

福州市雨洪模拟

李帅杰 程晓陶 郑敬伟 王 静

(中国水利水电科学研究院 北京 100038)

摘要 :为把握城市洪涝风险的演变趋向 ,建立了可用于模拟福州城区雨洪产消过程的水力学模型。模型中平面水流的特性按二维非恒定流求解 ,小尺度河道水流的特性则按一维非恒定流求解。应用近年来重创福州的 2 次台风暴雨洪水的实测资料对模型进行调试和验证 ,结果表明模型具有良好的计算精度。模型可提供福州市洪水风险分析所需的洪水峰现时间、淹没范围、淹没水深、淹没历时等时空分布信息 ,为开展城市洪涝风险分析与评估、科学制定防汛应急预案、合理调度防洪工程体系提供先进有效的技术手段。

关键词 :水力学模型 ;非恒定流 ;城市洪水模拟 ;洪水风险分析 ;福州市

中图分类号 :TV877 ;P333.8 **文献标识码** :A **文章编号** :1006-7647(2011)05-0014-06

Numerical simulation of rainstorm flood in Fuzhou City//LI Shuai-jie , CHENG Xiao-tao , ZHENG Jing-wei , WANG Jing (China Institute of Water Resources and Hydropower Research , Beijing 100038 , China)

Abstract : A hydraulic model for simulating the urban flood routing in Fuzhou City was established in order to know the evolution trend of the urban flood risk . The urban overland flows were treated as the two-dimensional unsteady ones , and the urban channel flows was regarded as the one-dimensional unsteady ones in the model . The model was calibrated and validated by means of the observed data of two sets of typhoon floods seriously hitting Fuzhou City in recent years . The results show that the proposed model has good accuracy . It can provide spatial and temporal information during the flooding including time to flood peak , extent of the inundated areas , water depth and inundation time for the urban risk analysis in Fuzhou City . It can also provide technical support for the urban flood risk analysis and assessment , emergency plan-making for flood prevention , dispatch of projects and facilities for flood control .

Key words : hydraulic model ; unsteady flow ; urban flood simulation ; flood risk analysis ; Fuzhou City

城市洪涝灾害是城市化区域因河流泛滥或暴雨内涝形成的灾害 ,其过程受人类活动的影响变得更为显著 ,如城市不透水面积增加 ,城市向低洼易涝区扩张 ,城市热岛效应与雨岛效应等。统计显示 ,世界上因城市洪涝灾害造成的经济损失呈逐年增加的趋势^[1]。这不仅是由于城市聚集了更多的人口与财产 ,其水灾脆弱性日趋显现 ,而且还涉及城市化区域径流规律和洪水特性随之发生的变化 ,如同量级降水引发的洪水量级增大 ,河道洪水峰现时间提前、洪峰流量增大等^[2]。我国当前处在快速的城市化发展阶段 ,预计未来 30 年城市化水平还将不断提高 ,与之不相符的是我国城市防洪排涝标准普遍偏低 ,城市化地区洪水灾害损失持续增长^[3]。为了有效地抑制城市化进程中不断加剧的洪涝灾害风险 ,迫切需要针对变化环境下城市洪涝风险的演变趋向 ,切实

有效地采取防洪工程措施和非工程措施并举的综合防治措施。为此 ,城市暴雨洪涝的仿真模拟技术成为研究开发的重点课题。

城市暴雨洪水模拟研究主要分为水文学方法和水力学方法 ,现今应用较为广泛的城市雨洪模型的构建均基于确定性理论 ,通常可分为三大类 :系统理论模型、概念性模型及物理模型^[4]。水文学方法以产汇流理论为基础 ,依据“降雨-径流”过程的物理概念和实验或经验性理论建立数学模型 ,其数学模型包括系统理论模型和概念性模型。系统理论模型是基于对输入和输出系列的经验分析 ,模型参数不具有物理意义 ,概念性模型以水文现象的物理概念和经验公式为基础构造^[5] ,往往具有分布式特征 ,模型参数具有一定的物理意义 ,需结合集水口的历史洪水资料在计算域上率定^[6]。水文学方法结构简明、

计算速度快,其计算结果为流域或单元出口处的洪水过程,因此无法反映城市各水力要素值的时空变异规律。

随着计算机及数值计算技术的进步,城市洪水演算的水动力学方法得以迅速发展。水力学方法基于水文过程的物理规律,采用数值算法求解水流运动的质量和动量守恒的偏微分方程,得出详尽的洪水演进过程,可提供城市洪涝的淹没范围、水深分布、流速分布与淹没历时等信息。水力学模型属于物理模型,模型参数具有明确的物理意义,主要根据地形和地貌数据经量测和分析获取,并结合历史洪水资料进行率定和验证。当前,水力学模型在城市雨洪模拟中已经有许多成功的应用,如,Mark等^[7]采用隐式差分法求解圣维南方程组,建立了城市街道与地下管网联动的一维水动力学模型,成功地模拟了地表一维非恒定流过程。Schmitt等^[8]采用有限体积法求解浅水波方程组,用于模拟城市暴雨地表二维非恒定流过程,得出较好的计算结果。日本京都大学防灾研究所研发的集成式城市洪水模型(integrated urban flood model)^[9]将一、二维水力学模型耦合起来模拟城市河道、排水管道与城区泛滥的洪水,并能模拟洪水涌入地下商店街的淹没情况。国内,中国水利水电科学研究院自主研发的城市洪涝仿真模型是经过多年研究并在实践中不断改进的较成熟的模型。模型早期为矩形网格建模^[10],采用有限差分法求解二维浅水波方程,引入建筑物密集度参数以反映城区密集建筑物对洪涝过程的影响,并采用在二维网格中开沟的方式模拟小尺度河渠的行洪作用。1994年对复杂地形具有较好适应性的无结构不规则网格建模技术被引入模型体系之中,经过10多年的应用改进,目前该模型对城市地面雨洪过程的模拟已具有较高的精度和可靠性^[11-13]。张新华等^[14]建立的任意多边形网格2D FVM模型在时间和空间上均具有二阶精度,应用于城市的二维非恒定流模拟,取得了较好的计算结果。本研究采用中国水利水电科学研究院开发的城市洪水模拟技术建立福州市雨洪仿真模型。

近年来,随着数字高程模型(DEM)、高精度卫星遥感技术和GIS技术的不断发展,可获取的城市下垫面信息和水文信息的精度不断提高,综合应用水文学方法和水力学方法已经成为研究城市洪水过程的有效途径。如,Haile等^[15]在Tegucigalpa城建立了基于不同精度DEM数据的一维水力学模型,分析下垫面信息的详细程度对洪水过程模拟效果的影响,结果表明洪水特性的模拟值对DEM数据精度具有较高的敏感度。徐照明等^[16]、蔡金榜等^[17]、万洪涛

等^[18]应用MIKE11软件分别在深圳河流域、常州市、哈尔滨市和吉林市等建立了水文/水力学模型,通过研究证明基于科学的水文信息采集技术,应用UHM SCS模型和新安江模型等降雨-径流模型可为城市河网水动力学模拟提供更符合实际的边界输入。

笔者以福州市为例,结合城市当前的防洪工程体系进行暴雨洪水模拟研究。福州市位于福建省东部、闽江下游近海口处,区域年均降雨量为1394 mm,夏秋季节热带风暴和台风活动非常频繁,常携带大量水汽造成短时强降雨,流域分水线以内的山地集雨面积超过40 km²,易引发山洪灾害,城区行洪压力巨大。20世纪90年代以来,福州市进入快速城市化发展阶段,新建城区面积和人口比以往均增加了1倍以上。城区内河不堪重负,淤积导致河道蓄水和排水能力降低,低洼区域、路段遇暴雨洪水时内涝严重^[19]。受以上因素及极端天气的影响,福州市近年来洪涝灾害频发且不断升级,不仅造成巨大的经济损失和破坏性影响,同时也对城市的可持续发展构成严重威胁。

1 数学模型

1.1 基本原理

福州市雨洪仿真模型对城市的下垫面、防洪工程、排涝系统进行概化处理,以城区河道、管道及地表水流运动为模拟对象,其中平面水流采用二维非恒定流方程描述,对宽度较小的河道、街道中的水流采用一维非恒定流方程描述。模型采用无结构不规则网格对研究区进行离散,以网格为计算单元,在网格形心处布设水位,将网格的各边定义为通道,在通道上布设流量。模型将小于离散网格尺度的河道和有行洪记录的街道概化为特殊通道,用来计算一维单元汇集和排泄的水量,如图1所示的城区内晋安河、白马河、新西河、化工河、凤坂河、五四河等26条主要排水河道和20个易行洪积涝路段被设计为特殊型通道。计算区域北侧和西侧以分水岭为边界,南侧以闽江为边界,东侧以铁路护墙为边界,总计算面积为326.07 km²。

1.2 基本方程的离散

在计算平面二维水流运动时,模型应用有限体积法对控制方程进行离散,对每个单元分别进行水量和动量平衡计算,求得计算时段末网格内的平均水深和网格各通道上的单宽流量。控制体水深计算采用显式离散化形式的连续性方程:

$$H_i^{T+2\Delta t} = H_i^T + \frac{2\Delta t}{A_i} \sum_{k=1}^K Q_{ik}^{T+\Delta t} l_{ik} + 2\Delta t q_i^{T+\Delta t} \quad (1)$$



图1 模型网格示意图

式中: H_i 为网格 i 的水深; T 为计算时刻; Δt 为时间步长; A_i 为网格 i 的面积; Q_{ik} 为网格 i 的第 k 条通道上的单宽流量; l_{ik} 为网格 i 的第 k 条通道的长度; q_i 为网格 i 的源汇项。

河道型和陆面型通道上的流量采用简化的二维非恒定流动量方程的离散格式计算, 忽略了动量方程中的对流项, 保留方程中的局地惯性项、重力项和阻力项, 离散形式如下:

$$Q_j^{T+\Delta t} = Q_j^{T-\Delta t} - 2gH_j\Delta t \frac{Z_{j2}^T - Z_{j1}^T}{L_j} - 2g\Delta t \frac{n^2 Q_j^{T+\Delta t} |Q_j^{T-\Delta t}|}{H_j^{7/3}} \quad (2)$$

式中: Q_j 为通道 j 上的单宽流量; g 为重力加速度; H_j 为通道 j 上的平均水深; Z_{j2} 、 Z_{j1} 为通道 j 两侧单元的水位; L_j 为通道 j 两侧单元形心到通道 j 中点的距离之和; n 为糙率。

特殊型通道上的水位和流量计算以特殊节点为计算单元, 特殊节点由通道交点及其连接的所有特殊通道(取长度的 $1/2$)组成, 通道的宽度、底高程均根据实际的河流或街道断面设计, 如图2所示。对计算单元进行水量平衡计算, 既要考虑通道上的水流运动, 也要考虑通道与两侧网格间的水流交换。特殊通道与两侧网格间的流量交换采用堰流公式计算(如式(3))。沿通道方向的水流属于一维明渠流,

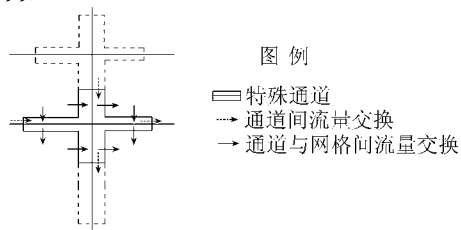


图2 特殊通道计算单元示意图

计算单元的水位和流量采用一维明渠非恒定流计算, 连续性方程的离散格式如式(4)所示。

a. 宽顶堰流公式:

$$Q_j^{T+\Delta t} = m_j \sigma_j \sqrt{2g} H_j^{3/2} \quad (3)$$

b. 一维明渠非恒定流连续方程离散格式:

$$H_{di}^{T+2\Delta t} = H_{di}^T + \frac{2\Delta t}{A_{di}} \left(\sum_{k=1}^N Q_{ik}^{T+\Delta t} l_{ik} + \sum_{j=1}^{2N} Q_{ij}^{T+\Delta t} l_{ij} \right) + 2\Delta t q_{di}^{T+\Delta t} \quad (4)$$

式中: m_j 为通道 j 的流量系数; σ_j 为通道 j 的淹没出流系数; H_{di} 为计算单元 i 上的水深; A_{di} 为计算单元 i 的面积; $\sum_{k=1}^N Q_{ik}^{T+\Delta t} l_{ik}$ 为计算时段内沿通道方向流入和流出计算单元 i 的水量之和, 流入计算单元 Q_{ik} 为正, 流出计算单元 Q_{ik} 为负; $\sum_{j=1}^{2N} Q_{ij}^{T+\Delta t} l_{ij}$ 为计算时段内计算单元 i 与两侧网格间交换的水量之和, 流入计算单元 Q_{ij} 为正, 流出计算单元 Q_{ij} 为负; q_{di} 为计算单元 i 的源汇项。

1.3 模型参数率定

模型的计算单元包括网格和特殊节点, 其参数有网格与节点的高程、糙率、径流系数。模型参数率定按其目标可分为: ①率定影响城区地表积水深的参数, 包括地面径流系数、糙率、计算单元高程, 以使积水点计算水深与实测值误差达到精度要求; ②率定影响河道洪峰水位及峰现时间的参数, 主要为河道的糙率, 以使河道水位站计算的水位过程线与实测水位过程线最大可能地吻合。河道中的流量除上游入流之外, 其余主要是由城区地表产流之后汇入, 因此影响地表产汇流的参数同时会影响河道中的洪峰过程, 上述2种目标参数率定应是一个综合的过程。经反复试算调整, 模型参数率定结果见表1。

表1 模型参数率定结果

地面情况	径流系数	糙率
草地	0.15	0.065
街道	0.65	0.035
河道	—	0.025
中心城区(不透水覆盖面积大于70%)	0.65	0.070
居民区(不透水覆盖面积为50%~70%)	0.60	0.070
居民区(不透水覆盖面积为30%~50%)	0.45	0.070
居民区(不透水覆盖面积小于30%)	0.40	0.070

2 模型的调试和验证

2005年10月2—3日的“龙王”台风与2006年7月16—17日的“碧利斯”台风形成的暴雨洪水在福州市引发了严重的洪涝灾害。对于这2场暴雨洪涝的城区积水情况, 福州市组织了专门的调查, 为模型的调试与验证提供了难得的实测资料。有调查数据

的积水点分布如图 3 所示。2 场暴雨的降雨过程如图 4、图 5 所示。

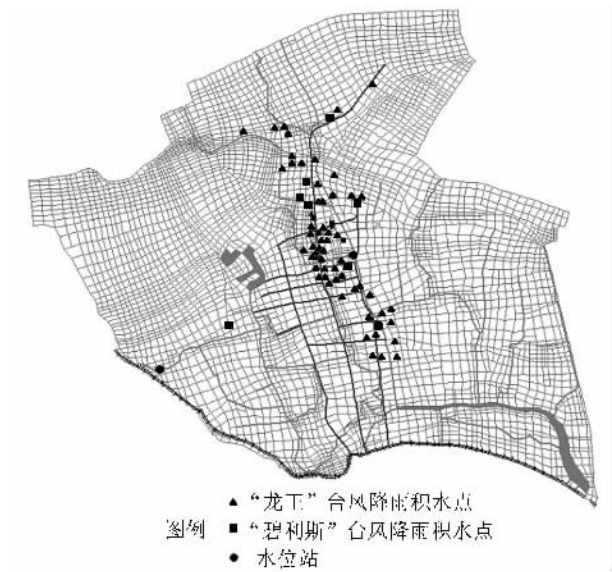


图 3 选用水位站及台风降雨积水点分布

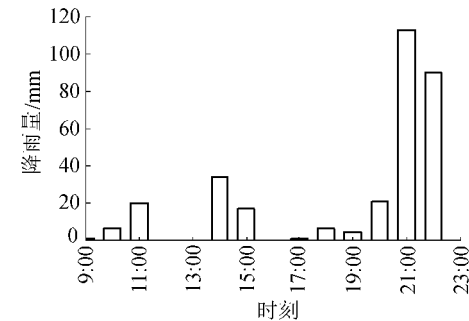


图 4 “龙王”台风降雨过程

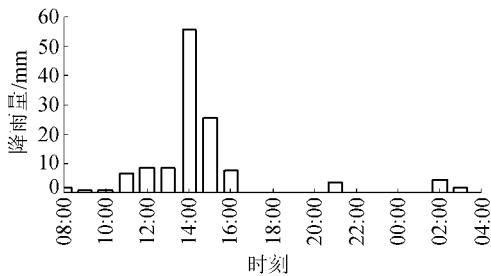


图 5 “碧利斯”台风降雨过程

模型调试过程中选取城区 66 个积水点水深数据和 2 个水位站实测水位过程线作为模拟结果调试的依据(积水点和水位站位置分布见图 3) 2 个水位站分别位于晋安河和新西河上,晋安河和新西河是福州市东、西片区主要的泄洪河道,其断面水位过程可代表洪水在城区的演进过程。

最大积水深调试结果见表 2,重要断面水位过程线的调试结果如图 6 所示。模型计算的最大积水深与实测值误差情况:66 个积水点中绝对误差等于 0.20 m 的只有 1 个,介于 0.10 ~ 0.20 m 之间的有 17 个,两者共占 27%;绝对误差小于 0.10 m 的有 48 个,占 73%。积水点中相对误差大于 20% 的有

7 个,介于 10% ~ 20% 之间的有 22 个,两者共占 36%;相对误差小于 10% 的有 37 个,占 64%。以上结果符合当前福州城区对模拟结果的精度要求;模型计算的新西河水位站与五四河水位站的水位过程线与实测水位过程线趋势相同,计算水位与实测水位之间的相关系数分别为 0.90 和 0.96,拟合结果表明模型对城区排水系统的概化以及调度规则的运用是合理的。

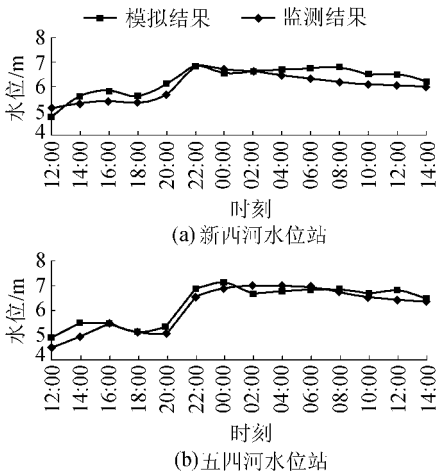


图 6 “龙王”台风期水位过程线

选用福州市 2006 年 7 月 16—17 日“碧利斯”台风暴雨洪水数据来验证调试好的模型,验证结果见表 3 和图 7。12 个监测积水点的计算值与实测值绝对误差小于 0.20 m 的有 9 个,占 75%,精度良好。模型计算的新西河水位站与五四河水位站的水位过程线与实测数据趋势基本相符,计算水位与实测水位之间的相关系数分别为 0.67 和 0.58。

3 误差原因分析

a. 降雨输入和净雨计算误差:台风雨是造成福州市洪涝灾害的主要雨型,据统计其降雨量可占全年降雨量的 30%。台风雨发生时往往大风与降水相伴,造成雨强和降雨量在空间上的分布存在较大差异,模型采用对不同雨量站的记录进行插值计算的方法来考虑这种差异性。但插值计算方法所得结果不完全符合降雨空间变化的真正规律,同时模型中假设计算单元上的降雨是均匀的,采用径流系数法计算净雨量,这些都会使计算结果存在误差。今后在市区有较多实时雨量观测数据时可以进一步识别降雨空间分布的不均匀,从而减少此项因素造成的误差。

b. 空间离散误差:模型计算单元(包括网格和特殊节点)的底高程、糙率等参数均取单元范围内的平均值,参数在微尺度上的空间差异性被忽略。因此,模型不能精确反映小于离散尺度的淹水区域内

表 2 “龙王”台风暴雨最大积水深调试结果

积水点	实测 水深/m	计算 水深/m	绝对 误差/m	相对 误差/%	积水点	实测 水深/m	计算 水深/m	绝对 误差/m	相对 误差/%
冠茂洲苑	0.23	0.17	0.06	26.1	福州大戏院	1.60	1.73	0.13	8.1
高尔夫花园	1.65	1.61	0.04	2.4	新天地大厦	0.40	0.46	0.06	15.0
锦绣文华	1.30	1.18	0.12	9.2	信茂温泉公园	0.70	0.72	0.02	2.9
福盛花园	0.80	0.89	0.09	11.3	骏建大厦	0.70	0.73	0.03	4.3
福日新城	1.20	1.33	0.13	10.8	国际大厦	1.00	0.93	0.07	7.0
黄金山村	1.40	1.56	0.16	11.4	华福花园	0.28	0.41	0.13	46.4
福华花园	0.76	0.79	0.03	3.9	华城国际	1.00	0.98	0.02	2.0
琴亭苑	0.76	0.77	0.01	1.3	新华都广场	0.90	1.03	0.13	14.4
福建省总工会	0.70	0.78	0.08	11.4	宜发大厦	0.70	0.75	0.05	7.1
亿力物资公司	1.00	0.87	0.13	13.0	华香楼酒店	0.90	1.00	0.10	11.1
丽景天下	0.50	0.52	0.02	4.0	中银大厦	0.70	0.78	0.08	11.4
省体育馆	0.37	0.47	0.10	27.0	温泉别墅	0.70	0.67	0.03	4.3
鑫亭小区	0.60	0.62	0.02	3.3	城市之光	1.07	1.09	0.02	1.9
省烟草公司	1.50	1.44	0.06	4.0	省商业厅	1.62	1.60	0.02	1.2
海富客运站	1.15	1.12	0.03	2.6	省图书馆	0.58	0.62	0.04	6.9
省老年医院	1.50	1.44	0.06	4.0	省中图旅行社	0.63	0.55	0.08	12.7
福建中医学院	1.22	1.33	0.11	9.0	国贸广场	0.73	0.73	0.00	0.0
琴亭小区	1.10	1.25	0.15	13.6	城建大院	0.88	0.87	0.01	1.1
环北一村	0.90	0.83	0.07	7.8	温 泉 苑	0.37	0.36	0.01	2.7
天溢小区	0.29	0.20	0.09	31.0	馨泉公寓	0.71	0.62	0.09	12.7
福州汽车北站	1.00	0.90	0.10	10.0	东湖宾馆	0.45	0.43	0.02	4.4
省经贸会展中心	1.14	1.09	0.05	4.4	省水利水电设计院	0.60	0.44	0.16	26.7
武夷大厦	0.70	0.74	0.04	5.7	市城建设计研究院	1.10	0.96	0.14	12.7
花园大酒店	0.70	0.72	0.02	2.9	省邮电局宿舍	0.50	0.44	0.06	12.0
省建材设计院	0.75	0.77	0.02	2.7	华盛大厦	0.47	0.55	0.08	17.0
地震局	1.00	1.06	0.06	6.0	市新华印刷厂	0.65	0.64	0.01	1.5
郊区物资局	1.08	1.06	0.02	1.9	福州农药厂	0.70	0.59	0.11	15.7
省建委宿舍	1.10	1.10	0.00	0.0	福州市茶厂	0.86	0.95	0.09	10.5
温泉公寓	0.50	0.43	0.07	14.0	市汽车工业公司	1.05	1.17	0.12	11.4
市三山中学	0.30	0.32	0.02	6.7	劳动大厦	0.60	0.64	0.04	6.7
温泉花园	0.84	0.84	0.00	0.0	福州电线厂	0.70	0.90	0.20	28.6
温泉大饭店	1.10	1.09	0.01	0.9	福州制革厂	0.65	0.74	0.09	13.8
王庄贸易市场	0.38	0.44	0.06	15.8	省机械研究所	0.27	0.43	0.16	59.3

表 3 “碧利斯”台风暴雨最大积水深验证结果

积水点	实测 水深/m	计算 水深/m	绝对 误差/m	相对 误差/%
国绵厂	0.29	0.27	0.02	6.9
紫阳站	0.34	0.10	0.24	70.6
花园大酒店	0.30	0.43	0.13	43.3
省体育馆	0.70	0.43	0.27	38.6
福州烟草大厦	0.72	0.60	0.12	16.7
温泉路公园	0.80	0.71	0.09	11.3

积水点	实测 水深/m	计算 水深/m	绝对 误差/m	相对 误差/%
省图书馆	0.34	0.29	0.05	14.7
工贸会展中心	0.15	0.14	0.01	6.7
二环路与华林路交叉	0.70	0.72	0.02	2.9
二环路杨桥路口	0.32	0.14	0.18	56.3
秀峰路	1.00	1.26	0.26	26.0
省电力勘测设计院	0.39	0.47	0.08	20.5

水力要素的变化。譬如对于局部低洼的积水点 ,模型计算积水深误差明显。

c. 模型在计算 2 场暴雨洪水时 ,排水系统的运

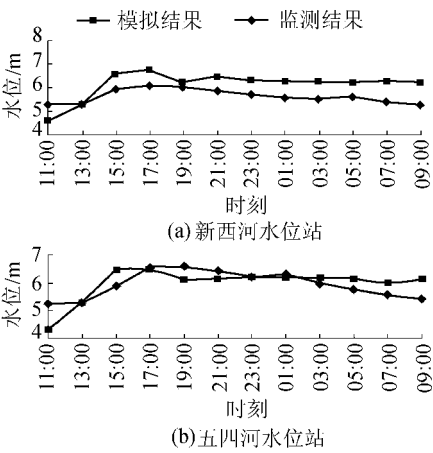


图 7 “碧利斯”台风期水位过程线

行方案依据《福州市防洪调度预案》进行设计 ,具体设计内容包括雨前水库水位、雨中水库闸门开度变化、排涝闸门启闭和泵站运行等。对比 2 次台风期模型计算的河道断面水位精度可知 ,设计调度方案

与实际调度过程的差异也是导致模型计算误差的重要原因。

d. 模型中选取淹没点最大积水深作为调试和验证模型的主要依据,而积水深值的测量也存在误差,如部分积水深是在洪水过后还原得到的,有些积水深是在局部低洼区上测得的,不能代表网格上的平均水深。在应用过程中可进一步校正模型,以提高模拟精度。

e. 调试和验证结果表明,模型在部分浅积水点(实测积水深小于 0.40 m)计算值与实测值之间的相对误差偏大,笔者认为除了以上分析的原因之外,还有部分是由模型自身精度条件造成的,调试和验证过程中模型在所有积水点计算的水深绝对误差平均值分别为 0.067 m 和 0.022 m,在平均精度范围内,浅积水点由于水深基数较小导致其相对误差偏大。

4 结 语

笔者建立的数学模型可用于模拟因暴雨、溃坝及溃堤等引发的城市洪水过程。无结构不规则网格和一维通道的应用,使模型在对城市下垫面离散时,可以更加灵活地考虑城市洪水的特性,提高模拟结果的合理性;一、二维非恒定流模型耦合演算不同尺度的洪水运动,提高了模型对洪水流量的计算精度。验证表明该模型对研究区的概化是合理的,模拟结果基本满足福州市对防汛应急管理的要求。今后随着暴雨、洪水监测预报系统的完善,模型精度可以进一步提高。模型结合城市当前的防洪工程体系,可计算区域在不同重现期暴雨条件下的洪水风险特征值。其计算结果包含的洪水峰现时间、淹没范围、淹没水深、淹没历时等信息为开展城市洪涝风险评估、制定防汛应急预案、调度防洪工程体系、发布防洪预警等提供了重要依据。

参考文献:

[1] Munich Reinsurance Company. Megacities-megarisks : trends and challenges for insurances and risk managemen[EB/OL]. [2011-03-08]. http://www.munichre.com/publications/302-04271_en.pdf.

[2] 杨士弘. 城市生态环境学[M]. 北京: 科学出版社, 1996 : 56-61.

[3] 辛长爽, 金锐. 我国城市防洪体系存在的问题及解决途径的探讨[J]. 水利学报, 2007, 38(S1) : 423-427.

[4] 石教智, 陈晓宏. 流域水文模型研究进展[J]. 水文, 2006, 26(1) : 18-23.

[5] 董艳萍, 袁晶瑄. 流域水文模型的回顾与展望[J]. 水力发电, 2008, 34(3) : 20-23.

[6] 胡伟贤, 何文华, 黄国如, 等. 城市雨洪模拟技术研究进

展[J]. 水科学进展, 2010, 21(1) : 137-144.

[7] MARK O, WEESAKUL S, APIRUMANEKUL C, et al. Potential and limitations of 1D modeling of urban flooding[J]. Journal of Hydrology, 2004, 299(3/4) : 284-299.

[8] SCHMITT T G, THOMAS M, ETTRICH N. Analysis and modeling of flooding in urban drainage systems[J]. Journal of Hydrology, 2004, 299(3/4) : 300-311.

[9] TODA K, KAWAIKE K, YONEYAMA N, et al. Underground inundation analysis by integrated urban flood model[C]// Proceedings of 16th IAHR-APD Congress and 3rd Symposium of IAHR-ISHS. Beijing : Tsinghua University Press, 2008 : 107-112.

[10] 程晓陶, 仇劲卫, 陈喜军. 深圳市洪涝灾害的数值模拟与分析[J]. 自然灾害学报, 1995, 7(4) : 202-209.

[11] 程晓陶, 仇劲卫, 李娜, 等. 城市洪涝仿真模型开发研究总结报告[R]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 1997.

[12] 仇劲卫, 李娜, 程晓陶, 等. 天津市城区暴雨沥涝仿真模拟系统[J]. 水利学报, 2000, 31(11) : 34-42.

[13] 王静, 李娜, 程晓陶. 城市洪涝仿真模型的改进与应用[J]. 水利学报, 2010, 41(12) : 1393-1400.

[14] 张新华, 隆文非, 谢和平, 等. 任意多边形网格 2D FVM 模型及其在城市洪水淹没中的应用[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2007, 39(4) : 6-11.

[15] HAILE A T, RIJNTJES T H M. Effects of LIDAR DEM resolution in flood modeling : a model sensitivity study for the city of Tegucigalpa, Honduras[J]. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2005, 36(3) : 168-173.

[16] 徐照明, 何勇, 吴良冰. 深圳河防洪能力的研究[J]. 人民长江, 2011, 42(1) : 9-12.

[17] 蔡金傍, 张毅敏, 李维新, 等. 常州平原河网水动力学模型构建[J]. 生态与农村环境学报, 2010, 26(S1) : 41-44.

[18] 万洪涛, 程晓陶, 胡昌伟. 基于 WebGIS 的流域级洪水管理系统集成与应用[J]. 地球信息科学学报, 2009, 11(3) : 363-369.

[19] 张江山. 福州内河环境治理与生态城市建设[J]. 福建师范大学学报: 自然科学版, 2005, 21(3) : 99-103.

(收稿日期: 2011-03-17 编辑: 高建群)

