

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2020.03.014

# 基于水动力数值计算的城市设计洪水模拟研究

王盼, 何洋, 杜志水

(中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司, 陕西 西安 710065)

**摘要:** 基于水动力数值模拟方法, 采用 MIKE11 构建一维水动力模型, MIKE URBAN 构建管道水流模型, MIKE FLOOD 耦合一维水动力模型与管网水动力模型, 建立适用于城市设计洪水模拟的耦合模型。选取深圳市宝安区沙井河片区为研究区域, 推求典型断面设计洪水; 将计算的各断面设计洪水与传统水文分析方法计算结果进行对比。从对比分析结果来看, 应用水动力耦合数值计算方法计算的设计洪水结果较传统方法计算结果有所差别, 符合区域城市化后洪水变化的一般规律。

**关键词:** 水动力数值计算; MIKE; 耦合模型; 城市设计洪水

**中图分类号:** TV856

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1006-4710(2020)03-0362-05

## Research on urban design flood simulation based on hydrodynamic numerical calculation

WANG Pan, HE Yang, DU Zhishui

(Power China Northwest Engineering Corporation Limited, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** One-dimensional hydrodynamic model and pipeline flow model are established by MIKE11 and MIKE URBAN respectively, which is based on the hydrodynamic numerical simulation method; they are coupled by MIKE FLOOD also, with the coupling model suitable for urban design flood simulation established. The design flood calculated by selecting typical sections from research area in Shajinghe area, Bao'an District, Shenzhen, and the calculated design flood of each section is compared with the calculation results by traditional hydrological analysis methods. The comparative analysis shows that the design flood results calculated by the hydrodynamic coupling numerical calculation method are different from those by the traditional method, but they conform to the general law of flood change after regional urbanization.

**Key words:** hydrodynamic numerical calculation; MIKE; coupled model; urban design flood

近年来,随着城市化进程的不断加快,城市的规模、容量逐渐扩大,城市下垫面条件发生了较大改变,区域不透水面积所占比重增大<sup>[1-3]</sup>,改变了城市水循环过程,导致极端降水事件增多,径流系数和径流量增加,洪水特性发生改变,城市暴雨洪涝风险增大,面源污染情况加剧等。暴雨洪灾对我国社会经济造成了严重影响,危及居民生命安全。因此,开展城市设计洪水研究,制定相应治理措施,对减少居民财产损失、保护居民生命安全和科学高效地抵御洪水灾害具有重大意义。同时,流域和城市作为整体水文循环单位,其水环境治理及水资源调控当前也面临巨大挑战,城市设计洪水的研究对其进行水环境治理和水生态保护也具有重要意义<sup>[4-6]</sup>。

目前,深圳市大多数工程设计中,设计洪水计算

方法采用地方水文手册中推荐的综合单位线法或推理公式法,但该方法不能很好地反映城市化后的洪水特性。随着海绵城市建设理念的推广,城市蓄滞、入渗、产流、汇流等水文过程对洪水特性的影响将越来越大,其模拟分析计算方法也越来越复杂,因此对城市水文学研究需求愈发迫切。

城市暴雨内涝模型<sup>[7-10]</sup>的核心是城市水文、水动力学机制及其耦合模拟,精细模拟城市区域暴雨产、汇流过程是解析城市内涝问题机制的科学基础。

本研究选取深圳市宝安区沙井河片区为研究对象,采用 MIKE 软件构建 MIKE11 河道模型、MIKE URBAN 管网模型、MIKE11 与 MIKE URBAN 耦合模型,将所构建的耦合模型应用于城市设计洪水模拟,对该区域的暴雨洪水内涝问题及防洪、排涝进行研究。

收稿日期: 2020-09-04; 网络出版日期: 2020-09-28

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1294.N.20200928.0957.002.html>

第一作者: 王盼,女,硕士,工程师,研究方向为水文水资源、水动力计算。E-mail: hhu\_wp@163.com

## 1 研究区域概况

### 1.1 区位概况

宝安区位于深圳市西部海岸线,处在珠江口东岸发展轴上,是穗莞深港黄金走廊的重要节点,也是粤港澳大湾区的核心地带,下辖新安、沙井、松岗等10个街道,土地面积397 km<sup>2</sup>,海岸线45 km,海域220 km<sup>2</sup>。本次研究区域位于沙井街道,地处深圳市西部中心,毗邻中国特色社会主义先行示范区重点建设片区国际会展城、新桥智创城两大区域。

宝安区所在流域属亚热带海洋性季风气候区,气候温和湿润,雨量充沛,多年平均降雨量约1 600 mm,降雨年内分配极不均匀,汛期(4~9月份)降雨量大而集中,约占全年降雨总量的85%左右,且降雨强度大,多以暴雨形式出现,易形成洪涝灾害,夏季常受台风侵袭,灾害性天气频发。

宝安区作为粤港澳大湾区的核心区,城市地位和重要性不断提高,在水安全建设方面,防洪排涝安全首当其冲,它是保障区域社会经济安全和人民生命财产安全的基石。

### 1.2 流域概况

研究区域位于茅洲河流域,沙井片区河流有排涝河、沙井河、衙边涌、共和涌、道生围涌,均为茅洲河一级支流,排涝河和沙井河通过岗头调节池相连,呈环状水系,沙井河及排涝河总流域面积为67.47 km<sup>2</sup>;潭头河和潭头渠之间建有潭头水闸(节制闸),潭头河洪水下泄至排涝河,潭头渠洪水下泄至沙井河;桥头片区潭头河、新桥河、上寮河(含支流万丰河)在岗头调节池汇合后,由岗头调节池下泄至排涝河,排涝河沿程汇入石岩渠后自流排入茅洲河;沙井河沿程有潭头渠、东方七支渠、松岗河汇入,通过沙井河口泵站(设计流量170 m<sup>3</sup>/s)抽排至茅洲河,如图1所示。



图1 流域水系图

Fig. 1 River network map of the watershed

## 2 城市水文学模型模拟

### 2.1 模型构建

在城市防洪排涝模拟中,同时存在排水管网、城市河流水系、城市地面等要素,水流可以在降雨(洪水)过程中不断流入或溢出排水系统,要精确而有效地模拟这种复杂水流情况,常采用耦合模型来计算。本研究采用的河道断面为近两年河道综合整治中的设计断面;同时,整理了近几年雨污分流等工程管网资料用于模型构建,由于管网涉及干支管,数据庞杂,主要整理管线数据及检查井数据。

沙井片区设计洪水由上游水库下泄洪水和区间洪水组成,其中上游水库下泄洪水采用天然设计洪水经水库调洪后的下泄流量,区间洪水采用MOUSE管流模型计算结果。本次采用MIKE11构建河网一维水动力模型,MIKE URBAN构建区域管道水动力模型,MIKE FLOOD对其进行耦合,模拟各断面的设计洪水与洪水位;模型验证中,MIKE URBAN与MIKE21耦合,管网节点直接与地形网格连接,作为管道溢流,水在地表和管网中发生交互作用,得到涝水在地面的演进情况,耦合模型概化示意图如图2所示。

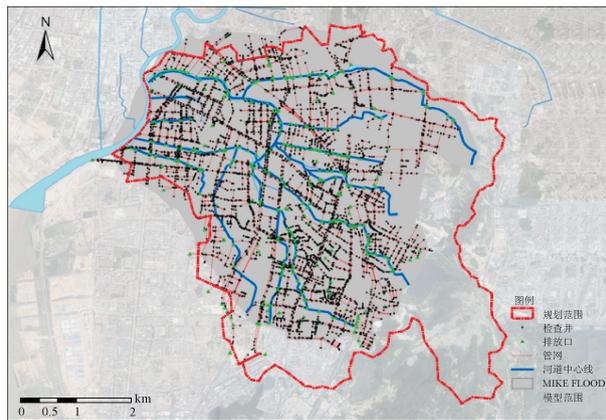


图2 耦合模型概化示意图

Fig. 2 Generalized schematic diagram of the coupled model

### 2.2 模型率定和验证

2018年台风“山竹”期间,流域降雨约5年一遇,赤湾站潮位约100年一遇。本研究采用“山竹”降雨、潮位边界条件,模拟5年一遇1 h降雨情况下该区域的内涝淹没最大深度与范围,结合“山竹”期间现场实际调查的涝点情况,与模型模拟的涝点进行对比,结果如图3所示。

实测与模拟的淹没水深对比,如表1所示。从表1可知,内涝位置和淹没水深基本吻合,误差水深在25%以内,说明模型可用于设计方案计算。

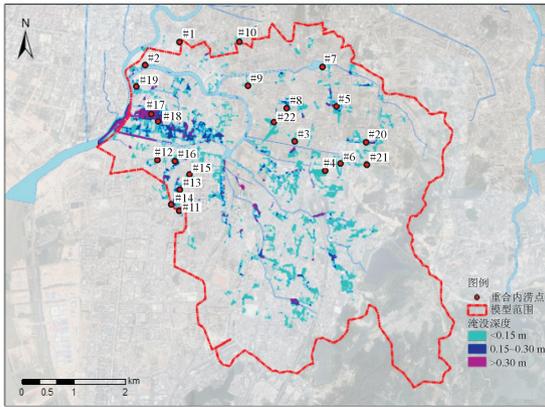


图3 模型计算内涝点与实测内涝点对比图

Fig. 3 Comparison diagram of the waterlogging point calculated by model and measured

表1 实测、计算淹没水深对比表

Tab. 1 Comparison table of measured and calculated submerged depth

点号	涝点位置	实测淹没水深/cm	计算淹没水深/cm	误差水深/cm
#16	友谊路西片区	42	52	10
#17	共和社区福和路西八巷	45	39	-6
#18	福和路共和市场段	40	45	5
#19	基达利工业园	25	29	4

2.3 计算方法及边界条件

2.3.1 计算方法

1) 对于天然下垫面,采用《广东省暴雨参数等值线图》(2003年)中综合单位线法计算上游设计洪水;城市下垫面洪水采用 MOUSE 管流模型计算,并采用 MIKE11 进行洪水演进模拟,最后采用 MIKE FLOOD 对其进行耦合,计算河口设计洪水。耦合区域下垫面解析如图4所示。

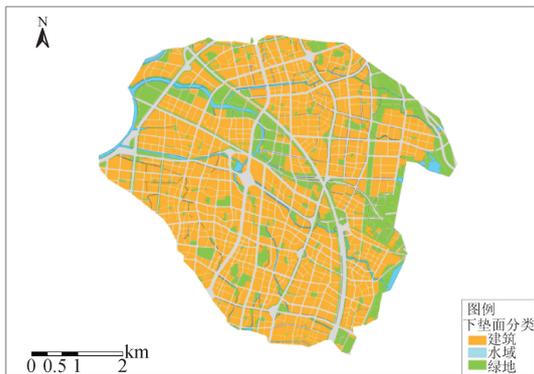


图4 耦合区域下垫面解析示意图

Fig. 4 Analytical diagram of the underlying surface of the coupling region

2) 全流域采用综合单位线法计算河口设计洪水。计算方法概化图如图5所示。

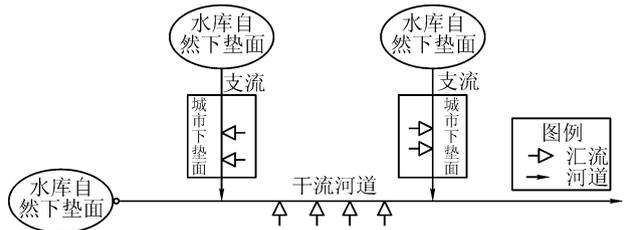


图5 计算方法概化图

Fig. 5 Generalization diagram of calculation method

2.3.2 上边界条件

1) 流量边界条件

MIKE URBAN 边界条件为 20 年一遇、50 年一遇降雨过程;MIKE11 上边界为五指耙水库、长流陂水库下泄洪水过程。

2) 降雨边界条件

本研究选取设计暴雨时,将石岩水库雨量站实测雨量系列经 P-III 型频率曲线适线,并与《广东省暴雨参数等值线图》(2003 年)查算结果进行对比,从偏安全角度出发,采用《广东省暴雨参数等值线图》查图结果。

2014 年,华北水利水电大学开展《深圳市城市设计暴雨雨型分析研究》专题,根据深圳市连续 52 年(1962—2013 年)实测降雨资料,采用“众值定位”原则,确定雨峰位置;分析多场实测降雨雨型,统计各时段平均降雨量,综合确定各时段降雨占 24 h 降雨量的比例(最小时间间隔 5 min)。最终确定了深圳市“珠江三角洲、东江下游、粤东沿岸”三类地区的雨型及 24 h 历时的设计暴雨雨型,为水利防洪、市政治涝提供了统一的降雨雨型,其结果如图6所示。本研究区域位于珠江口,故采用珠江三角洲雨型。

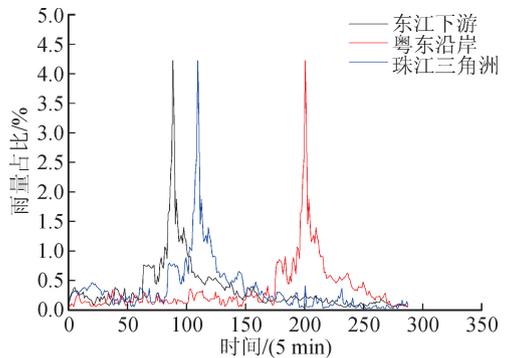


图6 深圳 2015 雨型分配示意图

Fig. 6 Rain distribution diagram of 2015 of Shenzhen

采用上述设计暴雨结果和雨型分配过程,点面折算系数按照 0.896 考虑,计算用于 MIKE URBAN 水文模型的降雨过程边界,得到设计暴雨过程线,如图7所示。

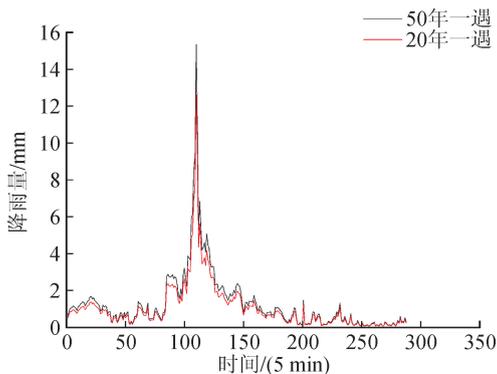


图7 设计暴雨过程线图

Fig. 7 Designed rainstorm hydrograph

### 2.3.3 下边界条件

#### 1) 设计潮位

茅洲河流域内无实测潮位观测资料,但流域南、北海岸线附近分别设有赤湾站、舢舨洲潮位站,可作为本次研究设计潮位的依据站。本次研究中,设计潮位复核采用《茅洲河界河整治工程(深圳部分)初步设计报告》中的设计高潮位结果,如表2所示。

表2 茅洲河河口设计高潮位结果表

Tab. 2 Results of design high tide level of Maozhou River Estuary

结果	设计高潮位(黄海海面)/m				
	均值	$P = 0.5\%$	$P = 1\%$	$P = 2\%$	$P = 10\%$
本次计算结果	2.44	3.45	3.31	3.16	2.81
界河初设结果(采用)	2.44	3.45	3.31	3.17	2.81

注: $P$ 表示频率。

#### 2) 雨潮遭遇组合

根据《深圳市防洪潮(排涝)规划(2021—2035)》中赤湾站实测风暴潮资料,按照与设计高潮位接近的原则,在赤湾站2008年6月23日08:00至25日20:00“黑格比”、2017年8月22日00:00至25日00:55“天鸽”、2018年9月5日00:00至19日00:00“山竹”三场台风潮位过程中,选取最不利的潮位过

程作为典型潮位过程线用于缩放。

综合来看,“山竹”潮型对挡潮期间的排涝最为不利,因此选取“山竹”潮位过程作为设计潮型的典型潮位过程,按照变比例放大(主潮峰按同倍比放大,低潮位不变)原则,得到挡潮工况下设计潮位过程,如图8所示。

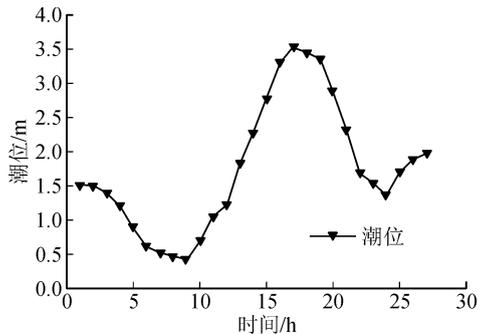


图8 设计潮位过程线图

Fig. 8 Designed tide curve hydrograph

## 3 设计洪水结果分析

考虑到区域城市化后洪水过程较天然洪水峰高量大、峰现提前特点,本研究中设计洪水的计算考虑水库和城市两类下垫面,水库设计洪水采用调洪计算结果,城市下垫面洪水通过管网模型计算,河道汇流采用一维水流数学模型进行模拟,最终得到河道各断面设计洪水。

MIKE URBAN中使用的水文模型有地表径流模块,包括时间面积模型、动力波动模型-非线性水库、线性水库模型、单位水文过程线模型,在对比分析的基础上,本研究选用单位水文过程线模型。

此外,采用广东省水电厅1991年颁发的《广东省暴雨径流查算图表》(简称《查算图表》)所介绍的综合单位线法、推理公式法进行洪水的分析计算。根据《查算图表》的要求,两种方法计算结果误差在20%以内,最终采用综合单位线结果。

根据上述两种方法计算研究区域设计洪水,沙井河口和排涝河口设计洪峰结果如表3所示。

表3 设计洪水结果表

Tab. 3 Design flood results table

河流名称	断面位置	流域面积/ km <sup>2</sup>	城市洪水耦合模型				综合单位线法			
			洪峰流量/ (m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )		洪峰模数/ (m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ·km <sup>-2</sup> )		洪峰流量/ (m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )		洪峰模数/ (m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ·km <sup>-2</sup> )	
			$P=2\%$	$P=5\%$	$P=2\%$	$P=5\%$	$P=2\%$	$P=5\%$	$P=2\%$	$P=5\%$
沙井河	河口	24.93	247	214	9.91	8.58	233	202	9.33	8.09
排涝河	河口	42.54	357	260	8.39	6.12	312	255	7.33	6.00

从表3可看出,洪峰模数随着流域面积增大而减小,且同一断面的洪峰流量模数随着频率( $P$ )的增加而降低,符合一般洪水的变化特性。但由于雨水管道过流能力不足及雨水并未完全排放至河道等原因,造成目前城市洪水耦合模型的设计洪水计算结果偏小。

## 4 结 语

以深圳市沙井河片区为研究区域,利用 MIKE FLOOD 平台构建暴雨洪水一维水动力与管道水流耦合模型,用于计算该地区城市设计洪水。考虑到流域城市化后,其洪水过程较天然洪水的洪量加大、洪峰增高并提前,本次城市水文模拟研究中设计洪水计算分别考虑水库和城市两类下垫面,水库设计洪水采用调洪计算结果,城市下垫面洪水采用管网模型进行计算,河道汇流采用一维水流数学模型进行模拟,最终得到河道各断面设计结果。从计算结果来看,两种方法相差不大,城市洪水耦合模型计算的设计洪水较综合单位线法结果偏大,符合区域城市化后洪水变化的一般规律。下一步,将结合实测洪水资料进一步完善模型率定和验证工作,保证设计洪水结果的可靠性及合理性。

### 参考文献:

- [1] 程卫帅,陈进,刘丹. 洪灾风险评估方法研究综述[J]. 长江科学院院报,2010,27(9):17-24.  
CHENG Weishuai, CHEN Jin, LIU Dan. Review on flood risk assessment[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2010, 27(9): 17-24.
- [2] TRAN P, MARINCIONI F, SHAW R, et al. Flood risk management in central Viet Nam: challenges and potentials[J]. Natural Hazards, 2008, 46(1):119-138.
- [3] 刘家福,张柏. 暴雨洪灾风险评估研究进展[J]. 地理科学,2015,35(3):346-351.  
LIU Jiafu, ZHANG Bai. Progress of rainstorm flood risk assessment[J]. Scientia Geographica Sinica, 2015, 35(3):346-351.
- [4] SETO K C, FRAGKIAS M, GÜNERALP B, et al. A meta-analysis of global urban land expansion[J]. PloS one, 2011, 6(8): e23777.
- [5] 张蓓,李家科,李亚娇. 不同开发模式下城市雨洪及污染模拟研究进展[J]. 环境科学与技术, 2017, 40(8): 87-95.  
ZHANG Bei, LI Jiake, LI Yajiao. Study on urban storm water and non-point source simulation under different development patterns[J]. Environmental Science & Technology, 2017, 40(8): 87-95.
- [6] 朱瑶,梁志伟,李伟,等. 流域水环境污染模型及其应用研究综述[J]. 应用生态学报, 2013, 24(10): 3012-3018.  
ZHU Yao, LIANG Zhiwei, LI Wei, et al. Watershed water environment pollution models and their applications: a review[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(10): 3012-3018.
- [7] 许唯临,杨永全,邓军. 水力学数学模型[M]. 北京:科学出版社,2010.
- [8] 耿艳芬. 城市雨洪的水动力耦合模型研究[D]. 大连:大连理工大学,2006.  
GENG Yanfen. A coupled hydraulic numerical models on the urban rain flood[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006.
- [9] 喻海军. 城市洪涝数值模拟技术研究[D]. 广州:华南理工大学,2015.  
YU Haijun. Research on numerical simulation technology of urban floods[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2015.
- [10] 柳园园,王船海,吴朱昊,等. 城市排水管网明满交替非恒定流数学模型的研究[J]. 水动力学研究与进展 A 辑, 2016,31(2): 210-219.  
LIU Yuanyuan, WANG Chuanhai, WU Zhuhao, et al. Study on free-surface-pressurized flow mathematical model for urban drainage networks[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2016, 31(2): 210-219.

(责任编辑 周 蓓)