

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.01.001

基于遥感土壤湿度数据的分布式水文模型参数联合率定方法

李致家¹, 邓帆¹, 张汉辰², 李安琪¹

(1. 河海大学水文水资源学院; 2. 宁夏大学地理科学与规划学院)

摘要: 为探究在半干旱小流域引入遥感土壤湿度数据辅助分布式水文模型参数率定的可行性,提出了融合硬数据(流量)与软数据(遥感土壤湿度)的参数联合率定方法。该方法将 CLDAS 卫星遥感土壤湿度数据应用于 Grid-Multi-GA 模型中,采用多目标优化框架,以流量模拟的纳什效率系数和土壤湿度时空分布的 Spearman 相关系数作为双评价指标,通过系统调整权重实现两类指标的动态权衡,最终确定最优权重及其对应的产流和汇流参数组合,同时通过设置参数未率定、仅用流量率定、流量与土壤湿度联合率定 3 种情景,验证联合率定方法的可行性。宁夏原州流域的实例验证结果表明:流量与土壤湿度联合率定的 Grid-Multi-GA 模型在小流域中的洪水模拟中,纳什效率系数大于 0.7, Spearman 相关系数为 0.84,明显优于未率定和仅用流量率定的 Grid-Multi-GA 模型。

关键词: 半干旱地区; Grid-Multi-GA 模型; 参数率定; 径流模拟; 遥感土壤湿度; 原州流域

Joint calibration method of distributed hydrological model parameters based on remote sensing soil moisture data

Li Zhijia¹, Deng Fan¹, Zhang Hanchen², Li Anqi¹

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University;

2. School of Geography and Planning, Ningxia University)

Abstract: To explore the feasibility of introducing remote sensing soil moisture data to assist in distributed hydrological model parameter calibration in semi-arid small watersheds, a joint parameter calibration method that integrated hard data (flow rate) and soft data (remote sensing soil moisture) was proposed. CLDAS satellite remote sensing soil moisture data were applied to the Grid-Multi-GA model. A multi-objective optimization framework was adopted, and the Nash efficiency coefficient of flow rate simulation and the Spearman correlation coefficient of soil moisture's spatiotemporal distribution were used as dual evaluation indicators. By adjusting the weights of the system to dynamically balance two types of indicators, the optimal weight and its corresponding runoff generation and flow routing parameter combination were ultimately determined. To validate the feasibility of the joint calibration method, three model scenarios were established, namely uncalibrated parameters, calibration using only discharge, and joint calibration of discharge and soil moisture. The case study results in the Ningxia Yuanzhou Watershed demonstrate that the Grid-Multi-GA model jointly calibrated by flow rate and soil moisture achieves a Nash efficiency coefficient greater than 0.7 and a Spearman correlation coefficient of 0.84 in flood simulation for small watersheds, significantly outperforming both the uncalibrated model and the model calibrated only with flow rate.

Key words: semi-arid region; Grid-Multi-GA model; parameter calibration; runoff simulation; remote sensing soil moisture; the Yuanzhou Watershed

水文模型作为表征流域降雨-径流响应关系的核心工具,在水文预报、水资源优化配置及综合管理等领域得到广泛应用^[1-4]。水文模型在参数率定时通常仅使用流量资料,且普遍认为径流序列的时长越久,越能精细刻画流域水文过程的内在特征,进而有助于提升模型参数率定的精度,因此模型参数的率定效果极大程度上取决于流量资料的序列长度与数据质量。然而只使用硬数据(直接观测、精度高、物理意义明确、不确定性低的数据)进行参数率定存在显著局限:①限制了模型发展;②对完整水文资料的依赖性过强,使其在资料缺失或无资料的小流域(尤其是干旱、半干旱地区)表现欠佳,核心问题在于参数难以精确定。为突

基金项目: 宁夏回族自治区重点研发项目(2023BEG02054);国家自然科学基金项目(52079035)

作者简介: 李致家(1962—),男,教授,博士,主要从事水文预报研究。E-mail: zjli@hhu.edu.cn

通信作者: 邓帆(2001—),男,硕士研究生,主要从事水文预报研究。E-mail: 231301010005@hhu.edu.cn

破这一局限,需要协同运用硬数据和软数据^[5]。软数据指通过间接推断、低分辨率手段获取的数据,虽存在一定不确定性,物理意义直接性较弱,但具备空间覆盖广等优势。遥感土壤湿度数据作为软数据的一种,是连接降水入渗、蒸散发消耗与径流生成的核心状态变量,既能直接反映流域蓄水容量的动态饱和程度,又可通过阈值响应机制揭示水文过程的非线性特征,其模拟精度直接决定径流预测质量^[6-11]。

随着卫星遥感技术的持续革新与发展,覆盖面广、时空分辨率高的水文遥感数据集日益丰富,如陆面数据同化系统(CLDAS)、土壤湿度与海洋盐度卫星、土壤湿度主动被动探测卫星、高级微波扫描辐射计2、高级散射计及风云系列气象卫星反演产品等^[12-16]。这些由遥感获取的陆面蒸发、土壤湿度等数据可为水文建模的理论创新与应用拓展提供强有力的数据支撑。同时,随着卫星遥感、GIS、多源数据融合、水文大数据等技术的发展,降低了水文模型对水文资料的依赖性。

Grid-Multi-GA 模型作为 Grid-GA 模型的优化版本,通过将土壤垂向划分为上下两层,更贴合网格尺度下土壤性质的垂向差异,在半干旱地区径流模拟中展现出优异性能^[2]。但该模型当前仍采用传统手动率定方法,依赖专家经验逐参数调试,效率与精度均有提升空间。鉴于此,本文通过在产流层引入 CLDAS 土壤湿度数据与模型模拟值进行动态同化,利用遥感土壤湿度数据验证产流模块的土壤水分动态模拟能力,并在汇流层延续传统参数率定方法,提出“土壤湿度动态约束-有限流量验证”的联合率定方法,通过宁夏原州流域对该方法进行验证,以期小流域水文模型参数率定提供新思路。

1 研究方法

1.1 Grid-Multi-GA 模型

Grid-GA 模型^[17-20]充分考虑了流域的下垫面和降雨空间分布的不均匀性,主要划分为蒸散发计算、产流计算及汇流计算三大功能模块,其中蒸散发与产流计算在独立网格单元内完成,汇流计算则严格遵循网格间的汇流演算次序逐单元推进。考虑到土壤在垂向上具有分布异质性,且不同深度土层的产流特性存在显著差异,在 Grid-GA 模型基础上,学者们将土层划分为上下两层,构建了产流过程更贴合流域实际水文情势的 Grid-Multi-GA 模型^[21-26]。其计算流程如图1所示(图中 I_p 为当前时段的降雨强度; f_t 为 t 时段的下渗容量; F_t 为 t 时段的累积下渗量; F_p 为当前时段的下渗能力)。

相比于 Grid-GA 模型,Grid-Multi-GA 模型对网格下渗能力的计算有所优化,即湿润锋位于上层土壤时,按照 GA 下渗公式进行计算,当湿润锋进入下层后,按照式(1)进行计算,其余模块均与 Grid-GA 模型产流计算部分相同。Grid-Multi-GA 模型主要参数集中在产流、汇流部分,其中汇流参数主要包括蓄量流量关系曲线坡度、流量比重系数、河网消退系数、滞后时间,取值范围分别为 $0 \sim 0.5$ 、 $0 \sim 0.5$ 、 $0.001 \sim 0.999$ 、 $1 \sim 10$ h;产流参数中的最大累积下渗量无固定范围,其他参数范围见表1。

$$f_t = \frac{K_1 K_2 (\theta_{s2} - \theta_{l2})}{H_1 K_2 (\theta_{s2} - \theta_{l2}) + K_1 [F_t - H_1 (\theta_{s1} - \theta_{l1})]} \left[\Psi_2 + H_1 + \frac{F_t - H_1 (\theta_{s1} - \theta_{l1})}{\theta_{s2} - \theta_{l2}} \right] \quad (1)$$

式中: K_1 、 K_2 分别为上层、下层土壤的饱和和水力传导度; Ψ_2 为下层湿润锋处土壤吸力; θ_{s1} 、 θ_{s2} 分别为上层、下层土壤饱和含水率; θ_{l1} 、 θ_{l2} 分别为上层、下层土壤的初始土壤含水率; H_1 为上层土壤厚度。

1.2 评价标准及目标函数

依据传统水文模拟与预报精度评定准则,参考 GB/T 22482—2008《水文情报预报规范》,选择4种评价指标:径流深相对误差,以实测值的20%作为许可误差,当该值大于20 mm时取20 mm,小于3 mm时取

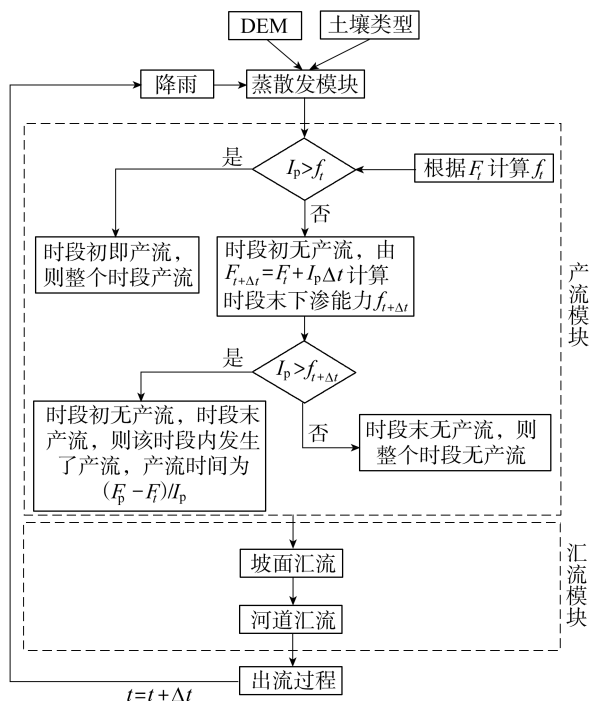


图1 Grid-Multi-GA 模型计算流程

Fig. 1 Grid-Multi-GA model calculation flowchart

表 1 Grid-Multi-GA 模型产流参数取值范围					
Table 1 Runoff generation parameter value ranges of Grid-Multi-GA model					
土壤类型	土层	饱和孔隙度	有效孔隙度	湿润锋处土壤吸力/mm	饱和水力传导度/(mm/h)
壤土	上层	0.427~0.597	0.376~0.576	2.14~46.81	0.34
	下层	0.408~0.616	0.382~0.614	1.01~40.49	0.34
粉质壤土	上层	0.444~0.610	0.425~0.603	1.89~63.05	0.65
	下层	0.430~0.636	0.387~0.643	0.86~60.82	0.65
黏壤土	上层	0.434~0.560	0.328~0.532	6.13~118.90	0.10
	下层	0.401~0.501	0.228~0.530	4.36~78.73	0.10

3 mm;洪峰流量相对误差,以实测洪峰流量的 20%作为许可误差判定预报洪峰是否合格;峰现时间误差,以 3 h 作为许可误差;纳什效率系数,用来评价洪水实测过程与预报过程之间的拟合程度,越接近 1,说明模拟的效果越好。采用纳什效率系数作为径流模拟的目标函数;为评估遥感土壤湿度与 Grid-Multi-GA 模型模拟土壤湿度的一致性,将二者的 Spearman 相关系数作为土壤湿度的目标函数^[27-28]。

1.3 参数率定方法

在参数联合率定过程中,将水文模型参数划分为产流和汇流参数,利用遥感土壤湿度数据和径流数据对这两类参数进行率定^[29],主要步骤如下。

a. 构建目标函数。使用径流和土壤湿度数据率定模型时,目标函数 F_{out} 为:

$$F_{out} = wF_Q + (1 - w)F_{SM} \tag{2}$$

式中: w 为径流目标函数的权重; F_Q 为径流目标函数; F_{SM} 为土壤湿度目标函数。

b. 产流和汇流参数率定。模型采用产流和汇流参数联合自动率定方法,通过单一优化框架同步校准产流参数(土壤孔隙度、湿润锋吸力、饱和导水率等)与汇流参数(汇流滞时、河道曼宁系数等)。该过程由双目标协同驱动,以实测流量最优化为目标构建函数一,以土壤湿度数据最优化为目标构建函数二。基于 Python 优化框架,在参数物理可行域约束下,通过最大化加权综合目标函数实现双目标同步优化迭代。针对不同权重组合,分别运行模型,当综合目标函数达到最小值时,记录对应的产流和汇流参数最优解集,最终分析权重代表性并确定全局最优参数配置,确保水文过程模拟的系统一致性。

c. 参数率定结果整合。在参数率定过程中,通过产流参数与汇流参数的协同优化,确保模型整体性能。为确定最优 w ,将 w 设置为多个值,分别对模型进行参数率定。由表 2 可知, $w=0.2$ 时 F_{out} 最大,因此将 w 设置为 0.2。

2 实例验证

2.1 研究区概况

以宁夏回族自治区固原市清水河的原州流域为研究区,流域面积约 105 km²,经纬度范围为 35°39'N~36°36'N、106°04'E~106°18'E,选取 4 个雨量站、1 个水文站(图 2)。清水河发源于六盘山东麓,流经宁夏和甘肃,最终注入黄河,流域面积 14 481 km²,年平均水面蒸发量为 300 mm。该河流域受温带大陆性气候影响,水资源稀缺,降水时空分布不均,70%以上径流集中在汛期,且多以洪水形式出现。流域内水质差,河水矿化度高,水土流失严重。主河道在沈家河水库以上比较顺直,沈家河水库以下蛇曲蜿蜒。原州区境内,较大支流有 3 条,分别为冬至河、中河、苋麻河。清水河西侧支流洪水多、洪量大,主要来自冬至河、中河、苋麻河等支流。东部属黄土丘陵区,支流多而洪量小,主要有毛家沟、杨达子沟、大红沟、石景河等。

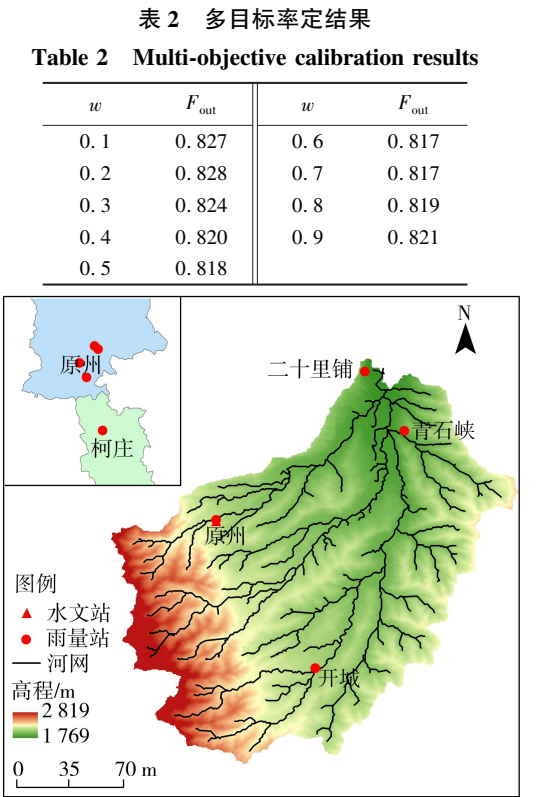


图 2 原州流域概况

Fig. 2 Overview of the Yuanzhou Watershed

2.2 研究数据

用于率定 Grid-Multi-GA 模型参数的数据主要包括 2009—2022 年实测降水、蒸发、径流数据、6 场洪水数据以及流域 DEM、内部栅格单元的坡度坡向、流经长度、流域平均坡度、平均河道坡度、植被类型、土壤类型与地形指数。初始 DEM 数据为美国太空总署(NASA) 与国防部国家测绘局(NIMA) 联合测量的 SRTM 数据,分辨率为 30 m,通过地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn>) 下载。参考姚成^[30] 的研究,将 DEM 等资料通过 ArcGIS 处理后得到 input 数据。

CLDAS 土壤湿度数据来自中国气象局陆面数据同化系统(CLDAS V2.0) 近实时产品数据集(<https://data.cma.cn/>),其空间分辨率为 0.0625°、时间分辨率为 1 d,并提供 2017 年以来垂直分为 5 层(0~5、0~10、10~40、40~100、100~200 cm) 的土壤湿度数据^[31-35]。本文选取了 2018 年 1 月至 2022 年 5 月的 0~10、10~40、40~100 cm 深度的土壤湿度数据。根据 Grid-Multi-GA 模型的两层土壤结构,将 CLDAS 土壤湿度数据重新分层转换:0~30 cm 数据转换为模型表层土壤湿度,30~100 cm 数据转换为模型深层土壤湿度。

2.3 结果与分析

设置了 3 种不同的率定情景进行对照:①情景 1 (未率定),采用 Grid-Multi-GA 模型默认参数集或基于区域土壤属性图获取的先验参数,未经任何率定;②情景 2 (仅用流量率定),以流域出口断面实测流量为唯一优化目标,代表传统水文模型率定方法;③情景 3 (流量与土壤湿度联合率定),同时以出口断面实测流量和流域土壤湿度为目标函数。

引入 CLDAS 遥感土壤湿度数据(2017 年 7 月、2018 年 5 月、2019 年 8 月、2022 年 5 月)对水文模型参数率定。由图 3 可知,从时间动态一致性上看,流域平均模拟土壤湿度与 CLDAS 遥感土壤湿度在时间序列上表现出较高的同步性,平均 Spearman 相关系数达到 0.84,表明两者在时间上的动态变化趋势非常吻合。同时,模拟土壤湿度与遥感土壤湿度在流域边界形态、空间梯度分布等格局特征上也呈现显著的相似性。

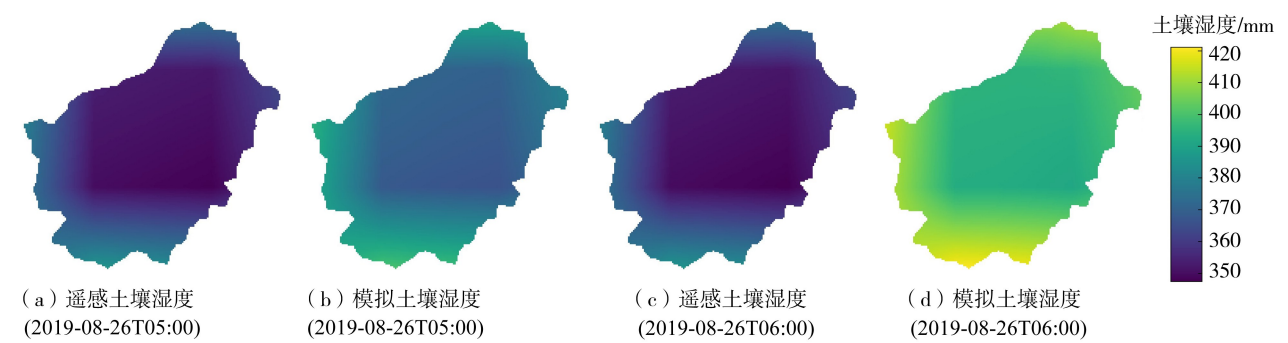


图3 模拟土壤湿度与遥感土壤湿度时间变化

Fig.3 Variation of simulated soil moisture and remote sensing soil moisture with time

情景 1 无需率定,故仅对比情景 2 和情景 3。由表 3 可知;与情景 2 相比,率定期情景 3 将土壤湿度动态同步性(Spearman 相关系数) 提高至 0.84,径流深相对误差降低至 3.47%,洪峰流量相对误差减小为 -2.01%,峰现时间误差减小为 0,纳什效率系数提升至 0.81。率定期模拟评价指标表明,引入土壤湿度进行参数率定,提升了土壤湿度的模拟表现,从而提高了洪水的模拟精度。在参数率定中,可以针对每个网格单元分别对这些参数进行率定,以更准确地反映流域土壤物理特性,并进一步提升模型的整体模拟能力。

表3 模型率定期和汇流验证期模拟评价指标

Table 3 Simulation evaluation indices for model calibration and flow routing verification periods										
情景	Spearman 相关系数		径流深相对误差/%		洪峰流量相对误差/%		峰现时间误差/h		纳什效率系数	
	率定期	验证期	率定期	验证期	率定期	验证期	率定期	验证期	率定期	验证期
情景 1		0.42		30.68		40.21		5		0.53
情景 2	0.71	0.70	4.38	9.02	5.83	5.47	1	1	0.78	0.71
情景 3	0.84	0.85	3.47	8.11	-2.01	-2.25	0	0	0.81	0.74

注:表中评价指标分别为率定期和验证期的平均值。

由表 3、图 4 可知,验证期 3 种情景的模拟差异较为显著:情景 1,径流深相对误差为 30.68%,洪峰流量相对误差为 40.21%,表明其完全缺乏预测能力;情景 2 保持了基本可靠性,纳什效率系数为 0.71,但径流深相对误差为 9.02%,洪峰流量相对误差为 5.47%;情景 3 的 Spearman 相关系数高达 0.85,土壤湿度动态同步

性最优,洪峰流量相对误差仅为-2.25%,峰现时间误差为 0,显著优于情景 1 和情景 2。情景 3 在涨洪阶段显著优于其他情景,主要源于遥感土壤湿度数据有效约束了降雨初期的土壤湿度变化过程;至洪峰处,3 个情景模拟差异明显缩窄,因土壤饱和和后产流主导因素转向降雨强度;退水期虽情景 3 仍保持小幅优势,但受限于模型主要考虑超渗产流,地面径流占比为主,在退水阶段呈现更为缓慢的态势,因此落洪阶段的拟合较差。

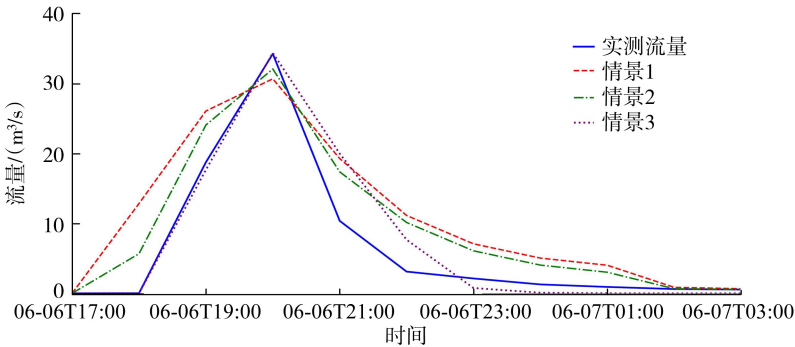


图 4 3 种情景的 2013060617 号洪水流量过程线

Fig. 4 Discharge hydrographs of flood event No. 2013060617 under three scenarios

2009—2022 年研究区仅有 6 场洪峰大于 $10\text{ m}^3/\text{s}$ 的洪水,洪水编号分别为 2013060617、2014072712、2016082416、2018071007、2019082605、2022071016,基于情景 3 验证期这 6 场洪水的模拟评价指标见表 4。径流深模拟平均相对误差约 10%,全部洪次均为合格,洪峰流量平均相对误差约 5%,达标率为 100%;峰现时间在 4 次洪次中误差为 0,仅 2014072712 洪次实测洪峰滞后、2019082605 洪次模拟洪峰提前,主要是因为降雨空间分布不均;纳什效率系数均大于 0.70,表明了该方法在研究区的适用性。

表 4 情景 3 模型验证期模拟评价指标

Table 4 Simulation evaluation indices for model verification period in Scenario 3

洪号	径流深相对误差/%	洪峰流量相对误差/%	峰现时间误差/h	纳什效率系数
2013060617	18.14	-1.67	0	0.71
2014072712	2.52	0.95	1	0.78
2016082416	11.56	1.21	0	0.73
2018071007	11.23	-8.25	0	0.71
2019082605	4.11	-1.48	-1	0.76
2022071016	2.11	1.96	0	0.74

Grid-Multi-GA 模型在验证期原州流域的汇流模拟达到预期,通过在参数率定时引入长时段连续的遥感土壤湿度数据,能在小流域地区突破传统硬数据依赖框架,基于硬数据与软数据的融合的土壤湿度动态约束-有限径流验证方法在小流域地区展现出显著可行性。

3 结 论

- a. 情景 1 验证期洪峰流量相对误差和径流深相对误差均不合格,证实先验参数不可行;情景 2 虽洪峰流量相对误差为 5.47%,但径流深相对误差为 9.02%,且土壤湿度同步性偏低;情景 3 则实现洪水高精度模拟与土壤湿度最佳模拟,系统验证了联合率定方法的可行性。
- b. 流量与土壤湿度联合率定的 Grid-Multi-GA 模型的模拟评价指标满足精度要求,证实该模型在宁夏半干旱流域具有可靠的洪水模拟能力。本文参数率定方法更好地考虑土壤湿度时空分布,有利于进一步提高洪水模拟预报精度。

参考文献:

[1] 程艳,裴盼盼,张祥祥. 国内外流域水文模型研究进展[J]. 现代农业科技,2023(23):133-136. (Cheng Yan,Pei Panpan,Zhang Xiangxiang. Research progress on watershed hydrological models at home and abroad[J]. Modern Agricultural Science and Technology,2023(23):133-136. (in Chinese))

[2] 杜若愚,程龙,蒲博文,等. Grid-XAJ 与 Grid-GA 模型在小流域洪水模拟中的适用性对比验证[J/OL]. 华北水利水电大学学报(自然科学版),2024-12-12. <https://link.cnki.net/urlid/41.1432.TV.20241212.1102.002>. (Du Ruoyu,Cheng Long,Pu

- Bowen, et al. Comparison and verification of the applicability of Grid-XAJ and Grid-GA models in small watershed flood simulation[J/OL]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2024-12-12. <https://link.cnki.net/urlid/41.1432.TV.20241212.1102.002>. (in Chinese))
- [3] Roy A, Kasiviswanathan K S, Patidar S, et al. A novel physics-aware machine learning-based dynamic error correction model for improving streamflow forecast accuracy[J]. Water Resources Research, 2023, 59(2): e2022WR033318.
- [4] 李致家, 姚成, 张珂, 等. 基于网格的精细化降雨径流水文模型及其在洪水预报中的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2017, 45(6): 471-480. (Li Zhijia, Yao Cheng, Zhang Ke, et al. Research and application of the high-resolution rainfall runoff hydrological model in flood forecasting[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2017, 45(6): 471-480. (in Chinese))
- [5] Seibert J, McDonnell J J. On the dialog between experimentalist and modeler in catchment hydrology: use of soft data for multicriteria model calibration[J]. Water Resources Research, 2002, 38(11): 1241.
- [6] 李巧玲, 刘兴文, 李致家, 等. 多源多层土壤湿度实时同化及在实时洪水预报中的应用[J]. 水科学进展, 2024, 35(5): 773-783. (Li Qiaoling, Liu Xingwen, Li Zhijia, et al. Real-time multi-source information assimilation improves multi-layer soil moisture for real-time flood forecasting[J]. Advances in Water Science, 2024, 35(5): 773-783. (in Chinese))
- [7] 张力, 赵自阳, 王红瑞, 等. 气候变化下水文模拟不确定性若干问题讨论[J]. 水资源保护, 2023, 39(1): 109-118. (Zhang Li, Zhao Ziyang, Wang Hongrui, et al. Discussion on several issues of uncertainty in hydrological simulation under climate change [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(1): 109-118. (in Chinese))
- [8] 刘永伟, 王文, 刘元波, 等. 水文模型模拟预报的多源数据同化方法及应用研究进展[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021, 49(6): 483-491. (Liu Yongwei, Wang Wen, Liu Yuanbo, et al. Advances in multi-source data assimilation approach and application in simulation and forecast of hydrological model[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(6): 483-491. (in Chinese))
- [9] 张珂, 周佳奇, 张企诺, 等. 栅格岩溶分布式水文模型[J]. 水资源保护, 2022, 38(1): 43-51. (Zhang Ke, Zhou Jiaqi, Zhang Qينو, et al. Grid-based karst distributed hydrological model [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(1): 43-51. (in Chinese))
- [10] 吴洪石, 石朋, 瞿思敏, 等. 水文相似性研究进展[J]. 水资源保护, 2023, 39(6): 77-86. (Wu Hongshi, Shi Peng, Qu Simin, et al. Research progress on hydrologic similarity[J]. Water Resources Protection, 2023, 39(6): 77-86. (in Chinese))
- [11] 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))
- [12] 刘永伟, 王文, 刘元波, 等. 基于 EnKF 方法和 SWAT 模型的土壤湿度数据同化试验[J]. 武汉大学学报(工学版), 2024, 57(1): 17-27. (Liu Yongwei, Wang Wen, Liu Yuanbo, et al. Soil moisture data assimilation experiment based on EnKF method and SWAT model[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2024, 57(1): 17-27. (in Chinese))
- [13] 耿德源, 赵天杰, 施建成, 等. 地基雷达的微波面散射模型对比与土壤水分反演[J]. 遥感学报, 2021, 25(4): 929-940. (Geng Deyuan, Zhao Tianjie, Shi Jiancheng, et al. Surface microwave scattering model evaluation and soil moisture retrieval based on ground-based radar data[J]. National Remote Sensing Bulletin, 2021, 25(4): 929-940. (in Chinese))
- [14] 何涯舟, 张珂, 晁丽君, 等. 基于多源遥感土壤湿度与模型数据同化的流域径流模拟[J]. 水资源保护, 2023, 39(2): 145-151. (He Yazhou, Zhang Ke, Chao Lijun, et al. Watershed runoff simulation based on multi-source remotely sensed soil moisture and data assimilation[J]. Water Resources Protection, 2023, 39(2): 145-151. (in Chinese))
- [15] Pierdicca N, Fascetti F, Pulvirenti L, et al. Analysis of ASCAT, SMOS, in-situ and land model soil moisture as a regionalized variable over Europe and North Africa[J]. Remote Sensing of Environment, 2015, 170: 280-289.
- [16] 姜璐璐, 吴欢, Alfieri L, 等. 基于遥感与区域化方法的无资料流域水文模型参数优化方法[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2020, 56(6): 1152-1164. (Jiang Lulu, Wu Huan, Alfieri L, et al. Review of regionalization and remote sensing based method for hydrological model parameters calibration in ungauged basins[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2020, 56(6): 1152-1164. (in Chinese))
- [17] 刘化芳, 张成福, 冯霜, 等. 水文模型研究进展[J]. 绿色科技, 2023, 25(18): 49-53. (Liu Huafang, Zhang Chengfu, Feng Shuang, et al. Research progress of hydrological models[J]. Journal of Green Science and Technology, 2023, 25(18): 49-53. (in Chinese))
- [18] 陈骄锐, 李绍红, 罗晓辉, 等. 改进的 Green-Ampt 模型及其试验验证[J]. 工程地质学报, 2023, 31(5): 1728-1737. (Chen Jiaorui, Li Shaohong, Luo Xiaohui, et al. An improved Green-Ampt model and its experimental verification [J]. Journal of

- Engineering Geology,2023,31(5):1728-1737. (in Chinese))
- [19] 曾凌,陈金凤,李雨,等. 基于卫星遥感数据率定分布式水文模型参数[J]. 水资源研究,2022,11(6):561-571. (Zeng Ling, Chen Jinfeng, Li Yu, et al. Parameter calibration of a distributed hydrological model based on satellite remote sensing data[J]. Journal of Water Resources Research,2022,11(6):561-571. (in Chinese))
- [20] 杜若愚,姚成,刘玉环,等. 基于蓄满超渗时空动态组合的网格新安江模型[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(6):25-32. (Du Ruoyu, Yao Cheng, Liu Yuhuan, et al. Grid-Xin' anjiang model based on spatio-temporal dynamic combination of saturation-excess and infiltration-excess runoff[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2022,50(6):25-32. (in Chinese))
- [21] 王越,李巧玲,肖杨. 概念性水文模型与智能模型在中小河流洪水模拟中的比较研究[J]. 水文,2024,44(1):44-49. (Wang Yue, Li Qiaoling, Xiao Yang. Comparative study of conceptual hydrological model and intelligent model in flood simulation of small and medium rivers[J]. Journal of China Hydrology,2024,44(1):44-49. (in Chinese))
- [22] 霍文博,李致家,张珂,等. 分布式格林-安普特降雨径流模型研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(3):47-54. (Huo Wenbo, Li Zhijia, Zhang Ke, et al. Study on the distributed Green-Ampt rainfall-runoff model[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2022,50(3):47-54. (in Chinese))
- [23] 李致家,霍文博,张珂. 格林-安普特降雨径流模型改进及初步应用[J]. 河海大学学报(自然科学版),2020,48(5):385-391. (Li Zhijia, Huo Wenbo, Zhang Ke. Improvement and preliminary application of Green-Ampt rainfall-runoff model[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2020,48(5):385-391. (in Chinese))
- [24] Kang Shouxuan, Fei Liangjun, Zhong Yun, et al. A modified Green-Ampt infiltration model for muddy water[J]. Journal of Hydrology,2024,629:130606.
- [25] 罗玉玲,秦洪亮,姚成,等. 基于网格水滴的汇流模拟计算方法[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(6):9-17. (Luo Yuling, Qin Hongliang, Yao Cheng, et al. Confluence calculation method based on grid water drop[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2023,51(6):9-17. (in Chinese))
- [26] 李致家,孔凡哲,王栋,等. 现代水文模拟与预报技术[M]. 2 版. 南京:河海大学出版社,2022.
- [27] Chen Xi, Yang Tao, Wang Xiaoyan, et al. Uncertainty intercomparison of different hydrological models in simulating extreme flows[J]. Water Resources Management,2013,27(5):1393-1409.
- [28] Zhuo Lu, Dai Qiong, Han Dawei. Evaluation of SMOS soil moisture retrievals over the central United States for hydro-meteorological application[J]. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C,2015,83-84:146-155.
- [29] 吴平辉,张佳鹏,王加虎,等. 径流与土壤湿度数据联合率定水文模型参数研究[J]. 中国防汛抗旱,2022,32(4):72-76. (Wu Pinghui, Zhang Jiapeng, Wang Jiahu, et al. Study on multi-objective optimization of hydrological model based on runoff and soil moisture[J]. China Flood & Drought Management,2022,32(4):72-76. (in Chinese))
- [30] 姚成. 基于栅格的分布式新安江模型构建与分析[D]. 南京:河海大学,2007.
- [31] Zhu Qian, Wang Yushi, Luo Yulin. Improvement of multi-layer soil moisture prediction using support vector machines and ensemble Kalman filter coupled with remote sensing soil moisture datasets over an agriculture dominant basin in China[J]. Hydrological Processes,2021,35(4):e14154.
- [32] 中华人民共和国水利部. 土壤墒情监测规范:SL 364—2015[S].
- [33] WANG Yuanyuan, LI Guicai. Evaluation of simulated soil moisture from China Land Data Assimilation System (CLDAS) land surface models[J]. Remote Sensing Letters,2020,11(12):1060-1069.
- [34] 韩帅,师春香,姜立鹏,等. CLDAS 土壤湿度模拟结果及评估[J]. 应用气象学报,2017,28(3):369-378. (Han Shuai, Shi Chunxiang, Jiang Lipeng, et al. The simulation and evaluation of soil moisture based on CLDAS[J]. Journal of Applied Meteorological Science,2017,28(3):369-378. (in Chinese))
- [35] 师春香,姜立鹏,朱智,等. 基于 CLDAS2.0 驱动数据的中国区域土壤湿度模拟与评估[J]. 江苏农业科学,2018,46(4):231-236. (Shi Chunxiang, Jiang Lipeng, Zhu Zhi, et al. Simulation and evaluation of soil moisture in Chinese regions based on CLDAS2.0 driven data[J]. Jiangsu Agricultural Sciences,2018,46(4):231-236. (in Chinese))

(收稿日期:2025-04-25 编辑:刘晓艳)