

林芝市融雪水文环境径流汇流模拟研究

次仁旺姆, 陈宫燕*, 巴果卓玛, 强巴欧珠, 阿旺卓玛

西藏林芝市气象局, 西藏 林芝 860000

DOI:10.61369/EAE.2026040011

摘 要 : 近年来林芝市流域由气候变暖引发的洪涝灾害风险加剧。针对林芝市冰川融水对径流过程的影响,在径流模拟过程中,集成了度日模型,将冰川融水作为模型的重要水量收入来源,构建了适宜于高海拔和高山地区的融雪径流汇流模型。在波密与奴下实验区通过实际水位数据率定模型参数,开展模型模拟对比实验。实验发现,在高海拔和高山地区,未考虑冰川融雪情况下,同一实验区简单径流汇流模型的拟合系数为0.85、0.92,而增加冰川融雪后,其拟合系数为0.96、0.98,同比增长13%、7%左右。表明本文的融雪径流汇流模型可应用于高海拔和高山地区的径流汇流模拟。这一成果对于林芝市流域的水文管理和复杂水文环境下的径流汇流模拟研究具有重要的理论和实践价值。

关 键 词 : 林芝市; 复杂水文; 径流模拟; 冰川融雪

Simulation Study on Runoff Confluence in Snowmelt Hydrological Environment in Linzhi

Ciren Wangmu, Chen Gongyan*, Baguo Zhuoma, Qiangba Ouzhu, Awang Zhuoma

Nyingchi Municipal Meteorological Bureau, Xizang, Linzhi, Xizang 860000

Abstract : The risk of flooding in the Linzhi City watershed, triggered by climate warming, has increased in recent years. In view of the influence of glacier meltwater on the runoff process in Linzhi City, during the runoff simulation process, the degree-day model was integrated, and the glacier meltwater was taken as an important source of water revenue in the model, so that the snowmelt runoff and confluence model was constructed suitable for high-altitude and alpine areas. In the experimental areas of Bomi and Nuxia, the model parameters were determined by the actual water level data, and comparative experiments were carried out. It was found that the fitting coefficients of the simple runoff and catchment model in the same experimental area were 0.85 and 0.92 at high altitude and high mountain areas without considering the glacier snowmelt, while the fitting coefficients of the model were 0.96 and 0.98 after adding the glacier snowmelt, which were increased by about 13% and 7% year-on-year. It shows that the snowmelt runoff catchment model in this paper can be applied to runoff catchment simulation in high altitude and alpine areas. This result has important theoretical and practical value for the hydrological management of Linzhi City watershed and the simulation of runoff and catchment under complex hydrological environment.

Keywords : Linzhi city; complex hydrology; runoff simulation; glacial snowmelt

引言

随着气候变化,西藏林芝冰川发生大面积消融,导致汛期雅鲁藏布江下游水位暴涨。林芝的复杂水文环境,受高山部分水以固态形式存放,融化为液态时受温度等气候要素影响^[1]。近几年,全国冰川积雪呈现消融趋势,直接影响当地水文,体现在降水、蒸发、融雪等方面^[2-3]。气候变化增加了冰川积雪区的水文预测研究的复杂性^[4]。目前对于高原冰川融雪水文环境下径流汇流过程的研究仍存在一定的不充分^[5],特别是缺乏完整冰川积雪数据情况下进行的有效径流汇流模拟研究。高原地区关于冰川积雪的径流汇流模型研究有 Singh Vishal等使用 SWAT 模型研究喜马拉雅陡峭山脉流域尺度上积雪和融雪^[6]。SWAT 模型是一种冰雪消融模拟方法,这种方法计算复杂,需要大量的气象和冰川数据,对于地形复杂、数据稀缺的林芝来说,推广应用存在一定难度。度日模型(Degree-Day Model)是一种简化的冰川消融模拟方法,度日模型在冰雪消融估算中的应用更为广泛。因此,采用度日模型对冰川融雪进行估算,将度日模型纳入径流汇流模型中,使其适应林芝的冰川融雪水文环境,创新性地搭建一个适用于高原融雪径流汇流的模型。

资助项目: 西藏自治区科技厅自然科学基金项目(XZ202101ZR0042G)。

作者简介: 次仁旺姆,女,藏族,大学本科,现有职称: 工程师,研究方向: 应用气象,主要从事气象服务与应用气象研究。E-mail: 313261200@qq.com

通讯作者: 陈宫燕,正高级工程师,主要从事预报技术与方法研究。E-mail: chengongyan_35@163.com

一、研究区概况及实验区建立

(一) 研究区概况

林芝地处西藏东南部,平均海拔3100m,山高谷深,具有低温的气候条件,使降雨以积雪的形式储存,发育为现代冰川。林芝的冰川和常年积雪面积6728.2km²,占土地总面积的5.78%。海洋性冰川主要发育于受海洋性气候影响的地区,特点是积累和消融过程较为频繁,气温相对较高,因此冰川的运动和变化活动性较强^[7-8]。波密县易贡八玉沟的卡钦冰川是全国最大的海洋性冰川^[9-10]。

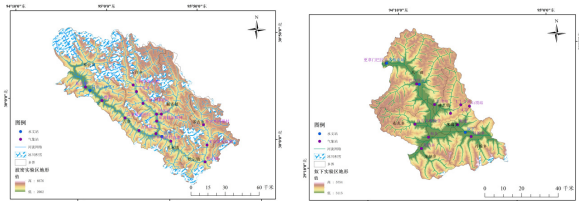


图1-1 林芝水文环境研究区域图 (a.波密 b.奴下)

(二) 研究数据概况

径流汇流模型的设计涉及多种数据,其中一些数据对模拟效果和适应性的影响至关重要。

1. 地形数据

本文收集到的林芝市 DEM数据的分辨率为30米,能够捕捉到林芝区域内的山脉、河流、谷地及地貌特征。

2. 气象数据

气象数据来源于林芝市及周边气象站,包括自动气象站和人工观测站的记录,以2019年、2020年的数据为主。

3. 水位数据

研究的径流汇流模型能够模拟出流域内的径流水位,通过与实测水位数据进行比较,以评估模型的性能和准确性。

4. 冰川积雪数据

采用了一种基于气温的融雪径流汇流模型,该融雪径流汇流模型能够估算冰川融水对水位的影响。

(三) 实验区建立

根据林芝的历史积雪数据,在冰川积雪覆盖度较高的波密和奴下作为融雪水文环境实验区。

表1-1 融雪水文环境实验区

简单水文环境实验区	水系	地形	降雨	气温	附近冰川	附近闸坝	数据情况
波密实验区	帕隆藏布江	河谷地貌	年降雨量977毫米	年均气温8.5℃	附近冰川覆盖度相对高	上游无运行的水电站	汛期部分水文数据,少量冰川积雪数据
奴下实验区	雅鲁藏布江	大峡谷	年降雨量650毫米	年平均气温8.2℃		上游附近无运行的水电站	

二、径流汇流模拟研究

(一) 简单水文环境径流汇流模拟研究

1. 简单水文环境径流汇流模型

简单水文环境径流汇流模型要充分考虑到地形、降雨、气温、水位因素,具有可以反映出上述因素下对径流产生降雨、蒸发、下渗、扩散等影响的能力。将林芝的流域纳入径流汇流计算,以 Navier-Stokes 方程为指导。

2. 水流运动的 N-S 方程

N-S 方程考虑了流体的质量守恒、动量守恒和能量守恒。公式2-1是 N-S 方程的一部分,用于描述流体的运动行为。由于水流运动是同性和不可压的流体运动,可以视为是无粘性的流体, N-S 公式表达为方程组:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -(u \cdot \nabla)u - \frac{1}{\rho} \nabla p + F \quad (2-1)$$

$$\nabla \cdot u = 0 \quad (2-2)$$

式中, u 为速度场, ρ 为流体密度, p 为压强, F 是作用于流体上的质量力(外力)。 $\nabla \cdot u = 0$ 表示流体是不可压缩的,即质量在流体中是守恒的。

3. 模型模拟结果评价

本研究统计模型模拟的水位结果与真实水位数据进行线性拟合,评价两个数据的相关性和线性拟合系数,作为参数率定、适

应性分析的依据。建立一个自变量与因变量间的线性关系模型。

$$y = \beta_0 + \beta_1 x \quad (2-3)$$

β_0 是截距, β_1 是斜率。通过计算皮尔逊相关系数(Pearson's r)来衡量两个连续变量间线性相关程度的统计量,其范围在-1到1,1表示完全正相关,-1表示完全负相关,0表示没有线性相关,越接近1表明模型模拟的效果越好。

$$r = \frac{\sum (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum (X_i - \bar{X})^2 \sum (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (2-4)$$

式中, X_i 和 Y_i 分别是两个变量的观测值, $\bar{X}$ 和 $\bar{Y}$ 是它们的平均值。

决定系数(R-Square)来评估模型的拟合优度和可靠性,越接近1表明模型模拟的效果越好。在简单线性回归中,R-Square 值也等于 Pearson's r 的平方。

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (2-5)$$

在简单线性回归中 $\hat{Y}_i$ 可以通过回归方程 $\hat{Y}_i = \beta_0 + \beta_1 X_i$ 计算得到。

(二) 融雪水文环境径流汇流模拟研究

1. 融雪径流汇流模型的构建

在探索径流汇流模型在林芝的应用过程中,首先在简单水文

环境中进行了模型的适应性分析，一定程度上能够反映林芝多变地形、独特气候及降雨蒸发等关键水文特征。而对于林芝特有的冰川融雪现象，现有模型尚缺乏充分的解释能力。为确保径流汇流模型在林芝各流域的适用性，继续深入研究复杂水文环境下的径流汇流模型。

在林芝高山地区，冰川消融对水资源的贡献显著，因此在径流模拟中考虑冰川消融作为水分收入源至关重要，基于度日模型的原理，冰川消融量与超过某一阈值（通常为 0°C ）的累积正气温成正比。度日模型数学表达：

$$M = \begin{cases} MF(T - T_0) & T > T_0 \\ 0 & T \leq T_0 \end{cases} \quad (2-6)$$

其中， M 为日消融量（ mm ）， T 为日平均气温（ $^{\circ}\text{C}$ ）， T_0 为冰川消融温度阈值（ $^{\circ}\text{C}$ ）， MF 为度日因子（ $\text{mm} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ ）。由于林芝市地形起伏大，基于DEM与温度递减率对空间插值后的气温进行了修正。将气温数据插值后代入公式2-6计算得到冰川所在栅格像元的日消融量。栅格单元的降水量加上冰川消融量作为模型的水量输入。

增加冰川消融量后模型的水量平衡公式为：

设 t_n 时刻的中心栅格 c 水位为 W_c^n 。依据水量平衡原理， t_{n+1} 时刻的中心栅格水位 W_c^{n+1} 为：

$$W_c^{n+1} = W_c^n + R_c^n + In_c^n - I_c^n - E_c^n - Out_c^n + M_c^n \quad (2-7)$$

式中， M_c^n 、 R_c^n 分别为中心栅格时间片上的消融量、降水量，由流域气象站小时降水数据插值得到； In_c^n 、 Out_c^n 、 I_c^n 、 E_c^n 分别表示中心栅格时间片上的流入、流出、下渗和蒸发量，依据下渗性质设定下渗率和蒸发率，与 W_c^n 相乘得。

在简单径流汇流模型中加入度日模型，建立的融雪径流汇流模型，能更好模拟和预测冰川积雪消融对流域径流的影响。融雪径流汇流模型中增加了融雪温度这一参数，与径流汇流模型的参数率定过程相同，模型基于当地气温数据以手动率定的方式确定实验区融雪温度参数。

三、融雪水文环境适应性分析

（一）波密实验区适应性分析

融雪径流汇流模型构建后，在波密实验区进行适应性分析，观察融雪水文参数在融雪水文环境中的适用性。

表3-1 波密实验区径流模拟参数

参数	下渗系数 (mm/h)	蒸发系数 (mm/h)	加速系数 (mm/h ²)	扩散系数 (mm/h)	最大水速 (m/s)	融雪温度 ($^{\circ}\text{C}$)
径流汇流模型	0.10	0.02	0.24	0.12	2.00	无
融雪径流汇流模型	0.10	0.02	0.24	0.12	2.00	8.50

在集成融雪水文参数之前，2020年6月16日0时-20日23时段不含融雪水文参数在波密实验区径流汇流模拟效果和融雪径流汇流模型集成融雪水文参数后在波密实验区20日6时段模拟水位

结果对比，b与a相比，b模拟水位更贴近真实水位，能够捕捉到水位的峰值和低谷，证明融雪径流汇流模型由于考虑到了冰川融水的输入，模拟的效果要更真实。

从结合拟合结果来看，融雪径流汇流模型的Pearson's r和R-Square更高，表明融雪径流汇流模型的预测水位能力更强，在解释水位变异性方面更为有效，模型拟合得更好。

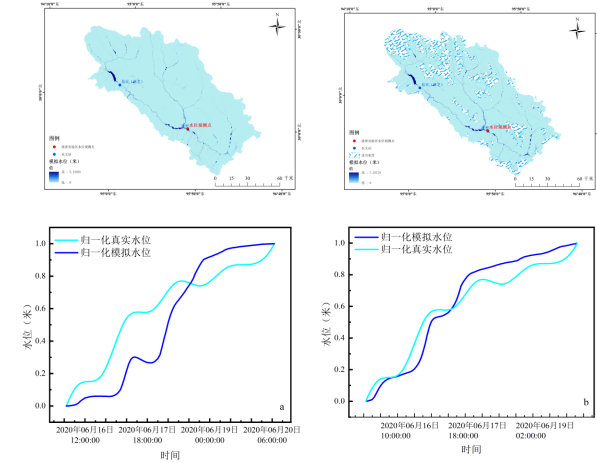


图3-1 20200616案例波密实验区水位模拟结果（a.径流汇流模型 b.融雪径流汇流模型）

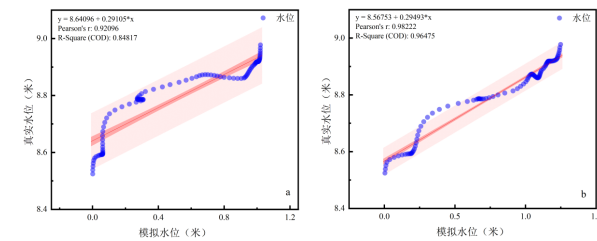


图3-2 20200616案例波密实验区线性拟合结果（a.径流汇流模型 b.融雪径流汇流模型）

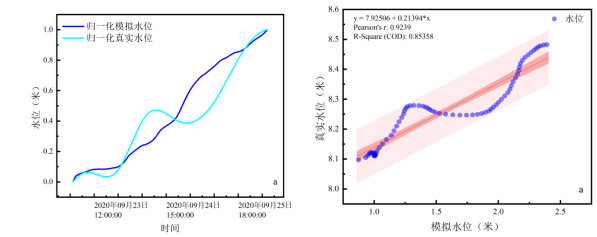


图3-3 20200923案例波密实验区（a.水位模拟结果 b.线性拟合结果）

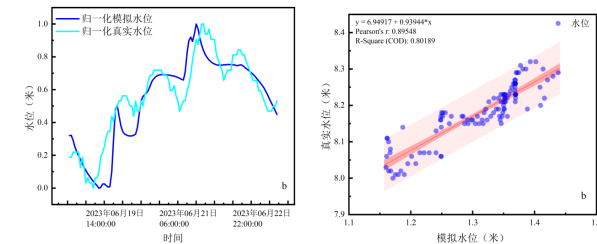


图3-4 20230619案例波密实验区（a.水位模拟结果 b.线性拟合结果）

通过两个案例验证融雪径流汇流模型对冰川融雪的模拟是否具有稳定性和适应性，从模拟结果来看，这两个案例模拟水位线紧密跟随真实水位线，表明这两段时间内融雪径流汇流模型的预测效果较好，在波密实验区适应性分析中模拟水位方面表现优良，具有较高的相关性和解释力。

（二）奴下实验区适应性验证

进一步在奴下实验区融雪水文环境进行融雪径流汇流模型的适应性验证，确保该径流汇流模型在林芝市融雪水文环境的全面适用性。

表3-2 奴下实验区径流模拟参数

参数	下渗系数 (mm/h)	蒸发系数 (mm/h)	加速系数 (mm/h ²)	扩散系数 (mm/h)	最大水速 (m/s)	融雪温度 (°C)
数值	0.10	0.02	0.48	0.12	5.00	8.00
固定	否	是	是	是	是	是

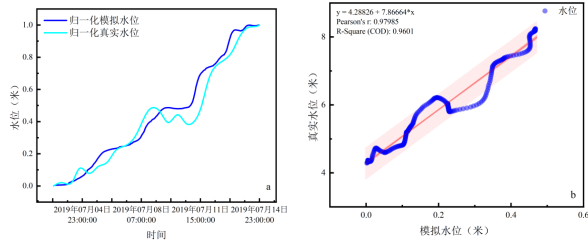


图3-5 20190703案例奴下实验区 (a.模拟水位结果 b.线性拟合结果)

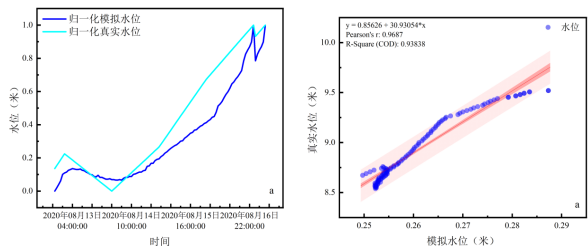


图3-6 20200813案例奴下实验区 (a.模拟水位结果 b.线性拟合结果)

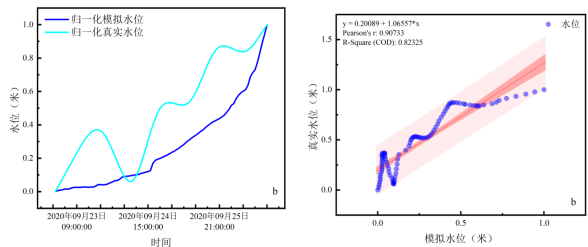


图3-7 20200923案例奴下实验区 (a.模拟水位结果 b.线性拟合结果)

从三个案例模拟结果看，模拟水位与真实水位的变化趋势是

一致的。Pearson's r分别为0.98、0.97、0.91，R-Square 分别为0.96、0.94、0.82，表明模型有很高的相关性和解释力。

结合简单水文与融雪水文环境实验区的对比看，纳入融雪后的径流汇流模型在融雪水文环境模拟效果要优于简单径流汇流模型在简单水文环境的模拟效果，印证了本文分析的即使在简单水文环境中也无法避免径流受到融雪影响的观点，只是融雪水文环境实验区相对于简单水文环境实验区受到的影响更剧烈，当前阶段径流汇流模型中纳入了融雪的计算，更剧烈的冰川融雪影响也能被模型所解释。本文原模型中由于没纳入融雪计算导致的误差在这一阶段得到了减小，径流汇流模拟的效果得到了提升。

四、结论与讨论

（一）结论

（1）基于简单径流汇流模型，创新性地集成度日模型，构建可以模拟林芝流域冰川融雪水源补给融雪的径流汇流模型，该模型在融雪水文环境实验区的整体模拟效果要优于简单径流汇流模型，验证了融雪径流汇流模型在林芝流域冰川融雪环境下的稳定性与适应性。

（2）波密实验区经过参数率定，三个不同时段案例模拟水位与真实水位的R-Square和Pearson's r平均值为0.87、0.93，均高于径流汇流模型的模拟结果，证明了融雪径流汇流模型在原模型的基础上增加了融雪水源供给的有效模拟。

（3）奴下实验区经过参数率定，三个不同时段案例模拟水位与真实水位的R-Square和Pearson's r平均值为0.91、0.95，验证了融雪径流汇流模型在林芝流域冰川融雪环境下的稳定性与适应性。

（二）讨论

在奴下实验区7-8月2个案例中，融雪径流汇流模型展现了良好的模拟效果，9月的案例模拟效果相对较差，这与波密实验区的情况类似，可能是没有将冰川融水和融雪径流作为两个要素精细化研究，影响了模型的预测表现，为了提高模型在类似情况下的准确性，径流汇流模型在未来的研发中应考虑更全面地整合多样化的水文要素。

参考文献

- [1]刘秀华,吕军奇.气候变化下寒区水文研究进展[C]//2022中国水利学术大会论文集(第四分册):黄河水利出版社,2022:454-458.
- [2]张建梅.基于CMIP6全球气候模式的澜沧江流域气候变化初步评估[D].南京信息工程大学,2020
- [3]陈活泼,孙建奇,林文青,等.CMIP6和CMIP5模式对极端气候的模拟比较(英文)[J].Science Bulletin,2020,65(17):1415-1418.
- [4]王磊,刘虎,雍斌,等.陆地冰冻圈水文过程的研究现状及展望[J].北京师范大学学报(自然科学版),2023,59(3):489-496.
- [5]王鹏翔.高原寒区分布式水文模型研究及应用[D].武汉大学,2021
- [6]Vishal Singh,Francisco Muñoz-Arriola.Improvements in Sub-Catchment Fractional Snowpack and Snowmelt Parameterizations and Hydrologic Modeling for Climate Change Assessments in the Western Himalayas[J].Mdp Ag,2021,8(4):179.
- [7]景才瑞.论海洋性冰川地貌特色及其地学意义[J].华中师范大学学报(自然科学版),2002,(2):233-236.
- [8]李宗省,何元庆,贾文雄,等.中国典型季风海洋性冰川区“冰川-径流”系统的全球变化敏感性研究[J].地理科学,2008,(2):229-234.
- [9]李宗省,何元庆,贾文雄,等.近年来中国典型季风海洋性冰川区气候、冰川、径流的变化[J].兰州大学学报(自然科学版),2008,(S1):1-5.
- [10]苏珍,梁大兰,洪明.贡嘎山海洋性冰川发育条件及分布特征[J].冰川冻土,1993,(4):551-558.