

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.01.020

浦东新区洪涝预报预警系统构建与应用

杨森¹, 周全², 黄琳煜²

(1. 宜水环境科技<上海>有限公司, 上海 200235; 2. 上海市浦东新区水文水资源管理署, 上海 200129)

摘要: 浦东新区受其地理位置和气候条件的影响,容易遭受风暴潮洪的侵袭。为防范洪涝风险,在前期大量信息化建设的基础上,提出了浦东新区洪涝预报预警系统的构建方法,涵盖系统框架设计、数据集成、平原感潮河网水力模型和强排区雨水管网一二维耦合模型构建、保障系统稳定运行设置以及系统应用模式设计。该洪涝预报预警系统已在“云雀”“温比亚”“米娜”“利奇马”等台风期间进行了应用实践,可为浦东新区水雨情和汛情形势分析和趋势预测提供量化支撑,辅助防汛管理。

关键词: 洪涝预报预警; 平原感潮河网; 内嵌河网模型; Delft-FEWS平台; Sobek软件; 浦东新区

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2024)01-0131-06

Establishment and Application of Flood Forecasting and Early Warning System in Pudong New Area

YANG Sen¹, ZHOU Quan², HUANG Lin-yu²

(1. Ewaters Environmental Science and Technology <Shanghai> Co. Ltd., Shanghai 200235, China; 2. Shanghai Pudong New Area Hydrology and Water Resources Management Center, Shanghai 200129, China)

Abstract: Affected by its geographical location and climatic conditions, Pudong New Area is vulnerable to storm surge floods. This paper proposed a method for establishment of flood forecasting and early warning system in Pudong New Area on the basis of a lot of information construction in the early stage, so as to prevent flood risk. The method included system framework design, data integration, construction of plain tidal river network hydraulic model and one-dimensional and two-dimensional coupling models of stormwater pipe network in pump drainage areas, stable operation setting of the system, and system application model design. The flood forecasting and early warning system was applied during typhoons such as Skylark, Wumbia, Mina and Likima, which could provide quantitative support for the analysis and trend prediction of rainfall and flood conditions in Pudong New Area, and assist flood control management.

Key words: flood forecasting and early warning; plain tidal river network; embedded river network model; Delft-FEWS platform; Sobek; Pudong New Area

上海市浦东新区地势平坦、河网密集,东濒东海、南临杭州湾、西隔黄浦江,受亚热带海洋性季风

气候的影响,汛期易遭受台风、高潮、暴雨和洪水的影响与侵袭^[1]。浦东新区注重防洪排涝信息化建设

管理,先后建立了水情自动测报站、水文预报系统、水务信息共享服务平台、河湖监管平台、防汛防台平台,积累了大量的水雨情、泵闸工情等监测数据以及河网和管网普查数据,为防汛排涝管理提供了良好的支撑。随着浦东新区开发日益增加、地下空间大幅利用,洪涝灾害一旦发生,其造成的危害和损失巨大,远大于风险管理成本。为了防范洪涝风险,在前期大量信息化建设的基础上,研究构建浦东新区洪涝预报预警系统,分析预判水雨情和汛情形势变化对防汛排涝调度和管理十分必要。

1 区域概况

浦东新区面积约为1 210 km²,水面率约为9.8%,河网密度约为5.74 km/km²,河道常水位在2.50~2.80 m之间,警戒水位大治河以北为3.20 m、大治河及大治河以南为3.30 m^[2],防洪控制水位为3.75 m。历经多年建设,浦东新区防洪排涝格局日趋完善,构建了由海塘与防汛墙、城市河网、外围闸泵、城市排水管网系统共同组成的防洪排涝工程体系,形成了“外挡洪潮、内河蓄排、闸泵排涝,蓄以待排”和“东出长江为主,西入黄浦江、南排杭州湾为辅”的防洪排涝格局。

2 系统构建

本着整体谋划、分步实施、急用先行、边建边用、逐步完善、示范引领的原则,浦东新区洪涝预报预警系统按三期规划实施,期望融合国内外先进、成熟的信息集成和实时模拟技术,通过系统建设实现水雨情形势分析和汛情演变预判,提高洪涝精细化预报预警能力,为防汛管理决策提供辅助。本研究为一期项目,从系统顶层设计出发,以浦东水利片骨干河网与陆家嘴雨水强排片区为研究对象,进行系统平台构建;通过集成降雨、潮位、水位监测以及降雨与潮位预报数据,内嵌河网水文水动力模型以及管网一二维耦合模型,实现河网水位预报预警以及强排片区积涝预报预警。通过系统构建与应用经验的积累,为系统完善和迭代优化,以及二、三期项目建设奠定基础。

2.1 框架设计

浦东新区洪涝预报预警系统的核心包括四个组成部分,分别为综合数据库、数值机理模型、洪涝预报预警壳系统、预报成果Web发布与管理系统,如图1所示。

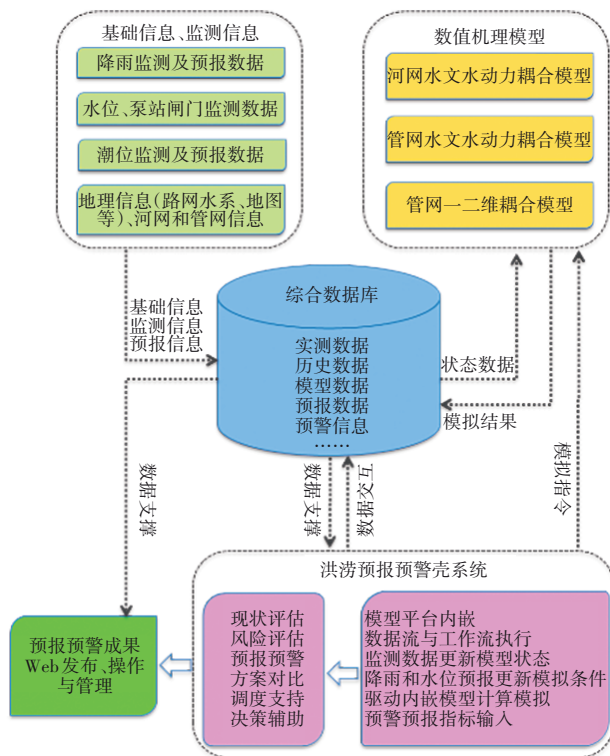


图1 浦东新区洪涝预报预警系统的核心组成部分

Fig.1 Core component of flood forecasting and early warning system of Pudong New Area

综合数据库:主要包括基础地理信息、监测信息、模型方案数据、模拟预报数据、预警数据的综合存储,支持通过标准接口为洪涝预报预警壳系统以及预报预警成果Web发布提供数据交互。

数值机理模型:主要包括研究构建浦东新区水利片河网与陆家嘴强排片区的水文水动力耦合模型,用于内嵌到洪涝预报预警壳系统中,为模拟计算提供引擎。

洪涝预报预警壳系统:是数据流控制中心,既包括实时监测的水雨情形势分析,又包括驱动内嵌模型进行模拟计算与评估分析,并控制输出预报预警成果给Web前端。洪涝预报预警壳系统采用在欧洲、美国等广泛应用的Delft-FEWS平台软件^[3-6]。该软件采用模块化架构,可便捷实现实时数据、模拟数据、预报数据的集成,支撑超过60余种水力模型软件(包括Sobek、Mike11、PCSWMM、SWMM、ISIS等)的平台内嵌,具有多达100余种标准通用数据接口,支持多源时空序列数据的组合展示、统计分析和二次开发^[7-8]。

Web发布与管理:以Web方式来实时呈现水雨

情形势及汛情预报预警成果,实现预报预警信息的发布和共享。

系统平台框架分为数据库层、数据接口层、应用服务层和操作应用层,如图2所示。数据库层用于存储模型数据、监测数据、预报数据和预警数据;数据接口层用于综合数据库与浦东新区水文水资源管理署已建 WISKI 数据库进行对接;应用服务层主要用于预报预警工作流处理,包括数据预处理和转换、内嵌模型状态更新、驱动模型计算;操作应用层主要用于系统的操作查看、水雨情综合分析、预报预警和汛情趋势研判辅助等。

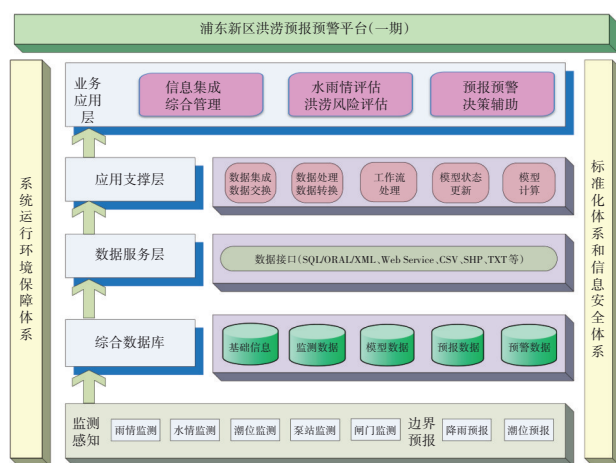


图2 浦东新区洪涝预报预警系统的框架

Fig.2 Framework of flood forecasting and early warning system of Pudong New Area

2.2 数据集成

系统建设过程中,充分利用浦东新区水文水资源管理署已建的相关业务系统,通过 Webservice 接口读取水文水资源 WISKI 数据库,获取降雨、河道水位、潮位、雨水泵站与河道水闸开关实时监测数据以及降雨和潮位预报数据,存入浦东新区洪涝动态预报预警系统综合数据库中,包括:①59个雨量站、12个风速风向监测站每5 min的实时监测数据;②56个河道水位站每5 min的实时监测数据;③18个潮位站每5 min的天文潮和气象潮实时监测数据;④38个沿江沿海闸门开度每5 min的监测数据;⑤64个雨水管网强排泵站泵机开关每5 min的实时监测数据;⑥天文潮和气象潮每5 min的更新预报数据,降雨预报数据为用3 km×3 km网格预报数据,早8点和晚8点更新预报未来24 h逐时降雨数据。

2.3 模型构建

由于浦东新区河网边界不封闭,将河网模型构建范围扩大到浦东水利片,总面积约为1 890 km²,不包括浦东机场、临港综合区、临港主城区等相对独立水系的区域。

① 浦东水利片河网模型构建

采用 Sobek 模型软件构建浦东水利片河网模型,模拟感潮往返河网的复杂水动力及泵闸等水工设施的调度控制。结合浦东水利片一二级骨干河道以及河道断面普查数据进行模型网络概化,包含了2 839个河道断面,平均间距约为60 m,如图3所示。



图3 河道模型概化图

Fig.3 River model schematic map

根据浦东片河网特征和水利工程运行管理的实践经验,遵循防汛保安全调度能排则排的原则、非汛期活水和用水保障调度原则,对38个沿江沿海水闸设施按照闸内外水位控制、片区河网平均水位控制及时间控制等进行规则设置。潮位边界有13个,包括沿江的米市渡和吴淞口潮位以及沿海11个潮位。

根据市政雨水入河道形式,将河道汇水分区分为两类:一类为雨水强排区,该区域雨水经管道收集后通过雨水强排泵站排入河,将此类强排区划分为一个汇水分区分配给雨水泵站抽排入河,共划分了77个汇水分区;另一类为自流排水区,雨水经管道或地面漫流后就近排入周边河道,根据地块与周边河道的关系,结合地形高程划分了1 551个自排汇水分区,按照逐段河道汇集雨水片区概化产汇流入河,考虑各入河雨水片区的 longest 汇流路径和平均

汇流坡度。各汇水分区的下垫面依据水资源普查数据结合航拍图,划分为河湖水面、绿地/耕地、难透水下垫面(包括屋面、道路、广场等)、鱼塘、水田等五类。各汇水分区的降雨输入根据分析筛选后的59个雨量站分布采用泰森多边形法划分,按面积加权计算各汇水分区面平均雨量。

选用“菲特”台风与“马勒卡”台风期间的降雨、水位、潮位监测数据开展河网模型校验。“菲特”台风期间上海市普降大暴雨,降雨集中发生在2013年10月7日—8日,24 h雨量最大值达到319.5 mm,多个站点的降雨量超过200 mm,且台风期间恰逢天文大潮,河网排泄受阻,浦东新区多地发生积水;选择同期有连续河道水位监测数据的40个站点,对最高水位、纳什效率系数进行模拟与监测对比,最高水位偏差在0.19 m以内,纳什效率系数介于0.51~0.81之间,40个站点的平均最高水位偏差在0.08 m以内。“马勒卡”台风期间上海市普降大暴雨,降雨集中在2016年9月15日—16日,全区面平均雨量为172.1 mm;选择同期有连续河道水位监测数据的48

个站点进行对比,对最高水位、纳什效率系数进行模拟与监测对比,最高水位偏差在0.21 m以内,纳什效率系数介于0.50~0.74之间,48个站点的平均最高水位偏差在0.1 m以内。

② 陆家嘴强排区管网模型构建

陆家嘴雨水强排区为黄浦江以南、张家浜以北、三八河以西区域,面积约为18.96 km²。模型概化排水管道5130条、长约143 km,概化节点(雨水检查井)4974个,强排泵站6座,总抽排能力为108 m³/s。结合地面高程、管网分布、道路收水进行雨水集水区划分,并提取了区域内的房屋道路等难透水下垫面以及绿地等透水下垫面,分别采用初损后全部产流以及Horton下渗进行产流模拟,汇流长度和坡度采用GIS分析统计。在一维模型基础上耦合二维地面高程模型,建立管网水文水动力耦合、一二维耦合的排涝模型。采用“菲特”台风期间的道路积水情形进行模型合理性检验,模型模拟出的道路积水与相关部门记录的积水情形基本一致,如表1所示。

表1 “菲特”台风期间模拟积水与记录积水情形对比

Tab.1 Comparison of simulated and recorded flood area during Typhoon Fitow

项目	起止路段	记录积水深度/cm	模拟积水深度/cm	吻合程度
民生路	昌邑路—浦东大道	35	30~35	基本一致
张杨路	源深路—巨野路	35	30~60	基本一致
桃林路	浦东大道—张杨路	35	20~40	基本一致
浦东大道	源深路—华开路	35	25~40	基本一致
潍坊路	浦东南路—南泉北路	30	30~40	基本一致
东方路	潍坊路—向城路	40	35~50	基本一致
世纪大道	张杨路—浦电路	40	20~35	一般
向城路	东方路—竹林路	40	40	基本一致
浦电路	世纪大道口	40	30~45	基本一致
源深路	张杨路—浦电路	60	30	略差

2.4 稳健性设置

洪涝预报预警壳系统在内嵌水力模型后,进行预报模拟前需要输入边界条件,更新河网的初始水位状态。这些条件与状态处于动态变化中,需要与实时数据进行关联。在实际运行中,实时数据在部分时间段、部分站点难免存在数据缺失的问题。输入数据一旦缺失,将会造成模型计算报错,在系统建设中需考虑保障系统模拟运行稳定的设置。

① 河网模型初始水位设置以及缺失数据替代方法:浦东新区河网密集,骨干一二级河道相互连通,河道水位落差较小,河道初始水位影响系统

的调蓄容积,因而需要根据模拟开始 T_0 时刻对应的河道监测水位进行面插值,再赋值给河网模型的各个断面点作为模型模拟的河段初始水位。在进行 T_0 时刻水位插值过程中,可能存在部分站点 T_0 时刻数据缺失情况,将采用 T_0 时刻前5 min水位数据进行替代;若 T_0 时刻前5 min也没有数据,将采用周边邻近3个水位站点的平均水位替代该缺失数据的站点;若周边邻近站点也存在缺失数据时,将采用常水位替代。

② 监测降雨数据缺失或预报降雨数据缺失的替代方法:河网模型采用了59个雨量站的降雨数

据作为模型计算的雨量输入条件。在进行模型历史模拟时,若模拟时段内存在部分降雨站点数据缺失时,将采用周边邻近的3个雨量站同期雨量进行空间插值替代;若周边3个雨量站同期数据也缺失,将该区域同期缺失雨量数据的站点采用降雨量为0替代。模型预报时将网格预报降雨数据按照空间位置赋值给59个雨量站作为预报降雨输入。若共享的网格预报降雨存在传输不及时问题或者数据中断的情况,则提供人工自定义预报降雨输入方式,支持一次输入全部赋值给59个雨量站点或分区赋值给59个雨量站点。

③ 预报潮位选项:潮位边界是模型模拟预报的重要边界条件之一,浦东新区潮位预报一直稳定运行,分为天文潮和气象潮预报,在台风期间还会进行风暴潮预报。在启动内嵌模型模拟时,对潮位边界条件的选择提供了上述3种潮位预报选项供配置选用。

④ 河网模型计算效率:在进行防汛台风预报预警时,河网水位是整个系统的关键,需要保障河网模型的计算效率。浦东新区河网模型计算步长为1 min,模拟预报未来24 h河网水位需将用时控制在6 min内。

3 应用设计与实践

3.1 应用模式设计

采用3种模式设计系统的应用方式,分别为常态模式、警戒模式和应急模式。

① 常态模式

常态模式主要应用于无降雨和小雨期间,可以进行当前和历史水雨情的查看、分析及统计,对过往防汛防台等事件进行复盘复演,为汛情风险研判和防汛调度积累经验。还可以开展历史模拟,在系统中记录模型与监测的差异,为模型精度的提升奠定基础。

② 警戒模式

警戒模式主要应用在中雨和暴雨期间以及预报有暴雨情形,关注水雨情和沿江沿海潮位变化,分析水雨情当前形势变化,可继续观察或选择启动内嵌模型进行河网预报,分析河网水情变化趋势;再结合降雨监测与预报数据,一旦出现暴雨继续、河道水位接近警戒水位时,转入应急模式。

③ 应急模式

应急模式主要应用在大暴雨及以上情形。在应急模式下,实时关注当前监测和预报的水雨情变化,利用内嵌模型开展滚动模拟预报,呈现未来24 h内各条河道预报水位与超警戒状态的时空分布、陆家嘴片区各条道路预报最大积水水深分布和积退水时空预判过程,为防汛防台应急管理提供预警支撑。

3.2 防汛预报实践

浦东新区洪涝预报预警系统一期项目于2017年底完成建设研究,在随后的“云雀”“温比亚”“米娜”“利奇马”等台风期间得以应用实践,进行了浦东水利片河网水位模拟预报和超警戒预警,其中浦东北部和中部区域的河网预报的最高水位与监测最高水位的平均偏差在0.14 m以内,南部区域靠近奉贤和闵行区域的水位预报偏差略大,预报的水位过程与监测水位过程吻合不太理想。在台风过后分析预报与实测数据,发现预报与模拟出现偏差的原因如下:

① 模型预报采用的气象短期预报(早、晚8点各更新一次未来24 h降雨)的逐时空间降雨量分布与实际降雨量的时空分布存在差异,预报雨峰过程时段和预报潮位的遭遇与实际遭遇存在差异。利用降雨、潮位实测数据进行河网模拟反演台风工况,约70%的站点模拟水位与监测水位变化过程吻合较好。建议后续模型计算的降雨条件输入考虑采用短临降雨的时空过程预报数据(如预报未来2 h逐5 min的降雨时空过程,预报更新频率为10 min),并研究其对预见期预报精度的提升效果。

② 对浦东新区南部靠近奉贤和闵行区域的河网水系断面数据及河网更新等资料掌握尚不详尽。建议后续研究中加大对这部分河网资料的掌握、更新和补充。

③ 模型预报对沿江沿海闸门运行按照能排则排的原则进行设置,相当于闸前水位高出闸后水位0.1 m即可开闸排涝。通过分析河道闸门开度监测数据发现,有监测数据期间的台风期闸门开关调度与模型设置的调度原则存在差异,需进一步与调度人员讨论和分析各场暴雨及台风下闸门调度的考虑因素,梳理优化相应情形下的调度规则,并增加多孔闸门中某些闸门不能开启的选项,作为模拟预报的设置条件。

此外,按照上位规划浦东新区河网还在建设完

善中,沿海排涝泵闸、次干河道和支级河道将得以规划新增和动态建设,建议对系统内嵌的河网模型根据工程建设进展进行相应更新。

4 结语

以浦东新区一二级河网以及陆家嘴排水片区为研究对象,构建了浦东新区洪涝预报预警系统,集成了实时降雨、潮位、水位监测以及降雨与潮位预报数据,内嵌了平原感潮河网水文水动力模型以及管网一二维耦合模型,实现了浦东新区水利片河网水位预报预警以及陆家嘴强排片区积涝预报预警,为水雨情形势和风险预判、防汛排涝调度和应急管理提供了决策辅助工具。在系统建设过程中,对实时水雨情数据处理、水力模型积木式系统内嵌、内嵌模型的初始状态更新与动态模拟预报等关键技术进行了研究和实践,为开展整个城市防汛排涝预报预警的深入研究和平台建设优化奠定了良好的基础。

参考文献:

- [1] 孟钰秀,黄琳煜,杨晓斌.基于SOBEK模型的浦东新区防汛管理措施研究[J].浙江水利科技,2019,47(4):17-20.
MENG Zhengxiu, HUANG Linyu, YANG Xiaobin. Study on flood control management measures in Pudong New Area based on SOBEK model [J]. Zhejiang Hydraulics, 2019, 47(4):17-20 (in Chinese).
- [2] 黄琳煜,瞿思敏,石朋.浦东新区内河防洪警戒水位核定[J].水电能源科学,2017,35(6):47-50.
HUANG Linyu, QU Simin, SHI Peng. Determination on inland river flood protection warning water level of Pudong New Area [J]. Water Resources and Power, 2017, 35(6):47-50 (in Chinese).
- [3] 敖静,章卫军. Delft-FEWS在英国环境署的国家防汛系统中的应用[J]. 中国给水排水, 2014, 30(21): 147-150.
AO Jing, ZHANG Weijun. Application of Delft-FEWS model in national flood forecasting system of Environment Agency for England and Wales [J]. China Water & Wastewater, 2014, 30 (21): 147-150 (in Chinese).
- [4] CRANSTON M D, TAVENDALE A C W. Advances in operational flood forecasting in Scotland [J]. Water Management, 2012, 165(WM2): 79-87.
- [5] ADAMS T E, CHEN S, DYMOND R. Results from operational hydrologic forecasts using the NOAA/NWS OHRFC Ohio River Community HEC-RAS Model [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2018. DOI: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001663.
- [6] YOSSEF N C, VAN BEEK R, WEERTS A, *et al.* Skill of a global forecasting system in seasonal ensemble streamflow prediction [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2017, 21(8): 4103-4114.
- [7] WERNER M, SCHELLEKENS J, GIJSBERS P, *et al.* The Delft-FEWS flow forecasting system [J]. Environmental Modelling & Software, 2013, 40: 65-77.
- [8] WEERTS A H. Real-time geospatial data handling and forecasting: examples from Delft-FEWS forecasting platform/system [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2010, 3(3): 386-394.

作者简介:杨森(1984-),男,安徽六安人,本科,工程师,主要从事城市排水排涝、水环境治理、海绵城市、智慧水务、数值模拟等相关工作。

E-mail:johnson.yang@ewaters.cn

收稿日期:2023-04-28

修回日期:2023-06-29

(编辑:刘贵春)