

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2022.0095

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 J C, XING Y C, LI Y Z, et al. Attribution analysis of runoff change based on the *abcd* model coupled with the snowmelt module in the source region of the Yellow River[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2022, 20(5): 953-965. (in Chinese)

基于改进 *abcd* 模型的黄河源区径流变化与归因

庄稼成¹, 星寅聪¹, 李艳忠¹, 刘晓聪², 杨泽龙^{1,3}, 赵紫春¹,
王启素¹, 谢雨初¹, 王洁¹, 白鹏³, 刘昌明³

(1. 南京信息工程大学水文与水资源工程学院, 南京 210044; 2. 四川省生态环境科学研究院, 成都 610094;
3. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要: 为改进模型对高寒地区融雪径流模拟不足的缺陷, 将融雪模块耦合到传统 *abcd* 模型。利用 1980—2018 年逐月实测的径流数据和通过 AnuSpline 方法插值的格网气象要素, 驱动改进后的 *abcd* 模型, 分析三江源生态保护措施实施前后(1980—1999 年和 2000—2018 年)黄河源区径流的动态变化, 并量化关键气象因素与人类活动对径流变化的影响程度, 即相对贡献。结果表明: 耦合融雪模块的 *abcd-snow* 模型完善了高寒地区水文过程的模拟, 提高对径流的模拟性能, 在黄河源区表现出较好的适用性; 整个研究时段黄河源区的实测径流呈不显著减少趋势(-0.80 mm/a, $p>0.05$), 但 2000 年前径流则呈现显著下降趋势(-4.12 mm/a, $p<0.05$), 2000 年后径流则呈显著增加趋势(3.16 mm/a, $p<0.05$); 归因分析表明气候变化是源区径流变化的主导因素。2000 年前, 气候变化对径流减少的相对贡献率为 62.8%, 人类活动对径流的贡献为 37.2%; 2000 年后, 气候变化对径流增加的贡献率达到 120.0%, 人类活动对径流的贡献为-20.0%。其中: 降水的变化是决定径流变化主导因素; 其他气候因素的相对贡献较小; 以人类活动为主的生态恢复可显著降低河川径流。本研究有助于理解气候变化和下垫面变化对黄河源区水资源变化的系统驱动机理, 并为流域水资源合理配置提供科学参考依据。

关键词: 径流变化; 黄河源区; 度日模型; *abcd* 水文模型; 气候变化; 归因分析

中图分类号: TV214 文献标志码: A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



黄河源区作为黄河流域的重要产水区和水源涵养区, 对黄河流域生态保护和高质量发展具有重要意义^[1]。但是, 受极端高寒环境的影响, 黄河源区的生态环境极其脆弱, 对气候变化和人类活动的干扰十分敏感。为保护脆弱的生态环境, 我国在 2005 年实施生态保护工程, 并于 2016 年将三江源区设立为首个国家公园。近年来, 气候变暖导致黄河源区水循环过程加快, 进而改变了源区的产流过程^[2]。此外, 随着经济社会的发展和生态恢复工程的大规模持续推行, 源区人类活动不断增强, 影响了草原和

湿地等生态格局, 进而对源区径流产生较大影响^[1]。在近 40 年急剧变化的环境下, 黄河源区径流到底发生了哪些变化? 特别是在 2000 年左右实施生态环境保护前后的变化如何? 变化的驱动机制是什么? 这些科学问题的揭示将决定着黄河中下游流域水资源利用和配置^[3], 对流域的可持续发展具有重要的科学和实践价值。

对径流变化的归因分析, 大多采用基于数理统计的方法^[4-6]、基于半经验半定量 Budyko 假设的弹性系数法^[7-9]和水文模型法^[11]。数理统计分析难以

收稿日期: 2022-04-18 修回日期: 2022-08-02 网络出版时间: 2022-10-08

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20220929.1454.001.html>

基金项目: 国家自然科学基金项目(42177436; 41701019); 四川省重大科技专项(2018SZDZX0025); 江苏省研究生科研与实践创新计划项目(KYCX22_1210)

作者简介: 庄稼成(1998—), 男(满族), 辽宁丹东人, 主要从事水文气象与 3S 技术应用研究。E-mail: 595710581@qq.com

通信作者: 刘晓聪(1990—), 女, 河南周口人, 工程师, 主要从事水环境模拟研究。E-mail: liu_xc@126.com

模拟不同因素对径流的作用机理,且对径流和影响因素的相关性要求较高,得出的结论缺乏说服力。弹性系数法简单地将气候因素划分为降水和潜在蒸散发两项,难以精细刻画不同气候因素对径流变化的贡献;研究发现,气候季节性变化的影响常被不合理地归因到参数 n 中,但参数 n 主要用来表征人类活动的影响^[10-12],所以,这样会导致低估气候变化的影响。因而,采用这两种方法对黄河源区径流变化及其影响因素的分析具有较大的不确定性。相对而言,水文模拟法则具有物理概念清晰、对径流过程的模拟精度较高等优点,弥补了上述两种方法的不足,并能精确刻画降水、蒸散发、下渗、产汇流等水循环过程。常用的水文模型又可分为基于物理机制的分布式水文模型和概念性水文模型,其中概念性水文模型不仅具有与分布式水文模型相近的精度,还具有参数少、易优化、计算简便等优势,现已广泛应用于诸多研究^[11,13]。

在诸多概念性水文模型中,Thomas^[14]提出的 $abcd$ 水文模型仅涉及 4 个参数,但明确包含了主要水文过程,具有概念清楚、参数少且易优化、模拟精度高等优点,在科研领域得到了广泛应用^[15]。例如: Bai 等^[16]在中国 153 个不同气候条件的流域比较了 12 个月尺度水文模型,其中 $abcd$ 水文模型展现出较好的适用性。吴光东等^[15]将 $abcd$ 水文模型用于新安江流域的径流模拟,并对模型参数进行敏感性分析,认为该模型模拟精度高、具有较高的适用性,能够广泛应用于我国中小流域。何玉芬等^[11]基于 $abcd$ 水文模型,对北大沙河流域径流变化进行了归因分析,并与基于弹性系数法的归因分析结果进行比较,认为弹性系数法未考虑气象要素年内分配,可能低估气候变化对径流的影响。但是,由于黄河源区地处寒区,降雪、融雪过程是该地区径流生成不可或缺的组成部分,而 $abcd$ 水文模型本身缺少对降雪、融雪过程的模拟,直接在黄河源区运用该模型会导致对水文过程刻画不合理。所以,将融雪模块和传统 $abcd$ 水文模型耦合,将成为解决高寒地区水文过程精确模拟的有效途径。

基于此,本研究选择黄河源区作为研究区:构建耦合融雪模块的 $abcd$ -snow 水文模型,并检验其在高寒地区的水文模拟性能;分析源区 1980—2018 年以及 2000 年前后的径流变化趋势,并基于改进的模型和去趋势分析法,揭示不同因素对径流变化的相对贡献。研究结果不仅有助于深化对高寒区水

循环过程的认识,还为黄河流域生态保护和高质量发展提供理论支撑。

1 研究区与研究方法

1.1 研究区概况

黄河源区位于 32°N ~ 36°N、95°E ~ 103°E,流域径流发源于雅拉达泽山东坡的约古宗列曲,环绕阿尼玛卿山流向西北,到达唐乃亥水文站。黄河源区流域面积约 12.20 万 km²,海拔高程 1800~4200 m,地势西北高、东南低,属于典型的高寒地区,见图 1。黄河源区水系河网密布,径流量主要受降水量影响,冰川融水和地下水也对其产生一定的影响^[17]。

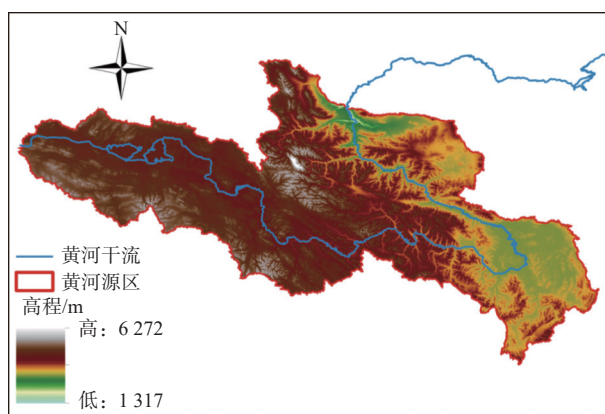


图 1 黄河源区示意图

Fig. 1 Location of the source region of the Yellow River

1.2 数据

本研究采用的国家标准气象站数据,通过 Anusplin 软件插值生成的、空间分辨率为 0.05°的数据,包括逐日最高气温、最低气温、平均气温、降水量、2 m 风速、日照时数和相对湿度 7 项数据。Anusplin 软件的插值结果考虑地形等因素,相较于一般的插值算法,其结果更为可靠^[18]。数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)来自地理空间数据云,流域边界通过 DEM 数据提取。 $abcd$ 水文模型所需流域面尺度气象驱动数据,通过流域边界数据裁剪,并利用算术平均法获得。唐乃亥水文站 1980—2018 年径流量数据来自水文年鉴。考虑到自 20 世纪 90 年代开始的生态恢复工程,将研究时段划分为 1980—1999 年与 2000—2018 年两个时期,以对比研究不同时期下气候变化和人类活动对径流变化的影响。潜在蒸散发(potential evapotranspiration, PET)的计算采用联合国粮农组织(Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO)修正的 Penman-Monteith 方法。

1.3 耦合融雪模块的 *abcd* 水文模型

黄河源区属于高寒区,在径流模拟时考虑研究时段内积雪、融雪过程,才能更加真实地刻画高寒地区的水文过程。因此,在 *abcd* 水文模型中耦合融

雪模块,以提升模型模拟黄河源区径流以及对水文气象要素变化响应的能力。将耦合融雪模块的 *abcd* 水文模型称为 *abcd-snow* 模型,模型结构见图 2。

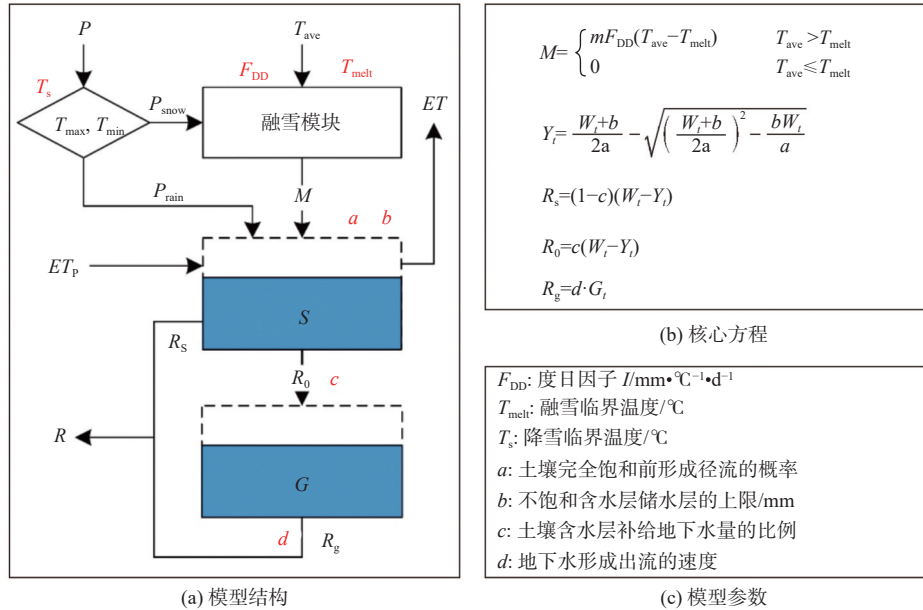


图 2 *abcd-snow* 模型结构、核心方程和参数

Fig. 2 The model structure, key equations and parameters in the *abcd-snow* model

积雪融雪量的获取方法主要包括地面检测、遥感观测和模型模拟 3 种,其中度日模型是最常用的模型模拟方法,该方法仅需要温度数据,具有数据获取简单、计算方便、具有与物理模型相近的输出结果等优点,被广泛应用于国内外融雪量计算^[19]。度日模型的基本假设为一日内融雪量和气温存在显著的正线性关系:

$$M_d = \begin{cases} F_{DD} (T - T_{melt}) & T > T_{melt} \\ 0 & T \leq T_{melt} \end{cases} \quad (1)$$

式中: M_d 为日融雪量, mm/d ; F_{DD} 为度日因子, $mm/(^\circ C \cdot d)$; T 为气温, $^\circ C$; T_{melt} 为融雪临界温度, $^\circ C$ 。由于 *abcd* 水文模型的时间尺度为月尺度,而度日模型的时间尺度为日尺度,基于公式(2)将度日模型扩展至月尺度,便于与 *abcd* 水文模型进行时间尺度的匹配^[20],最终得到如公式(3)所示的月尺度度日模型。

$$M = \sum_{i=1}^m M_{d,i} = F_{DD} m \left(\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m M_{d,i} \right) \quad (2)$$

$$M = \begin{cases} m F_{DD} (T_{ave} - T_{melt}) & T_{ave} > T_{melt} \\ 0 & T_{ave} \leq T_{melt} \end{cases} \quad (3)$$

式中: M 为月融雪量, $mm/月$; m 为当月的天数, d ; $M_{d,i}$ 为当月第 i 日的融雪量, mm/d ; T_{ave} 为流域月平均气温, $^\circ C$ 。

度日模型所计算的融雪量是基于能量概念的最大融雪量,实际融雪量不可能超过当地积雪储量。积雪储量及其变化可通过水量平衡原理计算。计算积雪储量的关键是将降水分离为降雨和降雪。目前大多数水文模型采用临界气温法来分离降雨和降雪^[19]。临界气温法又可分为单临界气温法和双临界气温法两种。其中,单临界气温法在中国适用效果较好,而双临界气温法只适用于干旱地区^[19,21]。在黄河源区采用单临界气温法对降水成分进行划分,公式为

$$P_{snow} = \begin{cases} P & T_{max} < T_s \\ P \left(1 - \frac{T_{max} - T_s}{T_{max} - T_{min}} \right) & T_{min} < T_s < T_{max} \\ 0 & T_{min} > T_s \end{cases} \quad (4)$$

$$P_{rain} = P - P_{snow} \quad (5)$$

式中: P_{snow} 为月降雪量, mm ; P 为月降水量, mm ; P_{rain} 为月降雨量, mm ; T_{max} 和 T_{min} 分别为月最高气温和月最低气温, $^\circ C$; T_s 为降雪临界气温, $^\circ C$ 。对于积雪层,存在水量平衡方程:

$$S_{snow,t-1} + P_{snow,t} = S_{snow,t} + M_t \quad (6)$$

式中: $S_{snow,t-1}$ 为上月积雪储量, mm ; $S_{snow,t}$ 为当月积雪储量, mm 。根据水量平衡方程(5),若由度日模

型计算得到的月融雪量 $M > S_{\text{snow},t-1} + P_{\text{snow},t}$, 则 $M_t = S_{\text{snow},t-1} + P_{\text{snow},t}$, 否则 $M_t = M$, 并更新当月积雪储量。

abcd 水文模型的原理可见文献 [15], 其共有 4 个参数 a 、 b 、 c 、 d , 降水划分模块和融雪模块中有 3 个参数 F_{DD} 、 T_{melt} 、 T_s , 因此 *abcd-snow* 模型共有 7 个参数。在将模型应用至流域前, 需要在不同研究期率定上述 7 个参数。本研究参数率定方法采用遗传算法, 算法中种群数设为 250, 世代数设为 700, 其他参数依照 MATLAB 软件默认设定, 参数率定的目标函数采用纳什效率系数 (E_{NS})。在水文模型模拟精度评价指标方面, 对于水文过程的评价, 采用 E_{NS} 和 Kling-Gupta 效率系数^[22] (E_{KG}), 最优值为 1; 对于水量误差方面, 采用均方根误差 (E_{RMS}) 和相对偏差 (E_{BIAS}), 最优值为 0。 E_{NS} 、 E_{KG} 、 E_{RMS} 和 E_{BIAS} 可分别通过式(7)~(10)计算。

$$E_{\text{NS}} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\sqrt{R_{\text{sim},i}} - \sqrt{R_{\text{obs},i}})^2}{\sum_{i=1}^n (\sqrt{R_{\text{obs},i}} - \sqrt{R_{\text{obs},i}})^2} \quad (7)$$

$$E_{\text{KG}} = 1 - \sqrt{(r-1)^2 - (\alpha-1)^2 - (\beta-1)^2}, \quad \alpha = \sigma_{\text{sim}} / \sigma_{\text{obs}}, \quad \beta = \mu_{\text{sim}} / \mu_{\text{obs}} \quad (8)$$

$$E_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (R_{\text{sim},i} - R_{\text{obs},i})^2} \quad (9)$$

$$E_{\text{BIAS}} = \frac{\sum_{i=1}^n (R_{\text{sim},i} - R_{\text{obs},i})}{\sum_{i=1}^n R_{\text{obs},i}} \times 100\% \quad (10)$$

式中: n 为数据序列长度; R_{sim} 与 R_{obs} 分别为模拟径流深和实测径流深, mm; r 为模拟值与实测值间的相关系数; σ_{sim} 与 σ_{obs} 分别为模拟值与实测值的均值; μ_{sim} 与 μ_{obs} 分别为模拟值与实测值的标准差。

1.4 去趋势与相对贡献方法

去趋势方法常用于调查某一时期水文气象变量的变化以及这种变化对研究区水循环过程的影响。其基本原理见图 3, 具体步骤为: 筛选研究时段内影响水循环过程的水文气象变量, 确定变量在研究时段内的线性趋势并去除该趋势, 将去除线性趋势前后的变量分别输入模型, 模拟去除各水文气象变量的线性趋势对水循环过程的影响, 并由此计算研究时段内各水文气象变量对水循环变化的相对贡献率。

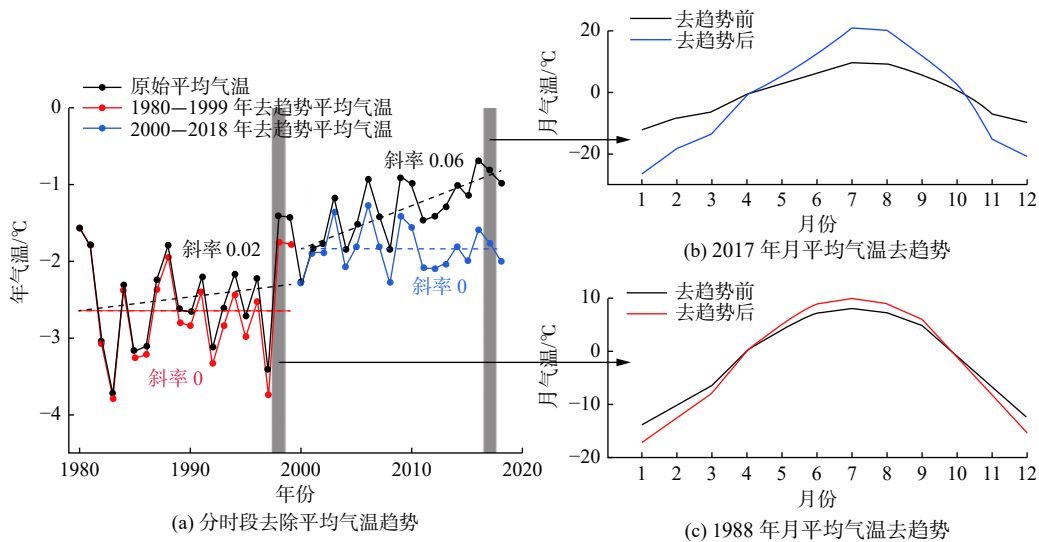


图 3 去趋势方法

Fig. 3 Schematic of the detrending method

序列 x 的线性趋势可以通过线性回归, 由最小二乘估计确定:

$$x = a_0 + a_1 t \quad (11)$$

式中: a_1 是序列 x 随时间 t 的趋势; a_0 是回归常数。序列线性趋势的显著性通过 Mann-Kendall(M-K)趋势检验^[23] 确定。随后, 采用去趋势方法, 从序列 x

中去除其最佳拟合线性趋势:

$$\begin{cases} x_d(t) = x(t) - x'(t) \\ x'(t) = a_0 + a_1 t \end{cases} \quad (12)$$

式中: x' 是 x 运用公式(11)的拟合值; x_d 是 x 的去趋势序列。为了确保序列 x_d 的首值与序列 x 的首值相等, 需要去趋势后的结果进行如下位移:

$$x_{\text{det}}(t) = x_d(t) + [x(1) - x_d(1)] \quad (13)$$

式中: x_{det} 是 x 去除时间趋势的最终序列; $x(1)$ 和 $x_d(1)$ 分别为序列 x 和序列 x_d 的首值。

在对各气候因素应用去趋势方法求得不同去趋势情景下的模拟径流后,人类活动对径流变化的影响可由此间接推求。气候变化和人类活动对径流变化的贡献率和不同气候因素各自对径流变化的贡献分别通过下式计算:

$$\begin{cases} C_R(i) = 100 \times f_{\text{adjust}} \frac{\Delta R_i}{\Delta R} \\ f_{\text{adjust}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{\Delta R_i}{\Delta R}} \end{cases} \quad (14)$$

式中: $C_R(i)$ 表示第 i 个影响因子对径流变化的贡献率,%; ΔR_i 表示由第 i 项影响因子的趋势产生的径流变化; ΔR 表示所有影响因子的趋势共同作用产生的径流变化; 参数 f_{adjust} 用于确保气候变化和人类活动的贡献率之和为 100%; n 是影响径流的因素种类,由于主要考虑气候变化和人类活动的影响, n 取 2。

2 结果

2.1 耦合融雪模块 *abcd* 模型的性能

在应用水文模型对流域径流进行模拟前,需要对模型在研究区模拟径流的能力进行评估。本研

究分别对 1990—1999 年和 2000 年—2018 年两个时段的径流变化进行归因分析,需要在两个研究时段分别率定模型参数,采用交叉验证方法,在上述两个时段分别评估 *abcd-snow* 模型模拟径流的性能:当研究时段为 1980—1999 年时,率定期为当前研究时段,验证期为 2000—2018 年;当研究时段为 2000—2018 年同理。*abcd-snow* 模型参数率定结果见表 1。

表 1 模型参数取值

Tab. 1 The parameters of models

参数	1980—1999年		2000—2018年	
	<i>abcd</i>	<i>abcd-snow</i>	<i>abcd</i>	<i>abcd-snow</i>
<i>a</i>	0.96	0.97	0.93	0.94
<i>b</i>	354.00	384.78	394.63	430.74
<i>c</i>	0.01	0.02	0.64	0.55
<i>d</i>	0.03	0.03	0.92	0.89
F_{DD}		8.28		3.93
T_s		-5.00		-5.00
T_{melt}		-3.24		-0.82

在黄河源区,以 1980—1999 年为率定期、2000—2018 年为验证期和以 2000—2018 年为率定期、1980—1999 年为验证期的 *abcd-snow* 模型模拟径流结果与实测径流的比较,见图 4(a)、图 4(b)。

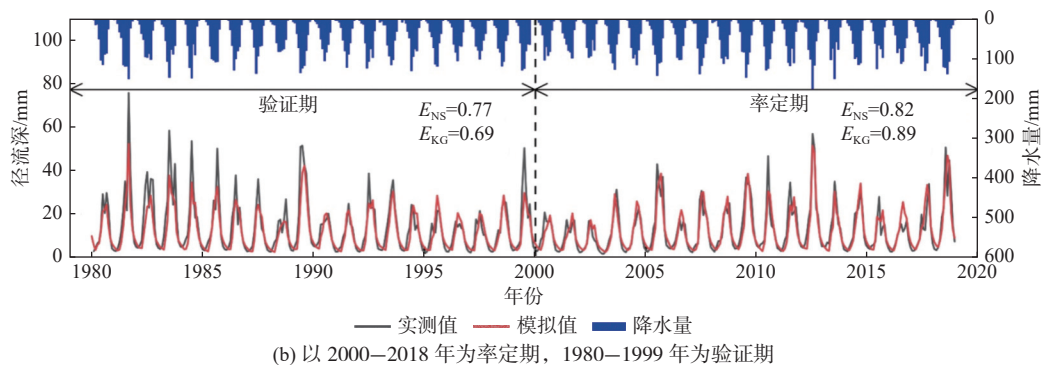
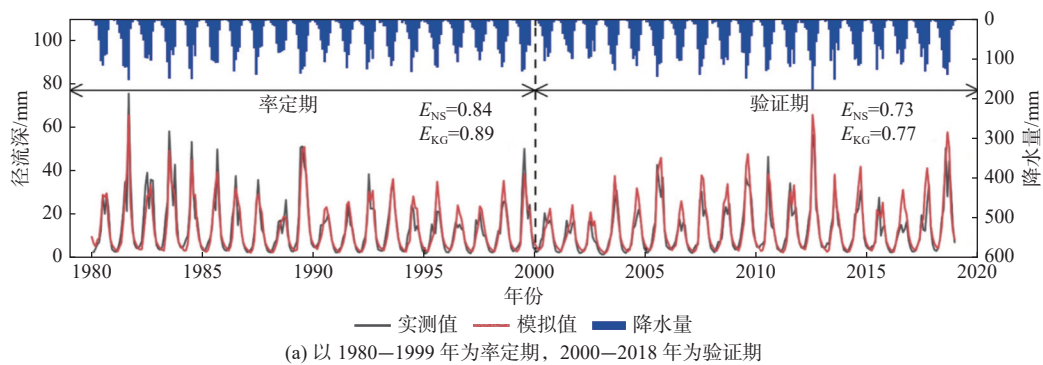


图 4 *abcd-snow* 模型模拟结果与实测径流比较

Fig. 4 Comparison of the observed runoff and simulated runoff by the *abcd-snow* model

由图 4 可知, *abcd-snow* 模型对于月径流峰值的捕捉能力较低, 但在绝大多数年份都可以很好地模拟径流月际变化。在水文模拟性能方面, 根据 E_{NS} 和 E_{KG} 两项指标(图 4, 表 2), *abcd-snow* 模型验证期的模拟精度略低于率定期的模拟精度, 但总体而言模型在径流模拟方面具有较高的精度。在水量模拟误差方面, 根据 E_{RMS} , *abcd-snow* 模型在率定期和验证期均具有较小的误差, 且验证期与率定期的误差差距不大; 但根据 E_{BIAS} , *abcd-snow* 模型的模拟偏差在率定期和验证期之间存在较大差距, 这可能是由于黄河源区两个时段间实测径流量存在较大变化(表 2)。综上所述, *abcd-snow* 模型可以有效地对黄河源区的径流进行模拟。

考虑到黄河源区寒区的气候特点, 在 *abcd* 水文模型中耦合了融雪模块, 因此有必要对比验证耦合融雪模块前后模型对研究区径流模拟能力的变化。原始 *abcd* 模型参数率定结果见表 1, 图 5(a)、图 5(b) 分别比较了 1980—1999 年和 2000—2018 年两个时段 *abcd* 水文模型在耦合融雪模块前后径流模拟能力的变化, 图中黑色线代表原始 *abcd* 模型在两个时期的径流模拟结果, 蓝色色块代表 *abcd-snow* 模型在两个时期的径流模拟结果, 其中, 浅蓝色部分为仅因前期储水和降雨产生的径流, 深蓝色部分代

表 2 模型精度评价结果
Tab. 2 Evaluation results of model accuracy

研究时段	指标	率定期		验证期	
		<i>abcd</i>	<i>abcd-snow</i>	<i>abcd</i>	<i>abcd-snow</i>
1980—1999年	E_{NS}	0.83	0.84	0.70	0.73
	E_{KG}	0.88	0.89	0.75	0.77
	E_{RMS}/mm	5.03	4.76	5.67	5.39
	$E_{BIAS}/\%$	-1.96	-1.71	12.42	12.30
2000—2018年	E_{NS}	0.81	0.82	0.75	0.77
	E_{KG}	0.87	0.89	0.67	0.69
	E_{RMS}/mm	4.48	4.30	5.98	5.75
	$E_{BIAS}/\%$	-0.83	-1.12	-13.14	-13.08

表因融雪产生的径流。根据图 5 和表 2 中 E_{NS} 与 E_{KG} 两项指标, *abcd-snow* 模型不仅具有与原始 *abcd* 模型相近的径流模拟性能, 而且可以在机制上更为合理地刻画研究区径流及其变化。在水量模拟误差方面, *abcd-snow* 模型也在除 2000—2018 年的率定期 E_{BIAS} 以外的指标中优于原始 *abcd* 模型。上述结果说明耦合了融雪模块的 *abcd-snow* 模型不仅可以从原理上更好地解释水文气象要素的变化, 尤其是气温的变化对黄河源区径流的影响, 而且在径流模拟结果上也略优于未添加融雪模块的 *abcd* 水文模型。

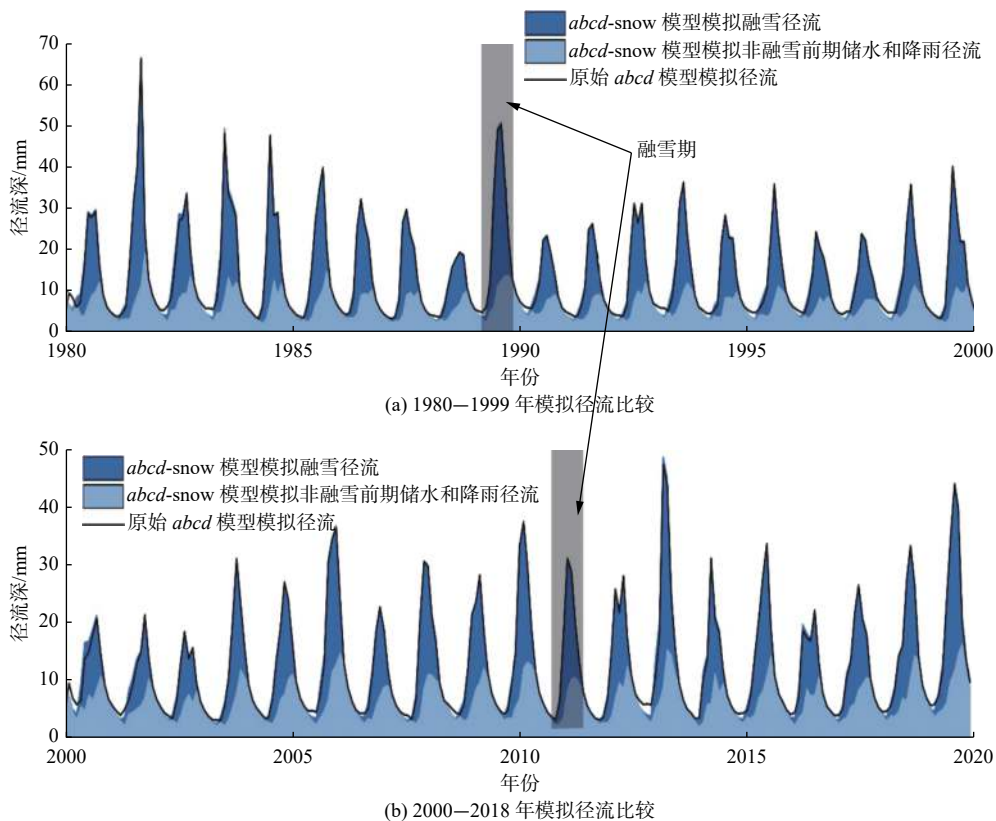


图 5 *abcd* 水文模型耦合融雪模块前后径流模拟结果比较

Fig. 5 Comparison of the simulated runoff by the *abcd* model before and after coupled with the snowfall-snowmelt module

2.2 径流和水文气象变量变化特征

1980—2018年黄河源区年均实测径流、降水、潜在蒸散发、最高气温、平均气温、最低气温、2 m 风速、日照时数、相对湿度的年际变化、研究期总趋势和分时段趋势见图6,并通过M-K趋势检验确定趋势的显著性。结果表明:黄河源区径流在

1980—2018年具有不显著的减少趋势($p>0.05$),线性趋势线斜率为 $-0.80(\text{mm}/\text{a})$;但在1980—1999年、2000—2018年两个时期分别具有显著减少趋势和显著增加趋势($p<0.05$),线性趋势线的斜率分别为 $-4.12 \text{ mm}/\text{a}$ 和 $3.16 \text{ mm}/\text{a}$ 。

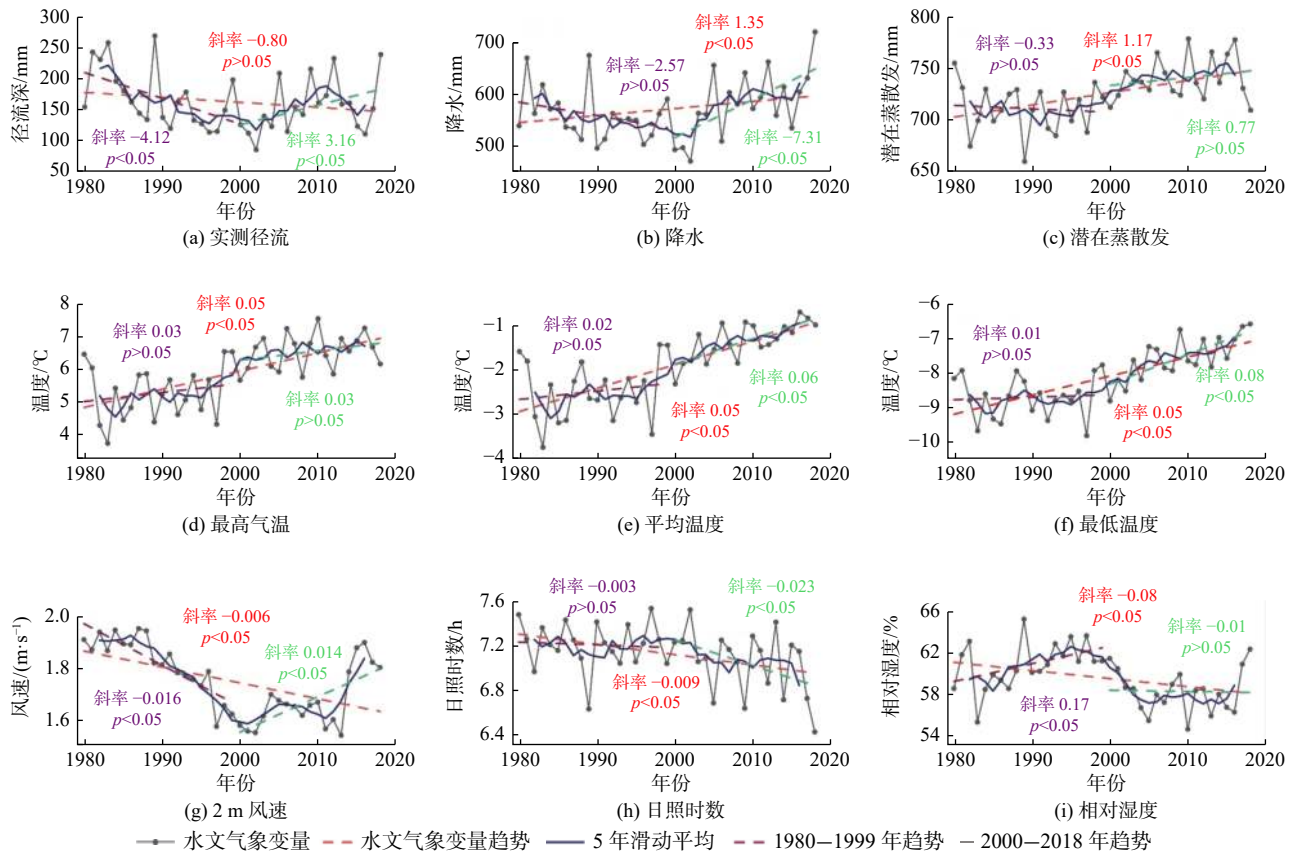


图6 黄河源区1980—2018年水文气象变量特征

Fig. 6 Characteristic of hydrological and climatic variables across the source region of the Yellow River from 1980 to 2018

对于研究期全时段,黄河源区的最高气温、最低气温、平均气温、潜在蒸散发和降水均呈显著增加的趋势($p<0.05$),其中:气温3项的线性趋势线斜率均为 $0.05 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{a}$,潜在蒸散发和降水的线性趋势线斜率分别为 $1.17 \text{ mm}/\text{a}$ 和 $1.35 \text{ mm}/\text{a}$;2 m 风速、日照时数和相对湿度呈显著减少的趋势($p<0.05$),3者的线性趋势线斜率分别为 $-0.006 \text{ m}/(\text{s}\cdot\text{a})$ 、 $-0.009 \text{ h}/\text{a}$ 、 $-0.08 \text{ }/\text{a}$ 。

1980—1999年,气温3项的增加趋势不显著($p>0.05$),线性趋势线的斜率分别为 $0.03 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{a}$ 、 $0.01 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{a}$ 和 $0.02 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{a}$;相对湿度具有显著增加的趋势($p<0.05$),线性趋势线的斜率为 $0.17 \text{ }/\text{a}$;日照时数、潜在蒸散发和降水减小的趋势不显著($p>0.05$),线性趋势线的斜率分别为 $-0.003 \text{ h}/\text{a}$ 、 $-0.33 \text{ mm}/\text{a}$ 、 $-2.57 \text{ mm}/\text{a}$;2 m 风速具有显著减少的趋势($p<0.05$),

线性趋势线的斜率为 $-0.016 \text{ m}/(\text{s}\cdot\text{a})$ 。2000—2018年,最低气温、平均气温、2 m 风速和降水具有显著增加的趋势($p<0.05$),线性趋势线的斜率分别为 $0.08 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{a}$ 、 $0.06 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{a}$ 、 $0.014 \text{ m}/(\text{s}\cdot\text{a})$ 、 $7.31 \text{ mm}/\text{a}$;最高气温和潜在蒸散发的增长趋势不显著($p>0.05$),线性趋势线的斜率为 $0.03 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{a}$ 与 $0.77 \text{ mm}/\text{a}$;日照时数具有显著减少的趋势($p<0.05$),线性趋势线的斜率为 $-0.023 \text{ h}/\text{a}$;相对湿度的减少趋势不显著($p>0.05$),趋势线斜率为 $-0.01 \text{ }/\text{a}$ 。

基于5年滑动平均,气温3项和潜在蒸散发的5年滑动平均线为明显的持续增长趋势且形状类似;降水和径流的5年滑动平均线变化和形状类似,以2000年为界,前为减少趋势,后为增加趋势;2 m 风速和相对湿度的5年滑动平均线整体波动较大,其中2 m 风速在2000年前波动较小,呈单一的减少趋

势, 2000 年后波动较大, 仍可以看出增加的趋势, 相对湿度在 1995 年前呈增加趋势, 1995—2005 年呈减小趋势, 2005 年后没有明显的趋势; 日照时数的 5 年滑动平均线波动很小, 总体呈减少趋势。

2.3 气候变化和人类活动对径流的影响

黄河源区 1980—1999 年、2000—2018 年两个时期各自在不同去趋势情景下年径流及趋势变化, 见图 7。图 7 中黑色点线表示未去趋势的模型模拟径流, 彩色点线表示气候因素综合、人为活动因素以及单一气象因素去趋势情景下的模拟径流, 虚线表示线性趋势。由图 7(a)、7(b)可知, 气候因素对

黄河源区径流起主导作用, 气候因素的综合影响使黄河源区径流在 1980—1999 年下降、在 2000—2018 年上升, 而人为因素在两个时期均具有使得源区径流下降的作用, 但在 2000 年后人为因素使径流下降的能力减弱。由图 7(c)~(g)可知: 降水是影响源区径流变化的气候因素中最主要的因素, 对径流变化起主导作用, 使源区径流在 1980—1999 年下降、在 2000—2018 年上升; 气温在两个时期均使得源区径流减少, 日照时数在两个时期均使得源区径流增加, 相对湿度和 2 m 风速使源区径流在 1980—1999 年上升、在 2000—2018 年下降。

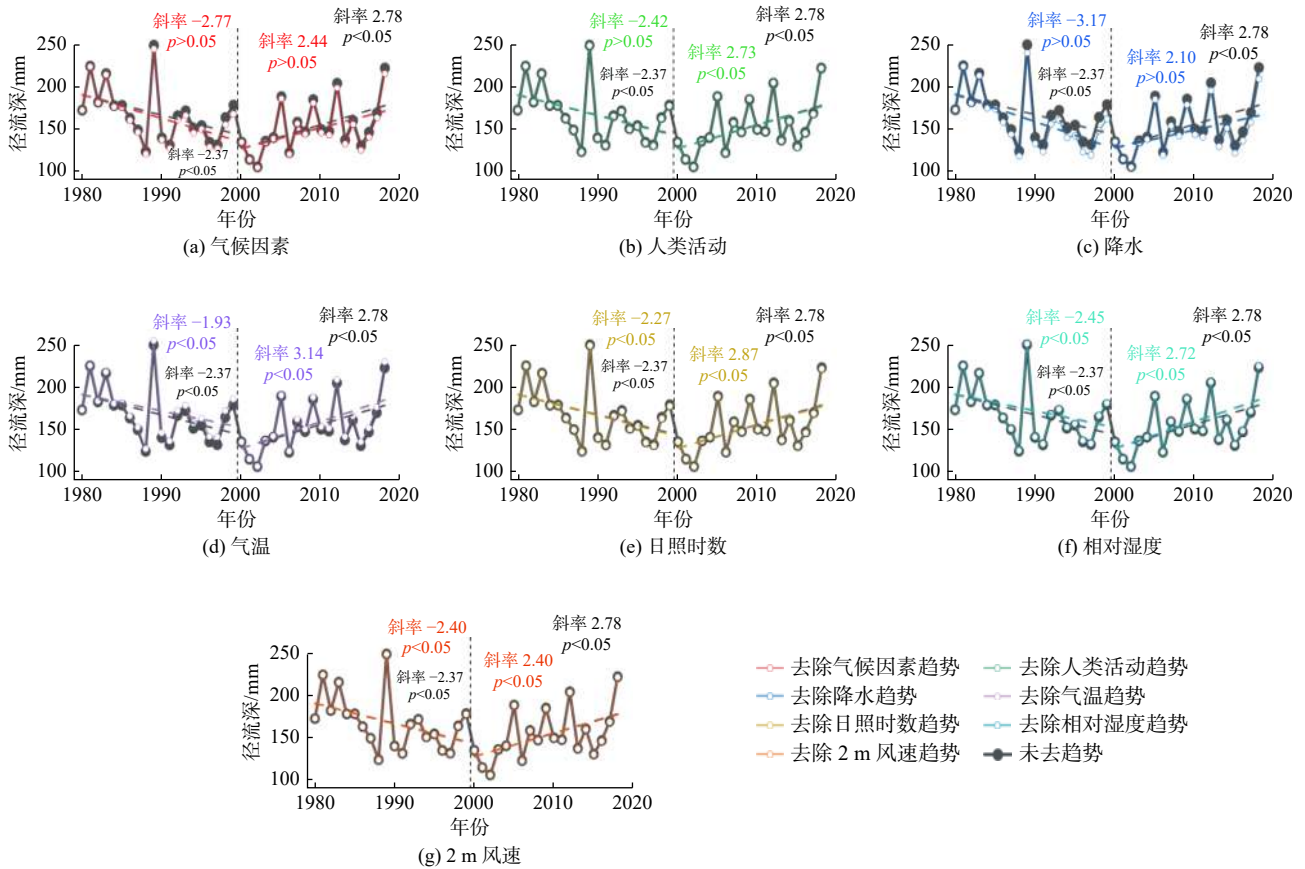


图 7 1980—2018 年黄河源区不同去趋势情景下年径流

Fig. 7 The mean annual runoff under different detrending scenarios across the source region of the Yellow River from 1980 to 2018

表 3 列出了不同时期、不同去趋势情景下的年平均径流、相对于基准情景下的径流变化量以及不同因素对径流变化的相对贡献率。由表 3 可知: 气候变化和人类活动的共同作用在 1980—1999 年使径流以 18.7 mm/a 的速度减少, 在 2000—2018 年使径流以 31.9 mm/a 的速度增加。降水对径流变化的贡献最大, 1980—1999 年使径流平均每年减少 15.5 mm, 占该时期径流总变化的 68.8%; 2000—2018 年使径流平均每年增加 30.6 mm, 占该时期径流总变化的 124.9%, 对径流变化起主导作用。气候因素的共同

作用使得黄河源区径流在 1980—1999 年平均每年减少 14.1 mm, 占该时期径流总变化的 62.8%; 在 2000—2018 年平均每年增加 29.4 mm, 占该时期径流总变化的 120.0%。由此可以认为气候变化是黄河源区径流变化的最主要因素。人类活动使黄河源区径流在 1980—1999 年平均每年减少 8.4 mm, 占该时期径流总变化的 37.2%; 在 2000—2018 年平均每年减少 4.9 mm, 占该时期径流总变化的 -20%。对比两个时期, 尽管人类活动都使得黄河源区径流减少, 但在 2000—2018 年径流减少的速度减缓, 这

从一定程度上说明了生态修复工程的作用。除降水外,对于其他气候因素,在 1980—1999 年,相对湿度对径流的贡献最大,为-9.4%,气温次之,为 8.6%,2 m 风速和日照时数的变化对径流的贡献分

别为-3.2%与-0.9%;在 2000—2018 年,气温对径流的贡献最大,为-8.1%,日照时数次之,为 5.4%,2 m 风速和日照时数对径流变化的贡献分别为-3.2%与-0.5%。

表 3 不同去趋势情景、不同时段流域平均年径流变化和相对贡献率

Tab. 3 The basin-average mean annual runoff, ΔR and C_R under different detrending scenarios and periods.

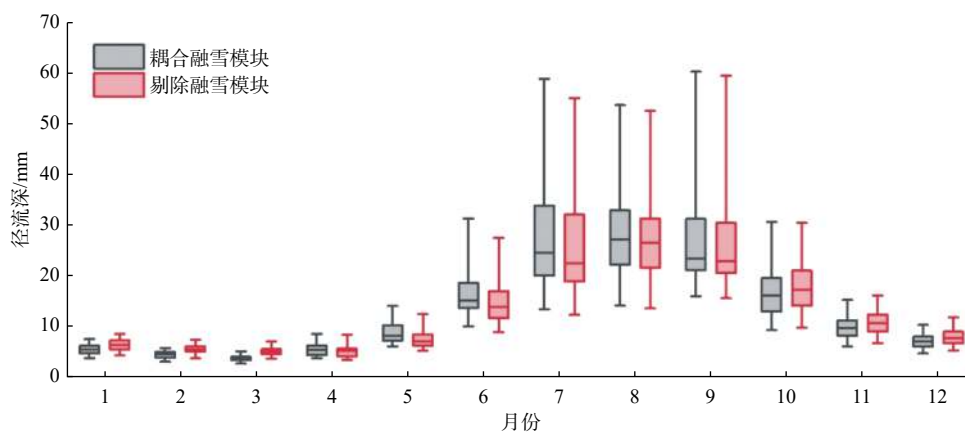
去趋势情景	1980—1999年			2000—2018年		
	年平均径流/($\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$)	ΔR /($\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$)	$C_R/\%$	年平均径流/($\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$)	ΔR /($\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$)	$C_R/\%$
基准情景	169.5			154.3		
全因素	188.2	-18.7	100.0	122.4	31.9	100.0
气候因素	183.6	-14.1	62.8	124.9	29.4	120.0
人类活动	177.9	-8.4	37.2	159.2	-4.9	-20.0
仅降水	185.0	-15.5	68.8	123.7	30.6	124.9
仅气温	171.4	-1.9	8.6	156.3	-2.0	-8.1
仅日照时数	169.3	0.2	-0.9	153.0	1.3	5.4
仅相对湿度	167.4	2.1	-9.4	154.4	-0.1	-0.5
仅2 m风速	168.8	0.7	-3.2	155.0	-0.8	-3.2

3 讨论与不确定性

3.1 降雪、融雪过程对径流的时程分配

为说明降雪、融雪过程对黄河源区径流在月尺度的分配作用,保持 *abcd-snow* 模型参数不变,剔除耦合在模型中的融雪模块,对比剔除融雪模块前后的月际径流,结果见图 8,箱线图由 1980—2018 年各月径流量绘制。剔除融雪模块后,径流月际变化的总趋势未出现明显变化,但 4 月至 9 月的径流

小于剔除前,10 月至次年 3 月的径流大于剔除前。由此可见,融雪模块即降雪、融雪过程的作用是将气温较低时期的部分径流调节至气温较高时期。然而,图 5 所示 *abcd-snow* 模型与 *abcd* 水文模型的对比中并未发现如图 7 所示的现象。这是由于在率定模型参数时,*abcd* 水文模型通过调整模型参数,消除了由缺失融雪模块导致的径流月际时程差异,最终使得 *abcd* 水文模型的输出与 *abcd-snow* 模型的输出近似。

图 8 1980—2018 年剔除融雪模块前后 *abcd-snow* 模型模拟月际径流对比Fig. 8 Comparison of the monthly simulated runoff by the *abcd-snow* model before and after culling the snowfall-snowmelt module from 1980 to 2018

3.2 与其他研究对比

黄河源区作为黄河流域的源头,其径流变化直接影响黄河中下游水资源利用和配置,因而评估该流域气候变化与人类活动对于径流变化的影响一直是研究热点。由于考虑的研究时段、采用的方法

和切入的角度不同,不同学者对影响黄河源区径流变化的因素及其贡献的结论也不尽相同。例如:孙卫国等^[7]基于 1956—2005 年的水文气象数据,采用交叉小波变换方法,认为降水对流域径流变化起到主导作用,区域气候因子的综合作用是黄河源区径

流变化的根本原因。这与本研究的结论类似,但这种基于统计的分析方法未能对区域气候变化对径流的影响进行定量评估。Zheng等^[24]基于1961—2010年的水文气象数据,利用基于Budyko框架的弹性系数法,以5年为时间间隔,认为气候变化是黄河源区径流减少的主要原因,占径流变化的60%~70%;周帅等^[8]基于1960—2010年的水文气象数据,利用基于Budyko框架的弹性系数法,以1960—1989年为基准期、1990—2010年为变化期,认为人类活动是导致径流改变的主要因子,占比67.62%,气候变化因子次之,占比为32.38%。上述两位学者的研究尽管都采用基于Budyko框架的弹性系数法,但两者的结论从表面来看不仅与本研究的结论差别较大,两者之间也具有很大的分歧。其原因不仅在于研究时段以及时间间隔的选取,还在于研究的切入角度与基于Budyko框架的弹性系数法不同,即对两个时段间流域径流变化的归因,因此时段长度和数量的选取对结果影响很大。周帅等^[8]的研究通过5年的时间间隔来分析时段内径流变化的原因;Zheng等^[24]的研究通过划分“基准期”与“变化期”,进而分析以“基准期”为基准,变化期径流变化的原因。本研究采用的基于水文模型的去趋势方法基于相对贡献,对单一时段内径流变化的归因,因此从切入角度与基于Budyko框架的弹性系数法有所不同。本研究从另一个角度对黄河源区径流变化的原因进行了分析,拓宽了研究思路。

3.3 不确定性

本研究虽然深入分析了黄河源区气候变化和人类活动对径流变化的影响,量化了各因素对径流变化的贡献率,但仍然存在着一些不确定性。首先,模型中未包含影响径流变化的一些潜在因素。例如张成凤等^[8]认为黄河源区冰川退缩、冻土层持续下移等其他环境驱动因素是造成黄河源区径流减少的重要原因。将冰川、冻土的影响考虑进模型中有待于后续改进。本研究采用的水文模型的局限性,人类活动的影响通过间接推求的方式得出,方法本身存在一定的局限性,同时无法分离气候变化和人类活动的“叠加效用”。由于流域气象站点较少,代表性稍差,为了减少该不确定性,利用研究区及周边气象站点数据,基于空间插值方法获取本流域的气象要素特征,但仍存在着不确定性。

4 结论

本研究将传统 $abcd$ 模型与融雪模块耦合,改进

了模型对高寒地区融雪径流模拟不足的问题,并利用黄河源区1980—2018年逐月实测径流数据以及通过AnuSpline软件插值的气象资料,分析三江源生态保护前后(1980—1999年和2000—2018年),黄河源径流及其影响要素的变化动态趋势,并量化气候变化和人类活动对径流变化的影响程度即相对贡献,得出如下结论:

耦合融雪模块的 $abcd$ -snow模型对径流的模拟性能得到改善,改进的模型在黄河源区具有较好的适用性。1980—1999年, $abcd$ -snow模型的 E_{NS} 和 E_{KG} 均在0.84以上;而2000—2018年,两项指标也在0.82以上。相较于原始 $abcd$ 模型, $abcd$ -snow模型的精度略有提升,能更合理地分析不同因素对径流变化的影响。

1980—2018年,黄河源区最高气温、最低气温、平均气温、潜在蒸散发和降水显著增加($p < 0.05$),2 m风速、日照时数和相对湿度显著减少($p < 0.05$),实测径流不显著的减少($p > 0.05$)。2000年之前,气温不显著趋势($p > 0.05$),相对湿度显著增加($p < 0.05$),日照时数、潜在蒸散发和降水不显著减小($p > 0.05$),2 m风速和径流显著减少($p < 0.05$)。2000年之后,最低气温、平均气温、2 m风速、降水和径流显著增加($p < 0.05$),最高气温和潜在蒸散发不显著增长($p > 0.05$),日照时数显著减少($p < 0.05$),相对湿度不显著减少($p > 0.05$)。

气候变化对黄河源区径流变化起主导作用。1980—1999年,在气候变化影响下径流以14.1 mm/a的速度减少,相对贡献率为62.8%;2000—2018年,在气候变化影响下径流以29.4 mm/a的速度增加,相对贡献率为120%。包含于气候变化的诸多因素中,降水对径流变化的贡献最大:1980—1999年,相对贡献率为68.8%;2000—2018年,的相对贡献率为124.9%。其他气候因素对径流变化的贡献有限,相对贡献的绝对值在10%以内。降水的变化主导了气候因素的变化,进而主导了径流的变化。人类活动使黄河源区径流在1980—1999年减少8.4 mm,相对贡献率为37.2%,而在2000—2018年减少4.9 mm,相对贡献率为-20%。

本研究将有助于理解气候变化条件下流域径流变化及其特征,也可为黄河源区应对气候变化的挑战制定应对策略提供参考依据。

参考文献(References):

- [1] 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.(WANG D

- X, TIAN S M, JIANG S Q, et al. Research progress of the evolution of runoff in the source area of the Yellow River[J]. *Yellow River*, 2020, 42(9): 90-95. (in Chinese)) DOI: [10.3969/j.issn.1000-1379.2020.09.017](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-1379.2020.09.017).
- [2] 楼骏, 崔激. 改进的SIMHYD模型在黄河源区高寒气候的适应性研究[J]. *水电能源科学*, 2021, 39(10): 27-30. (LOU J, CUI W. Study on adaptability of improved SIMHYD model in alpine climate region[J]. *Water Resources and Power*, 2021, 39(10): 27-30. (in Chinese))
- [3] 孟宪红, 陈昊, 李照国, 等. 三江源区气候变化及其环境影响研究综述[J]. *高原气象*, 2020, 39(6): 1133-1143. (MENG X H, CHEN H, LI Z G, et al. Review of climate change and its environmental influence on the Three-River Regions[J]. *Plateau Meteorology*, 2020, 39(6): 1133-1143. (in Chinese)) DOI: [10.7522/j.issn.1000-0534.2019.00144](https://doi.org/10.7522/j.issn.1000-0534.2019.00144).
- [4] 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. (SHANG Y, JIANG Z. Characteristics and response analysis of precipitation and runoff in the source area of the Yellow River[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2021(2): 106-112. (in Chinese)) DOI: [10.3969/j.issn.1007-2284.2021.02.019](https://doi.org/10.3969/j.issn.1007-2284.2021.02.019).
- [5] 孙永寿, 刘晔, 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. (SUN Y S, LIU T, LI Y. Analysis on the consistency of precipitation and runoff in the source area of the Yellow River and its influencing factors[J]. *Yellow River*, 2021, 43(10): 51-55. (in Chinese)) DOI: [10.3969/j.issn.1000-1379.2021.10.010](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-1379.2021.10.010).
- [6] 孙卫国, 程炳岩, 李荣. 黄河源区径流量与区域气候变化的多时间尺度相关[J]. *地理学报*, 2009, 64(1): 117-127. (SUN W G, CHENG B Y, LI R. Multitime scale correlations between runoff and regional climate variations in the source region of the Yellow River[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2009, 64(1): 117-127. (in Chinese)) DOI: [10.3321/j.issn:0375-5444.2009.01.012](https://doi.org/10.3321/j.issn:0375-5444.2009.01.012).
- [7] 张成凤, 刘翠善, 王国庆, 等. 基于Budyko假设的黄河源区径流变化归因识别[J]. *中国农村水利水电*, 2020(9): 90-94. (ZHANG C F, LIU C S, WANG G Q, et al. Attribution of runoff variation for the Yellow River source region based on the Budyko hypothesis[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2020(9): 90-94. (in Chinese)) DOI: [10.3969/j.issn.1007-2284.2020.09.018](https://doi.org/10.3969/j.issn.1007-2284.2020.09.018).
- [8] 周帅, 王义民, 郭爱军, 等. 气候变化和人类活动对黄河源区径流影响的评估[J]. *西安理工大学学报*, 2018, 34(2): 205-210. (ZHOU S, WANG Y M, GUO A J, et al. Assessment on impacts of climate change and human activities on runoff in source region of the Yellow River[J]. *Journal of Xi'an University of Technology*, 2018, 34(2): 205-210. (in Chinese)) DOI: [10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2018.02.013](https://doi.org/10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2018.02.013).
- [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. (LI F, ZOU S B, LU Z X, et al. Analysis of streamflow variations in the Bai and Hei River basins in the source region of the Yellow River under the background of climate warming[J]. *Journal of Lanzhou University(Natural Sciences)*, 2020, 56(1): 56-64. (in Chinese)) DOI: [10.13885/j.issn.0455-2059.2020.01.007](https://doi.org/10.13885/j.issn.0455-2059.2020.01.007).
- [10] 何玉芬, 杨汉波, 唐莉华, 等. 北大沙河流域径流变化归因分析[J]. *水资源保护*, 2022, 38(4): 95-101. (HE Y F, YANG H B, TANG L H, et al. Attribution analysis of runoff change in Beidasha River basin[J]. *Water Resources Protection*, 2022, 38(4): 95-101. (in Chinese))
- [11] POTTER N J, ZHANG L, MILLY P C D, et al. Effects of rainfall seasonality and soil moisture capacity on mean annual water balance for Australian catchments[J]. *Water Resources Research*, 2005, 41(6): 697. DOI: [10.1029/2004WR003697](https://doi.org/10.1029/2004WR003697).
- [12] 杨汉波, 吕华芳, 杨大文, 等. 水热同步性对流域水热耦合平衡的影响[J]. *水力发电学报*, 2012, 31(4): 54-59. (YANG H B, LYU H F, YANG D W, et al. Seasonality of precipitation and potential evaporation and its impact on catchment water-energy balance[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2012, 31(4): 54-59. (in Chinese))
- [13] 王国庆, 张建云, 管晓祥, 等. 中国主要江河径流变化成因定量分析[J]. *水科学进展*, 2020, 31(3): 313-323. (WANG G Q, ZHANG J Y, GUAN X X, et al. Quantifying attribution of runoff change for major rivers in China[J]. *Advances in Water Science*, 2020, 31(3): 313-323. (in Chinese)) DOI: [10.14042/j.cnki.32.1309.2020.03.001](https://doi.org/10.14042/j.cnki.32.1309.2020.03.001).
- [14] THOMAS H. Improved methods for national water assessment[R]. Washington, D. C: Water Resource Council, 1981: 14-18. DOI: [10.3133/70046351](https://doi.org/10.3133/70046351) DOI: [10.3133/70046351](https://doi.org/10.3133/70046351).
- [15] 吴光东, 许继军, HOSHIN G, 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 G D, XU J J, HOSHIN G, et al. The “abcd” water balance model: application to Xin'an River basin and sensitivity analysis[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research*, 2019, 36(7): 23-27. (in Chinese)) DOI: [10.11988/ckyyb.20171318](https://doi.org/10.11988/ckyyb.20171318).
- [16] BAI P, LIU X, LIANG K, et al. Comparison of performance of twelve monthly water balance models in

- different climatic catchments of China[J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 529: 1030-1040. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2015.09.015.
- [17] 李志威, 王兆印, 田世民, 等. 黄河源水沙变化及与气温变化的关系[J]. *泥沙研究*, 2014(3): 28-35. (LI Z W, WANG Z Y, TIAN S M, et al. Variation of streamflow and sediment discharge rate and relationship with temperature change in Yellow River source area[J]. *Journal of Sediment Research*, 2014(3): 28-35. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.0468-155X.2014.03.005.
- [18] 刘志红, TIM R M, VAN NIEL T G, 等. 专用气候数据空间插值软件ANUSPLIN及其应用[J]. *气象*, 2008(2): 92-100. (LIU Z H, TIM R M, VAN NIEL T G, et al. Introduction of the professional interpolation software for meteorology data: ANUSPLIN[J]. *Meteorological Monthly*, 2008(2): 92-100. (in Chinese)) DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2008.02.013.
- [19] 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 J, ZHANG W, XIA J, 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)) DOI: 10.7522/j.issn.1000-0240.2017.0090.
- [20] MARTINEZ G F, GUPTA H V. Toward improved identification of hydrological models: A diagnostic evaluation of the "abcd" monthly water balance model for the conterminous United States[J]. *Water Resources Research*, 2010, 46(8): 1-21. DOI: 10.1029/2009WR008294.
- [21] CHUNTAN H, RENSHENG C, LIU J, et al. A discuss of the separating solid and liquid precipitations[J]. *J. Glaciol. Geocryol.*, 2010, 32: 249-256. DOI: 10.3724/SP.J.1037.2010.00186.
- [22] 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. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2009.08.003.
- [23] MANN H. Non-parametric test against trend[J]. *Econometrica*, 1945, 13: 245-259. DOI: 10.2307/1907187.
- [24] ZHENG Y, HUANG Y, ZHOU S, et al. Effect partition of climate and catchment changes on runoff variation at the headwater region of the Yellow River based on the Budyko complementary relationship[J]. *Science of The Total Environment*, 2018, 643: 1166-1177. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.06.195.

Attribution analysis of runoff change based on the *abcd* model coupled with the snowmelt module in the source region of the Yellow River

ZHUANG Jiacheng¹, XING Yincong¹, LI Yanzhong¹, LIU Xiaocong², YANG Zelong^{1,3}, ZHAO Zichun¹,
WANG Qisu¹, XIE Yuchu¹, WANG Jie¹, BAI Peng³, LIU Changming³

(1. School of Hydrology and Water Resources, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2. Sichuan Academy of Environmental Sciences, Chengdu 610094, China; 3. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: Three Rivers Source is known as the "Chinese Water Tower" because it is an important water source conservation area in China and even in Asia. The change of runoff in the source region of the Yellow River in the Three Rivers Source played a crucial role in the ecological civilization and high-quality development of the Yellow River basin. Thus, it is of great scientific and practical significance to clarify the change of the runoff and its driving factor in the source region.

The *abcd*-snow model coupled with the traditional *abcd* hydrological model and snowfall-snowmelt module was constructed to improve the traditional *abcd* model's insufficient simulation of snowmelt runoff in alpine regions. Monthly observed runoff data and the measured meteorological data interpolated by AnuSpline software using more than 2000 meteorological stations from 1980 to 2018. The genetic algorithm was used to calibrate the *abcd*-snow model parameters. Among them, the data from 1980 to 1999 was used for model calibration, and from 2000 to 2018 was used for model validation. The Nash-Sutcliffe Efficiency, Kling-Gupta Efficiency, root mean square error and BIAS were used as indicators to evaluate the applicability of the *abcd*-snow model. With the aid of the *abcd*-snow model, the change dynamics of the runoff in the source region of the Yellow River before and after the ecological protection of the Three Rivers Source was analyzed. The contributions of climate change and human activities to runoff variability were analyzed and quantified based on the detrending method.

Results showed that the *abcd*-snow model improved runoff simulation performance, and had good applicability

in the source region of the Yellow River. The Nash-Sutcliffe Efficiency and Kling-Gupta Efficiency of the *abcd*-snow model were above 0.82. Compared with the traditional *abcd* model, the accuracy of the *abcd*-snow model is slightly improved, and the impact of different factors on the runoff change can be more reasonably analyzed. The observed runoff showed an insignificant decrease trend (slope=-0.80, $p > 0.05$), but the runoff from 1980 to 1999 showed a significant decrease (slope=-4.12, $p < 0.05$), and the runoff from 2000 to 2018 showed a significant increase trend (slope=3.16, $p < 0.05$). From 1980 to 1999, the impact of climate change indicate a reduced runoff at a rate of 14.1 mm/a, with a relative contribution rate of 62.8%. And from 2000 to 2018, climate change caused runoff to increase at a rate of 29.4 mm/a, with a relative contribution rate of 120%. The contribution of precipitation to runoff change was the largest, with a relative contribution rate of 68.8% from 1980 to 1999 and 124.9% from 2000 to 2018. The contribution of other climatic factors to runoff change was limited, and the absolute value of the relative contribution was within 10%. Human activities reduced the runoff by 8.4 mm from 1980 to 1999, with a relative contribution rate of 37.2%. It decreased by 4.9 mm from 2000 to 2018, with a relative contribution rate of 20%.

Climate change was the dominant factor in the change of runoff in the source region of the Yellow River. Among them, precipitation was the main driving factor determining the streamflow variation, and human activities dominated by ecological restoration could significantly reduce river runoff. This study could help to understand the mechanism of the impact of climate change on the runoff change in the Yellow River basin and provide a scientific reference for water resources planning in the basin.

Key words: runoff change; source region of the Yellow River; degree-day model; *abcd* model; climate change; attribution analysis

(上接第 952 页)

Taking the watershed near-dam area of Wuqiangxi by extracting from the SRTMDEM 90M digital elevation model, and based on the rainfall data, the storm center map was plotted using the inverse distance weighting method. Storm center locations were considered and used to precisely divide the sub-basins. A parameter calibration method combining an automatic selection of the Monte Carlo random sampling model and manual debugging was used in the parameter calibration process. Flood simulations were carried out based on the Xin'anjiang model, while the results were used to compare with those based on the natural sub-basin division method. Twenty historical floods from 2014 to 2020 were selected, of which 13 floods were used for model calibration and 7 floods for model validation. Four floods from 2021 were selected for testing, and the comparative analysis was based on the results of the natural sub-basin flood forecasts and the results of the flood forecasts considering the location of the storm center. The results showed that sub-flood simulation based on natural sub-basins only failed for one flood in terms of flood volume error and two floods in terms of flood peak error, while the sub-flood simulation taking into account the location of the center of the storm for the sub-basins passed in terms of flood volume error and flood peak error for both periods (rate and test). Four flood simulations for 2021 that were used for testing showed the mean value of the coefficient of certainty for the sub-basins considering the location of the storm center was 0.82, which was higher than the mean value of the coefficient of certainty for the sub-basins based on natural sub-basins, which was 0.72. The results of the four flood simulations considering the location of the storm center to divide the sub-basins were within 10% of the peak error and within 20% of the flood volume error, which reached the accuracy standard of Class A. This showed that it was reasonable to divide the sub-basins considering the location of the storm center. A new method is provided for the division of sub-basins in the near-dam area of reservoirs. The method of dividing sub-basins by considering the location of the storm center can be applied to flood forecasting in the near-dam area, thus achieving the effect of improving forecast accuracy, providing a basis for flood control departments to make decisions on disaster prevention and mitigation, and reducing the losses caused by floods in the basin, with significant economic and social benefits.

Key words: basin near dam area; rainstorm center; sub watershed division; Xin'anjiang model; flood forecast