

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.24.004

排水防涝规划水力模型应用探讨及案例分析

陈盛达¹, 冯一军², 吴荣波², 魏思泽², 贾能²

(1. 杭州城市规划设计咨询有限公司, 浙江 杭州 310012; 2. 杭州市规划设计研究院, 浙江 杭州 310012)

摘要: 《城市排水(雨水)防涝综合规划编制大纲》中明确提出要利用水力模型来指导城市排水防涝规划。截至目前,大部分城市已编制完成了该规划,但是模型的使用仍存在较多的问题。为此,以多个城市的研究报告为分析样本,从基础资料收集、模型参数率定、建模尺度、河道水位衔接、规划方案模拟等方面,分析了目前模型应用过程中存在的具体问题,最后以杭州市高新区排水模型应用为例,探索了排水防涝规划中雨水管网和河网耦合模型的应用。

关键词: 排水防涝; 水力模型; 方案模拟

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)24-0017-06

Discussion on Hydraulic Model Application for Urban Drainage and Flood Control Planning and Case Analysis

CHEN Sheng-da¹, FENG Yi-jun², WU Rong-bo², WEI Si-ze², JIA Neng²

(1. Hangzhou Urban Planning and Design Consulting Co. Ltd., Hangzhou 310012, China; 2. Hangzhou City Planning and Design Academy, Hangzhou 310012, China)

Abstract: The Outline for Integrated Plan for Urban Drainage (Rainwater) and Flood Control proposed that the hydraulic model should be used to guide urban drainage planning, and most cities have completed the plan up to now. However, many problems still exist during the model application. Research reports of multiple cities were used as the analysis samples to analyze the most common problems in the current model application. Data collection, model parameter calibration, model scale, flood level connection and other details were discussed. Finally, the application of the drainage model in Hangzhou High-tech Zone was used as a case study to explore the model application of coupling rainwater network and river system.

Key words: urban drainage and flood control; hydraulic model; scheme simulation

自2013年6月住房和城乡建设部发布《城市排水(雨水)防涝综合规划编制大纲》(以下简称《大纲》)以来,截至目前,全国大部分城市已编制完成该规划。与传统排水规划相比,综合规划不仅涉及较多新的理念和方法,还涉及多个子系统及其衔接关系^[1]。另外,《大纲》首次提出需构建水力模型对现状排水能力和内涝风险进行评估^[2]。由于我国长期以来采用传统的方法对排水管网进行规划和设

计,专业人员对模型的应用缺乏科学性,如何根据不同条件选择适合的模型,并根据现有数据资料合理应用模型,使模拟结果更好地指导规划设计,对规划编制将是很大的挑战^[3]。

以多个不同城市的规划文本或研究论文为分析对象,着重分析综合规划编制中模型应用暴露的主要问题,以期今后各城市进一步完善排水防涝模型和规划修编提供参考。最后以杭州市高新区

排涝模型应用为例,探索了排水防涝规划中管网和河网耦合模型的应用。

1 水力模型应用概况

我国《室外排水设计标准》(GB 50014—2021)指出,当汇水面积超过2 km²时,宜考虑降雨在时空分布的不均匀性和管网汇流过程,采用数学模型法

计算雨水设计流量。而城市内涝模拟涉及管道内水流和地表涝水淹没深度、范围等重要结果的输出和表达,因此要求模型不仅具有二维模拟功能^[3],还要具有强大的数据集成能力。目前,绝大多数城市选择 MIKE 和 InfoWorks ICM 系列等较为成熟的商业软件作为模拟工具,如表1所示。

表1 排水防涝规划编制中常用模型软件概况

Tab.1 Overview of model software commonly used in the compilation of drainage and waterlogging prevention planning

项目	InfoWorks ICM	MIKE	SWMM
特点	能够将河道和排水管网耦合在同一个模型中,支持地表二维模型,具备友好的二维及三维视图、视频输出	分为不同的功能模块,需要分别建立 MIKE 11 河道一维模型、MIKE URBAN 排水管网一维模型、MIKE 21 地表二维漫流模型,最终耦合到 MIKE FLOOD 平台中	开源软件,支持耦合模型,但河道对象属性较少,不支持地表二维模型,可视化功能较差
优、缺点	优点:能在同一平台建立耦合模型,可视化功能强大,运算速度较快; 缺点:耦合模型较为复杂,修改调整涉及对象多,软件使用难度较高	优点:继承性好,可以与水利软件进行无缝对接,模块化方便多人同时建模; 缺点:MIKE URBAN 缺少流量振荡和临界流的计算能力,MIKE FLOOD 对不同工况适应性较差,需校核	优点:开源免费,公开源代码; 缺点:没有集成功能,不支持二维地表漫流,展示效果差

在综合规划编制中,水力模型主要应用于雨水管网排水能力校核和内涝风险评估,而对于后期内涝系统方案的决策则模型参与较少。水力模型应用流程如图1所示。

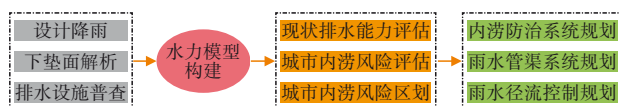


图1 水力模型应用流程

Fig.1 Application process of hydraulic model

2 存在问题探讨

2.1 基础资料问题

城市洪涝模拟的基础数据库主要包括降雨资料、城市下垫面资料以及内涝监测数据等。数据的系统性、准确性和完整性会对城市洪涝模拟以及进一步的城市规划、评估和建设产生深远影响。随着排水管网数字化管理的普及,目前各城市雨水管网的数字化率已逐步提高,为模型提供了良好的基础,但还存在如下问题:

① 目前模型数据多来源于普查原始数据,多数未进行校核和修正,导致管网存在错误的拓扑关系。

② 大部分城市未能建立实时更新维护的雨水管网GIS系统,而物探的工作通常为周期性,对于近期改建或新建的管网无法实时反映。

③ 地形数据很小的误差就有可能导致淹没

区域的不同,因此城市洪涝模型对地形数据的敏感性极高。地面模型数据大多来源于测绘地形图,难以避免存在数据缺失点、局部低洼等高程异常数据,对风险区域识别有一定干扰作用。目前,已有学者尝试用高精度的地面模型来模拟内涝风险^[4]。

④ 部分城市内涝评估范围很大^[5],参数率定和方案模拟均未考虑降雨空间分布的不均匀性,对于不同区块的子集水区也未采用不同的降雨过程线。

2.2 模型应用问题

2.2.1 模型参数率定问题

尽管最近几年大量的学者开始尝试更加科学的模型参数率定方法,但受限于监测校核数据和模型不确定性因素的处理难度,现有的内涝风险模型大部分难以达到准确的校核标准。

对于单独的雨水管网模型,由于管网在线监测数据的缺失,各地均未对单独的雨水管网模型进行验证,主要依靠经验进行调整或者通过耦合模型的积水区域对比来验证。河道防洪模型多采用最高洪水位的验证方法^[6],在防洪水利规划中通常有较为成熟的率定方法。而对于内涝的耦合模型,由于缺少易涝点积水面积、深度及时间等定量率定数据,对积水区域验证仍以定性为主,其模拟分析结果和评估结论的科学性和可靠性存疑。模型参数率定概况如图2所示。

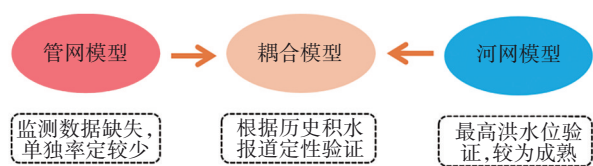


图2 参数率定概况

Fig.2 Overview of model calibration

2.2.2 尺度问题

模型的尺度以及精细化程度对模拟结果的影响,主要体现在径流的峰值特点和总量两个方面,而排涝综合规划编制范围通常较大。例如,杭州市的建模范围超过4 000 km²,雨水管网总长度超过5 000 km;重庆市核心区(294 km²)全部纳入建模范围^[5],共计16个排水分区,总计管段数量超过10万个,雨水管网长度2 308 km^[7]。城市内涝模拟关注和研究的焦点通常是小尺度上的水文规律,例如通常会关注城市区域小尺度的高密度立体化城区(下穿立交)、局部地势低洼点等,有城市开始将精细模型应用于排水分区系统尺度的排水能力评估和内涝风险分析。因此对于综合规划而言,如何同时满足编制范围要求的大系统完整,同时又兼顾小尺度模型准确性成为建模的难点。

大尺度内涝模型仅包含骨干河道和大型排灌设施,主要用于确定排涝系统格局,多数综合规划由于缺少水力模型,基本沿用上位的防洪减灾规划。小尺度内涝模型通常关注雨水管排水能力和局部的积水情况,而排水能力和内涝风险评估对尺度大小敏感度较高。例如,雨水管网汇水区划分的准确程度对排水能力评估结果的影响很大,目前软件能够自动划分子集水区,将每个子集水区汇到最近的节点,由于评估范围较大,采用手动调整较为困难,造成雨水管网汇水区与设计不符,严重影响了模型的准确性。影响子汇水区划分的常见问题有以下两种:①由于部分路段雨水管网普查资料的缺失,导致相邻的雨水管网集水范围偏大。②由于城市的部分集水区域靠近河道,雨水径流直接通过地表漫流排入河道,在划分汇水区时若仍按汇水周边雨水管网计算,则雨水管网集水范围比实际偏大。

2.2.3 水位衔接问题

与其他内涝评估方法相比,水力模型可以真实地模拟城市暴雨的产汇流过程,以及通过排水管网系统将雨水汇至河道或海洋等接纳系统。此外,水

力模型还能比较真实、准确地反映局部区域产生内涝积水的全过程^[8]。因此,排水管网和接纳系统的水位衔接也是影响模型准确性的要素之一。

目前,城市排水与排涝通常采用两级排涝体系(见图3):一级排涝系统负责较大区域的暴雨涝水以及市政雨水管网所汇集涝水的排除,属于水利排涝范畴,防治目标为发生城市内涝防治标准以内的暴雨时,城市不能出现内涝灾害,城市内河最高水位不超过最高控制水位;二级排涝系统承担城市小区、街道等小区域范围的雨水排除,属于市政排水范畴^[9]。

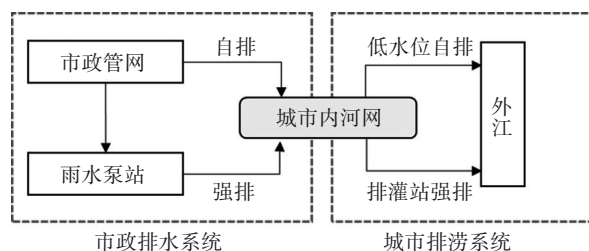


图3 市政排水与城市排涝之间的关系

Fig.3 Relationship between municipal drainage and urban waterlogging drainage system

在内涝风险评估中,河道水位是模型重要的边界条件,雨水的排出能力受到河道水位顶托作用后会大打折扣。综合研究样本,总结出河道水位的衔接主要存在以下问题:

① 内涝模型中缺少对河道水位边界条件的描述,仅在相关的防洪规划中介绍了洪水位的情况,河道水位和雨水管网如何衔接交代不清。

② 明确河道水位的取值多数为防洪成果中的最高洪水位,即排水口水位为固定水头类型^[10],缺少河道水位过程线,致使内涝积水区域以及积水时间产生偏差。

③ 受限于规划编制时间,水利上的防洪规划通常难以和排涝规划同步编制,这期间随着城市调蓄空间的下降,河道整治工程、水利工程条件会发生变化,继续沿用原有成果也给模型的准确性带来负面影响。

2.2.4 规划方案模拟

在多数研究样本中,模型的应用仅停留在管道排水能力评估和内涝风险评估上,排涝的系统方案往往脱离模型,排涝模型价值无法真正体现。排涝系统方案多数仍沿用原有的水利防洪规划,水利的

规划与市政的排水系统无法有机结合。对于风险评估中存在的积水区域,提出改造方案后其效果缺少模型的验证,存在较多的主观判断。在研究的样本中,仅有两座城市利用模型计算结果进行了排涝规划方案的探讨。这两座城市的排涝规划方案具体应用如表2所示。

表2 排涝规划方案模型应用

Tab.2 Model application of waterlogging prevention plan scheme

城市	模型概况	规划方案模型应用
杭州市	建立整个运河水系河网模型,划分548个河段、476个子流域	利用模型研究杭州江北片圩区包围圈的大小和排涝泵站的配置规模,提出中、大、小圩区三个方案
温岭市	MIKE11一维模型,包括17个河段、12个边界	利用模型对比隧洞排海工程、小型水库工程及引水入湖漫工程三个老城区疏引山水方案的效果,并进行了老城区改造、竖向调整后的内涝风险对比

2.2.5 模型的更新与维护

对排水防涝管网模型进行及时、有效的维护,既是水力模型得以长期、高效地应用于防洪排涝管理的保证,也可作为雨水管网和水利设施新建、改建提供科学决策的依据。而目前大部分城市的排水模型仅用于规划的编制,项目编制完成后缺少对模型的更新和维护,因此难以产生后续的应用价值。另外,模型总体以离线为主,智慧化程度较低。

3 案例分析

以杭州市滨江区排水防涝规划编制过程中水力模型的应用为例,探讨目前水力模型存在问题的部分解决办法。

杭州市高新区(滨江)是国务院批准的首批国家级高新区,行政区域面积共约73 km²(其中钱塘江水面约10 km²)。该区位于钱塘江下游南岸,通过钱塘江大桥、钱江三桥、复兴大桥、之江大桥与主城区相连,其西、北部为钱塘江,东、南侧与萧山区相接,地理位置十分优越。区域内的地势总体上较为平坦,河网水系密度较低,加之近年来建设用地上硬化比例大幅增加,造成该区域内涝灾害频发。

3.1 内涝风险评估

模型率定采用近期一场典型的降雨,考虑降雨分布的不均匀性,对区域内雨量站的降雨数据进行

插值处理,不同集水区采用区域内实际的降雨数值,主干河道水位采用边界水位,各排涝泵站启闭主要通过调度指令确定。通过河道最高洪水位、实测值以及报道的积水区域两方面来验证模型的准确性。

滨江区于2014年编制完成了《滨江区行洪排涝规划》,而近几年随着排灌泵站、河道整治等工程的实施,原有的排涝条件发生了较大变化,现状各频率的洪水位也均发生了改变。因此需要重新构建河网模型。模型共设6个边界水位,水位边界时间间隔为1 h,边界数据取自江南平原区域水利模型的计算结果,各频率下的计算洪水位与区域模型互相关校核,解决了雨水管网和河道水位衔接问题。

参考《浙江省城镇防涝规划标准》提出的城区地表内涝风险等级划分标准,基于设计降雨情景下模拟得到的高新区内涝情况,对城区内涝特征进行风险等级划分,并绘制城区不同降雨情景下的内涝风险评估结果,如图4所示。

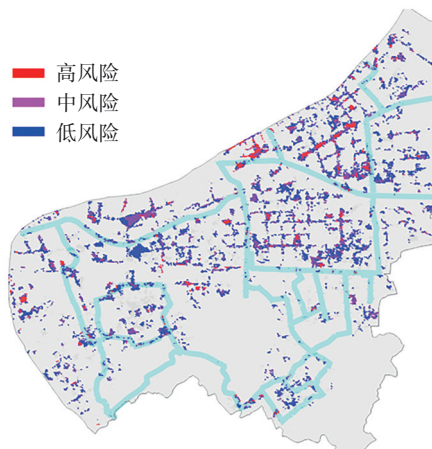


图4 内涝风险评估与区划分布

Fig.4 Waterlogging risk assessment and zoning distribution

3.2 排涝系统方案模型应用

滨江区分为两个排涝分区,以北塘河为界,北面为建设河排涝区块,南面为白马湖排涝区块。建设河排涝区块涝水通过建设河泵站抽排入钱塘江,相对独立。白马湖排涝区块为河网整体排涝布局,西面涝水主要通过浦沿排灌站抽排入钱塘江,东面涝水向北汇入北塘河后,排入下游南沙平原或通过江边排灌站抽排入钱塘江。

遭遇50年一遇降雨时,计算得到河道在洪峰流

量下的过流能力(见图5)以及流量。结果表明,大部分河道能满足河道行洪要求,但有部分河道存在阻水点,过流能力不足。时代河以及山北河的过流能力不足,使得现状南面的涝水不能及时通过排灌站排出,洪峰时段所有排灌站都满负荷工作,剩余流量主要通过小砾山输水河向南排出。



图5 河道过流能力评价

Fig.5 Evaluation of river flow capacity

因此在规划模型构建中,将重点对上述几条河道实施拓宽、清淤等整治工程,将更新后的河道断面输入模型,借助分析软件,对不满足排水排涝标准的现状管网进行改造,重点对局部易产生积水的道路、地块及内涝比较严重的区域进行改造。

以北塘河排水分区为例,探讨局部片区规划排涝方案。区域内北塘河为外河,局部水系的整治仍无法有效降低其洪水位,另外部分雨水管至河道的距离较远,模拟结果显示仍存在一定的内涝风险。现状排水区域北侧北塘河50年一遇洪水位达到5.72 m,而地坪标高大部分在6.5~7 m之间,考虑雨水管覆土深度,则排出口管顶标高在4.5 m以下,受河道洪水位顶托严重,区域内无法顺畅排水。

该排水分区内时代河及花园徐直河不受外河水位影响,50年一遇洪水位相对较北塘河低0.2 m以上,因此规划在区域内新增东西向排水通道,以此降低外河高水位顶托的风险。区域内大部分路段已建成,规划在滨安路北侧绿化带敷设雨水箱涵,通过改造部分南北向的主干管,将雨水通过箱涵排入时代河和花园徐直河,改造后雨水管排水距离大幅减小,该区域的积水量下降至原有的35%,内涝风险大幅度降低。

全区规划措施实施前、后的积水量对比如图6所示。由图6可知,规划工程实施后区域内的积水量大幅减少,积水点主要分布在北塘河以及建设河排涝区块,局部积水主要分布在现状地势低洼处,规划新建区域基本没有新的积水点出现。

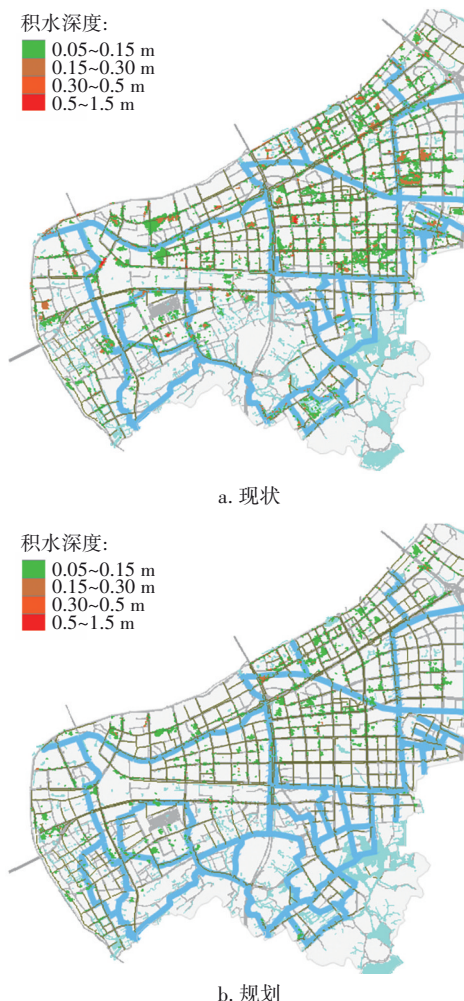


图6 改造效果模型验证

Fig.6 Model verification of transformation effect

4 结语

① 尽管大部分城市已经编制完成了排水防涝综合规划,但水力模型在率定、建模尺度、边界等方面的应用还存在较多问题,模型应用基本停留在现状评估阶段。

② 针对目前模型的尺度问题,建议对内涝严重地区做重点区域的精细模型,细化雨水管网汇水区域的划分,结合实地调研将雨水口排水能力、外来水的汇流等因素考虑在模型中,增强模型的针对性。

③ 排水防涝编制中河道的水位边界是影响模型可靠性的重要因素,建议在规划编制中联合水利规划部门,同步将河道、排灌站等重要水利设施更新到耦合模型。

④ 目前综合规划编制中模型应用到系统方案的规划较少,河道模型和雨水管网模型的结合度不高,使得模型的应用价值大打折扣,建议在下一轮修编中明确耦合模型的建模标准,包括河网和雨水管道各自的数据要求,在规划方案中推广模型的应用。

参考文献:

- [1] 车伍,杨正,赵杨,等. 城市排水(雨水)防涝综合规划编制若干问题探讨[J]. 中国给水排水, 2014, 30(16): 6-11.
CHE Wu, YANG Zheng, ZHAO Yang, *et al.* Discussion on several problems in compilation of integrated plan for urban drainage and flood control [J]. China Water & Wastewater, 2014, 30(16): 6-11 (in Chinese).
- [2] 高小平,曾曜. 城市排水(雨水)防涝规划编制技术路线探讨[J]. 中国给水排水, 2016, 32(4): 19-23.
GAO Xiaoping, ZENG Yao. Discussion on technical routes for compilation of urban drainage (rainwater) and flood control integrated planning [J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(4): 19-23(in Chinese).
- [3] 车伍,葛裕坤,唐磊,等. 我国城市排水(雨水)防涝综合规划剖析[J]. 中国给水排水, 2016, 32(10): 15-21.
CHE Wu, GE Yukun, TANG Lei, *et al.* Analysis of integrated plan for urban drainage (stormwater) and flood control [J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(10): 15-21(in Chinese).
- [4] 殷杰. 基于高精度地形表面模型的城市雨洪情景模拟与应急响应能力评价[J]. 地理研究, 2017, 36(6): 1138-1146.
YIN Jie. Urban pluvial flood scenario modeling and emergency response assessment using high resolution Lidar-DSM[J]. Geographical Research, 2017, 36(6): 1138-1146(in Chinese).
- [5] 靳俊伟,吕波,章卫军,等. 重庆主城区排水(防涝)综合规划总体技术路线[J]. 中国给水排水, 2015, 31(8): 24-29.
JIN Junwei, LÜ Bo, ZHANG Weijun, *et al.* Overall technical route of comprehensive planning of urban drainage and water-logging prevention in Chongqing main urban area [J]. China Water & Wastewater, 2015, 31(8): 24-29 (in Chinese).
- [6] 沈明星. 长乐市防洪排涝规划中MIKE11模型参数率定分析[J]. 陕西水利, 2017(6): 43-44.
SHEN Mingxing. Parameter calibration analysis of MIKE11 model in flood control and drainage planning in Changle City [J]. Shaanxi Water Resources, 2017(6): 43-44(in Chinese).
- [7] 毛绪昱,黄丽萍,杨森,等. 基于详细水力模型的重庆市排水防涝规划[J]. 中国给水排水, 2016, 32(3): 113-117.
MAO Xuyu, HUANG Liping, YANG Sen, *et al.* Drainage and waterlogging prevention planning based on detailed hydraulic model in Chongqing [J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(3): 113-117(in Chinese).
- [8] 黄维. 城市排水管网水力模拟及内涝风险评估[D]. 广州:华南理工大学, 2016.
HUANG Wei. Risk Assessment of Waterlogging and Hydraulic Simulation of Urban Drainage Network [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016 (in Chinese).
- [9] 黄兆玮,刘霞,徐辉荣,等. 市政排水与城市排涝标准衔接理念及其应用案例分析[J]. 中国给水排水, 2018, 34(4): 16-21.
HUANG Zhaowei, LIU Xia, XU Huirong, *et al.* Concept of matching municipal drainage and urban waterlogging drainage standard and application case analysis [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(4): 16-21(in Chinese).
- [10] 王永,赵萍,信昆仑. 温州市雨水专项规划编制过程思考[J]. 给水排水, 2014, 40(3): 23-26.
WANG Yong, ZHAO Ping, XIN Kunlun. Reflection on the editing of the rainwater plan of Wenzhou City [J]. Water & Wastewater Engineering, 2014, 40(3): 23-26 (in Chinese).

作者简介:陈盛达(1991-),男,浙江舟山人,硕士,工程师,研究方向为给排水规划设计、管网模型等。

E-mail:125482283@qq.com

收稿日期:2020-11-12

修回日期:2020-12-06

(编辑:丁彩娟)