

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2026.01.017

气候变化下西北内陆河典型流域出山径流 变化归因分析

李光轩^{1,2,3}, 赵钟楠¹, 李原园¹, 陈 飞¹, 何 君¹, 潘扎荣¹, 李 激¹,
张 越¹, 刘 震¹, 陈 康¹

(1. 水利部水利水电规划设计总院; 2. 北京大学环境科学与工程学院; 3. 教育部水沙科学重点实验室)

摘要:为研究气候变化下西北内陆河流域水循环与水资源演变规律,选取疏勒河昌马堡站子流域和叶尔羌河卡群站子流域作为研究对象,采用 Sen's 斜率估计法分析了 1956—2016 年水文气象要素的变化特征,利用 Mann-Kendall 趋势检验法确定了径流量的突变年份,运用随机森林模型和 SHAP 方法量化评估了降水、积雪融水和冰川融水对径流的影响,基于 CMIP6 多模式数据预测了未来径流变化趋势。结果表明:1956—2016 年昌马堡站子流域和卡群站子流域气候都经历了显著的暖湿化趋势,两子流域年径流突变年份分别为 1993 年和 1997 年;在气候暖湿化背景下,两流域降水和冰川融水均呈增加趋势,但积雪融水趋势表现为一升一降;随机森林模型可有效模拟两流域径流的逐月变化,率定期纳什效率系数分别为 0.975~0.976 和 0.984~0.985;昌马堡站子流域冰川融水对径流的影响最大,其次是积雪融水和降水;卡群站子流域突变前和整体时段冰川融水对径流影响最大,其次是积雪融水和降水,但突变后降水的影响超越了积雪融水;基于 CMIP6 多模式数据的预估反映出未来两个子流域年径流或将持续增加,但增加趋势有所减弱。

关键词:气候变化;径流;度日因子法;随机森林模型;疏勒河流域;叶尔羌河流域

Attribution analysis of mountainous runoff evolution in typical basins of northwest inland rivers under climate change//Li Guangxuan^{1,2,3}, Zhao Zhongnan¹, Li Yuanyuan¹, Chen Fei¹, He Jun¹, Pan Zharong¹, Li Wei¹, Zhang Yue¹, Liu Zhen¹, Chen Kang¹(1. MWR General Institute of Water Resources and Hydropower Planning and Design; 2. College of Environmental Sciences and Engineering, Peking University; 3. Key Laboratory of Water and Sediment Sciences, Ministry of Education)

Abstract: To study the water cycle and water resources evolution laws in the inland river basins of Northwest China under climate change, the sub-basins of Changmabao Station on the Shule River and Kaqun Station on the Yarkand River were selected as the research objects. The Sen's slope method was used to analyze the variation characteristics of hydro-meteorological elements from 1956 to 2016. The Mann-Kendall trend test was used to identify the years of runoff abrupt changes. The random forest model and SHAP method were applied to quantify the effects of precipitation, snow meltwater, and glacier meltwater on runoff. The future runoff change trend was predicted based on CMIP6 multi-model data. The findings indicate that from 1956 to 2016, both the Changmabao and Kaqun station sub-basins experienced a significant warming-wetting trend, with abrupt change years in annual runoff occurring in 1993 and 1997, respectively. Under the background of warming-wetting climate, precipitation and glacier meltwater in the two sub-basins showed increasing trends, while snow meltwater exhibited divergent trends with one rising and the other declining. The random forest model can effectively simulate the monthly runoff variations in both sub-basins, achieving the Nash-Sutcliffe efficiency coefficient of 0.975-0.976 and 0.984-0.985 in the calibration period, respectively. In the Changmabao Station sub-basin, glacier meltwater had the greatest impact on runoff, followed by snow meltwater and precipitation; in the Kaqun Station sub-basin, glacier meltwater had the greatest influence before the abrupt change and during the overall period, while influence of precipitation exceeded snow meltwater after the abrupt change. Projections based on CMIP6 multi-model dataset indicate that the annual runoff of the two sub-basins may continue to increase in the future, but the increasing trend will weaken.

Key words: climate change; runoff; degree-day factor method; random forest model; the Shule River Basin; the Yarkant River Basin

基金项目:国家重点研发计划项目(2024YFC3211303,2022YFC3202300);国家自然科学基金重大项目(21&ZD104)

作者简介:李光轩(1994—),男,工程师,博士,主要从事水利规划与战略研究。E-mail:liguangxuan@tju.edu.cn

通信作者:李原园(1964—),男,正高级工程师,主要从事水利规划与战略研究。E-mail:liyanyuan@giwp.org.cn

在全球变化背景下,我国区域水循环过程正发生显著变化,水安全问题日趋凸显^[1-3]。干旱半干旱的西北内陆河地区水资源严重短缺,水土资源分布极不平衡^[4],加之水资源的形成、转化及水循环过程独特,对气候变化的响应尤为敏感^[5],这些因素共同制约了该区域经济社会的高质量发展^[6]。近年来,全球气候变化引发该地区由暖干向暖湿化转型,水资源演变变异特征明显,进一步加剧了该地区的水安全问题^[7-8]。研究西北内陆河流域水资源演变态势及机理,对于促进区域社会经济持续健康发展以及优化流域水资源合理利用和有效管理具有至关重要的作用。

目前,已有众多学者开展关于西北内陆河流域径流等水资源演变态势及其驱动机制相关研究。在水资源演变态势方面,王士维等^[9]、季宗虎等^[10]、李培都等^[11]和魏霞等^[12]利用线性倾向、滑动平均、Mann-Kendall(M-K)突变检验等方法,分别研究了疏勒河流域 1951—2020 年气温、1956—2020 年降水量、1972—2011 年径流量和 1956—2016 年输沙量的年际变化过程及其突变性,结果表明疏勒河流域气温、降水量、径流量和输沙量总体呈增加趋势;宋子奕等^[13]基于 2009—2019 年河西走廊的地下水位资料,运用地统计学方法和基于分形理论的 R/S 分析法研究了河西走廊地下水位时空演变特征,研究发现河西走廊地下水位总体呈持续下降的趋势;张雪琪等^[14]通过线性趋势法、累积距平法、M-K 突变检验法等方法研究叶尔羌河流域 1957—2015 年气象和径流变化特征,研究结果显示流域气温、降水量和径流量呈增加趋势,相对湿度和平均风速除上游区域外,中游、下游和全流域均呈减小趋势。驱动机制方面,李洪源等^[15]采用包含冰雪消融模块的寒区分布式水文模型——SPHY(spatial processes in hydrology)模型对疏勒河上游径流成分及其变化特征进行定量分析,结果表明降雨径流、积雪融水径流、冰川融水径流和地下水(基流)对流域径流的贡献率分别为 13.5%、12.9%、30.5%和 43.1%;王妍^[16]采用 SPHY 模型研究叶尔羌河、和田河和阿克苏河的水循环过程,结果表明叶尔羌河、和田河和库玛拉克河(阿克苏河支流)流域的总径流量增加系冰川区和非冰川区共同作用的结果,而托什干河(阿克苏河支流)流域径流量的增加则主要受到非冰川区的影响;薛联青等^[17]采用基于 Budyko 假设的 Choudhury 公式和水量平衡方法,计算分析塔里木河流域径流变化对气候变化和人类活动响应的敏感性,结果表明径流变化对人类活动的敏感性较高,降水增加对径流增加起促进作用,而下垫面变化

(如耕地面积扩大和水库修建)使径流减少;魏潇娜等^[18]利用嵌入冰川模块的 SWAT 模型定量分析了和田河流域上游冰川径流的变化趋势及其对出山径流的贡献,结果表明 1967—2017 年玉龙喀什河流域和喀拉喀什河流域冰川径流对出山径流的贡献率分别为 48.7%和 45.5%。

综上所述,针对西北内陆河地区的研究多聚焦单一流域,集中在水文气象要素与径流量的演变趋势分析、突变年份识别、水源贡献率计算及驱动机制解析等单一维度,缺乏多流域尺度、多维度的系统性整合研究。本文选取河西走廊三大河流之一的疏勒河和塔里木河 4 源之一的叶尔羌河上游子流域作为研究对象,探究 1956—2016 年昌马堡站子流域和卡群站子流域气温、降水、积雪融水、冰川融水和径流等要素的演变态势。在前人研究成果的基础上,通过运用随机森林模型模拟径流变化,借助 SHAP(Shapley additive explanations)方法定量评估降水、积雪融水和冰川融水对径流变化的驱动力,预估未来径流的变化趋势,以期为西北内陆河流域水资源可持续利用提供决策参考。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

疏勒河流域位于我国甘肃省西北部、河西走廊西部,地理位置为 38°00′N~42°48′N、92°11′E~98°30′E(图 1(a))。疏勒河发源于祁连山脉的岗格尕尔肖合力岭,干流全长 583 km,流域面积 4.13 万 km²,自东南流向西北,流经天峻县、肃北蒙古族自治县、玉门市、瓜州县和敦煌市 5 个县(市)。从河源到昌马峡出山口(昌马堡水文站)为昌马堡站子流域,面积 1.48 万 km²,占疏勒河流域总面积的 30.8%。流域属于内陆干旱性气候区,降水少,蒸发量大,年平均气温为 6.9~8.8℃,年降水量约 230 mm,年潜在蒸散发量超过 1000 mm^[19]。流域内冰川面积约为 739 km²。在径流形成过程中,冰川融水、积雪融水、降雨和地下水的贡献率分别约为 30.5%、12.9%、13.5%和 43.1%^[15]。

叶尔羌河流域位于我国最西部的新疆维吾尔自治区,是塔里木河的 4 源之一^[20]。流域位置为 35°27′N~40°20′N、74°27′E~80°25′E(图 1(b))。主要支流为克勒青河、塔什库尔干河、提孜那甫河、柯克亚河和乌鲁河。叶尔羌河发源于克什米尔北部喀喇昆仑山脉的喀喇昆仑山口,干流全长 996 km,面积 10.8 万 km²,自西南流向东北,流经塔什库尔干、叶城、泽普等 7 个县^[21]。出山口重要控制水文站为卡群站,卡群站以上流域(卡群站子流域)面积

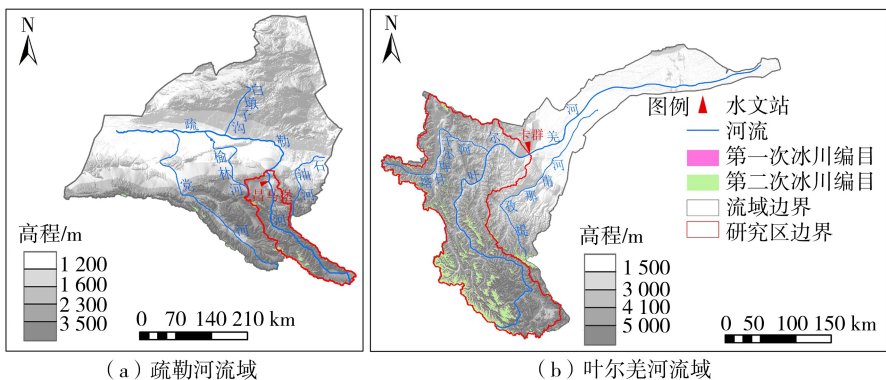


图 1 流域概况

Fig. 1 Overview of study area

4.48 万 km^2 , 占叶尔羌河流域总面积的 42%。流域属于暖温带大陆性干旱气候区, 干燥少雨, 年平均气温为 $11.4\sim 12.3^\circ\text{C}$, 年降水量约 80 mm, 年平均蒸发量为 $1500\text{ mm}^{[22]}$, 流域内冰川面积约为 5026 km^2 。冰川融水、积雪融水、降雨和地下水对径流的贡献率分别为 65.3%、16.6%、6.8% 和 11.3%^[16]。

1.2 数据来源

疏勒河昌马堡站和叶尔羌河卡群站气温、降水和未来预估径流数据分别来自国家青藏高原科学数据中心的 1 km 分辨率逐月平均气温数据集 (1901—2024 年)、降水量数据集 (1901—2024 年) 和中国区域历史及未来预估径流和蒸散数据集 (1985—2100 年); 积雪融水数据采用国家冰川冻土沙漠科学数据中心的 1951—2020 年月尺度积雪融水数据集; 冰川融水数据结合气温数据和度日因子法计算得出^[23]; 径流数据为 1956—2016 年两个水文站实测值。

2 研究方法

2.1 M-K 突变检验法

M-K 突变检验法主要用于时间序列的突变年份识别及趋势特征分析。本文采用 M-K 突变检验法对两流域径流量的突变年份进行识别与分析。该方法通过构建统计量 UF 和 UB 进行计算分析, UF 值大于 0 或小于 0, 分别表示径流量呈上升或下降趋势; 在 0.01 和 0.05 的显著性水平下, 对应的临界值分别为 ± 2.58 和 ± 1.98 。若 UF 值超出对应显著性水平的临界值范围, 则表明径流量上升或下降趋势显著, 且通过该显著性水平检验。若 UF 曲线与 UB 曲线存在交点, 则交点对应的年份即为径流量发生突变的年份^[24-25]。

2.2 度日因子法

度日因子法基于气温与冰川积雪消融量之间线性关系的简化模型, 通过将正积温 (即日平均气温

高于冰点的累积值) 与度日因子 (即单位正积温所对应的消融量) 相乘来估算冰川融水量^[23, 26]。参考已有研究^[15, 18, 27], 本文以流域冰川分布位置的平均气温作为输入, 以冰川度日因子作为模型参数, 通过度日因子法求解冰川消融量, 并将其作为实际冰川融水量用于后续研究。流域平均气温数据经由中国 1 km 分辨率逐月平均气温数据集处理后得到的。疏勒河与叶尔羌河的冰川度日因子由高亚洲冰川区度日因子空间分布数据集确定, 其数值分别为 $8.9\text{ mm}/(^{\circ}\text{C}\cdot\text{d})$ 和 $4.5\text{ mm}/(^{\circ}\text{C}\cdot\text{d})$ 。

2.3 随机森林模型

随机森林模型是一种应用广泛的机器学习方法, 属于集成学习的范畴, 可用于分类和回归任务^[28]。模型学习速度快, 能够有效应对小样本和高维度数据的分类与回归问题^[29]。近年来, 随机森林模型在特征分类与提取、时间序列预测等多个领域得到了应用和有效推广^[30]。本文以 1956—2016 年逐月降水、积雪融水、冰川融水为自变量, 利用随机森林模型对疏勒河昌马堡站子流域和叶尔羌河卡群站子流域逐月径流进行预测。

2.4 SHAP 方法

SHAP 方法是一种基于博弈论的方法, 用于解释机器学习模型的预测结果。该方法基于 SHAP 值, 通过考虑所有可能的特征组合, 计算每个特征在不同组合中的边际贡献, 从而定量评估每个特征的重要性。SHAP 值大于 0 或小于 0 表示特征对预测结果为正向或负向影响, 其绝对值表示特征对整体预测结果的影响程度^[31-32]。

2.5 模拟精度评价指标

采用均方根误差 (RMSE)^[33] 和纳什效率系数 (NSE)^[34] 评价径流量预测的准确性。RMSE 能够有效放大误差的影响, 从而对模型预测的准确性进行严格评估。NSE 通过比较模型预测值与观测值之间的均方误差 (MSE) 与观测值方差的比值来评估

模型的拟合程度,计算方便,能够直观反映模型的整体拟合优度。RMSE 越小,NSE 越接近 1,代表随机森林模型的预测性能越好。

3 结果与分析

3.1 水文气象要素演变态势

由图 2 可知,昌马堡站和卡群站子流域气温均呈现先下降再上升的趋势;两子流域降水量则呈现先上升再下降再上升的趋势;昌马堡站子流域积雪融水量呈现先上升再下降再上升的趋势,卡群站子流域积雪融水量则保持相对稳定状态;两子流域冰川融水量呈现先略有下降再上升的变化趋势。

由表 1 可知,从整体变化趋势来看,昌马堡站子流域气温、降水量、积雪融水量和冰川融水量的 Sen's 斜率值^[35]均为正值,表明这些水文气象要素均呈上升趋势。对于卡群站子流域,气温、降水量和冰川融水量的 Sen's 斜率值为正值,显示出上升趋势,而积雪融水量的 Sen's 斜率值为负值,呈下降趋势。

3.2 径流演变态势

由图 3 和表 1 可知,昌马堡站子流域和卡群站子流域径流量均呈增加趋势,卡群站子流域 Sen's 斜率值较大,而昌马堡站子流域相对较小。图 4 的 M-K 突变检验结果显示,昌马堡站径流量 1956—

表 1 1956—2016 年各水文气象要素的 Sen's 斜率值
Table 1 Sen's slopes of different hydro-meteorological elements from 1956 to 2016

子流域	气温/ (℃/a)	降水量/ (mm/a)	积雪融水量/ (亿 m ³ /a)	冰川融水量/ (亿 m ³ /a)	径流量/ (亿 m ³ /a)
昌马堡站	0.021	0.567	0.039	0.031	0.103
卡群站	0.026	0.152	-0.001	0.125	0.243

1961 年为增加趋势,1962—1979 年为波动变化趋势,1980—1989 年为增加趋势,1990 年和 1998 年分别通过 0.05 和 0.01 显著性检验,增加趋势显著;卡群站径流量 1956—1962 年为减少趋势,1963—1976 年为波动变化趋势,1977—1997 年为增加趋势,1998 年和 2000 年分别通过 0.05 和 0.01 显著性检验,增加趋势显著。由图 4 中 UF 与 UB 的相交点可知,昌马堡站和卡群站的径流量分别在 1993 年和 1997 年发生了突变。突变前后昌马堡站的年均径流量分别为 8.5 亿、12.2 亿 m³,卡群站分别为 65.1 亿、73.2 亿 m³。与突变前相比,突变后两个水文站径流量均明显增加,昌马堡站径流量变化率较大,达到 43.3%,而卡群站径流量变化率为 12.3%。

3.3 径流过程模拟

采用随机森林模型对昌马堡站和卡群站子流域逐月径流进行模拟。模拟分为整体时段、突变前和突变后 3 个时段。对于整体研究时段的径流模拟,

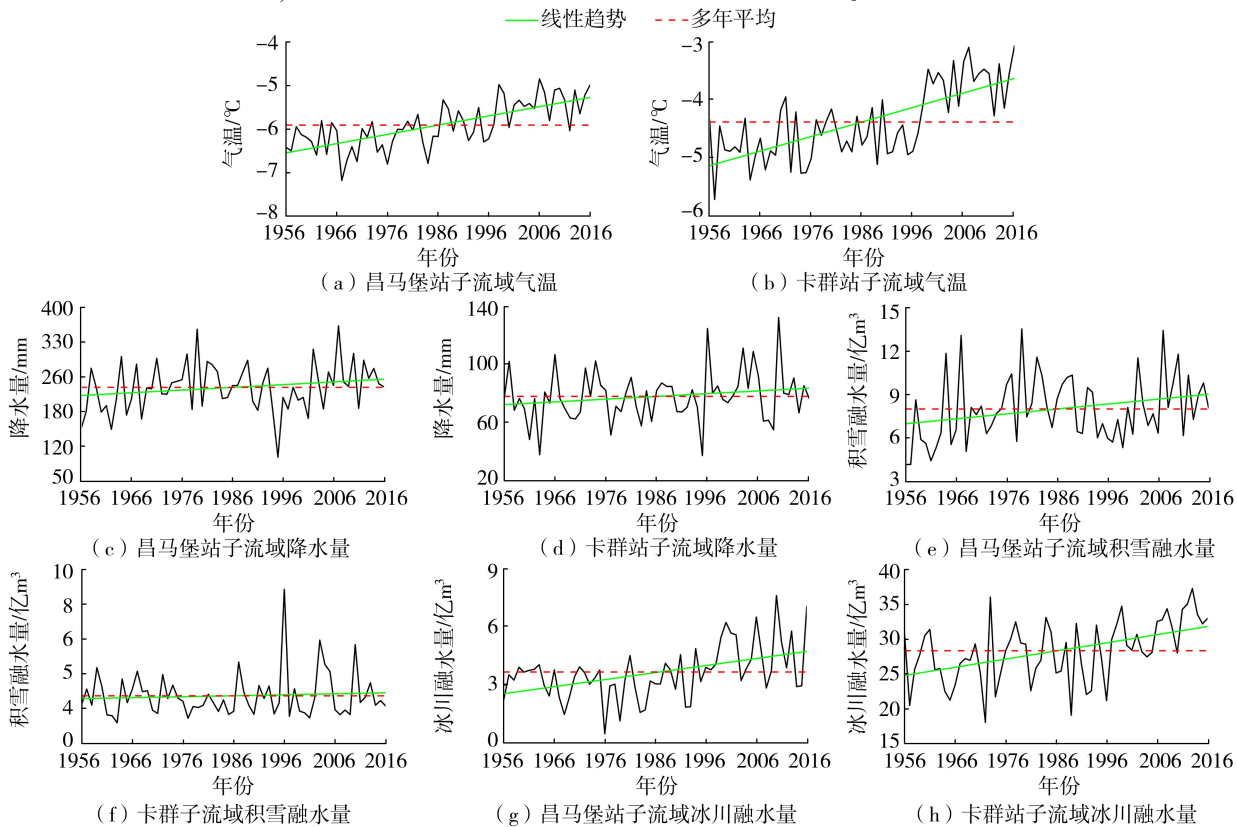


图 2 1956—2016 年水文气象要素变化

Fig. 2 Changes in hydro-meteorological elements from 1956 to 2016

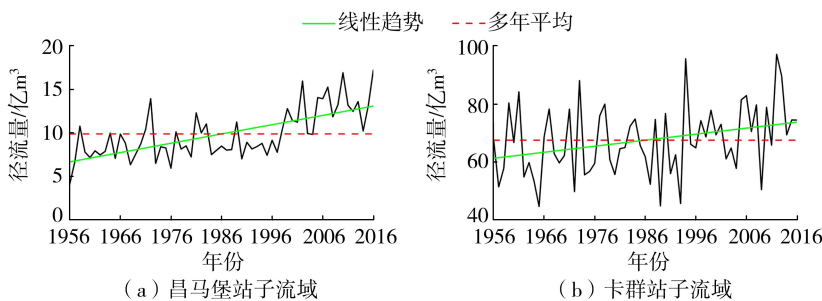


图 3 1956—2016 年径流量变化

Fig. 3 Changes in runoff from 1956 to 2016

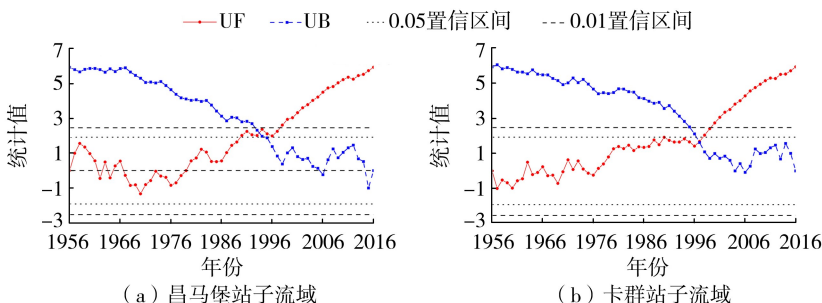


图 4 1956—2016 年径流量突变特征

Fig. 4 Abrupt change characteristics of runoff from 1956 to 2016

两站训练期均设定为 1956—2006 年,验证期则为 2007—2016 年。由于昌马堡站和卡群站的径流突变年份分别为 1993 年和 1997 年,在模拟突变前径流时,昌马堡站训练期为 1956—1983 年,验证期为 1984—1993 年;卡群站训练期为 1956—1990 年,验证期为 1991—1997 年。在模拟突变后径流时,昌马堡站训练期为 1994—2010 年,验证期 2011—2016 年;卡群站训练期为 1998—2012 年,验证期为 2013—2016 年。基于随机森林模型的昌马堡站和卡群站子流域径流量模拟结果及其与实测值的比较如图 5 和图 6 所示。模拟结果与实测值显示出良好的一致性,表明随机森林模型能够较好地模拟两个子流域的径流量变化过程。

3.4 机器学习模型的解释分析

通过计算数据集中每个指标的绝对平均 SHAP

值,可以明确不同指标对径流变化的影响程度。图 7 为不同时段昌马堡站和卡群站子流域径流影响因素的绝对平均 SHAP 值。由图 7 可知,两个子流域中冰川融水对径流的影响均十分显著。在昌马堡站子流域,影响径流变化的因素按重要性从高到低排序为:冰川融水、积雪融水、降水。对于卡群站子流域,在整体时段和突变前影响径流变化的因素按重要性从高到低排序均为:冰川融水、积雪融水、降水;突变后影响径流变化的因素从高到低排序为:冰川融水、降水、积雪融水。

4 讨论

4.1 径流对降水、积雪融水和冰川融水变化的响应

为了进一步揭示降水、积雪融水和冰川融水对疏勒河和叶尔羌河出山径流的影响,分析了 1956—

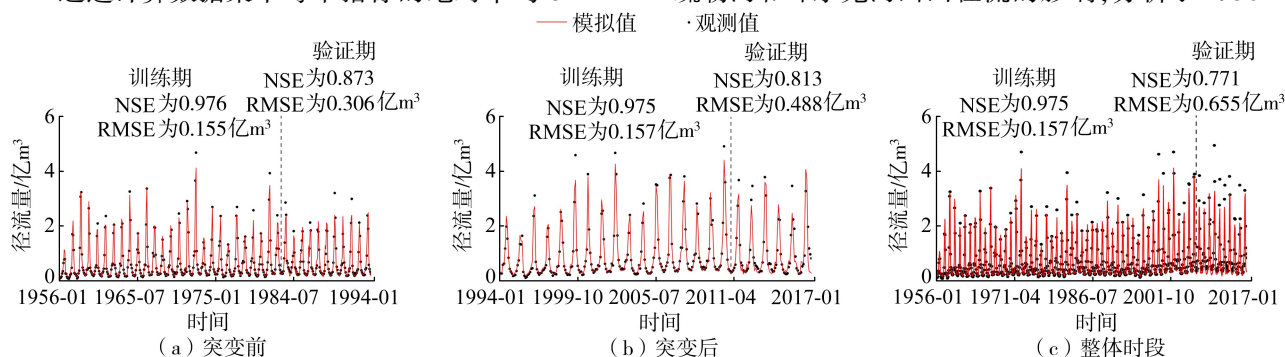


图 5 昌马堡站子流域不同时段逐月径流量实测值与模拟结果对比

Fig. 5 Comparison of observed and simulated monthly runoff at the Changmabao Station Sub-basin in different periods

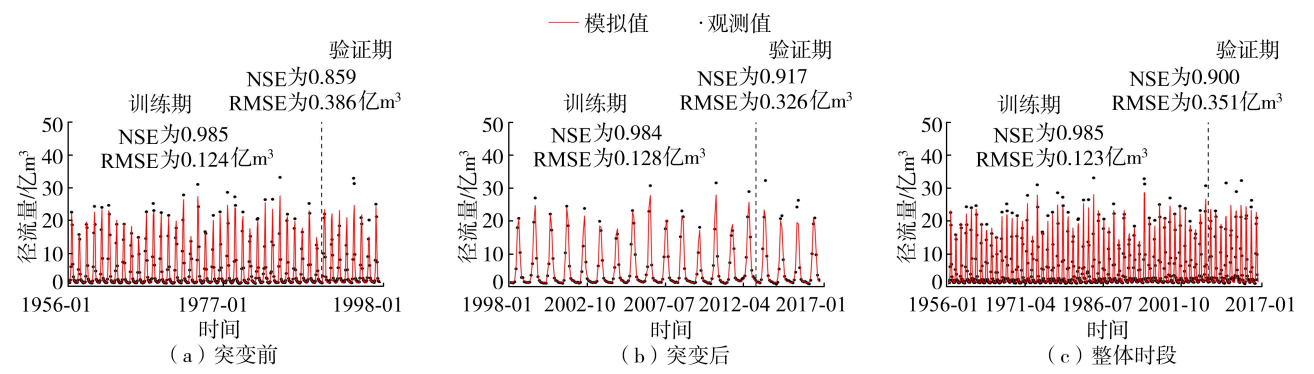


图 6 卡群站子流域不同时段逐月径流量实测值与模拟结果对比

Fig. 6 Comparison of observed and simulated monthly runoff at the Kaqun Station Sub-basin in different periods

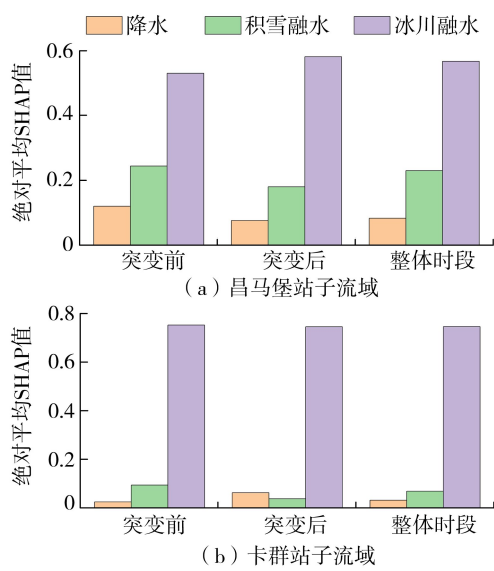


图 7 不同时段径流影响因素的绝对平均 SHAP 值

Fig. 7 Absolute mean SHAP values of runoff influencing factors in different periods

2016 年气温、降水量、积雪融水量、冰川融水量与径流量之间的相关性。如表 2 所示,在昌马堡站子流域,逐年径流量与气温、降水量、积雪融水量和冰川融水量均呈显著的正相关关系;而在卡群站子流域,逐年径流量与气温、冰川融水量呈显著正相关关系。

在昌马堡站子流域,径流量与气温、降水量、积

雪融水量和冰川融水量的相关性均通过了显著性检验,其 Pearson 相关系数(r)分别为 0.638、0.480、0.378 和 0.687。此外,气温与冰川融水量之间也表现出显著正相关关系, r 为 0.643,这表明在全球气候变化背景下,气温升高导致冰川融水量增加,从而引起径流量持续上升^[36]。尽管积雪融水量与气温之间的相关性较低,但其与降水量之间存在显著正相关关系, r 为 0.836,说明部分降水通过积雪融水的形式对径流产生影响^[37]。

在卡群站子流域,径流量与气温和冰川融水量的相关性通过了显著性检验, r 分别为 0.407 和 0.686。与昌马堡站子流域类似,气温与冰川融水量、降水量与积雪融水量之间存在显著正相关关系, r 分别为 0.650 和 0.706。然而,径流量与降水量和积雪融水量之间的相关性未通过显著性检验,冰川融水量与降水量和积雪融水量之间的相关性较低,这表明在该子流域内,冰川融水是径流变化的主要驱动因素,其对径流的影响远大于降水和积雪融水对径流的影响,这与 SHAP 值计算的结果相一致。

4.2 与以往研究结果的对比分析

针对昌马堡站子流域与卡群站子流域径流演变归因分析需求,本文系统梳理了两子流域既往研究成果,从研究结果和研究方法两方面展开对比分析。

表 2 径流与影响因素的 Pearson 相关系数

Table 2 Pearson correlation coefficients between runoff and its influencing factors in sub-basins

子流域	因素	Pearson 相关系数				
		气温	降水量	积雪融水量	冰川融水量	径流量
昌马堡站	气温	1	0.151	0.064	0.643**	0.638**
	降水量		1	0.836**	0.015	0.480**
	积雪融水量			1	-0.112	0.378**
	冰川融水量				1	0.687**
	径流量					1
卡群站	气温	1	-0.018	-0.177	0.650**	0.407**
	降水量		1	0.706**	-0.270*	-0.029
	积雪融水量			1	-0.334**	-0.097
	冰川融水量				1	0.686**
	径流量					1

注: * 表示在 0.05 置信度水平(双侧)显著相关; ** 表示在 0.01 置信度水平(双侧)显著相关。

疏勒河流域方面,杨春利等^[38]基于1958—2015年疏勒河昌马堡水文站径流数据及气象资料开展定量分析,结果表明,20世纪90年代后期以来,气温和降水对径流的影响率分别超过60%和30%;高鑫等^[39]和Zhang等^[40]通过模型模拟,分别得出1961—2006年和1971—2013年疏勒河上游子流域冰川融水对径流的贡献率超过30%和20%;Qin等^[41]研究发现,2008—2018年冰川、高山草甸、寒冷荒漠和裸露景观是影响疏勒河上游河流径流的主要区域,共同贡献了约95%的径流,其中,6—8月冰川融水对径流的贡献率超过30%。叶尔羌河流域方面,Kan等^[42]研究发现,1965—2015年叶尔羌河上游流域年径流变化主要受冰川融水、中高海拔区域及暖季气温控制,冰川融水占径流的52%;高鑫等^[43]研究得出,1961—2006年冰川融水对叶尔羌河上游子流域(以库鲁克栏杆站为上游水量控制站)径流的贡献率为51.3%,2000年后增至63.3%。本文结果为冰川融水是昌马堡站子流域和叶卡群站子流域径流变化的主导因素,该结果与前人结论基本一致。

以往研究中,不同学者基于不同方法对疏勒河和叶尔羌河流域径流演变驱动因素展开分析。杨春利等^[38]利用双累积曲线法探究降水和气温对径流的影响程度;高鑫等^[39,43]利用度日因子法得到流域冰川融水序列,进而计算其贡献率与影响;Zhang等^[40-42]利用包含度日因子模块的VIC和改进的VIC模型计算冰川融水和径流。本文采用多方法耦合框架,利用兼具机理解释性的度日因子法计算冰川融

水,再借助随机森林模型模拟出山径流,以强化对多水源交互作用的刻画能力,并通过SHAP方法量化评估冰川融水、降水和积雪融水对径流变化的影响程度,实现驱动因素的定量化归因分析,为西北内陆河地区径流演变归因提供参考。

4.3 西北内陆河典型流域水资源未来演变态势

在全球气候变化背景下,西北地区水文气象要素变化显著。已有研究表明,该地区1961—2019年每10a平均增温达0.34℃^[44],远超全国(0.26℃)^[45]与全球(0.12℃)^[46]平均水平,且未来升温趋势仍将延续^[40]。受此驱动,疏勒河流域和叶尔羌河流域的冰川融水量预计分别在21世纪30年代和70年代出现拐点^[40,47],因此两流域冰川融水量将持续增加或保持稳定状态。同时,该地区降水量正以每10a约5.07mm的速率增长,基于IPCC-CMIP6(第六次国际耦合模式比较计划)多模式预估,未来降水量将持续增加。降水量增加将带动降雪量上升,进而促使积雪融水量显著增加^[37],但随着气温进一步升高,未来降雪量或将下降,积雪融水量因复杂交互作用整体变化幅度有限。此外,采用了等距离累积分布函数方法对CMIP6模式数据进行降尺度和偏差校正,结果如表3和图8所示。基于CMIP6中6个模式(CANESM5、FGOALS-g3、GFDL-CM4、IPSLCM6A-LR、MPI-ESM1-2-HR和MRI-ESM2-0)在2种排放情景(SSP2-4.5和SSP5-8.5)下的模拟结果,昌马堡站子流域和卡群站子流域径流量至2100年或将持续增加。从表1和表3可以看出,昌马堡站子流域除CANESM5模式外,其

表 3 2017—2100 年 CMIP6 模式下径流量 Sen's 斜率值
Table 3 Sen's slopes of runoff under CMIP6 models from 2017 to 2100

子流域	CANESM5		FAOALS-g3		GFDL-CM4		IPSL-CM6A-LR		MPI-ESM1-2-HR		MRI-ESM2-0	
	SSP2-4.5	SSP5-8.5	SSP2-4.5	SSP5-8.5	SSP2-4.5	SSP5-8.5	SSP2-4.5	SSP5-8.5	SSP2-4.5	SSP5-8.5	SSP2-4.5	SSP5-8.5
昌马堡站	0.121	0.186	0.032	0.060	0.046	-0.018	0.056	0.074	-0.014	0.051	0.031	0.027
卡群站	0.216	0.082	0.093	0.056	0.009	-0.226	0.124	0.124	-0.012	-0.186	0.011	-0.164

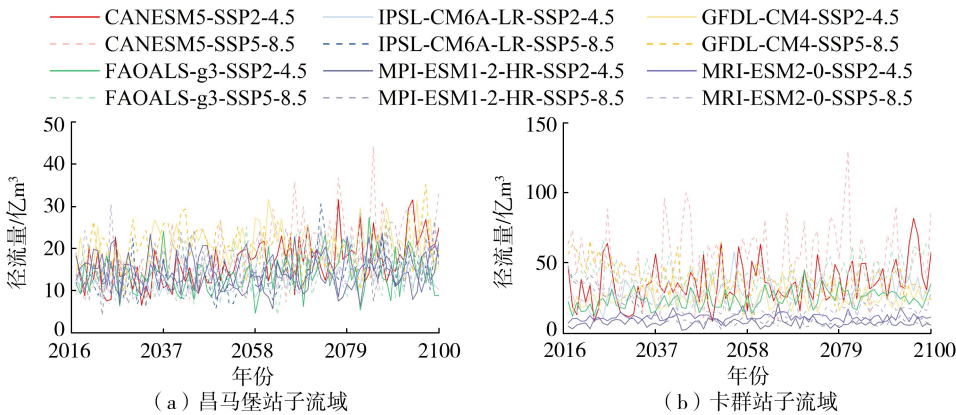


图 8 不同气候情景下未来径流量变化

Fig. 8 Future runoff changes under different climate scenarios

余模式未来预估径流量的 Sen's 斜率值均小于历史实测径流量的 Sen's 斜率值;卡群站子流域所有模式未来预估径流量的 Sen's 斜率值均小于历史实测径流量的 Sen's 斜率值,说明两个子流域径流量的未来增加趋势有所减弱。

5 结 论

a. 1956—2016 年昌马堡站子流域径流量和卡群站子流域径流量总体呈增加趋势,径流量突变年份分别为 1993 年和 1997 年,突变后年径流量显著增加,变化率分别为 43.3%和 12.3%。

b. 在昌马堡站子流域,突变前、突变后和整体时段冰川融水对径流的影响均最为显著,其次是积雪融水,降水的影响相对较小。而在卡群站子流域,突变前和整体时段冰川融水占据主导地位,积雪融水次之,降水影响最小;但突变后降水对径流的影响超过了积雪融水。

c. 在全球气候变化背景下,西北地区降水量将持续增加,积雪融水量则不会发生显著变化,冰川融水在拐点出现前也将持续增加或保持稳定状态。根据 CMIP6 不同模式在不同排放情景下的模拟结果,昌马堡站子流域和卡群站子流域未来径流量或将持续增加,但增加趋势有所减弱。

参考文献:

[1] 杨肖丽,马慧君,吴凡,等. 基于 CMIP6 的全球及干旱带干旱时空演变[J]. 水资源保护,2023,39(2):40-49. (Yang Xiaoli, Ma Huijun, Wu Fan, et al. Spatiotemporal evolution of global and arid zone drought based on CMIP6 [J]. Water Resources Protection,2023,39(2):40-49. (in Chinese))

[2] 张力,赵自阳,王红瑞,等. 气候变化下水文模拟不确定性若干问题讨论[J]. 水资源保护,2023,39(1):109-118. (Zhang Li, Zhao Ziyang, Wang Hongrui, et al. Discussion on several issues of uncertainty in hydrological simulation under climate change [J]. Water Resources Protection,2023,39(1):109-118. (in Chinese))

[3] 李原园,李云玲,何君. 新发展阶段中国水资源安全保障战略对策[J]. 水利学报,2021,52(11):1340-1346. (Li Yuanyuan, Li Yunling, He Jun. Strategic countermeasures for China's water resources security in the new development stage [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2021,52(11):1340-1346. (in Chinese))

[4] 邓铭江. 中国西北“水三线”空间格局与水资源配置方略[J]. 地理学报,2018,73(7):1189-1203. (Deng Mingjiang. “Three Water Lines” strategy: its spatial patterns and effects on water resources allocation in

northwest China [J]. Acta Geographica Sinica, 2018, 73 (7):1189-1203. (in Chinese))

[5] 左其亭,李佳伟,马军霞,等. 新疆水资源时空变化特征及适应性利用战略研究[J]. 水资源保护,2021,37(2):21-27. (Zuo Qiting, Li Jiawei, Ma Junxia, et al. Study on spatio-temporal variation characteristics and adaptive utilization strategy of water resources in Xinjiang [J]. Water Resources Protection, 2021, 37 (2) : 21-27. (in Chinese))

[6] 栗晓玲,刘雨翰,姜田亮,等. 西北地区陆地生态系统未来生态需水量预估[J]. 水资源保护,2023,39(4):9-18. (Su Xiaoling, Liu Yuhan, Jiang Tianliang, et al. Prediction of future ecological water demand of terrestrial ecosystem in Northwest China [J]. Water Resources Protection,2023,39(4):9-18. (in Chinese))

[7] 张强,杨金虎,王朋岭,等. 西北地区气候暖湿化的研究进展与展望[J]. 科学通报,2023,68(14):1814-1828. (Zhang Qiang, Yang Jinhu, Wang Pengling, et al. Progress and prospect on climate warming and humidification in Northwest China [J]. Chinese Science Bulletin, 2023, 68 (14) : 1814-1828. (in Chinese))

[8] 薛联青,魏卿,魏光辉. 塔里木河干流地表水与地下水耦合模拟[J]. 河海大学学报(自然科学版),2019,47(3):195-201. (Xue Lianqing, Wei Qing, Wei Guanghui. Coupled simulation of surface water and groundwater in the main stream of Tarim River [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2019, 47 (3) : 195-201. (in Chinese))

[9] 王士维,孙栋元,周敏,等. 1951—2020 年疏勒河流域气温时空变化特征[J]. 干旱区研究,2023,40(7):1065-1074. (Wang Shiwei, Sun Dongyuan, Zhou Min, et al. Temporal and spatial variation of temperature in the Shule River Basin from 1951 to 2020 [J]. Arid Zone Research, 2023, 40 (7) : 1065-1074. (in Chinese))

[10] 季宗虎,孙栋元,牛最荣,等. 疏勒河流域降水变化特征研究[J]. 干旱区研究,2023,40(10):1583-1594. (Ji Zonghu, Sun Dongyuan, Niu Zuirong, et al. Characteristics of precipitation changes in the Shule River Basin [J]. Arid Zone Research, 2023, 40 (10) : 1583-1594. (in Chinese))

[11] 李培都,司建华,冯起,等. 疏勒河年径流量变化特征分析及模拟[J]. 水资源保护,2018,34(2):52-60. (Li Peidu, Si Jianhua, Feng Qi, et al. Analysis and simulation on annual runoff variation characteristics of Shule River [J]. Water Resources Protection, 2018, 34 (2) : 52-60. (in Chinese))

[12] 魏霞,杨正华,张振鹏,等. 疏勒河流域径流量和输沙量变化规律[J]. 水土保持研究,2024,31(1):144-150. (Wei Xia, Yang Zhenghua, Zhang Zhenpeng, et al. Study on the variation characteristics of runoff and sediment in

- Shule River Basin [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(1): 144-150. (in Chinese))
- [13] 宋子奕, 鲁程鹏, 吴成城, 等. 2009—2019 年河西走廊地下水位时空分布及演变趋势[J]. 水资源保护, 2023, 39(2): 160-167. (Song Ziyi, Lu Chengpeng, Wu Chengcheng, et al. Spatiotemporal distribution and evolution trend of groundwater level in Hexi Corridor from 2009 to 2019 [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(2): 160-167. (in Chinese))
- [14] 张雪琪, 满苏尔·沙比提, 刘海涛, 等. 1957—2015 年叶尔羌河流域气候变化特征及其径流响应[J]. 干旱区研究, 2019, 36(1): 58-66. (Zhang Xueqi, Shabit M, Liu Haitao, et al. Response of runoff volume to climate change in the Yarkant River Basin during the period of 1957-2015 [J]. Arid Zone Research, 2019, 36(1): 58-66. (in Chinese))
- [15] 李洪源, 赵求东, 吴锦奎, 等. 疏勒河上游径流组分及其变化特征定量模拟[J]. 冰川冻土, 2019, 41(4): 907-917. (Li Hongyuan, Zhao Qudong, Wu Jinkui, et al. Quantitative simulation of the runoff components and its variation characteristics in the upstream of the Shule River [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2019, 41(4): 907-917. (in Chinese))
- [16] 王妍. 塔里木河三源流径流及其组分变化研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2021.
- [17] 薛联青, 杨帆, 杨昌兵, 等. 外界胁迫作用下塔里木河流域径流变化响应的敏感性[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2018, 46(1): 1-6. (Xue Lianqing, Yang Fan, Yang Changbing, et al. Sensitivity analysis of the streamflow alteration subjected to climate changes and anthropogenic activities in the Tarim River Basin [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2018, 46(1): 1-6. (in Chinese))
- [18] 魏潇娜, 龙爱华, 尹振良, 等. 和田河流域冰川径流对气候变化响应的模拟分析[J]. 水资源保护, 2022, 38(4): 137-144. (Wei Xiaona, Long Aihua, Yin Zhenliang, et al. Simulation of response of glacier runoff to climate change in the Hotan River Basin [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(4): 137-144. (in Chinese))
- [19] 马亚丽, 牛最荣, 张芮, 等. 疏勒河流域潜在蒸散发时空演变及驱动因素量化分析[J]. 水土保持研究, 2022, 29(5): 350-357. (Ma Yali, Niu Zuirong, Zhang Rui, et al. Temporal and spatial evolution and driving factors of potential evapotranspiration in Shule River Basin [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022, 29(5): 350-357. (in Chinese))
- [20] 安东, 宋倍, 吴宝国. 塔里木河流域信息化资源整合实践与成效[J]. 水资源保护, 2021, 37(5): 68-74. (An Dong, Song Bei, Wu Baoguo. Practices and benefits of integrating information resources in Tarim River Basin [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(5): 68-74. (in Chinese))
- [21] 司涵. 气候变化背景下叶尔羌河上游洪水极值事件概率分析[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2023.
- [22] 刘蛟, 刘铁, 黄粤, 等. 基于遥感数据的叶尔羌河流域水文过程模拟与分析[J]. 地理科学进展, 2017, 36(6): 753-761. (Liu Jiao, Liu Tie, Huang Yue, et al. Simulation and analysis of the hydrological processes in the Yarkant River Basin based on remote sensing data [J]. Progress in Geography, 2017, 36(6): 753-761. (in Chinese))
- [23] Hock R. Glacier melt: a review of processes and their modelling [J]. Progress in Physical Geography: Earth and Environment, 2005, 29(3): 362-391.
- [24] 姜秋香, 孙宇祥, 王子龙, 等. 基于突变理论和因子分析的黑龙江水资源利用效率评价及驱动因素分析[J]. 水资源保护, 2025, 41(4): 19-26. (Jiang Qiuxiang, Sun Yuxiang, Wang Zilong, et al. Evaluation of water resources utilization efficiency and analysis of driving factors in Heilongjiang Province based on mutation theory and factor analysis [J]. Water Resources Protection, 2025, 41(4): 19-26. (in Chinese))
- [25] Yue Sheng, Wang Chunyang. Applicability of prewhitening to eliminate the influence of serial correlation on the Mann-Kendall test [J]. Water Resources Research, 2002, 38(6): 1-7.
- [26] 赵贵宁, 张正勇, 刘琳, 等. 基于多源遥感数据的玛纳斯河流域冰川物质平衡变化[J]. 地理学报, 2020, 75(1): 98-112. (Zhao Guining, Zhang Zhengyong, Liu Lin, et al. Changes of glacier mass balance in Manas River Basin based on multi-source remote sensing data [J]. Acta Geographica Sinica, 2020, 75(1): 98-112. (in Chinese))
- [27] 何兵. 变化环境下高亚洲地区水资源演变及农业水资源短缺风险: 以塔里木河流域为例[D]. 西安: 西安理工大学, 2023.
- [28] 宋蕾玥, 张珂, 晁丽君, 等. 基于随机森林模型的长江流域分区多源融合降水模拟方法研究[J]. 水资源保护, 2024, 40(3): 125-132. (Song Leiye, Zhang Ke, Chao Lijun, et al. Research on zoning multi-source fusion precipitation simulation method of the Yangtze River Basin based on random forest model [J]. Water Resources Protection, 2024, 40(3): 125-132. (in Chinese))
- [29] 李继清, 刘佳利, 邓世浪, 等. 变化环境下西江干流水文情势演变及其驱动因素[J]. 水资源保护, 2025, 41(1): 9-18. (Li Jiqing, Liu Jiali, Deng Shilang, et al. Hydrological regime evolution and its driving factors in main stream of the Xijiang River under changing environment [J]. Water Resources Protection, 2025, 41(1): 9-18. (in Chinese))

- [30] Breiman L. Random forests[J]. Machine Learning, 2001, 45(1):5-32.
- [31] Zhou Xingchi, Liu Guodong, Wu Yongxiang, et al. XGBoost-SHAP based multi-scale evaluation and nonlinear response of river health in Guangdong Province [J]. Ecological Indicators, 2025, 178:114138.
- [32] 咎子懿,岳卫峰,赵航正,等. 基于机器学习和 SHAP 算法的农业用水量预测模型构建[J]. 节水灌溉, 2024(12): 102-110. (Zan Ziyi, Yue Weifeng, Zhao Hangzheng, et al. Development of agricultural water-consumption prediction model based on machine learning and SHAP [J]. Water Saving Irrigation, 2024(12): 102-110. (in Chinese))
- [33] 王建群,段蓉,蔡晨凯. TIGGE 模式在淮河水系史河流域的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020, 48(1): 14-21. (Wang Jianqun, Duan Rong, Cai Chenkai. Application of TIGGE precipitation forecast in Shihe Catchment of Huaihe River Basin [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48(1): 14-21. (in Chinese))
- [34] 徐凡奇,赵阳,王兴平,等. SDSM 在黄河流域水源涵养区降水和气温降尺度预报中的适用性[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2025, 53(2): 19-28. (Xu Fanqi, Zhao Yang, Wang Xingping, et al. Applicability evaluation of SDSM in the downscaling forecast of precipitation and temperature in the water conservation region of the Yellow River Basin [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2025, 53(2): 19-28. (in Chinese))
- [35] Sen P K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's Tau [J]. Journal of the American Statistical Association, 1968, 63(324): 1379-1389.
- [36] Ding Yongjian, Zhang Shiqiang, Zhao Lin, et al. Global warming weakening the inherent stability of glaciers and permafrost[J]. Science Bulletin, 2019, 64(4): 245-253.
- [37] 丁永建,赵求东,吴锦奎,等. 中国冰冻圈水文未来变化及其对干旱区水安全的影响[J]. 冰川冻土, 2020, 42(1): 23-32. (Ding Yongjian, Zhao Qiudong, Wu Jinkui, et al. The future changes of Chinese cryospheric hydrology and their impacts on water security in arid areas [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020, 42(1): 23-32. (in Chinese))
- [38] 杨春利,蓝永超,王宁练,等. 1958—2015 年疏勒河上游出山径流变化及其气候因素分析[J]. 地理科学, 2017, 37(12): 1894-1899. (Yang Chunli, Lan Yongchao, Wang Ninglian, et al. Mountainous runoff changes and climate factors analysis of the Shule River Basin in 1958-2015 [J]. Scientia Geographica Sinica, 2017, 37(12): 1894-1899. (in Chinese))
- [39] 高鑫,张世强,叶柏生,等. 河西内陆河流域冰川融水近期变化[J]. 水科学进展, 2011, 22(3): 344-350. (Gao Xin, Zhang Shiqiang, Ye Baisheng, et al. Recent changes of glacier runoff in the Hexi Inland river basin [J]. Advances in Water Science, 2011, 22(3): 344-350. (in Chinese))
- [40] Zhang Zhihua, Deng Shifan, Zhao Qiudong, et al. Projected glacier meltwater and river run-off changes in the Upper Reach of the Shule River Basin, north-eastern edge of the Tibetan Plateau [J]. Hydrological Processes, 2019, 33(7): 1059-1074.
- [41] Qin Jia, Yang Bingfeng, Ding Yongjian, et al. Assessment of runoff generation capacity and total runoff contribution for different landscapes in alpine and permafrost watershed [J]. CATENA, 2025, 249: 108643.
- [42] Kan Baoyun, Su Fengge, Xu Baiqing, et al. Generation of high mountain precipitation and temperature data for a quantitative assessment of flow regime in the upper Yarkant Basin in the Karakoram [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2018, 123(16): 8462-8486.
- [43] 高鑫,张世强,叶柏生,等. 1961—2006 年叶尔羌河上游流域冰川融水变化及其对径流的影响[J]. 冰川冻土, 2010, 32(3): 445-453. (Gao Xin, Zhang Shiqiang, Ye Baisheng, et al. Glacier runoff change in the upper stream of Yarkant River and its impact on river runoff during 1961-2006 [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2010, 32(3): 445-453. (in Chinese))
- [44] 姚旭阳,张明军,张宇,等. 中国西北地区气候转型的新认识[J]. 干旱区地理, 2022, 45(3): 671-683. (Yao Xuyang, Zhang Mingjun, Zhang Yu, et al. New insights into climate transition in northwest China [J]. Arid Land Geography, 2022, 45(3): 671-683. (in Chinese))
- [45] 中国气象局气候变化中心. 中国气候变化蓝皮书(2022)[M]. 北京:科学出版社, 2022.
- [46] Stocker T, Intergovernmental Panel on Climate Change, WMO, et al. Climate change 2013: the physical science basis[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [47] 倪明霞,段峥嵘,夏建新. 新疆南疆周边高山冰川融化及其未来水资源安全风险[J]. 山地学报, 2022, 40(3): 329-342. (Ni Mingxia, Duan Zhengrong, Xia Jianxin. Melting of mountain glacier and its risk to future water resources in Southern Xinjiang, China [J]. Mountain Research, 2022, 40(3): 329-342. (in Chinese))

(收稿日期:2025-04-29 编辑:施业)