

基于 WEP-ISF 模型的黄河源区径流演变特征及其驱动因素分析

孙君文¹, 黄跃飞^{1,2,3}, 甘永德¹, 吴玉帅¹, 刘欢⁴

(1. 青海大学土木水利学院, 青海 西宁 810016; 2. 黄河上游生态保护与高质量发展实验室, 青海 西宁 810016; 3. 水利部 江河源区水生态治理与保护重点实验室, 青海 西宁 810016; 4. 中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室 北京 100038)

摘要: [目的] 量化径流深中各因素产流量的贡献率及构成, 分析黄河源区下垫面、气候和工农业用水变化对径流变化的贡献率, 为黄河流域生态环境保护和水资源开发提供参考。[方法] 基于 1970—2021 年黄河源区气象水文数据, 利用分布式水热耦合模型 WEP-ISF 分析不同时期黄河源区月均流量及其实际蒸散发、土壤温度、土壤含水量和径流成分动态变化过程, 并运用多因素归因分析方法定量剖析各影响因素对径流量变化的贡献。[结果] ① 利用 WEP-ISF 模型对黄河源区 1970—2021 年流域水文及水热变化过程模拟验证, 其土壤温度模拟值与遥感解译值的平均绝对百分比误差为 69.78%~171.55%, Nash 效率系数均超过 0.70; 土壤表层含水量模拟值与遥感解译值的平均绝对百分比误差为 13.94%~20.97%, Nash 效率系数基本达到 0.5 以上; 月平均流量模拟值与实测值 Nash 效率系数和平均绝对百分比误差分别为 0.80 和 25.85%; 实际蒸散发模拟值与遥感解译值 Nash 效率系数和平均绝对百分比误差分别为 0.80 和 53.39%。② 冰川、融雪和降水产流多年平均为 0.9, 14.9, 70.5 mm, 分别占黄河源区径流深的 1.0%, 17.3% 和 81.7%。变化期 1991—2021 年相比于基准期 1970—1990 年, 冰川、融雪和降水产流变化量分别为 1.48, -3.8, -13.2 mm, 这三者对黄河源区总径流深变化量的贡献率分别为 9.53%, -24.48% 和 -85.05%。③ 唐乃亥多年平均径流量减少 $6.77 \times 10^9 \text{ m}^3$, 其中气候、下垫面以及工农业用水变化影响的贡献率分别为 96.46%, 2.49% 和 1.05%。[结论] 在影响黄河源区径流变化的诸多因素中, 气候因素是导致黄河源区径流衰减的主要驱动因子, 其具体表现为冰川融水产流呈现增多趋势, 而融雪产流和降水产流呈减少趋势。

关键词: 黄河源区; WEP-ISF 模型; 演变分析; 水热耦合

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2025)04-0173-11

中图分类号: P333

文献参数: 孙君文, 黄跃飞, 甘永德, 等. 基于 WEP-ISF 模型的黄河源区径流演变特征及其驱动因素分析 [J]. 水土保持通报, 2025, 45(4): 173-183. Sun Junwen, Huang Yuefei, Gan Yongde, et al. Analysis on runoff evolution characteristics and driving factors in source region of Yellow River by using WEP-ISF model [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(4): 173-183. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2025.04.008; CSTR: 32312.14.stbctb.2025.04.008.

Analysis on runoff evolution characteristics and driving factors in source region of Yellow River by using WEP-ISF model

Sun Junwen¹, Huang Yuefei^{1,2,3}, Gan Yongde¹, Wu Yushuai¹, Liu Huan⁴

(1. School of Civil Engineering and Water Resources, Qinghai University, Xining, Qinghai 810016, China; 2. Laboratory of Protection and High-Quality Development in Upper Yellow River, Xining, Qinghai 810016, China; 3. Provincial Laboratory of Ecological Protection and High Quality Development in Upper Yellow River, Ministry of Water Resources, Xining, Qinghai 810016, China; 4. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: [Objective] The contribution rates and composition of each factor in runoff depth were quantified to analyze the contribution rates of underlying surface, climate, and industrial and agricultural water use change to

收稿日期: 2025-01-03

修回日期: 2025-03-23

采用日期: 2025-03-24

资助项目: 国家重点研发计划“冰冻圈要素演变及其对长江和黄河水资源的影响与应对”(2023YFC3206303); 清华大学—宁夏银川水联网数字治水联合研究院专项统筹重点项目(SKL-IOW-2023TC2309)

第一作者: 孙君文(1999—), 男(汉族), 河南省邓州市人, 硕士研究生, 研究方向为水文与水资源。Email: 2543027404@qq.com。

通信作者: 甘永德(1985—), 男(汉族), 青海省海东市人, 博士, 副教授, 主要从事水文与水资源方面研究。Email: bjganyd@163.com。

runoff change in the source region of the Yellow River, in order to provide references for ecological environment protection and water resource development in the Yellow River basin. [Methods] Based on the meteorological and hydrological data of the source region of the Yellow River from 1970 to 2021, the distributed water-heat coupled model WEP-ISF was used to analyze the dynamic changes in monthly average flow, actual evapotranspiration, soil temperature, soil moisture content and runoff components in different periods in the source region of the Yellow River, and the multi-factor attribution analysis method was used to quantitatively analyze the contribution of each influencing factor to the variation in runoff volume. [Results] ① Simulation and verification of the hydrological and water-heat change process in the source region of the Yellow River from 1970 to 2021 by using the WEP-ISF model showed that the average absolute percentage error between the simulated soil temperature and remote sensing interpreted value was between 69.78% and 171.55%, and the Nash efficiency coefficient was more than 0.70; the average absolute percentage error between the simulated surface soil moisture content and remote sensing interpreted value was between 13.94% and 20.97%, and the Nash efficiency coefficient was more than 0.5; the Nash efficiency coefficient and average absolute percentage error between the simulated monthly average flow and measured value were 0.80 and 25.85%, respectively; and the Nash efficiency coefficient and average absolute percentage error between the simulated actual evapotranspiration and remote sensing interpreted value were 0.80 and 53.39%, respectively. ② The multi-year average runoff from glaciers, snowmelt, and precipitation in the source region of the Yellow River was 0.9, 14.9, and 70.5 mm, accounting for 1.0%, 17.3%, and 81.7%, respectively, of the runoff depth in the source region of the Yellow River. Compared with the baseline period of 1970—1990, the change in runoff from glaciers, snowmelt and precipitation during the change period of 1991—2021 was 1.48, -3.8, and -13.2 mm, respectively, accounting for 9.53%, -24.48%, and -85.05%, respectively, of the change in the runoff depth of the source region of the Yellow River. ③ The multi-year average runoff at Tangnaihai decreased by $6.77 \times 10^9 \text{ m}^3$, among which the contribution rates of climate, underlying surface, and industrial and agricultural water use changes were 96.46%, 2.49%, and 1.05%, respectively. [Conclusion] Among the many factors affecting runoff change in the source region of the Yellow River, climate is the main driving factor leading to runoff attenuation, which is manifested in the trend of increasing glacier melt water flow and decreasing trend of snowmelt runoff and runoff.

Keywords: source region of the Yellow River; WEP-ISF model; evolution analysis; hydrothermal coupling

长江、黄河、澜沧江等河流源区径流对中下游地区的生态系统稳定和经济社会发展起着不可或缺的作用,这些河流源区因其广袤的冰川、积雪覆盖和多年冻土而对气候变化极为敏感^[1]。人类活动加之气候变化的影响,使得地处青藏高原的黄河源区生态环境有了显著改变,出现了湖泊萎缩、土地沙漠化、地下水储存量减少等现象,致使生态环境更加脆弱和敏感^[2]。在唐乃亥水文站以上的黄河源区,其径流量占整个黄河流域径流量的38%^[3]。因此,研究气候变化形势下黄河源区径流量演变特征,对黄河流域生态保护与高质量发展蕴含显著的科学意义和参考价值。

已有研究表明,黄河源区径流量在人类活动及气候因素的双重影响下,发生了显著变化,在过去几十年周期里表现出下降但近几年略有上升的特征,且运用多种归因分析方法分析各影响因素对径流量变化的贡献。李霞等^[4]利用WEP-QTP模型针对黄河源区在冻融期与非冻融期的径流过程展开系统性

剖析,深入探寻该区域径流的变化规律及其背后成因,并利用趋势分析法得出1956—2020年这一时间段内,黄河源区径流呈现出一种并不显著的增长态势,而这种变化趋势乃是降水因素与气温因素共同作用下的产物。周祖昊等^[5]基于分布式流域二元水循环模型,对黄河流域不同时期的天然河川径流量予以评价,运用多因素归因分析方法得出与1956—1979年水平年情景相比,2016年水平年情景下唐乃亥断面的多年平均天然河川径流量有所增长。就各影响因素贡献率而言,气候因素为108.3%,下垫面因素为-5.8%,社会经济用水为-2.5%。庄稼成等^[6]利用耦合融雪模块的abcd-snow模型,对三江源生态保护措施实施前后黄河源区径流的动态变化展开剖析,同时量化关键气象因素以及人类活动在径流变化中所起作用的程度。利用去趋势方法得出在整个研究时期内,黄河源区的实测径流呈现出不显著的下降态势。其中,降水的改变是使径流变化的关键因素,而其他气候因素所起的相对作用较小。张磊

磊等^[7]利用大尺度陆面水文模型VIC模型对黄河源区流量过程进行模拟,得出降水是产流主要影响因素。在气候变化分析里,对比温度变化,降水变化对该区域水资源影响更大。Zheng Yutong等^[8]利用Budyko理论,对黄河源区1961—2010年期间每五年气候变化在径流变化中贡献率情况展开定量分析,得出气候变化在黄河源区径流减少这一情况中是主要原因所在,占60%~70%。Yan Dan等^[9]基于Budyko理论,通过计算气候变化以及人类活动对黄河源区径流变化的影响,发现气候因素与人类活动在径流变化方面的贡献率分别达到75.33%和24.67%;Wu Jingwen等^[10]利用SWAT模型对黄河源区流量减少原因进行验证,得出气候变化是导致黄河源区径流变化的主要因素,降水与温度对径流变化的贡献率分别是64.2%和25.93%;Qin Yue等^[11]利用GBEHM水文模型对1981—2015年黄河源区水文变化过程模拟,得出黄河源区年径流量与降水量变化趋势一致。

已有针对黄河源区径流变化特征的研究结论存在一定的差异,其主要原因在于采用的模型未能综合考虑源区冰川、积雪和冻土变化对水文过程影响,模型无法精准刻画冰冻圈要素对黄河源区径流影响。Gan Yongde等^[12]对WEP-L模型进行了改进,考虑了冰冻圈要素变化对径流的影响,本研究中,利用改进后的WEP-ISF模型对黄河源区月平均流量、实际蒸散发、土壤温度、土壤含水量和径流成分动态变化过程进行模拟分析,运用多因素归因分析方法剖析关键因素对径流量变化的贡献,进一步加深黄河源区冰冻圈要素变化对黄河源区径流影响的理解。

1 材料与方 法

1.1 研究流域概况

据考察,根据以“河源唯远”的原则,黄河发源于卡日曲的那扎陇查河^[13]。为高原山地气候,区域蒸发量大,是黄河流域重要产流区。水文上界定黄河干流唐乃亥断面以上集水区域称为河源区,地理位置为95°—104°E,31°—37°N,流域总面积 $1.22 \times 10^5 \text{ km}^2$,占黄河流域总面积的(不含闭流区)的16.2%,干流总长度1 553 km,占黄河干流总长度的28.46%,高程在2 600~6 300 m之间,平均高程4 100 m^[14],海拔高、水流落差大,总体呈西高东低的趋势(图1)。依据中国冻土分布图(国家青藏高原数据中心),黄河源区地处山地和高原多年冻土、中-深季节冻土之间,以季节性冻土为主(图2)。

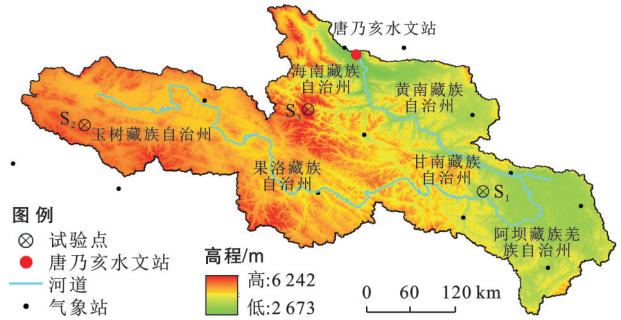


图1 黄河源区范围及高程等基本 信息

Fig.1 Basic information such as scope and elevation of source region of Yellow River basin

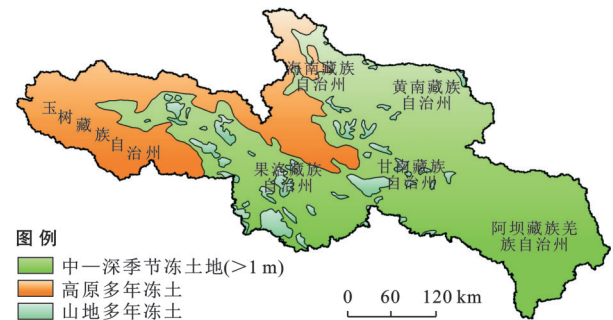


图2 黄河源区冻土分布示意图

Fig.2 Distribution diagram of frozen soil in source region of Yellow River

1.2 数据来源

构建考虑冰冻圈要素的黄河源区流域分布式水文模型所需数据包括唐乃亥水文站1970—2020年的月径流数据,相关数据来源于黄河水利委员会水文局。具体涵盖1970—2021年期间流域内12个国家气象站的逐日降水量、风速、气温、日照时数以及湿度等实际观测数据,数据从中国气象数据网(<http://cdc.cma.gov.cn/home.do>)获取。土地利用数据[中国土地利用数据(1980—2015)]、地形地貌数据[中国数字高程图(1 km)]、植被覆盖度数据[中国区域250 m植被覆盖度数据集(2000—2023)]与叶面积指数[青藏高原叶面积指数数据集(1982—2015)]月数据,来源于国家青藏高原数据中心、土壤类型数据(全国第二次土壤普查信息图)、冰川分布等^[15]年数据。

由于研究区缺少实测点的土壤水热数据,且黄河源区面积较广,为了验证模型对流域水热过程模拟效果,根据海拔高度,在黄河源区选取3个代表点位,与模型所划分的最小计算单元模拟值进行率定验证(模型基于500 m分辨率DEM对黄河源区数字河网提取和子流域划分,共将黄河源区划分为1 529个子流域,进一步,将每一子流域按照高程变化细分为1~10个等高带,全区共计5 662个等高带,作为模型基本计算单元。),其位置如图1所示。位置中心点

位地理坐标分别为 $S_1(101.733^\circ E, 33.768^\circ N)$, $S_2(96.706^\circ E, 34.605^\circ N)$ 和 $S_3(99.528^\circ E, 34.803^\circ N)$, 海拔高度分别为 3 500, 4 529 和 5 810 m。利用国家青藏高原科学数据中心下载的卫星遥感解译的土壤水热动态过程数据对模型水热过程进行模拟。所用土壤表层温度时间尺度为日, 年份分别为 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年, 土壤表层含水量时间尺度为 5 日, 年份为 2005 年和 2010 年。

1.3 研究方法

1.3.1 WEP-ISF 模型

WEP-ISF(ice, snow and freezing soil) 分布式水文模型基于二元水循环 WEP-L 模型^[12], 兼顾气象、下垫面、人类取用水以及水利水保工程给水循环带来的影响, 可以模拟大气-陆面能量交换过程, 以水循环各通量要素值作为输出结果。改进的 WEP-ISF 模型中, 将冰川作为独立土地利用类型参与水热平衡计算, 冰川和积雪融水均采用改进的度日因子模型计算。

WEP-ISF 模型在综合考虑模型计算速度和冻结深度影响等基础上, 为提高能量平衡计算精度, 将冻土层细分为 11 层(原 WEP-L 为 3 层), 其中, 针对表层土壤水热变化剧烈等特点, 将其划分为 2 层, 每层 15 cm; 对 3—11 层, 每层为 25 cm。土壤蒸发仅发生在表层土壤, 草本植物覆盖 1—5 层, 乔木根系涵盖 1—11 层。植被根系随着深度增加而逐渐降低, 土壤厚度和植物根系深度根据需要进行调整。模型对冻土产流的 Richards 方程进行了改进, 参考 CoLM 模式^[16] 计算冻土水分运动过程(积分形式), 计算公式如下:

$$\partial\theta_i/\partial t = \partial[D(\theta_i) \times \partial\theta_i/\partial z - K(\theta_i)]/\partial z - \rho_i/\rho_w \times \partial\theta_i/\partial t - S_r(z, t) \quad (1)$$

式中: θ_i 为体积含水量 (cm^3/cm^3); t 是时间 (min); θ_i 是土壤体积冰含量 (cm^3/cm^3); $K(\theta_i)$ 为土壤导水率 (cm/min); ρ_w 和 ρ_i 分别为水和冰的密度 (g/cm^3); $D(\theta_i)$ 是水分扩散率 (cm^2/min); S_r 是源汇项 (min); Z 是垂直坐标轴, 向下为正 (cm)。

研究参考 SHAW 模型^[17], 并以有效导水系数替换原饱和导水系数, 公式如下:

$$K_{ef,j} = K_{s,j} \left[(\theta_{s,j} - \theta_{i,j}) / \theta_{s,j} \right]^{2b_j+3} \quad (2)$$

式中: $K_{ef,j}$ 是有效导水系数 (cm/min); $K_{s,j}$ 是饱和导水系数 (cm/min); $\theta_{s,j}$ 是土壤饱和含水量 (cm^3/cm^3); $\theta_{i,j}$ 是土壤含冰量 (cm^3/cm^3); b_j 为和土壤性质有关的参数。

模型借助质量守恒方程与能量传导模型对冻土水热运移过程予以计算。结合 van Genuchten 模型^[18], 提出了水热联合方程, 进而可以将冻土水热运

动方程联合求解, 进一步完善了土壤水热参数的物理过程数学表达, 冻土水热联合方程表示为:

$$\theta_i = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left\{ 1 / \left\{ 1 + [\alpha L_f (T - T_f) / g T] \right\}^n \right\}^m \quad (3)$$

$$\theta_{i,j} = \theta_{i,j} - \theta_{i,j} \quad (4)$$

$$\theta_{i,j} = \min[\theta_{w0,j}, \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left\{ 1 / \left\{ 1 + [\alpha L_f (T - T_f) / g T_s] \right\}^n \right\}^m] \quad (5)$$

式中: L_f 是冰的融解潜热 (J/kg); T_f 是冰点温度, 273.15 K; θ_r 是残余含水量; θ_s 是饱和含水量; θ_i 是总含水量; θ_{w0} 为初始液态水含量 (cm^3/cm^3); g 是重力加速度 (m/s^2); T_s 是土壤绝对温度 ($T_s = T + 273.15$), K; T 是土壤温度 (K); m, α, n 为参数; 下标 j 为土层; 其余参数同前。

在冰川覆盖区, 鉴于冰川厚度较大, 气温对土壤温度的影响不大, 所以忽略冰川热传导过程对土壤温度的影响, 将热通量设为 0。这里的上边界通过能量平衡方程来计算, 下边界是恒温边界, 按海拔高度加以设定。土壤热运移过程则依靠热传导方程来计算^[17]:

$$C_v \times \partial T / \partial t = \partial(\lambda \times \partial T / \partial z) / \partial z + L_i \rho_i \times \partial \theta_i / \partial t \quad (6)$$

式中: C_v 是土壤比热容 ($\text{J}/(\text{cm}^3 \cdot ^\circ\text{C})$); L_i 是冰的融解潜热 (J/g); λ 是非饱和土壤导热系数 ($\text{W}/(\text{cm} \cdot \text{K})$); t 为时间 (min); 其余参数同前。

1.3.2 模型参数率定与验证

WEP-ISF 模型参数主要包含 4 类: ① 河道地及地表面系统参数; ② 植被参数; ③ 土壤导热系数; ④ 土壤饱和和导水系数、含水层导水系数、给水度等参数。鉴于参数存在空间变异情况, 在模拟时通常会采用单元均值或有效参数, 所以部分关键参数需结合模型检验, 并依据流量实测数据来进行调整。本研究中需率定的关键参数有含水层厚度、土壤导水系数、土壤孔隙度、土壤导热系数、气孔阻抗以及地下水导水系数。

在模型参数率定与验证方面, 将 1970—1990 年设为率定期, 1991—2020 年设为验证期。模型采用变时间步长: 若降雨强度超过 5 mm 的入渗过程, 时间步长设为 1 h; 坡地与河道汇流的时间步长设为 6 h; 其余情况则采用 1 d 的时间步长。模型适用性评价对于模型运用十分关键, 为衡量模型校验效果, 本文选用 Nash-Sutcliffe 效率系数^[19] 以及平均绝对百分比误差 MAPE^[20] 展开评价。平均绝对百分比误差更明确地体现了实际值与预测值的偏离程度, 避免了正负误差相互抵消的问题, 平均相对误差可能会在一定程度上模糊这种真实的偏差情况。

1.3.3 径流演变多因素归因分析方法

运用多因素归因分析方法^[5]来进行归因分析。鉴于影响径流变化的 n 个因素分别都有基准期和变化期这2种状态(且二者的时间序列允许重叠),所以设定了 2^n 个模拟情景。利用分布式水循环模型针对各个情景展开模拟,算出各情景下黄河源区径流的多年平均值,之后按照以下公式对贡献率进行分解计算:

$$\delta x_i = \frac{1}{2^{n-1}} \sum_{j=1}^{2^n} e_{i,j} \times S_j \quad (i=1, 2 \dots n; j=1, 2 \dots 2^n) \quad (7)$$

$$\beta_i = \frac{\delta x_i}{\left| \sum_{i=1}^n \delta x_i \right|} \times 100\% \quad (i=1, 2 \dots n) \quad (8)$$

式中: δx_i 代表因素 x_i 对某水循环变量的贡献量; $e_{i,j}$ 为第 i 个因素在第 j 个情景下的权重系数(若该因素

处于变化期,此系数取值为1,若处于基准期,则取值-1); S_j 是第 j 个情景下模拟得到的某个水循环变量的多年平均值; β_i 为第 i 个因素占总变化的贡献率,其值为正表明起到增加作用,为负则说明起到减少作用。

通过对各因素在水资源减少方面的贡献率进行定量计算,将1970—1990年设为基准期,1991—2021年为变化期,运用多因素归因分析方法剖析近50年黄河源区径流演变规律。影响因素涵盖气候、下垫面(含植被、灌溉农田面积、非灌溉农田面积)和工农业用水(包含地下、地表取用水)3类,共设置 2^3 即8个情景(表1)。基准期和变化期不同因素的设置情况见表2,黄河源区主要影响因素的多年平均值详见表3。

表1 多因素归因分析法下各情景的设置

Table 1 Scenario setting using multi-factor attribution analysis

情景	气候变化	下垫面	工农业用水	情景	气候变化	下垫面	工农业用水
I	基准期	基准期	基准期	V	变化期	变化期	基准期
II	变化期	基准期	基准期	VI	变化期	基准期	变化期
III	基准期	变化期	基准期	VII	基准期	变化期	变化期
IV	基准期	基准期	变化期	VIII	变化期	变化期	变化期

表2 基准期和变化期各因素的设置

Table 2 Setting of each factor during base period and change period

时期	气候变化	下垫面	工农业用水
基准期	1970—1990年逐日气象数据	1980年土地利用和植被参数	1980年地表、地下取水量
变化期	1991—2021年逐日气象数据	2010年土地利用和植被参数	2010年地表、地下取水量

表3 黄河源区水循环主要影响因素均值

Table 3 Average value of main influencing factors of water cycle in source region of Yellow River

项目	基准期	变化期	差值
降水量/mm	597.37	591.98	-5.39
气温/°C	-3.12	-2.19	0.93
工农业用水/ 10^8 m^3	0.38	0.51	0.13
灌溉农田面积/ km^2	417.58	390.76	-26.82
非灌溉农田面积/ km^2	120 936.17	120 962.99	26.82
冰川面积/ km^2	110.54	100.53	-10.01

2 结果与分析

2.1 月径流及实际蒸散发模拟率定与结果验证

运用该模型对唐乃亥水文站1970—2020年月径流过程予以模拟和验证。结果表明(图3,表4),考虑土壤冻融循环、冰川/积雪产流等过程,模型对黄河源区月均径流模拟有较好的模拟效果,且与气象站

测得降水数据相对应。其中月均径流在率定期和验证期的误差分别为26.41%和25.46%,Nash系数分别为0.79和0.81,月均径流在整个验证时期的误差为25.85%,Nash系数为0.80。

流域蒸散发遥感解译值由国家青藏高原科学数据中心下载(ET Monitor全球1 km分辨率地表实际蒸散发数据集),用于研究区域实际蒸散发模拟结果对比。月均蒸散发在整个验证时期的误差为53.39%,Nash系数为0.80(如图4和表4所示)。月径流及实际蒸散发模拟效果较好,表明改进的模型符合分布式水文模型建模的需求,能有效模拟水文站点月径流和流域月实际蒸散发过程。

2.2 土壤温度模拟率定与结果验证

通过构建模型对研究区域土壤表层温度及土壤表层含水量等进行模拟,3个等高带计算单元气温均为气象站数据插值得到,为等高带计算单元的面均值,并非实测数据。3个等高带计算单元遥感解

译值由国家青藏高原科学数据中心下载[中国西部逐日 1 km 全天候地表温度数据集(TRIMS LSTTP; 2000—2022) V2 和青藏高原地区 2005, 2010, 2015,

2017, 2018 年逐日 $0.01^{\circ} \times 0.01^{\circ}$ 地表土壤水分产品], 进而与等高带计算单元土壤表层温度和含水量模拟进行对比。

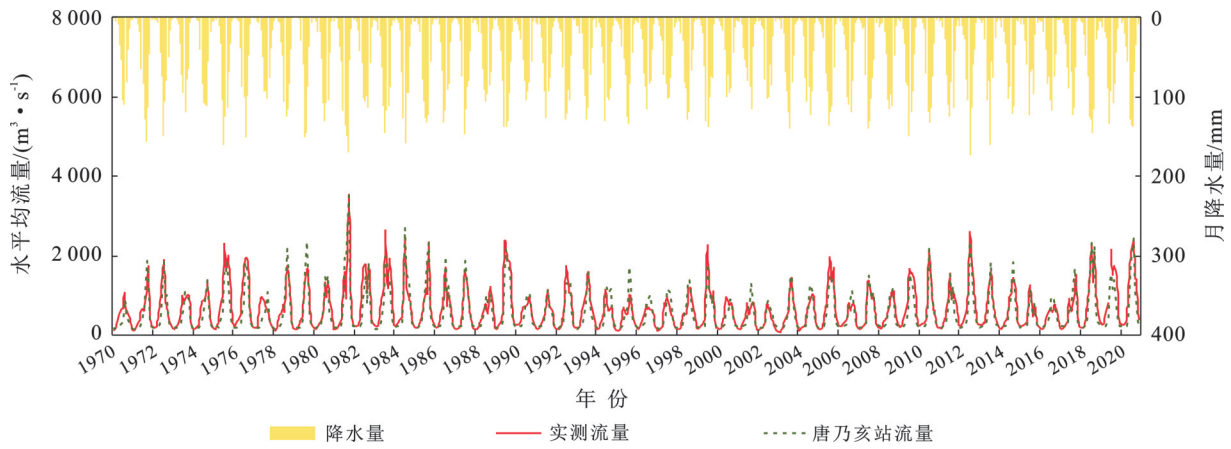


图 3 唐乃亥水文站逐月径流率定与验证

Fig.3 Determination and verification of monthly runoff at Tangnaihai hydrologic station

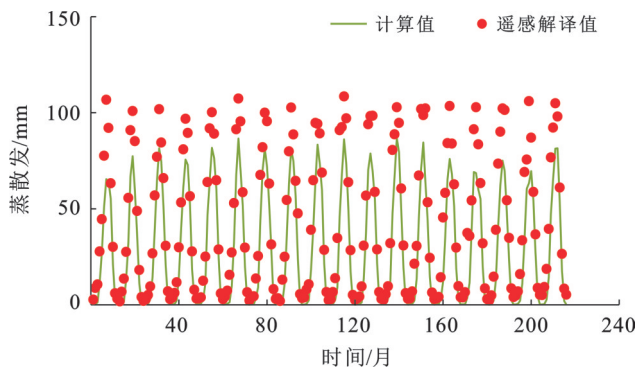


图 4 黄河源区流域蒸散发率定与验证

Fig.4 Determination and verification of evapotranspiration rate in watershed in source region of Yellow River

表 4 唐乃亥水文站径流及实际蒸散发率定与验证结果

Table 4 Calibration and verification of streamflow and evapotranspiration at Tangnaihai hydrologic station

项目	时期	平均绝对误差/%	Nash 系数
径流月均值	1970—1990 年	26.41	0.79
	1991—2020 年	25.46	0.81
	1970—2020 年	25.85	0.80
实际蒸散发月均值	2001—2019 年	53.39	0.80

通过模型对 3 个等高带计算单元土壤表层温度的模拟及监测结果详见表 5 和图 5。可以看到, 虽然由于数据精度不高和验证数据非实测等情况导致结果存在一定误差, 但该模型依然可以较好地反应计算单元土壤表层温度在年内变化。平均绝对百分比误差在 69.78%~171.55% 之间, Nash 效率系数均超 0.70, 表明模型大体能反映该地区土壤表层温度随海拔的变化情况。且在不同海拔下, 温度在年内变化

趋势一致, 在长时间尺度上也能刻画该地区土壤表层温度变化。

表 5 监测点土壤表层温度模拟结果验证

Table 5 Monitoring and simulation results of soil surface temperature changes over time of monitored points

监测点	年份	土壤温度	
		平均绝对误差/%	Nash 系数
S ₁	2000	74.28	0.85
	2005	158.35	0.76
	2010	76.74	0.89
	2015	142.13	0.87
S ₂	2000	108.84	0.90
	2005	57.80	0.84
	2010	124.35	0.95
	2015	69.78	0.90
S ₃	2000	171.55	0.74
	2005	133.48	0.70
	2010	144.11	0.85
	2015	129.09	0.86

注: S₁, S₂ 和 S₃ 分别代表不同等高带计算单元, 下同。

2.3 土壤含水量模拟率定与验证

表层土壤含水量模拟及检测结果见图 6 和表 6。通过对 3 个等高带计算单元土壤表层含水量进行模拟验证可以看到, 考虑土壤冻融循环过程后, 该模型可以较好地反应计算单元土壤表层含水量年际变化。土壤表层含水量模拟值与遥感解译值的误差在 13.94%~20.97% 之间, Nash 效率系数均超过 0.34。说明在不同海拔下, 模型也基本可以反映该地区土

壤表层含水量的变化,且年内变化趋势基本一致。相较于土壤温度模拟的 Nash 系数,土壤含水量的 Nash 系数偏小。这可能是由于土壤含水量的变化不

仅与土壤温度相关,还受降水量的影响,同时,降水的模型输入值和点位监测值存在差异,进而干扰了模型中土壤含水量的模拟。

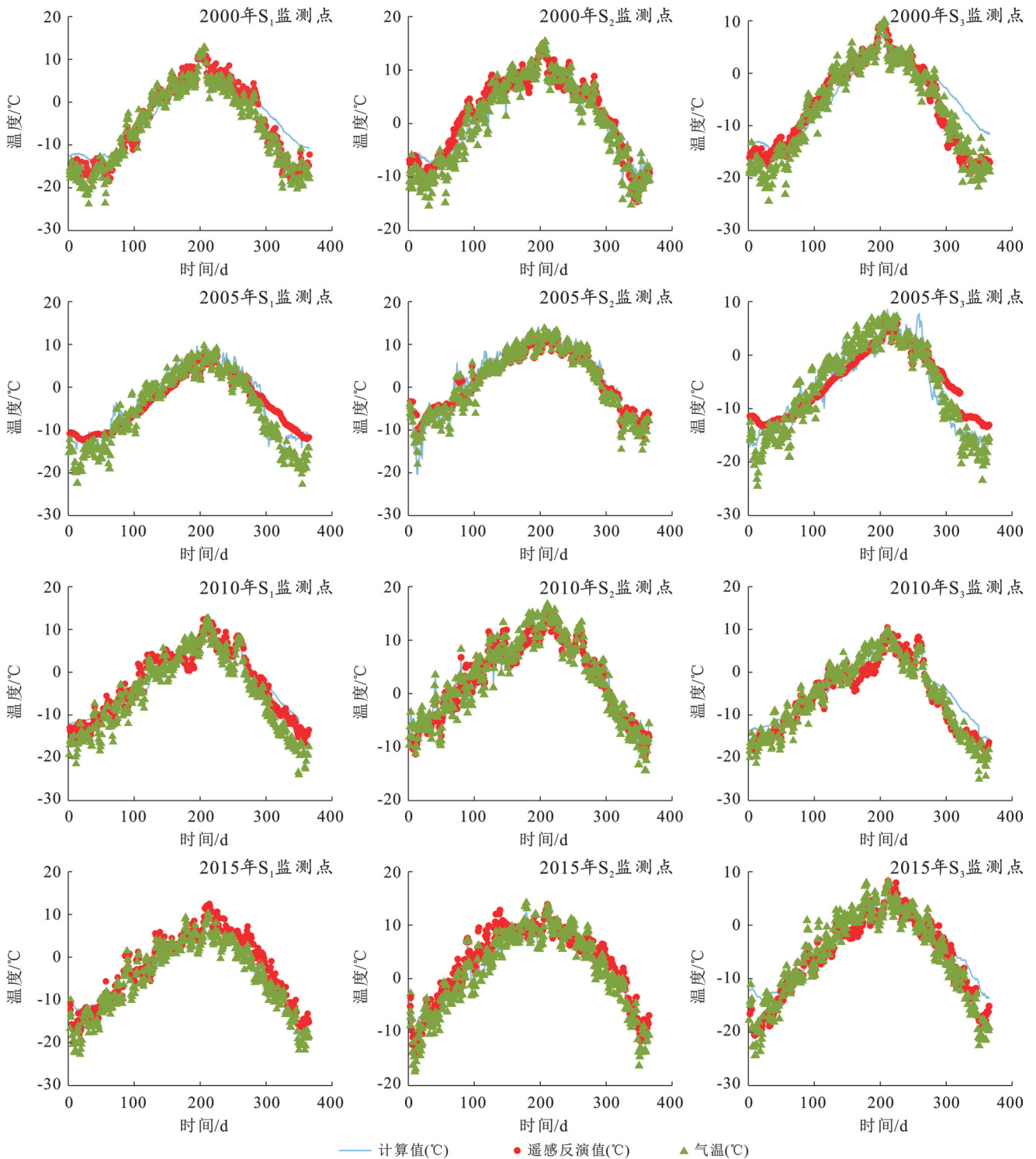


图 5 土壤表层温度随时间变化监测与模拟结果

Fig.5 Monitoring and simulation results of soil surface temperature changes over time

2.4 黄河源区径流与气象水文要素变化特征分析

利用改进的 WEP-ISF 模型模拟得到黄河源区 1970—2021 年期间,冰川、融雪和降水产流多年平均

为 0.9, 14.9 和 70.5 mm, 而黄河源区径流由冰川、融雪和降水产生, 可得冰川、融雪和降水产流分别占黄河源区径流深的 1.0%, 17.3% 和 81.7%。1970—1990 年

期间,冰川、融雪和降水产流多年平均为 0.02, 17.1 和 78.4 mm, 可得冰川、融雪和降水产流分别占黄河源区径流深的 0.02%, 17.9% 和 82.1% (表 7)。

为探究黄河源区径流变化原因, 将 1970—1990 年设为基准期, 1991—2021 年为变化期, 两个时间段内黄河源区年均气温、年降水量、年径流深、年蒸发量、地表水资源量、地下水资源量、总水资源量、融冰产流量、融雪产流量、降水产流量模拟结果表明 (表 7)。相较于时段 1, 时段 2 和全时段年平均气温及蒸发量上升, 降水量和径流深下降。由图 7a 可知, 径流呈轻微下降趋势, 可能是融雪产流和降水产流共同减少的结果。根据 M-K 检验结果, 1970—2021 年气温 (M-K 检验统计量 $Z_c=6.344 > 1.96$) 和蒸发量 ($Z_c=2.999 > 1.96$) 呈显著上升趋势, 降水量呈不显著

增加趋势 ($Z_c=1.278 < 1.96$), 径流深呈不显著减少趋势 ($Z_c=-0.347 > -1.96$) (图 7b)。

表 6 土壤表层含水量模拟与结果验证
Table 6 Monitoring and verification of soil surface temperature changes over time

监测点	年份	土壤湿度	
		平均绝对误差/%	Nash系数
S ₁	2005	13.99	0.76
	2010	20.88	0.34
S ₂	2005	20.97	0.48
	2010	20.28	0.50
S ₃	2005	16.93	0.55
	2010	13.94	0.55

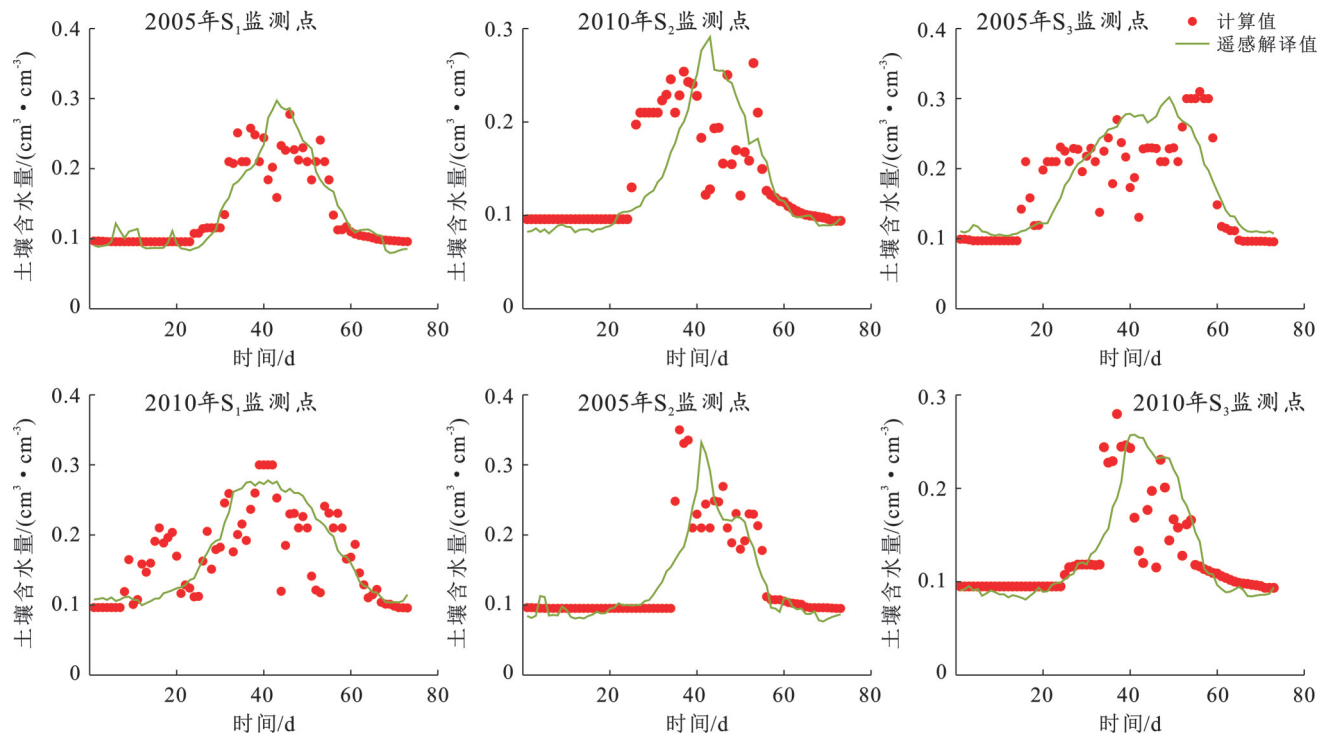


图 6 土壤表层含水量随时间变化监测与模拟结果

Fig.6 Monitoring and simulation results of soil surface moisture content over time

2.5 黄河源区径流变化归因分析

利用 WEP-ISF 模型对所列情景进行分别模拟, 并利用公式 (7) 和 (8) 对各影响因素贡献率进行计算, 可得黄河源区唐乃亥水文站以上流域各影响因素贡献率 (表 8)。可以看出, 黄河源区径流变化的主因是气候因素, 贡献率占 96.46%, 而下垫面、工农业用水贡献率分别占 2.49% 和 1.05%。综上所述, 黄河源区气温、降水等气候因素变化对径流量影响较大, 叶面积指数、植被覆盖度、灌溉农田面积、非灌溉农田面积等下垫面因素和工农业用水因素变化对径流量影响较小。

利用改进的 WEP-ISF 模型, 模拟得到黄河源区 1991—2021 年期间冰川、融雪和降水产流多年平均值为 1.5, 13.3 和 65.2 mm, 1970—1990 年期间, 冰川、融雪和降水产流多年平均值为 0.02, 17.1 和 78.4 mm, 总径流深变化量为 15.52 mm, 冰川、融雪和降水产流变化量 1.48, -3.8 和 -13.2 mm, 分别占黄河源区径流深变化量的贡献率分别为 9.53%, -24.48% 和 -85.05%。综合可得, 变化期 1991—2021 年相较于基准期 1970—1990 年产流变化主要是由于气温升高等因素导致冰川融水产流增多, 融雪产流和降水产流共同减少的结果。

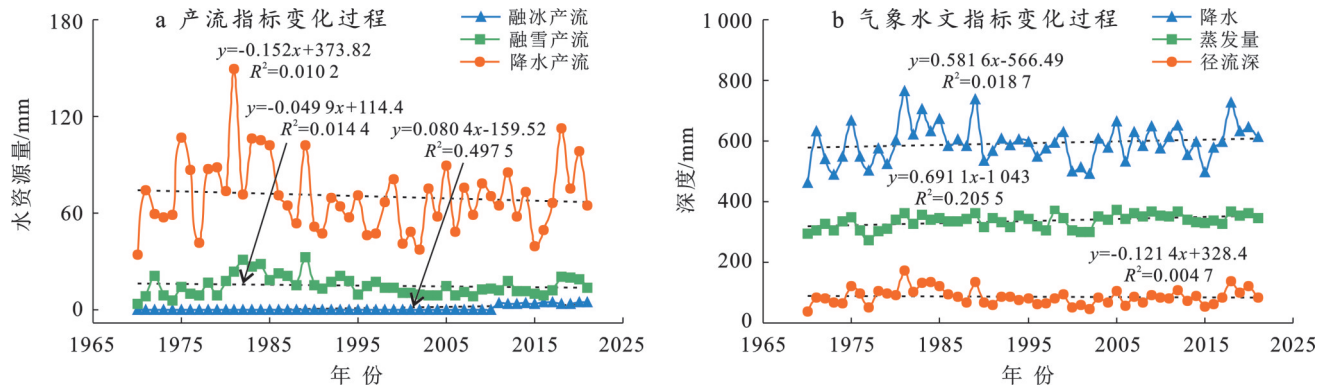


图7 1970—2021年黄河源区产沙及气象水文指标变化过程

Fig.7 Changes of meteorological, hydrological and runoff yield indexes in source region of Yellow River from 1970 to 2021

表7 黄河源区1970—2021年气象水文指标(多年平均值)
Table 7 Meteorological and hydrological indicators of source region of Yellow River during 1970—2021 (annual average)

指标	1970—1990年	1991—2021年	1970—2021年
气温/°C	-3.1	-2.2	-2.6
年降水量/mm	597.4	592.0	594.1
年径流深/mm	95.5	80.0	86.2
年蒸发量/mm	327.4	341.9	336.1
地表水资源量/mm	163.6	150.7	155.9
地下水资源量/mm	128.0	137.5	133.6
总水资源量/mm	291.6	288.2	289.5
融冰产流量/mm	0.02	1.5	0.9
融雪产流量/mm	17.1	13.3	14.9
降水产流量/mm	78.4	65.2	70.5

2021年黄河源区径流组分里融雪径流、降水径流以及融冰径流的贡献率。冰川、融雪和降水产流多年平均为0.9, 14.9, 70.5 mm, 分别占黄河源区径流深的1.0%, 17.3% 和 81.7%。诸多学者亦借助 Glacier-ESSI-3模型及数据分析等量化了黄河源区径流组分的贡献率, 融冰产流均1%左右, 黄河源区径流主要由降水获得, 且本文结果与各学者所得总体差异较小(表9)。

本文基于改进的WEP-ISF模型量化了黄河源区气候、下垫面以及工农业用水变化对径流驱动机制。以1970—1990年为基准期, 变化期1991—2021年气候、下垫面以及工农业用水变化影响的贡献率分别为96.46%, 2.49% 和 1.05%。尽管在所用数据以及采用的模型方法方面存在差别, 但本文与其他文献所得结果大体一致, 都认定气候变化是致使黄河源区径流发生变化的主要驱动因子(表10)。而且, 本文更进一步对黄河源区气候变化驱动径流组分(降水径流、融雪径流以及融冰径流)的机制展开了定量分析。

3 讨论

本文借助改进的WEP-ISF模型, 量化了1970—

表8 黄河源区径流量变化归因分析

Table 8 Attribution analysis of runoff variation in source region of Yellow River

站点	径流量变化/ 10 ⁸ m ³	各因素影响量/10 ⁸ m ³			各因素贡献率/%		
		气候	下垫面	工农业用水	气候	下垫面	工农业用水
唐乃亥	67.65	65.26	1.68	0.71	96.46	2.49	1.05

4 结论

本研究利用改进的WEP-ISF模型模拟了黄河源区冰川、融雪和降水产流量, 量化了径流深中各因素产流量的贡献率及构成, 并进一步定量分析了黄河源区下垫面、气候和工农业用水变化对径流变化的贡献率。

(1) 改进的WEP-ISF模型对黄河源区的月平均径流有较好的模拟效果, Nash效率系数和平均绝对

百分比误差分别为0.80和25.85%。实际蒸散发模拟值与遥感解译值的Nash效率系数和平均绝对百分比误差分别为0.80和53.39%。改进的WEP-ISF模型能较好地模拟土壤表层温度和土壤表层含水量随时间的动态变化特征, 土壤表层温度的平均Nash系数和平均绝对百分比误差分别为0.84和115.87%, 土壤表层含水量的平均Nash系数和平均绝对百分比误差分别为0.53和17.83%。表明改进的WEP-ISF模型能够有效模拟黄河源区月径流及流域水热过程。

表 9 黄河源区径流及其组分研究成果对比
Table 9 Comparison of research results on runoff and its components in source region of Yellow River

年份	径流规律	降水径流 贡献率/%	融雪径流 贡献率/%	融冰径流 贡献率/%	方法	来源
1970—2021	不显著减少	81.70	17.30	1.00	WEP-ISF 模型	本文
2006—2019		93.53	5.53	0.96	Glacier-ESSI-3 模型	陈龙飞 ^[21]
1956—2020	下降趋势			2.30		姚檀栋等 ^[22]
1956—1999	略微增长趋势			0.63		谢昌卫等 ^[23]

表 10 黄河源区径流变化归因分析研究成果对比
Table 10 Comparison of research results on attribution analysis of runoff change in source region of Yellow River

年份	人类活动贡献率/%	气候变化贡献率/%	方法	来源
1970—2021	3.54	96.46	WEP-ISF 模型	本文
1967—2020	44.42	55.50	ABCD 水文模型	曹振江等 ^[24]
1990—2016	68.00	81.46	SWAT 模型	李芳 ^[25]
1988—2018	18.54	74.08	Budyko 假设弹性系数法	王召航 ^[26]
1970—2000	20.09	79.91	VIC-3 L 模型	陈利群等 ^[27]

(2) 黄河源区径流成分模拟和径流变化归因分析结果表明,在 1970—2021 年期间,冰川、融雪和降水多年平均产流径流深分别为 0.9, 14.9, 70.5 mm, 冰川、融雪和降水产流变化量 1.48, -3.8, -13.2 mm, 分别占黄河源区径流深变化量的贡献率分别为 9.53%, -24.48% 和 -85.05%。气候、下垫面和工农业用水变化对黄河源区径流变化的贡献率依次为 96.46%, 2.49% 和 1.05%, 黄河源区径流变化主因是气候因素,且冰川融水产流呈现增多趋势,而融雪产流和降水产流呈减少趋势。

参考文献 (References)

- [1] 刘虎,王磊.第三极地区冰川径流研究进展[J].冰川冻土,2022,44(3):737-752.
Liu Hu, Wang Lei. A review of glacier runoff studies in the third pole region [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2022, 44(3):737-752.
- [2] Si Jianhua, Li Jianming, Lu Sujin, et al. Effects of climate change on surface runoff and soil moisture in the source region of the Yellow River [J]. Water, 2023, 15(11):2104.
- [3] 余忠全,杨雪,王盼,等.耦合不同融雪方法的黄河源区径流模拟与评估[J/OL](2024-04-01).西安理工大学学报, <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1294.n.20240329.1717.010.html>.
Yu Zhongquan, Yang Xue, Wang Pan, et al. Evaluation of snow simulation methods on hydrologic simulation in the Yellow River's source region [J/OL](2024-04-01). Journal of Xi'an University of Technology, <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1294.n.20240329.1717.010.html>.
- [4] 李霞,周祖昊,刘佳嘉,等.基于 WEP-QTP 模型的近 65 a 黄河源区径流演变分析[J].人民黄河,2024,46(2):41-48.

Li Xia, Zhou Zuhao, Liu Jiajia, et al. Analysis of runoff evolution in the source region of the Yellow River in the past 65 years based on the WEP-QTP model [J]. Yellow River, 2024, 46(2):41-48.

- [5] 周祖昊,刘佳嘉,严子奇,等.黄河流域天然河川径流量演变归因分析[J].水科学进展,2022,33(1):27-37.
Zhou Zuhao, Liu Jiajia, Yan Ziqi, et al. Attribution analysis of the natural runoff evolution in the Yellow River basin [J]. Advances in Water Science, 2022, 33(1):27-37.
- [6] 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 the Yellow River [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2022, 20(5):953-965.
- [7] 张磊磊,郝振纯,童凯,等.VIC 模型在三江源地区产汇流模拟中的应用[J].水电能源科学,2013,31(1):18-20.
Zhang Leilei, Hao Zhenchun, Tong Kai, et al. Application of VIC model to runoff simulation of three-source regions [J]. Water Resources and Power, 2013, 31(1):18-20.
- [8] Zheng Yutong, Huang Yuefei, Zhou Sha, 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.
- [9] Yan Dan, Lai Zhizhu, Ji Guangxing. Using budyko-type equations for separating the impacts of climate and vegetation change on runoff in the source area of the Yellow River [J]. Water, 2020, 12(12):3418.

- [10] Wu Jingwen, Zheng Haiyan, Xi Yang. SWAT-based runoff simulation and runoff responses to climate change in the headwaters of the Yellow River, China [J]. *Atmosphere*, 2019,10(9):509.
- [11] Qin Yue, Lei Huimin, Yang Dawen, et al. Long-term change in the depth of seasonally frozen ground and its ecohydrological impacts in the Qilian Mountains, north-eastern Tibetan Plateau [J]. *Journal of Hydrology*, 2016,542:204-221.
- [12] Gan Yongde, Li Qingqing, Liu Huan, et al. Construction and verification of distributed hydrothermal coupling model in the source area of the Yangtze River [J]. *Journal of Hydrology:Regional Studies*, 2024,56:102057.
- [13] 长江黄河发现新源头[J]. *海河水利*, 2009(5):81. The Yangtze River and the Yellow River have found a new source [J]. *Haihe Water Resources*, 2009(5):81.
- [14] 刘壮添,陈睿智,王未. 气候变化和土地利用变化对黄河源区径流变化的累积影响评估[J]. *人民珠江*, 2022, 43(7):29-35. Liu Zhuangtian, Chen Ruizhi, Wang Wei. Assessment of cumulative impacts of climate change and land use change on runoff variations in source area of Yellow River [J]. *Pearl River*, 2022,43(7):29-35.
- [15] 张勇,刘时银,王欣. 高亚洲冰川区度日因子空间分布数据集[J]. *中国科学数据*, 2019,4(3):137-147. Zhang Yong, Liu Shiyin, Wang Xin. A dataset of spatial distribution of degree-day factors for glaciers in high mountain Asia [J]. *China Scientific Data*, 2019,4(3):137-147.
- [16] 郭琦,刘少锋,袁华,等. 基于FLUXNET数据集对陆面模式CoLM能量通量的单点评估[J]. *气候与环境研究*, 2022,27(6):688-706. Guo Qi, Liu Shaofeng, Yuan Hua, et al. Evaluating energy fluxes of the common land model based on FLUXNET dataset [J]. *Climatic and Environmental Research*, 2022,27(6):688-706.
- [17] Fu Chong, Xue Jing, Chen Junfeng, et al. Evaluating spatial and temporal variations of soil water, heat, and salt under autumn irrigation in the Hetao irrigation district based on distributed SHAW model [J]. *Agricultural Water Management*, 2024,293:108707.
- [18] Wang Shijun, Yang Jing, Wang Xing, et al. Uncertainty in determination of the soil-water characteristic curve based on the van Genuchten model [J]. *Sustainability*, 2023,15(8):6740.
- [19] Lin Feng, Chen Xingwei, Yao Huaxia. Evaluating the use of Nash-sutcliffe efficiency coefficient in goodness-of-fit measures for daily runoff simulation with SWAT [J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2017,22(11):05017023.
- [20] 张观山,丁小明,何芬,等. 基于LSTM-AT的温室气体温度预测模型构建[J]. *农业工程学报*, 2024,40(18):194-201. Zhang Guanshan, Ding Xiaoming, He Fen, et al. Predicting greenhouse air temperature using LSTM-AT [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2024,40(18):194-201.
- [21] 陈龙飞. 三江源地区雪冰动态变化及其对流域水文过程的影响[D]. 北京:中国科学院大学(中国科学院空天信息创新研究院), 2022. Chen Longfei. Snow and glacier variation and its impact on hydrological processes in the three-rivers headwater region [D]. Beijing: Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, 2022.
- [22] 姚檀栋,徐柏青,谭德宝,等. 气候变化对江河源区水循环的影响[J]. *青海科技*, 2022,29(5):4-11. Yao Tandong, Xu Baiqing, Tan Debao, et al. Effects of climate change on water cycle in the source region of the Yangtze and Yellow rivers [J]. *Qinghai Science and Technology*, 2022,29(5):4-11.
- [23] 谢昌卫,丁永建,刘时银,等. 长江—黄河源寒区径流时空变化特征对比[J]. *冰川冻土*, 2003,25(4):414-422. Xie Changwei, Ding Yongjian, Liu Shiyin, et al. Comparison analysis of runoff change in the source regions of the Yangtze and Yellow rivers [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2003,25(4):414-422.
- [24] 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):209-217. Cao Zhenjiang, Ji Guangxing, Yang Ruiting, et al. Multi-temporal scale attribution analysis of actual evapotranspiration and runoff changes in the source area of the Yellow River [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2025,32(1):209-217.
- [25] 李芳. 黄河上游水源涵养区径流变化及其影响因素研究[D]. 甘肃 兰州:兰州大学, 2022. Li Fang. Study on the runoff changes and influencing factors in the water conservation area of the upper reaches of Yellow River basin [D]. Lanzhou, Gansu: Lanzhou University, 2022.
- [26] 王召航. 气候变化背景下黄河源区径流演变与模拟预估[D]. 河南 郑州:华北水利水电大学, 2023. Wang Zhaohang. Runoff variation and simulation in the source region of the Yellow River under climate change [D]. Zhengzhou, Henan: North China University of Water Resources and Electric Power, 2023.
- [27] 陈利群,刘昌明. 黄河源区气候和土地覆被变化对径流的影响[J]. *中国环境科学*, 2007,27(4):559-565. Chen Liqun, Liu Changming. Influence of climate and land-cover change on runoff of the source regions of Yellow River [J]. *China Environmental Science*, 2007, 27(4):559-565.