

DEM 分辨率对山洪淹没模拟影响

刘天雪^{1,2}, 王瑛^{1,2}, 陈笑娟³, 俞海洋³, 张越^{1,2}

(1. 北京师范大学 环境演变与自然灾害教育部重点实验室, 北京 100875; 2. 应急管理部及教育部
减灾与应急管理研究院, 北京 100875; 3. 河北省气象灾害防御中心, 河北 石家庄 050021)

摘要: DEM 是表征地形状况的重要指标, 在山洪淹没模拟中起着重要作用。以 2016 年 7 月 19 日发生在河北省石家庄市井陘县西部山区的特大暴雨山洪事件为研究对象, 利用 HEC-HMS 水文模型和 FLO-2D 水动力模型, 设置 5 种 DEM 分辨率方案(30、20、15、10、5 m), 从淹没范围和淹没水深两方面分析了 DEM 分辨率对山洪淹没模拟的影响, 并从模型运行时间角度对其运行效率进行了评估。研究表明: DEM 分辨率越高, 则淹没范围越小, 平均淹没水深越大, 即模型模拟精度越高, 山洪事件的淹没范围及水深越接近于实际调查情况(DEM 分辨率为 30 和 5 m 时, 淹没范围及淹没深度的模拟精度分别为 0.56 和 0.41、0.76 和 0.79); 随着 DEM 分辨率的提高, 尤其从 10 m 提高至 5 m 时, 模拟结果差异减少, 模拟精度的增幅也减小, 淹没范围和水深的精度增幅分别为 2.70% 和 3.94%; DEM 分辨率越高, 则模型运行时间越长, 模型运行效率越低, 5 m DEM 方案下的运行时间为 30 m DEM 方案的 700 倍。综合考虑模拟精度及模拟时间, 10 m 分辨率的 DEM 对山洪淹没模拟、风险评估及预警预报等更为适用。

关键词: DEM 分辨率; 山洪灾害; HEC-HMS 模型; FLO-2D 模型; 淹没特征; 贵泉流域

中图分类号: TV122; P333.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-643X(2021)04-0156-08

Effects of DEM resolution on flash flood inundation simulation

LIU Tianxue^{1,2}, WANG Ying^{1,2}, CHEN Xiaojuan³, YU Haiyang³, ZHANG Yue^{1,2}

(1. Key Laboratory of Environmental Change and Natural Disaster, Ministry of Education, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Academy of Disaster Reduction and Emergency Management, Ministry of Emergency Management and Ministry of Education, Beijing 100875, China; 3. Defense Center for Meteorological Disasters of Hebei Province, Shijiazhuang 050021, China.)

Abstract: Digital Elevation Model (DEM), as an important tool for characterizing the terrain features, plays a major role in the simulation of flash floods. Taking the rainfall-triggered flash flood event occurred in Guiquan Catchment located in the western mountainous area of Jingxing County, Shijiazhuang, Hebei Province on July 19, 2016 as the research object, we adopted the HEC-HMS model and FLO-2D model to investigate the influence of DEM resolution on flash flood inundation simulation from aspects of flooded area and flood depth by setting five resolution schemes, which are 30 m, 20 m, 15 m, 10 m and 5 m. Then the operational efficiency of the models were evaluated according to their respective runtime. The results show that a higher resolution of DEM leads to the decrease of flooded area and the increase of average flood depth, which in turn enhances the accuracy of the model simulation. That is, the higher the DEM resolution, the closer to the observed data the simulated flooded area and flood depth get. The accuracy of flooded area and flood depth by 30 m DEM and 5 m DEM was 0.56 and 0.41, 0.76 and 0.79, respectively. As the DEM grid size decreased, the simulation accuracy increased so slowly that the difference of the simulation results (i. e., the flooded area and flood depth) between 5 m DEM and 10 m DEM was excessively small. The accuracy of flooded area and flood depth increased only by 2.70% and 3.94%, respectively. However, with the decrease of the DEM grid size, the runtime of FLO-2D increased sharply. The runtime under the 5 m DEM was 700 times longer than that under the 30 m DEM,

收稿日期:2021-01-14; 修回日期:2021-06-10

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFC1502505)

作者简介:刘天雪(1990-),女,河北唐山人,博士研究生,研究方向为水文模拟和自然灾害风险评估。

通讯作者:王瑛(1974-),女,云南曲靖人,博士,教授,博士生导师,研究方向为防洪减灾和自然灾害风险评估。

which made the efficiency of the model much lower. Our analyses suggest that for many flash floods, a 10 m DEM presents a rational compromise between accuracy and runtime for simulating the flash flood inundation and it is more suitable for the risk assessment, early warning and forecasting of flash floods.

Key words: DEM resolution; flash flood; HEC - HMS model; FLO - 2D model; characteristics of flood inundation; Guiquan Catchment

1 研究背景

洪水淹没模拟涉及洪水淹没范围及洪水特征指标(如淹没水深,水流速度,水流冲击力等)模拟,是洪水易发区识别、洪水风险评估、水利工程等防灾减灾设施建设的基础,日益成为水文、水利及灾害等领域研究者与管理者的关注焦点^[1]。数字高程模型(digital elevation model, DEM)是地表形态的数字化表达,在洪水淹没模拟中起着举足轻重的作用^[2-6]。国内外已有很多学者研究了DEM分辨率对洪水淹没模拟的影响,尤其是对洪水淹没范围和淹没水深的影响。以往的研究表明,当DEM分辨率不断提高,如从数百米提高至30 m直至5 m时,洪水的淹没范围逐渐减小并以30 m分辨率为分界点,减小幅度先大后小^[7-13];当DEM分辨率进一步提高至1 m时,洪水的淹没范围继续减小,但其数值变化极小^[8,11-16]。而淹没水深则随DEM分辨率的不断提高呈现出与淹没范围相反的变化趋势,表现为最大淹没水深和平均淹没水深逐渐增大,但其增幅无明显变化趋势,呈波动态^[7-8,13]。此外,无论洪水的淹没范围和淹没水深随DEM分辨率如何变化,上述研究均较为一致地表明,二者的模拟精度均随DEM分辨率的提高而不断提高,但其提高的边际效益呈递减态。值得注意的是,已有研究多针对中小河流的洪泛平原区及人口稠密和高楼林立的城市环境区^[7-12,15-16],鲜有针对中小河流的上游山区及以农业生产为主的农村环境区^[13-14],这个研究空缺在中国更为明显。近年来,在气候变化、城镇化发展及人类活动等的影响下,中国的中小河流上游山区极易暴发山洪灾害,且山区多以脆弱性较强的农村环境为主,使得山洪灾害造成的损失十分严重^[17]。据中国水旱灾害公报统计,2000-2019年间山洪灾害造成的死亡人数占洪涝灾害死亡人数的比例呈增长趋势,占比高达60%~95%,年均死亡人数高达819人,成为我国造成人员伤亡最主要的灾种之一^[18]。因此,有必要研究山洪易发区内洪水淹没模拟及其精度对DEM分辨率的响应。

本研究以2016年7月19日发生在河北石家庄井陘县西部山区的特大暴雨山洪事件为研究对象,

利用HEC-HMS水文模型和FLO-2D水动力模型,设置30、20、15、10、5 m共5种DEM分辨率方案,从淹没范围和淹没水深两大方面,通过对比模型模拟结果与灾后实地调查结果,分析中小河流山洪易发区内DEM分辨率对洪水淹没模拟的影响,并从模型运行时间角度,对模型运行效率进行评估,以期在山洪灾害风险评估、预警预报等研究及在实际工程应用中选择最优DEM分辨率进行建模提供参考。需要说明的是,研究中涉及的DEM分辨率均指其水平分辨率(horizontal resolution),即栅格单元的大小,不包含其垂直精度(vertical accuracy)。

2 数据来源与研究方法

2.1 研究区概况

贵泉流域位于河北省石家庄市井陘县境内,介于东经113°52'~113°55'、北纬38°00'~38°03'之间,是绵河流域台头河的重要支流,该流域概况如图1所示。贵泉河河道全长4.38 km,集水面积7.4 km²,是一条季节性河流,流域内无气象及水文监测站。贵泉流域受温带大陆性季风气候影响,多年平均降水量500~600 mm,次暴雨最大日降水量平均90~100 mm。降雨主要集中在夏季,强降雨导致山洪频发。流域地处太行山东麓迎风坡,地势西高东低,海拔最高1 043 m,最低448 m,落差大且陡峻;受地形及中小尺度天气系统影响,贵泉流域夏季多暴雨且临近暴雨中心,加剧了山洪灾害影响。历史上,流域曾先后于1956、1963、1996、2016年遭受4次重大山洪灾害。其中,2016年7月19日发生的特大山洪事件(以下简称“7·19”事件)是该流域自建国以来遭受的最严重的山洪灾害。此次事件共造成流域内唯一的行政村——贵泉村10人死亡,百余间房屋毁坏,数百亩农田及众多交通设施损毁,给当地人民的生产和生活造成了毁灭性打击。因此,对该区域山洪灾害进行研究显得迫切而且必要。

2.2 数据来源

研究以“7·19”事件为模拟对象,对DEM分辨率在山洪淹没模拟中的影响展开研究,所需研究数据主要包括地形数据、气象数据、基础地理信息数据及灾情数据等,各类基础数据类型及来源如表1所

示。地形数据作为本研究最重要的数据,来源于河北省气象灾害防御中心,包括2015年贵泉流域DEM数据。气象数据是基于最邻近法则,选取距流域最近的3个气象站(气象站位置见图1)2016年7月19日0时至2016年7月20日23时的逐时降雨数据,该数据亦由河北省气象灾害防御中心提供。基础地理信息数据包括贵泉流域的土地利用数据、土壤数据及流域出口断面特征数据,其中流域的土地利用数据及土壤数据是在地理国情监测云平台(<http://www.dsac.cn/>)经申请下载所得,而流域出口断面特征数据则是研究团队在2018年8月经实地调查测量所得。灾情数据包括“7·19”事件的淹没范围数据和淹没水深数据,两者均是研究团队通过财新网(<https://photos.caixin.com/2016-08-15/100977746.html>)获得灾后图像信息后,于2018年8月赴贵泉流域,经实地调查及访谈验证和修正后,利用ArcGIS对数据进行数字化处理所得,其中部分淹没水深数据是根据水文及水利部门标记的洪痕位置经实地测量所得。

2.3 研究方法

山洪淹没模拟是对洪水在坡面及河道中的运动过程进行模拟,通常利用水动力模型来完成。本着所需数据简单且能精准反映山洪特征的原则,选用FLO-2D模型对“7·19”事件的淹没情况进行模拟。模型所需数据包括DEM、流域曼宁系数及流量

过程线。其中,流域曼宁系数通过流域内的土地利用情况,参照Rhee等^[19]的方法来获得;而因流域内无水文监测站,无法直接获取此次事件的流量数据,故通过HEC-HMS水文模型,利用事件的降雨资料来间接获得研究所需流量过程线。山洪淹没模拟的具体流程如图2所示。

首先,根据研究目的,对高分辨率DEM数据进行预处理,即利用ArcGIS的重采样功能,将1m分辨率的DEM数据重采样为30、20、15、10和5m的分辨率(如图3所示)。此操作不仅可以满足研究需要,还可以有效避免不同数据源DEM(即DEM垂直精度)对山洪淹没模拟结果的影响^[20]。此外,考虑到由1m分辨率DEM数据构建模型的运行时间过长且实际应用中数据获取难度较大,故研究中未设置1m分辨率DEM的模拟方案。

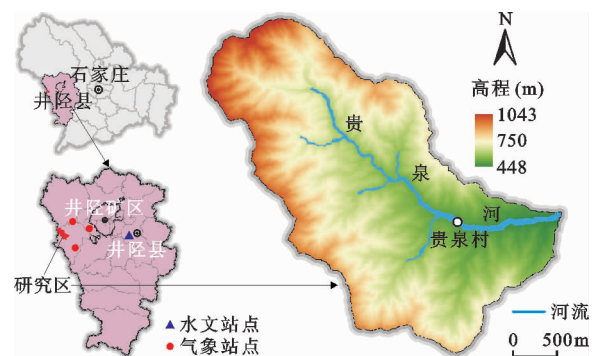


图1 研究区贵泉流域概况

表1 各类基础数据类型及来源

数据类别	数据名称	数据内容	数据格式	数据特性	数据来源
地形数据	DEM数据	高程	栅格(.tif)	分辨率1m	河北省气象灾害防御中心
气象数据	站点降雨数据	降雨量	文本(.txt)	小时级	
	土地利用数据	土地利用类型	栅格(.tif)	分辨率30m	地理国情监测云平台
基础地理信息	土壤数据	土壤类型与质地	矢量(.shp)	比例尺1:1000000	
数据	贵泉河出口断面数据	断面宽度与两侧坡度	文本(.txt)		财新网及实地调查
灾情数据	淹没范围数据	“7·19”事件受灾范围	矢量(.shp)		
	淹没水深数据	“7·19”事件淹没水深	矢量(.shp)		

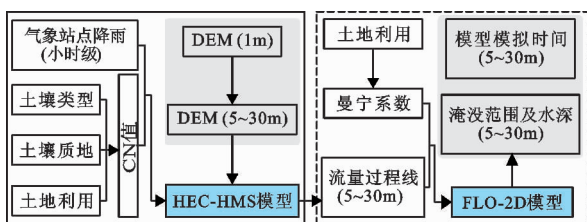


图2 山洪淹没模拟流程图

然后,利用HEC-HMS水文模型获取研究所需流量过程线。HEC-HMS(the hydrologic engineering

center's - hydrologic modeling system)模型是美国陆军工程兵团研发的、具有物理概念的、可用于模拟流域降雨径流过程的半分布式水文模型,在国内已被广泛应用于山洪灾害研究^[21]。在整个计算过程中,根据降雨径流形成过程,采用SCS-CN(soil conservation service - curve number)法、SCS(soil conservation service)单位线法及运动波法来依次计算产流、直接径流及河道洪水演进。其中,CN(curve num-

ber)值作为产流计算的最重要参数,其取值主要取决于流域的土地利用和土壤情况。河流出口断面宽度及两侧坡度作为河道洪水演进的重要参数,通过实地调查测量取得。流域内基流对河流径流的作用极小,可忽略其对山洪形成过程的影响^[22]。此外,如前所述,不同DEM分辨率的选择会导致地形及流域特征参数的不确定性(如表2所示),且该不确定性会在径流模拟过程中传递。为尽可能消除DEM分辨率因素外的其他因素对径流模拟的影响,用5种分辨率方案的DEM数据进行HEC-HMS模型构建时,在流域模块、气象模块、控制模块中各参数的设置均保持了一致。

表2 不同DEM分辨率下地形和流域特征参数

项目	DEM分辨率/m					
	30	20	15	10	5	
坡度/ (°)	最小值	0.66	0.84	0.09	0.00	0.00
	最大值	56.88	63.20	65.55	71.20	77.26
	平均值	27.09	29.34	30.51	31.56	32.31
	标准差	9.48	10.16	10.72	11.54	13.14
坡向/ (°)	最小值	0.01	0.01	0.01	-1.00	-1.00
	最大值	358.54	358.58	358.58	358.58	359.99
	平均值	149.58	151.83	153.53	155.13	156.49
	标准差	104.59	104.62	104.86	104.85	104.95
地形起伏度/m	591.60	592.30	593.60	594.30	595.00	
流域面积/km ²	7.41	7.41	7.40	7.40	7.40	
河道长度/km	2.37	2.49	2.49	2.48	2.66	
河网密度/ (km·km ⁻²)	0.32	0.34	0.34	0.34	0.36	

最后,利用FLO-2D水动力模型完成山洪淹没模拟。FLO-2D模型是美国O'Brien等^[23]提出的将非牛顿体模型和有限差分法整合而成的可用于模拟二维洪水与泥石流的模型,在国内外被广泛应用于河道洪水、泥石流及山洪研究^[24]。在整个模拟过程中,为5种分辨率模拟方案输入相同的曼宁系数及模拟控制参数和经由HEC-HMS模型获得的对应方案下的流量过程线,以尽可能消除DEM分辨率因素外的其他因素对模拟结果的影响。

在结果评估方面,主要从淹没范围、淹没水深、模型运行时间3个方面对DEM分辨率在山洪淹没模拟过程中的影响进行分析。其中,利用拟合优度指标(Fit_A)^[25]评估DEM分辨率对山洪淹没范围的影响,其计算公式如公式(1)所示:

$$Fit_A = \frac{FA_{obs} \cap FA_{mod}}{FA_{obs} \cup FA_{mod}} \quad (1)$$

式中: Fit_A 为拟合优度指数,其值越大,则模型模拟效果越好; FA_{obs} 和 FA_{mod} 分别为实地测量的淹没范围和模型模拟的淹没范围,km²。

在淹水深度方面,将模型模拟所得水深与实地调查所得的水深进行对比,利用调整均方根误差(adjusted root mean square error, ARMSE)来评估5种DEM分辨率方案下模型模拟的优劣,其计算公式如公式(2)所示:

$$ARMSE = 1 - RMSE \quad (2)$$

式中:ARMSE为调整均方根误差,无量纲,其值越大,表示模型模拟值与实地测量值之间的差别越小;RMSE为均方根误差,无量纲。

此外,通过比较各个方案下模型运行时间来进一步评估DEM分辨率对山洪淹没模拟效率的影响。本研究只比较了FLO-2D模型的运行时间,主要是因为5种方案下HEC-HMS模型的运行时间极短,不足1毫秒且方案间的差异十分微小,故在此暂不对其进行运行时间的比较分析。

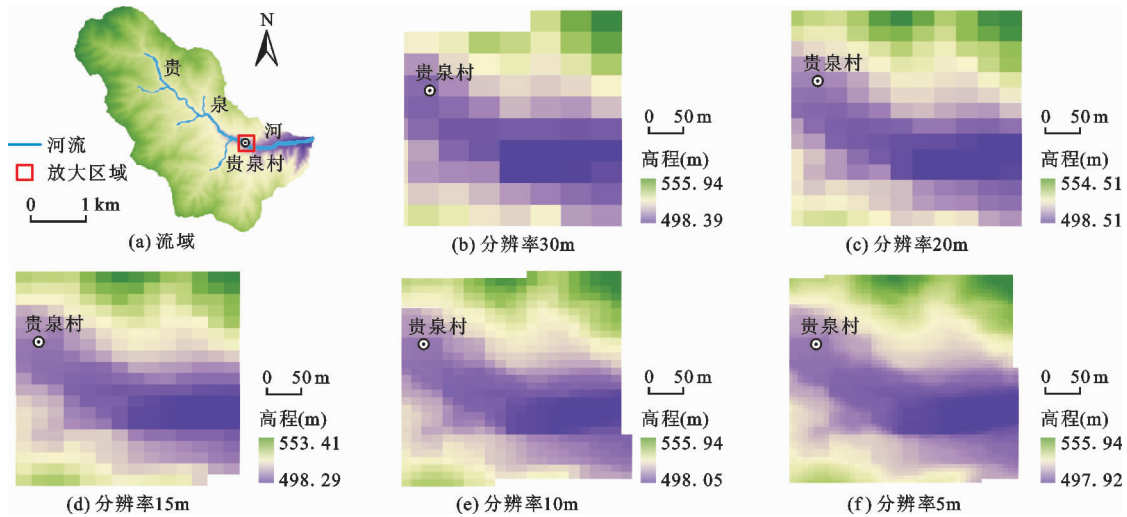
3 结果与分析

3.1 DEM分辨率对山洪淹没范围影响

图4展示了不同DEM分辨率情况下,用FLO-2D模型模拟“7·19”事件的淹没范围及淹没水深的分布情况。不同DEM分辨率下淹没状况模拟结果统计及其精度评估见表3。

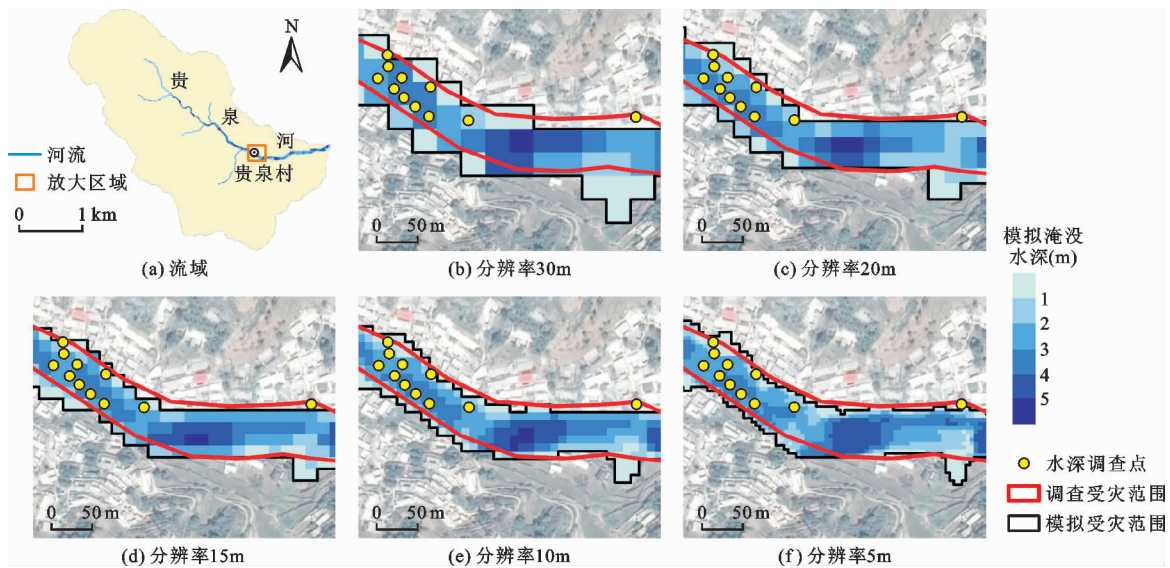
由图4可直观看出,随着DEM分辨率的提高,淹没范围逐渐变小且与实地测量所得淹没范围相差越来越小,表现为流域淹没总面积由0.35 km²(30 m DEM)减小到0.23 km²(5 m DEM)(见表3),而评估指标 Fit_A 也从0.56增大到0.76(见表3)。值得注意的是,10 m DEM与5 m DEM两方案下淹没范围的模拟结果基本一致,分别为0.25和0.23 km²。由此可见,DEM分辨率越高,淹没范围模拟越精确,但对场次山洪模拟效果的影响却逐渐减小。

表3中不同水深淹没面积比是指在某DEM分辨率下,指定水深的淹没面积占流域淹没总面积的比例。由表3可以看出,在相同的DEM分辨率下,水深越小,则淹没范围越大;相反,水深越大,则淹没范围越小。在不同DEM分辨率下,随着DEM分辨率不断提高,小于1 m水深的淹没范围不断减小,大于等于5 m水深的淹没范围逐渐增大,而1~5 m水深的淹没范围虽略有变化,但变幅较小。此外,需特别注意的是,10 m DEM下1~5 m水深的淹没范围分布与5 m DEM所得结果十分相近。



注:图(b)~(f)均显示图(a)中的放大区域

图3 贵泉流域5种分辨率的DEM数据



注:图(b)~(f)均显示图(a)中的放大区域。

图4 不同DEM分辨率下“7·19”事件的淹没范围及淹没水深分布

表3 不同DEM分辨率下淹没状况模拟结果统计及其精度评估

项目	DEM 分辨率/m					
	30	20	15	10	5	
不同水深(h) 淹没面积比/%	$h < 1\text{m}$	41.97	32.28	29.80	30.12	25.74
	$h = 1 \sim 2\text{m}$	25.65	25.79	24.59	25.34	25.48
	$h = 2 \sim 3\text{m}$	18.13	22.34	23.59	21.00	23.04
	$h = 3 \sim 4\text{m}$	9.07	13.66	14.90	16.22	16.47
	$h = 4 \sim 5\text{m}$	4.92	5.38	6.46	6.81	7.83
	$h \geq 5\text{m}$	0.26	0.55	0.66	0.52	1.43
模型模拟淹没总面积/ km^2	0.35	0.29	0.27	0.25	0.23	
模型模拟平均淹没水深/m	1.54	1.80	1.89	1.91	2.05	
淹没范围评估精度(Fit_A)	0.56	0.61	0.66	0.74	0.76	
淹没水深评估精度($ARMSE$)	0.41	0.60	0.70	0.76	0.79	
模型运行时间($FLO - 2D_{TIME}$)/min	0.60	3.60	10	90	420	

由此可知,极端水深(小于1 m和大于等于5 m)的淹没范围对DEM分辨率变化的响应显著,且DEM分辨率越高,极小值分布范围越小,极大值分布范围越大;相反,中间水深(1~5 m)的变化响应较弱,且随着DEM分辨率不断提高,各区间水深淹没范围分布的变化响应越来越小。

3.2 DEM分辨率对山洪淹没水深及模型运行时间影响

山洪淹没水深不仅是山洪淹没特征的重要指标,更是山洪危险性评估的重要指标,对其进行高精度模拟,对山洪风险评估及防治具有重要影响。由图4和表3可知,DEM分辨率越高,平均淹没水深越大。图5展示了不同DEM分辨率下的模拟精度评估值(Fit_A 、 $ARMSE$)及模拟运行时间($FLO-2D_{TIME}$)。

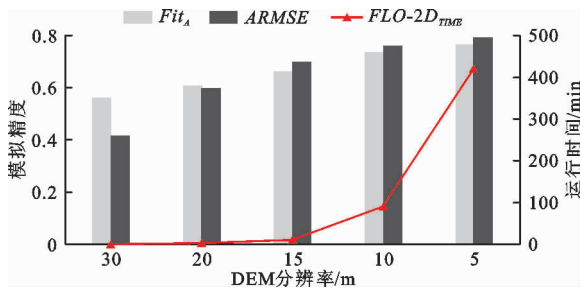


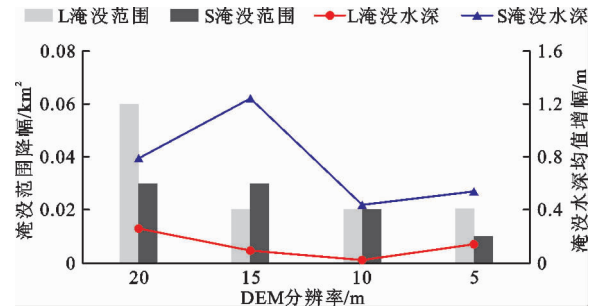
图5 不同DEM分辨率的模拟精度评估值及模拟运行时间

由图5可以看出,随着DEM分辨率的不断提高,淹没水深的模拟精度越来越高。当DEM分辨率由30 m提高到10 m直至5 m,评估指标 $ARMSE$ 也由0.41增大到0.76再增大到0.79,但精度增幅逐渐变小,表明DEM分辨率越高,山洪水深的模拟越接近实地调查情况,但随着DEM分辨率不断提高,模拟水深变化越来越小,逐渐趋于一致。从模型运行时间来看,在相同环境下(硬件环境为图型工作站,Intel(R) Xeon(R) Silver 4110 CPU,运行内存128 GB;软件环境为Windows 10),随着DEM分辨率的提高,模型运行时间呈几何级数增长,5 m DEM方案下 $FLO-2D$ 的运行时间为30 m DEM方案的700倍(如表3和图5所示),但从淹没范围及淹没水深的模拟精度来看,其提升速率却逐渐减小,尤其是分辨率由10 m提高到5 m时,模拟精度的变化十分微小,增幅分别为2.70%和3.94%,使得模型相对运行效率降低。由此可见,DEM分辨率越高,模拟效果越好,但模型运行时间越长,运行效率越低。

4 讨论

从本研究的结果来看,对于山洪淹没模拟的精度,

多数情况下认为DEM的分辨率越高,模拟精度越高,具体表现为山洪事件的淹没范围逐渐减小,愈趋近于实地调查结果,且山洪事件淹没水深均值逐渐增大。以上结果与Saksena等^[14]的研究结果一致,但两指标的变化幅度与Saksena等^[14]的研究结果存在较大差异。图6展示了山洪淹没范围与淹没水深的均值变幅在本研究中和Saksena等^[14]研究中的情况。



注:图中L代表本研究的研究结果,S代表Saksena等^[14]的研究结果
图6 不同研究中山洪淹没模拟范围与水深均值变幅变化情况

据图6可知,本研究中山洪淹没范围的降幅呈先减小后趋于稳定的态势,而Saksena等^[14]研究得出的淹没范围降幅则基本为一直减小的态势,说明本研究中山洪淹没范围随着DEM分辨率的升高,减小的更快,变化趋势相对稳定。此外,由图6亦可知,二者的山洪淹没水深均值的增幅均呈现波动变化,但Saksena等^[14]的波动态势明显强于本研究,表明Saksena等的淹没水深对DEM分辨率的响应敏感程度强于本研究。造成上述现象的原因,很大可能是选取的水动力模型不同。因此,未来可继续深入探讨不同水文水动力模型在进行山洪淹没模拟时对DEM分辨率的响应。

此外,从本研究的结果亦可看出,山洪淹没模拟的精度虽然随着DEM分辨率的提高而不断提高,但是精度提高的幅度却在减小,而模型模拟运行时间却一直在急剧增大。图7展示了DEM分辨率由30 m提高到5 m时,淹没水深和淹没范围的模拟精度及其模拟时间变幅的变化情况。

由图7可知,当DEM分辨率由30 m提高到10 m的过程中,山洪淹没水深模拟精度增幅虽在不断减小,但变化显著,说明山洪淹没水深模拟精度提高显著;同时山洪淹没范围的精度变化亦十分显著且变幅呈缓慢增长趋势,说明山洪淹没范围的模拟精度随着DEM分辨率的提高而显著提高。在此过程中,模型运行时间虽在不断增长,但增幅相对较小,增速较缓慢。以上分析表明,DEM分辨率由30 m提高到10 m时,山洪淹没模拟的效率在不断提高。

当DEM分辨率由10 m继续提高到5 m时,山洪淹没水深精度的增幅继续减小,但其减小程度远小于DEM分辨率从30 m提高到10 m过程中的程度,说明山洪淹没水深精度在DEM分辨率从10 m提高到5 m时的变化不显著,模拟精度提升较小;而山洪淹没范围精度增幅在此过程中却呈现出减小的趋势,说明山洪淹没范围的模拟精度在DEM分辨率从10 m升高到5 m时,模拟精度虽也在提高但提高程度远小于DEM分辨率从30 m升高到10 m过程中的提高程度。但在此过程中,模型的运行时间却急剧增长,增幅巨大,增速极快,表明山洪淹没模拟的效率在不断下降。

综上所述,随着DEM分辨率的不断提高,综合考虑山洪淹没模拟的精度和效率,以10 m分辨率DEM对山洪淹没模拟的效果更佳。但随着计算机技术的不断发展,并行计算等高效率计算模式的出现将会大大提高数值模拟的计算效率,但在运行过程中亦存在诸多问题,如并行计算过程中各个计算过程间的通讯处理消耗时间可能远大于计算本身所花时间等^[26],未来可进一步探讨并行计算等对数值模拟运行时间的影响。

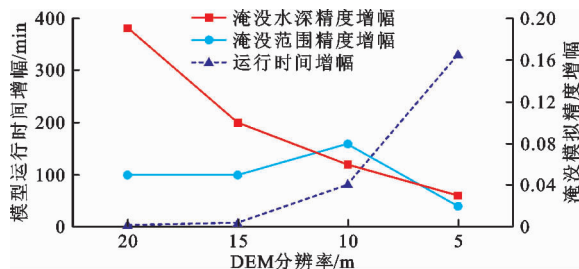


图7 不同DEM分辨率的模拟精度及模型运行时间变幅情况

5 结论

本研究以2016年7月19日发生在河北井陘县西部山区的特大暴雨山洪事件为例,利用HEC-HMS水文模型和FLO-2D水动力模型,从淹没范围和淹没水深两方面,通过与灾害造成的受灾范围及淹没水深的实地调查结果进行比较,利用拟合优度(Fit_A)和调整均方根误差($ARMSE$)等统计指标,定量分析了DEM分辨率对山洪淹没模拟的影响,并以模型运行时间为指标,辅以模型模拟效果,评估了模型的运行效率,具体结论如下:

(1) DEM分辨率对山洪的淹没范围及水深模拟有重要影响。随着DEM分辨率的不断提高,山洪事件的淹没范围逐渐减小,由 0.35 km^2 (30 m DEM)

减小到 0.23 km^2 (5 m DEM)。对于各水深淹没面积分布而言,极端水深(小于1 m和大于等于5 m)淹没面积占比对DEM分辨率变化的响应显著;而中间水深(1~5 m)淹没面积占比的变化响应较弱,随着DEM分辨率不断提高,各水深淹没面积分布渐趋一致。在淹没水深方面,DEM分辨率越高,山洪平均淹没水深越大,由1.54 m (30 m DEM)增大到2.05 m (5 m DEM)。

(2) DEM分辨率与模型模拟精度密切关系。DEM分辨率越高,模型模拟精度越高,即模型模拟结果与实地调查结果的差异越小。其中,淹没范围的模拟精度(Fit_A)由30 m DEM方案下的0.56提高至5 m DEM方案下的0.76;淹没水深的模拟精度($ARMSE$)则由0.41提高至0.79。但随着DEM分辨率的不断提升,模拟精度增幅逐渐减小,边际递减效应显著,尤其是分辨率从10 m提升至5 m时,淹没范围和淹没水深的模拟精度增幅仅为2.70%和3.94%,模拟结果差异较小。

(3) DEM分辨率对模型运行效率有显著影响。从模型运行时间角度并结合其模拟效果来看,随着DEM分辨率的不断提高,模型运行时间呈几何级数增长,从30 m DEM方案的0.60 min增加到10 m DEM方案的90 min再增加到5 m DEM方案的420 min,而模拟效果越来越好,淹没范围的模拟精度从0.56增大到0.74再到0.76,淹没水深的模拟精度也从0.41增大到0.76再到0.79。但随着模拟精度增幅不断减小,模型运行时间增幅却急剧增大,使得模型运行效率先增大后减小。因而在10 m DEM方案下,模型的运行效率最佳。

综上所述,DEM分辨率越高,则山洪淹没的模拟精度越高,但精度增幅越小且模型运行时间越长,使得模型运行效率先增后降。因此,在考虑DEM可获性、模拟精度及模型运行效率等情况下,10 m分辨率DEM数据将更加有利于山洪淹没模拟、危险性评估、风险评估、预警预报及应对与防治工作。

参考文献:

- [1] BATES P D, DE ROO A P J. A simple raster-based model for flood inundation simulation[J]. Journal of hydrology, 2000, 236(1-2): 54-77.
- [2] SAKSENA S. Investigating the role of DEM resolution and accuracy on flood inundation mapping[C] // World Environmental and Water Resources Congress 2015: Floods, Droughts, and Ecosystems. Austin, Texas, USA: American Society of Civil Engineers, 2015: 2236-2243.

- [3] 刘凡,陈波,史培军. DEM水平分辨率越高提取的河长越准确? [J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2016, 52(5): 610–615.
- [4] VAZE J, TENG J, SPENCER G. Impact of DEM accuracy and resolution on topographic indices [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2010, 25(10): 1086–1098.
- [5] ARBAB N N, HARTMAN J M, QUISPE J, et al. Implications of different DEMs on watershed runoffs estimations [J]. *Journal of Water Resource and Protection*, 2019, 11(4): 448–467.
- [6] JUNG Y, MERWADE V. Uncertainty quantification in flood inundation mapping using generalized likelihood uncertainty estimate and sensitivity analysis [J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2012, 17(4): 507–520.
- [7] MARKO K, ELFEKI A, ALAMRI N, et al. Two dimensional flood inundation modelling in urban areas using WMS, HEC – RAS and GIS (Case Study in Jeddah City, Saudi Arabia) [C] // *Advances in Remote Sensing and Geo Informatics Applications*. Sousse, Tunisia: Springer, 2018: 265–267.
- [8] YALCIN E. Assessing the impact of topography and land cover data resolutions on two-dimensional HEC – RAS hydrodynamic model simulations for urban flood hazard analysis [J]. *Natural Hazards*, 2020, 101(S1): 995–1017.
- [9] SAVAGE J, BATES P, FREER J, et al. The impact of scale on probabilistic flood inundation maps using a 2D hydraulic model with uncertain boundary conditions [C] // *Vulnerability, Uncertainty, and Risk: Quantification, Mitigation, and Management*. Liverpool, UK: American Society of Civil Engineers, 2014: 279–289.
- [10] SAVAGE J T S, BATES P, FREER J, et al. When does spatial resolution become spurious in probabilistic flood inundation predictions? [J]. *Hydrological Processes*, 2016, 30(13): 2014–2032.
- [11] HSU Y C, PRINSEN G, BOUAZIZ L, et al. An investigation of DEM resolution influence on flood inundation simulation [J]. *Procedia Engineering*, 2016, 154: 826–834.
- [12] LIM N J, BRANDT S A. Flood map boundary sensitivity due to combined effects of DEM resolution and roughness in relation to model performance [J]. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 2019, 10(1): 1613–1647.
- [13] BAKUŁA K, STĘPNIK M, KURCZYŃSKI Z. Influence of elevation data source on 2D hydraulic modelling [J]. *Acta Geophysica*, 2016, 64(4): 1176–1192.
- [14] SAKSENA S, MERWADE V. Incorporating the effect of DEM resolution and accuracy for improved flood inundation mapping [J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 530: 180–194.
- [15] VOZINAKI A – E K, MORIANOU G G, ALEXAKIS D D, et al. Comparing 1D and combined 1D/2D hydraulic simulations using high-resolution topographic data: A case study of the Koiliaris basin, Greece [J]. *Hydrological Sciences Journal*, 2017, 62(4): 642–656.
- [16] DE ALMEIDA G A M, BATES P, OZDEMIR H. Modelling urban floods at submetre resolution: challenges or opportunities for flood risk management? [J]. *Journal of Flood Risk Management*, 2018, 11(S2): S855–S865.
- [17] HE Bingshun, HUANG Xianlong, MA Meihong, et al. Analysis of flash flood disaster characteristics in China from 2011 to 2015 [J]. *Natural Hazards*, 2018, 90(1): 407–420.
- [18] 中国水利部. 中国水旱灾害公报 [DB/OL]. (2021-04-09) [2021-06-05] <http://www.mwr.gov.cn/sj/tjgb/zg-shzhgb/>.
- [19] RHEE D S, WOO H, KWON B A, et al. Hydraulic resistance of some selected vegetation in open channel flows [J]. *River Research and Applications*, 2008, 24(5): 673–687.
- [20] GESCH D, PALASEANU – LOVEJOY M, DANIELSON J, et al. Inundation exposure assessment for Majuro Atoll, Republic of the Marshall Islands using a high-accuracy digital elevation model [J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(1): 154.
- [21] GAO Yuqin, YUAN Yu, WANG Huaizhi, et al. Examining the effects of urban agglomeration polders on flood events in Qinhuai River basin, China with HEC – HMS model [J]. *Water Science and Technology*, 2017, 75(9): 2130–2138.
- [22] 石家庄水利局, 河北省石家庄水文水资源勘测局. 河北省石家庄市水文水资源手册 [M]. 河北: 石家庄水利局, 1996.
- [23] O’ BRIEN J S, JULIEN P Y, FULLERTON W T. Two-dimensional water flood and mudflow simulation [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1993, 119(2): 244–261.
- [24] ZHANG Yue, WANG Ying, CHEN Yu et al. Assessment of future flash flood inundations in coastal regions under climate change scenarios—A case study of Hadahe River basin in northeastern China [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 693: 1–11.
- [25] SEGURA – BELTRÁN F, SANCHIS – IBOR C, MORALES – HERNÁNDEZ M, et al. Using post-flood surveys and geomorphologic mapping to evaluate hydrological and hydraulic models: The flash flood of the Girona River (Spain) in 2007 [J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 541: 310–329.
- [26] 王皓, 傅旭东, 孙其诚, 等. 大尺度流域水文并行计算的方法改进 [J]. *应用基础与工程科学学报*, 2009, 17(S1): 1–9.