

DOI:10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20221110

Tank 模型在中小河流洪水气象风险预警中的应用

旷 兰¹,田茂举¹,肖 蕾²,陈茜茜²,海 川¹,葛的霆¹

(1. 重庆市綦江区气象局, 重庆 401420; 2. 遵义市气象局, 贵州 遵义 563000)

摘要: 结合蒲河流域的气候条件和洪水特性,利用 Tank 模型模拟了该流域 2019~2020 年 10 次暴雨洪水过程,构建了适用于该流域的概念性暴雨致洪气象风险预警模型,并进行仿真模拟和精度评定。结果表明,改进后的水箱模型能直观地模拟出石角水文站不同时间尺度、不同基础水位条件下的水位变化过程曲线,能减少面雨量阈值的不确定性,预报精度为乙等;根据模拟结果逐级发布气象风险预警,技巧评分和命中率为 100%;平均预警发布时间提前 3 h 以上,可代入预测降水进一步延长洪水预报预见期。

关键词: Tank 模型; 中小河流洪水; 气象风险预警; 洪水预警

中图分类号: TV122;P642

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)02-0074-05

1 引言

洪水灾害是复杂山地地区最严重的自然灾害之一,合理利用气象、水文等信息模拟流域水文系统建立水文模型在流域出口断面准确及时地预报山洪过程,对降低山洪灾害、合理分蓄洪水、提高水库调度能力具有重要作用。现阶段,有传统的集总式水文模型、分布式水文模型、基于蓄满产流的新安江水文模型、基于概念性的水箱(Tank)模型^[1,2]。其中,分布式水文模型由于其复杂性在实际应用过程中难度很大;新安江模型因参数依赖率定,故制约了模型的推广应用;而水箱模型属于概念性径流模型,将降雨—径流关系简化为蓄水与出流的关系,虽无直接的物理量,但有一定的物理意义,且模型的弹性好,具有结构简单、操作容易、适用性强等特点。胡彩虹等^[3]通过改进水箱模型发现模型能反映地表径流、壤中流、地下径流等变化,可应用于洪水预报;罗志勇等^[4]通过对几种模型进行模拟发现水箱模型能较好地模拟金溪流域的日径流过程与实测过程相接近,满足洪水预报精度要求。为此,本文以蒲河流域为例,利用 Tank 模型模拟了该流域 2019~2020 年的 10 次暴雨洪水过程,构建了适用于该流域的概念性暴雨致洪气象风险预警模型,并进行精度评定。

2 研究资料与方法

2.1 研究数据

(1)降水数据。2019~2020 年蒲河流域范围内 28 个自动气象站的逐小时地面降水观测资料,此数据来自于重庆市气象局信息中心。

(2)水位数据。由重庆市水利局提供的石角水文站逐小时水位、流量数据。

流域内地形、水系分布、自动气象站和石角水文站分布见图 1。

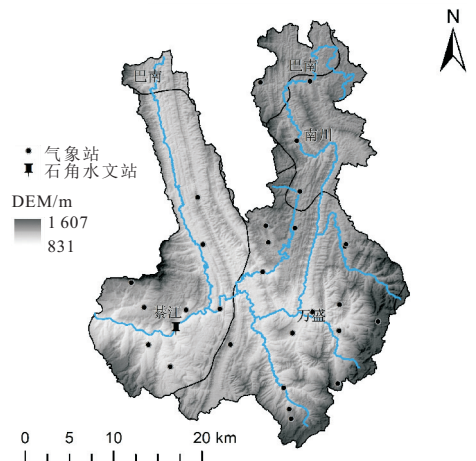


图 1 蒲河流域地形、水系、自动气象站、水文站分布
Fig. 1 Distribution of topography, water system, automatic weather station and hydrological station in Puhe River Basin

收稿日期: 2022-04-24, 修回日期: 2022-06-12

基金项目: 重庆市气象部门业务技术攻关项目(YWJSJGG-202128)

作者简介: 旷兰(1987-),女,工程师,研究方向为水文气象及天气预报,E-mail:616032331@qq.com

通讯作者: 田茂举(1985-),男,硕士、高级工程师,研究方向为水文气象及天气预报,E-mail:147758044@qq.com

2.2 研究方法

结合《水文情报预报规范》^[5], 利用水文站点的实测水位及其对应的模拟淹没深度, 选取确定性系数 D_{DC} 、相关系数 C_{COR} 、技巧评分 T_{TS} 、命中率 P_{POD} 、空报率 F_{FAR} 、漏报率 M_{MR} 为评估洪水模拟误差的指标。其计算公式分别为:

$$D_{DC} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N [y_c(i) - y_o(i)]^2}{\sum_{i=1}^N [y_o(i) - \bar{y}_o]^2} \quad (1)$$

$$C_{COR} = \frac{\sum_{i=1}^N [(y_c(i) - \bar{y}_c)][(y_o(i) - \bar{y}_o)]}{\sqrt{\sum_{i=1}^N [(y_c(i) - \bar{y}_c)]^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N [y_o(i) - \bar{y}_o]^2}} \quad (2)$$

$$T_{TS} = N_{NA} / (N_{NA} + N_{NB} + N_{NC}) \quad (3)$$

$$P_{POD} = N_{NA} / (N_{NA} + N_{NC}) \quad (4)$$

$$F_{FAR} = N_{NB} / (N_{NA} + N_{NB}) \quad (5)$$

$$M_{MR} = N_{NC} / (N_{NA} + N_{NC}) \quad (6)$$

式中, $y_o(i)$ 为实测值, m ; $y_c(i)$ 为模拟值, m ; \bar{y}_o 为实测值的平均值, m ; \bar{y}_c 为模拟值的平均值, m ; N 为参与评估的总样本数; N_{NA} 为预报正确次数; N_{NB} 为空报次数; N_{NC} 为漏报次数。

选用降雨径流预报接受的许可误差为水位预报以预见期内实测变幅的 20%、峰现时间以预报根据时间至实测洪峰出现时间之间时距的 30%。其中, D_{DC} 是指洪水模拟过程与实测过程之间的吻合程度, 更偏重于洪水过程线的拟合, 以提高洪水整体的拟合程度^[6], 越接近 1 说明模拟结果越好; C_{COR} 、 T_{TS} 、 P_{POD} 越接近 1 说明效果越好; F_{FAR} 、 M_{MR} 越接近 0 说明效果越好。

当对预报项目进行精度等级划分时, 根据合格率或确定性系数的大小, 精度等级分为 3 个等级(表 1)。

表 1 预报精度等级

Tab. 1 Forecast accuracy grade

精度等级	合格率/%	确定性系数
甲	$Q_{QR} \geq 85$	$D_{DC} > 0.9$
乙	$70 \leq Q_{QR} < 85$	$0.7 \leq D_{DC} < 0.9$
丙	$60 \leq Q_{QR} < 70$	$0.5 \leq D_{DC} < 0.7$

3 水箱模型的建立

3.1 模型介绍

水箱模型^[7]原理是将复杂的降水过程转化为径流过程, 即对流域蓄水和出流的关系进行模拟, 通过控制水箱的蓄水深度、边孔高度及底孔出流

来计算流域的产流、坡度汇流及下渗等过程。目前, 水箱模型已在三峡入库站^[8]、汾河水库流域^[9]、牡丹江流域^[10]的洪水预报中得到了验证。考虑到降水空间分布和流域下垫面的差异, 为更好地反映蒲河流域的非均匀性, 本文选择若干个串、并联组合而成的串并混联多层水箱(图 2), 间接模拟地表径流、壤中流、浅层地下径流、深层地下径流的产流和下渗以及河网汇流的整个过程。

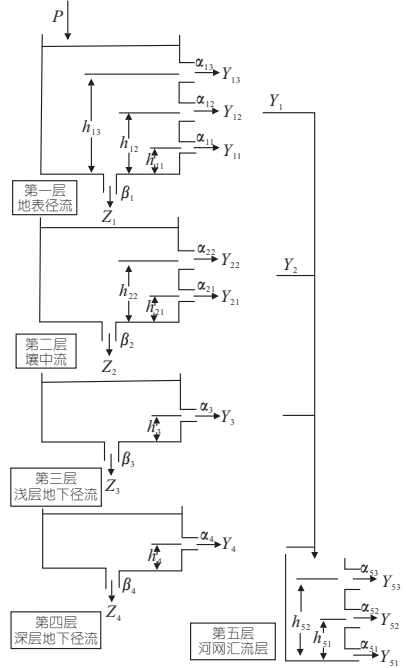


图 2 多层混联水箱模型的概念图

Fig. 2 Concept diagram of multi-layer hybrid water tank model

3.2 模型参数的率定

水箱模型参数与流域汇流的物理过程未建立直接关系, 其调蓄函数是非线性分段不可导函数, 且模型有多阶时间延迟, 系统传递函数关系复杂。参数主要包括各水箱的初始蓄水深、孔出流系数、孔高及水箱下渗系数等。对图 2 中的水箱模型结构图而言, 共有 28 个模型参数, 其中第四层水箱的底孔下渗代表水循环中的损耗。本文模型参数的选优主要采用蒙特卡罗方法和人工试错法相结合, 模型参数的意义、取值范围和选取值见表 2。

4 模型的应用及检验

4.1 长时间序列的模拟及检验

4.1.1 仿真模拟

将泰森多边形方法计算的流域面雨量数据代入水箱模型得到模拟后的汇流结果。用部分模拟结果与实测水位为依据, 分别编制出幂函数、指数函数和多项式曲线拟合程序进行分析与研究, 得到较为满意的流量—水位的拟合关系(图 3)。

表 2 蒲河流域水箱模型的参数值

Tab. 2 Parameters of Tank model in Puhe River Basin

名称	参数	符号	序号	取值范围		选取值	
				最小值	最大值		
第一层	初始蓄水深	D_1	1	0	35.0	16.00	
	出流系数	α_{11}	2	0.01	0.6	0.40	
		α_{12}	3	0.05	0.8	0.50	
		α_{13}	4	0.10	0.9	0.70	
		孔高	h_{11}	5	0	25.0	17.00
	h_{12}	6	5.00	40.0	20.00		
	h_{13}	7	10.00	50.0	30.00		
	下渗系数	β_1	8	0.05	0.9	0.50	
第二层	初始蓄水深	D_2	9	0	30.0	0	
	出流系数	α_{21}	10	0.01	0.6	0.03	
		α_{22}	11	0.10	0.9	0.40	
		孔高	h_{21}	12	0	25.0	20.00
		h_{22}	13	5.00	40.0	40.00	
	下渗系数	β_2	14	0.01	0.9	0.90	
第三层	初始蓄水深	D_3	15	0	25.0	0	
	出流系数	α_3	16	0.01	0.6	0.20	
	孔高	h_3	17	0	30.0	5.00	
	下渗系数	β_3	18	0.01	0.9	0.20	
第四层	初始蓄水深	D_4	19	0	20.0	0	
	出流系数	α_4	20	0.01	0.5	0.01	
	孔高	h_4	21	0	30.0	5.00	
	下渗系数	β_4	22	0.01	0.3	0.01	
第五层	初始蓄水深	D_5	23	0	10.0	0	
	出流系数	α_{51}	24	0.01	0.3	0.01	
		α_{52}	25	0.01	0.5	0.03	
		α_{53}	26	0.05	0.8	0.20	
		孔高	h_{51}	27	0	30.0	8.00
	h_{52}	28	10.00	50.0	14.00		

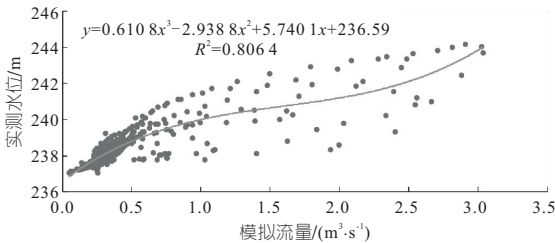


图 3 模拟流量—水位的拟合关系

Fig. 3 Fitting relationship between simulated discharge and water level

选取 5 次典型洪水过程进行率定,再仿真模拟全时段洪水过程(图 4)。由图 4 可知,模拟结果能较好地展现雨洪关系和洪峰水位的变化趋势,证明水箱模型在蒲河流域有一定的适用性。

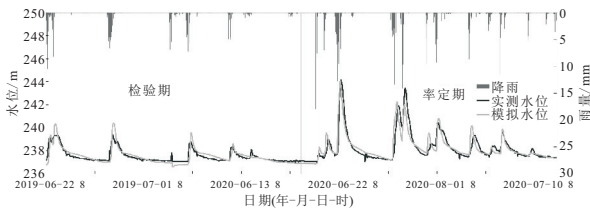


图 4 长时间序列仿真模拟全时段洪水过程

Fig. 4 Long time series simulation of full time flood process

4.1.2 效果检验

为进一步研究和验证水箱模型的适用性,提

取洪峰达到 238 m 及以上的历史个例用于验证,将 Tank 模型输出的模拟流量数据,代入流量—水位差的拟合关系式,得到模拟水位差,再加基准水位得到模拟水位数据,从而实现基于实时水位模拟河道水位,此长时间序列仿真模拟的逐次洪水过程精度评定见表 3。由表 3 可知,峰现时间预报精度全部合格,而洪峰水位预报精度却仅有 3 场合格。

表 3 长时间序列仿真模拟水位及峰现时间精度评定

Tab. 3 Precision of simulated water level and peak time of long time series

序号	洪号	预报洪峰水位 /m	实际洪峰水位 /m	许可误差 /h	预报误差 /m	是否合格	峰现时间允许误差/h	峰现时间预报误差/h	是否合格
1	190623	240.37	239.34	0.43	1.03	否	3	-1	是
2	190628	240.01	239.42	0.46	0.59	否	3	-3	是
3	200608	239.13	238.82	0.35	0.31	是	3	-2	是
4	200612	237.71	238.38	0.25	-0.67	否	3	-2	是
5	200622	243.89	244.15	1.43	-0.26	是	3	2	是
6	200628	242.06	243.46	1.25	-1.40	否	3	1	是
7	200701	240.30	240.50	0.58	-0.20	是	3	-2	是
8	200704	238.13	239.33	0.37	-1.20	否	3	3	是
9	200707	238.10	239.71	0.45	-1.61	否	3	-3	是

图 5 为长时间序列仿真模拟每次洪水过程。由图 5 可知,模拟结果对较长时间序列的 200608、200622、200701 号洪水预警有较好的指示意义,对 200628 号双峰型洪水预警也有一定的作用,但对预警标准以下的一般性洪水存在较大的误导,且无调节机制,不适用于日常业务的开展。

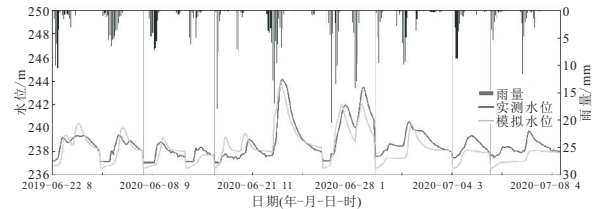


图 5 长时间序列仿真模拟每次洪水过程

Fig. 5 Long time series simulation of each flood process

按照《重庆市綦江区防汛抗旱指挥部关于印发〈重庆市綦江区水情预警发布制度(试行)〉的通知》规定的预警标准分级作评定(表 4)。由表 4

表 4 长时间序列仿真模拟预报精度评定结果

Tab. 4 Evaluation of prediction accuracy of long time series simulation

等级	洪峰预报合格率/%	峰现时间合格率/%	D_{DC}	精度等级	C_{COR}	T_{TS}	P_{POD}	F_{FAR}	M_{MR}
红色预警	—	—	—	—	—	—	—	—	—
橙色预警	50	100	0.78	—	0.89	0.50	50	0	50
黄色预警	50	100	0.78	—	0.89	1.00	100	0	0
蓝色预警	67	100	0.71	丙等	0.86	0.75	100	25	0
≥ 239.00	29	100	0.61	—	0.84	0.63	71	17	29
≥ 238.00	33	100	0.62	—	0.85	0.89	89	0	11

注:“—”表示缺测,无等级。

可知,该方案对超警及以上的洪水预报精度达到丙级,仅适用于参考性估报,对预警标准以下的一般性洪水精度更低,且存在一定的空报和漏报。

4.2 模型的改进及检验

通过建立以实时水位数据为基准的暴雨致洪水气象风险预报模型,以提高洪水预报精度、延长洪水预报预见期。

4.2.1 改进模拟

模拟后的汇流结果与实际测量水位差进行拟合,得到流量—水位差的多项式曲线拟合关系(图 6),以期实现基于当前实时水位模拟一段时间内河道水位的变化趋势。

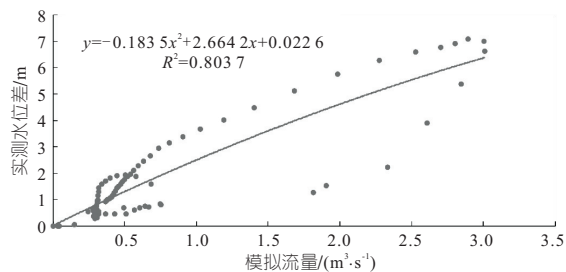


图 6 模拟流量—水位差的拟合关系

Fig. 6 Fitting relationship between simulated discharge and water level difference

4.2.2 效果检验

为验证改进后的模型能否真正基于实时水位数据模拟,将 200628 号双峰型洪水拆分成 200627、200628 号两个洪水。改进后模拟的逐次洪水过程精度评定见表 5。由表 5 可知,洪峰水位预报精度 7 场合格,峰现时间预报精度全部合格。

表 5 改进模型仿真模拟水位及峰现时间精度评定

Tab. 5 Accuracy evaluation of simulated water level and peak time of improved model

序号	洪号	预报洪峰水位 /m	实际洪峰水位 /m	许可误差 /h	预报误差 /m	是否合格	峰现时间允许误差/h	峰现时间预报误差/h	是否合格
1	190623	239.34	239.34	0.44	0	是	3	-1	是
2	190628	239.69	239.42	0.46	0.27	是	3	-3	是
3	200608	238.64	238.82	0.35	-0.18	是	3	-2	是
4	200612	237.75	238.38	0.25	-0.63	否	3	-2	是
5	200622	243.44	244.15	1.43	-0.71	是	3	2	是
6	200627	242.65	241.94	0.95	0.71	是	3	3	是
7	200628	244.2	243.46	1.25	0.74	是	3	1	是
8	200701	240.58	240.50	0.58	0.08	是	3	-2	是
9	200704	238.35	239.33	0.37	-0.98	否	3	3	是
10	200707	238.52	239.71	0.45	-1.19	否	3	-3	是

按照规定的预警标准分级来评定(表 6)。由表 6 可知,改进后的方案各等级的精度均达到乙等,可用于正式预报。该方案对超警及以上洪水预报的命中率提高到 100%,虽然对预警标准以下的一般性洪水存在一定的漏报,但不会影响日常预警业务。

表 6 改进模型仿真模拟预报精度评定

Tab. 6 Prediction accuracy evaluation of improved model simulation

等级	洪峰预报合格 率/%	峰现时 间合格 率/%	D_{DC}	精度 等级	C_{COR}	T_{TS}	P_{POD}	F_{FAR}	M_{MR}
红色预警	—	—	—	—	—	—	—	—	—
橙色预警	100	100	0.86	乙等	0.93	1.00	100	0	0
黄色预警	100	100	0.82	乙等	0.91	1.00	100	0	0
蓝色预警	100	100	0.80	乙等	0.90	1.00	100	0	0
≥239.00	75	100	0.77	乙等	0.89	0.75	75	0	25
≥238.00	70	100	0.78	乙等	0.89	0.90	90	0	10

注:“—”表示缺失,无等级。

图 7 为改进模型仿真模拟每次洪水过程。由图 7 可知,改进模型可很好地模拟不同时间尺度、不同基础水位条件下的水位变化过程曲线。虽然对预警标准以下的一般性洪水的洪峰水位仍存在低估,但不会对日常预警业务存在跨级误导,且具有很大的参考价值。

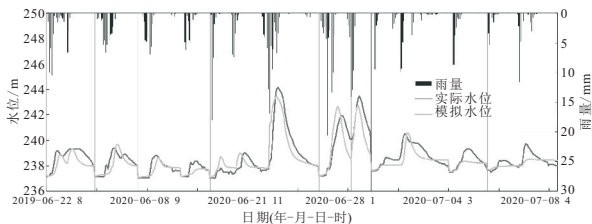


图 7 改进模型仿真模拟每次洪水过程

Fig. 7 Improved model simulation to simulate each flood process

通过对 4 次超警戒水位的洪水过程进行模拟预警(图 8)。发现各级预警均有很好的表现,命中率为 100%。在不考虑后续降水的情况下,预警发布平均提前 3 h 以上,橙色预警平均提前 3.5 h;后续代入预测降水能进一步延长洪水预报预见期。改进后的模型能实现基于实时水位数据和预报数据模拟,且能实现逐级预警。

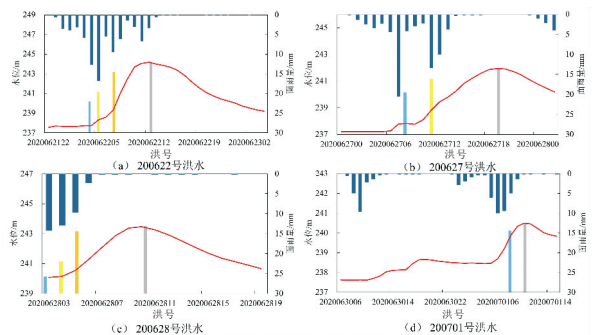


图 8 洪水过程及预警模拟

Fig. 8 Flood process and early warning simulation

将改进的水箱模型应用于蒲河流域 2019~2020 年的 10 场洪水(4 场超警戒水位、6 场未超警戒水位)预警中进行验证(表 7)。由表 7 可知,改进后的模型准确预报了 4 场超警洪水,准确率为 100%,能减少面雨量阈值的不确定性。在实

表 7 改进的水箱模型模拟的气象预警应用验证

Tab. 7 Verification of meteorological early warning based on improved Tank model simulation

序号	洪号	预警级别	改进水箱模型		
			是否预警	提前量/h	是否正确
1	190623	蓝色预警	否	—	是
2	190628	蓝色预警	否	—	是
3	200608	蓝色预警	否	—	是
4	200612	蓝色预警	否	—	是
5	200622	蓝色预警	是	4	是
		黄色预警	是	4	是
		橙色预警	是	3	是
6	200627	蓝色预警	是	6	是
		黄色预警	是	5	是
7	200628	蓝色预警	是	1	是
		黄色预警	是	2	是
		橙色预警	是	4	是
8	200701	蓝色预警	是	1	是
9	200704	蓝色预警	否	—	是
10	200707	蓝色预警	否	—	是

注：“—”表示不参与平均提前量的计算。

际业务应用中,可用于定量评价暴雨洪涝淹没模拟,动态监测洪水过程,以提高洪水气象风险预警的精度和时效,开展气象和水文相融合的影响预报与风险预警业务。

5 结论

a. 水箱模型的模拟结果能较好地展现雨洪关系和洪峰水位的变化趋势,峰现时间预报精度全部合格,洪峰水位预报精度只有 3 场合格;而改进后基于基础水位的水箱模型洪峰水位预报精度有 7 场合格,其中超警戒水位洪水过程的洪峰水位预报精度全部合格,预报精度为乙等;能根据模拟结果逐级发布气象风险预警,技巧评分和命中

率为 100%;平均预警发布时间提前 3 h 以上,可代入预测降水进一步延长洪水预报预见期。

b. 由于人类对自然环境不断地开发利用,流域下垫面和气候环境也在不断变化,模型参数还需在试验过程中不断调整优化。

参考文献:

[1] 金倩芳,周建中,严冬,等. TOPMODEL 模型在长江上游无资料地区的水文模拟[J]. 水电能源科学, 2018,36(9):44-47.

[2] 孙娜,周建中,朱双,等. 基于小波分析的两种神经网络耦合模型在月径流预测中的应用[J]. 水电能源科学,2018,36(4):14-17,32.

[3] 胡彩虹,王金星. 流域产汇流模型及水文模型[M]. 郑州:黄河水利出版社,2009.

[4] 罗志勇,杨炳良,管晓祥,等. 不同水文模型在金溪流域的模拟与适应性研究[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版),2018,39(3):6-12.

[5] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 水文情报预报规范:GB/T22482-2008[S]. 北京:中国标准出版社,2009.

[6] 孙娜,周建中,张海荣,等. 新安江模型与水箱模型在柘溪流域适用性研究[J]. 水文,2018,38(3):37-42.

[7] 詹道江,徐向阳,陈元芳. 工程水文学[M]. 北京:中国水利水电出版社,2010.

[8] 汤成友,缪韧,舒栋才. 水箱模型在三峡入库洪水预报模型研制中的应用[J]. 水利水电科技进展,2006(4):40-42.

[9] 胡效宁,路全福,左海凤,等. 半干旱地区水库洪水预报中对水箱模型改进的研究和应用[J]. 海河水利,1999(1):5-8,48.

[10] 关志成,朱元牲,段元胜,等. 水箱模型在北方寒冷湿润半湿润地区的应用探讨[J]. 水文,2001,21(4):25-29.

Application of Tank Model in Flood Meteorological Risk Early Warning of Small and Medium-sized Rivers

KUANG Lan¹, TIAN Mao-ju¹, XIAO Lei², CHEN Xi-xi², HAI Chuan¹, GE Di-ting¹

(1. Chongqing Qijiang District Meteorological Bureau, Chongqing 401420, China;

2. Zunyi Meteorological Bureau, Zunyi 563000, China)

Abstract: Based on the climatic conditions and flood characteristics of the Puhe River Basin, this paper used Tank model to simulate 10 rainstorm flood processes in the basin from 2019 to 2020, constructed a conceptual rainstorm flood meteorological risk early warning model suitable for the basin, and carried out simulation and accuracy evaluation. The results show that the improved water tank model can intuitively simulate the water level change process curve of Shijiao hydrological station under different time scales and different basic water levels, reduce the uncertainty of area rainfall threshold, and the prediction accuracy is class B; Meteorological risk warning is issued level by level according to the simulation results, and the skill score and hit rate are 100%; The average early warning release time is more than 3 hours in advance, which can be substituted into the predicted precipitation to further extend the flood forecast period.

Key words: Tank model; flood of medium and small rivers; meteorological risk warning; flood warning