

山区河流洪水预报中水文模型参数优化分析

刘振宇, 高素坤

(山东省水利勘测设计院有限公司, 山东 济南 250014)

【摘要】山区河流洪水预报通过构建高精度水文模型并优化关键参数,实现对复杂地形降雨-径流过程的精准模拟与预警。文章阐述了构建水文模型时要素整合与空间分辨率配置的方法,介绍了基于敏感性分析、多目标演化算法与混合优化策略对土壤曲线数、导水率与河道阻力系数等参数进行校准的技术要点,并通过典型案例验证了优化后模型在洪峰预测精度提高(NSE由0.65提升至0.84)、RMSE显著降低及预报提前期延长等效果。结果表明:自动化参数优化可大幅提升山区洪水预报可靠性,为防洪调度与风险管理提供科学支撑。

【关键词】山区河流;洪水预报;水文模型;参数优化

【中图分类号】TV122

【文献标志码】A

【文章编号】1009-6159(2025)-08-0033-03

Optimization Analysis of Hydrological Model Parameters in Flood Forecasting for Mountain Rivers

LIU Zhenyu, GAO Sukun

(Shandong Survey and Design Institute of Water Conservancy co., Ltd, Jinan, Shandong 250014, China)

Abstract: Flood forecasting for mountain rivers realizes accurate simulation and early warning of the rainfall-runoff process in complex terrain by constructing high-precision hydrological models and optimizing key parameters. This paper expounds the methods of element integration and spatial resolution configuration in constructing hydrological models, introduces the technical points of calibrating parameters such as soil curve number, hydraulic conductivity, and channel resistance coefficient based on sensitivity analysis, multi-objective evolutionary algorithms, and hybrid optimization strategies. Through typical cases, it verifies the effects of the optimized model, such as increased flood peak prediction accuracy (NSE increased from 0.65 to 0.84), significantly reduced RMSE, and extended forecast lead time. The results show that automatic parameter optimization can greatly improve the reliability of mountain flood forecasting, providing scientific support for flood control scheduling and risk management.

Key words: Mountain rivers; Flood forecasting; Hydrological model; Parameter optimization

山区河流因地形陡峭,流域比降大,故其汇流速度快,暴雨易引发突发性山洪、泥石流等灾害。山区河流洪水预报作为一种非工程防洪措施,通过对洪水预报模型中水文参数的敏感性与不确定性分析,可实现对洪水过程的模拟并提前发出预警,为危险区人员撤离、交通管制及水库调度争取关键时间,有效降低人员伤亡和基础设施损毁风险。

山区地形起伏大、降雨空间分布差异显著,加之土地利用变化影响产汇流机制,传统经验预报难以满足精准需求。采用遗传算法和自适应粒

子群算法率定关键参数,可有效提升模型可靠性和预报精度,为防洪调度提供科学依据,减少洪水风险与损失。

1 水文模型构建

1.1 水文模型的选择与要素整合

在山区河流洪水预报中,模型的准确性依赖于对降雨、地形、植被和土壤等要素的全面整合。首先,应根据流域面积、地形坡度和数据可用性,

收稿日期:2025-05-27

作者简介:刘振宇(1992—),男,工程师

选择合适的水文模型类型,如基于物理机理的分布式模型、半分布式模型或经验型模型。在进行要素整合时,需要通过数字高程模型(DEM)提取坡度和汇水区界线,然后利用遥感技术和实地调查获取流域覆盖类型和土壤参数,并结合气象站和雷达资料对降雨时空分布进行插值。整合后的输入要素能够提供模型运算所需的时空分辨率基础,为后续模拟打下坚实基础。

1.2 模型结构与空间分辨配置

水文模型结构设计需兼顾计算效率与空间精度。针对山区河流洪水预报,通常将流域划分为若干子流域或网格单元,通过栅格化或分块化形式实现分布式模拟。栅格化方法将流域划分成均匀网格,通过统一空间分辨率简化模型结构,每个网格独立计算降水、下渗、产流等过程,利用规则化的邻域关系(如D8流向算法)高效模拟水流路径与汇流网络,显著降低复杂地形处理的计算复杂度;同时,栅格数据便于与遥感、雷达等多源空间数据无缝融合,减少数据转换成本,并支持并行计算加速(如GPU加速),在保持空间异质性刻画能力(如土壤、植被类型差异)的同时,通过调整网格分辨率,灵活平衡计算效率与模拟精度。分块划分则依据地形特征划分不规则子流域,因其依据地形、水系及汇流路径的自然边界划分子单元,每个子流域内部视为均质化处理单元,通过简化空间异质性降低计算复杂度;同时子流域间通过河道网络连接,仅需计算单元间的水量交换而非全流域高分辨率网格的连续模拟,大幅减少计算节点和迭代次数。

水力学过程模拟部分,应将植被拦截、土壤下渗和地表径流分离成不同模块,使模型能分别计算拦截损失、下渗速率及坡面汇流,同时在河道网格中加入水动力学方程,以模拟河道蓄水、漫溢和洪水远程传播,并针对不同地形复杂度进行分区处理,优先精细化关键区域的水流演进过程。空间分辨配置不仅影响模拟精度,也关系到预报的实时性,对于应急调度至关重要。

1.3 参数优化与不确定性评估

山区河流水文模型通常包含土壤饱和导水率、曲线数、河道摩阻系数等关键参数,这些参数在不同流域和时期具有较大差异。为了提高模型的可靠性,需要通过自动优化算法(如遗传算法、

粒子群优化或贝叶斯校准)在历史洪水事件和观测资料的基础上,调整参数至最优组合。同时,应对参数的不确定性进行评估,通过蒙特卡罗模拟或敏感性分析,探究参数变动对预报结果的影响范围,进而建立预报区间或置信度评估。最后,将不确定性结果纳入预警发布系统,可以在预报通报中提供风险区间,供决策者在调度水库、预警群众时更好地把握风险程度,实现防洪减灾的科学决策。

2 模型参数优化

2.1 参数敏感性分析

参数优化前,需要开展敏感性分析,以识别对洪水预报结果影响最大的关键参数。通过局部灵敏度方法或全局敏感度分析(如Sobol指数或方差分解),可以量化每个参数在不同水文情景下对流域产汇流过程、河道蓄水能力及洪峰时程的作用强度。针对高度非线性的山区流域,敏感性分析能帮助模型调优聚焦最显著参数,减少计算量和不确定性。

2.2 优化算法选择与配置

针对洪水预报模型的高维非线性参数空间,应选用适合多峰和不规则搜索的全局优化算法,如遗传算法(GA)、粒子群优化(PSO)或差分进化(DE)。在算法配置时,需要合理设置种群规模、迭代次数、交叉与变异概率等超参数,以保证搜索的广度和收敛速度。在实际应用中,可结合局部优化算法(如牛顿法或梯度下降)进行混合优化,以在全局搜索锁定优良区域后精细调整参数。同时,为避免陷入局部最优,应多次运行并评估结果的稳定性,选取最优且最具鲁棒性的参数组合。

2.3 数据前处理与校验

高质量的观测数据是参数优化的基础,山区河流预报模型对降雨、流量以及土壤含水率等时序数据要求高精度和连续性。优化前,应对原始资料进行插值、去噪和平滑处理,填补缺失值并剔除异常点;同时需要对DEM、土地利用和土壤类型图进行矢量化或栅格化处理,保证空间要素与模型网格的一致性。校验阶段,通过留出验证集或交叉验证方式,实现对不同水文事件的模拟检验,并采用KGE、NSE或RMSE等多种性能指标综合评估模型优劣,确保参数优化不是对单个

洪水事件的过度拟合。

2.4 多目标优化与权衡

山区河流洪水预报不仅要追求流量预测精度,还需兼顾洪峰时间、洪水过程形状和预报时效性等多重目标。多目标优化技术(如 NSGA-II 或 MOEA/D)可以同时处理多个评价指标,构建 Pareto 前沿,展示不同优化策略下的折中解。决策者可根据实际防洪需求和预警响应能力,从 Pareto 集群中选择最合适的参数组合,实现精度与计算效率、可靠性与实时性的平衡。

3 案例应用

3.1 工程概况

山东省某典型山区河流(流域面积约 120 km²),地形坡度大、汇水响应迅速。研究对象为 2023 年 7 月一次极端短时暴雨过程,累计降雨量达 180 mm,出现洪峰流量约 170 m³/s。流域内主要河道长度 15 km,上游植被覆盖率仅 40%,裸露地带易产生快速径流。原始预报模型采用半分布式方程,关键参数包括土壤曲线数(CN)、饱和导水率(K_s)和河道曼宁系数(n),初值由经验公式估算,预报结果洪峰流量偏差大、时滞明显,不利于防洪调度。

3.2 参数优化措施

针对上述问题,采取遗传算法(GA)和粒子群优化(PSO)相结合的混合优化策略。

3.2.1 参数范围与初始化

根据区域土壤类型、植被覆盖及历史经验,将曲线数(CN)设定在 60~95 范围内;土壤饱和导水率(K_s)取值 0.005~0.05 mm/s;曼宁系数(n)限制在 0.03~0.08 之间。初始化阶段,GA 种群规模设置为 100 个个体,每个个体对应一组随机生成的参数组合,以保证搜索空间的广覆盖性。

3.2.2 双目标函数构建

采用纳什效率系数(NSE)与洪峰误差率(PE)作为优化目标,通过 NSGA-II 多目标进化框架同时优化两者。NSE 权重侧重模型拟合优度,而 PE 权重关注洪峰时刻和流量误差,二者共同约束模型在总体过程与极值预测上的表现。

3.2.3 混合优化流程

首先,遗传算法执行全局搜索:交叉概率设置为 0.8,变异概率为 0.1,经过 50 代迭代后,选

取适应度排名前 50% 的优良个体作为候选;其次,将这些优良解输入粒子群优化阶段,PSO 采用惯性权重线性递减策略,从 0.9 降至 0.4,学习因子 c₁、c₂ 均设为 2.0,通过局部搜索进一步精细化参数组合;整个 GA-PSO 流程重复 3 次,以确保结果的鲁棒性和稳定性。

3.2.4 数据处理与验证机制

针对暴雨过程,降雨序列基于 5 min 时间步进行空间插值;流量观测数据按小时同步,与模型输出匹配。优化过程中,采用两折交叉验证:将观测数据分为训练集和验证集,交替进行参数校准与性能评估,以避免单一事件过拟合,同时检验参数在不同暴雨场景下的泛化能力。最终,以综合性能最优的参数集作为模型运行依据。

3.3 优化效果

优化后模型洪峰流量预测精度显著提升,洪峰时序吻合度增强,预报提前期延长 10 min。与优化前相比,NSE 从 0.65 提高到 0.84, RMSE 从 12.8 m³/s 降至 6.2 m³/s。基于此模型,防洪调度模拟显示可减少下游区域警戒水位超限时长 20%,降低经济损失约 8%。相比经验校准,自动化优化效率提高近 70%,可在 30 min 内完成全流程校准,为实时预警提供有力支撑。

4 结语

文章系统探讨了山区河流洪水预报中模型构建、空间格网设计、参数敏感性分析及多目标混合优化策略,验证了自动化校准在提升洪峰流量和时序预测精度方面的显著优势。案例表明,优化后模型不仅提高了预报准确率,还延长了预警提前期,为防洪调度和风险管理提供了可靠依据。未来应结合实时观测与新型优化算法,持续完善不确定性量化与动态校准机制,以进一步增强山区洪水预报系统的智能化与适应性。

参考文献

- [1] 李翔,张利平,王纲胜,等.洪水预报模型参数优化与影响因素分析[J].武汉大学学报(工学版),2024,57(9):1191-1202.
- [2] 刘一卓,陈璐,郭鹤翔,等.不同目标函数对径流模拟结果的影响分析[J].中国农村水利水电,2024(10):40-46.
- [3] 杨斐.哈里斯鹰算法的改进及其在沂沭河洪水预报中的应用研究[D].郑州:华北水利水电大学,2024.

(责任编辑 崔春梅)