

城市雨洪综合模拟方法及应用

钱真,谭琼,贾卫红

(上海市水务规划设计研究院,上海 200233)

摘要:为综合模拟城市雨洪和分析其对区域内涝的影响,在 OpenMI 异构模型集成平台上动态耦合河网水文水动力模型和城市排水管网水力模型,以上海 14 个水利分片之一的淀北片为例,建立了淀北片雨洪耦合模型,并应用此模型分析了不同雨潮组合对淀北片区域内涝的影响。淀北片雨洪综合模拟计算结果表明,雨洪综合模拟较真实地反映了感潮河网城市地区的内涝情况,可为城市防洪除涝工作提供参考。

关键词:区域除涝;感潮河网;水动力模型;排水管网;OpenMI

中图分类号:P333.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2015)06-0057-05

Method for integrated simulation of urban storm water flow and its application//QIAN Zhen, TAN Qiong, JIA Weihong(*Shanghai Water Planning and Design Research Institute, Shanghai 200233, China*)

Abstract: In order to simulate urban storm water flow and analyze its influence on zonal waterlogging, a hydrological and hydrodynamic model for river networks and a hydraulic model for urban drainage networks were dynamically coupled using the OpenMI technology. Using the Dianbei zone, one of 14 water conservation zones in Shanghai, as an example, a coupled urban storm water model was established. Then, the effect of the combination of different types of rainstorms and tides on zonal waterlogging in the Dianbei zone was analyzed using the model. The results indicate that the model can precisely simulate urban zonal waterlogging in tidal river networks and provide reference for urban flood control.

Key words: zonal waterlogging control; tidal river network; hydrodynamic model; drainage network; OpenMI

当发生暴雨、台风、洪水等灾害时,平原感潮河网地区往往会“因洪致涝”,使得城市区域除涝形势严峻。随着城市的发展,城市排水量和排水强度明显增大,形成了城市小区和城市区域二级排水格局。区域除涝与城镇排水的有机结合才能真正解决城市内涝问题,对两者进行统一模拟分析也是城市雨洪综合管理的一项重要内容^[1-4]。

目前,在城市排水管网系统模拟计算中国外有不少成熟的商业软件,并在排水实时模拟中得到应用^[5-7],如 MIKE URBAN、SewerGEMS 以及 InfoWorks CS 等,这些商业软件中也集成了相应模块模拟河网水流,但由于国内外防洪体系及各地区水情差异等原因,国外商业软件并不能完全适应我国水情分析的实际需求。就河网水文水动力学模型而言,国内在模型研究方面有成熟先进的技术,也在区域除涝分析评估和规划设计中得到应用^[8-11]。利用 OpenMI (open modeling interface) 标准接口技术,能够在较短时间内有效集成现有的城市排水管网水力模型软

件和河网水文水动力模型软件,取长补短,发挥各自优势,综合模拟城市雨洪。

本文采用水文水动力学方法建立城市感潮河网水流模型,运用 InfoWorks CS V12.0 建立城市小区排水管网系统模型,利用 OpenMI 技术对两者进行动态耦合从而实现城市雨洪综合模拟,并应用该方法建立淀北片雨洪模型,分析不同雨潮组合对淀北片区域内涝的影响,为城市区域除涝规划和相关标准制定提供技术支撑和科学依据。

1 城市雨洪综合模拟

根据城市二级排水的格局,城市雨洪综合模拟包括对城市河网水流和小区排水的计算,以及两者之间的动态数据交换。

1.1 城市河网水流计算

在感潮河网地区,城市河网水流计算采用感潮河网水文水动力模型。根据不同的产流规律,降雨径流模拟将区域下垫面分成水面(包括河道、湖泊

等水面)、水田、旱地或绿地及城镇道路等有覆盖的下垫面,按照水文学的原理和方法分块计算区域的产汇流^[8-9]。河网水动力模拟基本方程为 Saint-Venant 方程组(式(1)),数值离散采用成熟的四点线性隐格式,使用矩阵标识法求解河网节点水位方程组^[11]。

$$\begin{cases} B \frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \\ \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\alpha \frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial Z}{\partial x} = -gAS_f \end{cases} \quad (1)$$

式中: B 为断面河宽; Z 为断面水位; Q 为断面流量; q 为单位河长上的区间入流; α 为动量校正系数; A 为过水断面面积; g 为重力加速度; S_f 为摩阻比降。

1.2 小区排水计算

本文以 InfoWorks CS 构建城市排水管网水力学模型,通过划分子集水区,针对不同产流特性的表面采用固定比例径流模型、Green-Ampt 渗透模型及 Horton 渗透模型的组合模拟产流,对各表面的汇流模拟采用双线性水库 (Wallingford) 模型和 SWMM 径流模型的组合。通过完全求解 Saint-Venant 方程组计算小区管网内的水流运动,对于超负荷的模拟采用 Preissmann Slot 方法。基于 TVD 格式应用二维有限体积法求解浅水方程组来演算小区地面积水过程,并在网格单元尺度上模拟水量的垂向交换:降雨和下渗^[17]。

1.3 耦合方法

城市河网水流计算和小区排水计算采用不同结构的模型,无法直接通信。为了准确地模拟计算城市雨水排水与河网蓄排水的相互关系,建立完整的城市雨洪模型,本文利用 OpenMI 系统平台,集成现有的、相对独立的雨水排水管网水力模型和河网水力模型,实现不同模型间的动态交互并行计算,提高模拟计算精度。OpenMI 是水环境模型开发研究领域的开放的公共接口标准,通过其提供的模型包装功能,可将原模型包装为兼容模型,在统一的平台上动态耦合集成多个异构模型,发挥各个模型的优势^[12-16],并被不少国外商业软件所兼容,如 InfoWorks CS、MIKE。

使用 OpenMI 开放式模型接口为感潮河网水文水动力模型和以 InfoWorks CS 建立的城市排水管网水力学模型实现每个时间步长内的数据交换提供公共平台。异构模型的数据交换为双向,即在每个计算时间步长内,城市排水管网水力学模型的排放口出流量值输出给感潮河网水文水动力模型作为断面的入流量,感潮河网水文水动力模型运行后将断面的水位值反馈给城市排水管网水力学模型作为排放口的水位边界。在 OpenMI 平台中,分别导入

InfoWorks CS 构建的城市排水管网水力学模型 (new model to omi) 和感潮河网水文水动力模型 (dbp) 的接口文件,并为上述双向连接定义对应关系(图 1)。

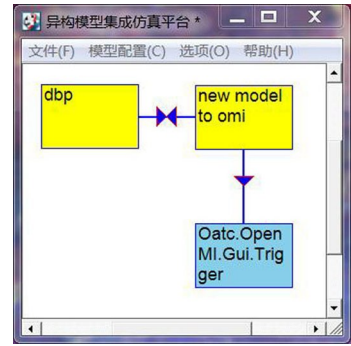


图 1 OpenMI 模型耦合配置界面

2 淀北片雨洪模型

2.1 模型构建

淀北片为上海市 14 个水利分片之一,位于苏州河以南、淀浦河以北、小涑港以东、黄浦江以西,总面积 179.28 km²,呈西北向东南的斜长形(图 2)。片内河道总长 261.35 km,河道密度达到 1.46 km/km²,河湖面积达到 5.37 km²,河网率达到 2.99%,常水位河网槽蓄量约 1084.68 万 m³。本河网模型共概化河道(段)146 条,计算节点 228 个,可控水工建筑物 36 个。

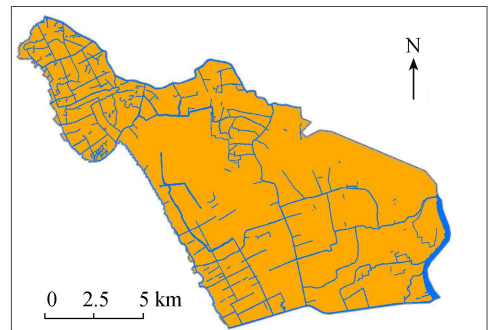


图 2 淀北片示意图

淀北片雨水排水系统主要包括该片闵行区域、长宁区域、徐汇区域的排水系统,根据 3 区的雨水排水规划,片内规划强排系统 51 个,自流排水系统 11 个,规划泵排流量约 671.77 m³/s。以罗秀、梅陇、长桥为典型排水系统建立 InfoWorks CS 排水模型,概化节点个 2708 个,管段 2700 条,地面网格 11548 个,集水区 310 个,每个集水区进行独立产汇流计算。

2.2 模型率定及验证

采用 2012 年 8 月 1—13 日“海葵”台风暴雨期间和 2013 年 10 月 1—15 日“菲特”台风暴雨期间的降雨、水文同步监测资料进行模型参数的率定与验证。根据上海市降雨径流计算相关研究^[5-6],确定城

市排水管网水力学模型及河网水文水动力模型的参数。经率定,各排水系统降雨模拟的体积和径流洪峰的平均相对误差分别为4.1%和7.9%,达到城市排水系统水力模拟应用规范的相应要求。以虹桥新桥站作为河网水流模型的模拟实测对照站,模拟的2场次洪水的洪峰水位相对误差均小于5%,确定性系数均在0.95以上,与实测结果吻合较好。

3 雨潮组合对淀北片内涝的影响

3.1 计算方案

目前上海市在区域除涝计算中采用典型年法,现行的区域除涝标准中,以1963年9月发生的“639”暴雨(1963年9月12日8:00至13日8:00)作为典型暴雨,区域除涝标准为20年一遇最大24h面雨量,该标准下淀北片的24h总雨量为192.9mm。

2005年8月出现的“麦莎”雨型对上海的影响较大,其中最大24h(2005年8月6日8:00至7日8:00)面雨量181.5mm,其雨型特点为雨峰靠后且连续3h雨强未明显衰减,这种持续强暴雨容易造成区域内涝,因此“麦莎”雨型也常作为验算雨型。

综合考虑以上2种雨型特点,拟定以“639”雨型和“麦莎”雨型为基础概化的雨型作为设计暴雨,淀北片的20年一遇最大24h设计面雨量提高到203.0mm。

为研究不同暴雨、潮型以及雨潮组合对区域除涝和城镇排水的影响,以“639”暴雨与对应的同步潮水位过程组合作为基准计算方案(方案0),在方案0的基础上逐一改变雨型(方案1)、潮型(方案2),计算分析新概化雨型对区域除涝的影响,并计算模拟“麦莎”期间淀北片河网内水流运动情况(方案3)。雨洪综合模拟的具体方案见表1。

表1 雨洪综合模拟计算方案

计算方案	雨型	最大24h面雨量/mm	潮型
方案0	“639”雨型	192.9	“639”同步潮型
方案1	新概化雨型	203.0	“639”同步潮型
方案2	新概化雨型	203.0	“麦莎”同步潮型
方案3	“麦莎”雨型	181.5	“麦莎”同步潮型

片内河道常水位2.5m,预降水位为2.0m,初始流速为0.0m/s。在除涝时段,除涝泵、闸调度遵循水闸能排则排、尽量自排的原则,水闸不能开则启用除涝泵站抽排。

3.2 结果分析

3.2.1 节点最高水位分布

在方案0的情况下,淀北片河网节点最高水位分布见图3,可以看出其分布总体趋势为西北高、东南低,这与沿黄浦江、淀浦河(淀东闸外段)的排水条件较好

有关;其中81.3%的节点最高水位达4.00~4.20m,8.3%的节点最高水位在4.20m以上,集中在苏州河沿线及其闸外节点;本次城市雨洪耦合模拟的河网节点最高水位的平均值为4.09m,比以往仅用河网水文水动力模型在相同情况下模拟的节点最高水位平均值4.29m低0.20m。两者的差异主要源于:以往仅用河网水文水动力模型模拟时认为片内涝水全归槽,即地块上产流后瞬时汇流入河道;而本次城市雨洪综合模拟中,地块上产流后经雨水井收集汇入雨水排水管网,再由雨水泵站就近排入河网水体中,在此过程中雨水排水管网的调蓄作用对汇入河道的流量过程进行了“削峰”;同时由于排水管网系统实际排水能力有限,导致一定深度的地面积水,排水系统出现最大30~40cm的地面积水深度。

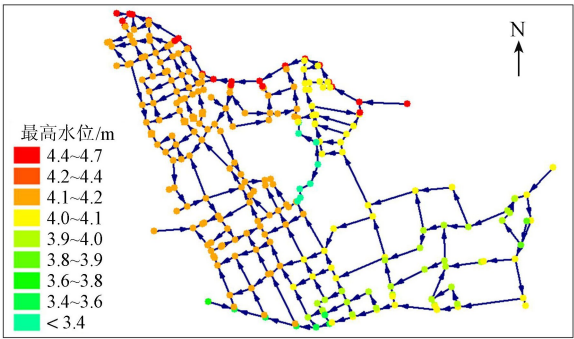


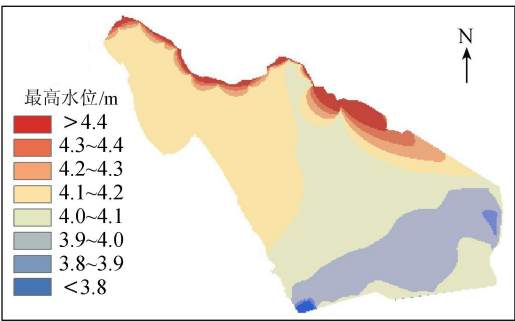
图3 方案0河网节点最高水位分布

3.2.2 最高水位分布

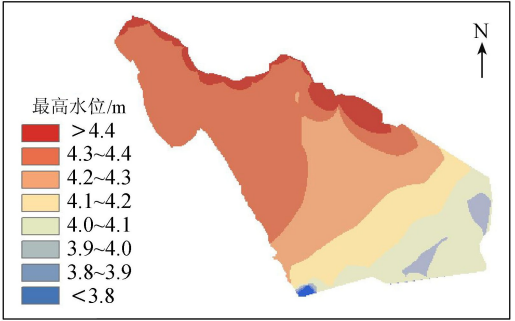
为了更加直观方便地对各计算方案结果进行比较,根据河网节点的最高水位计算值,利用ArcGIS绘制淀北片最高水位分布如图4所示。方案1计算的面平均最高水位为4.249m,面最高水位4.00m以上的区域面积占比为89.5%;方案2计算的面平均最高水位为4.198m,面最高水位4.00m以上的区域面积占比为89.9%。

新概化雨型总雨量大于“639”雨型,方案1、2计算得到的淀北片面最高水位都相应上升(图5),尤其在潮水位条件相同时,雨型变化对面最高水位分布的影响显著,方案1区域河道最高水位最大增幅达21.5cm,增幅超过20.0cm的区域面积占比达19.4%。

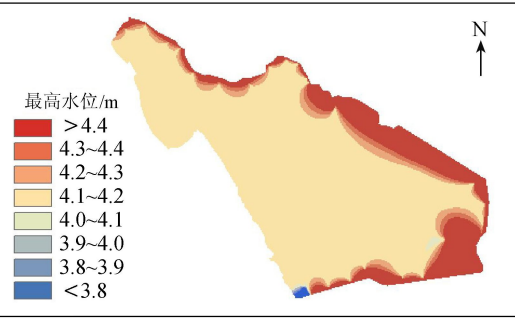
新概化雨型较“麦莎”雨型的雨峰出现时间提前,与“麦莎”期间同步潮水位组合时,雨峰恰遇潮谷,使得片内河网能够“趁潮排涝”,河道内最高水位降低;而在涨潮时段由泵、闸将片内外的河网水系相阻隔,与方案1相比,在相同的暴雨设计条件下,方案2计算的面最高水位上升主要集中在边界附近,其中最高水位4.60m以上的区域面积占比达11.1%。可见,区域排水条件受片外潮水位控制,从而影响了面最高水位分布。



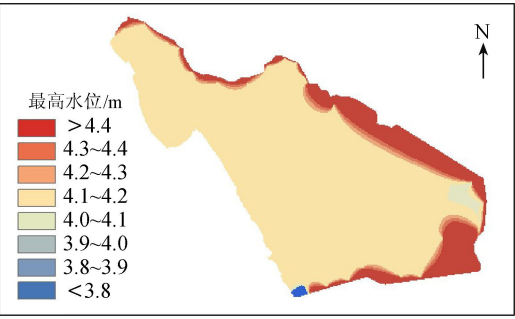
(a) 方案0



(b) 方案1

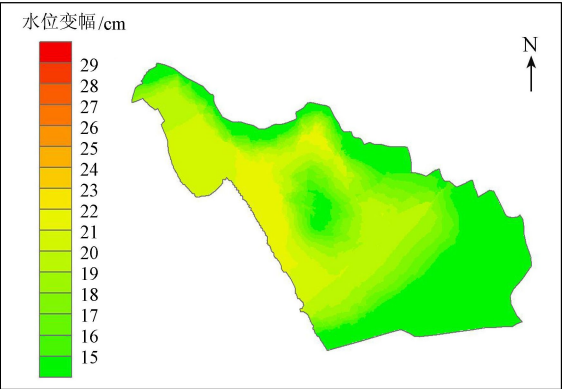


(c) 方案2

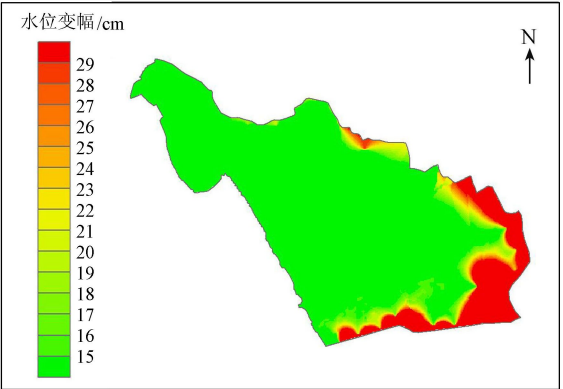


(d) 方案3

图4 最高水位分布



(a) 方案1



(b) 方案2

图5 最高水位变幅分布

方案3复演出“麦莎”台风暴雨期间淀北片的最高水位分布情况(图4(d)),可以清晰地看到,与方案2的模拟结果接近。

4 结 语

本文在OpenMI异构模型集成平台上,耦合感潮河网水文水动力模型和InfoWorks CS城市排水管网水力学模型,构建了淀北片雨洪模型,利用2012年和2013年的两次台风暴雨实测水文数据对模型进行了率定、验证,并应用该模型对不同雨潮组合条件下的最高水位分布进行了计算。结果表明:雨洪综合模拟较真实地反映了感潮河网城市区域的内涝情况,可以为城市区域除涝、市政雨水排水新标准和规划的制定提供参考。

参考文献:

[1] 解以扬,李大鸣,李培彦,等.城市暴雨内涝数学模型的研究与应用[J].水科学进展,2005,16(3):384-390. (XIE Yiyang, LI Daming, LI Peiyan, et al. Research and application of the mathematical model for urban rainstorm water logging[J]. Advance in Water Science, 2005, 16(3):384-390. (in Chinese))

[2] 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. (HU Weixian, HE Wenhua, HUANG Guoru, et al. Review of urban storm water simulation techniques[J]. Advance in Water Science, 2010, 21(1):137-144. (in Chinese))

[3] 徐向阳.平原城市雨洪过程模拟[J].水利学报,1998(8):34-37. (XU Xiangyang. Simulation of storm runoff process for plain urban [J]. Journal of Hydraulic

- Engineering,1998(8):34-37. (in Chinese))
- [4] YONEYAMA N, TODA K, AIHATA S, et al. Numerical analysis for evacuation possibility from small underground space in urban flood[C]//Advances in Water Resources and Hydraulic Engineering. Berlin: Springer, 2009: 107-112.
- [5] 谭琼,李田,周永潮,等. 城市雨水管网模型参数的率定与评价[J]. 湖南大学学报:自然科学版,2008,35(1): 31-35. (TAN Qiong, LI Tian, ZHOU Yongchao, et al. Calibration of urban stormwater drainage model [J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2008, 35(1):31-35. (in Chinese))
- [6] 谭琼,时珍宝,张建频,等. 排水实时模型在上海防汛中的应用示范[J]. 中国给水排水,2012,28(15):49-52. (TAN Qiong, SHI Zhenbao, ZHANG Jianpin, et al. Demonstration application of real-time drainage model in Shanghai flood control [J]. China Water & Wastewater, 2012,28(15):49-52. (in Chinese))
- [7] PLEAU M, COLAS H, LAVALLEE P, et al. Global optimal real-time control of the Quebec urban drainage system [J]. Environ Modeling & Software, 2005, 20(4): 401-413.
- [8] 李光炽,王船海. 内涝行流域洪灾洪水模拟[J]. 成都科技大学学报, 1995(1): 87-96. (LI Guangchi, WANG Chuanhai. Flood modeling for internal waterlogged basin [J]. Journal of Chengdu University of Science and Technology, 1995(1):87-96. (in Chinese))
- [9] 王船海,王娟,程文辉,等. 平原区产汇流模拟[J]. 河海大学学报:自然科学版,2007,35(6):627-632. (WANG Chuanhai, WANG Juan, CHENG Wenhui, et al. Numerical simulation of runoff yield and confluence in plain area [J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2007, 35(6):627-632. (in Chinese))
- [10] 钱真,贾卫红. 基于 GIS 的感潮地区城市区域除涝能力评估[J]. 水电能源科学,2014,32(3):85-87. (QIAN Zhen, JIA Weihong. Urban zonal water logging control evaluation in tidal region based on GIS [J]. Water Resources and Power, 2014, 32(3):85-87. (in Chinese))
- [11] 钱真,贾卫红,李世阳. 河网水流模拟的矩阵标识法研究[J]. 人民长江,2014,45(14):85-88. (QIAN Zhen, JIA Weihong, LI Shiyang. Research of matrix mark method for river network flow modeling [J]. Yangtze River, 2014, 45(14):85-88. (in Chinese))
- [12] GREGERSEN J B, GIJSBERS P J A, WESTEN S J P. OpenMI Open modeling interface[J]. Journal of Journal of Hydroinformatics, 2007, 9(3):175-191.
- [13] FORTUNE D, GIJSBERS P, GREGERSEN J, et al. OpenMI-real progress towards integrated modelling [J]. Water Science and Technology Library, 2008, 68: 449-464.
- [14] REUBNER F, ALEX J, BACH M, et al. Basin-wide integrated modelling via OpenMI considering multiple urban catchments [J]. Water Science & Technology, 2009, 60(5):1241-1248.
- [15] 雷四华,陈鸣,魏俊彪,等. 基于 OpenMI 技术的墒情预报模型[J]. 水利水运工程学报,2013(3):32-36. (LEI Sihua, CHEN Ming, WEI Junbiao, et al. Soil moisture forecast model based on OpenMI technology [J]. Hydro-science and Engineering, 2013(3):32-36. (in Chinese))
- [16] 王永. 基于 OpenMI 的城镇排水系统模拟技术研究[D]. 北京:北京工业大学,2009.
- [17] ALCRUDO F, MULET-MARIT J. Urban inundation models based upon the shallow water equations [C]// BENKHALDOUN F, OUZAR D, RAGHAY S. Proceedings of Fnite Volumes for Complex Applications IV: Problems and Perspectives. London: Hermes Science, 2005:1-2.
- (收稿日期:2014-08-08 编辑:熊水斌)

• 简讯 •

第四届“河口日”国际学术研讨会在南京召开

由河海大学主办,江苏省海洋湖沼学会以及江苏省海岸海洋资源开发与环境安全重点实验室协办的第四届“河口日”国际学术研讨会于2015年10月13—15日在河海大学召开。“河口日”学术研讨会(estuary day workshop)于2012年由美国、英国、荷兰以及西班牙等多国科学家联合发起,旨在搭建一个相对小范围的、开放的学术交流平台,在轻松、愉快的学术氛围中,共同探讨河口水动力、泥沙及物质输运特性和河口动力地貌特征等领域的最新科学研究进展。该学术研讨会已经成功在荷兰举办了3届。每一届选择一个明确的主题,与会学者通过口头报告和延展性讨论的形式进行学术交流讨论,围绕共同感兴趣的课题开展国际科研合作。本届“河口日”学术研讨会以“海岸、河口环境下的动力地貌平衡”为主题开展学术研讨。会议邀请了来自新西兰、英国、荷兰、美国、意大利,以及南京大学、华东师范大学、中山大学、南京水利科学研究院和河海大学共近30名学者参会交流。

(本刊编辑部供稿)