Research,2024,44(6):110-121 (in Chinese))
- [14] 曹振江,姬广兴,杨瑞婷,等. 黄河源实际蒸发和径流变化多时间尺度归因分析[J]. 水土保持研究,2025,32(1):182-191. (Cao Zhenjiang, Ji Guangxing, Yang Ruiting, et al. Multi-temporal scale attribution analysis of actual evapotranspiration and runoff changes in the source area of Yellow River [J]. Research of Soil and Water Conservation,2025,32(1):182-191 (in Chinese))
- [15] 庄稼成,星寅聪,李艳忠,等. 基于改进 ABCD 模型的黄河源区径流变化与归因[J]. 南水北调与水利科技(中英文),2022,20(5):953-965. (Zhuang Jiacheng, Xing Yincong, Li Yanzhong, et al. Attribution analysis of runoff change based on the ABCD model coupled with the snowmelt module in the source region of Yellow River [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2022,20(5):953-965. (in Chinese))
- [16] 李秋菊,李占玲,王杰. 黑河流域上游径流变化及其归因分析[J]. 南水北调与水利科技,2019,17(3):31-39. (Li Qiuju, Li Zhanling, Wang Jie. Variation and attribution of runoff over the upper reaches of Heihe River Basin [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2019,17(3):31-39. (in Chinese))
- [17] 党素珍,刘昌明,王中根,等. 近 10 年黑河流域上游积雪时空分布特征及变化趋势[J]. 资源科学,2012,34(8):1574-1581. (Dang Suzhen, Liu Changming, Wang Zhonggen, et al. Spatio-temporal distribution characteristics of snow cover in the upper reaches of Heihe River Basin over the past 10 years and the variation trend [J]. Resources Science, 2012, 34(8): 1574-1581. (in Chinese))
- [18] 张璇,朱睿,尹振良,等. 基于 SWAT+模型的黑河上游

- 山区水文要素变化模拟与预测[J]. 高原气象, 2025, 44(6): 1476-1488. (Zhang Xuan, Zhu Rui, Yin Zhenliang, et al. Simulation and prediction of hydrological element change in the upper reaches of Heihe River based on SWAT+ model [J]. Plateau Meteorology, 2025, 44(6): 1476-1488. (in Chinese))
- [19] MUÑOZ-Sabater J, Dutra E, Agustí-Panareda A, et al. ERA5-Land: a state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications[J]. Earth System Science Data, 2021, 13(9): 4349-4383.
- [20] Li Yanzhao, Qin Xiang, Liu Yushuo, et al. Evaluation of long-term and high-resolution gridded precipitation and temperature products in Qilian Mountains, Qinghai-Tibet Plateau[J]. Frontiers in Environmental Science, 2022, 10: 906821.
- [21] Peng Shouzhong, Ding Yongxia, Wen Zhongming, et al. Spatiotemporal change and trend analysis of potential evapotranspiration over the Loess Plateau of China during 2011-2100 [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2017, 233: 183-194.
- [22] Li Huiwen, Cao Yue, Yuan Zuoqiang, et al. A daily gap-free normalized difference vegetation index dataset from 1981 to 2023 in China[J]. Scientific Data, 2024, 11(1): 527.
- [23] 吴光东, 许继军, Gupta H, 等. 新安江流域 ABCD 水量平衡模型及参数敏感性分析[J]. 长江科学院院报, 2019, 36(7): 23-27. (Wu Guangdong, Xu Jijun, Gupta H, et al. The ABCD water balance model; application to Xin'an River Basin and sensitivity analysis [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2019, 36(7): 23-27. (in Chinese))
- [24] 刘洁, 张伟, 夏军, 等. 2000—2016 年度日模型的主要研究进展及关键问题[J]. 冰川冻土, 2017, 39(4): 801-810. (Liu Jie, Zhang Wei, Xia Jun, et al. Study of degree-day model from 2000 to 2016: the main progress and key issues [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2017, 39(4): 801-810. (in Chinese))
- [25] Lindstrom G, Johansson B, Persson M, et al. Development and test of the distributed HBV-96 hydrological model [J]. Journal of Hydrology, 1997, 201(1-4): 272-288.
- [26] Martinec J, Rango A. Parameter values for snowmelt runoff modelling [J]. Journal of Hydrology, 1986, 84(3-4): 197-219.
- [27] 韩春坛, 陈仁升, 刘俊峰, 等. 固态降水分离方法探讨 [J]. 冰川冻土, 2010, 32(2): 249-256. (Han Chuntan, Chen Rensheng, Liu Junfeng, et al. A discuss of the separating solid and liquid precipitations [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2010, 32(2): 249-256. (in Chinese))
- [28] Reshma T, Reddy K V, Pratap D, et al. Optimization of calibration parameters for an event based watershed model using genetic algorithm [J]. Water Resources Management, 2015, 29(13): 4589-4606.
- [29] Nash J E, Sutcliffe I V. River flow forecasting through conceptual models part I - A discussion of principles [J]. Journal of Hydrology, 1970, 10(3): 282-290.
- [30] Gupta H V, Kling H, Yilmaz K K, et al. Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria; implications for improving hydrological modelling [J]. Journal of Hydrology, 2009, 377(1): 80-91.
- [31] Li Chunzhu, Zhang Lu, Wang Hao, et al. The transferability of hydrological models under nonstationary climatic conditions [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2012, 16(4): 1239-1254.
- [32] Legates D R, McCabe G J. Evaluating the use of "goodness-of-fit" measures in hydrologic and hydroclimatic model validation [J]. Water Resources Research, 1999, 35(1): 233-241.
- [33] Moriasi D N, Arnold J G, Van Liew M W, et al. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations [J]. Transactions of the ASABE, 2007, 50(3): 885-900.
- [34] 杨汉波, 杨大文, 雷志栋, 等. 任意时间尺度上的流域水热耦合平衡方程的推导及验证 [J]. 水利学报, 2008(5): 610-617. (Yang Hanbo, Yang Dawen, Lei Zhidong, et al. Derivation and validation of watershed coupled water-energy balance equation at arbitrary time scale [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008(5): 610-617. (in Chinese))
- [35] Du Chaoyang, Sun Fubao, Yu Jingjie, et al. New interpretation of the role of water balance in an extended Budyko hypothesis in arid regions [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2016, 20(1): 393-409.
- [36] Yang Linshan, Feng Qi, Ning Tingting, et al. Attributing the streamflow variation by incorporating glacier mass balance and frozen ground into the Budyko framework in alpine rivers [J]. Journal of Hydrology, 2024, 628: 130438.
- [37] 吴贞晖, 梅亚东, 朱迪, 等. 基于拓展敏感性方法和 ABCD 模型的流域枯季径流归因分析 [J]. 长江流域资源与环境, 2020, 29(6): 1366-1373. (Wu Zhenhui, Mei Yadong, Zhu Di, et al. Dry season runoff attribution in basin based on extended hydrological sensitivity method and ABCD model [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2020, 29(6): 1366-1373. (in Chinese))
- [38] Long Di, Pan Ming, Cong Zhentao, et al. Vegetation control on water and energy balance within the Budyko framework [J]. Water Resources Research, 2013, 49(2): 969-976.

(下转第 260 页)

on ESTARFM Model [J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2024, 45(9) : 953-967. (in Chinese)

[32] 陈默, 林育青, 张建云, 等. 水生态系统生产总值核算体系及应用 [J]. 水资源保护, 2023, 39(1) : 234-242. (Chen Mo, Lin Yuqing, Zhang Jianyun, et al. Accounting system of gross water ecosystem product and its application [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(1) : 234-242. (in Chinese))

[33] 李旭杰, 虞玉诚. 基于博弈论的南水北调水资源调度算

法研究 [J]. 水利发展研究, 2013, 13(10) : 33-35. (Li Xujie, Yu Yucheng. Research on water resources dispatch algorithm of South-to-North Water Transfer Project based on game theory [J]. Water Resources Development Research, 2013, 13(10) : 33-35. (in Chinese))

[34] 刘伟莉. 博弈论在水资源配置中的应用研究 [D]. 南京: 河海大学, 2007.

(收稿日期: 2025 - 05 - 12 编辑: 胡新宇)

(上接第 208 页)

[39] Yue Siyuan, Huang Jinlei, Zhang Yao, et al. Quantitative evaluation of the impact of vegetation restoration and climate variation on runoff attenuation in the Luan River Basin based on the extended Budyko model [J]. Land, 2023, 12(8) : 1626.

[40] Mann H B. Nonparametric tests against trend [J]. Econometrica, 1945, 13(3) : 245-259.

[41] 徐宗学, 班春广, 张瑞. 我国主要河川径流演变规律与归因及其区域特征 [J]. 水利水电科技进展, 2024, 44(1) : 1-8. (Xu Zongxue, Ban Chunguang, Zhang Rui. Evolution law, attribution and regional characteristics of runoff for major rivers in China [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44(1) : 1-8. (in Chinese))

[42] Yamamoto R, Iwashima T, Sanga N K, et al. An analysis of climatic jump [J]. Journal of the Meteorological Society of Japan; Series II, 1986, 64(2) : 273-281.

[43] Barnett T P, Adam J C, Lettenmaier D P. Potential impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions [J]. Nature, 2005, 438(7066) : 303-309.

[44] Wang Xianwei, Gao Bing, Wang Xufeng. A modified ABCD model with temperature-dependent parameters for cold regions; application to reconstruct the changing runoff in the headwater catchment of the Golmud River, China [J]. Water, 2020, 12(6) : 1812.

[45] Barnett T P, Adam J C, Lettenmaier D P. Potential impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions [J]. Nature, 2005, 438(7066) : 303-309.

[46] 李光轩, 赵钟楠, 李原园, 等. 气候变化下西北内陆河典型流域出山径流变化归因分析 [J]. 水资源保护, 2025, 41(3) : 62-72. (Li Guangxuan, Zhao Zhongnan, Li Yuanyuan, et al. Analysis of mountain runoff evolution in

typical basins of northwest inland rivers under climate change [J]. Water Resources Protection, 2025, 41(3) : 62-72. (in Chinese))

[47] Luo Kai, Tao Fulu, Moiwo J P, et al. Attribution of hydrological change in Heihe River Basin to climate and land use change in the past three decades [J]. Scientific Reports, 2016, 6(1) : 33704.

[48] 王宇涵, 杨大文, 雷慧闽, 等. 冰冻圈水文过程对黑河上游径流的影响分析 [J]. 水利学报, 2015, 46(9) : 1064-1071. (Wang Yuhan, Yang Dawen, Lei Huimin, et al. Impact of cryosphere hydrological processes on the river runoff in the upper reaches of Heihe River [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(9) : 1064-1071. (in Chinese))

[49] 司伟, 黄思琦, 王培霞, 等. 富春江水库流域径流变化及其量化归因分析 [J]. 河海大学学报 (自然科学版), 2025, 53(3) : 1-7. (Si Wei, Huang Siqi, Wang Peixia, et al. Analysis of runoff evolution in Fuchunjiang Reservoir Basin and its quantitative attribution [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2025, 53(3) : 1-7. (in Chinese))

[50] Triplett A, Condon L E. Climate-warming-driven changes in the cryosphere and their impact on groundwater-surface-water interactions in the Heihe River Basin [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2023, 27(14) : 2763-2785.

[51] Ji Guangxing, Yue Shuaijun, Zhang Jincai, et al. Assessing the impact of vegetation variation, climate and human factors on the streamflow variation of Yarlung Zangbo River with the corrected Budyko equation [J]. Forests, 2023, 14(7) : 1312.

[52] Zheng Jiahao, Jiang Xiaohui. Attribution identification of runoff variation in Kuye River based on Budyko's theory of water and heat balance [J]. Journal of Water Resources Research, 2020, 9: 471.

(收稿日期: 2025 - 07 - 22 编辑: 胡新宇)