

金沙江上游降雨-融雪径流模拟与洪水风险评估

罗煜宁^{1,2}, 张珂^{1,2,3,4,5}, 王宇昊^{1,2}, 蒋飞卿⁶

(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; 6. 水利部南京水利水文自动化研究所, 江苏 南京 210012)

摘要: 针对在寒区大尺度流域难以开展同位素示踪法水源解析、降雨-融雪径流模拟精度低、洪水遭遇风险难以量化等问题, 构建了分布式水文模型 iRainSnowHydro 对金沙江上游石鼓流域进行水源分割和径流模拟。基于降雨、融雪水源解析结果, 结合实测流量数据, 运用 Copula 函数分别构建二维和三维联合分布, 分别计算了雨、雪、洪组合事件的丰枯遭遇风险。结果表明: iRainSnowHydro 模型对金沙江上游的日径流模拟效果较好, 纳什效率系数达 0.8 以上; 流域水源组成季节性差异显著, 春季融雪径流占比高, 且稳定在 $(27 \pm 6)\%$; 在二维联合分布中, 雨、洪的丰枯同步遭遇风险最大, 为 56.34%; 在三维联合分布中, 雨、雪、洪丰枯同步遭遇风险为 15.39%, 出现雨、雪、洪三碰头的极端天气事件概率为 2.55%。

关键词: 寒区; 降雨-融雪径流; 水源解析; 丰枯遭遇; iRainSnowHydro 模型; Copula 函数; 金沙江上游
中图分类号: TV213.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-6933(2025)03-0093-08

Simulation of rainfall-snowmelt runoff and flood risk assessment in upper reaches of the Jinsha River// LUO Yuning^{1,2}, ZHANG Ke^{1,2,3,4,5}, WANG Yuhao^{1,2}, JIANG Feiqing⁶ (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, Hohai University, 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; 6. Nanjing Research Institute of Hydrology and Water Conservation Automation, Ministry of Water Resources, Nanjing 210012, China)

Abstract: To address the challenges of determining water source composition using isotope tracing methods in large-scale alpine basins, as well as the low accuracy of rainfall-snowmelt runoff simulations and the difficulty in quantifying flood risk encounters, a distributed hydrological model, iRainSnowHydro, was established for water source partitioning and runoff simulation in the Shigu Basin of the upper reaches of the Jinsha River. Based on the division results of rainfall and snowmelt water, combined with observed flow data, the Copula function was used to construct two-dimensional and three-dimensional joint distributions to calculate the encounter risks of wet and dry for rain, snow, and flood combination events. The results indicate that the iRainSnowHydro model performs well in simulating daily runoff at the upper reaches of the Jinsha River, with Nash efficiency coefficients exceeding 0.8. There are significant seasonal differences in the water source proportion, with snowmelt water in spring accounting for a high and stable proportion of $(27 \pm 6)\%$. In the two-dimensional joint distribution, the risk of synchronous wet-dry encounters between rainfall and streamflow is the highest at 56.34%. In the three-dimensional joint distribution, the risk of synchronous wet-dry encounters for rain-snow-flood is 15.39%, and the probability of extreme weather events involving synchronous occurrences of rain, snow, and flood is 2.55%.

Key words: alpine basin; rainfall-snowmelt runoff; water source composition; wet-dry encounters; iRainSnowHydro model; Copula function; upper reaches of the Jinsha River

融雪径流是高寒山区的重要水文过程^[1], 与地区水资源可利用量和河川径流的时空分布规律有着密切联系。在全球变暖和人类活动的影响下, 青

高原的水文循环系统的稳定性受到干扰^[2-3], 积雪融化速度显著加快。这种变化引发了一系列显著的水文和气象现象, 包括冰川面积减少^[4]、海平面上

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2023YFC3006500)

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

通信作者: 张珂 (1979—), 男, 教授, 博士, 主要从事水文水资源研究。E-mail: kzhang@hhu.edu.cn

升^[5]、内陆湖泊扩张^[6]以及重大雪灾及洪涝事件频发^[7]。开展高寒山区的降雨-融雪径流模拟并进行洪水风险评估^[8-10]对于降低寒区洪涝风险、维护水安全具有重要意义。

水源解析是开展融雪型洪水风险评估的前提,解析方法包括同位素示踪法^[11]和水文模型解析法^[12]。同位素示踪法可以根据雨雪同位素的丰度进行雨雪的识别与分割,该方法通常依赖长系列(多场次降雨)的监测数据和高精度测量仪器,然而青藏高原环境恶劣,数据获取和样品采集困难,受试验环境和设备制约,目前这种方法难以在青藏高原进行应用。分布式水文模型是研究复杂水文过程的重要工具^[13-15],可应用于青藏高原上有积雪覆盖的流域。青藏高原降雨产流和融雪过程均会发生,融雪径流是径流组分中不可忽略的重要组成部分,影响着径流的年内分配。例如,积雪融化日期的提前会导致春季和夏季的径流量减少,进而影响水资源的可利用性和地下水的补给^[16]。在青藏高原已有的水源解析和融雪径流模拟研究中,Meng等^[17]利用可变下渗容量(variable infiltration capacity, VIC)模型对青藏高原6个典型流域的地表水储量变化进行了分析,认为水储量变化主要归因于降水和蒸散的变化;田富强等^[18]在雅鲁藏布江流域构建了基于代表性单元流域的分布式水文模型THREW(Tsinghua representative elementary watershed),并进行了不同水源主导的流量过程线子集的划分;徐华亭等^[19]以青藏高原尼洋河流域为例,评估了再分析降水资料和VIC模型在缺资料地区径流模拟中的适用性;张居嘉等^[20]使用融雪径流模型(snowmelt-runoff model, SRM)对澜沧江上游春季融雪径流进行模拟,结果良好。有研究表明,1990—2020年全球共发生融雪洪水灾害579次,春季为融雪洪水灾害高发期^[7]。此外,相较于由温度升高引发的融雪型洪水,雨雪混合型洪水的发生频率更高,破坏力更大^[21],亟须开展融雪洪水灾害的预警和风险评估。然而,现阶段研究大多针对融雪洪水时空变化特征及成因进行分析^[22-23],鲜有研究关注流域暴雨、大量融雪和洪水,即雨、雪、洪在同一时段内发生的联合遭遇及其相关性变化。

鉴于此,本文采用青藏高原金沙江流域上游一体化降雨-融雪径流模型(integrated rainfall-runoff and snowmelt-runoff simulation hydrological model, iRainSnowHydro),利用地表雪层水库对融雪径流进行模拟,解析降雨和融雪的水源组成,构建Copula函数的丰枯遭遇模型^[24],研究金沙江上游汛期雨、雪、洪三大致灾事件的遭遇风险,以期为流域防灾预

警提供科学依据。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

金沙江是长江上游河段,发源于青海省唐古拉山脉主峰格拉丹东雪山,流域范围为24°N~36°N、90°E~105°E。金沙江流域面积约38.75万km²,为长江流域总面积的26%。流域地形复杂,主要以高山和深谷为特征,上下游地区海拔差异显著。河流水系分布复杂,河流主要由降雨补给,辅以地下水和融雪水。本文以青藏高原金沙江石鼓站以上流域(简称石鼓流域)为研究区(图1),该流域位于青藏高原东南部,覆盖面积为21.4万km²。石鼓流域内主要的土地覆盖类型为草地(58.7%),其次为裸地(22.4%);主要土壤类型为砂质壤土。石鼓流域属于半湿润、半干旱气候,由于横断山脉的阻挡作用,降水量相对较低,年平均气温为1.5℃,年平均降水量为452.6mm。石鼓流域内的洪水主要由融雪洪水和暴雨洪水引起,其中暴雨洪水最为常见。

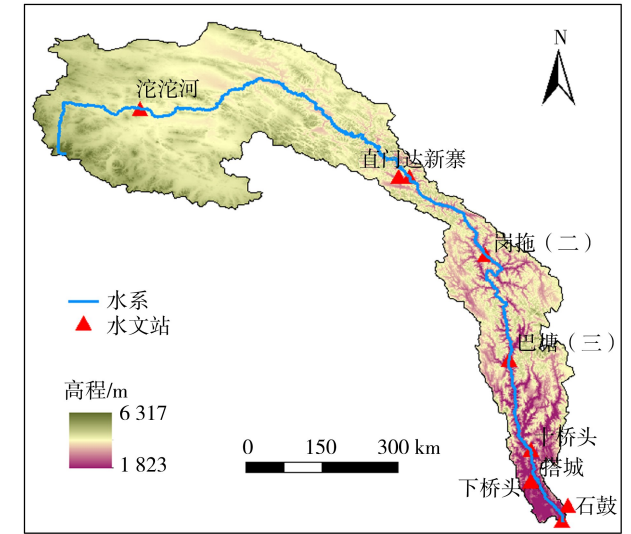


图1 石鼓流域概况

Fig. 1 Overview of the Shigu Basin

1.2 数据来源

本文使用来自美国国家海洋和大气的管理局的全球1km分辨率的DEM数据。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1km。植被类型资料来自全球ESA CCI土地覆盖分类图(<https://www.esa-landcover-cci.org>),空间分辨率为300m。通过ArcGIS软件得到流域的基础下垫面信息,如流向、累积汇水面积、坡度、坡向、地形指数等。用于驱动水文模型的气象数据(降水 and 气温)来自国家气象中心(<https://data.cma.cn/>),时间分辨率为1d,

空间分辨率为 $0.05^{\circ} \times 0.05^{\circ}$ 。积雪数据来自中国积雪深度长时间序列数据集^[25],时间分辨率为 1 d,空间分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 。石鼓站日径流数据摘录自《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、气温和积雪数据统一至与模型分辨率相匹配的空间分辨率,为 $0.01^{\circ} \times 0.01^{\circ}$ 。

2 研究方法

2.1 iRainSnowHydro 模型

采用 iRainSnowHydro 模型进行石鼓流域的径流模拟和水源解析,模型结构、参数和计算公式参见文献[26-27]。模型中基于地表雪层水库的融雪液态水量包括由固态雪转为液态水后直接流出的水量以及雪层水库中缓慢流动的液态水量。地表雪层水库的融雪液态水计算方法反映了雪层对液态水的调蓄作用,需先计算新雪融化和积雪消融的叠加水量,再与落在栅格计算单元上的降雨叠加,一并参与到后续的产汇流计算中。主要计算流程如图 2 所示。

2.2 Copula 函数

Copula 函数可以灵活联合不同类型的单变量分布^[28],目前已广泛应用于水文、海洋、气象等领域。本文在运用 iRainSnowHydro 模型计算石鼓流域 2014—2020 年逐日降雨和融雪水量的基础上,选择汛期(5—10 月)的逐日降雨、融雪水量以及流量作为洪水致灾因子,运用 Copula 函数计算其丰枯遭遇并进行风险评估。

2.2.1 边际概率分布模型

构建 Copula 函数首先需要确定变量的边际分

布。选择 5 种水文领域常见的单变量概率分布函数,包括广义极值分布 (generalized extreme value, GEV)^[29]、韦伯分布 Weibull^[30]、正态分布 Normal、广义帕累托分布 (generalised Pareto, GP)^[31]、P-III 分布^[32],分别对石鼓流域的降雨、融雪水量以及流量序列进行概率分布拟合,并采用 Kolmogorov-Smirnov (K-S) 检验进行合理优选。K-S 检验基于累积分布函数的最大差异来评估两个分布之间的差异,先假设水文变量 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 来自某个指定的理论分布 $F(x)$,而后根据序列数据计算经验累积分布函数和 K-S 统计量,进而计算概率 P 值,若 P 值大于显著性水平 α ,则接受原假设,认为该水文变量符合指定的理论分布。

2.2.2 联合概率分布模型

在确定水文变量的边际分布后,通过在水文领域广泛使用的 Archimedean 型 Copula 函数构造多维联合分布函数。对于随机变量 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 的边际分布 $u_1, u_2, \dots, u_n$ 存在联合分布函数,使得:

$$F(x_1, x_2, \dots, x_n) = C(u_1, u_2, \dots, u_n, \theta) \quad (1)$$

式中: $F(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 为多维联合分布函数; $C(\cdot)$ 为 Copula 函数; θ 为 Copula 函数的参数; n 为变量数,本文取 2 或 3。本文选取 Gumbel、Clayton 以及 Frank 函数分别构建二维(雨-雪、雨-洪、雪-洪)和三维(雨-雪-洪)联合分布模型,表达式为

$$C(u_1, u_2, \dots, u_n) = \exp \left\{ - \left[\sum_{i=1}^n (-\ln u_i)^{\theta} \right]^{1/\theta} \right\} \quad (2)$$

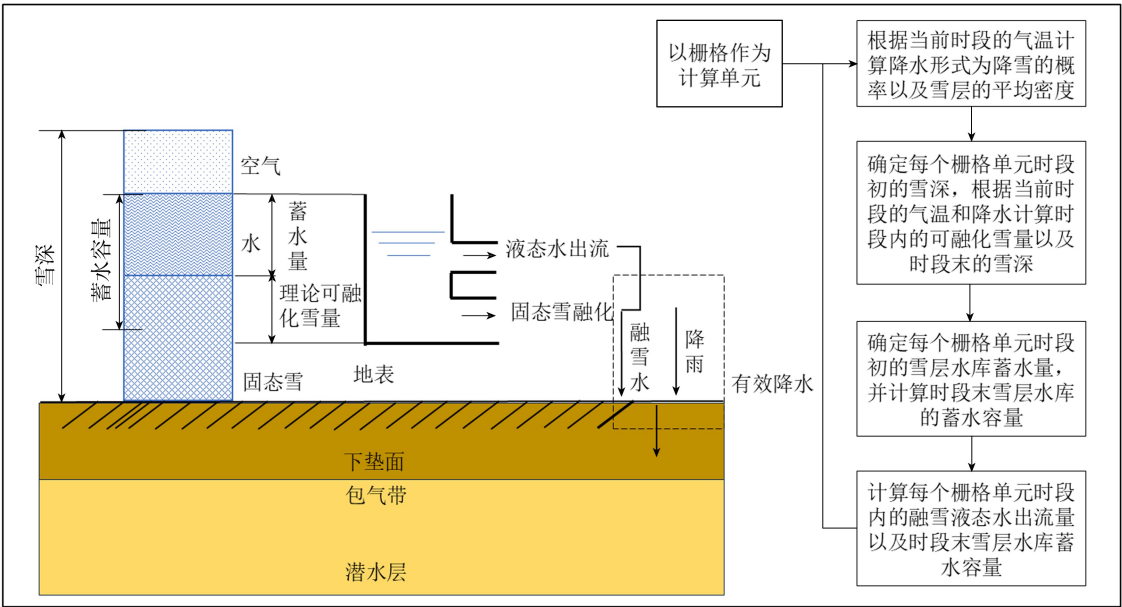


图 2 地表雪层水库概化图及主要计算流程

Fig. 2 Schematic diagram of surface snow reservoir and main calculation process

$$C(u_1, u_2, \dots, u_n) = \left[1 + \sum_{i=1}^n (u_i^{-\theta} - 1) \right]^{-1/\theta} \quad (3)$$

$$C(u_1, u_2, \dots, u_n) = -\frac{1}{\theta} \ln \left[\frac{\prod_{i=1}^n (e^{-\theta u_i} - 1)}{e^{-\theta} - 1} \right] \quad (4)$$

拟合度检验采用普通最小二乘准则 (ordinary least squares, OLS) 以及赤池信息准则 (Akaike information criterion, AIC) 进行判断。OLS 值越小, 说明 Copula 函数拟合效果越好; AIC 值越小, 说明 Copula 函数拟合程度越高。

利用雨、雪、洪三碰头的联合概率来分析流域极端天气发生的可能性, 三维变量超越概率计算公式为

$$F(X_1, X_2, X_3) = P(x_1 \geq X_1, x_2 \geq X_2, x_3 \geq X_3) = 1 - u - v - w + C(u, v) + C(u, w) + C(v, w) - C(u, v, w) \quad (5)$$

式中: x_1, x_2, x_3 分别为降雨、融雪水量、流量; X_1, X_2, X_3 为降雨、融雪水量、流量的阈值; $F(X_1, X_2, X_3)$ 为 x_1, x_2, x_3 超越 X_1, X_2, X_3 的联合超越概率函数; u, v, w 分别为降雨、融雪水量、流量的边际分布函数。

3 结果与分析

3.1 径流模拟及水源解析

石鼓流域内未修建大中型水利工程, 天然径流未受到强人类活动的影响。选取 2014—2017 年、2018—2020 年分别作为率定期和验证期, 结合栅格新安江模型敏感性参数率定经验^[33], 率定 iRainSnowHydro 模型的参数。利用纳什效率系数、皮尔逊相关系数以及相对偏差量评价模型模拟效果。

图 3 为率定期和验证期石鼓站降水量与径流模拟结果。由图 3 可见, 石鼓站的降雨主要集中在汛期 5—10 月。率定期和验证期内, 径流模拟结果的纳什效率系数为 0.85 和 0.81, 相关系数为 0.95 和 0.96, 相对偏差量为 -1.07% 和 -13.68%, 模拟效果较好。从径流量过程线来看, 模拟过程比较贴近实测过程, 特别在枯季, 与实测过程很吻合; 小部分径流量模拟值偏高的情况主要出现在集中降雨过后, 如 2017 年 9 月中上旬以及 2020 年 7 月下旬, 这两段时间内降雨集中且量大, 模拟值明显比实测值更大; 也存在极个别模拟值远小于实测值的情况, 如 2018 年 11 月 15 日, 实测径流量为 5 250 m³/s, 远超历史最大值, 在排除年鉴摘录错误、剔除周边可能来水并结合当日降雨情况, 推测造成该日实测流量过大的可能原因是石鼓水文站上游规划在建的水电站

进行了放水活动。上述结果表明, iRainSnowHydro 模型可用于石鼓流域降雨-融雪径流模拟及水源解析。

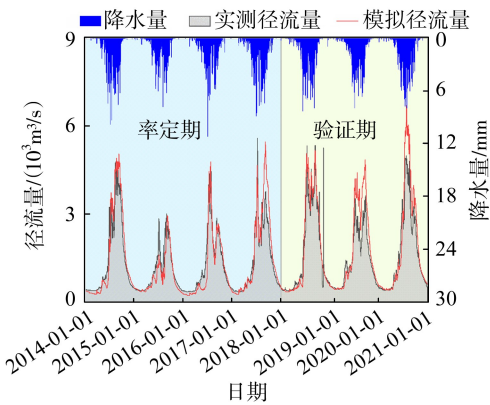


图 3 2014—2020 年石鼓站降水量与径流模拟结果
Fig. 3 Precipitation and runoff simulation results at the Shigu Station from 2014 to 2020

图 4 为 2014—2020 年石鼓流域不同季节水源解析结果。由图 4 可见, 2014—2020 年石鼓流域春季的融雪水量占比在四季中最高, 且稳定在 (27 ± 6)% 左右。在夏季, 因流域平均气温高, 径流组成以降雨径流占绝对主导地位; 在秋季, 尽管降雨径流仍占据主要地位, 但因青藏高原温度变化显著, 易发生少量积雪累积再消融的情况, 融雪径流也是径流组成中的一部分; 在冬季, 石鼓流域因其海拔相较于青藏高原其他地区较低, 平均温度相对较高, 存在降水过程, 且降雨径流占主导。

3.2 雨、雪、洪联合遭遇及风险评估

对石鼓流域汛期降雨、融雪水量及流量系列的边际分布函数进行拟合。评价标准为: 假设检验 H 值等于 0 表示接受原假设, H 值等于 1 表示拒绝该假设; P 值越大、K-S 值越小表示拟合效果更优。得到降雨序列的最优拟合函数为 GEV 分布, 融雪水量序列的最优拟合函数为 Weibull 分布, 流量序列的最优拟合函数为 Weibull 分布, 降雨、融雪水量和流量序列的边际分布函数拟合效果如图 5 所示。在此基础上, 采用 3 种 Copula 函数构建雨、雪、洪事件的二维和三维联合分布模型, 根据 OLS 和 AIC 准则进行拟合优度检验, 检验结果见表 1。由表 1 可见, 三维联合分布 Frank 函数的拟合效果较好, R^2 为 0.946, OLS 值为 0.069。最终确定雨、雪、洪组合二维、三维最优 Copula 函数表达式为

$$C_{\text{雨-雪}} = \frac{1}{2.275} \ln \left[\frac{\prod_{i=1}^n (e^{2.275 u_i} - 1)}{e^{2.275} - 1} \right] + \frac{(e^{2.275 u} - 1)(e^{2.275 v} - 1)}{e^{2.275} - 1} \quad (6)$$

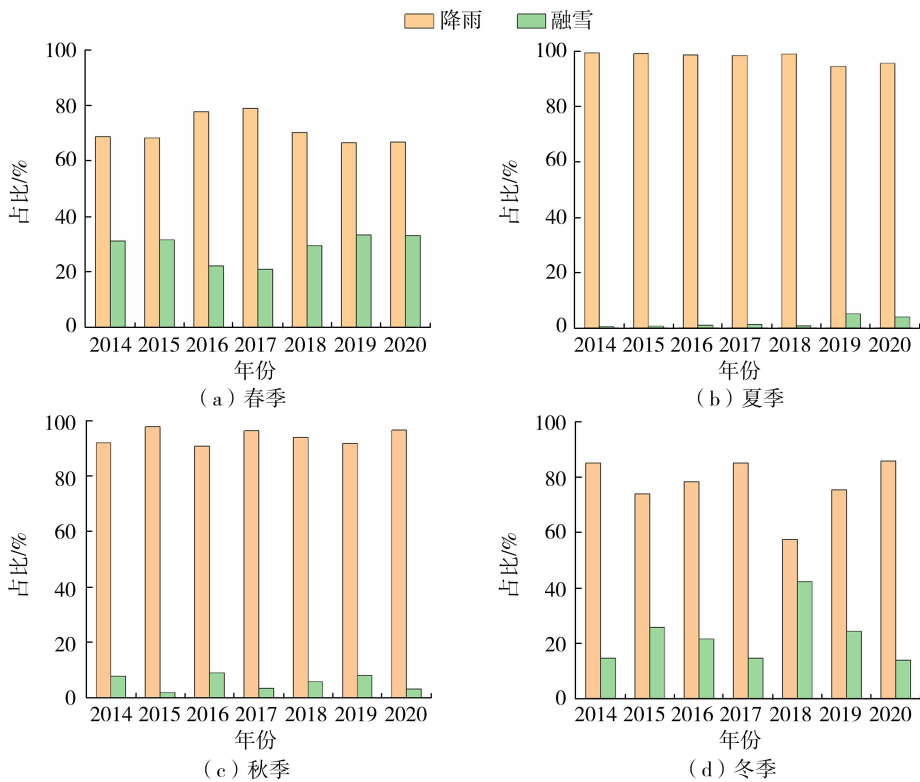


图 4 2014—2020 年石鼓流域不同季节水源解析结果

Fig. 4 Analysis results of water sources in different seasons of the Shigu Basin from 2014 to 2020

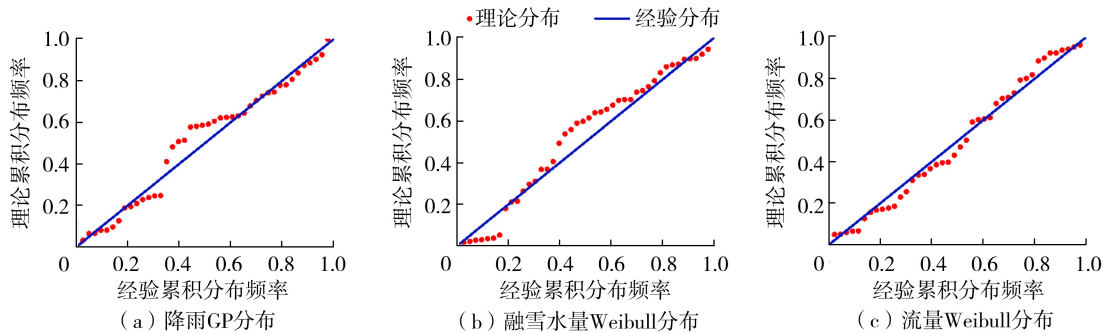


图 5 降雨、融雪水量及流量序列边际分布函数拟合效果

Fig. 5 Fitting effect of marginal distribution functions for rainfall, snowmelt, and flow sequences

表 1 雨、雪、洪组合二维、三维 Copula 函数拟合优度检验结果

Table 1 Goodness of fit test results of two-dimensional and three-dimensional Copula functions for rain, snow, and flood combinations

组合	Gumbel		Clayton		Frank	
	AIC 值	OLS 值	AIC 值	OLS 值	AIC 值	OLS 值
雨-雪	-223.7967	0.1943	-223.7967	0.1943	-247.1661	0.1114
雨-洪	-292.4006	0.0379	-292.4006	0.0717	-293.4138	0.0370
雪-洪	-250.6773	0.1024	-250.6773	0.1024	-278.9915	0.0522
雨-雪-洪	-266.7363	0.0699	-8.8214	32.4603	-267.2531	0.0690

$$C_{\text{雨-洪}} = -\frac{1}{4.325} \ln \left(\frac{e^{-4.325u} - 1}{e^{-4.325} - 1} + \frac{(e^{-4.325u} - 1)(e^{-4.325v} - 1)}{e^{-4.325} - 1} \right) \quad (7)$$

$$C_{\text{雨-雪-洪}} = \frac{1}{0.272} \ln \left(\frac{e^{0.272u} - 1}{e^{0.272} - 1} + \frac{(e^{0.272u} - 1)(e^{0.272v} - 1)(e^{0.272w} - 1)}{e^{0.272} - 1} \right) \quad (9)$$

$$C_{\text{雪-洪}} = \frac{1}{2.714} \ln \left(\frac{e^{2.714v} - 1}{e^{2.714} - 1} + \frac{(e^{2.714v} - 1)(e^{2.714w} - 1)}{e^{2.714} - 1} \right) \quad (8)$$

图 6 为雨-雪-洪三维联合分布 Frank 函数拟合效果,图 7 为三维空间中雨-雪-洪的联合分布切片。由图 7 可见,随着雨量和雪量的增加,洪量也增加的

情况下,联合分布概率有较大的增加趋势,反映了极端气象条件下发生洪水的可能性会更高。

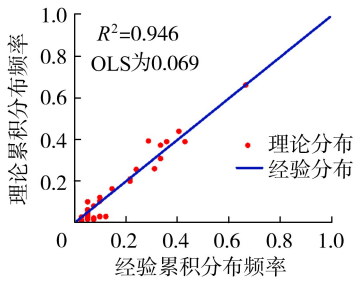


图 6 雨-雪-洪三维 Frank 函数拟合效果

Fig. 6 Fitting effect of three-dimensional Frank function for rain, snow, and flood

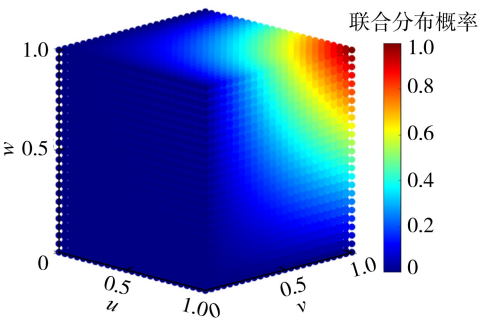


图 7 三维空间中雨-雪-洪联合分布切片

Fig. 7 Joint distribution slicing of rain, snow, and flood in three-dimensional space

以 25%和 75%的出现频率作为降雨、融雪水量以及流量分级标准的界限,将降雨、融雪水量和流量划分为枯、平、丰 3 个等级。参考 Wang 等^[34]研究中的丰枯遭遇公式,计算雨、雪、洪事件中二维和三维丰枯遭遇概率,结果见表 2、表 3。由表 2、表 3 可见,在二维联合分布中,雨-洪的丰枯同步遭遇风险最大,为 56.34%,其中同平遭遇概率最高,雨-洪同丰和同枯的遭遇概率相同;雨-雪的丰枯同步遭遇和雪-洪丰枯同步遭遇相近。丰枯异步遭遇风险中,雨-雪以及雪-洪的丰枯异步遭遇概率均较大,雨-洪

表 2 雨、雪、洪事件二维丰枯遭遇概率

组合	遭遇概率/%								
	同丰	同平	同枯	丰-平	丰-枯	平-丰	平-枯	枯-丰	枯-平
雨-雪	2.86	26.41	2.86	11.79	10.35	11.79	11.79	10.35	11.79
雨-洪	13.51	29.32	13.51	10.34	1.15	10.34	10.34	1.15	10.34
雪-洪	2.39	26.95	2.39	11.52	11.09	11.52	11.52	11.09	11.52

表 3 雨、雪、洪事件三维丰枯遭遇概率

指标	遭遇概率/%								
	雨丰-洪丰	雨丰-洪平	雨丰-洪枯	雨平-洪丰	雨平-洪平	雨平-洪枯	雨枯-洪丰	雨枯-洪平	雨枯-洪枯
雪丰	2.55	0.01	0.55	0.03	9.55	1.22	0.01	1.22	9.32
雪平	1.21	7.18	2.40	6.99	11.53	6.24	2.67	6.24	2.88
雪枯	9.75	2.40	0.04	2.67	6.24	2.88	0.02	2.88	1.31

事件中的雨丰洪枯或雨枯洪丰遭遇概率很小,这表明降雨是影响流量大小的主要因素。在三维联合分布中,雨-雪-洪丰枯同步遭遇风险为 15.39%,其中同平遭遇风险最大为 11.53%,同丰和同枯遭遇显著小于同平遭遇,同丰为 2.55%,同枯为 1.31%。三者的丰枯异步遭遇风险中,雨丰雪枯洪丰、雨平雪丰洪平、雨枯雪丰洪枯以及雨丰雪平洪平的组合遭遇风险较大,分别为 9.75%、9.55%、9.32%和 7.18%,而雨丰雪丰洪平、雨枯雪丰洪丰、雨枯雪枯洪丰以及雨丰雪丰洪枯的组合遭遇风险较小,分别为 0.01%、0.01%、0.02%和 0.04%。该结果表明在降雨和融雪水量都较大的情况下,流域来水基本不会偏枯,且在降雨很少的情况下,无论融雪水量有多少,来水也基本不会偏丰。从石鼓流域风险评估角度出发,以融雪径流为主导而引发洪涝灾害的可能性较小,降雨仍是汛期主要的需关注要素。然而在极端情况下,流域暴雨事件往往会加速积雪融化同时伴有洪水,形成雨、雪、洪三碰头的情景,对此进行风险评估和预报预警尤为重要。

4 结 语

本文运用 iRainSnowHydro 模型对金沙江上游石鼓流域进行降雨-融雪径流模拟和水源解析,构建了雨、雪、洪多维 Copula 联合遭遇分布模型,开展了洪水风险评估。iRainSnowHydro 模型能够较好地模拟石鼓流域的降雨产流和融雪径流过程;石鼓流域水源组成存在季节性差异,春季融雪径流占比在四季中最高且相对稳定。雨、雪、洪多维联合遭遇分布模型能有效地识别汛期洪水主要影响要素,并定量求解不同丰枯遭遇概率。在二维联合遭遇中,雨-洪的二维丰枯同步遭遇风险最大,为 56.34%。在三维联合遭遇中,雨、雪、洪丰枯同步遭遇风险为 15.39%,出现雨、雪、洪三碰头情景的概率为

2.55%,值得关注和采取风险应对方案。

参考文献：

[1] HARIK G,ALAMEDDINE I,NAJM M A,et al. Modified SWAT to forecast water availability in Mediterranean mountainous watersheds with snowmelt dominated runoff [J]. Water Resources Management,2023,37(5): 1985-2000.

[2] SHAO Xingmin, ZHANG Yongqiang, MA Ning, et al. Flood increase and drought mitigation under a warming climate in the southern Tibetan Plateau [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2023, 128 (2): e2022JD037835.

[3] 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.

[4] ZANONI M G, STELLA E, BELLIN A. Long-term hydrological behavior of an Alpine glacier[J]. Journal of Hydrology,2023,626:130316.

[5] SONG Jiecheng, TONG Guanchao, CHAO Jiayou, et al. Data driven pathway analysis and forecast of global warming and sea level rise [J]. Scientific Reports, 2023, 13(1) :5536.

[6] LEI Yanbin, YAO Tandong, SHENG Yongwei, et al. Unprecedented lake expansion in 2017-2018 on the Tibetan Plateau:processes and environmental impacts[J]. Journal of Hydrology,2023,619:129333.

[7] 崔曼仪,周刚,张大弘,等. 1900—2020 年全球融雪洪水灾害及其影响[J]. 冰川冻土,2022,44(6) :1898-1911. (CUI Manyi,ZHOU Gang,ZHANG Dahong,et al. Global snowmelt flood disasters and their impact from 1900 to 2020[J]. Journal of Glaciology and Geocryology,2022,44 (6):1898-1911. (in Chinese))

[8] 朱光熙,效存德,陈波,等. 气候变化背景下黑河上游春季融雪洪水预估研究[J]. 气候变化研究进展,2020,16 (6):667-678. (ZHU Guangxi,XIAO Cunde,CHEN Bo,et al. Spring snowmelt flood estimate in the upper Heihe River under climate change [J]. Climate Change Research,2020,16(6) :667-678. (in Chinese))

[9] DRENKHAN F, BUYTAERT W, MACKAY J D, et al. Looking beyond glaciers to understand mountain water security[J]. Nature Sustainability,2023,6(2) :130-138.

[10] 何朝飞,王晓云,陈伏龙,等. 玛纳斯河不同峰量组合下的融雪洪水风险分析[J]. 水利水电科技进展,2023,43 (1): 15-21. (HE Chaofei, WANG Xiaoyun, CHEN Fulong, et al. Risk analysis of snowmelt flood under different combination of flood peaks and flood volumes in Manas River[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2023,43(1) :15-21. (in Chinese))

[11] 瞿思敏,包为民,MCDONNELL J J,等. 同位素示踪剂在流域水文模拟中的应用 [J]. 水科学进展, 2008, 19 (4):587-596. (QU Simin,BAO Weimin,DONNELL J J, et al. Isotope tracer in watershed hydrological modeling [J]. Advances in Water Science,2008,19(4) :587-596. (in Chinese))

[12] 丁永建,张世强,吴锦奎,等. 中国冰冻圈水文过程变化研究新进展 [J]. 水科学进展, 2020, 31 (5): 690-702. (DING Yongjian, ZHANG Shiqiang, WU Jinkui, et al. Recent progress on studies on cryospheric hydrological processes changes in China [J]. Advances in Water Science,2020,31(5) :690-702. (in Chinese))

[13] 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 Qinuo,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))

[14] 李致家,张心愿,白云鹏,等. 海河“23·7”流域性特大洪水复盘模拟 [J]. 河海大学学报(自然科学版), 2024, 52 (5): 13-19. (LI Zhijia, ZHANG Xinyuan, BAI Yunpeng, et al. Retrospective simulation on the Haihe “23·7” basin-wide extreme flood [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2024, 52 (5): 13-19. (in Chinese))

[15] 吴勇拓,李致家,戚振亚,等. 基于水文模型的缺资料流域设计洪水计算 [J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51 (6): 1-8. (WU Yongtuo, LI Zhijia, QI Zhenya, et al. Design flood calculation of watershed with lack of data based on hydrological model [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51 (6): 1-8. (in Chinese))

[16] FERNANDES R A, ZHOU F, SONG H. Evaluation of multiple datasets for producing snow-cover indicators for Canada [M]. Ottawa: Natural Resources Canada, Geomatics Canada,2017.

[17] MENG Fanchong, SU Fengge, LI Ying, et al. Changes in terrestrial water storage during 2003-2014 and possible causes in Tibetan Plateau [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres,2019,124(6) :2909-2931.

[18] 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))

[19] 徐华亭,吴志勇,陈瑞方,等. 基于再分析降水资料的青藏高原典型流域径流模拟分析 [J]. 水资源保护, 2024, 40(4) :92-98. (XU Huating, WU Zhiyong, Chen Ruifang,

- et al. Runoff simulation analysis of typical watershed in Tibetan Plateau based on reanalysis precipitation data [J]. Water Resources Protection, 2024, 40(4): 92-98. (in Chinese))
- [20] 张居嘉, 杨明祥, 王贺佳, 等. 澜沧江上游积雪演变规律及融雪径流模拟[J]. 长江科学院院报, 2025, 42(3): 42-49. (ZHANG Jujia, YANG Mingxiang, WANG Hejia, et al. Evolution trend of snow cover and simulation of snowmelt runoff in upper reaches of Lancang River[J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2025, 42(3): 42-49. (in Chinese))
- [21] 陈仁升, 沈永平, 毛炜峰, 等. 西北干旱区融雪洪水灾害预报预警技术: 进展与展望[J]. 地球科学进展, 2021, 36(3): 233-244. (CHEN Rensheng, SHENG Yongping, MAO Weiyi, et al. Progress and issues on key technologies in forecasting of snowmelt flood disaster in arid areas, Northwest China[J]. Advances in Earth Science, 2021, 36(3): 233-244. (in Chinese))
- [22] 阿不力米提江·阿布力克木, 陈春艳, 玉素甫·阿不都拉, 等. 2001—2012 年新疆融雪型洪水时空分布特征[J]. 冰川冻土, 2015, 37(1): 226-32. (ABLIMITJAN Ablikim, CHEN Chunyan, YUSUP Abdula, et al. The temporal and spatial distribution features of snowmelt flood events in Xinjiang from 2001 to 2012 [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2015, 37(1): 226-232. (in Chinese))
- [23] 吴南, 张珂, 管晓祥, 等. 1979—2018 年雅砻江中上游积雪时空变化及影响因素分析[J]. 水资源保护, 2022, 38(5): 151-158. (WU Nan, ZHANG Ke, GUAN Xiaoxiang, et al. Spatiotemporal variations of snow cover and its influencing factors in upper-middle reaches of the Yalong River from 1979 to 2018 [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(5): 151-158. (in Chinese))
- [24] 王磊之, 崔婷婷, 李笑天, 等. 降水变化条件下沿海地区暴雨-潮位遭遇联合风险[J]. 水资源保护, 2022, 38(4): 110-116. (WANG Leizhi, CUI Tingting, LI Xiaotian, et al. Joint risks of rainstorm and tidal level under varying precipitation conditions in coastal areas [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(4): 110-116. (in Chinese))
- [25] DAI L, CHE T, DING Y, 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): 1933-48.
- [26] 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))
- [27] 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.
- [28] 张琦, 梁丙臣, 邵珠晓. 基于 Copula 函数的黄海波高周期联合统计分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(4): 108-114. (ZHANG Qi, LIANG Bingchen, SHAO Zhuxiao. Joint statistical analysis of wave height and wave period of Yellow Sea based on Copula function [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51(4): 108-114. (in Chinese))
- [29] 江善虎, 任明明, 章二子, 等. 基于非平稳 GEV 模型的黄河源区枯季径流演变特征分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(2): 1-7. (JIANG Shanhu, REN Mingming, ZHANG Erzi, et al. Study on evolution characteristics of dry season runoff using a non-stationary GEV model in Source Region of the Yellow River [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51(2): 1-7. (in Chinese))
- [30] 严晓东, 马翔, 郑荣跃, 等. 三参数威布尔分布参数估计方法比较[J]. 宁波大学学报(理工版), 2005(3): 301-305. (YAN Xiaodong, MA Xiang, ZHENG Rongyue, et al. Comparison of the parameters estimation methods for 3-parameter Weibull Distribution [J]. Journal of Ningbo University (Natural Science & Engineering Edition), 2005(3): 301-305. (in Chinese))
- [31] 赵瑞星, 翟宇梅. 极端降水广义帕累托分布参数的 Pickands 自助矩估计研究[J]. 水力发电学报, 2015, 34(10): 42-50. (ZHAO Ruixing, ZHAI Yumei. Study on pickands bootstrap moment estimation of generalized Pareto distribution parameters of extreme precipitations [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2015, 34(10): 42-50. (in Chinese))
- [32] 张静怡, 徐小明. 极值分布和 P-III 型分布线性矩法在区域洪水频率分析中的检验[J]. 水文, 2002(6): 36-38. (ZHANG Jingyi, XU Xiaoming. Test on L-moment estimation method for GEV and P-III distribution in regional flood frequency analysis [J]. Journal of China Hydrology, 2002(6): 36-38. (in Chinese))
- [33] 姚成, 纪益秋, 李致家, 等. 栅格型新安江模型的参数估计及应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2012, 40(1): 42-47. (YAO Cheng, JI Yiqiu, LI Zhijia, et al. Parameter estimation and application of grid-based Xin'anjiang model [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2012, 40(1): 42-47. (in Chinese))
- [34] WANG Yuhao, XIAO Honglin, WANG Dong, et al. Study on multiscale-multivariate prediction and risk assessment of urban flood [J]. Environmental Modelling & Software, 2024, 173: 105958.

(收稿日期: 2024-09-04 编辑: 王芳)