

旷兰,田茂举,康俊,等. 基于 FloodArea 模型的一次特大暴雨洪涝淹没模拟[J]. 中低纬山地气象,2023,47(2):24-29.

基于 FloodArea 模型的一次特大暴雨洪涝淹没模拟

旷 兰¹,田茂举¹,康 俊²,翟丹华³,刘 祥⁴,庞 玥³

(1. 重庆市綦江区气象局,重庆 綦江 401420;2. 重庆市气候中心,重庆 401147;
3. 重庆市气象台,重庆 401147;4. 重庆市气象服务中心,重庆 401147)

摘 要:利用蒲河流域内所有国家气象站以及区域自动气象站共 28 站逐小时降水实况、过程降水量、数字高程模型、土地利用、土壤类型等资料,采用 FloodArea 水动力模型,对 2020 年 6 月 19 日 21 时—22 日 20 时出现的历史罕见暴雨洪涝过程进行洪水淹没模拟及效果检验。模拟结果表明:(1)全过程模拟水位与实测水位整体拟合度较高,确定性系数 DC 达 93.22%;(2)蒲河上游来水较小,持续性强降水是造成此次洪涝水位偏高的主要原因,模拟显示蒲河流域中上游水位上涨明显,其中石角水文站模拟的最大上涨水位达 7.61 m,与实测上涨水位 7.14 m 较为一致;(3)FloodArea 水动力模型能够较准确地反演出蒲河流域暴雨致洪个例的淹没进程,能够直观地反映出淹没范围、淹没深度的空间差异,且淹没深度与逐小时实测水位的确定性系数较高,淹没深度的突增对洪峰的预报预警具有一定的指示意义。

关键词:FloodArea 水动力模型;暴雨洪涝;泰森多边形;面雨量

中图分类号:P426.616 **文献标识码:**A

Flood Inundation Simulation of a Heavy Rainstorm Based on FloodArea

KUANG Lan¹, TIAN Maoju¹, KANG Jun², ZHAI Danhua³, LIU Xiang⁴, PANG Yue³

(1. Meteorological Bureau of Qijiang District, Qijiang 401420, China;2. Chongqing Climate Center, Chongqing 401147, China;3. Chongqing Meteorological Observatory, Chongqing 401147, China;
4. Chongqing Meteorological Service Center, Chongqing 401147, China)

Abstract:Based on the hourly precipitation, process precipitation, digital elevation model, land use, soil type and other data of 28 national meteorological stations and regional automatic meteorological stations in Puhe River Basin, the flood inundation simulation and effect test of the historical rare rainstorm and flood process from 21:00 on June 19 to 20:00 on June 22, 2020 are carried out by using the flood area hydrodynamic model. The simulation results show that: (1) the overall fitting degree of the simulated water level and the measured water level in the whole process is high, and the certainty coefficient DC reaches 93.22%. (2) The inflow from the upper reaches of Puhe River was small, and the continuous heavy precipitation was the main reason for the high flood level. The simulation results show that the water level in the middle and upper reaches of Puhe River Basin increased significantly, and the maximum water level simulated by Shijiao hydrological station was 7.61 meters, which was consistent with the measured water level of 7.14 meters. (3) FloodArea hydrodynamic model can accurately reflect the performance of PuHe River Basin rainstorm flood process, to flood example can intuitively reflect the scope of flood, submerged depth of the space difference, and submerged depth and the deterministic coefficient of the measured water level is higher, one by one hour submerged depth of a spate of flood forecast warning has a certain

收稿日期:2022-02-28

第一作者简介:旷兰(1987—),女,工程师,主要从事天气预报预警工作,E-mail:616032331@qq.com。

通讯作者简介:田茂举(1985—),男,硕士,高工,主要从事天气预报预警工作,E-mail:147758044@qq.com。

资助项目:重庆市气象部门业务技术攻关项目:面向致灾过程的蒲河流域洪水演进模拟及检验(YWJSGG-202128)、綦江暖区暴雨特征分析及预报模型研究(YWJSGG-202012)。

instruction significance.

Key words: FloodArea model; rainstorm and flood; Tyson polygon; areal rainfall

0 引言

近年来,暴雨诱发的中小河流洪涝灾害呈多态势,因其具有突发性,水量集中流速大、冲刷破坏力强,常造成人身伤亡和财产损失,越来越受到社会各界的广泛关注。如 2020 年 6 月 19—22 日綦江出现了持续性强降水天气过程,发生了破历史记录的特大暴雨洪涝灾害。因此开展中小河流暴雨洪水的淹没模拟,提升中小河流暴雨洪涝监测预警能力对防灾减灾具有重要意义。目前,基于 ArcGIS 与水动力模型结合的洪水淹没模拟研究较多,通过二维水动力洪水动态演进模型模拟长江流域不同洪峰流量下分洪区的洪水淹没范围和水深^[1];通过 FloodArea 模型研究山洪灾害风险雨量评估^[2];根据前期和现时的大气与流域水文状态,使用气象学与水文学原理与预报技术,对未来水文循环中某一水体、某一流域或者某一站点/格点的降水、蒸发、土壤水分、径流等水文气象要素的状态及可能影响进行预报预测;在灾害风险普查和灾害信息库基础上,确定中小河流洪水、山洪与地质灾害的致灾气象条件阈值,结合精细化降水估测与预报,发布气象灾害风险预警,基于业务检验动态评估风险预警效果效益,这些研究对暴雨洪涝灾害的预警具有重要意义。

本文主要以綦江蒲河流域为例,开展基于 FloodArea 水动力模型的暴雨洪涝淹没模拟研究,动态模拟暴雨致洪演进过程,提取不同时相的淹没水深与实测水位进行对比验证分析,加强业务衍生产品的应用,提升短时临近预报预警能力,以期面向实时的暴雨洪涝灾害风险动态评估业务提供技术支撑,有助于发挥防洪减灾第一道防线作用。

1 数据来源与研究方法

1.1 研究区概况

蒲河发源于南川区神童镇青杠桠,全长 67.8 km,由 1 条主干流(神童主干流)、1 条支干流(隆盛支干流)、3 条支流(万盛支流、石莲支流、南桐支流)组成,其流域面积形状呈倒背带裤状,蒲河在綦江中游三江处汇入,沿岸乡镇多,人口密,因此防洪预警对防洪减灾具有重要意义。蒲河流域地处新华夏系第 3 隆起带和第 3 沉降带之间,即四川沉降褶皱带之川东褶皱带东缘与川鄂湘黔隆起带西缘的交

接部位。流域内地貌特点:东高西低、南高北低,以山地为主,受河流切割,沟深谷多,少完整山脉,地势高差大。流域属于亚热带湿润季风气候区,年均气温 13~19℃,全年无霜期 250~350 d,年平均降水 1019.5 mm,降水多集中在汛期 4—10 月,其中以 6—7 月最多。2020 年 6 月 19 日 21 时—22 日 20 时蒲河流域普降暴雨到大暴雨,受持续性强降水影响,蒲河流域下游洪水猛涨,出现了 80 a 一遇的特大暴雨洪涝灾害。蒲河流域暴雨洪水的汇流特点、数字地面高程 DEM 以及水系分布特征见图 1。石角水文站始建于 1958 年 6 月,位于重庆市綦江县石角镇桃花村,地理坐标为 106°48'E, 28°56'N,流域集水面积 707 km²,海拔 248 m(85 基准基面),基本断面距河口距离 9.8 km。该站建于长江二级支流、綦江一级支流蒲河上,为国家基本水文站。

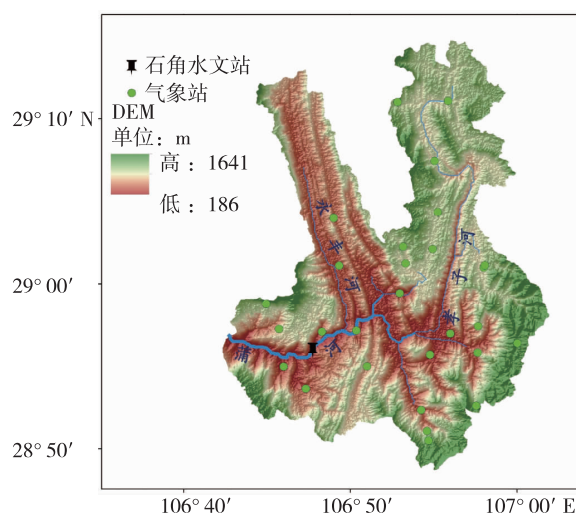


图 1 蒲河流域地形、水系、自动气象站、水文站分布

Fig. 1 Distribution of topography, water system, automatic weather stations and hydrological stations in Puhe River Basin

1.2 数据来源

降水数据:蒲河流域范围内的自动气象站点(包括綦江、万盛、南川等 28 个自动气象站点)2020 年 6 月 19 日 21 时—22 日 20 时的气象信息综合分析显示系统(MICAPS)逐小时地面降水观测资料。MICAPS 是我国天气预报预测业务中广泛使用的工具之一,能够提供多种气象数据的显示、分析。

水位数据:由重庆市水利局提供的石角水文站的逐小时水位、流量数据。

地形高度 DEM 模型:采用空间分辨率数据为

30 m 的 SRTM 数字高程模型, ALBERS 等面积圆锥投影, WCG1984 大地坐标系^[3-5]。

1.3 研究方法

1.3.1 流域边界提取方法 利用 ArcGIS 的水文分析模块, 对嵌入河网的 DEM 进行分析, 通过填洼、汇流等处理, 再给定出水口位置, 利用流域生成功能, 生成流域边界, 如图 1^[6]。

1.3.2 FloodArea 模型 是基于水动力方法, 内嵌于 ArcGIS 平台, 由德国 Geomer 公司开发的洪水淹没模型。模型通过同时兼顾堤坝、溃口、坡度、地表

水利糙度以及地表产流系数对暴雨洪水进行模拟, 最终以栅格形式输出, 其中水流的淹没深度为淹没水位高程和地面高程之差。淹没过程中的水流方向由地形坡向决定, 坡向即为该点高程值的最大变化方向。地表水力糙度是衡量河道边壁形状不规则性和粗糙程度影响的一个综合性系数。FloodArea 模型主要有漫顶、溃口以及暴雨 3 种基本淹没情景, 根据蒲河流域的实际情况, 本文主要利用蒲河流域内地表覆盖类型及其糙率转变的数值进行赋值, 选用暴雨淹没情景进行模拟, 见图 2a。

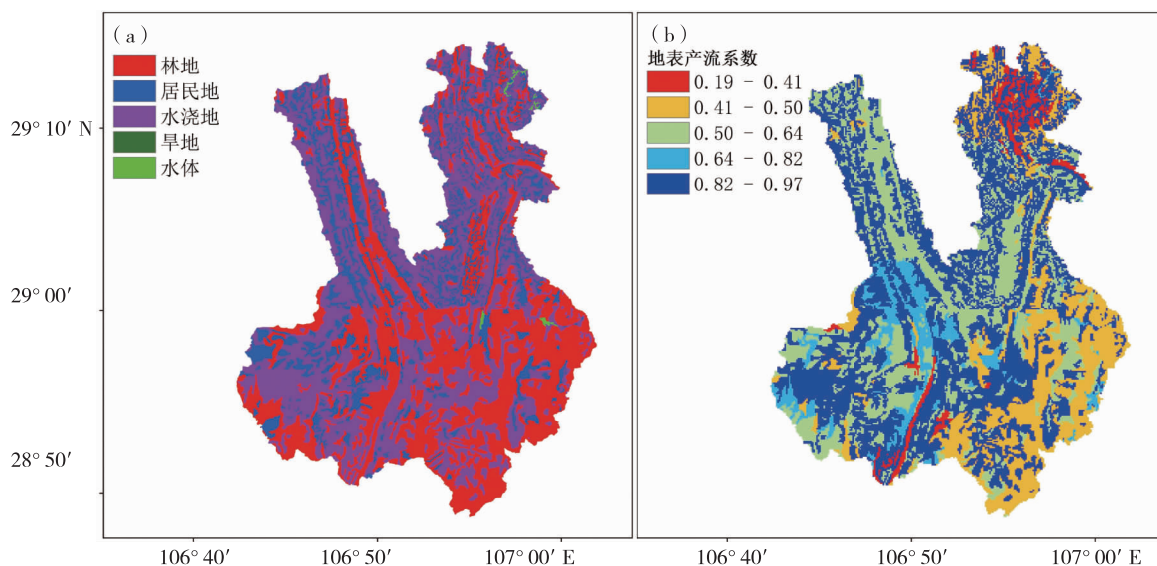


图 2 蒲河流域地面糙率(a)、径流系数(b)

Fig.2 Surface roughness (a) and runoff coefficient (b) in Puhe River Basin

地表产流系数 SCS (Soil Conservation Service) 模型主要依据地表覆盖类型来确定 SCS 模型的参数^[7], 见图 2b。可以通过土壤类型、地表覆盖类型以及前期土壤含水量比较客观地反映降雨径流影响^[8]。

1.3.3 泰森多边形法 通过蒲河流域的数字高程 DEM, 利用 ArcGIS 生成蒲河流域水系文件, 截取所要分析的流域, 再根据流域分布及自动气象站分布, 利用 ArcGIS 制作流域内的泰森多边形, 最后采用权重法计算流域面雨量, 见图 3。

$$AR = \sum_{i=1}^N (R_i \times A_i) / A \quad (1)$$

式中, AR 为蒲河流域面雨量, R_i 为自动气象站点 i 的雨量, A_i 为自动气象站点 i 代表的面积, A 为蒲河流域总面积, N 为泰森多边形个数。

1.3.4 评估指标 根据《水文情报预报规范》, 选取确定性系数 (DC) 作为评估洪水模拟误差的一个指标。确定性系数 (DC) 是指洪水模拟过程与实测

过程之间的吻合程度, 它更偏重于洪水过程线的拟合, 以提高洪水整体的拟合程度^[9]。

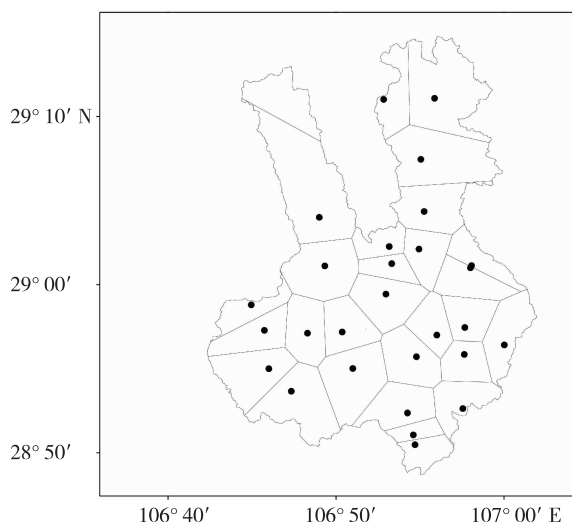


图 3 蒲河流域的泰森多边形视图

Fig.3 Tyson polygon view of Puhe River Basin

$$DC = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n [y_c(i) - y_o(i)]^2}{\sum_{i=1}^n [y_o(i) - \overline{y_o}]^2} \quad (2)$$

式中, $y_o(i)$ 为实测值, $y_c(i)$ 为模拟值, y_o 实测值的均值, n 参与评估的总样本数。

2 结果与分析

2.1 降水实况空间分布

此次多轮持续性强降水天气过程发生在稳定的大尺度环流背景下,其中,中高纬地区 500 hPa 维持两槽一脊环流形势,西太平洋副高在长江沿线以南地区稳定少动,青藏高原东部不断有低槽发展东移,影响四川、重庆、贵州一带。从图 4 降水的时间分布可以发现,此次降水过程持续时间长,以 20 时为日界,整个降水过程跨度超过了 3 d,且均以夜间降水为主,单站降水强度大。按照降水时效性特点,此次强降水过程总共分为 3 个时段,如图 5,第 1 个时段为 19 日 21 时—20 日 20 时,整个流域普降大雨,局部暴雨,其中永城站 05 时出现了 54.5

mm · h⁻¹;第 2 个时段为 20 日 21 时—21 日 20 时,整个流域普降中雨到大雨;第 3 个时段为 21 日 21 时—22 日 16 时,整个流域普降暴雨到大暴雨,最大雨量为永城站 197.8 mm,此阶段降水强度最大,持续时间最长;整个过程 100% 的站点达到了暴雨以上量级,92.9% 的站点达到了大暴雨以上量级,其中永城站点达到了特大暴雨量级,而永城站所在的支流是蒲河流域的一条重要支流,然后汇入蒲河。

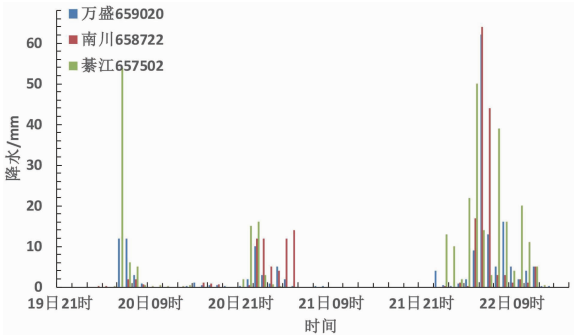


图 4 蒲河流域降水中心点的时间序列
Fig. 4 Time series of precipitation centers in Puhe River Basin

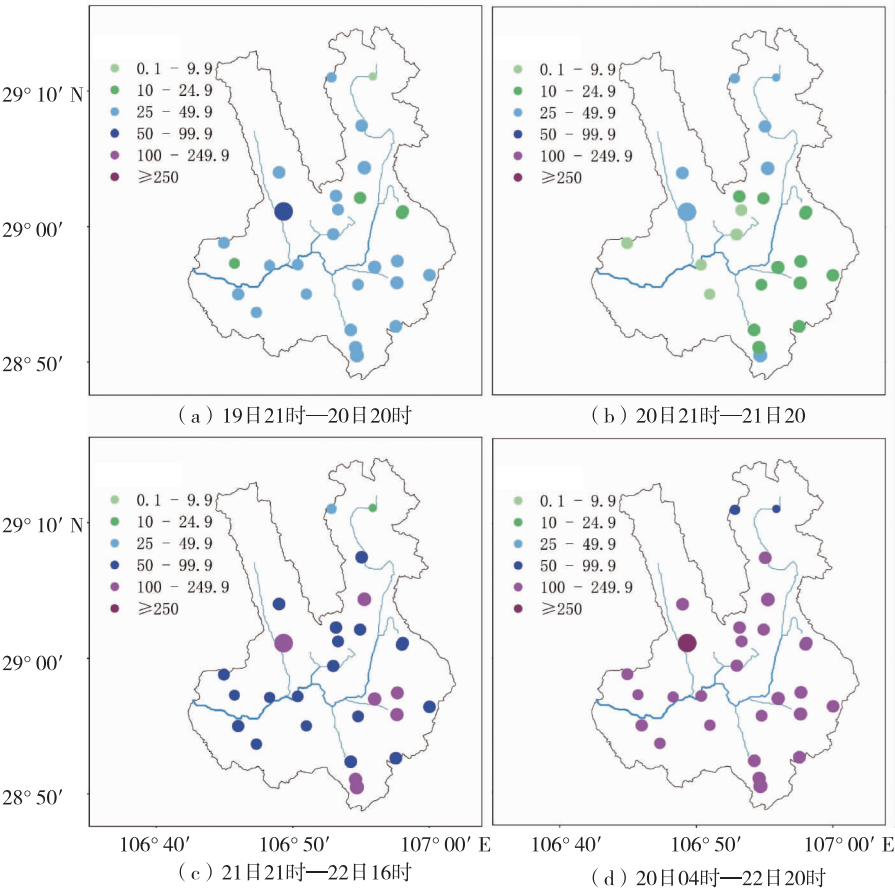


图 5 蒲河流域降水的空间分布(单位:mm)
Fig. 5 Spatial distribution of precipitation in Puhe River Basin(unit:mm)

2.2 淹没模拟结果分析

通过 FloodArea 水文模型中的暴雨模块对此次过程进行动态模拟,步长选取为 1 h,运行时间 72 h,并对输出的淹没结果进行分析(图 6)。图 6a 模拟的时效为 19 日 21 时—20 日 20 时,图 6b 模拟的时效为 19 日 21 时—21 日 20 时,图 7c 模拟的是整个过程的 72 h 淹没情况。结果发现,受降水影响,淹没深度随着降水量级的增加而更加明显,整个汇流和淹没过程非常清晰。从图 6c 可以看出,整个蒲河

流域的淹没水深大部分超过了 1.2 m,相比于前 48 h 淹没情况更加明显。通过提取石角水文站点的逐小时淹没深度发现(图略),此次淹没过程也同降水过程一样分为 3 个阶段,呈阶梯状,第 3 阶段淹没深度明显上升,6 月 22 日 09 时提取的石角水文站点的模拟淹没深度开始超过 5 m,而石角水文站实测水位在 22 日 12 时达到了洪峰值 244.15 m,可见淹没水深的猛增对洪峰水位具有一定的指示意义。

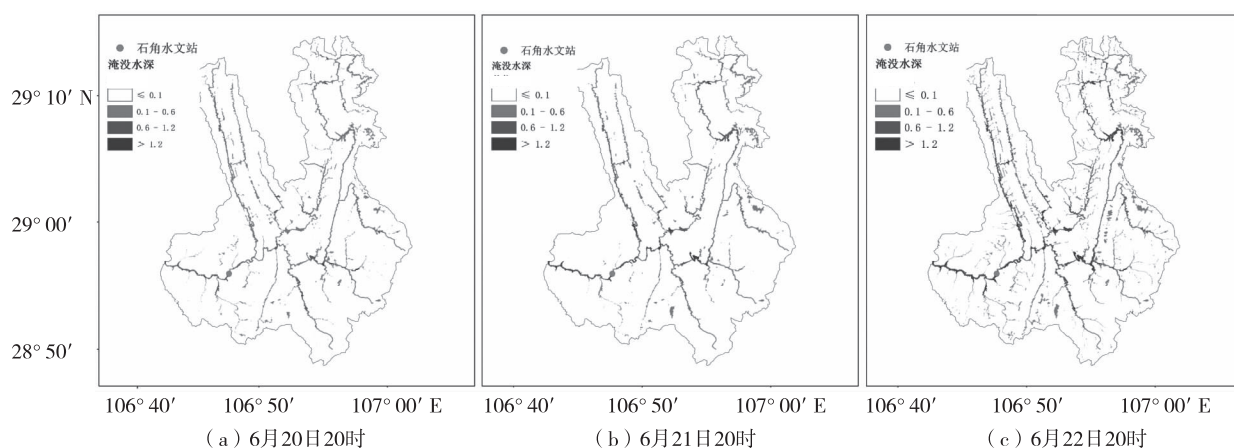


图 6 FloodArea 模型模拟的不同时效的淹没深度(单位: m)

Fig. 6 The FloodArea model simulates the inundation depth of different aging(unit:m)

利用水文模型计算地表径流,模拟暴雨致洪演进过程,提取不同时相的淹没水深与实测水位进行对比研究发现,模拟水位与实测水位的确定性系数 DC 达到了 93.22%,说明此次暴雨洪涝过程整体拟合度较好。从逐小时面雨量与实测水位、模拟水位之间的关系(图 7)发现,间断的短时强降水导致的小时面雨量突增对水位的影响较小,只有持续性的强降水才能引起水位的增加,但前期降水对于后期的水位增加具有一定的铺垫作用,由此可见持续性强降水是影响洪涝水位高低的主要原因。此外还发现,6 月 20 日 04—10 时,模拟水位较实测水位偏高,这是因为 6 月 20 日 04 时以前流域无降水,流域土壤水分含量极低,一旦降水首先会被土壤吸收一部分,所以实测水位较模拟水位偏低;6 月 21 日 04—10 时模拟水位并未上升,而实测水位上升较大,这是上游水库放水所致。整体上说,模拟结果与实测结果总体趋势比较吻合,但涉及土壤含水量的饱和程度和外界因素影响,在细节特征上(特别是有些水位突变特征)无法完全模拟。

针对此次过程进行洪水检验(图 8),提前了 5 h 准确发布橙色预警,具有较大的参考价值。Flood-

Area 水动力模型能够较准确地反演出蒲河流域暴雨致洪个例的淹没进程,能够直观地反映出淹没范围、淹没深度的空间差异,且淹没深度与逐小时实测水位的确定性系数较高,淹没深度的猛增对洪峰的预报预警具有一定的指示意义。但由于受到 FloodArea 水动力模型参数率定的历史洪水场次和资料的限制,所得结论可能存在一定偏差。随着今后暴雨洪涝场次的新增,将根据实测水位与模拟淹没深度的差异对蒲河流域的地表水力糙度和地表产流系数进行更加精细的率定,从而计算出适合本流域的模型参数以及历史洪水的淹没进程。

3 结论与讨论

利用蒲河流域内所有国家气象站以及区域自动气象站共 28 站逐小时降水实况、过程降水量、数字高程模型、土地利用、土壤类型等资料,采用 FloodArea 水动力模型,对 2020 年 6 月 19 日 21 时—22 日 20 时出现的历史罕见暴雨洪涝过程进行洪水淹没模拟及效果检验。模拟结果表明:

(1)全过程模拟水位与实测水位整体拟合度较高,确定性系数 DC 达 93.22%;

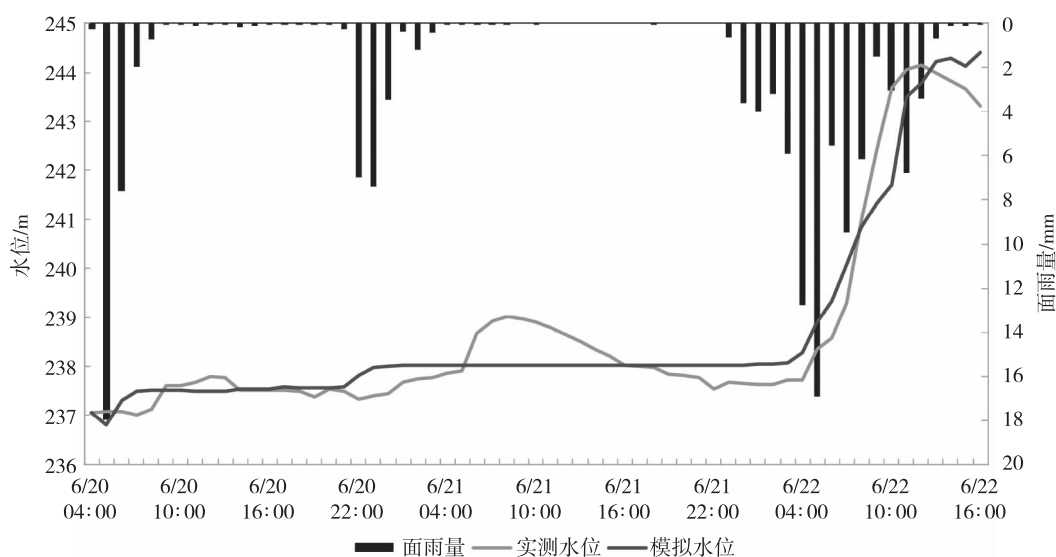


图7 石角水文站逐小时实测水位与模拟水位、面雨量的关系

Fig. 7 Relationship between hourly measured water level and simulated water level and area rainfall at Shijiao hydrological station

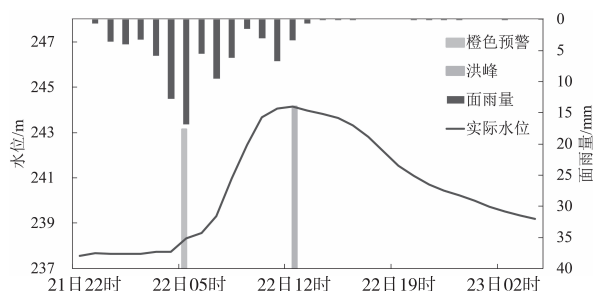
图8 2020年6月21—23日
石角水文站洪水过程及预警模拟

Fig. 8 Flood process and early warning simulation at Shijiao hydrological station from 21 to 23 June, 2020

(2) 蒲河上游来水较小,持续性强降水是造成此次洪涝水位偏高的主要原因,模拟显示蒲河流域中上游水位上涨明显,其中石角水文站模拟的最大上涨水位达 7.61 m,与实测上涨水位 7.14 m 较为一致;

(3) FloodArea 水动力模型能够较准确地反演出蒲河流域暴雨致洪个例的淹没进程,能够直观地反映出淹没范围、淹没深度的空间差异,且淹没深度与逐小时实测水位的确定性系数较高,淹没深度的突增对洪峰的预报预警具有一定的指示意义。

本文仅使用了 1 次个例对 FloodArea 水动力模型在蒲河流域进行适用性研究,该模型是否适用于其他流域、其他暴雨洪涝过程还有待于进一步研究。

参考文献

[1] 苏布达,姜彤,郭业友,等. 基于 GIS 栅格数据的洪水风险动态模拟模型及应用[J]. 河海大学学报,2005,33(4):370-374.

[2] 文明章,林昕,游立军,等. 山洪灾害风险雨量评估方法研究[J]. 气象,2013,39(10):1325-1330.

[3] 周杰,陈良吕,等. 重庆市清江河流域山洪致灾临界面雨量研究[J]. 西南师范大学学报(自然科学版),2018,43(2):42-48.

[4] 周杰,刘晓冉,康俊,等. 基于 FloodArea 的三峡库区小流域山洪面雨量分析[J]. 西南师范大学学报(自然科学版),2019,47(4):697-704.

[5] 康俊,孙佳,程炳岩. 基于 ArcHydroTools 的涪江流域特征自动提取分析[J]. 西南师范大学学报(自然科学版),2017,42(6):83-87.

[6] 俞雷,刘洪斌,武伟. 基于 DEM 的重庆三峡库区流域水系提取研究[J]. 西南农业大学学报(自然科学版),2006,28(2):215-218.

[7] 甘衍军,李兰,杨梦裴. SCS 模型在无资料地区产流计算中的应用[J]. 人民黄河,2010,32(5):30-31.

[8] 刘家福,蒋卫国,占凤凤. SCS 模型及其研究进展[J]. 水土保持研究,2010,17(2):120-124.

[9] 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.

[10] 水利部水文局. 水文情报预报规范:GB/T22482-2008[S].

[11] 田茂举,旷兰,康俊,等. CMPAS 产品在綦江流域面雨量研究中的应用[J]. 湖北农业科学,2021,60(增刊II):171-175.

[12] 旷兰,田茂举,谭建国,等. 重庆市綦江地区短时强降水天气分析[J]. 中低纬山地气象,2020,44(2):24-30.

[13] 曾妮,方鹏,李启芬,等. 安顺市大暴雨的时空分布特征与物理量分析[J]. 中低纬山地气象,2020,44(6):66-70.

[14] 张凌云,刘蕾,苏小玲,等. 桂北后汛期一次持续性暴雨天气过程分析[J]. 中低纬山地气象,2020,44(6):25-31.

[15] 田茂举,旷兰,海川,等. 綦江流域 80 a 一遇特大暴雨实况与影响系统分析[J]. 中低纬山地气象,2022,46(4):40-44.