

DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2024.04.002

考虑融雪及土壤冻融的新安江模型及其应用

——以雅砻江上游径流模拟为例

董宁澎¹, 王浩¹, 杨明祥¹, 张居嘉¹, 徐世琴²

(1. 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; 2. Hydrology, Agriculture and Land Observation Laboratory, Division of Biological and Environmental Science and Engineering, King Abdullah University of Science and Technology, Thuwal 23955-6900, Kingdom of Saudi Arabia)

摘要: 寒区为中国大江大河的主要产流区, 其径流预报精度直接影响下游水利工程调度和水资源科学管理。针对传统概念性水文模型较少考虑积雪融雪及土壤冻融过程对径流的叠加影响这一问题, 以新安江模型为基础, 以降水量和气温为驱动数据, 提出了基于“等效土壤温度”和“土壤冻融特征曲线”的概念性土壤冻融模块来刻画积雪融雪及土壤冻融共同影响下的流域产流过程, 构建了考虑融雪产流和土壤冻融的新安江模型。以雅砻江甘孜水文站以上流域为典型研究区, 开展了流域2017—2022年冰雪消融期逐小时的径流模拟分析。结果表明, 相比于HBV模型, 考虑融雪产流和土壤冻融的模型可以显著提升流域冰雪消融期的水文模拟精度, 各年份消融期径流的纳什效率系数中位数由0.69提升至0.83, 相关系数中位数由0.88上升至0.92。本研究所提出的考虑融雪及土壤冻融的新安江模型可以为寒区的水文业务预报提供科学支撑。

关键词: 寒区; 融雪产流; 土壤冻融; 新安江模型; 水文预报

中图分类号: TV124 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-6791(2024)04-0530-13

积雪及冻土是中国青藏高原、西北山区及东北等寒区水文循环的重要组成部分^[1-3]。与其他地区单一的降雨产流机制不同, 寒区的积雪融雪和土壤冻融过程与降雨产流过程相互影响、共同作用, 形成了独特的三水转化关系, 对开展精准的水文预报带来了更大的挑战^[4]。一方面, 土壤冻融及相应的水热变化可以直接影响土壤水再分配和土壤水储量^[5-6], 当进入秋冬季时, 气温迅速降低, 土壤水部分结冰, 形成冰冻隔水层, 导致土壤的储水能力及导水系数减小^[7], 地表下渗水量及土壤水蒸发量减少, 产流系数相应增加; 进入春夏季之后, 气温逐渐上升, 冻土逐渐消退, 地表下渗水量及土壤水蒸发量增加, 壤中流及地下径流汇流速度加快^[8-11], 这一过程在四季变化中循环重复。另一方面, 积雪融雪过程对水文过程的影响主要体现在秋冬季降雨产流减少、地表积雪量增加, 春夏季地表积雪融化、融雪产流增大等方面; 此外, 当地表存在一定厚度的积雪时, 下层积雪压实, 密度增大^[12-13], 积雪颗粒一定程度上阻塞了水分的下渗与蒸发通道^[14-15], 同样可导致地表下渗水量及土壤水蒸发量减少、产流系数增加, 其对产流过程的影响与土壤冻结类似。上述寒区独特的水文过程对水文模型的研发提出了更高的要求。

为了准确模拟寒区的土壤冻融和积雪融雪过程, 学者们相继提出了适用于寒区的水文模型, 主要包括概念模型、机理性模型和数据驱动型模型三大类。其中, 概念性模型多基于经验方程对寒区水文过程进行概化, 如Lindström等^[16]通过构建土壤冻结模型改进了集总式概念性水文模型HBV; 关志成等^[17]将新安江模型中张力水的冻结程度写作关于累积负气温的函数, 建立了具有物理基础的寒区新安江模型。机理性水文模型多以水热耦合方程为基础, 通过考虑积雪层及土壤层温度、湿度的垂向运移机制及分布规律, 实现积雪及

收稿日期: 2023-12-04; 网络出版日期: 2024-07-30

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/32.1309.P.20240729.1847.010>

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2023YFC3081000); 中国电力建设股份有限公司科技项目(DJ-HXGG-2021-04)

作者简介: 董宁澎(1993—), 男, 江苏南京人, 高级工程师, 博士, 主要从事气象水文模拟及预报方面的研究。

E-mail: dongnp@iwhr.com

土壤冻融循环的精细化描述, 如陈仁升等^[18]、苏辉东等^[19]、刘水清等^[20]利用分布式水热耦合模型在松花江、黄河、黑河、长江、雅鲁藏布江流域等典型寒区流域开展了径流模拟及演变成因分析; Qi 等^[21]和 Qi 等^[22]分别通过建立具有物理基础的冻融模块改进了 SWAT 和 WEB-DHM 水文模型; 其他学者也在 VIC、GBHM 等模型中分别耦合了相应机理模块^[23-24]。此外, 近年来基于人工智能算法的数据驱动型寒区水文模型也逐渐发展起来, 如周剑等^[25]利用人工神经网络识别水文单元冻土面积, 改进了半分布式模型 PRMS; Kratzert 等^[26]基于长短期记忆网络实现了包括受融雪影响流域在内的全球数百个流域的径流模拟。然而, 上述模型在开展寒区水文模拟和预报方面仍然存在一定不足。由于积雪和土壤冻融过程的复杂性, 机理性模型和数据驱动型模型往往需要更多更精细的气象水文要素作为输入数据^[27-28], 但寒区多分布在高纬度、高海拔地区, 气候条件恶劣、人烟稀少, 实测数据往往长度不足且质量不高, 导致上述模型在水文模拟和业务预报中的应用受到了较大限制^[29-30]。相对而言, 概念性模型计算简便、运算速度快、所需资料较少, 在开展寒区水文预报方面具有独特优势。然而, 当前的概念性模型较少考虑积雪融雪及土壤冻融过程的共同作用对产汇流机制的影响, 对寒区水文过程的刻画有待进一步完善。

本研究针对这一问题, 以新安江模型为基础, 以降水量和气温为驱动数据, 提出了基于“等效土壤温度”和“土壤冻融特征曲线”的概念性土壤冻融模块来刻画积雪融雪及土壤冻融共同影响下的产流过程, 构建了考虑融雪产流和土壤冻融的新安江模型。在构建模型的基础上, 以雅砻江上游甘孜站以上流域为典型研究区开展流域逐小时径流模拟, 并与原始新安江模型和 HBV 模型的模拟结果进行对比分析。本研究所构建的模型可为寒区水文业务预报提供一定参考。

1 模型方法

1.1 考虑融雪和土壤冻融的新安江模型

新安江模型的基本原理参见文献[31]。本文着重介绍在模型中新构建的融雪产流及土壤冻融模块及其相关参数。

1.1.1 融雪产流模块

步骤 1: 判断降水类型。设置临界气温(T_s)及融雪气温(T_0)作为判断降水形态的依据。记过去 6 h 的平均气温为 T , 当 $T > T_0$ 时, 所有降水为液态降雨; 当 $T_s \leq T \leq T_0$ 时, 降雨量为降水量和气温的线性函数; 当 $T < T_s$ 时, 所有降水为固态降雪:

$$P_r = \begin{cases} 0, & T < T_s \\ P \frac{T_s - T}{T_s - T_0}, & T_s \leq T \leq T_0 \\ P, & T > T_0 \end{cases} \quad (1)$$

$$P_s = P - P_r \quad (2)$$

式中: P 为降水量; P_s 为降雪量; P_r 为降雨量。

步骤 2: 计算高温融雪量。基于度日因子法计算气温升高而导致的逐小时积雪消融量(M_s):

$$M_s = \frac{\alpha}{24}(T - T_0) \quad (3)$$

式中: α 为度日因子。

步骤 3: 计算降雨融雪量。除了气温升高导致积雪融化之外, 降雨也可导致积雪融化, 其逐小时融雪水量(M_r)一般根据经验估计:

$$M_r = \beta P_r (T - T_0) \quad (4)$$

式中: β 为降雨融雪因子, 与流域植被覆盖情况有关。

步骤4: 计算总融雪水量(M)。考虑雪水当量(G)的约束, 逐小时融雪水量为

$$M = \min(M_s + M_r, G) \quad (5)$$

步骤5: 更新流域平均雪水当量。按如下公式更新流域平均雪水当量:

$$G_{t+1} = G_t - M + P_s \quad (6)$$

式中: 下标 t 代表当前小时, $t+1$ 代表下一小时。

步骤6: 计算融雪产流量。假定融雪水与降雨的产流机制相似, 将融雪水量与降雨量叠加得到总液态水量, 并输入考虑土壤冻融的新安江蓄满产流模型计算得到融雪及降雨的总产流量。

1.1.2 土壤冻融模块

对于雅砻江上游等高寒地区, 当气温较低时, 土壤水部分结冰, 形成冰冻层, 导致地表下渗水量及土壤水蒸发量减少, 产流量相应增加^[32]。其中, 土壤温度是上述过程的决定性要素。诸多研究表明, 对于水分变化相对剧烈、对产流过程影响较大的表层土壤, 土壤温度与空气温度显著相关, 其相关关系式随一年内的不同时期而变化^[33-35]。根据杨洪波等^[36]在青藏高原地区的研究, 对于春季消融期, 空气温度与表层土壤温度之间存在线性滞后相关关系, 滞后时间为0~2 d, 据此在模型中建立春季消融期土壤温度关于气温的线性函数 $g(T_a)$ 如下:

$$T_{\text{soil}} = g(T_a) = \mu(T_a - \sigma) \quad (7)$$

式中: T_{soil} 为土壤温度; T_a 为预报起始时刻前48 h的平均气温; μ 及 σ 为参数。

当地表存在一定厚度的积雪时, 下层积雪受到压实, 密度增大^[12-13], 积雪颗粒一定程度上阻塞了水分的下渗与蒸发通道^[14-15], 同样可导致地表下渗量及土壤水蒸发量减少、产流量增加, 其产流效应与土壤冻结类似。综合上述2种机制, 本文提出“等效土壤温度”的概念来描述积雪与冻土共同影响下的产流过程, 其核心思想是假定地表积雪厚度足够大时的产流特性等价于土壤完全冻结时的产流特性, 并将土壤完全冻结时的土壤温度记为冻结温度(T_f), 则等效土壤温度可表示为土壤温度与冻结温度的加权平均值, 其权重为关于雪水当量的函数。据此建立等效土壤温度(T_e)的表达式如下:

$$T_e = f(G)g(T_a) + (1 - f(G))T_f \quad (8)$$

式中: $f(G)$ 为值域 $[0, 1)$ 的函数, 记为积雪产流特性曲线, 代表雪水当量对产流及等效土壤温度的影响。结合物理含义, 在对多种函数形式进行数值试验的基础上, 选择其函数表达式如下:

$$f(G) = \exp(-\gamma G^2) \quad (9)$$

式中: γ 为积雪厚度因子, 为待率定参数。该函数的物理意义是, 当雪水当量趋近于0时, 根据式(8)此时等效土壤温度仅由气温/土壤温度决定; 随着雪水当量的增大, 积雪及冻结温度对等效土壤温度的影响程度增加; 当雪水当量增加至由参数 γ 确定的某一阈值后, 无论气温如何, 等效土壤温度均趋近于冻结温度。需要说明的是, 积雪影响下土壤的实际水热交互作用较为复杂且具有较强的时空异质性, 一方面积雪的保温作用有助于提高土壤温度, 另一方面融雪水入渗抑制了消融期土壤温度稳定提升。由于这些过程多涉及水热耦合计算, 本文所构建的新安江模型未对这些过程加以考虑。

为简化计算并减少参数个数, 按照 $T_i^* = \mu(T_i - \sigma)$ 的形式对式(8)中的 T_e 、 T_f 及 T_a 进行标准化, 则式(8)可简化为

$$T_e^* = \exp(-\gamma G^2)T_a^* + [1 - \exp(-\gamma G^2)]T_f^* \quad (10)$$

研究表明^[37], 土壤冻结程度和土壤温度之间存在近似指数关系。为定量描述表层土壤的冻融程度, 本文在获取等效土壤温度表达式的基础上, 参考 Lunardini^[38]和 Bai等^[39]提出的土壤冻融特征曲线, 将土壤水未被冻结的比例(θ_u)写作关于等效土壤温度的分段函数, 即

$$\theta_u = \begin{cases} 1 - (1 - \theta_r)\exp[\delta(T_e^* - T_f^*)], & T_e^* \geq T_f^* \\ \theta_r, & T_e^* < T_f^* \end{cases} \quad (11)$$

式中: δ 为土壤冻融速率因子; θ_r 为残余水含量, 代表土壤中始终不会结冰的水量比例。 δ 和 θ_r 均为待率定

参数。

基于土壤水未被冻结的比例,提出土壤冻融的计算步骤如下:

(1) 对于自由水,根据总自由水量(含冻结部分)(S_{tot}),计算自由水量的未冻结部分(S):

$$S = S_{\text{tot}} \theta_u \quad (12)$$

土壤水结冰可阻塞水分通道,形成冰冻层,导致蓄水容量减少。假定自由水蓄水容量的冻结比例亦为 θ_u ,根据总自由水蓄水容量(含冻结部分)($S_{M_{\text{tot}}}$),计算自由水蓄水容量的未冻结部分(S_M):

$$S_M = S_{M_{\text{tot}}} \theta_u \quad (13)$$

(2) 对于张力水,首先根据整层张力水量(W_{tot}),计算张力水量整体的未冻结部分(W)和冻结部分(W_f):

$$W = W_{\text{tot}} \theta_u \quad (14)$$

$$W_f = W_{\text{tot}} (1 - \theta_u) \quad (15)$$

式中: W_{tot} 为上层、下层、深层的总张力水量(含冻结部分)之和。

考虑到表层土壤与空气之间的热传导更加迅速,仅当上一层张力水冻结/融化之后下一层张力水才会冻结/融化。基于这一概念,将张力水量的冻结部分自上而下逐层分配至上层、下层和深层张力水量,仅当上一层张力水量全部冻结后,再将 W_f 的剩余部分分配至下一层,据此计算得到各层张力水量的未冻结部分 W_U 、 W_L 、 W_D 和冻结部分 W_{U_f} 、 W_{L_f} 、 W_{D_f} 。

(3) 与自由水类似,假定张力水蓄水容量整体的未冻结比例为 θ_u ,根据整层张力水蓄水容量(含冻结部分)($W_{M_{\text{tot}}}$),计算张力水蓄水容量整体的未冻结部分(W_M)和冻结部分(W_{M_f}):

$$W_M = W_{M_{\text{tot}}} \theta_u \quad (16)$$

$$W_{M_f} = W_{M_{\text{tot}}} (1 - \theta_u) \quad (17)$$

式中: $W_{M_{\text{tot}}}$ 为上层、下层、深层的总张力水蓄水容量(含冻结部分)之和。

进一步地,仿照步骤(2)中各层张力水量的计算步骤,将 W_{M_f} 自上而下分配至各层,可计算得到各层张力水蓄水容量的未冻结部分 W_{UM} 、 W_{LM} 、 W_{DM} 。在计算过程中,需约束各层张力水蓄水容量的冻结和未冻结部分分别不小于步骤(2)所得该层张力水的冻结和未冻结水量。

(4) 仅自由水及张力水蓄水容量的未冻结部分 S_M 、 W_M 、 W_{UM} 、 W_{LM} 、 W_{DM} 及自由水及张力水的未冻结部分 S 、 W 、 W_U 、 W_L 、 W_D 参与新安江模型内部的蒸发及产流计算,并进行更新,冻结部分保持不变。

(5) 将步骤(4)新安江模型蒸发及产流计算更新得到的自由水及张力水的未冻结部分 S 、 W_U 、 W_L 、 W_D 与步骤(1)、(2)计算得到的冻结部分 S_f 、 W_{U_f} 、 W_{L_f} 、 W_{D_f} 相加,得到新的总自由水量 S_{tot} 和各层的总张力水量 $W_{U_{\text{tot}}}$ 、 $W_{L_{\text{tot}}}$ 、 $W_{D_{\text{tot}}}$,并代入下一时间步长进行计算。

1.2 HBV 模型

为了分析考虑融雪和土壤冻融的新安江模型在寒区径流模拟的适用性,本文选取 HBV 模型用于后续开展径流模拟对照试验。HBV 模型是瑞典水文气象研究所于 20 世纪 70 年代开发的半分布式概念性水文模型,可实现流域内的融雪、蒸散发、土壤水分变化、产汇流等水文过程的精细化模拟,特别是对于寒区流域有良好的适用性。该模型结构简单、参数较少、资料需求相对较低且易于扩展,已在全球多个国家的水资源评估、洪水预测和水资源管理等领域得到了广泛应用。HBV 模型主要包括融雪计算模块、土壤水和蒸散发计算模块、产流模块以及汇流模块,其详细原理参见文献[40]。

2 模型应用

2.1 研究区概况

雅砻江发源于青海省玉树州巴颜喀拉山南麓,干流全长 1 571 km,流域面积为 13.6 万 km²,天然落差

为 3 830 m, 地势高差最大可达 5 000 m 以上。其中, 甘孜水文站为流域上游的主要控制性水文站之一, 流域面积为 3.25 万 km², 平均海拔 4 500 m 以上(图 1), 多年平均降水量约 520 mm, 日照强, 冬季漫长, 春季融雪及季节冻土消融对流域产汇流机制和洪枯水过程具有重要影响。每年进入秋冬季后, 甘孜以上流域的气温逐渐转负, 并于 10 月和 11 月开始积雪, 至次年 3 月积雪覆盖达到峰值。多源积雪同化产品表明^[41], 甘孜以上流域年最大雪水当量约 15 mm, 但其年际变化较大, 2021 年最大需水当量仅为 5 mm, 2020 年、2021 年则达到 40 mm 以上。融雪期主要集中在次年的 4 月和 5 月, 至 5 月底积雪基本完全融化。甘孜以上流域的季节冻土分布广泛, 最大冻结深度为 0.5 ~ 2.0 m, 而多年冻土主要零星分布在河流源头及高山地区^[42](图 1)。其中, 季节冻土的年内分布规律与积雪相似^[43], 多于每年 11 月前后开始形成, 至次年 1—2 月冻土深度达到最大; 进入春季后, 季节冻土在 4 月左右开始快速消融, 至 5 月中下旬基本完全消融。在全球气候变化背景下, 近年来流域融雪及季节冻土的时空变异性增加, 进而导致春季径流的不稳定性增大, 对流域梯级水库群科学调度和水能资源开发利用造成了一定挑战。

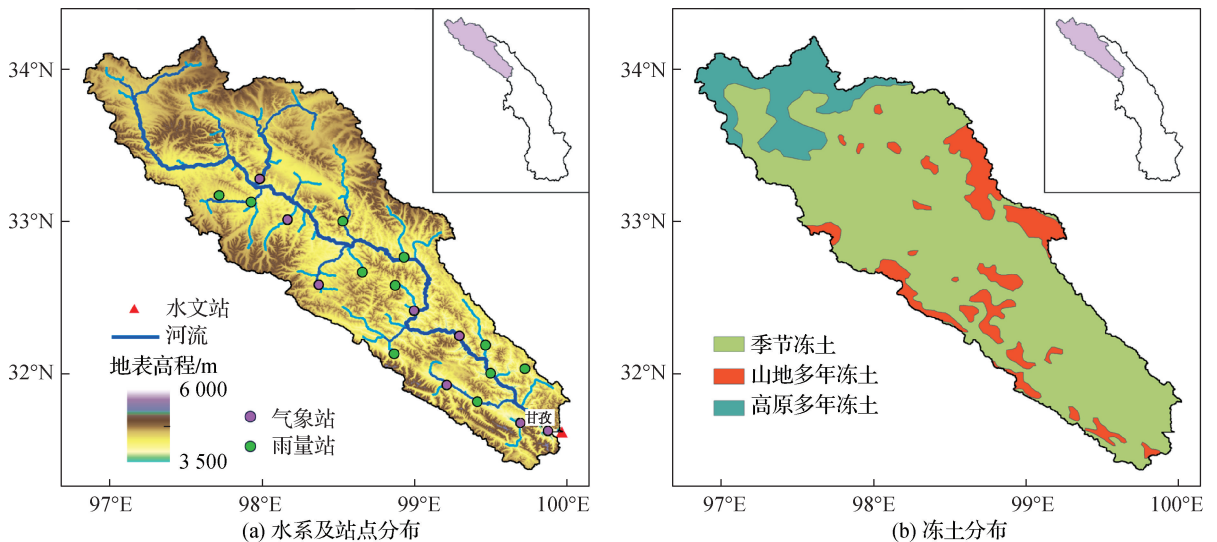


图 1 甘孜以上水系、站点及冻土分布情况

Fig. 1 Rivers, stations and frozen soil distributions of the basin upstream of the Ganzi hydrologic station

2.2 资料情况

(1) 径流。径流数据为雅砻江流域甘孜水文站 2017—2022 年的逐小时实测径流资料。

(2) 降水。降水数据来源于四川省气象局的 11 个雨量站和 8 个气象站, 站点位置见图 1。其中, 大部分站点建于 2016 年前后, 收集了 2017—2022 年甘孜以上流域雨量站和气象站的逐小时降水量数据。

(3) 气温。气温数据来源于四川省气象局的 8 个气象站, 收集了 2017—2022 年甘孜以上流域气象站的逐小时气温数据。

(4) 潜在蒸发。逐月潜在蒸发数据来源于甘孜站的蒸发皿观测数据。

(5) 数字高程(DEM)。数字高程数据主要用于划分高程带, 数据来源于美国地质勘探局(USGS), 空间分辨率为 30 m。

2.3 模型对比试验及参数率定

为定量评估对比本文所构建的模型在研究区的适用性, 开展原始新安江模型、HBV 模型以及考虑融雪和土壤冻融的新安江模型的径流模拟对照试验。

为更好地模拟不同海拔范围内的融雪及土壤冻融过程, 根据 DEM 数据将甘孜以上流域划分为面积相等的 3 个高程带, 其海拔范围分别为 4 400 m 以下、4 400 ~ 4 700 m、4 700 m 以上。在以上 3 个模型中, 均以

甘孜水文站模拟逐日径流量的纳什效率系数 (E_{NS}) 为率定目标分别对 3 个模型的参数进行率定, 率定期为 2018—2022 年, 验证期为 2017 年。选择距当前更近的时段作为率定期所得参数值更加接近当前气候及下垫面条件下的水文特性, 该率定方式近年来常用于水文模拟及预报^[44-45]。

在原始新安江模型中, 选取 12 个传统参数进行率定, 分别为上层、下层及深层张力水总蓄水容量 ($W_{UM,total}$ 、 $W_{LM,total}$ 、 $W_{DM,total}$)、自由水总蓄水容量 ($S_{M,total}$)、蒸发折算系数 (K)、深层蒸散发系数 (C)、地下水出流系数 (K_C)、壤中流出流系数 (K_I)、地下水消退系数 (C_C)、壤中流消退系数 (C_I)、纳什瞬时单位线参数 u_{hk} 及 u_{hm} 。在 HBV 模型中, 选取 12 个参数进行率定, 分别为融雪气温、度日因子、降雪修正因子 (C_s)、再冻结系数 (F_r)、最大土壤持水量 (F_c)、土壤含水量比值 (L_p)、降水贡献率 (β_p)、下渗系数 (I)、上层土壤含水阈值 (U)、地表径流、壤中流及基流退水系数 (K_0 、 K_1 、 K_2)。在考虑融雪和土壤冻融的新安江模型中, 选取 20 个参数进行率定, 除 12 个传统参数外, 进一步考虑了 4 个融雪参数, 分别为临界气温、融雪气温、度日因子、降雨融雪因子, 以及 4 个土壤冻融参数, 分别为标准化冻结温度 (T_f^*)、积雪厚度因子、土壤冻融速率因子以及残余水含量。

为避免人工经验率定带来的不确定性, 在以上 3 个模型的参数率定中, 均采用粒子群算法进行自动率定, 其中种群数取 40 000, 迭代次数为 50 次。

2.4 参数合理性及敏感性分析

对于考虑融雪及土壤冻融的新安江模型, 8 个融雪及土壤冻融参数的取值范围和率定结果如表 1 所示。由于不少研究已围绕新安江模型的传统参数和融雪参数开展了针对性分析^[46-49], 本文主要选取 δ 、 γ 、 T_f^* 和 θ_r 等 4 个土壤冻融参数开展参数取值合理性和敏感性分析。

(1) 标准化冻结温度 $T_f^* = -8.4$ 。该参数为按式(7)标准化之后土壤完全冻结时对应的温度, 为分析其合理性, 需估算其标准化之前的取值。根据杨洪波等^[36]在青藏高原开展的土温监测, 春季消融期气温和土壤温度的散点关系多围绕直线 $Y = X$ 波动, 即 $\mu = 1$ 且 $\sigma = 0$ 。由此可粗略估计率定所得的土壤冻结温度也为 -8.4 °C。以往研究表明, 土壤冻结温度低于水的冰点, 如 McKenzie 等^[50]将其取为 -12 °C。考虑到不同质地土壤的冻结温度有所不同^[51], 本文的参数取值处于合理范围内。

(2) 土壤冻融速率因子 $\delta = 5.2$ 。该参数主要表征土壤冻融曲线的斜率, 以往研究表明^[52], 其取值范围为 $0.2 \sim 10$, 本文的取值处于合理范围内。

(3) 残余水含量 $\theta_r = 0.01$ 。以往研究表明^[53], 不同类型土壤的残余水含量多为 $0 \sim 0.1$, 本文的取值处于合理范围内。

积雪厚度因子代表了积雪厚度对产汇流的影响, 其物理意义主要由本文定义, 以往研究未有相应参数取值范围可供参考, 后续将进一步开展野外试验予以验证。

在参数合理性分析的基础上, 选取 2020 年 4—5 月为典型分析时段, 在各最优参数值的基础上, 分别将除标准化冻结温度外的各参数值减小 50%、增大 50% 的径流模拟结果记为 EXP1 和 EXP2, 将标准化冻结温度降低 5 °C、增加 5 °C 的径流模拟结果分别记为 EXP1 和 EXP2。

表 1 考虑融雪及土壤冻融的新安江模型参数率定范围及结果

Table 1 Parameter calibration range and results of Xin'anjiang model with snow melting & soil freeze-thaw processes

参数名称	参数符号	率定范围	率定最优值	参数名称	参数符号	率定范围	率定最优值
临界气温/°C	T_s	$[-6, 5]$	1.94	标准化冻结温度/°C	T_f^*	$[-30, 5]$	-8.4
融雪气温/°C	T_0	$[-2, 4]$	1.45	积雪厚度因子	γ	$[0, 0.2]$	0.035
度日因子/(mm/d)	α	$[0, 5]$	1.2	土壤冻融速率因子	δ	$[0, 20]$	5.2
降雨融雪因子/(mm/h)	β	$[0, 0.2]$	0.085	残余水含量	θ_r	$[0, 0.5]$	0.01

各参数敏感性试验的逐小时径流模拟结果如图 2 所示。土壤冻融速率因子主要影响土壤水冻结比例的变

化速率,在气温或积雪覆盖度快速改变的阶段可以对产流过程尤其是洪水峰值产生一定影响,相对而言参数的敏感性不高,在2020年4—5月的3次融雪型洪峰中主要对洪水峰值产生了一定影响。积雪厚度因子为敏感参数,其大小直接决定了积雪覆盖下土壤的下渗速率和产流比例,对该年前2场融雪型洪水的洪峰流量、洪量和形状具有明显影响,同时对消融期末的产流量有一定影响,因此在积雪覆盖程度较大情况下需格外关注该参数对径流量模拟值的影响。标准化冻结温度对气温较低或积雪覆盖度较大等2种情况下的产流模拟具有较大影响,当标准化冻结温度较低时,会造成冬季及春季冰雪消融期降雨产流量及融雪产流量偏大,进而导致上述时段产流量偏大,而到消融期末由于前期下渗水量偏小,土壤蓄水量偏低,此时产流量将会偏小。残余水含量决定了土壤水的最大冻结比例,其对冬季及春季消融期的降雨产流量及融雪产流量有一定影响。综合以上分析结果,各参数对径流的影响并不完全相同,其中积雪厚度因子和标准化冻结温度相对而言更为敏感,当资料长度有限时可优先率定上述参数。

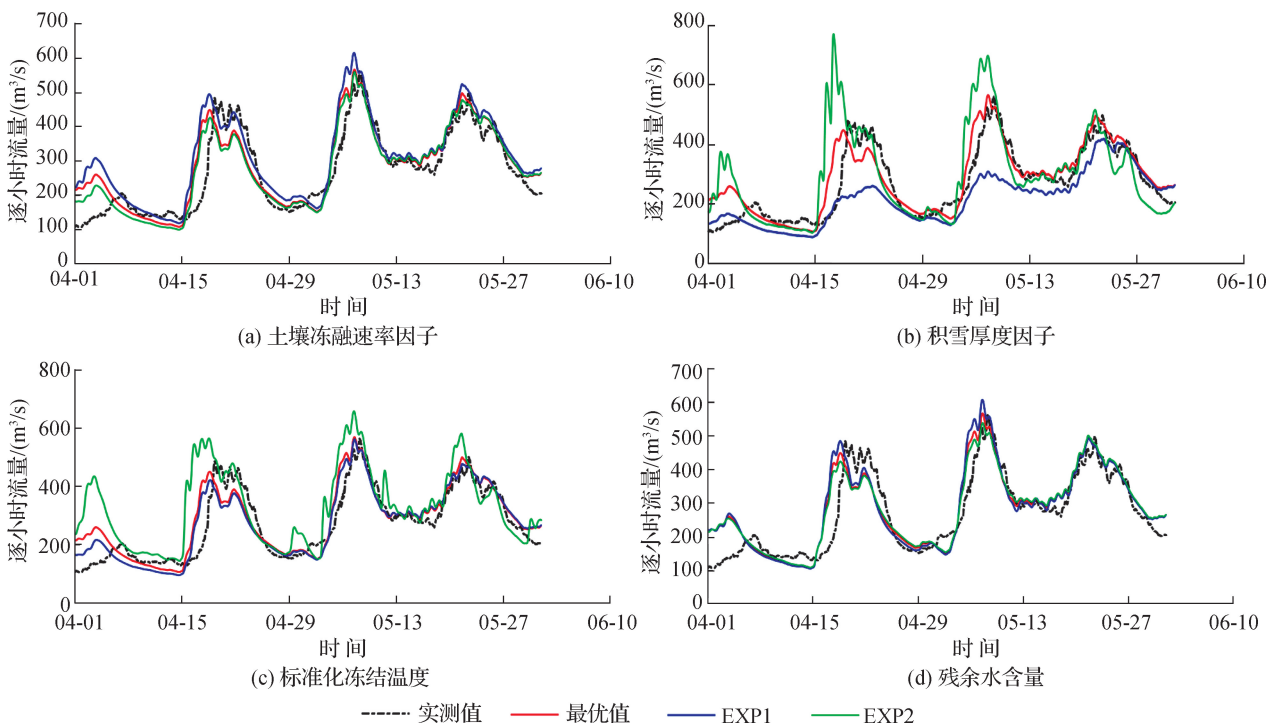


图2 土壤冻融参数敏感性试验的逐小时流量模拟结果

Fig. 2 Daily streamflow simulations of the soil freeze-thaw parameter sensitivity tests

2.5 径流模拟效果分析

由于小时尺度的数据过于密集,图3展示了考虑融雪和土壤冻融的新安江模型和HBV模型在日尺度下的径流模拟效果。结果表明,考虑融雪和土壤冻融的新安江模型率定期和验证期逐小时流量的 E_{NS} 分别为0.91和0.90,全时段 E_{NS} 为0.91;HBV模型率定期和验证期逐小时流量的纳什效率系数分别为0.88和0.89,全时段 E_{NS} 为0.89;表明2个模型都可以较好地模拟甘孜站的径流过程。

进一步对冰雪消融期(3月下旬至6月上旬)不同模型的日尺度径流模拟效果进行分析,图4展示了各年份原始新安江模型、HBV模型和考虑融雪和土壤冻融的新安江模型在消融期的径流模拟结果,表2展示了各模型径流模拟的定量评价结果。在图4及表2中,XAJ代表原始新安江模型的模拟结果,HBV代表HBV模型的模拟结果,M-XAJ代表考虑融雪及土壤冻融的新安江模型的模拟结果。

结果表明,原始新安江模型由于缺少对于积雪融雪和土壤冻融过程的刻画,无法复现冰雪径流对河流的

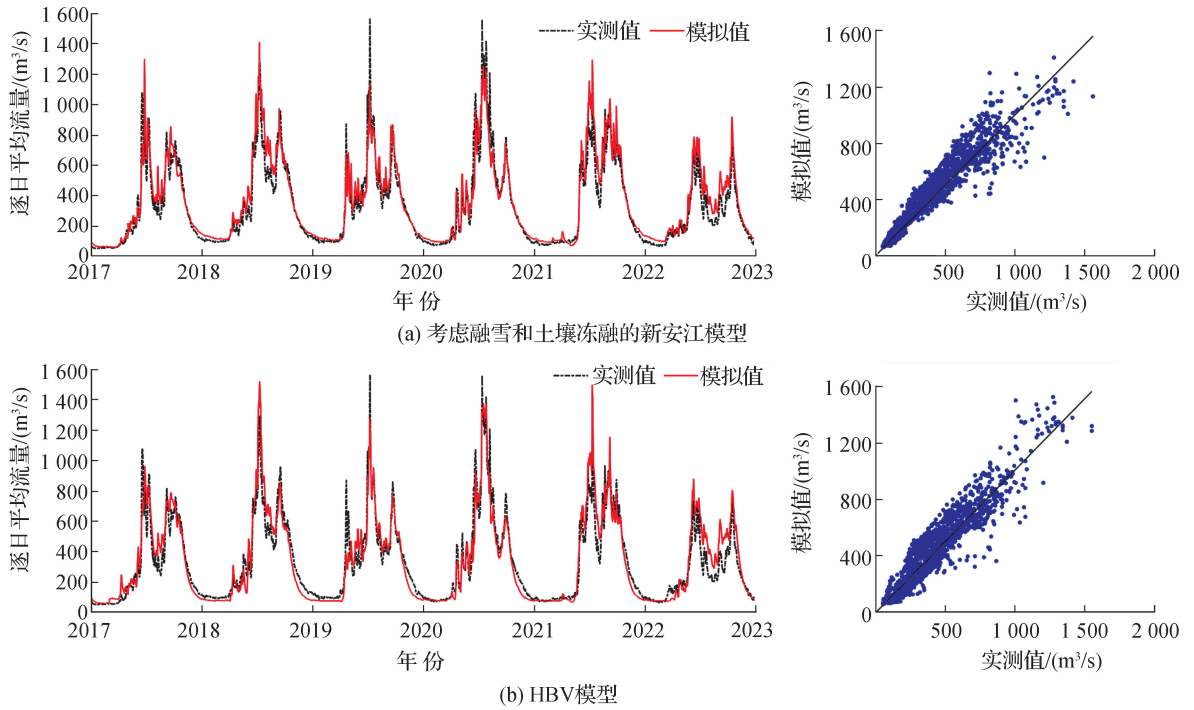


图 3 甘孜水文站 2017—2022 年考虑融雪和土壤冻融的新安江模型和 HBV 模型的逐日平均流量模拟效果
 Fig. 3 Daily streamflow simulations of the Ganzhi hydrologic station for the period of 2017—2022 of Xin'anjiang model with snowmelt and soil freeze-thaw processes and HBV model

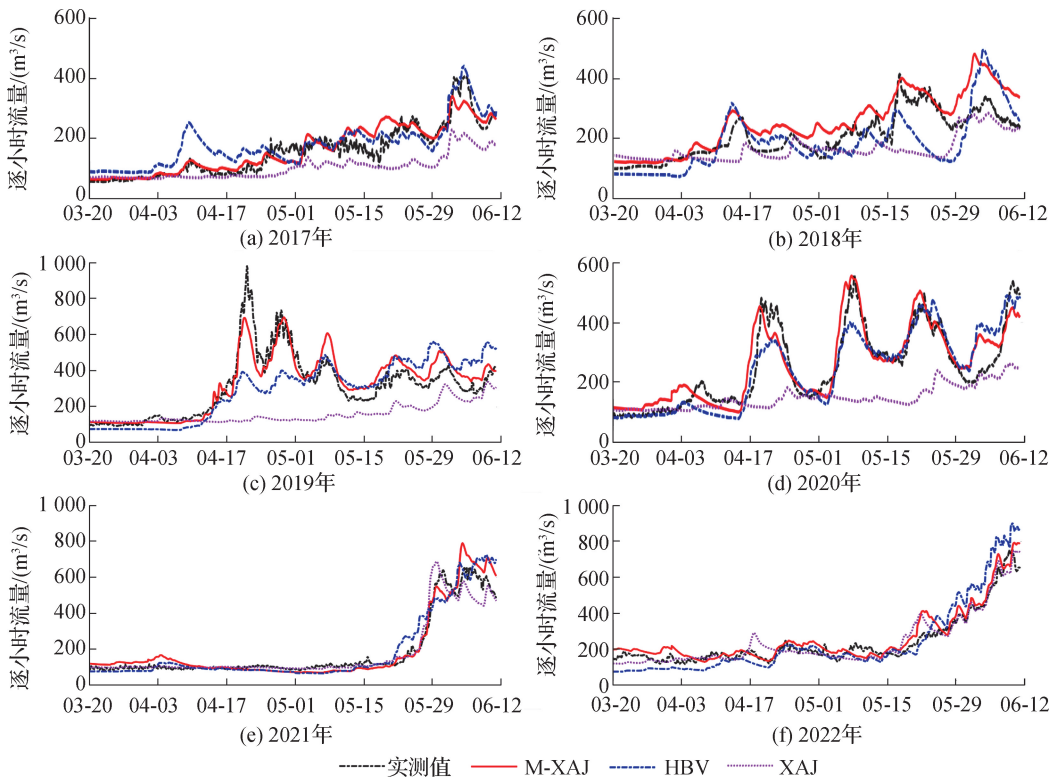


图 4 甘孜水文站 2017—2022 年消融期各模型逐日平均流量模拟效果

Fig. 4 Hourly streamflow simulations of the Ganzhi hydrologic station for the melting period of 2017—2022

补给作用,导致径流严重偏低,各年份消融期模拟径流的相对误差在 $-48.7\% \sim 0.2\%$ 之间波动,取绝对值后相对误差的中位数为 -27.5% 。相应地,小时尺度模拟径流的 E_{NS} 在 $-0.79 \sim 0.95$ 之间波动,中位数仅为 0.05 ;相关系数在 $0.17 \sim 0.97$ 之间波动,中位数为 0.71 。由于前期积雪情况不尽相同,模拟径流相对误差和 E_{NS} 的年际变异性较大,如2021年、2022年等年份入春前降水量偏低、气温偏高,导致冰雪覆盖情况较往年偏少,由此导致径流相对误差小于 $\pm 5\%$,日尺度 E_{NS} 可达到 0.9 ;而在2019年、2020年等多雪之年,前期降水充足、冰雪覆盖程度较大,模型模拟效果欠佳,相对误差在 -50% 附近波动,同时 E_{NS} 的值均小于 0 。

HBV模型内置有融雪产流模块,可以刻画积雪及融雪过程对流域水文过程的影响。结果表明,各年份消融期相对误差在 $-8.9\% \sim 16.1\%$ 之间波动,中位数为 -2.0% 。从整个消融期来看,不同年份下HBV模型对于径流总量均有较好的模拟效果,然而模拟的径流量在整个消融期内的时程分布特征与实际情况并不完全相符。例如,2019年4月中旬至5月初及2020年4月中旬至5月初的多场典型洪水中,HBV模型均大幅低估了洪水总量及峰值。从纳什效率系数和相关系数也可以看出,各年份 E_{NS} 在 $0 \sim 0.9$ 之间波动,中位数为 0.69 ;相关系数在 $0.66 \sim 0.98$ 之间波动,中位数为 0.88 。可见,HBV模型总体上对于消融期的径流总量和径流过程具有一定模拟能力,但对于业务部门更加关注的极端洪水事件,HBV的模拟能力相对不足。

考虑融雪及土壤冻融的新安江模型在原模型的基础上耦合了融雪产流和土壤冻融模块,可以刻画流域积雪较厚或温度较低时,水分下渗蒸发通道受阻、土壤蓄水容量减少、壤中流及地下水出流比例减少等水文现象。相比原新安江模型,考虑融雪及土壤冻融之后模拟径流总量偏小的问题得到大幅缓解,各年份相对误差在 $3.9\% \sim 22.7\%$ 之间波动,中位数为 4.8% ,其中6a中有5a相对误差小于 $\pm 10\%$,年际变化相对较小。相似地,各年份消融期 E_{NS} 在 $0.28 \sim 0.93$ 之间波动,中位数为 0.83 ,相比HBV模型提升了 0.14 ;相关系数在 $0.91 \sim 0.98$ 之间波动,中位数为 0.92 ,相比HBV模型提升了 0.04 ,说明模型可以在不同前期气象水文条件下较为准确地模拟积雪和土壤冻融共同作用下的三水转化及水量平衡过程。特别是对于2019年及2020年4月中旬到5月上旬的4场典型洪水事件具有较好的模拟效果,洪峰流量及洪量的模拟精度明显高于HBV模型和原始新安江模型。

表2 各模型消融期日平均流量模拟效果定量评价

Table 2 Quantitative evaluation of daily streamflow simulations of different models over melting periods

年份	相对误差/%			E_{NS}			相关系数		
	M-XAJ	HBV	XAJ	M-XAJ	HBV	XAJ	M-XAJ	HBV	XAJ
2017年	4.5	16.1	-34.5	0.83	0.66	0.22	0.92	0.87	0.92
2018年	22.7	-8.9	-20.6	0.28	0	-0.11	0.91	0.67	0.48
2019年	5.2	-5.4	-48.7	0.83	0.35	-0.79	0.92	0.66	0.17
2020年	4.0	-4.2	-40.1	0.83	0.78	-0.43	0.92	0.89	0.49
2021年	3.9	1.6	-2.4	0.93	0.90	0.95	0.98	0.96	0.97
2022年	10.0	0.3	0.2	0.91	0.73	0.90	0.97	0.98	0.95
中位数*	4.8	-2.0	-27.5	0.83	0.69	0.05	0.92	0.88	0.71

* 相对误差的中位数由各年份的相对误差取绝对值后计算得到。

分年份来看,相对误差方面,6a中有3a考虑融雪和土壤冻融的模型径流模拟效果最好,而HBV模型和原始新安江模型分别有2a和1a表现最好;纳什效率系数方面,6a中有5a考虑融雪和土壤冻融的模型径流模拟效果最好,而原始新安江模型有1a表现最好;相关系数方面,6a中有5a考虑融雪和土壤冻融的模型径流模拟效果最好,而HBV模型有1a表现最好。以上验证结果表明,本文构建的考虑融雪和土壤冻融的新安江模型可以在不同气象及积雪覆盖条件下提升原有模型在雅砻江上游的径流模拟效果,可用于后续开展雅砻江流域的水文预报。

此外,后续将从两方面进一步完善本研究。一是结合高分辨率遥感技术开展水文模型雪水当量和土壤温

度等初始场的滚动同化,探究其提升消融期水文预报精度的能力;二是进一步实地开展产汇流试验,确定不同流域积雪产流特性曲线和土壤冻融特征曲线的函数形式和参数,从而减少模型结构及参数的不确定性,更好地为中国寒区的水文预报提供支撑。

3 结 论

本研究针对传统概念性水文模型较少考虑积雪融雪及土壤冻融过程对径流过程的叠加影响这一问题,以降水量和气温为驱动数据,提出了基于“等效土壤温度”和“土壤冻融特征曲线”的概念性土壤冻融模块来刻画积雪融雪及土壤冻融共同影响下的产流过程,并据此构建了考虑融雪产流和土壤冻融的新安江模型。模型模拟结果表明:

(1) 土壤冻融速率因子、积雪厚度因子、标准化冻结温度及残余水含量等各土壤冻融参数对径流的影响机制并不完全相同,相对而言积雪厚度因子和标准化冻结温度更为敏感,当资料长度有限时可优先率定上述参数。

(2) 相比于 HBV 模型,考虑融雪产流和土壤冻融的模型可以显著提升甘孜以上流域消融期的径流模拟精度,各年份纳什效率系数的中位数由 0.69 提升至 0.83,相关系数中位数由 0.88 上升至 0.92,特别是对于洪水事件具有较好的模拟效果,可为中国寒区的水文业务预报提供一定支撑。

参考文献:

- [1] 岳书平,闫业超,张树文,等. 基于 ERA5-LAND 的中国东北地区近地表土壤冻融状态时空变化特征[J]. 地理学报, 2021, 76(11): 2765-2779. (YUE S P, YAN Y C, ZHANG S W, et al. Spatiotemporal variations of soil freeze-thaw state in Northeast China based on the ERA5-LAND dataset[J]. Acta Geographica Sinica, 2021, 76(11): 2765-2779. (in Chinese))
- [2] WANG T Y, WU T H, WANG P, et al. Spatial distribution and changes of permafrost on the Qinghai-Tibet Plateau revealed by statistical models during the period of 1980 to 2010[J]. Science of the Total Environment, 2019, 650: 661-670.
- [3] ZOU D F, ZHAO L, SHENG Y, et al. A new map of permafrost distribution on the Tibetan Plateau[J]. The Cryosphere, 2017, 11(6): 2527-2542.
- [4] 王根绪. 寒区生态水文学理论与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2016. (WANG G X. Ecohydrology in cold regions theory and practice[M]. Beijing: Science Press, 2016. (in Chinese))
- [5] 阳勇, 陈仁升. 冻土水文研究进展[J]. 地球科学进展, 2011, 26(7): 711-723. (YANG Y, CHEN R S. Research review on hydrology in the permafrost and seasonal frozen regions[J]. Advances in Earth Science, 2011, 26(7): 711-723. (in Chinese))
- [6] KUCHMENT L S, GELFAN A N, DEMIDOV V N. A distributed model of runoff generation in the permafrost regions[J]. Journal of Hydrology, 2000, 240(1/2): 1-22.
- [7] HUANG K W, DAI J C, WANG G X, et al. The impact of land surface temperatures on suprapermafrost groundwater on the central Qinghai-Tibet Plateau[J]. Hydrological Processes, 2020, 34(6): 1475-1488.
- [8] 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 Y J, ZHANG S Q, WU J K, 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))
- [9] WANG G X, MAO T X, CHANG J, et al. Processes of runoff generation operating during the spring and autumn seasons in a permafrost catchment on semi-arid plateaus[J]. Journal of Hydrology, 2017, 550: 307-317.
- [10] 张艳林, 常晓丽, 梁继, 等. 高寒山区冻土对水文过程的影响研究: 以黑河上游八宝河为例[J]. 冰川冻土, 2016, 38(5): 1362-1372. (ZHANG Y L, CHANG X L, LIANG J, et al. Influence of frozen ground on hydrological processes in alpine regions: a case study in an upper reach of the Heihe River[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2016, 38(5): 1362-1372. (in Chinese))
- [11] 李太兵, 王根绪, 胡宏昌, 等. 长江源多年冻土区典型小流域水文过程特征研究[J]. 冰川冻土, 2009, 31(1): 82-88. (LI T B, WANG G X, HU H C, et al. Hydrological process in a typical small permafrost watershed at the headwaters of Yangtze

- River[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2009, 31(1): 82-88. (in Chinese))
- [12] 朱淑珍, 黄法融, 冯挺, 等. 1979—2020年天山地区积雪量估算及其特征分析[J]. *冰川冻土*, 2022, 44(3): 984-997. (ZHU S Z, HUANG F R, FENG T, et al. Estimation of snow mass and its distribution characteristics from 1979 to 2020 in Tian-shan Mountains, China[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2022, 44(3): 984-997. (in Chinese))
- [13] GAO Y, DAI Y F, YANG W, et al. Estimation of snow bulk density and snow water equivalent on the Tibetan Plateau using snow cover duration and snow depth[J]. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2023, 48: 101473.
- [14] IWATA Y, HAYASHI M, SUZUKI S, et al. Effects of snow cover on soil freezing, water movement, and snowmelt infiltration: a paired plot experiment[J]. *Water Resources Research*, 2010, 46(9): W09504.
- [15] IWATA Y, NEMOTO M, HASEGAWA S, et al. Influence of rain, air temperature, and snow cover on subsequent spring-snowmelt infiltration into thin frozen soil layer in northern Japan[J]. *Journal of Hydrology*, 2011, 401(3/4): 165-176.
- [16] LINDSTRÖM G, BISHOP K, LÖFVENIUS M O. Soil frost and runoff at Svartberget, Northern Sweden: measurements and model analysis[J]. *Hydrological Processes*, 2002, 16(17): 3379-3392.
- [17] 关志成, 段元胜. 寒区流域水文模拟研究[J]. *冰川冻土*, 2003, 25(增刊2): 266-272. (GUAN Z C, DUAN Y S. Modeling the hydrological process of drainages in cold regions[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2003, 25(S2): 266-272. (in Chinese))
- [18] 陈仁升, 吕世华, 康尔泗, 等. 内陆河高寒山区流域分布式水热耦合模型(I): 模型原理[J]. *地球科学进展*, 2006, 21(8): 806-818. (CHEN R S, LYU S H, KANG E S, et al. A distributed water-heat coupled (DWHC) model for mountainous watershed of an inland river basin (I): model structure and equations[J]. *Advances in Earth Science*, 2006, 21(8): 806-818. (in Chinese))
- [19] 苏辉东, 贾仰文, 刘欢, 等. 基于 WEP-L 模型的寒区流域径流演变模拟及归因分析[J]. *冰川冻土*, 2021, 43(5): 1523-1530. (SU H D, JIA Y W, LIU H, et al. Runoff evolution simulation and attribution analysis in cold region basin based on WEP-L model[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2021, 43(5): 1523-1530. (in Chinese))
- [20] 刘水清, 周祖昊, 刘佳嘉, 等. 基于冻土水文模拟的松花江流域水资源演变规律[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2023, 21(1): 127-136. (LIU S Q, ZHOU Z H, LIU J J, et al. Evolution law of water resources in Songhua River basin based on hydrological simulation of frozen soil[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2023, 21(1): 127-136. (in Chinese))
- [21] QI J Y, ZHANG X S, WANG Q F. Improving hydrological simulation in the Upper Mississippi River basin through enhanced freeze-thaw cycle representation[J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 571: 605-618.
- [22] QI J, WANG L, ZHOU J, et al. Coupled snow and frozen ground physics improves cold region hydrological simulations: an evaluation at the Upper Yangtze River basin(Tibetan Plateau)[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2019, 124(23): 12985-13004.
- [23] 李明亮, 杨大文, 侯杰, 等. 黑龙江流域分布式水文模型研究[J]. *水力发电学报*, 2021, 40(1): 65-75. (LI M L, YANG D W, HOU J, et al. Distributed hydrological model of Heilongjiang River basin[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2021, 40(1): 65-75. (in Chinese))
- [24] LIANG X, LETTENMAIER D P, WOOD E F, et al. A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1994, 99(D7): 14415-14428.
- [25] 周剑, 李新, 王根绪, 等. 一种基于 MMS 的改进降水径流模型在中国西北地区黑河上游流域的应用[J]. *自然资源学报*, 2008, 23(4): 724-736. (ZHOU J, LI X, WANG G X, et al. An improved precipitation-runoff model based on MMS and its application in the upstream basin of the Heihe River[J]. *Journal of Natural Resources*, 2008, 23(4): 724-736. (in Chinese))
- [26] KRATZERT F, KLOTZ D, BRENNER C, et al. Rainfall-runoff modelling using Long Short-Term Memory (LSTM) networks [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2018, 22(11): 6005-6022.
- [27] CHEN X, HUANG J X, HAN Z, et al. The importance of short lag-time in the runoff forecasting model based on long short-term memory[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 589: 125359.
- [28] GAO H K, WANG J J, YANG Y Z, et al. Permafrost hydrology of the Qinghai-Tibet Plateau: a review of processes and modeling[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2021, 8: 576838.

- [29] 余其鹰, 胡彩虹, 白云岗, 等. 新疆洪水预报预警中融雪径流模型应用进展[J]. 干旱区地理, 2023, 46(12): 1951-1962. (YU Q Y, HU C H, BAI Y G, et al. Application of snowmelt runoff model in flood forecasting and warning in Xinjiang [J]. Arid Land Geography, 2023, 46(12): 1951-1962. (in Chinese))
- [30] 黄克威, 王根绪, 宋春林, 等. 基于LSTM的青藏高原冻土区典型小流域径流模拟及预测[J]. 冰川冻土, 2021, 43(4): 1144-1156. (HUANG K W, WANG G X, SONG C L, et al. Runoff simulation and prediction of a typical small watershed in permafrost region of the Qinghai-Tibet Plateau based on LSTM[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2021, 43(4): 1144-1156. (in Chinese))
- [31] ZHAO R J. The Xin'anjiang model applied in China[J]. Journal of Hydrology, 1992, 135(1): 371-381.
- [32] 习阿幸, 刘志辉, 卢文君. 干旱区季节性冻土冻融状况及对融雪径流的影响[J]. 水土保持研究, 2016, 23(2): 333-339. (XI A X, LIU Z H, LU W J. Processes of seasonal frozen soil freezing-thawing and impact on snowmelt runoff in arid area [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2016, 23(2): 333-339. (in Chinese))
- [33] GAO H R, ZHANG Z J, CHEN H, et al. Impacts of seasonally frozen soil hydrothermal dynamics on the watershed hydrological processes inferred from a spatially distributed numerical modelling approach[J]. Journal of Hydrology, 2023, 624: 129947.
- [34] LI Y L, FU Q, LI T X, et al. Snow melting water infiltration mechanism of farmland freezing-thawing soil and determination of meltwater infiltration parameter in seasonal frozen soil areas[J]. Agricultural Water Management, 2021, 258: 107165.
- [35] ORSOLINI Y, WEGMANN M, DUTRA E, et al. Evaluation of snow depth and snow cover over the Tibetan Plateau in global re-analyses using in situ and satellite remote sensing observations[J]. The Cryosphere, 2019, 13(8): 2221-2239.
- [36] 杨洪波, 于晓丹, 付海美, 等. 西藏那曲地区土壤温度变化特征及其与环境关系研究[J]. 全球变化数据学报(中英文), 2020, 4(2): 144-154. (YANG H B, YU X D, FU H M, et al. Variation of soil temperature and its relationship with the environment in Nagqu, Tibet[J]. Journal of Global Change Data & Discovery, 2020, 4(2): 144-154. (in Chinese))
- [37] ZOU Y Y, JIANG H Q, WANG E L, et al. Variation and prediction of unfrozen water content in different soils at extremely low temperature conditions[J]. Journal of Hydrology, 2023, 624: 129900.
- [38] LUNARDINI V J. Freezing of soil with an unfrozen water content and variable thermal properties[M]. US Army Corps of Engineers: Cold Regions Research & Engineering Laboratory, 1988.
- [39] BAI R Q, LAI Y M, ZHANG M Y, et al. Theory and application of a novel soil freezing characteristic curve[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 129: 1106-1114.
- [40] BERGSTRÖM S. The HBV model: its structure and applications[R]. Norrköping: SMHI Reports RH, No. 4, 1992.
- [41] 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 N, ZHANG K, GUAN X X, 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))
- [42] RAN Y H, LI X, CHENG G D, et al. Distribution of permafrost in China: an overview of existing permafrost maps[J]. Permafrost and Periglacial Processes, 2012, 23(4): 322-333.
- [43] 吴小丽, 刘桂民, 李新星, 等. 青藏高原多年冻土和季节性冻土区土壤水分变化及其与降水的关系[J]. 水文, 2021, 41(1): 73-78, 101. (WU X L, LIU G M, LI X X, et al. Variation of soil moisture and its relation with precipitation of permafrost and seasonally frozen soil regions on the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Journal of China Hydrology, 2021, 41(1): 73-78, 101. (in Chinese))
- [44] SONG Z H, XIA J, WANG G S, et al. Regionalization of hydrological model parameters using gradient boosting machine[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2022, 26(2): 505-524.
- [45] SHU L L, LI X D, CHANG Y, et al. Advancing understanding of lake-watershed hydrology: a fully coupled numerical model illustrated by Qinghai Lake[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2024, 28(7): 1477-1491.
- [46] 关铁生, 鲍振鑫, 贺瑞敏, 等. 无资料地区水文模型参数移植不确定性分析[J]. 水科学进展, 2023, 34(5): 660-672. (GUAN T S, BAO Z X, HE R M, et al. Uncertainties of model parameters regionalization in ungauged basins[J]. Advances in Water Science, 2023, 34(5): 660-672. (in Chinese))
- [47] 穆振侠. 高寒山区降水垂直分布规律及融雪径流模拟研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2010. (MU Z X. Vertical distribution of precipitation and simulation of snowmelt runoff in alpine mountainous areas[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural U-

- niversity, 2010. (in Chinese))
- [48] 吴亚琪, 梁忠民, 陈在妮, 等. 退水曲线与融雪-降雨径流相结合的枯季径流预报方法研究[J]. 水电能源科学, 2021, 39(12): 17-20. (WU Y Q, LIANG Z M, CHEN Z N, et al. Study on dry season runoff forecasting method based on recession curve and snowmelt-rainfall runoff[J]. Water Resources and Power, 2021, 39(12): 17-20. (in Chinese))
- [49] 张梅洁, 吕海深, 刘娣, 等. 耦合融雪的新安江模型在干旱区径流模拟研究[J]. 干旱区研究, 2022, 39(2): 379-387. (ZHANG M J, LYU H S, LIU D, et al. Runoff simulation in an arid area using the Xin'anjiang model coupled with snowmelt [J]. Arid Zone Research, 2022, 39(2): 379-387. (in Chinese))
- [50] MCKENZIE J M, VOSS C I, SIEGEL D I. Groundwater flow with energy transport and water-ice phase change: numerical simulations, benchmarks, and application to freezing in peat bogs[J]. Advances in Water Resources, 2007, 30(4): 966-983.
- [51] BI J, WU Z J, LU Y, et al. Study on soil freezing characteristic curve during a freezing-thawing process[J]. Frontiers in Earth Science, 2023, 10: 1007342.
- [52] LI X K, LI X, LIU J K. A dynamic soil freezing characteristic curve model for frozen soil[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2023, 16(18): 3339-3352.
- [53] REN J P, VANAPALLI S K, HAN Z. Soil freezing process and different expressions for the soil-freezing characteristic curve[J]. Sciences in Cold and Arid Regions, 2017, 9(3): 221-228.

An improved Xin'anjiang model with snow melting and soil freeze-thaw processes and its application in streamflow simulations of the Upper Yalongjiang River basin*

DONG Ningpeng¹, WANG Hao¹, YANG Mingxiang¹, ZHANG Jujia¹, XU Shiqin²

(1. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 2. Hydrology, Agriculture and Land Observation Laboratory, Division of Biological and Environmental Science and Engineering, King Abdullah University of Science and Technology, Thuwal 23955-6900, Kingdom of Saudi Arabia)

Abstract: Cold areas are primary runoff generation areas of China's major rivers. The accuracy of their runoff forecasts directly affects the scheduling of downstream water conservancy projects and the water resources management. This study aims at the problem that traditional conceptual hydrological models rarely consider the combined effects of snowmelt and soil freezing and thawing processes on the runoff process. Based on the Xin'anjiang model and using precipitation and air temperature as driving data, this study proposes a conceptual soil freeze-thaw module based on the equivalent soil temperature and soil freeze-thaw characteristic curve to describe the runoff process under the joint influence of snowmelt and soil freeze-thaw, and a Xin'anjiang model considering snowmelt runoff and soil freeze-thaw is developed. Taking the watershed above the Ganzi hydrological station in the Upper Yalongjiang River basin as a typical research area to carry out the daily streamflow simulation during the snowmelt period of 2017—2022. The results show that, compared with the HBV model, the Xin'anjiang model with snowmelt runoff and soil freeze-thaw processes can significantly improve the accuracy of streamflow simulation of the Ganzi station during the snowmelt period. The median Nash efficiency coefficient increases from 0.69 to 0.83, and the median correlation coefficient increases from 0.88 to 0.92. The Xin'anjiang model improved in this study that considers snowmelt and soil freezing and thawing can provide support for hydrological forecasting in cold regions of China.

Key words: cold areas; snowmelt runoff; soil freeze-thaw; Xin'anjiang model; hydrologic forecast

* The study is financially supported by the National Key R&D Program of China (No. 2023YFC3081000) and the Science and Technology Project of State Power Construction Co., Ltd, China (No. DJ-HXGG-2021-04).