

考虑变动产流模式的金沙江流域降雨-融雪 径流模拟及水文响应分析

张 珂^{1,2,3,4,5}, 罗煜宁^{1,2}, 王宇昊^{1,2}, 李顺章^{1,2}

(1. 河海大学水灾害防御全国重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098;
3. 河海大学长江保护与绿色发展研究院, 江苏 南京 210098; 4. 中国气象局水文气象重点开放实验室, 江苏 南京 210098;
5. 水利部水利大数据重点实验室, 江苏 南京 210098)

摘要:针对青藏高原产流机制复杂、水循环关键要素响应关系尚不明确的问题,提出了子流域尺度变动产流模式识别方法。基于 MODIS 卫星遥感产品和子流域主导产流模式划分结果,运用分布式水文模型 iRainSnowHydro 开展了金沙江流域降雨-融雪径流模拟和水源分割,定量分析了直门达和石鼓子流域径流组成的季节性变化特征以及降水与径流在不同响应时间下的自相关系数、偏自相关系数和互相关系数。结果表明:提出的方法可以有效识别金沙江各子流域的季节性主导产流模式,较准确地模拟流域径流过程,纳什效率系数达到 0.75;壤中流和地下径流是直门达和石鼓子流域主要的径流组分,春、夏季地表径流占比显著提高,地表径流和基流的消退时间分别为 3~10、10~80 d。

关键词:变动产流模式;降雨-融雪径流模拟;水文响应;水源分割;金沙江流域

中图分类号:TV213.4

文献标志码:A

文章编号:1004-6933(2025)05-0213-10

Rainfall-snowmelt runoff simulation and hydrological response analysis in the Jinsha River Basin considering dynamic runoff-generation mode//ZHANG Ke^{1,2,3,4,5}, LUO Yuning^{1,2}, WANG Yuhao^{1,2}, LI Shunzhang^{1,2} (1. State Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Yangtze Institute for Conservation and Development, Nanjing 210098, China; 4. China Meteorological Administration Hydro-Meteorology Key Laboratory, Nanjing 210098, China; 5. Key Laboratory of Water Big Data Technology of Ministry of Water Resources, Nanjing 210098, China)

Abstract: A sub basin scale dynamic runoff-generation identification method was proposed to address the complex runoff mechanism and unclear response relationships of key water cycle elements in the Qinghai Tibet Plateau. Based on MODIS satellite remote sensing products and the classification results of dominant runoff-generation modes in sub-basins, the distributed hydrological model iRainSnowHydro was applied for rainfall-snowmelt runoff simulation and water source division. Quantitative analysis was conducted on the seasonal variation characteristics of runoff composition in the Zhimenda and Shigu sub-basins, as well as the autocorrelation coefficients, partial autocorrelation coefficients, and cross-correlation coefficients of precipitation and runoff at different response times. The results show that the proposed method can effectively identify the seasonal dominant runoff patterns in each sub-basin of the Jinsha River Basin, accurately simulate the runoff process of the basin, and achieve a Nash efficiency coefficient of 0.75. Interflow and groundwater are identified as the dominant runoff components in the Zhimenda and Shigu sub-basins, while the proportion of surface runoff increases significantly during spring and summer. The decay time of surface runoff and base flow is 3-10 and 10-80 d, respectively.

Key words: dynamic runoff-generation mode; rainfall-snowmelt runoff simulation; hydrological response; water source division; the Jinsha River Basin

近年来,随着全球气候变化加剧^[1-2]和青藏高原环境的敏感性凸显^[3],该区域的水文过程正经历显著变化。作为“亚洲水塔”,青藏高原的积雪资源变

化对下游地区的生态环境和水资源供给至关重要^[4]。大量积雪的融化极易引发融雪型洪水,尤其与暴雨事件叠加时^[5],将对人们生命财产安全构成

基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFC3006500);山东省水文中心科技项目(37000000025001720230584,37000000025001720240235,37000000025001720250245)

作者简介:张珂(1979—),男,博士,教授,主要从事洪水预报与水文遥感研究。E-mail:kzhang@hhu.edu.cn

通信作者:罗煜宁(1999—),女,博士研究生,主要从事水文预报与水文模拟研究。E-mail:yuning_lynn@163.com

严重威胁^[6-7]。尽管已有诸多研究聚焦于青藏高原水循环过程的模拟和分析^[8-10],但由于该区域水循环系统的复杂性,现有水文模型在准确捕捉不同季节主导产流机制方面仍存在不足,对水循环关键要素的响应规律尚不明晰^[11]。

卫星遥感技术的发展为无资料地区的数据收集和人文模型的构建提供了强有力的支持^[12-13]。以往寒区的融雪径流模拟一般基于单一的产流模式,采用经验度日因子模型或能量平衡模型^[14-16]。前者通常将模型参数度日因子取为常数,虽然计算简单,但仅适合于平均状态下的流域融雪径流模拟,不能反映冰雪融化等物理过程在时空上的变化,存在较高的不确定性^[17];后者利用辐射数据计算能量收支过程,模拟精度较高,但需要更为详细的积雪观测数据,且参数率定较为复杂^[18]。Zhou 等^[19]总结了不同融雪模型的特点及计算方法,指出结合基于卫星遥感的积雪产品有助于改进模型;Riboust 等^[20]在度日模型的基础上耦合了 MODIS 积雪面积产品用于模型参数的率定和优化;Latif 等^[21]则将 MODIS 积雪面积产品用于估计积雪变化趋势和径流模拟,并区分积雪和冰川融水对径流的贡献。近年来,随着数据驱动方法的发展,机器学习模型被广泛引入水文模拟^[22-23],该方法能够有效捕捉降水、温度、积雪等变量与径流响应之间的非线性关系,提升了模型在复杂地形和多源数据融合条件下的适应性。例如:Liang 等^[24]比较了 4 种机器学习模型和 2 种水文模型在开都河流域的日径流与极端径流事件方面的表现,发现长短期记忆(long short-term memory, LSTM)模型在数据稀缺区域中有潜力成为优选方法;Wang 等^[25]基于雪盖遥感数据和大气再分析数据,构建了随机森林(random forest, RF)模型与人工神经网络(artificial neural network, ANN)模型的径流模拟系统,有效模拟了高山无资料地区的水文径

流过程。然而,对于气候复杂、下垫面空间异质性大的青藏高原,单一的产流模式无法反映复杂真实的水文过程^[26-27],降雨产流伴随融雪过程增加了径流组分的辨别难度,进一步制约了径流模拟的准确性^[28]。此外,关于青藏高原水循环关键要素的响应规律也缺乏深入研究^[29]。因此,开展青藏高原产流模式时空动态变化分析,揭示水文响应规律,对于提高气候变化背景下融雪径流模拟精度具有重要意义。

本文基于 MODIS 遥感产品,以金沙江流域为研究区,构建适用于寒区子流域尺度季节性主导产流模式识别方法,运用 iRainSnowHydro 模型开展降雨-融雪径流模拟并分析水循环关键要素在不同时间尺度的响应关系,以期为提高寒区降雨-融雪径流模拟的精度及了解其水文响应关系提供参考。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

金沙江流域地处青藏高原和滇北高原,地理位置 24°30'N~29°15'N、98°40'E~105°15'E,流域面积 50.2 万 km²,约占长江流域面积的 1/4,地形复杂,多为高山峡谷,上下游海拔落差大,水能资源丰富,流域概况如图 1(a)所示。流域多年平均降水量 617 mm,多年平均流量 4 750 m³/s,洪水由融雪(冰)洪水和暴雨洪水组成,以暴雨洪水为主。流域内植被类型丰富,主要包括高山草甸、荒漠、灌木、森林等。土壤类型以砂壤土、壤土和黏壤土为主。根据金沙江流域内主要水文控制站的分布,将流域划分为 13 个子流域,从上游到下游依次为:沱沱河以上、沱沱河—直门达、直门达—岗拖、岗拖—巴塘、巴塘—奔子栏、奔子栏—石鼓、石鼓—金安桥、金安桥—攀枝花、甘孜以上、甘孜—道孚、道孚—雅江、雅江—泸宁、泸宁—桐子林,如图 1(b)所示。

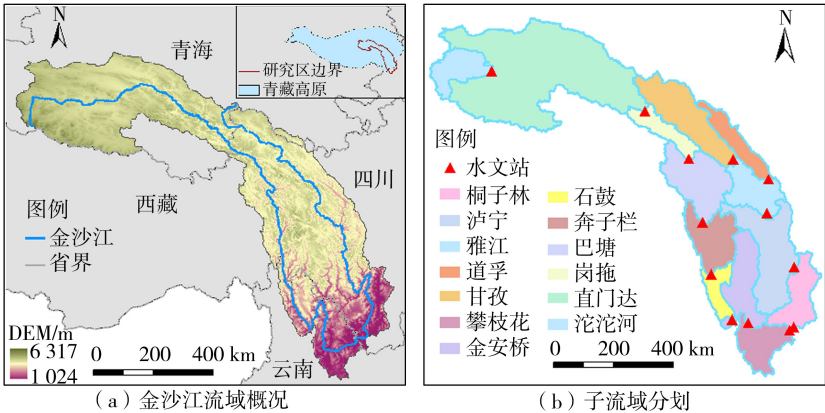


图 1 金沙江流域概况及子流域划分

Fig. 1 Overview of the Jinsha River Basin and sub-basin division

1.2 数据来源

本文使用的 DEM 来源于美国国家海洋和大气管理局 (<https://www.ngdc.noaa.gov/mgg/topo/gltiles.html>), 分辨率为 1 km。植被类型资料来源于全球 ESA CCI 土地覆盖分类图 (<https://www.esa-landcover-cci.org>), 空间分辨率为 300m。土壤类型数据来源于世界土壤数据库 (<https://www.fao.org/soils-portal/data-hub/soil-maps-and-databases/harmonized-world-soil-database-v12/en/>), 分辨率为 1 km。气温和降水数据来源于国家气象中心 (<https://data.cma.cn/>), 时间分辨率为 1 d, 空间分辨率为 $0.05^{\circ} \times 0.05^{\circ}$ 。积雪数据来源于中国积雪深度长时间序列数据集^[30], 时间分辨率为 1 d, 空间分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 。高亚洲逐日积雪覆盖度数据集通过 MODIS C6 遥感数据 (<https://www.scidb.cn/en>) 再估算得到^[31], 该产品云覆盖像元数总体比例小于 10%, 与二值产品具体较强的时空一致性^[32], 满足青藏高原地区逐日少云数据产品的研究需求。日径流数据摘录自《中华人民共和国水文年鉴》。研究中采用双线性插值法将下垫面数据、气温和积雪数据的分辨率统一至 0.01° 。

2 研究方法

2.1 变动产流模式识别

流域的产流机制受气象因素和下垫面特征共同影响。气象因素包括降水量、气温、气压、风速、湿度和辐射, 其中降水量直接决定流域的干湿分区。下垫面特征包括地形、植被覆盖、土壤类型和土地利用类型等, 这些因素在时空分布上表现出显著的异质性。本文根据各子流域的气象条件和下垫面特征确定子流域在不同季节的主导产流模式。首先, 结合卫星遥感数据计算各子流域的多年月平均积雪覆盖度 (F_{sc}), 作为判定融雪过程时空变化的指标, 其反映了单一像元中积雪覆盖面积占像元面积的比例; 其次, 利用径流曲线数 (C_N) 和地形指数 (I_T) 作为降雨产流模式的判别指标, 识别流域变动产流模式。具体步骤为:

a. 计算积雪指数与积雪覆盖度。结合 MODIS 版本 6 的遥感数据, 利用积雪在可见光波段反射和短波红外波段吸收的波谱特性来估算积雪指数^[33]。本文利用 Landsat 数据 (分辨率为 30 m) 对 MODIS 数据 (分辨率为 500 m) 进行空间聚合, 统计每个 MODIS 像元内的积雪覆盖比例, 作为积雪覆盖度的地面实况参考值。随后, 基于该积雪覆盖度与对应的 MODIS 中归一化差雪指数 (normalized difference snow index, NDSI) 构建回归模型, 确定积雪覆盖度

空间分辨率为 500 m, 经验回归关系为

$$F_{sc,i} = (-0.01 + 1.45I_{N,i}) \times 100 \quad (1)$$

式中: $F_{sc,i}$ 为像元 i 的积雪覆盖度, 取值范围为 $0 \sim 100$; $I_{N,i}$ 为像元 i 的 NDSI 值。

b. 计算径流曲线数与地形指数。径流曲线数是 SCS-CN 模型中用来描述下垫面土壤和土地利用特征的静态指标, 反映了下垫面在一般湿度条件下的下渗能力。SCS-CN 模型基于水平衡方程, 结合了两个基本假设: ①实际地表径流深与可能最大径流深的比值等于实际入渗量与土壤潜在最大蓄水量之比; ②初损是土壤潜在最大蓄水量的一部分。其中, 土壤潜在最大蓄水量通过经验公式由径流曲线数转换得到。在具体计算中, 参照《土地利用现状分类》对研究区的土地利用分类, 充分考虑 $0 \sim 30$ 、 $30 \sim 100$ cm 土壤类型的差异, 根据联合国粮食及农业组织所制定的土壤类型分类标准进行 4 类土壤水文单元识别, 计算每个像元的径流曲线数, 进而确定子流域平均径流曲线数。地形指数能够反映流域中径流的积累趋势以及在重力作用下沿坡面移动的趋势, 是评估流域发生蓄满产流难易程度的重要指标之一, 计算公式为

$$I_T = \ln(A/\tan\beta) \quad (2)$$

式中: A 为单宽集水面积; β 为地表坡度。

c. 确定主导产流模式判别标准。流域的积雪覆盖度越高, 当温度达到一定阈值后, 发生融雪径流的可能性越大。一般来说, 靠近河道和水系的平缓区域地形指数较大, 土壤湿润, 下渗能力强, 以蓄满产流为主; 而在山顶、山脊或流域上游的陡峭区域, 地形指数较小, 下渗能力较弱, 容易发生超渗产流。径流曲线数越大说明流域下垫面的下渗能力越低, 更容易发生超渗产流; 径流曲线数越小说明下垫面下渗能力更强, 不易发生超渗产流。因此, 本文将 $F_{sc} > 1\%$ 作为判定子流域发生融雪过程的标准; 将 $C_N \geq 70$ 的子流域初步划分为超渗产流主导型, $C_N < 70$ 的子流域则初步划分为蓄满产流主导型; 将 $I_T < 10$ 且蓄满产流主导的子流域进一步调整为超渗产流主导型, 将 $I_T \geq 10$ 且超渗产流主导的子流域进一步调整为蓄满产流主导型。

2.2 降雨-融雪径流模型

采用分布式一体化降雨-融雪径流模型 iRainSnowHydro 进行径流模拟^[34], 该模型以栅格新安江模型为基础^[35-36], 分模块计算三层蒸散发、水源划分、产流以及汇流。模型中的融雪模块采用地表雪层水库的形式, 在栅格尺度上定量计算新雪融化和积雪消融的叠加水量, 与模型模拟得到的降水量一起构成有效降水量, 参与后续产汇流计算。其

中,实际参与产流计算的时段水量计算公式为

$$P_{e,t} = P_t(1 - r_{s,t}) - I_{cum,t} - P_{ch,t} - ET_t + P_{sa,t} \quad (3)$$

式中: $P_{e,t}$ 为 t 时段实际参与产流计算的水量; P_t 为 t 时段总降水量; $r_{s,t}$ 为 t 时段的降雪概率; $I_{cum,t}$ 为 t 时段的累积冠层截留量; $P_{ch,t}$ 为 t 时段的河道直接降水量; ET_t 为 t 时段的蒸散发量; $P_{sa,t}$ 为 t 时段的融雪水量,其取值与雪层蓄水量、雪层蓄水容量、液态水流出快慢等因素有关。

在 iRainSnowHydro 模型中,任意栅格单元内的产流量均被划分为地表径流、壤中流及地下径流。汇流模拟采用基于栅格的马斯京根汇流方法,将地表径流、壤中流、地下径流以及河道水流分别演算至流域出口。模型结构如图 2 所示。

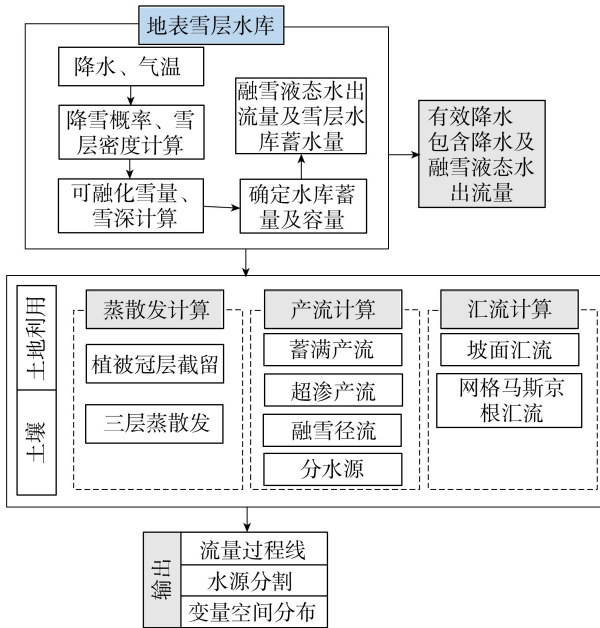


图 2 iRainSnowHydro 模型结构

Fig. 2 iRainSnowHydro model structure

在具体计算过程中,基于子流域季节性主导产流模式识别结果,采用空间组合的方式灵活调用不同的产流模型进行径流计算。主导产流模式的识别考虑了季节变化导致的产流机制转变,根据各子流域当前季节判定的主导产流模式,动态选择相应的产流计算方法。具体而言,当主导产流模式为超渗产流时,模型采用 Green-Ampt 公式进行产流计算。假设栅格单元内降水强度与入渗能力在计算时段内保持不变,若实际降水强度(包括降雨与融雪水)超过地表初始入渗速率,则发生超渗产流,产流量通过降水强度与入渗能力的差值计算得到;若降水强度低于入渗能力,则不产生径流。同时,根据 Green-Ampt 公式动态更新入渗过程中的土壤含水状态。当主导产流模式为蓄满产流时,根据栅格单元实际土壤含水量是否达到田间持水量判断是否产流,土

壤含水量超过田间持水量时产生径流,否则降水首先用于补充土壤水分,不产生径流。

在 iRainSnowHydro 模型参数确定方法上引入敏感性分析步骤,采用 Morris 方法与 Sobol 方法^[37]对模型参数进行系统敏感性筛查,识别关键控制参数及其交互影响,从而指导后续率定过程。

2.3 水循环关键要素响应关系分析

为探讨径流在不同滞后阶数下的自相关特性,识别其随时间变化的周期性特征,引入自相关系数来量化径流序列的内在相关性^[38]。自相关系数能够揭示时间序列在不同滞后阶数下的相关性程度,为径流序列中周期性行为的识别提供有力工具。

为了剔除径流序列中不同滞后阶数之间的间接影响,进一步引入偏自相关系数^[39],用于量化在排除中间滞后效应后径流时间序列与其滞后值之间的直接相关性。偏自相关系数提供了更精确的自相关度量,能够有效区分直接滞后影响与间接滞后影响,从而为汇流计算中滞时参数的优化估计提供理论支持。

考虑到降水作为外部驱动因子对径流过程的潜在影响,引入互相关系数来衡量降水时间序列和径流时间序列之间的相似性及相关性^[40]。互相关系数可用于探讨两个时间序列在不同滞后时间下的同步性或滞后性关系,特别是在时间延迟影响下,评估降水对径流变化的预测能力。互相关系数取值范围为-1~1,与自相关系数和偏自相关系数相似,系数值接近 1 或-1 表示强正相关或强反相关。

3 结果与分析

3.1 子流域尺度变动产流模式识别

图 3 为金沙江各子流域径流曲线数和地形指数平均值分布。由图 3(a)可见,金沙江上游子流域的径流曲线数较小,对应的产流模式为蓄满产流;巴塘至石鼓段属于横断山区,流域狭窄,且位于金沙江纵向河谷少雨区,年降水量小于 600 mm,为超渗产流区,与径流曲线数计算结果一致;中下游子流域的径

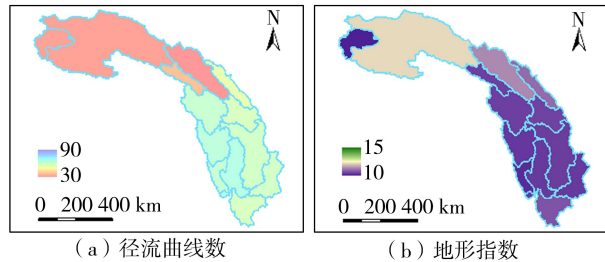


图 3 金沙江各子流域径流曲线数和地形指数分布

Fig. 3 Distribution of C_N and I_T in sub-basins of the Jinsha River

流曲线数较大,部分子流域 $C_N \geq 70$,例如金沙江流域的东部、雅砻江的上游、甘孜以及道孚子流域,年降水量小于 400,相对较干旱,其对应的产流模式为超渗产流。由图 3(b)可见,金沙江流域上游地形指数大于中下游地区,即地形指数高值区出现在较为陡峭的山脊。整体上,金沙江流域的地形指数差异不大,均大于 10。

图 4 为 2002—2016 年金沙江流域不同季节的多年平均积雪覆盖度,其中春、夏、秋、冬季分别为 3—5 月、6—8 月、9—11 月、12 月至次年 2 月。由图 4 可见,金沙江流域的积雪覆盖度随季节呈规律性变化。春季流域出现明显的积雪消融现象;夏季流域的积雪几乎融完,仅有个别地区还存在积雪;秋季流域开始逐渐出现积雪过程;冬季流域积雪面积达到最大。从子流域的积雪空间分布来看,流域中下游地区,特别是攀枝花和桐梓林子流域,在全年几乎都没有积雪覆盖,这归因于这两个子流域纬度和海拔相对较低、冬季气温相对较高,发生融雪径流的可能性和占比较小。对于其他子流域,在年内均会发生不同程度的积雪累积和消融过程,且子流域纬度越低,平均积雪覆盖程度越低,对应的积雪开始融化时间较早,开始累积时间较晚。

图 5 为金沙江各子流域不同季节中的主导产流模式分布。由图 5 可见,流域北部和南部以蓄满产流为主导,而中西部及道孚子流域则以超渗产流为主导。春季,仅流域的东北部和中南部少部分区域

出现了融雪径流现象,源头区域因海拔较高、气温较低,尚未发生融雪。夏季,除流域南部的攀枝花和桐梓林子流域外,其他子流域普遍存在融雪产流现象,融雪对春、夏季的产流量有重要影响。进入秋季和冬季,因气温下降到低于积雪融化的阈值温度,整个流域不再发生融雪径流,主导产流机制趋于单一。此外,流域南部的攀枝花和桐梓林子流域全年均以蓄满产流为主,这主要受其较低海拔的地理位置影响。总体来看,金沙江流域的产流模式在不同季节呈现出显著的空间变化,尤其是在春、夏季,融雪对流域中、北部地区的产流起到了显著的影响,而在秋、冬两季,超渗与蓄满产流成为主导机制。这种季节性变化反映了金沙江流域对气候条件的高度敏感性,特别是气温对降水类型以及积雪融化过程的控制作用。

3.2 参数敏感性分析及径流模拟

目前,金沙江干流上已建成包括梨园水电站在内共 8 座大型水电站,水电站的建设显著改变了径流的时空分布规律。梨园水电站是梯级水电站的龙头水库,位于石鼓水文站下游。因此,本文仅讨论石鼓水文站以上集水区域(直门达子流域和石鼓子流域)的天然径流模拟结果。其中,直门达子流域以蓄满产流和融雪径流过程为主导;石鼓子流域包含蓄满产流、超渗产流及融雪径流过程。

图 6 为参数敏感性分析结果。由图 6 可见,雪层水库融化因子 k_{mlt} 以及马斯京根地表径流参数

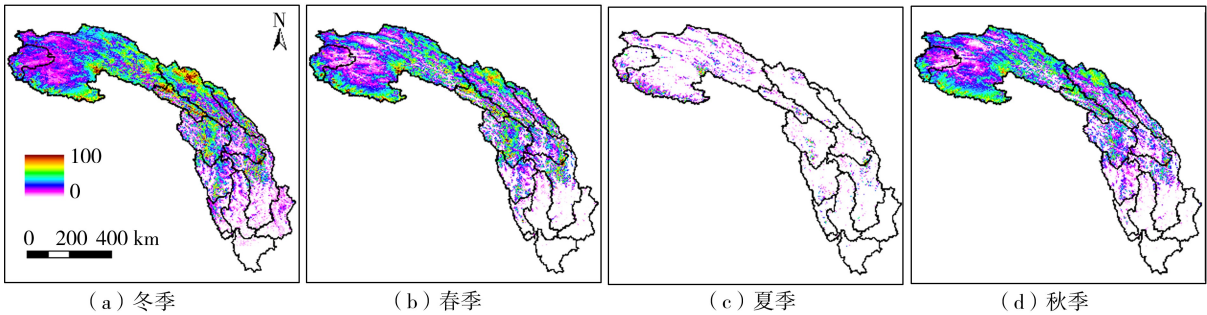


图 4 2002—2016 年金沙江流域不同季节的多年平均积雪覆盖度

Fig. 4 Multi year average snow cover of different seasons of the Jinsha River Basin from 2002 to 2016

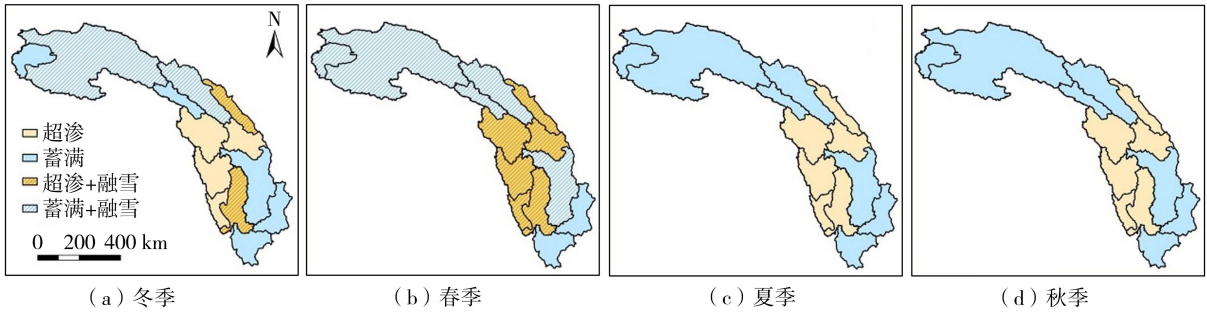


图 5 金沙江各子流域不同季节中的主导产流模式分布

Fig. 5 Distribution of dominant runoff patterns in different seasons in sub-basins of the Jinsha River

K_{es} 对径流模拟结果具有最高的敏感性,无论是在一阶敏感度还是总敏感度方面均表现出显著影响。此外,壤中流消退系数 C_1 、地表径流消退系数 C_s 、马斯京根河道汇流参数 K_{ech} 在产汇流模拟过程中也表现出一定的敏感性;蒸散发折算系数 K 和地下径流消退系数 C_c 的敏感度较低。总体而言,所有参数的总敏感度远大于一阶敏感度,反映出 iRainSnowHydro 模型具有很强的参数交互效应,说明积雪融化、产流、汇流过程都互相关联,符合水文模拟中常见的强交互、多参数控制的特性。

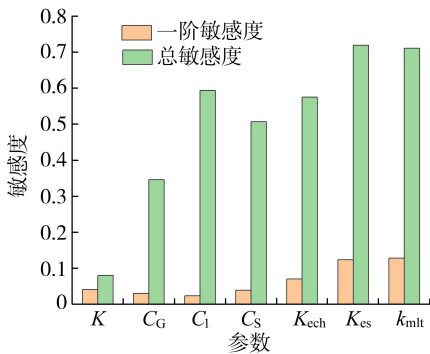


图 6 参数敏感性分析结果

Fig. 6 Parameter sensitivity analysis results

选取 2014—2017 年作为率定期, 2018—2020 年作为验证期, 以纳什效率系数、皮尔逊相关系数以及相对偏差量作为 iRainSnowHydro 模型径流模拟结果的评价指标。结果表明, 率定期内, 直门达子流域的纳什效率系数为 0.75, 相关系数为 0.88, 相对偏差量为 7.93%; 石鼓子流域的纳什效率系数为 0.85, 相关系数为 0.95, 相对偏差量为 -1.07%, 模拟效果好。验证期内, 直门达子流域的纳什效率系数为 0.73, 相关系数为 0.88, 相对偏差量为 7.93%; 石鼓子流域的纳什效率系数为 0.81, 相关系数为 0.96, 相对偏差量为 -13.68%, 模拟效果与率定期相近。为进一步评估 iRainSnowHydro 模型在模拟高径流量和低径流量及其发生概率方面的表现, 对径流值进行了对数转换处理, 减小高径流量与低径流量之间的差异, 使得数据分布更加均匀, 便于观察不同径流区间的超越概率, 图 7 为直门达和石鼓子流域数据转换前后径流模拟结果的超越概率曲线。由图 7 可见, iRainSnowHydro 模型总体的径流模拟效果较好, 但在石鼓子流域的高径流量区间中存在一定程度的高估, 在低径流量区间存在一定程度的低估, 对直门达子流域的中低径流量区间存在一定程度的低估。产生偏差的原因可能源于模型结构和参数率定对极端流量条件下的径流过程捕捉不足以及输入数据可能存在的误差。

为进一步探讨直门达和石鼓两个子流域产流模

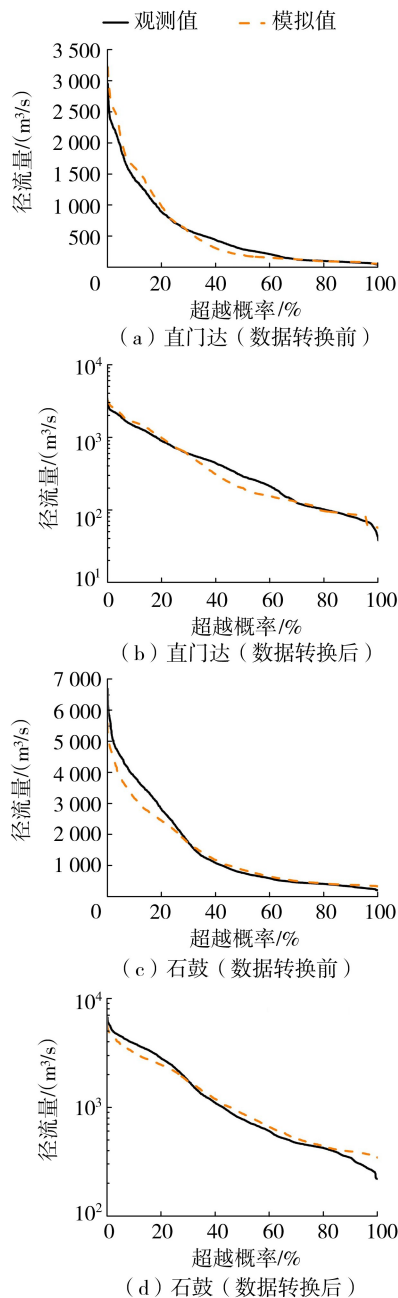


图 7 直门达和石鼓子流域数据转换前后径流模拟结果的超越概率曲线

Fig. 7 Exceedance probability curves of runoff simulation results before and after data conversion in Zhimenda and Shigu sub-basins

式的季节性变化特征, 利用 iRainSnowHydro 模型模拟了两个子流域的地表径流、壤中流以及地下径流, 结果如 8 图所示。由图 8 可见, 两子流域壤中流和地下径流更占主导, 而地表径流相对较少, 但在冰雪融化的春季或强降雨期间地表径流可能突增。相较于直门达子流域, 石鼓子流域的地表径流过程在春、夏季更为敏感, 表明强降雨主导的产流机制占有一定的比例, 这也与石鼓子流域纬度更低、气温更高有关。在枯水期, 直门达子流域的基流贡献率更高, 表现出更强的地下水补给能力。

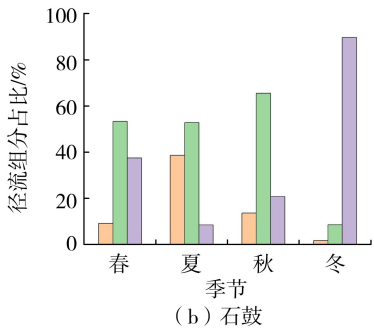
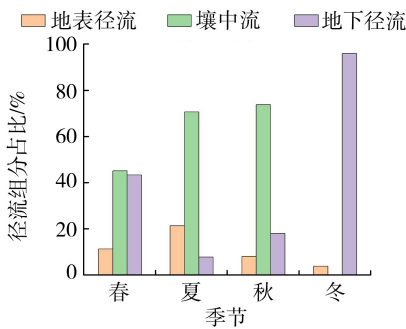


图8 直门达和石鼓子流域季节性径流组成
Fig. 8 Seasonal runoff composition in the Zhimenda and Shigu sub-basins

3.3 水循环关键要素响应规律

图9为直门达和石鼓子流域不同时间尺度下的降水、径流响应关系,图中长期响应指在更长时间尺度(如月、季、年)上,降水对径流总量的累积影响,受气候、土壤和下垫面变化等因素影响;短期响应指降水后地表径流迅速增加,反映降水与径流之间短时期内的关系,受土地利用、坡度影响显著。由图9(a)(b)可见,直门达和石鼓子流域径流序列的自相关系数呈规律性波动,其波峰波谷大致间隔

250~300 d,这表明两个子流域的径流具有年周期波动特征。两个子流域的径流过程可能受到了季节性降雨和融雪的影响,例如冬季降雪累积、春季融雪加剧径流或者汛期降雨等周期性变化。同时,石鼓子流域径流序列的自相关系数高于直门达子流域,表明历史流量对当前流量的影响更为持久,这与石鼓子流域的汇流时间更长、调蓄能力较强有关。从长期响应关系来看,直门达和石鼓子流域的降水与径流的互相关系数也呈现周期性波动,变化与自相关系数基本同步,这表明降水与径流序列之间存在长期滞后效应,可能与地下水补给、土壤含水量变化等因素有关,反映了降水对径流的影响不仅限于短期的直接响应,还伴随着较长时间的延迟效应。同时,降水与径流的互相关系数序列的响应时间滞后于径流的自相关系数序列,这反映出降水对径流的外部驱动作用,这种影响通过下渗、产流和汇流3个阶段进行作用,需要一定的响应时间。

由图9(c)(d)可见,短滞后时间(如10 d)内,直门达和石鼓子流域的降水与径流均具有较高的正相关关系,表明降水事件,特别是降雨事件,会在短时间内对地表径流过程产生显著影响。石鼓子流域的降水、径流互相关系数高于直门达子流域,也反映出石鼓子流域更高的流域调蓄能力。从短期响应规律来看,金沙江两个典型流域的地表径流消退时间为3~10 d。随着滞后时间的增加,两个子流域降水与径流的相关性逐渐减弱,直到80 d左右,相关系数趋近于0,这可能反映了壤中流和地下径流的退水过程需要较长时间,基流(壤中流和地下径流)的

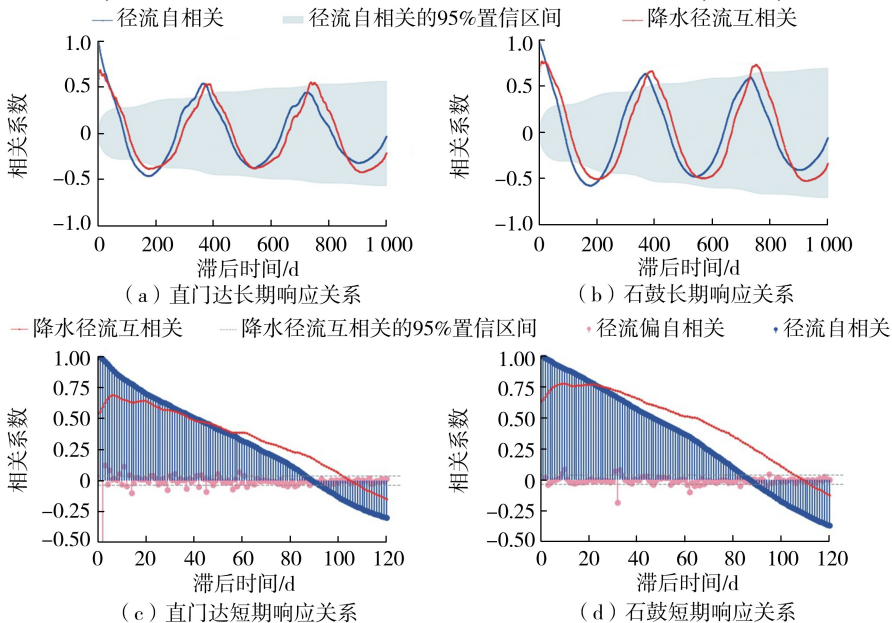


图9 直门达和石鼓子流域不同时间尺度下的降水、径流响应关系

Fig. 9 Precipitation-runoff response relationships at different time scales in the Zhimenda and Shigu sub-basins

消退时间为 10~80 d。该现象表明,降水对径流的影响存在不同时间尺度的响应,初期是快速的地表径流,而后期则更多与缓慢的壤中流和地下径流有关。同时,两个子流域径流序列的偏自相关系数均在 3 d 出现负值,表明流量序列存在短期滞后的反应。例如,在某次降雨或融雪事件后,径流会迅速增加,但由于滞后效应,径流可能在几天后出现反向调整。这种现象与流域的自然调节过程有关,一定程度上反映了地表径流的消退速度。

4 结 语

本文针对典型寒区——金沙江流域,根据地形指数、径流曲线数及积雪覆盖度构建了子流域季节性主导产流模式识别方法,采用 iRainSnowHydro 模型进行了降雨-融雪径流模拟,并分析了直门达和石鼓两个子流域的水循环关键要素的响应规律。结果表明,子流域季节性主导产流模式的识别效果较好,北部和南部子流域以蓄满产流为主导,而中西部及道孚子流域则以超渗产流为主导。iRainSnowHydro 模型可以较好地模拟金沙江各子流域的降雨-融雪径流过程,但对高、低流量过程存在一定程度的偏差,这可能源于输入数据和参数率定的不确定性。金沙江流域的降水和径流存在以季和年为尺度的周期性变化规律,壤中流和地下径流是直门达和石鼓子流域的主要径流组成,地表径流相对较少,但在春季积雪融化以及夏季降雨期间地表径流明显增加。此外,径流对降水存在不同时间尺度的响应,时间越短、流域面积越大,降水与径流的互相关系数越高。降水对径流的影响通过下渗、产汇流等过程作用,并与流域自然调蓄能力有关。金沙江两个典型子流域地表径流的消退时间为 3~10 d,基流(壤中流和地下径流)的消退时间为 10~80 d。考虑到高寒山区积雪过程对产流具有显著影响,且不同地区积雪的积累和融化时间存在显著差异,未来研究可引入积雪物候分析方法,构建基于物候阶段的降雨-融雪径流模拟。

参考文献:

[1] HUANG Jianping, ZHOU Xiuji, WU Guoxiong, et al. Global climate impacts of land-surface and atmospheric processes over the Tibetan Plateau [J]. Reviews of Geophysics, 2023, 61 (3) : e2022RG000771.

[2] 杨肖丽,张佳乐,黄星怡,等. 气候变化和人类活动对长江流域极端径流的影响 [J]. 水资源保护, 2025, 41 (4) : 1-9. (YANG Xiaoli, ZHANG Jiale, HUANG Xingyi, et al. Impacts of climate change and human activities on extreme runoff in the Yangtze River Basin [J]. Water

Resources Protection, 2025, 41 (4) : 1-9. (in Chinese))

[3] WANG Zhibiao, WU Renguang, HUANG Gang. Low-frequency snow changes over the Tibetan Plateau [J]. International Journal of Climatology, 2018, 38 (2) : 949-963.

[4] PU Zhaoxia, XU Li, SALOMONSON V V. MODIS/Terra observed seasonal variations of snow cover over the Tibetan Plateau [J]. Geophysical Research Letters, 2007, 34 (6) : L06706.

[5] 刘宏伟,储少志,蔡钊,等. 极端暴雨洪水条件下厂区不同排水方案的防洪能力模拟 [J]. 河海大学学报(自然科学版), 2025, 53 (3) : 30-39. (LIU Hongwei, CHU Shaozhi, CAI Zhao, et al. Simulation study on flood control capacity of different drainage schemes in factory area under extreme rainstorm flood conditions [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2025, 53 (3) : 30-39. (in Chinese))

[6] 王浩,赵钢铁,田雨,等. 考虑时间变化的洪涝灾害损失评估 [J]. 水利学报, 2024, 55 (2) : 127-136. (WANG Hao, ZHAO Tongtiegang, TIAN Yu, et al. Incorporating temporal changes into flood loss assessments [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2024, 55 (2) : 127-136. (in Chinese))

[7] 罗煜宁,张珂,王宇昊,等. 金沙江上游降雨-融雪径流模拟与洪水风险评估 [J]. 水资源保护, 2025, 41 (3) : 93-100. (LUO Yuning, ZHANG Ke, WANG Yuhao, et al. Simulation of rainfall-snowmelt runoff and flood risk assessment in upper reaches of the Jinsha River [J]. Water Resources Protection, 2025, 41 (3) : 93-100. (in Chinese))

[8] 郭林茂,王根绪,宋春林,等. 多年冻土区下垫面条件对坡面关键水循环过程的影响分析 [J]. 水科学进展, 2022, 33 (3) : 401-415. (GUO Linmao, WANG Genxu, SONG Chunlin, et al. Analysis on the influence of underlying surface conditions in permafrost regions on the key water cycle processes at slope scale [J]. Advances in Water Science, 2022, 33 (3) : 401-415. (in Chinese))

[9] 田富强,徐冉,南熠,等. 基于分布式水文模型的雅鲁藏布江径流水源组成解析 [J]. 水科学进展, 2020, 31 (3) : 324-336. (TIAN Fuqiang, XU Ran, NAN Yi, et al. Quantification of runoff components in the Yarlung Tsangpo River using a distributed hydrological model [J]. Advances in Water Science, 2020, 31 (3) : 324-336. (in Chinese))

[10] FENG Jin, ZHANG Ke, ZHAN Huijie, et al. Improved soil evaporation remote sensing retrieval algorithms and associated uncertainty analysis on the Tibetan Plateau [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2023, 27 (2) : 363-383.

[11] 张珂,张企诺,陈新宇,等. 栅格新安江-地表地下双人工调蓄分布式水文模型 [J]. 水资源保护, 2021, 37

- (5):94-101. (ZHANG Ke,ZHANG Qinguo,CHEN Xinyu, et al. Gridded Xin'anjiang-dual anthropogenic aboveground and underground regulation distributed hydrological model [J]. Water Resources Protection, 2021,37(5):94-101. (in Chinese))
- [12] 孔月,张珂,申晓骥,等. 基于微波遥感和多模型集成的土壤湿度反演[J/OL]. 河海大学学报(自然科学版), 1-11 (2025-02-03). <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1117.tv.20250205.1452.018.html>. (KONG Yue, ZHANG Ke, SHEN Xiaoj, et al. Soil moisture retrieval based on microwave remote sensing and multi-model ensemble[J/OL]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 1-11 (2025-02-03). <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1117.tv.20250205.1452.018.html>. (in Chinese))
- [13] 申笑萱,张珂,张兆安,等. 水文多模型拆分组配与协同优化研究进展[J]. 水资源保护,2025,41(4):189-196. (SHEN Xiaoxuan, ZHANG Ke, ZHANG Zhaoan, et al. Research progress on hydrological multi-model decomposition allocation collaborative optimization [J]. Water Resources Protection, 2025, 41 (4): 189-196. (in Chinese))
- [14] FINSTERWALDER S. Der suldenferner [J]. Zeitschrift des Deutschen und Osterreichischen Alpenvereins, 1887, 18:72-89.
- [15] GAREN D C, MARKS D. Spatially distributed energy balance snowmelt modelling in a mountainous river basin: estimation of meteorological inputs and verification of model results[J]. Journal of Hydrology, 2005,315(1/4): 126-153.
- [16] 王一帆,王宇昊,张珂,等. 考虑融雪和降雨径流过程的网格化模拟方法及其应用[J/OL]. 河海大学学报(自然科学版), 1-13 (2025-01-30). <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1117.TV.20250205.1542.028.html>. (WANG Yifan, WANG Yuhao, ZHANG Ke, et al. Grid simulation method considering snowmelt and rainfall-runoff process and its application [J/OL]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 1-13 (2025-01-30). <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1117.TV.20250205.1542.028.html>. (in Chinese))
- [17] 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))
- [18] YANG Yong, CHEN Rensheng, LIU Guohua, et al. Trends and variability in snowmelt in China under climate change [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2022,26(2): 305-329.
- [19] ZHOU Gang, CUI Manyi, WAN Junhong, et al. A review on snowmelt models: progress and prospect [J]. Sustainability, 2021,13(20):11485.
- [20] RIBOUST P, THIREL G, LE MOINE N, et al. Revisiting a simple degree-day model for integrating satellite data: implementation of SWE-SCA hystereses [J]. Journal of Hydrology and Hydromechanics, 2019,67(1):70-81.
- [21] LATIF Y, MA Yaoming, MA Weiqiang, et al. Differentiating snow and glacier melt contribution to runoff in the Gilgit River Basin via degree-day modelling approach[J]. Atmosphere, 2020,11(10):1023.
- [22] 薛联青,陈雨欣,刘远洪,等. 基于机器学习的 Budyko 流域时变特征参数估计[J]. 水资源保护, 2025, 41 (4): 10-18. (XUE Lianqing, CHEN Yuxin, LIU Yuanhong, et al. Machine learning-based estimation of time-varying budyko basin-specific parameter[J]. Water Resources Protection, 2025,41(4):10-18. (in Chinese))
- [23] 刘莉,梁霄,WANG Quanjun,等. 基于深度学习的改进 ERRIS 径流预报实时校正模型[J]. 水资源保护, 2024, 40(6):155-164. (LIU Li, LIANG Xiao, WANG Quanjun, et al. Improved ERRIS model for real-time correction of streamflow forecast based on deep learning [J]. Water Resources Protection, 2024, 40 (6): 155-164. (in Chinese))
- [24] LIANG Wenting, CHEN Yaning, FANG Gonghuan, et al. Machine learning method is an alternative for the hydrological model in an alpine catchment in the Tianshan region, central Asia [J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2023,49:101492.
- [25] WANG Guoyu, HAO Xiaohua, YAO Xiaojun, et al. Simulations of snowmelt runoff in a high-altitude mountainous area based on big data and machine learning models: taking the Xiyang River Basin as an example[J]. Remote Sensing, 2023,15(4):1118.
- [26] 刘江涛,徐宗学,赵焕,等. 基于改进降水输入模块的融雪径流模拟:以拉萨河为例[J]. 水利学报, 2018, 49 (11): 1396-1408. (LIU Jiangtao, XU Zongxue, ZHAO Huan, et al. Simulation of snowmelt runoff processes based on enhanced precipitation input module: case studies in the Lhasa River Basin [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018,49(11):1396-1408. (in Chinese))
- [27] 王福勇. 基于 MODIS 遥感影像的融雪径流模拟研究[J]. 水利水电技术, 2015, 46 (4): 26-29. (WANG Fuyong. MODIS remote sensing image-based study on simulation of snowmelt runoff [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2015, 46 (4): 26-29. (in Chinese))
- [28] 刘金平,任艳群,张万昌,等. 雅鲁藏布江流域气候和下垫面变化对径流的影响研究[J]. 冰川冻土, 2022, 44 (1): 275-287. (LIU Jinping, REN Yanqun, ZHANG Wanchang, et al. Study on the influence of climate and underlying surface change on runoff in the Yarlung Zangbo

- River Basin[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2022,44(1):275-287. (in Chinese))
- [29] 郭珈源,孙旭杨,刘金涛,等. 基于 Budyko 理论的高寒山区流域径流演变归因分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2025, 53(3): 22-29. (GUO Jiayuan, SUN Xuyang, LIU Jintao, et al. Attribution analysis of runoff evolution in cold alpine catchment based on Budyko theory [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2025,53(3):22-29. (in Chinese))
- [30] DAI Liyun, CHE Tao, DING Yongjian, et al. Evaluation of snow cover and snow depth on the Qinghai-Tibetan Plateau derived from passive microwave remote sensing[J]. The Cryosphere, 2017, 11(4): 1933-1948.
- [31] 邱玉宝, 王星星, 韩璐璐, 等. 2002—2016 年高亚洲逐日积雪覆盖率数据集 [J]. 中国科学数据, 2017, 2(2): 11. (QIU Yubao, WANG Xingxing, HAN Lulu, et al., Daily fractional snow cover dataset over High Asia (2002-2016) [J]. China Scientific Data, 2017, 2(2): 11. (in Chinese))
- [32] 邱玉宝, 郭华东, 除多, 等. 青藏高原 MODIS 逐日无云积雪面积数据集[J]. 中国科学数据, 2016, 1(1): 1-11. (QIU Yubao, GUO Huadong, CHU Duo, et al. MODIS daily cloud-free snow cover products over Tibetan Plateau [J]. China Scientific Data, 2016, 1(1): 1-11. (in Chinese))
- [33] SALOMONSON V V, APPEL I. Estimating fractional snow cover from MODIS using the normalized difference snow index [J]. Remote Sensing of Environment, 2004, 89(3): 351-60.
- [34] LUO Yuning, ZHANG Ke, WANG Yuhao, et al. iRainSnowHydro v1. 0: a distributed integrated rainfall-runoff and snowmelt-runoff simulation model for alpine watersheds[J]. Journal of Hydrology, 2024, 645: 132220.
- [35] 李巧玲, 李旻喆, 李致家, 等. 新安江-海河模型参数物理意义分析及应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2025, 53(1): 1-9. (LI Qiaoling, LI Minzhe, LI Zhijia, et al. Physical interpretation parameters of Xin'anjiang-Haihe model and its application [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2025, 53(1): 1-9. (in Chinese))
- [36] 石朋, 丁松, 司伟, 等. 新安江模型敏感参数动态变化规律研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2024, 52(3): 1-6. (SHI Peng, DING Song, SI Wei, et al. Study on dynamic variations of sensitive parameters in Xin'anjiang model [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2024, 52(3): 1-6. (in Chinese))
- [37] 刘松, 余敦先, 张利平, 等. 基于 Morris 和 Sobol 的水文模型参数敏感性分析[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(6): 1296-1303. (LIU Song, SHE Dunxian, ZHANG Liping, et al. Global sensitivity analysis of hydrological model parameters based on morris and sobol methods[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2019, 28(6): 1296-1303. (in Chinese))
- [38] WISE J. The autocorrelation function and the spectral density function [J]. Biometrika, 1955, 42(1/2): 151-159.
- [39] RAMSEY F L. Characterization of the partial autocorrelation function [J]. The Annals of Statistics, 1974: 1296-301.
- [40] BUSSGANG J J. Crosscorrelation functions of amplitude-distorted Gaussian signals [J]. 1952.

(收稿日期:2025-02-11 编辑:王芳)

(上接第 212 页)

- [29] 金君良. 西部资料稀缺地区的水文模拟研究[D]. 南京:河海大学, 2006.
- [30] ROSENBROCK H H. An automatic method for finding the greatest or least value of a function [J]. The Computer Journal, 1960, 3(3): 175-184.
- [31] JIANG Tong, SU Buda, HARTMANN H. Temporal and spatial trends of precipitation and river flow in the Yangtze River Basin, 1961-2000[J]. Geomorphology, 2007, 85(3-4): 143-154.
- [32] 刘晓娇, 陈仁升, 刘俊峰, 等. 黄河源区积雪变化特征及其对春季径流的影响[J]. 高原气象, 2020, 39(2): 226-233. (LIU Xiaojiao, CHEN Rensheng, LIU Junfeng, et al. Variation of snow cover and its influence on spring runoff in the source region of Yellow River [J]. Plateau Meteorology, 2020, 39(2): 226-233. (in Chinese))
- [33] 次旦央宗, 李鸿雁, 李晓峰. 东北寒区 SWAT 模型融雪径流空间异质性参数率定方法及应用: 以白山流域为例[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2023, 53(1): 230-240. (CIDAN Yangzong, LI Hongyan, LI Xiaofeng. Method and application of SWAT model parameter calibration for spatial heterogeneity of snowmelt runoff in cold regions of Northeast China: a case study of Baishan Basin [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2023, 53(1): 230-240. (in Chinese))

(收稿日期:2025-02-17 编辑:王芳)