

DOI:10.13476/j.cnki.nsbdtk.2022.0057

张文婷,李祉璇,张行南,等.基于 DEM 的河道断面构造改进方法及洪水演进精度评估[J].南水北调与水利科技(中英文),2022,20(3):563-572. ZHANG W T,LI Z X,ZHANG X N,et al. DEM-based improved method for river cross-sections modification and evaluation of flood routing accuracy[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2022,20(3):563-572. (in Chinese)

基于 DEM 的河道断面构造改进方法 及洪水演进精度评估

张文婷^{1,2},李祉璇¹,张行南¹,刘永志^{2,3}

(1. 河海大学水文水资源学院,南京 210098;2. 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室,南京 210098;
3. 南京水利科学研究院水文水资源研究所,南京 210009)

摘要:基于高精度数字高程模型(digital elevation model,DEM)数据,采用直接提取法和改进的断面构造法获得河道断面数据,将上述 2 种方法提取的河道断面数据作为水动力学模拟软件 HEC-RAS(hydrologic engineering center's river analysis system)的主要输入,开展一维和二维耦合水动力学数值模拟,使用实测的河道断面数据进行结果对比分析,评估不同河道断面快速获取方法的效果。将研究方法在美国佛罗里达州迈阿密河下游河段进行应用,选取 2004、2014 和 2017 年 3 场典型洪水,分析 2 种不同断面形态下洪水演进模拟结果的差异。结果表明,直接提取高精度 DEM 所得的河道断面数据在准确性上仍有欠缺,采用断面构造法修正后的河道断面数据模拟出的洪水水位与观测水位的均方根误差(RMSE)小于 0.1 m,与实测结果十分接近,在缺少河道断面资料的地区可替代实测断面,获得可信度较好的模拟结果。

关键词:水动力学;河道横断面;数字高程模型;洪水模拟;HEC-RAS

中图分类号:TV122 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



洪水灾害是自然灾害之一,常导致严重的经济损失和人员伤亡^[1-2]。为了减轻洪水带来的危害,需要不断加深对洪水的研究。随着计算机科学的快速发展,越来越多的水动力学数值模型用于模拟洪水过程,如 MIKE、HEC-RAS(hydrologic engineering center's river analysis system)等^[3-5],为防洪减灾措施的科学制定提供参考和依据。

水动力学数值模型可以得到与实际洪水演进过程较为吻合的模拟结果,需要河道断面资料用于建模,但在无河道断面地区和不方便实施河道断面测量的地区其应用受到了限制^[6-7]。河道断面数据缺乏问题在许多地区都存在,尽管可以在建模前补充

测量,但耗时长,花费昂贵^[8]。针对这一问题,一些学者^[9-11]开始探索从数字高程模型(digital elevation mode,DEM)中提取河道横断面数据应用到洪水模拟中,为缺少河道横断面数据的河段洪水模拟提供方法。在模拟中,研究者^[12-16]发现从 DEM 中提取河道断面数据存在对河道地形的描述不够准确的问题,这将会影响洪水模拟准确性,因此,一些研究者尝试通过使用河道断面数据修正的方法对 DEM 数据做出调整,将河道实测断面数据整合到 DEM 中,从而得出理想的模拟结果^[17-18]。然而实际洪水模拟中许多河段的断面数据不易获得或测量成本过高,对此,一部分研究者^[19]尝试概化河道断

收稿日期:2021-09-02 修回日期:2022-01-26 网络出版时间:2022-02-09

网络出版地址:<https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20220209.0902.002.html>

基金项目:国家重点研发计划项目(2019YFC1510204);国家自然科学基金项目(42175177;U2240216);中央级公益性科研院所基本科研业务费项目(Y521002)

作者简介:张文婷(1982—),女,江苏泰州人,副教授,博士,主要从事城市水灾害防治和洪水风险等研究。E-mail:zwt@hhu.edu.cn

通信作者:张行南(1960—),男,江苏张家港人,教授,博士,主要从事流域水文模拟、实时洪水预报等研究。E-mail:zxh@hhu.edu.cn

面,使概化的断面与实测断面保持一致的水位-流量关系;也有研究者探索通过结合水面以上地形数据推求水面以下的地形,例如俞茜等^[20]采用三次样条插值并合成完整断面,得到的模型结果有较高可信度。但目前缺乏对于 DEM 提取河道断面用于水动力学建模效果的系统研究和分析。

为此,本文在缺少河道断面资料的地区以高精度 DEM 数据为支撑,通过构造断面的方式快速获取能够应用于水动力学数值模型的河道横断面。分别采用由 DEM 直接提取河道横断面(以下简称 DEM 断面)、实际勘测测量河道断面(以下简称实测断面)和改进的基于 DEM 构造的河道断面(以下简称构造断面),进行河道水动力学数值模型建模,利用水动力学数值模型分别进行洪水模拟试验,包括在不同频率的洪水或不同模型结构(HEC-RAS 1D, HEC-RAS 1D-2D)中,分析不同河道断面生成和获取方法对模拟结果的影响,为缺少实测河道断面资料河段的洪水模拟提供参考。

1 基于 DEM 的河道断面提取方法和构造方法

1.1 DEM 数据直接提取河道断面

使用的地形数据由美国国家高程数据集(National elevation dataset, NED)以 DEM 的形式提供,其生成方式为通过航空激光扫描获取激光雷达点云数据,经过数据处理得到本试验采用的 $3\text{ m} \times 3\text{ m}$ 分辨率的 DEM 栅格数据,是研究区范围内可公开获取的最高分辨率数据。DEM 被用作地形数据的输入来源以创建河道横断面等,在 RAS Mapper 模块中将横断面数字化,以转换为 HEC-RAS 模型所需的河道几何形状,所有几何数据都使用栅格表面的高程值进行编码,作为 DEM 断面的地形数据导入模型计算。

1.2 改进的基于 DEM 数据构造断面

基于 DEM 的河道横断面构造方法^[21]以 Bhuyian 提出的 DEM 校正方法为基础,在河道横断面较为规则的河道中通过增大 DEM 断面面积来增强河道的过流能力。基本原理是利用 DEM 断面高岸点指定的坡度确定各断面左右岸的交点(图 1),并假定其为各断面最低点的近似位置。对于单渠道河道,边坡的坡度从高岸点处的最大值逐渐减小至零。断面最低点的近似位置确定之后,各横断面由通过断面最低点的铅直线分为左半部分和右半部分,每一部分面积相当于抛物线及其对称轴围成的面积,抛物线的垂直高度为均匀流深度 y 。此构造方法为

断面构造的 Bhuyian 方法,以下简称为 Bhuyian 法。

比对研究区实际勘测河道横断面情况, Bhuyian 法构造的断面形态较为接近实测断面,但其面积存在偏小的情况,造成过流能力不足,需要在此基础上增加构造断面的过流面积,使得构造断面与实测断面的过流能力更为接近。本文提出一种改进的断面构造方法,提出横断面最低点高程修正系数 k ,对横断面最低点高程进行修正,断面形态仍由左半部分和右半部分的抛物线组成,最终构造横断面的方式见图 1。

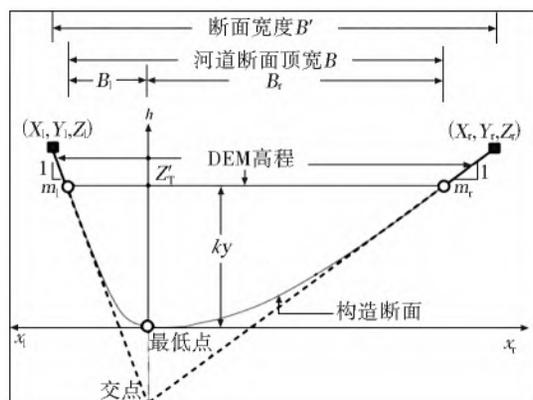


图 1 横断面构造

Fig. 1 Schematic of section construction

构造的横截面的几何特性为

$$B = B' \times \sqrt{\frac{y}{ky + Z_i - Z_T}} \quad (1)$$

式中: B 为河道断面顶宽, m ; B' 为断面宽度, m ; y 为均匀流水深, m ; Z_i 为 DEM 表示的高岸坡点高程, m ; Z_T 为 DEM 最低点高程, m ; k 为横断面最低点高程修正系数。

断面面积为

$$A = \sum A_i = A_l + A_r = \frac{2}{3} ky B_l + \frac{2}{3} ky B_r = \frac{2}{3} ky B \quad (2)$$

湿周为

$$P = \sum P_i = P_l + P_r \quad (3)$$

水力半径为

$$R = \frac{A}{P} \quad (4)$$

利用曼宁公式[式(5)]确定河道各断面的均匀流水深,这是一个求得参考流量的均匀流水深精确解的迭代过程^[21]。

曼宁公式为

$$Q = \frac{1}{n} AR^{2/3} \sqrt{S} \quad (5)$$

式中: Q 为参考流量, m^3/s ; n 为糙率,其取值在《水

工设计规范》等设计规范的基础上结合实际河道类型及以往研究模拟中的相关取值经验^[22]确定; A 为断面过水面积, m^2 ; R 为水力半径, m ; S 为河道坡度。

河道坡度由沿着河流中心线的 DEM 上可用的高程确定, 确定糙率时要考虑到局部特征和地形, 这一过程是为了实现估计的断面最低点的纵向坡度和河道坡度值之间的最小差异。通过计算得出断面最低点的高程为 $(Z'_T - k_y)$ 。本文所提改进的断面构造方法以 Bhuyian 法为基础, 利用横断面最低点高程修正系数 k 改进构造断面的横断面面积, 以下简称改进法。

2 洪水演进模拟模型计算原理

用于河道水力计算的两个模型为 HEC-RAS 1D 和 HEC-RAS 1D-2D, 均由美国陆军工程兵团 (USACE) 的水文工程中心 (Hydrologic Engineering Center) 研发^[23]。

HEC-RAS 1D 中所用到的理论基础是基于 Saint-Venant 方程组的水流连续方程和动量方程^[24]

$$\frac{\partial A_T}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} - q_1 = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(QV)}{\partial x} + gA \left(\frac{\partial z}{\partial x} + S_f \right) = 0 \quad (7)$$

式中: A_T 为过流断面面积, m^2 ; t 为过流时间, s ; x 为水平距离, m ; Q 为断面流量, m^3/s ; q_1 为单位长度的旁侧入流, m^2/s ; V 为沿水流方向流速, m/s ; g 为重力加速度, m/s^2 ; z 为河道水位, m ; S_f 为摩阻比降, 依据曼宁公式求得

$$S_f = \frac{n^2 Q |Q|}{A^2 R^{\frac{4}{3}}} \quad (8)$$

式中: n 为糙率; R 为水力半径, m 。

在一维非恒定流模拟中, HEC-RAS 模型对式 (6) 和 (7) 采用四点隐式差分格式离散求解方程。

HEC-RAS 1D-2D 模型由进一步扩展一维模型得到。通过建立侧向连接, 将二维流动区域耦合到一维断面。

二维连续方程为

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} + q = 0 \quad (9)$$

式中: H 为水面高程, m ; h 为水深, m ; u 和 v 为分别为 x 和 y 方向平均深度上的流速, m/s ; q 为源项, m/s , 表示外部流入 (如降水)。

二维动量方程中 x 方向为

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial x} + v_t \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - c_f u + fv \quad (10)$$

y 方向

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial y} + v_t \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - c_f v + fu \quad (11)$$

式中: v_t 为涡流黏度系数; c_f 为摩擦因数; f 为科里奥利参数。

侧向结构上水流的流动由堰流方程或二维流动方程确定, 计算侧向结构上水流流动的标准堰流方程为

$$dQ = C(y_{ws} - y_w)^{3/2} dx \quad (12)$$

式中: y_{ws} 为水面高程; y_w 为侧向结构的高程; C 为堰流系数。

3 实例应用

选取美国佛罗里达州迈阿密市内主河道迈阿密河作为研究案例, 该河流包括一条干流和南北两条支流。

3.1 研究区概况

迈阿密河发源于佛罗里达国家公园大沼泽地, 流经迈阿密的市中心, 长达 8.9 km, 河口位置为北纬 25°46'14", 西经 80°11'06", 研究区面积 38.8 km²。

迈阿密河流经的迈阿密市位于佛罗里达大沼泽和比斯坎湾之间, 属于热带季风气候, 平均最高气温一般为 29~38 °C, 年降水量 1 710 mm, 其中大部分降水发生在 6 月至 10 月中旬。此外, 该区域常受飓风影响, 如 2004 年弗朗西斯 (Frances) 飓风、2017 年艾尔玛 (Irma) 飓风。

3.2 数据

研究区域内流量和水位的观测数据来自南佛罗里达州水管理区 (SFWMD) 环境监测数据库, 这些数据集可作为水动力学模拟的边界条件输入 HEC-RAS 模型。根据 Anuar 等^[25] 的研究, 断面布设间距为河道水面宽度的 10~20 倍时对水位过程模拟结果影响较小, 考虑到迈阿密河大部分河道较为平直, 研究区域内自上游向下游以 500 m 为间距布设河道横断面, 布设情况、验证站位置及边界所处位置见图 2。

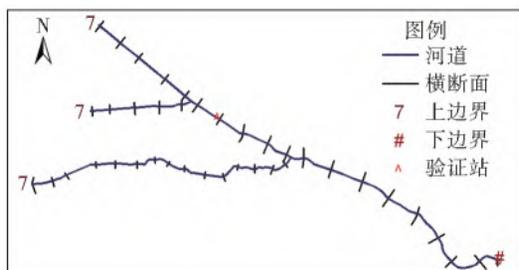


图 2 断面布设情况、验证站位置及边界所处位置
Fig. 2 The distribution of cross-sections and the location of the gauging station and the boundaries

采用本文提出的改进的断面构造法和 DEM 数据直接提取法生成研究区河道断面。经过当地实际典型河道断面与 Bhuyian 法概化的横断面对比分析,发现以 Bhuyian 法概化的横断面其过流面积虽然有所改善,但与实测断面面积仍相差较大,通过改进法进一步扩大河道横断面面积,当最低点高程修正系数取值为 1.1 时,各典型断面的横断面面积相对误差均降至 30% 以下,缩小了约 7%(表 1);若继续增大最低点高程系数的取值,部分横断面的河底高程将低于实测断面,综合考虑横断面形态特征和过流能力,将最低点高程修正系数 k 取值为 1.1。选取位于河道上游的断面 1、支流与干流交汇后的

断面 2、位于河道下游的断面 3 以及分别位于南北两条支流上的断面 4 和断面 5,比较实测断面、Bhuyian 法和改进法构造的断面,如图 3 所示,改进法构造的断面在表示的河道测深细节方面优于 Bhuyian 法构造的,更为贴近实测断面。

表 1 横断面面积的相对误差

Tab. 1 Relative error of cross-sectional area

横断面构造方法	相对误差				
	断面 1	断面 2	断面 3	断面 4	断面 5
Bhuyian 法	33.89	24.50	25.55	32.64	35.30
改进法	27.28	17.27	17.71	25.84	28.75

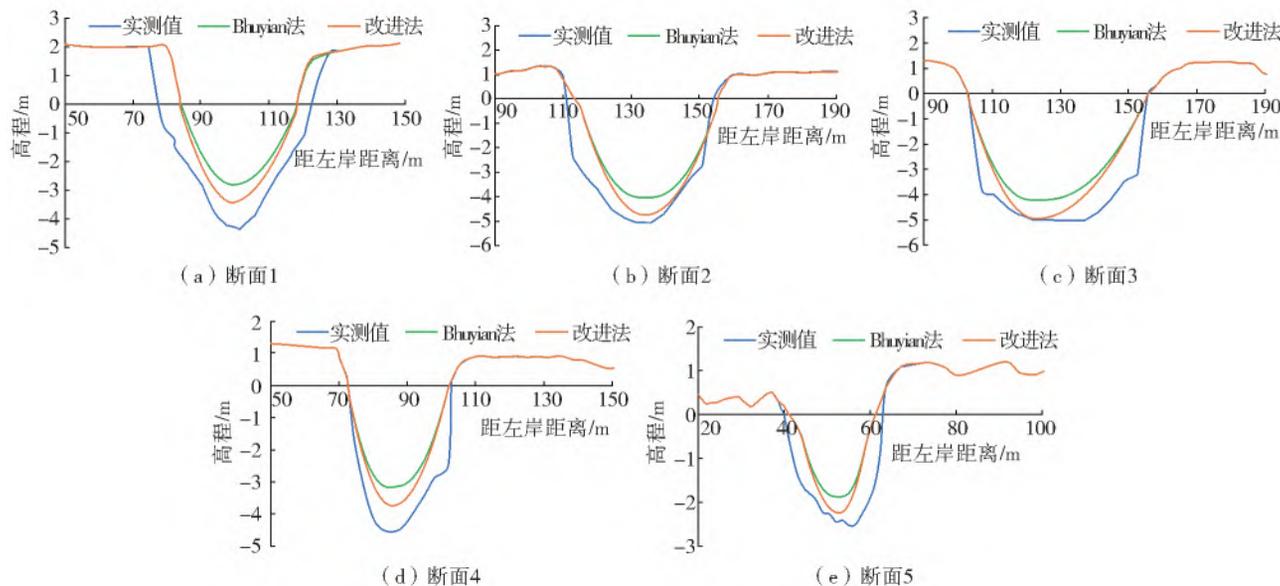


图 3 不同断面形式对比

Fig. 3 Comparison of cross-sections

3.3 水动力学模拟参数设置

运行 HEC-RAS 1D 模型需要河道横断面的地形资料、边界条件和糙率值。地形数据为研究区数字高程模型 (DEM),分辨率为 3 m。模拟 2004 年飓风 Frances 期间(2004 年 9 月 1 日 00:00 至 2004 年 9 月 8 日 00:00)、2017 年飓风 Irma 期间(2017 年 9 月 7 日 00:00 至 2017 年 9 月 14 日 00:00)和 2014 年 6 月 17 日至 2014 年 6 月 24 日的洪水演进过程,上边界条件为干流和两条支流的入流流量,下边界条件为各飓风期间的潮位,初始条件为上边界所在断面流量初始值,模型计算步长为 20 s,模拟结果输出时间间隔为 1 200 s。

在水力学模拟中,糙率是一个重要参数^[26],需要对河道和河漫滩的糙率分别赋值。根据《水工设计规范》等相关文献资料,河道糙率为 0.015~0.035,河漫滩糙率为 0.075~0.150,结合研究区河道受到人为干预的实际情况,糙率参数的最终取值

见表 2。

表 2 河道横断面糙率取值

Tab. 2 Parameter (Manning coefficient)

河流名称	左岸河漫滩	河道	右岸河漫滩
河流 1	0.1	0.020 000	0.1
河流 2	0.1	0.044 849	0.1
河流 3	0.1	0.034 046	0.1

HEC-RAS 1D-2D 模型由 HEC-RAS 1D 模型耦合水流的二维流动区域得到,输入模型的数据在一维模型基础上增加了洪泛区的地形数据和糙率值,水流的二维流动区域糙率取值依据美国地质调查局 (USGS) 的土地利用数据 (NLCD),对不同土地利用类型分区处理。研究区内不同类型下垫面的糙率取值见表 3。

本研究主要目的是研究河道横断面数据对洪水演进模拟的影响,因此,同一种水动力模型结构中的模拟设置仅有河道横断面地形数据不同,其他参数

均相同。

表 3 不同下垫面类型糙率取值

Tab.3 Roughness values of different underlying surface types

土地利用类型	糙率
开放的水域	0.001 0
已开发的开放空间	0.040 4
低强度开发	0.067 8
中强度开发	0.067 8
高强度开发	0.040 4
荒地岩石/沙/黏土	0.011 3
常绿林	0.320 0
灌木	0.400 0
草地	0.368 0
牧场/干草	0.325 0
种植作物	0.037 0
有树木的湿地	0.086 0
草洲	0.182 5

4 结果与分析

4.1 河道水位结果和流量结果对比分析

利用 HEC-RAS 1D 模型和 HEC-RAS 1D-2D 模型对 Frances 飓风期间(2004 年 9 月 1 日至 2004 年 9 月 8 日)和 Irma 飓风期间(2017 年 9 月 7 日至 2017 年 9 月 14 日)的洪水过程以及 2014 年 6 月 17 日至 2014 年 6 月 24 日的低水位过程进行水动力学模拟,根据验证站处断面实测水位过程,对实测断面的 HEC-RAS 1D 和 HEC-RAS 1D-2D 模型进行模型验证。验证结果表明,HEC-RAS 1D 模拟的 3 次水位过程均方根误差分别为 0.04、0.03 和 0.04 m, HEC-RAS 1D-2D 模拟的 3 次水位过程均方根误差分别为 0.07、0.04 和 0.07 m,模拟结果的均方根误差都不超过 0.1 m,模型模拟结果的偏差较小,可以在该区域进行准确的洪水模拟。将构造断面输入 HEC-RAS 1D 模型和 HEC-RAS 1D-2D 模型,其模拟水位过程见图 4。

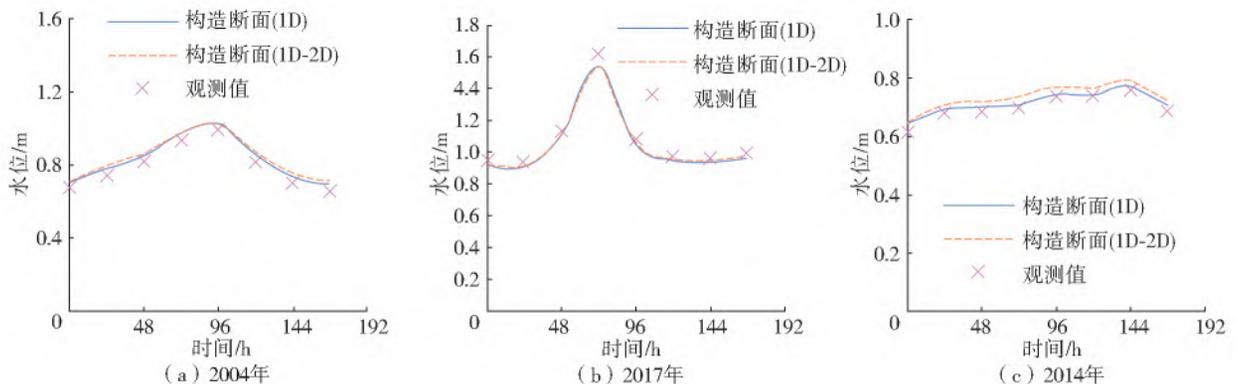


图 4 验证站处采用构造断面时模拟水位与观测水位对比

Fig. 4 Simulated water level and observed water level with modified cross-section at the gauging station

图 4 显示构造断面模拟出的水位过程与实测水位过程基本吻合,计算出模拟水位过程与实测水位过程的误差(表 4),用以比较不同水动力模型结构和不同断面形态模拟洪水水位过程的差别,计算结

果表明,DEM 断面模拟出的水位数值和变化趋势均与观测值相差较大。在采用 DEM 断面的 4 种模拟方案中,计算水位的平均误差最高可达 3.57 m,均方根误差明显高于采用构造断面的模拟方案。

表 4 模拟水位结果及分析

Tab.4 Summary of simulations

单位:m

模型结构	断面形式	2004 年		2017 年		2014 年	
		平均误差	均方根误差	平均误差	均方根误差	平均误差	均方根误差
HEC-RAS 1D	DEM 断面	3.57	3.74	1.34	1.59	1.34	1.59
	实测断面	0.04	0.04	0.03	0.03	0.04	0.04
	构造断面	0.03	0.03	0.03	0.04	0.03	0.03
HEC-RAS 1D-2D	DEM 断面	1.30	1.31	0.68	0.82	0.33	0.31
	实测断面	0.07	0.07	0.02	0.04	0.06	0.07
	构造断面	0.05	0.05	0.03	0.04	0.04	0.04

分析模拟水位误差大小与实际观测水位的关系(图 5),发现在 HEC-RAS 1D 模型和 HEC-RAS 1D-2D 模型中,实测断面和构造断面的模拟误差稳定在较低的数值,没有随水位而变化的趋势,DEM 断面的模拟误差随着水位的升高呈现不断减小的趋势,当验证站处水位达到 1.61 m 时,DEM 断面的计算误差已经小于 0.1 m,而在低水位条件下,DEM 断面的模型计算结果与观测值相差较大。

研究区内的验证站为水位站,缺少实测流量资料验证构造断面的准确性,但采用实测断面的 HEC-RAS 1D 模型经过验证可以模拟该研究区的洪水过程,故而将构造断面产生的流量过程与实测断面产生的流量过程进行比较,见图 6。图 6 显示,在不同的水位条件下,HEC-RAS 1D 模型中构造断面产生的流量过程与实测断面产生的流量过程平均误差为 $0.05 \text{ m}^3/\text{s}$,HEC-RAS 1D-2D 模型中两者分

别产生的流量过程变化趋势及峰现时间比较接近,洪峰流量平均相对误差约为 10%。考虑到偏大的模拟洪峰流量在实际应用中更为安全,偏差在可接受范围。

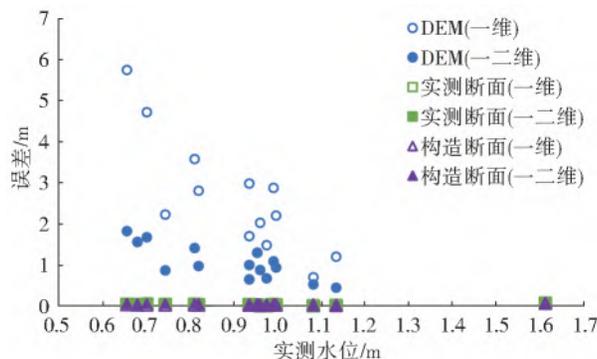


图 5 水位模拟误差与实测水位关系
Fig. 5 Relationship between simulation error and measured water elevation

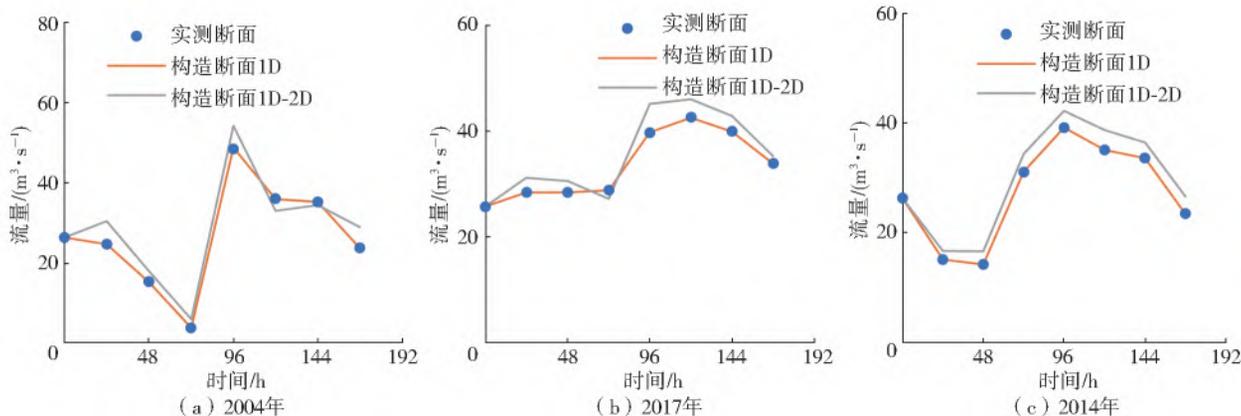


图 6 验证站处采用构造断面与实测断面时模拟流量对比

Fig. 6 Comparison of simulated flow between the modified cross-sections and measured cross-sections at the gauging station

4.2 淹没范围对比

洪水的最大淹没面积由 HEC-RAS 1D-2D 模型中的 RAS Mapper 模块计算得到,图 7 为 HEC-RAS 1D-2D 模型模拟的 2017 年 Irma 洪水过程中相应的淹没面积,在 3 种断面形式中,由构造断面和实测断面对应的 HEC-RAS 1D-2D 模型模拟出的淹没面积和变化趋势在第 72 h 前比较接近,几乎同时出现最大淹没范围,两者的淹没面积仅在退水过程中略有差异,相差最大的时刻出现在第 96 h,淹没面积相差约 20%;DEM 断面由于缺少足够的过水面积,且洪水期间上边界的来水流量较大,致使河道中的水不断地漫溢,洪泛区内洪水淹没面积呈扩大趋势,洪水的最大淹没范围产生于模拟计算结束的时刻。

分别使用实测断面、构造断面和 DEM 断面构建的 HEC-RAS 1D-2D 模型计算出洪水淹没范围,

图 8 为这 3 种断面数据模拟计算的最大淹没面积对比。使用基于 DEM 断面的模型计算出的最大淹没范围较基于实测断面的模型产生的最大淹没范围偏大,与基于 DEM 断面的模型相比,使用基于构造断面的模型计算出的最大淹没范围与使用基于实测断面的模型结果十分接近。

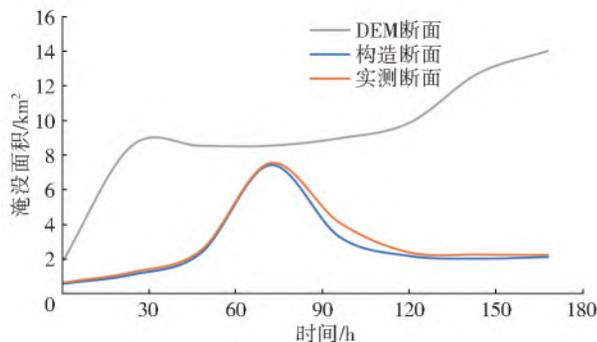


图 7 不同断面形态下的洪水淹没面积对比

Fig. 7 Comparison of flooded areas of different cross-sections

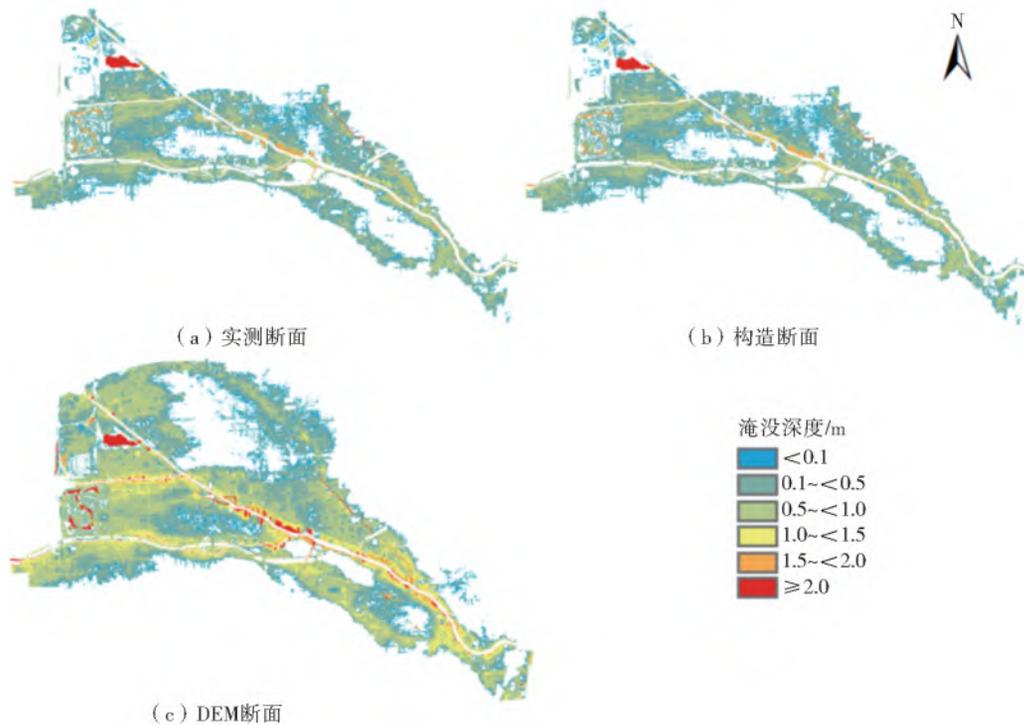


图 8 最大淹没面积对比

Fig. 8 Comparison of maximum submerged area

图 9 显示了 HEC-RAS 1D-2D 模拟的 Irma 洪水过程中实测断面和构造断面在不同淹没深度时对应的淹没面积对比,在不同的时刻,构造断面模拟的不同淹没深度对应的面积总体与实测断面的模拟一致,约 90%淹没范围水深小于 1 m。

造断面时能够较好地反映最大淹没水深,具有与采用实测断面时几乎相同的洪水到达时间,虽然构造断面模拟的退水过程略快于实测断面,但是在大多数淹没典型点退水时长相差不超过 4 h。总的来说,通过典型点的淹没过程比较,在洪水到达时间、淹没水深和洪水历时方面构造断面能够达到与实测断面接近的模拟效果,表明采用构造断面能够在该区域进行准确的洪水模拟。

5 结论

以美国佛罗里达州的迈阿密河下游为例,分析河道断面数据分别来源于 DEM 直接提取法、实地测量和本文改进的河道断面构造法时,对模型 HEC-RAS 1D, HEC-RAS 1D-2D 模型模拟效果的影响,主要结论如下。

DEM 数据在精确水力建模方面存在局限性,由于激光雷达扫描地形时忽略了水面以下的地形,DEM 数据对河床的描述是不充分的,DEM 断面提供的过流能力不足,使用 DEM 断面计算出的水位与实际观测水位过程不相符合,且模拟出的淹没深度、淹没范围与使用实测断面的模拟结果存在明显偏差。

采用本文提出的改进断面构造的方式对 DEM 水面以下的数据进行构造矫正,在洪水演进模拟中能够达到与使用实地测量河道横断面数据相近的效果,优于河道横断面仅从 DEM 数据直接提取法。

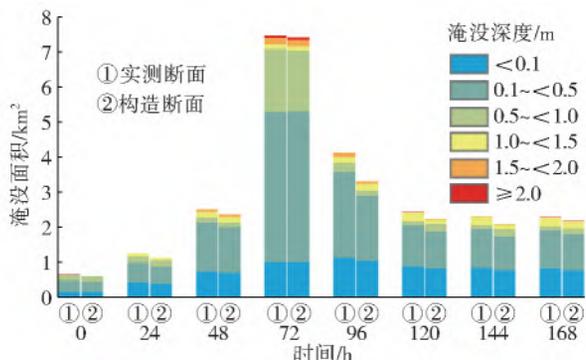


图 9 实测断面和构造断面在不同淹没深度时对应的淹没面积

Fig. 9 Area of the measured cross-sections and modified cross-sections at different submerged depths

在 HEC-RAS 1D-2D 模型的 4 个洪泛区总计 4 729 个二维流动网格中选取 6 个淹没典型点,将构造断面与实测断面的模拟的结果进行比较。比较对象是 Irma 飓风期间 6 个典型点的淹没过程,包括洪水到达时间、淹没水深和洪水历时,结果见图 10。

图 10 显示,在二维洪泛区中构造断面产生的淹没过程和实测断面接近,HEC-RAS 1D-2D 采用构

通过对 DEM 资料中的河道横断面数据进行改进, 可以节约实地勘测测量需要投入的时间和精力, 从

而增加 DEM 数据在广泛实践中的用处。

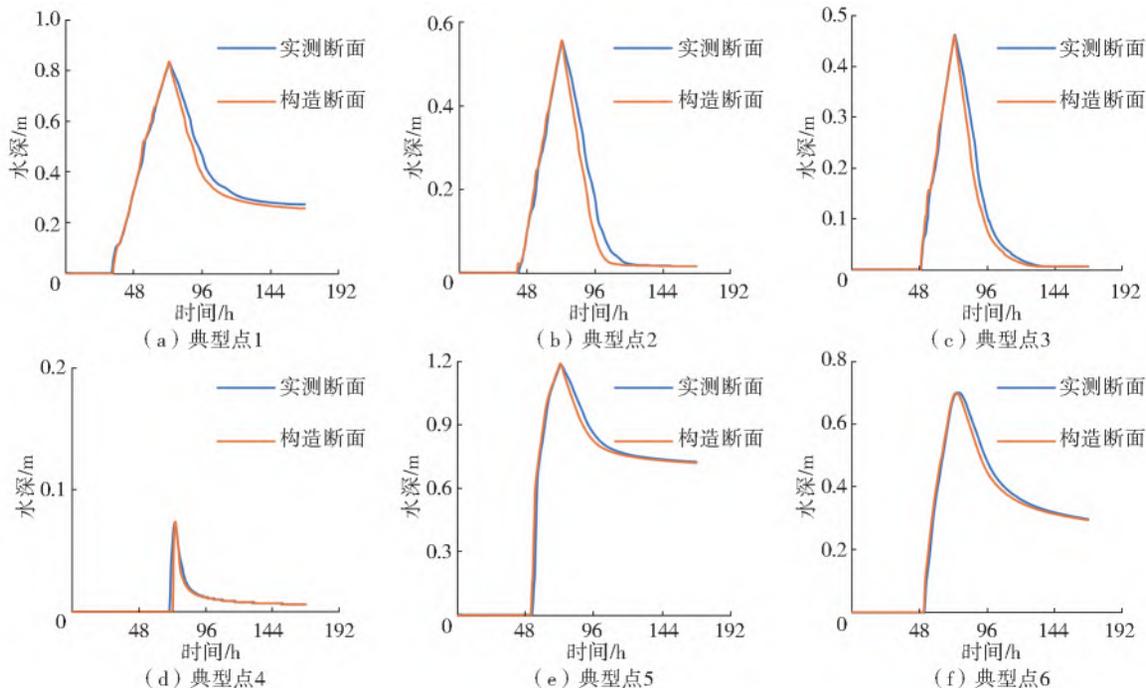


图 10 实测断面和构造断面的淹没典型点水深

Fig. 10 Water depth of submerged typical points in measured cross-sections and modified cross-sections

本研究中应用案例为平原河网地区, 该地区受人类活动干预较大, 横断面形状相比于有明显冲淤变化的河段更为规则, 且采用的 DEM 数据分辨率较高。后续将对国内具备条件的流域进行扩展, 并尝试在山区型河道或由于冲淤导致横断面形状不规则的河道区域, 开展横断面获取方法对水动力模型计算结果的准确性和适用性的进一步研究。

参考文献(References):

- [1] 成陆, 付梅臣, 王力. 基于 RS 和 GIS 的县域洪涝灾害风险评估[J]. 南水北调与水利科技, 2019, 17(6): 37-44, 68. (CHENG L, FU M C, WANG L. Comprehensive flood risk assessment based on RS and GIS in county area[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(6): 37-44, 68. (in Chinese)) DOI: 10. 13476/j. cnki. nsbdqk. 2019. 0133.
- [2] 李柔珂, 李耀辉, 徐影. 未来中国地区的暴雨洪涝灾害风险预估[J]. 干旱气象, 2018, 36(3): 341-352. (LI R K, LI Y H, XU Y. Protection of rainstorm and flooding disaster risk in China in the 21st century[J]. Journal of Arid Meteorology, 2018, 36(3): 341-352. (in Chinese)) DOI: 10. 11755/j. issn. 1006-7639(2018)-03-0341.
- [3] 蒋楠, 高成. 基于 MIKE 和 HEC-RAS 模型模拟锦江水面线比较研究[J]. 中国农村水利水电, 2019(4): 26-30. (JIANG N, GAO C. A comparative study of Jiang water surface line based on MIKE and HEC-RAS models[J]. China Rural Water and Hydropower, 2019 (4): 26-30. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1007-2284. 2019. 04. 005.
- [4] GHIMIRE E, SHARMA S. Flood damage assessment in HAZUS using various resolution of data and one-dimensional and two-dimensional HEC-RAS depth grids [J]. Natural Hazards Review, 2021, 22(1). DOI: 10. 1061/(ASCE)NH. 1527-6996. 0000430.
- [5] 姚斯洋, 刘成林, 魏博文, 等. 基于 MikeFlood 的组合情景洪水风险分析[J]. 南水北调与水利科技, 2019, 17(1): 61-69. (YAO S Y, LIU C L, WEI B W, et al. Combined scenario flood analysis based on MikeFlood[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(1): 61-69. (in Chinese)) DOI: 10. 13476/j. cnki. nsbdqk. 2019. 0009.
- [6] 苏程佳, 陈晓宏. 一种基于 Google Earth 影像的河道地形数据提取方法[J]. 水资源保护, 2019, 35(2): 80-84. (SU C J, CHEN X H. A new method for extracting river terrain data based on Google Earth image[J]. Water Resources Protection, 2019, 35(2): 80-84. (in Chinese)) DOI: 10. 3880/j. issn. 1004-6933. 2019. 02. 013.
- [7] 卢敏, 靳甜甜, 尹婧, 等. 少资料河流一维水动力水质模型概化断面参数获取方法[J]. 科技导报, 2017, 35(16): 74-83. (LU M, JIN T T, YIN J, et al. Determination of river cross section for 1-D water quality model

- in area without observation data[J]. *Science & Technology Review*, 2017, 35 (16): 74-83. (in Chinese)) DOI:10.3981/j.issn.1000-7857.2017.16.010.
- [8] AMIR M, KHAN M M K, RASUL M G, et al. Watershed delineation and cross-section extraction from DEM for flood modelling [C]//Proceedings of the 19th Australasian Fluid Mechanics Conference, Melbourne, Australia. 2014:8-11.
- [9] 王森,赵新益,黄尔. 基于 DEM 和 HEC-GeoRAS 软件的洪水模拟 [J]. *人民黄河*, 2017, 39 (5): 41-44. (WANG S, ZHAO X Y, HUANG E. Application research on digital elevation model and HEC-GeoRAS in flood simulation[J]. *Yellow River*, 2017, 39(5): 41-44. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2017.05.011.
- [10] 王辉,张佳,张骏. 基于 HEC-RAS 模型的青海省玉树县巴塘河流域洪水模拟分析 [J]. *水利与建筑工程学报*, 2018, 16 (6): 219-224. (WANG H, ZHANG J, ZHANG J. Flood simulation and analysis for Batang River watershed in Yushu County Qinghai Province based on HEC-RAS[J]. *Journal of Water Resources and Architectural Engineering*, 2018, 16(6): 219-224. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2018.06.041.
- [11] 周建红,杨彪,王华,等. 长江中下游河道岸滩低空机载 LiDAR 点云地形滤波算法 [J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2019, 47(1): 26-31. (ZHOU J H, YANG B, WANG H, et al. Filtering algorithm of the low-altitude airborne LiDAR point clouds for topographic survey of the middle-lower Yangtze River riparian zone[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2019, 47 (1): 26-31. (in Chinese)) DOI: 10.3876/j.issn.1000-1980.2019.01.005.
- [12] 孔乔,韩露,刘兴坡,等. 一种采用 SRTM DEM 重构河床数字地形的方法 [J]. *地球信息科学学报*, 2021, 23(3): 385-394. (KONG Q, HAN L, LIU X P, et al. Methodology of digital riverbed reconstruction based on SRTM DEM data[J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2021, 23(3): 385-394. (in Chinese)) DOI:10.12082/dqxxkx.2021.190811.
- [13] COOK A, MERWADE V. Effect of topographic data, geometric configuration and modeling approach on flood inundation mapping [J]. *Journal of Hydrology*, 2009, 377 (1-2): 131-142. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2009.08.015.
- [14] 李磊. 基于 HEC-RAS 的永定河泛区一维洪水演进模型的研究 [J]. *河北水利*, 2017 (11): 40-41. (LI L. Study on one-dimensional flood evolution model of Yongding River flood area based on HEC-RAS[J]. *Hebei Water Resources*, 2017(11): 40-41. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1004-7700.2017.11.034.
- [15] 王尧. 不同 DEM 在无资料地区小流域计算中的应用 [J]. *电力勘测设计*, 2016(5): 38-43. (WANG Y. Application of different DEMs to flood estimation in ungauged basins[J]. *Electric Power Survey & Design*, 2016(5): 38-43. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1671-9913.2016.05.010.
- [16] 郭海燕,陈军,徐沅鑫,等. 径流汇流模拟的河道高程修正方法研究 [J]. *干旱气象*, 2019, 37(4): 676-682. (GUO H Y, CHEN J, XU Y X, et al. Study on method of river course elevation correction to improve accuracy of runoff confluence simulation[J]. *Journal of Arid Meteorology*, 2019, 37(4): 676-682. (in Chinese)) DOI:10.11755/j.issn.1006-7639(2019)-04-0676.
- [17] 王光朋,查小春,黄春长,等. HEC-RAS 模型在汉江上游洪水演进和流量重建中的应用 [J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2017, 45 (12): 129-137. (WANG G P, ZHA X C, HUANG C C, et al. Application of HEC-RAS model in flood routing and discharge reconstruction of the upper reaches of Hanjiang River[J]. *Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition)*, 2017, 45(12): 129-137. (in Chinese)) DOI: 10.13207/j.cnki.jnwafu.2017.12.018.
- [18] MUTHUSAMY M, RIVAS C M, SALMORAL G, et al. A remote sensing based integrated approach to quantify the impact of fluvial and pluvial flooding in an urban catchment [J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(5): 577. DOI:10.3390/rs11050577.
- [19] 胡鹏,崔小红,周祖昊,等. 流域水文模型中河道断面概化的原理和方法 [J]. *水文*, 2010, 30(5): 38-41, 79. (HU P, CUI X H, ZHOU Z H, et al. Principle and method of river cross section regularization in watershed hydrological model[J]. *Journal of China Hydrology*, 2010, 30(5): 38-41, 79. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-0852.2010.05.008.
- [20] 俞茜,陈永灿,朱德军,等. 基于 DEM 数据的河道水动力过程数值模拟 [J]. *水力发电学报*, 2014, 33(3): 133-137, 157. (YU Q, CHEN Y C, ZHU D J, et al. River cross-section extraction from DEM for one-dimensional hydrodynamic modeling[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2014, 33 (3): 133-137, 157. (in Chinese))
- [21] BHUYIAN M N M, KALYANAPU A J, NARDI F. Approach to digital elevation model correction by improving channel conveyance [J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2015, 20 (5): 04014062. DOI: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001020.

- [22] 张文婷,唐雯雯. 基于水动力学模型的沿海城市洪水实时演进模拟[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2021, 51(1): 212-221. (ZHANG W T, TANG W W. Real-time flood routing simulation fo coastal citted based on hydrodynamic model[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 2021, 51(1): 212-221. (in Chinese)) DOI:10.13278/j.cnki.jjuese.20190171.
- [23] 高清震. HEC-RAS 和 MIKE11 模型的英那河水面线计算对比分析[J]. 黑龙江水利科技, 2020, 48(4): 68-72. (GAO Q Z. Comparison and analysis of calculation of surface line of Yingna River with HEC-RAS and MIKE11 models[J]. Heilongjiang Science and Technology of Water Conservancy, 2020, 48(4): 68-72. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1007-7596.2020.04.017.
- [24] Hydrologic Engineering Center. HEC- RAS user's Manual version 3. 1[Z]. Davis, CA, U. S. A. : U. S. Army Corps of Engineers, Davis, CA, 2016: 2-22~2-27+2-2~2-3.
- [25] ANUAR M. A, GIULIANO D. B, DIMITRI P. S. Testing different cross-section spacing in 1D hydraulic modelling: A case study on Johor River, Malaysia[J]. Hydrological Sciences Journal, 2015, 60(2): 351-360. DOI:10.1080/02626667.2014.889297.
- [26] 玛哈沙提·哈孜哈力, 努尔夏西·曼斯尔. 天然河道的糙率确定方法分析[J]. 能源与节能, 2017(4): 94-95. (MAHASHATI H, NUERXIAXI M. Analysis of the methods for determining the roughness of natural river course[J]. Energy and Energy Conservation, 2017(4): 94-95. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.2095-0802.2017.04.046.

DEM-based improved method for river cross-sections modification and evaluation of flood routing accuracy

ZHANG Wenting^{1,2}, LI Zhixuan¹, ZHANG Xingnan¹, LIU Yongzhi^{2,3}

(1. College of Hydrology and Water Resource, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. The State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing 210098, China; 3. Hydrology and Water Resources Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210009, China)

Abstract: River cross-section data is necessary for one-dimensional and one-two-dimensional coupled hydrodynamic flood routing numerical simulations. However, river cross-section field measurement is time-consuming, labor-intensive, and expensive. Under a sudden flood, it is impossible to carry out on-site measurements when modeling the emergency flood evolution. Rapid acquisition of river section data is the key to hydrodynamic flood evolution model modeling.

To solve the above-mentioned problems, two methods for river cross-section are proposed. One is to directly extract river cross-sections (called DEM cross-sections) based on the digital elevation model (DEM), and the other is the improved cross-section construction method using parabola. The elevation at the thalweg is corrected by the lowest point elevation correction coefficient k (called constructed cross-sections). Two sets of river section data is obtained by the above two methods as the main input of the hydrodynamic simulation software HEC-RAS to carry out one-dimensional and one-two-dimensional coupled hydrodynamic numerical simulations, and then simulation results are compared with the flood routing results modeled by the measured river section data to evaluate the effect of rapid acquisition of the two river sections.

The research method is applied in the lower reaches of the Miami River in Florida, USA. Two typical floods in 2004, 2017 and 2014 are selected to analyze the differences in the simulation results of flood evolution under two different cross-sections. The results show that the simulated water level of the measured cross-sections and constructed cross-sections are consistent with the observed water level process, and the simulated maximum inundation range is very close to the results of the model based on the measured cross-sections. In the simulation scheme using the DEM cross-sections, the average error of the simulated water level is up to 3.57 m. The maximum submergence range is calculated using the model based on the DEM cross-sections which is larger than measured cross-sections.

DEM data has limitations in accurate hydraulic modeling. The description of the riverbed by DEM data is insufficient due to the ignorance of the terrain below the water surface as LiDAR scanned the terrain. The overflow capability provide by the DEM cross-sections is insufficient. The water level calculated by the DEM cross-sections is not consistent with the actual observed water level process, and the simulated submergence depth and submerged range deviate from the simulation results using the measured cross-sections. In the flood routing simulation, using the improved cross-section construction method proposed to correct the DEM data below the water surface can achieve similar to field measured river cross-section data, which is better than the method of directly extracting the river cross-section only from DEM data. By improving the river cross-section data in the digital elevation model data, the time and effort required for field survey. The methods of obtaining river cross-section data apply to plain river network areas, and the DEM data has a high resolution. In the future study of mountainous rivers or areas with only coarse DEM that can be obtained, the accuracy and applicability of different acquisition methods of river cross-section data to the calculation results of the hydrodynamic model still need to be further studied.

Key words: hydrodynamics; river cross-sections; digital elevation model; flooding modeling; HEC-RAS