

基于垂向混合产流模型的三河口水库洪水预报方案构建

席小康

陕西省水文水资源勘测中心, 陕西 西安

收稿日期: 2026年1月9日; 录用日期: 2026年2月9日; 发布日期: 2026年4月30日

摘要

切实可行的入库洪水预报方案对水库防洪安全和科学调度管理具有重要作用, 本文以子午河三河口水库以上流域为研究对象, 采用垂向混合产流模型构建入库洪水预报方案, 该模型在三河口水库以上流域具有良好适用性, 能够较为精确地模拟入库洪水过程。率定期和检验期的确定性系数分别为0.852、0.924, 洪峰流量和峰现时间合格率均达到85%以上, 预报方案综合评定等级为甲等, 可以用于发布正式洪水预报。

关键词

三河口水库, 垂向混合产流模型, 洪水预报

Construction of Flood Forecasting Scheme for the Sanhekou Reservoir Based on a Vertical Mixed Runoff Model

Xiaokang Xi

Shaanxi Hydrology and Water Resources Survey Center, Xi'an Shaanxi

Received: January 9, 2026; accepted: February 9, 2026; published: April 30, 2026

Abstract

A practical and feasible inflow flood forecasting scheme plays a crucial role in ensuring reservoir flood control safety and scientific operation and management. Taking the watershed above the Sanhekou Reservoir in the Ziwu River as the study area, this research developed an inflow flood forecasting scheme by

作者简介: 席小康(1991-), 男, 工程师, 硕士研究生, 主要从事洪水预报预警方面研究, Email: 354925114@qq.com

文章引用: 席小康. 基于垂向混合产流模型的三河口水库洪水预报方案构建[J]. 水资源研究, 2026, 15(2): 177-183.

DOI: 10.12677/jwrr.2026.152021

employing a Vertical Mixed Runoff Model, which demonstrates good applicability above the Sanhekou Reservoir. The model can simulate the inflow flood process with considerable accuracy. The Nash-Sutcliffe efficiency coefficients reached 0.852 and 0.924 during the calibration period and validation period, respectively. The qualification rates for both peak discharge and time to peak exceeded 85%. The comprehensive rating of the forecasting scheme is classified as Grade A, indicating that it can be utilized for issuing official flood forecasts.

Keywords

Sanhekou Reservoir, Vertical Mixed Runoff Model, Flood Forecasting

Copyright © 2026 by author(s) and Wuhan University & Bureau of Hydrology, Changjiang Water Resources Commission. This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

作为引汉济渭工程的重要调蓄枢纽，三河口水库的科学防洪调度对于缓解关中地区水资源短缺、保障下游防洪安全具有关键作用[1]。及时准确的入库洪水预报是支撑水库科学调度与管理的重要非工程措施，而水文模型是流域洪水预报与防洪减灾中最核心且有效的工具之一[2]。在中国多年的水文实践中，形成了以蓄满产流和超渗产流为代表的两种经典产流模式[3]，其中，基于蓄满产流机制的新安江模型在湿润及半湿润地区洪水预报中应用广泛，并取得了显著成效[4]。流域产流机制并非固定不变，在受流域地形地貌、下垫面条件及局部短历时强降雨等因素影响的流域，蓄满产流和超渗产流可能共存，单纯基于蓄满产流模式假设的新安江模型在模拟洪水过程中可能出现偏差。垂向混合产流模型相较于新安江模型能灵活耦合蓄满与超渗产流机制，从而在一定程度上弥补新安江模型在产流机制单一方面的局限性[5]。

三河口水库所在的子午河流域，降雨主要集中于6月至9月，以对流性降雨和锋面降雨为主要类型，常表现为短历时、高强度特征，易在局部引发超渗产流。此外，受人类活动影响，流域内不透水下垫面面积增加，进一步加剧了部分区域的超渗产流倾向。综合考虑该流域的数据条件与下垫面特征，采用垂向混合产流模型进行入库洪水预报方案的构建，以期水库防洪调度提供科学依据。

2. 材料与方法

2.1. 研究区概况

三河口水库是引汉济渭调水项目的主干工程之一，坝址位于汉中市佛坪县大河坝镇椒溪河、蒲河、汶水河汇合口(即三河口)下游2 km处，坝址以上河长106 km，控制流域面积2186 km²，水库主要由拦河坝、坝后泵站及坝后电站等组成，总库容 7.1×10^9 m³。三河口以上流域属于汉江上游北岸一级支流子午河流域，是典型湿润地区，多年平均降雨约700~1100 mm，洪水过程常出现在7~10月，洪峰流量500~2500 m³/s。水系见图1。

2.2. 数据来源

本文采用三河口以上流域18处雨量站2010~2022年降雨摘要、日降雨资料，流域多年月平均蒸发资料，大河坝水文站2010~2022洪水摘录资料，以及三河口水位站2016~2022年水位资料。2010~2015年，三河口水库尚未建设，采用大河坝水文站洪水摘录资料作为三河口入库洪水过程，2016年三河口水库开始建设，受围堰和水库调蓄影响，2016~2022年利用三河口水位资料和大河坝水文监测洪水摘录资料根据三河口水位库容关系进行实测入库洪水过程还原计算。数据来源于水文部门整编后水文年鉴刊印成果，可靠性较高。

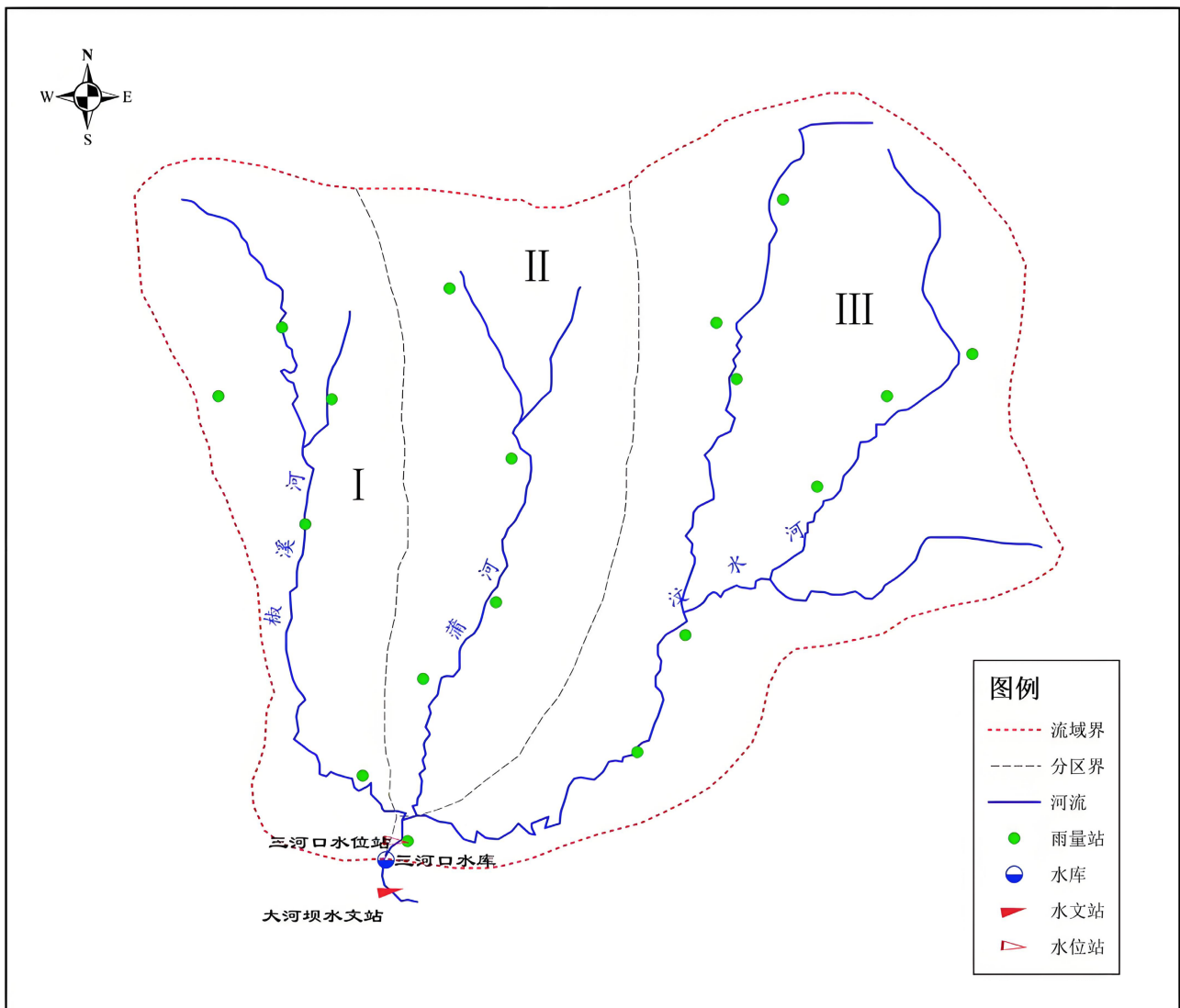


图 1. 三河口水库坝址以上流域水系

2.3. 研究方法

1) 垂向混合产流模型

垂向混合产流模型[6]的产流计算是利用流域蓄水容量 - 面积分布曲线和下渗能力分布曲线在垂向上将超渗产流、蓄满产流进行组合。降雨到达地表后, 首先依据空间分布的下渗能力曲线, 划分为地表径流与下渗水流两部分。下渗水流在土壤水分亏缺较大的区域, 主要用于补给土壤缺水量, 不产生径流; 而在土壤水分亏缺较小的区域, 土壤缺水量得到满足后, 则形成地下径流。地面径流取决于雨强和下渗, 为超渗产流模式; 地面以下的径流, 取决于前期土壤含水量和下渗的水量, 包含壤中流和地下径流, 为蓄满产流模式[7]。垂向混合产流模型结构分为蒸散发计算、产流计算、水源划分、坡面汇流和河道汇流四个层次, 除产流模块计算不同外, 其余计算形式类似于新安江模型[8] [9]。

2) 参数率定

参数优化通过 SCE-UA 算法与人机交互共同完成。SCE-UA 算法[10]-[12]的主要优势在于其混合搜索机制, 它首先在可行域内随机采样生成初始复合种群, 进而模拟生物竞争实现种群演化。这一设计综合了确定性、随

机性及进化方法的优点，使其能够稳健地处理高维全局优化问题，且不依赖于目标函数的解析形式或梯度信息。

3. 预报方案构建

3.1. 方案构建

根据三河口水库以上流域的资料条件、下垫面条件、模型适应性和实用性等多种因素，采取垂向混合产流模型进行入库洪水预报方案编制。子午河流域主要由椒溪河、蒲河、汶水河三条支流组成。据此，将三河口水库坝址以上流域划分为椒溪河流域、蒲河流域、汶水河流域共三个单元，其控制面积分别为 597 km²、497 km²、1092 km²。各单元面平均降雨采用泰森多边形法计算，其中椒溪河单元选取 5 个雨量站、蒲河单元选取 4 个雨量站、汶水河单元选取 9 个雨量站，各单元雨量站权重见表 1。采用垂向混合产流模型分别模拟三个单元的产汇流过程，并进行叠加得到三河口水库坝址断面洪水过程。方案结构见图 2。

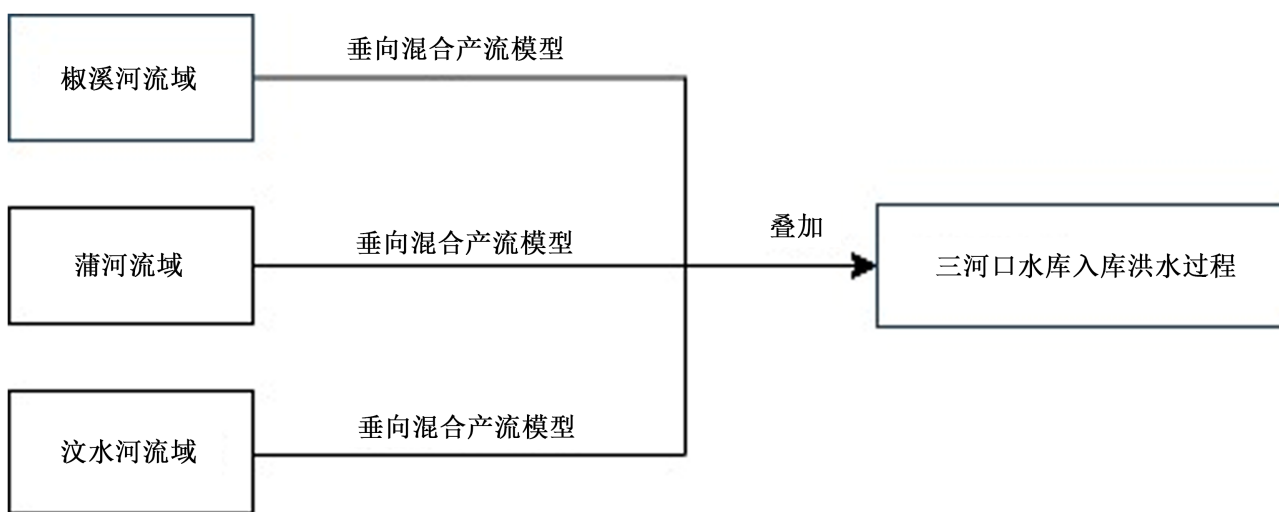


图 2. 子午河三河口水库入库洪水预报方案结构

表 1. 各单元雨量站所占权重

单元	序号	雨量站	权重	单元	序号	雨量站	权重
椒溪河	1	龙草坪	0.2527	汶水河	10	三河口	0.0351
	2	小南坪	0.1355		11	筒车湾	0.1292
	3	下沙窝	0.1190		12	龙王坪	0.1487
	4	佛坪	0.2600		13	新场	0.0730
	5	十亩地	0.2329		14	铜狮沟	0.0757
蒲河	6	金竹园	0.2637		15	寸耳坝	0.1675
	7	小庄	0.3403		16	钢铁	0.0784
	8	四亩地	0.2068		17	菜子坪	0.1392
	9	回龙寺	0.1891		18	统统河	0.1532

3.2. 参数率定与结果分析

选用 2016~2019 年三河口水库入库洪峰流量大于 500 m³/s 的 26 场洪水和相应 18 站配套降雨资料，进行预

报方案参数率定,以确定性系数最优为目标函数,采用 SCE-UA 算法和人工优选法进行模型参数优选,确定预报方案参数。参数优选结果见表 2。同时选用 2020~2022 年三河口水库入库洪峰流量大于 500 m³/s 未参与参数率定的 7 场洪水及相应配套降雨资料进行预报方案参数检验。根据《水文情报预报规范》(GB/T 22482-2008),方案精度评定与检验见表 3、表 4。

按照以上参数和方案,对 26 场洪水的确定性系数、洪峰流量、洪峰出现时间进行评定。垂向混合产流模型方案的 26 场洪水的平均确定性系数为 0.852,对 26 场洪水的模拟结果评估表明,洪峰流量的合格率为 88.5%(23 场),而洪峰出现时间的合格率则达到 100%(26 场)。综合确定性系数、洪峰流量及峰现时间三项指标进行评定,本次模拟的等级均为“甲等”。

从检验结果看,垂向混合产流模型方案 7 场洪水平均确定性系数为 0.924,洪峰流量、洪峰出现时间合格率均为 100%,方案的确定性系数、洪峰流量、洪峰出现时间检验等级均为甲等。典型洪水拟合过程见图 3。

依据《水文情报预报规范》的精度评定标准,对构建的垂向混合产流洪水预报方案进行了评定与检验。结果显示,方案在确定性系数、洪峰流量及洪峰出现时间等方面的评定等级均为甲等,表明垂向混合产流模型在子午河流域具有较强的适用性,可用于三河口水库入库洪水预报的正式发布。子午河流域属汉江上游典型湿润地区,在洪水预报实践中,基于蓄满产流机制的新安江模型曾取得较好的预报效果[13]。然而,随着流域水利工程建设、城镇化发展和极端降雨事件增多等因素的影响,局部地区产流方式由单一的蓄满产流逐步转变为蓄满与超渗混合产流模式[14]-[16]。子午河流域降雨强度大,流域内分布有佛坪县城和众多乡镇,以及二十余座梯级径流式小电站,考虑到流域下垫面变化明显,导致易发生超渗产流的区域有所增加,因此构建垂向混合产流洪水预报方案,以期在三河口入库洪水预报提供一定的参考。

表 2. 垂向混合产流模型参数率定结果

参数符号	参数意义	(椒溪河单元)参数值	(蒲河单元)参数值	(汶水河单元)参数值
K	流域蒸散发能力折算系数	0.865	0.817	0.844
WUM	流域上层蓄水容量 mm	23	22	23
WLM	流域下层蓄水容量 mm	56	60	60
C	深层蒸散发折算系数	0.289	0.362	0.284
WM	流域平均蓄水容量 mm	124	137	125
B	流域蓄水容量分布曲线指数	0.28	0.33	0.368
IM	流域不透水面积比例	0.006	0.005	0.006
FC	流域实际下渗率 mm/h	16	18	20
BF	流域下渗率分布曲线指数	1.0	1.1	1.2
KF	土壤对下渗率影响系数	0.38	0.39	0.40
SM	表土层自由水容量	14	16	8
EX	自由水蓄水容量面积分布曲线指数	1.089	1.285	1.379
KI	自由水箱壤中流出流系数	0.400	0.352	0.313
KG	自由水箱地下水出流系数	0.368	0.386	0.451
CS	地面水线性水库汇流系数	0.414	0.810	0.676
CI	壤中流线性水库汇流系数	0.880	0.894	0.940
CG	地下水线性水库汇流系数	0.969	0.959	0.910
LAG	滞后时间	4	2	6
KE	马斯京根法演算参数(h)	1	1	1
XE	马斯京根法流量比重系数	0.35	0.46	0.48

表 3. 预报方案精度评定与检验

模型	评价指标								方案等级
	率定期				检验期				
	洪水	洪峰 R_Q	时间 ΔH	DC	洪水	洪峰 R_Q	时间 ΔH	DC	
	场次	合格率/%	合格率/%		场次	合格率/%	合格率/%		
垂向混合产流模型	26	88.5	96.3	0.852	7	100	100	0.924	甲

表 4. 预报方案精度检验结果

洪水编号	洪峰流量(m^3/s)			评定	峰现时间(h)		确定性系数 DC
	实测洪峰	预报洪峰	误差		误差	评定	
211003	921	818	-103	合格	0	合格	0.943
210923	1620	1477	-143	合格	0	合格	0.939
210915	1001	897	-104	合格	0	合格	0.903
210903	1843	1634	-209	合格	0	合格	0.954
210821	1044	1029	-15	合格	-1	合格	0.884
200806	1010	964	-46	合格	-1	合格	0.962
200615	584	620	36	合格	0	合格	0.883

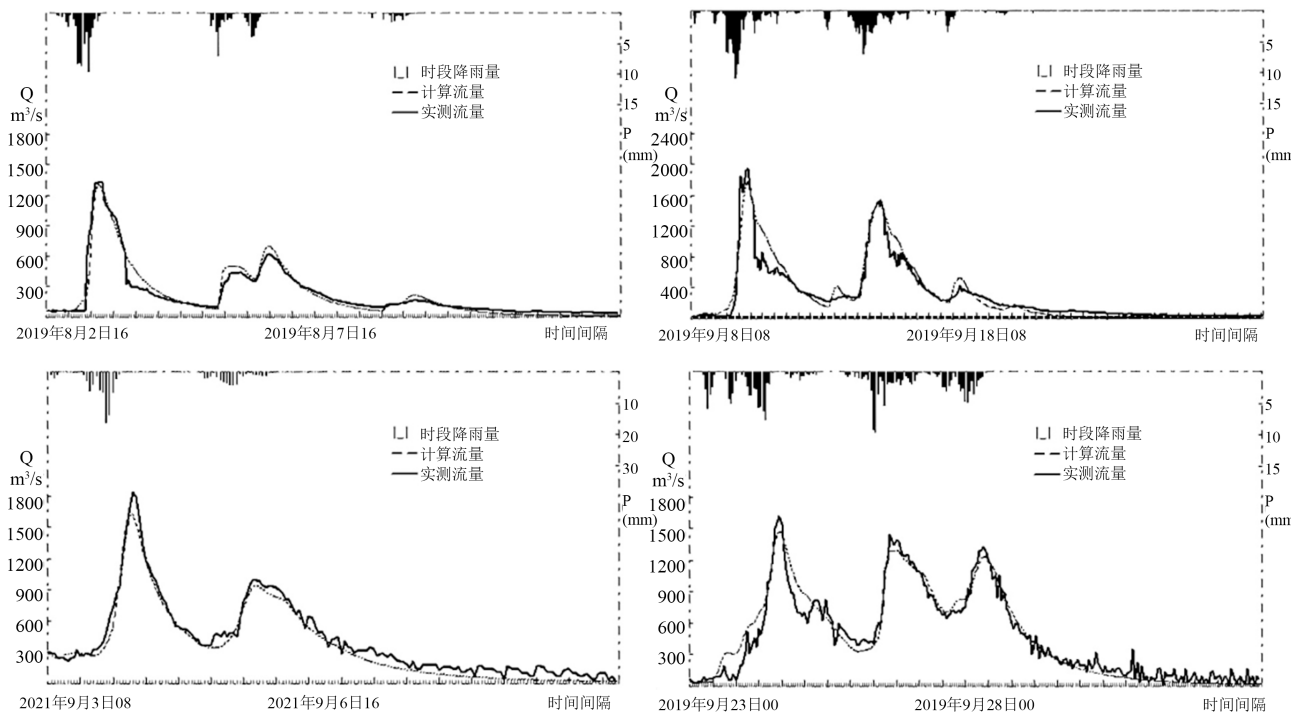


图 3. “2019”、“2021”典型洪水拟合过程

4. 结论与建议

采用垂向混合产流模型构建预报方案，通过 2010~2022 年期间 33 场历史洪水的率定与检验，得出以下结

论:

1) 基于垂向混合产流模型构建的子午河三河口入库洪水预报方案,在率定期和检验期的确定性系数分别为 0.852、0.924,洪峰流量合格率达 88.5%、96.3%,洪峰出现时间合格率分别为 96.3%、100%。依据《水文情报预报规范》(GB/T 22482-2008),方案综合评定等级为甲等,表明垂向混合产流模型在该流域具有良好的适用性,能够较为精确地模拟入库洪水过程,可用于发布正式洪水预报。

2) 由于三河口水库的入库洪水资料取自大河坝水文站,而该站流量数据在 2010~2015 年为天然河道观测值,在 2016~2019 年与 2020~2022 年两个时段,入库洪水过程分别受上游围堰截流及后期水库大坝调蓄的影响。因此,基于坝前水位与泄水流量反推得到的入库洪水过程,与天然洪水过程存在差异。这种差异给水文模型的参数率定与验证工作带来了一定误差。

为提高实时预报准确性,建议在作业预报中密切监测出库流量与坝上水位的偏差,并及时对数据进行校正,以减少预报误差。

参考文献

- [1] 董磊华,金奔,张傲然,等.三河口水库洪水资源利用方式研究[J].中国农村水利水电,2021(2):62-65+77.
- [2] 刘玉环,李致家,刘志雨,等.半干旱地区洪水模拟效果差异性分析及影响因子响应评估[J].湖泊科学,2022,34(2):652-663.
- [3] 姬荣彬.基于多种混合产流模式的水文模型研究[D]:[硕士学位论文].大连:大连理工大学,2019.
- [4] 赵丽平,邢西刚,宋君,等.分布式新安江模型在横锦水库洪水预报中的应用[J].中国防汛抗旱,2022,32(7):72-76.
- [5] 毛北平.垂向混合产流模型在无资料地区山洪灾害临界雨量计算中的应用[J].应用基础与工程科学学报,2016,24(4):720-730.
- [6] 包为民,王从良.垂向混合产流模型及应用[J].水文,1997(3):19-22.
- [7] 王璐,叶磊,吴剑,等.山丘区小流域水文模型适用性研究[J].中国农村水利水电,2018(2):78-84.
- [8] 赵丽平,刘晓阳,任明磊,等.垂向混合产流模型在三峡水库洪水预报中的应用[J].南水北调与水利科技(中英文),2024,22(S1):1-9.
- [9] 邹心怡,赵丽平,王思楠.基于 SRPCM 的新安江模型与垂向混合产流模型在山东省日照水库的应用研究[J].中国防汛抗旱,2025,35(7):1-6+84.
- [10] 余明睿,蔡亦婷,李雅丽,等.基于 SCE-UA 算法的山区河流洪水预报研究——以寿溪河为例[J].中国防汛抗旱,2024,34(7):10-17.
- [11] 王维,冯忠伦,杨伟,等.基于 SCE-UA 算法的新安江模型与垂向混合产流模型参数优化应用研究[J].中国农村水利水电,2017(3):26-30.
- [12] 刘希琛,阚光远,丁留谦,等.新安江模型参数优化的一种约束 SCE-UA 算法研究[J].中国水利水电科学研究院学报(中英文),2023,21(5):434-443+465.
- [13] 吴锐,马峰,冯亚鹏.基于三水源新安江模型的三河口水库洪水预报[J].水资源开发与管理,2023,9(8):65-71.
- [14] 包为民.水文预报[M].北京:中国水利水电出版社,2017:384.
- [15] 胡龙颂,张行南,夏达忠,等.基于垂向混合产流模型的综合干旱指数新方法及其应用[J].水电能源科学,2016,34(4):11-14.
- [16] 瞿思敏,包为民,张明,等.新安江模型与垂向混合产流模型比较[J].河海大学学报(自然科学版),2003(4):374-377.