

基于再分析降水资料的青藏高原 典型流域径流模拟分析

徐华亭^{1,2}, 吴志勇^{2,3}, 陈瑞方¹, 孙昭敏^{2,3}, 代斌¹, 张瀚文¹, 吴晓韬^{1,2}

(1. 上海勘测设计研究院有限公司, 上海 200335; 2. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098;
3. 河海大学水灾害防御全国重点实验室, 江苏 南京 210098)

摘要: 基于实测资料、中国区域地面气象要素驱动数据集(CMFD)和ERA5-Land再分析降水资料, 构建了青藏高原尼洋河更张站以上流域的可变下渗能力(VIC)模型, 评估再分析降水资料和VIC模型在资料缺乏地区径流模拟中的适用性, 并探究了VIC模型分辨率对径流模拟结果的影响。结果表明: 在资料严重缺乏地区, 基于实测资料的VIC模型难以反映径流的实际情况, 而采用再分析降水资料可以明显提升流域径流模拟精度; 与基于CMFD再分析数据的VIC模型模拟结果相比, 基于ERA5-Land再分析数据的模型径流模拟精度更高, 月径流模拟结果的纳什效率系数达到0.76, 表明ERA5-Land再分析降水资料和VIC模型在研究区具有较好的适用性, 但模型对洪峰模拟结果的精度需要进一步提高; VIC模型径流模拟精度随着其分辨率的提高有所提升, 当模型分辨率由10 km提高到1 km时, 月径流模拟结果的纳什效率系数提高了9.1%, 相对误差减小了16.5%; 较高分辨率的VIC模型对峰现时间、洪峰流量模拟更准确, 但是难以模拟退水过程。

关键词: 径流模拟; VIC模型; CMFD; ERA5-Land; 青藏高原

中图分类号: P338

文献标志码: A

文章编号: 1004-6933(2024)04-0092-07

Runoff simulation analysis of typical watershed in Tibetan Plateau based on reanalysis precipitation data//XU Huating^{1,2}, WU Zhiyong^{2,3}, CHEN Ruifang¹, SUN Zhaomin^{2,3}, DAI Bin¹, ZHANG Hanwen¹, WU Xiaotao^{1,2}(1. Shanghai Investigation, Design & Research Institute, Co., Ltd., Shanghai 200335, China; 2. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: A variable infiltration capacity (VIC) model was constructed for the Nyang River above Gengzhang Station on the Tibetan Plateau based on observed precipitation data and reanalysis precipitation data of China meteorological forcing dataset (CMFD) and ERA5-Land. The applicability of reanalysis data and the VIC model in runoff simulation in data-deficient areas was evaluated, and the influence of model resolution on runoff simulation results was explored. The results indicate that, the VIC model based on observations is difficult to reflect actual runoff in the area seriously lacking observations, while the use of reanalysis data can significantly improve the simulation accuracy. Runoff simulation with the VIC model based on ERA5-Land reanalysis data has a higher accuracy than that based on CMFD reanalysis data, achieving a Nash-Sutcliffe efficiency coefficient of 0.76 for monthly runoff simulation results. This demonstrates the suitability of ERA5-Land reanalysis data and the VIC model in runoff simulation in the study area. However, it is necessary to improve the accuracy of peak flow simulation of the VIC model. It is also demonstrated that the runoff simulation accuracy of the VIC model is improved with the increase of model resolution. When the VIC model resolution is increased from 10 km to 1 km, the Nash-Sutcliffe efficiency coefficient for monthly runoff simulation results is increased by 9.1%, and the relative error is decreased by 16.5%. The VIC model with higher resolution is more accurate to simulate the peak appearance time and peak flow, but it is difficult to simulate backwater processes.

Key words: runoff simulation; VIC model; CMFD; ERA5-Land; Tibetan Plateau

基金项目: 上海勘测设计研究院有限公司科标业项目(2022QT(831)-006, 2021SL(8)-014); 国家自然科学基金联合基金重点项目(U2240225)

作者简介: 徐华亭(1990—), 女, 工程师, 博士, 主要从事水文水资源研究。E-mail: xuht_hydro@163.com

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

水文模型是开展流域水文模拟和预测的重要工具^[1-4],大量具有一定物理机制的水文模型已经应用于资料稀缺地区径流模拟计算,如 SWAT(soil and water assessment tool)模型^[5-6]、基于模块化流域水循环综合模拟系统(hydro-Informatic modeling system, HIMS)构建的分布式水文模型^[7]、融雪径流模型(snowmelt-runoff model, SRM)^[8-9]和可变下渗能力(variable infiltration capacity, VIC)模型^[10-12]等。然而,水文模型模拟的精度很大程度上依赖于作为模型输入的降水资料的准确性。青藏高原作为众多河流发源地,是全球气候变化的驱动器和放大器,其地表水文过程异常复杂^[13-14],往往面临着水文气象站点稀疏、实测资料不连续等问题,是典型的资料缺乏地区,给水文模拟带来了极大的挑战^[9],已经成为国际水文水资源领域研究的前沿热点与难点之一^[9,15-16]。

2010年以来,随着气象资料同化技术在数值预报应用中的不断成熟,大气再分析资料已经成为一种重要的测量和观测替代品^[1,17]。通常,再分析资料将大量卫星资料和地面、高空等常规观测资料进行同化,与传统实测资料相比,具有范围大、序列长、精度高等特点^[18]。目前广泛使用的再分析资料有气候预测系统再分析数据^[19]、欧洲中期天气预报中心再分析 ERA 数据^[20]、日本 JRA-55 数据集^[21]和中国区域地面气象要素驱动数据集(China meteorological forcing dataset, CMFD)^[22]等。CMFD 是以国际现有的 Princeton 再分析资料、全球陆地数据同化系统资料、全球能量与水循环实验-地表能量收支辐射资料以及热带测雨任务卫星降水资料为背景场,融合了中国气象局常规气象观测数据制作而成^[22],在长江流域较多源加权集合降水和 ERA5^[23]、在新疆额尔齐斯河流域较 ERA-Interim 数据^[24]都具有较优的适用性,但其在青藏高原地区的适用性存在时间和空间上的差异^[25-26]。ERA5-Land 是 ERA5 土地部分增强型全球数据集^[27-29],空间分辨率为 $0.1^{\circ}\times 0.1^{\circ}$ (约 9 km),时间分辨率为 1 h^[29],提供了 1950 年至今的水量和能量循环数据^[30],拥有完善的数据种类以及较长的时间序列,是目前精度较高的数据集。Wu 等^[31]研究表明,ERA5-Land 再分析数据不仅可以较好地再现青藏高原降水的年内变化和时空格局,也可以较好地检测实际降水事件,但其严重高估了降水量和降水频次。

用再分析资料代替实测资料作为水文模型输入已经成为资料缺乏地区水文模拟的重要手段之一^[32]。谭秋阳等^[9]基于 CMFD 在年楚河流域构建 SRM 模型,验证了 CMFD 再分析数据在资料缺乏地

区的适用性。唐豪等^[18]在评估 ERA5-Land 再分析数据准确性的基础上,将其作为 SWAT 模型的驱动数据对玛纳斯河流域进行了径流模拟,结果表明 ERA5-Land 再分析数据可为西北缺乏实测气象资料地区的径流模拟提供参考。VIC 模型是一种基于土壤植被大气迁移方案思路的大尺度半分布式水文模型^[33-34],可同时考虑陆-气间水分收支和能量收支平衡过程,弥补了传统水文模型对能量过程描述的不足。VIC 模型主要特点之一是引入新安江模型蓄水容量曲线的概念,描述土壤饱和含水量次网格分布的不均匀性,并考虑多层土壤的水量平衡和能量平衡。与其他陆面水文模型相比,该模型能够反映土壤蓄水能力的空间分布不均匀性、冠层湿部蒸发、叶丛蒸腾、裸土蒸发和基流退水的非线性过程^[35],是对实际水文过程具有较强模拟能力的水文模型之一,在不同流域、不同尺度下得到了广泛应用^[36-40]。Sun 等^[41]基于 VIC 模型分析了 ERA5 数据在青藏高原典型流域的潜在水文效用,但亟须探究不同再分析资料和 VIC 模型在青藏高原的适用性。

本文将 CMFD、ERA5-Land 再分析降水资料与不同分辨率 VIC 模型相结合,评估再分析数据和 VIC 模型在青藏高原典型流域径流模拟中的适用性,探讨模型分辨率对径流模拟精度的影响。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

尼洋河流域为雅鲁藏布江左岸一级支流,发源于西藏自治区工布江达县,流域范围为 $29^{\circ}28'N \sim 30^{\circ}30'N, 90^{\circ}10'E \sim 94^{\circ}35'E$ 。流域属高原温带半湿润季风气候区,气候温和,小气候复杂多样,年温差小,日温差大。根据流域内及其周边两个气象站点资料统计,该流域多年平均降水量为 716 mm,降水量年际变化不大,年内分配不均,从东向西逐渐减少,4 月下旬至 10 月中旬的雨季降水量占全年降水量的 85%,多年平均气温为 $8.5^{\circ}C$ 。流域地势西北高、东南低,海拔高,干流落差为 2 080 m。更张站为尼洋河流域中游控制站,位于 $29^{\circ}43'59.88''N, 94^{\circ}4'59.88''E$ 。本文以青藏高原尼洋河更张站以上流域(以下简称“更张流域”)为研究区域(图 1),该区域为典型资料缺乏地区,位于青藏高原南部,平均海拔为 4 786 m,整体呈现四周高、中间低的地形分布特征。

1.2 数据来源

更张流域面积接近 1.6 km^2 ,流域内及其周边仅有 2 个气象站点(图 1),实测气象资料较少,难以满足该流域径流模拟对资料的要求。本文使用的

数据包括实测数据和 CMFD、ERA5-LAND 再分析数据。

数据在流域径流模拟中的合理性与适用性。

2.2 汇流计算

传统大尺度分布式汇流模型多采用 D8 法对河网进行划分,为改善这一方法存在的汇流路径不统一、难以反映真实河道特征信息等问题,Lu 等^[44]提出了基于网格与子流域融合单元的大尺度分布式精细化汇流模型,该模型基于汇流累积量确定网格的最大集水面积点,将其作为网格控制点,生成每个控制点的集水面积和融合单元;同时考虑每个融合单元内的调蓄作用,假设融合单元内降雨均匀分布,采用运动波描述坡面汇流,运用单位线理论生成融合单元响应函数,采用扩散波方法融合单元间的河道汇流。

3 结果与分析

3.1 不同数据驱动 VIC 模型模拟结果

VIC 模型参数优选以率定期(2000—2005 年)流域出口模拟流量与实测流量相对误差最小和纳什效率系数最大为原则,纳什效率系数体现了模拟流量与实测流量的匹配程度,相对误差体现了模拟流量与实测流量的偏差情况。基于 Rosenbrock 算法与人工干预调参相结合的方法,在不同数据驱动下均优选出一套模型参数,用于验证期(2010—2015 年)的径流模拟,以分析参数在验证期的适用性。不同数据驱动的模型参数优选结果见表 1。从表 1 可以看出,采用现有两个站点实测资料和 ERA5-Land 再分析降水资料作为驱动数据得到的模型优选参数基本相同,而采用 CMFD 再分析降水资料作为驱动数据得到的模型参数 b 和 D_s 与其他驱动数据模型差异较大。

不同数据驱动模型模拟结果误差统计见表 2。从表 2 可以看出,采用现有两个气象站点实测资料作为驱动数据的 VIC 模型在更张流域的模拟效果最差,日、月径流模拟结果的纳什效率系数小于 0.1,相对误差绝对值均超过 60%,模型模拟径流误差过大,难以反映径流的实际情况。

就纳什效率系数而言,相较于以两个站点实测资料作为驱动数据的 VIC 模型,采用 CMFD 和 ERA5-Land 再分析数据,特别是以 ERA5-Land 再分析数据作为气象驱动数据的 VIC 模型,其精度明显

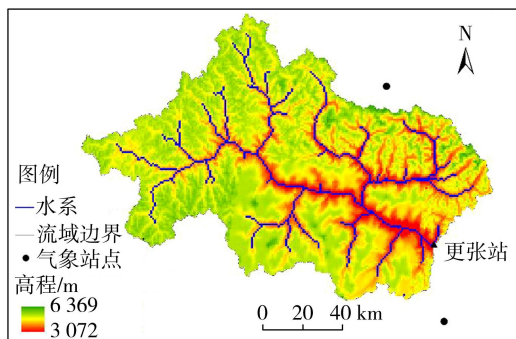


图 1 研究区概况

Fig. 1 Overview of study area

1.2.1 实测数据

实测数据包括中国气象数据网 (<https://data.cma.cn/>) 提供的全国范围内 844 个气象站降水、日最高和最低气温。地形资料为中国范围内 100 m 分辨率的 DEM 资料。植被数据为马里兰大学开发的全球 1 km×1 km 土壤覆盖数据^[42]。土壤数据来自 Reynolds 等^[43]开发的 10 km×10 km 土壤数据库。

1.2.2 再分析数据

再分析数据包括中国区域 CMFD 1999—2015 年逐日降水资料和中国区域 ERA5-Land 1980—2020 年逐日降水资料。采用距离反比插值法,将 CMFD 和 ERA5-Land 再分析降水资料插值到分辨率为 10 km 的 VIC 模型网格中。

2 模型构建

2.1 VIC 模型

VIC 模型中的气候地理参数、植被参数和土壤参数在构建模型中一般可直接标定,不再更改,但与产流密切相关的水文参数需要根据流域实测水文资料率定。需要率定的参数包括饱和容量曲线形状参数 (b)、下层土壤最大日基流 (D_m)、基流非线性增长时其占下层土壤最大日基流的比例 (D_s)、基流非线性增长时下层土壤含水量与最大土壤含水量的比值 (W_s)、下渗曲线指数 (c) 和第一、二、三层土壤厚度 (d_0, d_1, d_2),其中 c 和 d_0 一般分别取 2 和 0.1 m。

本文分别采用实测资料和 CMFD、ERA5-Land 再分析降水资料构建更张流域空间分辨率为 10 km 的 VIC 模型,对比分析资料缺乏地区不同气象驱动

表 1 不同数据驱动的 VIC 模型参数优选结果

Table 1 Optimization results of VIC model parameters based on different forcing data

驱动数据	b	D_m/mm	D_s	W_s	c	d_0/m	d_1/m	d_2/m
站点实测资料	0.3500	49.7188	0.6456	0.04	2	0.1	0.1019	0.1322
CMFD 再分析降水资料	0.0038	50.0000	0.8000	0.04	2	0.1	0.1019	0.1697
ERA5-Land 再分析降水资料	0.3469	47.9688	0.6456	0.04	2	0.1	0.1019	0.1322

表 2 不同数据驱动的 VIC 模型径流模拟结果误差统计

Table 2 Runoff simulation errors of VIC model based on different forcing data

驱动数据	时段	相对误差/%		纳什效率系数	
		日径流模拟	月径流模拟	日径流模拟	月径流模拟
站点实测资料	率定期	-69.59	-69.59	0.096	0.078
	验证期	-60.64	-60.64	0.017	0.008
CMFD 再分析降水资料	率定期	-53.99	-53.98	0.40	0.43
	验证期	-64.86	-64.86	0.22	0.20
ERA5-Land 再分析降水资料	率定期	-18.79	-18.79	0.69	0.76
	验证期	-17.67	-17.67	0.72	0.77

提升。采用 ERA5-Land 再分析数据驱动 VIC 模型的径流模拟结果中,率定期和验证期日径流模拟结果的纳什效率系数分别为 0.69 和 0.72,月径流模拟结果的纳什效率系数分别为 0.76 和 0.77。与更张流域邻近流域研究结果^[45]对比分析表明,在更张流域采用 ERA5-Land 再分析数据作为模型气象驱动数据是可行的,构建的 VIC 模型具有较好的适用性。就相对误差而言,与采用两个气象站点实测资料的 VIC 模型相比,基于 CMFD 再分析数据的 VIC 模型径流模拟精度并没有明显提升,而基于 ERA5-Land 再分析数据的 VIC 模型模拟结果相对误差的绝对值减小到 20% 之内。可以看出,基于不同数据驱动的 VIC 模型模拟结果的相对误差均为负数,表明在更张流域采用 CMFD 和 ERA5-Land 再分析数据的 VIC 模型径流模拟值低于实际值。

不同数据驱动的 VIC 模型模拟径流与实测径流典型时间序列如图 2 所示。从图 2 可以看出,基于站点实测资料的 VIC 模型对径流的模拟效果最

差,基于 CMFD 再分析数据的 VIC 模型模拟效果稍有改善,而基于 ERA5-Land 再分析数据的 VIC 模型对径流过程模拟效果最好。不同数据驱动的 VIC 模型模拟径流可以反映出流域径流随时间变化的特征,对流域洪峰过程的模拟结果也表现出相同的规律,但径流模拟值低于实际值。此外,基于 ERA5-Land 再分析数据的 VIC 模型在该流域虽然具有较好的适用性,但对洪峰的模拟精度仍需提升。

3.2 不同分辨率 VIC 模型模拟结果

在水文模拟中,高分辨率模型通常可以更好地模拟区域水量平衡,反映区域水文参数的空间变异性。为了研究模型空间分辨率与洪峰模拟精度的关系,本文基于 ERA5-Land 再分析数据,在研究流域进一步构建了分辨率分别为 5 km 和 1 km 的 VIC 模型。不同分辨率模型优选参数和径流模拟误差分别见表 3 和表 4,可以看出不同分辨率模型优选参数相似,但验证期模型模拟效果略优于率定期。在不同模型分辨率下,率定期和验证期日径流模拟结果的纳什效率系数基本上达到了 0.70,月径流模拟结果的纳什效率系数都达到了 0.76。当 VIC 模型分辨率为 5 km 和 1 km 时,日径流和月径流模拟结果的纳什效率系数分别达到了 0.74 和 0.81;VIC 模型分辨率为 5 km 时,日径流模拟结果的纳什效率系数最高,达到了 0.79;模型分辨率为 1 km 时,月径流模拟结果的纳什效率系数最高,达到了 0.84。1 km 分辨率模型日径流和月径模拟结果的纳什效率系数较 10 km 分辨率模型分别提高了 9.2% 和 9.1%。随着模型分辨率的提高,模拟结果的相对误差绝对值逐

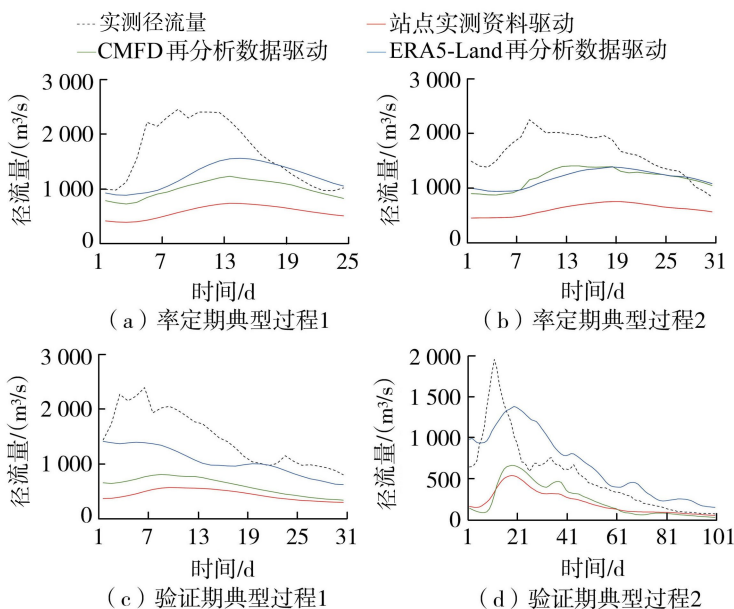


图 2 不同数据驱动的 VIC 模型模拟径流与实测径流时间序列

Fig. 2 Time series of observed and simulated runoff of VIC model based on different forcing data

表3 不同分辨率 VIC 模型的优选参数

Table 3 Optimal parameters of VIC model with different resolutions

模型分辨率/km	b	D_m/mm	D_s	W_s	c	d_0/m	d_1/m	d_2/m
10	0.3469	47.9688	0.6456	0.04	2	0.1	0.1019	0.1322
5	0.3487	50.0000	0.7862	0.04	2	0.1	0.1019	0.1650
1	0.3487	50.0000	0.7987	0.04	2	0.1	0.1019	0.1322

表4 不同分辨率 VIC 模型的径流模拟效果

Table 4 Runoff simulation effect of VIC model with different resolutions

模型分辨率/km	时段	相对误差/%		纳什效率系数	
		日径流模拟	月径流模拟	日径流模拟	月径流模拟
10	率定期	-18.49	-18.49	0.69	0.76
	验证期	-17.34	-17.34	0.72	0.77
5	率定期	-16.57	-16.57	0.76	0.81
	验证期	-15.37	-15.37	0.79	0.83
1	率定期	-15.31	-15.31	0.74	0.83
	验证期	-14.48	-14.48	0.76	0.84

渐减小。当 VIC 模型分辨率从 10 km 提高到 1 km 时,率定期模拟结果相对误差绝对值由 18.49% 减小到 15.31%,验证期由 17.34% 减小到 14.48%,表

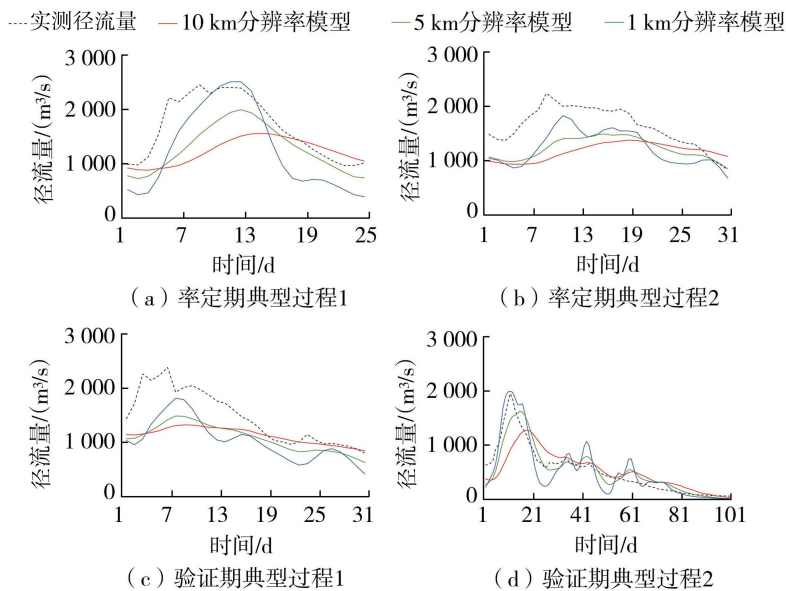


图3 不同分辨率 VIC 模型模拟径流与实测径流时间序列

Fig. 3 Time series of observed and simulated runoff of VIC model with different resolutions

4 结论

a. 更张流域为典型资料缺乏地区,采用流域内及周边稀疏气象站点实测资料作为气象驱动数据构建的 VIC 模型,难以反映径流的真实情况。

b. 采用 CMFD、ERA5-Land 再分析降水资料作为气象驱动数据构建更张流域 VIC 模型,模拟精度有所提高,特别是基于 ERA5-Land 再分析数据的 VIC 模型,率定期和验证期月径流模拟结果的纳什

效率系数分别为 0.76 和 0.77,表明 ERA5-Land 再分析降水资料和 VIC 模型在该流域具有较好的适用性,但构建的 VIC 模型对洪峰的模拟精度仍需提高,模型对峰值的模拟结果均小于实测洪峰流量。

c. 随着 VIC 模型分辨率提高,模拟效果有所提升。VIC 模型分辨率从 10 km 提高到 1 km 时,验证期月径流模拟结果的纳什效率系数由 0.77 提高到了 0.84,提高了 9.1%;相对误差绝对值由 17.34% 减小到 14.48%,减小了 16.5%。VIC 模型分辨率

明随着模型分辨率的提高,模型模拟径流与实测流量的偏差显著减小。

更张流域不同分辨率 VIC 模型模拟径流与实测径流典型时间序列如图 3 所示。从图 3 可以看出,模拟径流的时程波动幅度随着模型分辨率的提高而增大,即当 VIC 模型分辨率为 10 km 时,整体模拟径流最平缓;当 VIC 模型分辨率为 1 km 时,整体模拟径流波动最明显。图 3(d) 包含了径流洪峰过程和退水过程,可以看出,1 km 分辨率模型能更好地反映洪峰过程、峰值和峰现时间,其峰现时间模拟结果与实际峰现时间一致,模拟的洪峰略高于实际洪峰;5 km 分辨率模型模拟的峰现时间较实际峰现时间推迟了 4 d,模拟的洪峰流量低于实际洪峰流量;10 km 分辨率模型模拟的峰现时间较实际洪峰时间推迟了 7 d,模拟的峰型较 1 km 和 5 km 分辨率模型更为平坦。VIC 模型分辨率越低,对枯水期以及退水过程的模拟越准确,从图 3(d) 可以看出,对于实际退水过程,10 km 分辨率模型模拟的退水过程与实际情况最为接近,而 1 km 分辨率模型模拟的退水过程波动大,难以反映实际的退水情况。

为 1 km 时,对峰现时间、洪峰流量模拟更准确,但难以模拟退水过程。VIC 模型分辨率为 10 km 时,对枯水期和退水过程的模拟结果最理想。

参考文献:

- [1] 贾玉雪,张奇,曾冰茹,等. 湘江流域多源降水与气温产品组合的径流极值模拟精度评价[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(2):8-16. (JIA Yuxue,ZHANG Qi,ZENG Bingru, et al. Accuracy evaluation of runoff extremum simulation for the product combination of multi-source precipitation and temperature in the Xiangjiang River Basin [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2023,51(2):8-16. (in Chinese))
- [2] 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))
- [3] 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))
- [4] YAO Cheng, LI Zhijia, ZHANG Ke, et al. Evaluating performance dependency of a geomorphologic instantaneous unit hydrograph-based hydrological model on DEM resolution [J]. Water Science and Engineering, 2022,15(3):179-188.
- [5] 张永勇,张士锋,翟晓燕,等. 三江源区径流演变及其对气候变化的响应[J]. 地理学报,2012,67(1):71-82. (ZHANG Yongyong,ZHANG Shifeng,ZHAI Xiaoyan, et al. Runoff variation in the Three Rivers Source Region and its response to climate change [J]. Acta Geographica Sinica,2012,67(1):71-82. (in Chinese))
- [6] 李镇洋,李国芳,高倩雨,等. 变化环境下嫩江富拉尔基站径流响应[J]. 水利水电科技进展,2022,42(2):35-40. (LI Zhenyang, LI Guofang, GAO Qianyu, et al. Runoff response of Fulaerji station in Nenjiang River under changing environment [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2022,42(2):35-40. (in Chinese))
- [7] 郭禹含,王中根,伍玉良. 多源再分析降水数据在拉萨河流域应用对比研究[J]. 地理科学进展,2017,36(8):1033-1039. (GUO Yuhan,WANG Zhonggen,WU Yuliang. Comparison of applications of different reanalyzed precipitation data in the Lhasa River Basin based on HIMS model[J]. Progress in Geography,2017,36(8):1033-1039. (in Chinese))
- [8] 刘俊峰,杨建平,陈仁升,等. SRM 融雪径流模型在长江源区冬克玛底河流域的应用[J]. 地理学报,2006,61(11):1149-1159. (LIU Junfeng,YANG Jianping,CHEN Rensheng,et al. The simulation of snowmelt runoff model in the Dongkemadi River Basin,headwater of the Yangtze River[J]. Acta Geographica Sinica,2006,61(11):1149-1159. (in Chinese))
- [9] 谭秋阳,徐宗学,赵彦军,等. CMFD 数据集在雅江年楚河流域的适用性分析[J]. 北京师范大学学报(自然科学版),2021,57(3):372-379. (TAN Qiuyang,XU Zongxue,ZHAO Yanjun, et al. Applicability of China meteorological forcing dataset to the Nianchu River Basin [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science),2021,57(3):372-379. (in Chinese))
- [10] 程志刚,刘晓东,范广洲,等. 21 世纪长江黄河源区径流量变化情势分析[J]. 长江流域资源与环境,2010,19(11):1333-1339. (CHENG Zhigang,LIU Xiaodong,FAN Guangzhou,et al. Trends in runoff of the source region of the Yangtze River and the Yellow River for 21st century [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2010,19(11):1333-1339. (in Chinese))
- [11] 刘文丰,徐宗学,刘浏,等. 基于 VIC 模型的拉萨河流域分布式水文模拟[J]. 北京师范大学学报(自然科学版),2012,48(5):524-529. (LIU Wenfeng,XU Zongxue,LIU Liu, et al. Distributed hydrological simulation in the Lhasa River Basin based on VIC model [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science),2012,48(5):524-529. (in Chinese))
- [12] CUO Lan, ZHANG Yongxin, GAO Yanhong, et al. The impacts of climate change and land cover/use transition on the hydrology in the upper Yellow River Basin, China[J]. Journal of Hydrology,2013,502:37-52.
- [13] 王磊,李秀萍,周璟,等. 青藏高原水文模拟的现状 & 未来[J]. 地球科学进展,2014,29(6):674-682. (WANG Lei,LI Xiuping,ZHOU Jing, et al. Hydrological modelling over the Tibetan Plateau: current status and perspective [J]. Advances in Earth Science,2014,29(6):674-682. (in Chinese))
- [14] 韩煜娜,左德鹏,王国庆,等. 变化环境下青藏高原陆地水储量演变格局及归因[J]. 水资源保护,2023,39(2):199-207. (HAN Yuna,ZUO Depeng,WANG Guoqing, et al. Evolution pattern and attribution analysis of terrestrial water storage in Tibetan Plateau under changing environment [J]. Water Resources Protection, 2023, 39 (2):199-207. (in Chinese))
- [15] 刘苏峡,刘昌明,赵卫民. 无测站流域水文预测(PUB)的研究方法[J]. 地理科学进展,2010,29(11):1333-1339. (LIU Suxia,LIU Changming,ZHAO Weimin. Towards the methodology for predictions in ungauged

- basins[J]. *Progress in Geography*, 2010, 29(11): 1333-1339. (in Chinese))
- [16] 刘昌明, 白鹏, 王中根, 等. 稀缺资料流域水文计算若干研究: 以青藏高原为例[J]. *水利学报*, 2016, 47(3): 272-282. (LIU Changming, BAI Peng, WANG Zhonggen, et al. Study on prediction of ungaged basins: a case study on the Tibetan Plateau [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2016, 47(3): 272-282. (in Chinese))
- [17] XU Jintao, MA Ziqiang, YAN Songkun, et al. Do ERA5 and ERA5-land precipitation estimates outperform satellite-based precipitation products? A comprehensive comparison between state-of-the-art model-based and satellite-based precipitation products over mainland China [J]. *Journal of Hydrology*, 2022, 605: 127353.
- [18] 唐豪, 王晓云, 陈伏龙, 等. 基于 ERA5-Land 数据集的玛纳斯河径流模拟研究[J]. *地学前沿*, 2022, 29(3): 271-283. (TANG Hao, WANG Xiaoyun, CHEN Fulong, et al. Simulation of Manas River runoff based on ERA5-Land dataset [J]. *Earth Science Frontiers*, 2022, 29(3): 271-283. (in Chinese))
- [19] SAHA S, MOORTHI S, PAN Hualu, et al. The NCEP climate forecast system reanalysis [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2010, 91(8): 1015-1058.
- [20] DEE D P, UPPALA S M, SIMMONS A J, et al. The ERA-interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2011, 137(656): 553-597.
- [21] KOBAYASHI S, OTA Y, HARADA Y, et al. The JRA-55 reanalysis: general specifications and basic characteristics [J]. *Journal of the Meteorological Society of Japan, Ser. II*, 2015, 93(1): 5-48.
- [22] HE Jie, YANG Kun, TANG Wenjun, et al. The first high-resolution meteorological forcing dataset for land process studies over China [J]. *Scientific Data*, 2020, 7(1): 25.
- [23] 丁光旭, 郭家力, 汤正阳, 等. 多种降水再分析数据在长江流域的适用性对比[J]. *人民长江*, 2022, 53(9): 72-79. (DING Guangxu, GUO Jiali, TANG Zhengyang, et al. Evaluation on applicability of various reanalysis datasets of precipitation in Changjiang River Basin [J]. *Yangtze River*, 2022, 53(9): 72-79. (in Chinese))
- [24] 高黎明, 张乐乐, 沈永平, 等. ERA-Interim 和 CMFD 气象驱动数据在新疆额尔齐斯河流域的适用性评价[J]. *冰川冻土*, 2022, 44(1): 179-187. (GAO Liming, ZHANG Lele, SHEN Yongping, et al. Evaluation of applicability of ERA-Interim and CMFD meteorological forcing data in the Irtysh River Basin, Xinjiang [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2022, 44(1): 179-187. (in Chinese))
- [25] 温婷婷, 郭英香, 董少睿, 等. 1979—2017 年 CRU、ERA5、CMFD 格点降水数据在青藏高原适用性评估[J]. *干旱区研究*, 2022, 39(3): 684-697. (WEN Tingting, GUO Yingxiang, DONG Shaorui, et al. Assessment of CRU, ERA5, CMFD grid precipitation data for the Tibetan Plateau from 1979 to 2017 [J]. *Arid Zone Research*, 2022, 39(3): 684-697. (in Chinese))
- [26] 赵彤, 赵梦凡, 周秉荣, 等. 三种再分析气温降水资料在青藏高原的适用性评价[J]. *沙漠与绿洲气象*, 2023, 17(3): 116-125. (ZHAO Tong, ZHAO Mengfan, ZHOU Bingrong, et al. Applicability evaluation for three reanalysis datasets of temperature and precipitation over the Tibetan Plateau [J]. *Desert and Oasis Meteorology*, 2023, 17(3): 116-125. (in Chinese))
- [27] HERBACH H, BELL B, BERRISFORD P, et al. The ERA5 global reanalysis [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2020, 146(730): 1999-2049.
- [28] JIANG Shanhu, WEI Linyong, REN Liliang, et al. Evaluation of IMERG, TMPA, ERA5, and CPC precipitation products over Chinese mainland: spatiotemporal patterns and extremes [J]. *Water Science and Engineering*, 2023, 16(1): 45-56.
- [29] MUÑOZ-SABATER J, DUTRA E, AGUSTÍ-PANAREDA A, et al. ERA5-land: a state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications [J]. *Earth System Science Data*, 2021, 13(9): 4349-4383.
- [30] 曲学斌, 林聪, 辛孝飞, 等. ERA5-Land、MERRA2 再分析资料在呼伦贝尔地区的适用性研究[J]. *沙漠与绿洲气象*, 2022, 16(5): 24-30. (QU Xuebin, LIN Cong, XIN Xiaofei, et al. Applicability of ERA5-land and MERRA2 temperature and precipitation data in Hulun Buir Region [J]. *Desert and Oasis Meteorology*, 2022, 16(5): 24-30. (in Chinese))
- [31] WU Xiaojing, SU Jianbin, REN Weiwei, et al. Statistical comparison and hydrological utility evaluation of ERA5-Land and IMERG precipitation products on the Tibetan Plateau [J]. *Journal of Hydrology*, 2023, 620: 129384.
- [32] NKIAGA E, NAWAZ N, LOVETT J C. Evaluating global reanalysis datasets as input for hydrological modelling in the Sudano-Sahel region [J]. *Hydrology*, 2017, 4(1): 13.
- [33] LIANG Xu, 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.
- [34] HAMMAN J J, NIJSSEN B, BOHN T J, et al. The variable infiltration capacity model version 5 (VIC-5): infrastructure improvements for new applications and reproducibility [J]. *Geoscientific Model Development*, 2018, 11(8): 3481-3496.
- [35] 刘家福, 李京, 李秀霞. 中美典型水文模型比较研究[J]. *自然灾害学报*, 2014, 23(1): 17-23. (LIU Jiafu, LI Jing, LI Xiuxia. Intercomparison of typical hydrological models developed by China and United States [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2014, 23(1): 17-23. (in Chinese))

(下转第 147 页)

- [33] 虎永彪,张艳萍,史小宁,等.厚唇裸重唇鱼人工繁殖技术[J].中国水产,2014(8):63-64.(HU Yongbiao,ZHANG Yanping,SHI Xiaoning, et al. Artificial breeding techniques of *Gymnodiplocheilus pachycheilus* [J]. China Fisheries,2014(8):63-64. (in Chinese))
- [34] 胡仁云,张运海,舒旗林,等.重口裂腹鱼的胚胎发育观察[J].江苏农业科学,2020,48(14):198-203.(HU Renyun,ZHANG Yunhai,SHU Qilin, et al. Observation of embryonic development of *Schizothorax davidi* [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2020, 48 (14): 198-203. (in Chinese))
- [35] 杨泽凡,胡鹏,王玉莲,等.鱼类产卵敏感期河流生态流速的分区分类阈值研究[J].水利学报,2024,55(2):190-201.(YANG Zefan,HU Peng,WANG Yulian, et al. Zoning and classification of ecological flow velocity thresholds required by river fish during sensitivity spawning periods [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2024,55(2):190-201. (in Chinese))
- [36] 洪思扬,王红瑞,朱中凡,等.基于栖息地指标法的生态流量研究[J].长江流域资源与环境,2018,27(1):168-175.(HONG Siyang,WANG Hongrui,ZHU Zhongfan, et al. Research of ecologic flow based on habitat index method [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin,2018,27(1):168-175. (in Chinese))
- [37] 茹辉军,李云峰,沈子伟,等.大渡河流域川陕哲罗鲑分布与栖息地特征研究[J].长江流域资源与环境,2015,24(10):1779-1785.(RU Huijun,LI Yunfeng,SHEN Ziwei, et al. Distribution and habitat character of *Hucho bleekeri* in the Dadu River Basin [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin,2015,24(10):1779-1785. (in Chinese))
- [38] BARTSCHI D K. A habitat-discharge method of determining instream flows for aquatic habitat [C]// Proceedings of Symposium and Specility Conference on Instream Flow Needs II. Bethesda: American Fisheries Society,1976:285-294.
- [39] THARME R E. A global perspective on environmental flow assessment: emerging trends in the development and application of environmental flow methodologies for rivers [J]. River Research and Applications,2003,19(5/6):397-441.

(收稿日期:2023-12-15 编辑:施业)

(上接第98页)

- [36] LUO Lifeng,WOOD E F. Monitoring and predicting the 2007 US drought[J]. Geophysical Research Letters,2007,34(22):L22702.
- [37] 孙昭敏,吴志勇,何海,等.基于改进VIC模型的岔巴沟流域水沙耦合模拟研究[J].水电能源科学,2020,38(3):30-33.(SUN Zhaomin,WU Zhiyong,HE Hai, et al. Coupled flow-sediment simulation of Chabagou River Basin based on improved VIC model [J]. Water Resources and Power,2020,38(3):30-33. (in Chinese))
- [38] 吴志勇,徐征光,肖恒,等.基于模拟土壤含水量的长江上游干旱事件时空特征分析[J].长江流域资源与环境,2018,27(1):176-184.(WU Zhiyong,XU Zhengguang,XIAO Heng, et al. Spatio-temporal analysis of drought events in the upper reaches of Yangtze River Basin based on simulation of soil moisture [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin,2018,27(1):176-184. (in Chinese))
- [39] 吴志勇,白博宇,何海,等.珠江流域1981—2020年水文干旱时空特征分析[J].河海大学学报(自然科学版),2023,51(1):1-9.(WU Zhiyong,BAI Boyu,HE Hai, et al. Temporal and spatial characteristics of hydrological drought in the Pearl River Basin from 1981 to 2020 [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2023,51(1):1-9. (in Chinese))
- [40] XU Huating,WU Zhiyong,HE Hai, et al. Quantitative analysis of the uncertainty of drought process simulation based on atmospheric - hydrological coupling in different climate zones [J]. Water,2023,15(18):3286.
- [41] SUN He,SU Fengge,YAO Tandong, et al. General overestimation of ERA5 precipitation in flow simulations for high mountain Asia basins [J]. Environmental Research Communications,2021,3(12):121003.
- [42] HANSEN M C,DEFRIES R S,TOWNSHEND J R G, et al. Global land cover classification at 1km spatial resolution using a classification tree approach [J]. International Journal of Remote Sensing,2000,21(6/7):1331-1364.
- [43] REYNOLDS C A,JACKSON T J,RAWLS W J. Estimating soil water-holding capacities by linking the food and agriculture organization soil map of the world with global pedon databases and continuous pedotransfer functions [J]. Water Resources Research,2000,36(12):3653-3662.
- [44] LU Guihua,LIU Jingjing,WU Zhiyong, et al. Development of a large-scale routing model with scale independent by considering the damping effect of sub-basins [J]. Water Resources Management,2015,29(14):5237-5253.
- [45] 刘扬李,周祖昊,刘佳嘉,等.基于水热耦合的青藏高原分布式水文模型:II.考虑冰川和冻土的尼洋河流域水循环过程模拟[J].水科学进展,2021,32(2):201-210.(LIU Yangli,ZHOU Zuhao,LIU Jiajia, et al. Distributed hydrological model of the Qinghai Tibet Plateau based on the hydrothermal coupling: II. simulation of water cycle processes in the Niyang River Basin considering glaciers and frozen soils [J]. Advances in Water Science,2021,32