

阳澄淀泖区动态洪水风险图的编制及其 管理系统的开发

钟桂辉¹, 刘曙光¹, 张泉鸣¹, 胡子琛¹, 俞燕彦²

(1. 同济大学土木工程学院, 上海 200092; 2. 北京艾森思科技有限公司, 北京 100085)

摘要: 基于大量的实测和调研资料, 建立了能反映阳澄淀泖区现状河网、圩区分布及水工建筑物调度的水动力模型, 经率定和验证后能够用于该区域的洪水模拟。基于 Web 技术、GIS 技术和数据库技术, 研发了嵌套水动力模型的动态洪水风险图管理系统。针对任意降雨、边界条件、水工建筑物参数及调度参数, 系统能快速调用模型进行模拟计算并生成动态洪水风险图。与在线预报数据结合, 可实现洪水预报预警, 为洪水风险图在防洪减灾、洪水管理、洪水预报等方面提供技术支撑和应用借鉴。

关键词: 洪水风险图; 洪水管理系统; 水动力模型; 阳澄淀泖区

中图分类号: TV877 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7647(2017)06-0062-07

Dynamic flood risk mapping and development of a management system for Yangcheng & Dianmao District//
ZHONG Guihui¹, LIU Shuguang¹, ZHANG Xiaoming¹, HU Zicheng¹, YU Yanyan² (1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Beijing Aisensi Science and Technology Co., Ltd., Beijing 100085, China)

Abstract: A hydrodynamic model integrated with river networks, ponler areas and the controlling of hydraulic structures was established. After validation and calibration with sufficient measured data and current situation investigation, this numerical model can successfully simulate the flood. Based on Web, GIS and database technology, the management system of dynamic flood risk maps coupledwith the hydrodynamic model was developed. Dynamic flood risk mapping can be produced after the employment of the hydrodynamic model, which can deal with multiple customized data, including precipitation, boundary conditions, parameters of hydraulic structuresand scheduling disciplines. Combined with online forecasting data, the management system can provide technical support and references for the application of flood risk maps on flood control and disaster relief, as well as flood management and forecasting in China.

Key words: dynamic flood risk mapping; flood management system; hydrodynamic model; Yangcheng & Dianmao District

1968 年美国会通过《全国洪水保险法》推动洪水风险图诞生以来, 洪水风险图在世界各国得到了广泛的应用^[1-6]。我国自 2004 年开始洪水风险图编制试点工作, 至今已经在全国很多地区编制了包括防洪保护区、中小流域、蓄滞洪区及城区等不同类型的洪水风险图, 为我国洪水风险图的绘制和洪水风险管理探索出了经验、理论和方法^[7-13]。洪水风险图作为防洪减灾的重要技术支撑, 是制定流域防洪规划、规范和约束经济社会的发展行为、部署防洪工程及非工程措施、开展洪水保险和防汛抢险救灾等工作的重要依据。

随着全球气候变暖、海平面上升及城镇化的快

速发展, 洪水风险已经并将继续发生显著变化, 洪水风险图的灵活运用及动态更新已成为流域及各级洪水管理部门重点关注的问题。特别是太湖流域, 人口众多、经济发达, 特殊的地理环境和气候特点, 使得该地区洪涝灾害频繁, 损失严重。全球气候变暖使得太湖流域台风和暴雨趋势增强, 海平面的上升又降低了流域洪水外排的能力。人口、资产密度的急速增长, 土地利用方式的急剧改变, 流域内水面率与河网通达率的下降, 洪水风险的不确定性及其危害性在不断增加^[14-16]。另外, 太湖流域水系复杂, 河湖密布, 近 50% 的面积位于圩区或城市大包围之中, 圩区及城市大包围是平原低洼地区防洪除涝的

有效措施,但大量的涝水外排,导致圩外河网水位迅速大幅上涨,如 2015 年 6 月,太湖流域遭受 3 场强降雨侵袭,圩区及城市大包围的涝水外排使得大运河水位迅速上升,大运河全线水位超警戒,无锡段水位达到 5.18 m(1991 年历史高水位 4.88 m),区域及流域防洪压力大大增加。防洪减灾及洪水风险管理需要洪水风险图的支撑,也需要探索动态和实时洪水风险图,预见未来洪水风险,推广洪水风险图在其他领域的应用,并从而提高洪水风险的管理能力^[17]。

计算机技术及信息化平台的快速发展,使集成水文、气象、模型计算、数据同化、GIS 展示等为一体的动态洪水图编制成为可能。本文以太湖流域阳澄淀泖区为研究对象,基于大量的基础实测和调研资料,建立了高精度的一、二维耦合的水动力模型,结合计算机技术,将模型嵌套于洪水风险图管理系统中,实现了动态洪水风险图的编制。洪水风险的增长是气候变化和社会经济易损性增长共同作用的结果^[16]。因此,开展针对气候变化、人类活动和防洪工程体系综合影响下的洪水模拟,动态生成洪水风险图进行洪水风险分析和预测,能有效增强区域的洪水综合管理与应急响应的能力。

1 水动力模型

1.1 区域概况

阳澄淀泖区位于太湖流域东北部,属太湖下游的一个水利分区,西至望虞河,北倚长江,南至太浦河,面积 4 314 km²。区内河网纵横交错,湖泊众多,有大小河道 2 万余条,湖荡 146 个。

区域外围有长江控制线、环太湖控制线、望虞河东岸控制线、太浦河北岸控制线、运河澹台湖段东岸控制线、淀山湖昆山堤段控制线六大防洪工程。这些控制线沿线设有各种闸门及泵站,并按照联合调度的控制规则来控制 and 调节外围洪水。区域内部除了有通江骨干河道、大小湖荡进行洪水调节外,还建有大小联圩 366 个,面积占总研究区域面积的 50%。每个圩区都有多个泵站和节制闸进行调节,实现各自圩区的防洪排涝。

阳澄淀泖区地势低平,河道水面比降小,水流流速缓慢,上游受太湖洪水下泄影响,下游又受长江潮位顶托,排水难度大,洪涝滞蓄时间长。洪涝特点表现为:①洪涝灾害频繁。根据历史资料统计,平均每 4~5 a 发生一次洪涝灾害。新中国成立以来,相继发生了 1954、1991、1999 年流域性大洪水。②平原河网地区洪涝不分。洪涝灾害主要以平原河网地区受灾为主,每遇大范围持久降雨或局部大暴雨时,难以区分洪灾和涝灾。③洪涝灾害经济损失巨大。

④城市化发展导致区域防洪形势更趋严峻。城市基础设施的大规模建设使不透水地面面积扩大、水面率减少,对产汇流特性产生了较大影响;城市防洪除涝能力的增强和区域大规模的圩区建设,又造成地区排涝量进一步加大,致使圩外河道水位上涨加快,高水位持续时间延长,加重了流域区域防洪除涝压力^[17]。

1.2 水动力模型的建立与验证

选择丹麦水动力研究所开发的 MIKE FLOOD 软件建立一、二维耦合模型。

一维水动力模型的基本方程是圣维南方程组,包括水流连续方程和动量方程:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \tag{1}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial h}{\partial x} + g \frac{Q |Q|}{C^2 AR} = 0 \tag{2}$$

式中: x 为距离; t 为时间; A 为过水断面面积; Q 为流量; h 为水位; q 为旁侧入流量; C 为谢才系数; R 为水力半径; g 为重力加速度。

二维水动力模型基于三维不可压缩的 N-S (Navier-Stokes) 方程,服从 Bousinesq 涡黏假定和静水压力假定,采用非结构网格与蛙跳格式 (leap frog)、通过控制体积法求解连续方程和动量方程。

耦合模型是将一维河网两岸的堤防与二维地面进行侧向连接,实现水量、动量的实时交换,保证数学模型在空间、时间上的计算精度^[18-19]。

1.2.1 水动力模型的建立

a. 数据来源及处理。数据主要包括基础地理数据、水文数据、河道断面数据。河流水系数据、DEM 高程数据、道路交通及土地利用等基础地理数据来自江苏省测绘局提供的 2013 年全要素矢量地图,比尺为 1:10 000。水文数据为历史观测数据,包括 1951—2015 年 23 个水文站点的降水资料,典型年主要测站的水位资料,水文数据进行了数据的检验和校正。骨干河道的断面为实测数据,测量间距为 2 km,断面变化较大及转折点处进行了加密。其他河道断面为全国水利普查数据。模型中的断面进行了插值处理,一般每 500 m 一个计算断面。

b. 河网概化。区域内河网复杂,湖荡连通,且 50% 的区域面积为圩区控制。为了保证模型的精度,建模时尽量真实再现原有河网状况。将河道分为圩内、圩外两大类。圩外河道尽量按实际情况全面放入模型中,半高地和高地处的河道(主要集中在常熟、昆山和太仓地区)按调蓄水面面积进行概化。圩内河道尽量保留与圩外河网直接由闸泵相连的骨干河道,考虑洪水期水闸基本关闭,模型只考虑泵站的布置和抽排能力。调查每个圩区的水面率,根据

实际水面率对圩区增加了适量的调蓄水面。湖泊处理成虚拟河道加上调蓄水面,湖泊实际水面面积与虚拟河道水面面积的差作为附加调蓄面积添加在调蓄节点处。模型共概化河道 949 条(其中圩外河道 483 条,圩内河道 466 条),湖泊 50 个,计算水位点 6988 个、计算流量点 4699 个,模型河网如图 1 所示。

c. 水工建筑物处理。区域内水工建筑物主要包括水闸和泵站两种。望虞河、太湖、长江、太浦河沿线闸门按照实际闸门的位置、规模及调度情况加入模型,边界河道和澹台湖以上(非城区包围)沿运河东岸上的城区包围的水工建筑物也按实际闸门的位置、规模及调度情况模拟。因圩区内有大量的水闸和泵站,在保证圩区排涝总量不变的基础上,根据圩区规模、圩区排涝能力和圩区实际泵站分布进行概化处理。洪水期间圩区水闸关闭。经概化处理,模型包含泵站 480 个、水闸 86 个。

d. 城市大包围的处理。城市大包围相当于一个大圩区,研究区域内主要有苏州城区、昆山城区、吴江城区、常熟城区和太仓城区。城市大包围考虑了所有的水闸和泵站,水闸和泵站的位置、规模及调度按实际情况处理。

e. 网格剖分及耦合连接。为保证模型的精度,将每个圩区单独网格剖分,沿江的半高地与高地区域统一进行网格剖分,局部地区进行加密,共生成网格 82904 个,平均网格面积 0.04 km²。一、二维耦合采用侧向连接,将一维河道的堤防与二维陆域进行连接。

f. 边界条件、初始条件及参数选取。阳澄淀泖区是太湖流域一个独立的水利分区,南、北和西边分别以长江、望虞河、太浦河和太湖口门为开边界。东部边界主要包括青松大包围与嘉宝大包围,根据调

度实际,阳澄淀泖区难以向东泄洪,从区域防洪不利情况考虑,不考虑通过青松、嘉宝大包围向下游排水,仅考虑淀山湖通过拦路港向下游泄洪以及吴淞江与盐铁塘与下游的水量交换,因此东部边界基本为闭边界,仅泖甸站与黄渡站为水位控制的开边界。京杭运河参照 2015 年实测最大值,给定流量 188 m³/s。初始流量设为零,初始水位设为河道多年平均高水位。河道糙率的初始值选择文献[20]中各河道的给定值,陆域的糙率按《洪水风险图编制技术细则(试行)》赋予初值,率定时局部进行调整。

g. 设计暴雨。本文涉及的降雨有 20 年一遇、50 年一遇、100 年一遇最大 24 h 设计面暴雨;50 年一遇、100 年一遇最大 15 d 设计面暴雨;“91 北”、“99 南”最大 30 d 设计面暴雨。最大 24 h 设计暴雨选取了枫桥、平望、直塘、花桥 30 年以上长系列资料适线法计算,并进行点面折算,利用《江苏省暴雨洪水图集》^[21]最大 24 h 设计暴雨概化雨型进行时段雨量分配,并同时控制 1 h、6 h 降雨量。蒸发和渗透的影响采用初损后损法扣损,不考虑初损,后损为 1 mm/h。长历时设计暴雨中,蒸发和渗透的影响较大,不能单纯用扣损法。选择区域内 23 个雨量站 1951—2012 年长系列资料进行了长历时设计暴雨的计算,并利用泰森多边形进行点面关系折算,设计典型年为 1999 年型,最大 15 d 同频控制。最后再利用文献[20]的模型,按照土地类型进行蒸发和入渗计算,得到分片后的设计面净雨。

1.2.2 模型率定和验证

选取 2009 年 7 月 21 日至 8 月 10 日洪水进行率定,率定后各河道的曼宁系数介于 0.0225 ~ 0.035 之间。选取 2012 年 8 月 6—15 日、2013 年

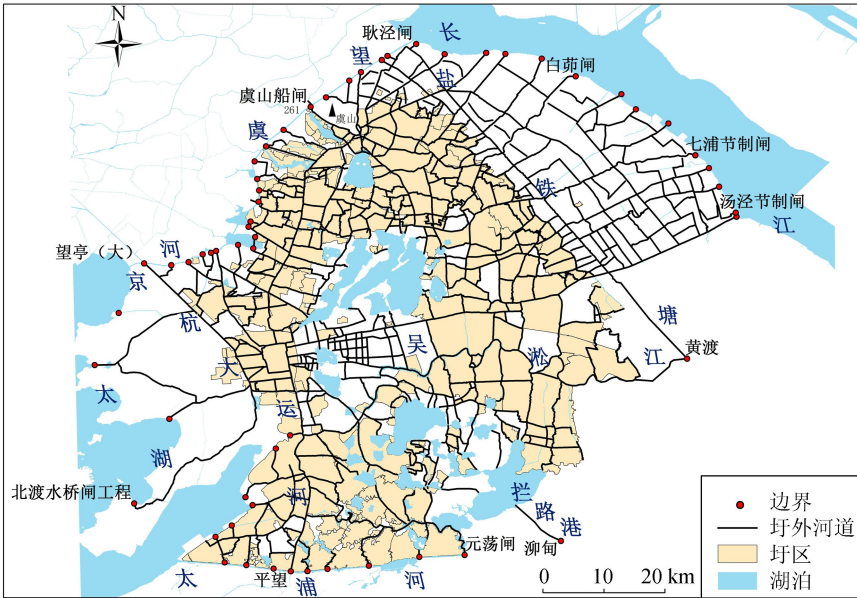


图 1 阳澄淀泖区水系概化

10月6—13日两场典型洪水进行验证。湘城站、陈墓站和金家坝站是阳澄淀泖区最具代表性的水位站点,两段验证期内各站点计算值与实测值相差较小(图2),绝大部分水位误差控制在5 cm以内,NASH 确定性系数介于0.83~0.98之间(表1),表明模型精度良好。

表1 模型误差分析

水位站名	年份	最高水位/m		出现日期		水位最大误差/m	确定性系数
		实测	计算	实测	计算		
湘城	2012	3.67	3.60	08-10	08-10	0.07	0.83
	2013	3.84	3.77	10-09	10-09	0.07	0.92
陈墓	2012	3.75	3.66	08-10	08-10	0.09	0.93
	2013	3.82	3.80	10-09	10-10	0.02	0.96
巴城	2012	3.59	3.53	08-10	08-10	0.06	0.84
	2013	3.84	3.74	10-09	10-09	0.10	0.91
金家坝	2012	3.76	3.69	08-10	08-10	0.07	0.91
	2013	4.02	3.98	10-09	10-10	0.04	0.98

2 动态洪水风险图

所谓动态洪水风险图,是指能任意设置不同频率的降雨,更改模型边界条件、任意设置水工建筑物参数和调度规则、预设不同溃口位置和溃口发展过程,实现快速调用模型计算并生成洪水风险图。同时,洪水风险的过程能动态展示;不同的方案可以调用对比;重点地区的水位和流量可以进行关注、预测并报警。

为完成上述目的,首先,基于 Web 技术、GIS 技术和数据库技术研发了 B/S (Browser/Server) 结构动态洪水风险图管理系统。考虑到该系统主要用于防洪规划、风险分析、防洪决策,系统采用面向服务(SOA)的体系架构,将应用程序的不同功能单元

(数据库、模型等)通过定义好的接口和契约进行链接,实现应用程序之间的数据交换和功能实现。然后,开发了 MIKEFLOOD 模型相关模块数据交互组件的接口,包括降雨更改接口、在线数据调用接口、水工建筑物更改及调用接口,预设的溃口接口等。系统可以灵活调用模型模块,更改相关参数,从而实现动态洪水风险图在系统中的编制。

2.1 动态洪水风险图管理系统

系统的开发基于 JAVAEE 技术^[22],将数据库访问、企业级 Java 组件、命名和目录服务、动态页面生成、XML、JSON、事务管理等有机集成在一起,并且提供集群等高级特性,使之特别适合构建复杂的大型应用系统,并且保证系统具有很好的可扩展性。采用轻量级的构建方法,在 POJO 的基础上,封装了 Spring、Spring MVC 和 Hibernate,实现了简单的构架、强大的功能、良好的扩展性以及在不同的应用服务器之间的高可移植性。系统建立的主要目标是实现在线数据的及数据库数据的存储和传递、水动力模型的封装和调用、洪水风险图结果的动态展示、动态洪水风险图的编制及部分关注点水位的预报预警。系统采用分层的设计架构,整个架构分为4层:应用层、认证层、组件层和数据层,各层都有一套定义好的接口和构件,具体见图3。

系统的主界面如图4所示,主要由菜单栏、图层区和显示区。菜单栏显示了系统的主要功能,包括区域概况、静态风险图、动态计算、实时预报及结果查看5个部分。

区域概况是区域的基本信息的概述,包括地理信息、社会经济、行政区划及历史洪水等。

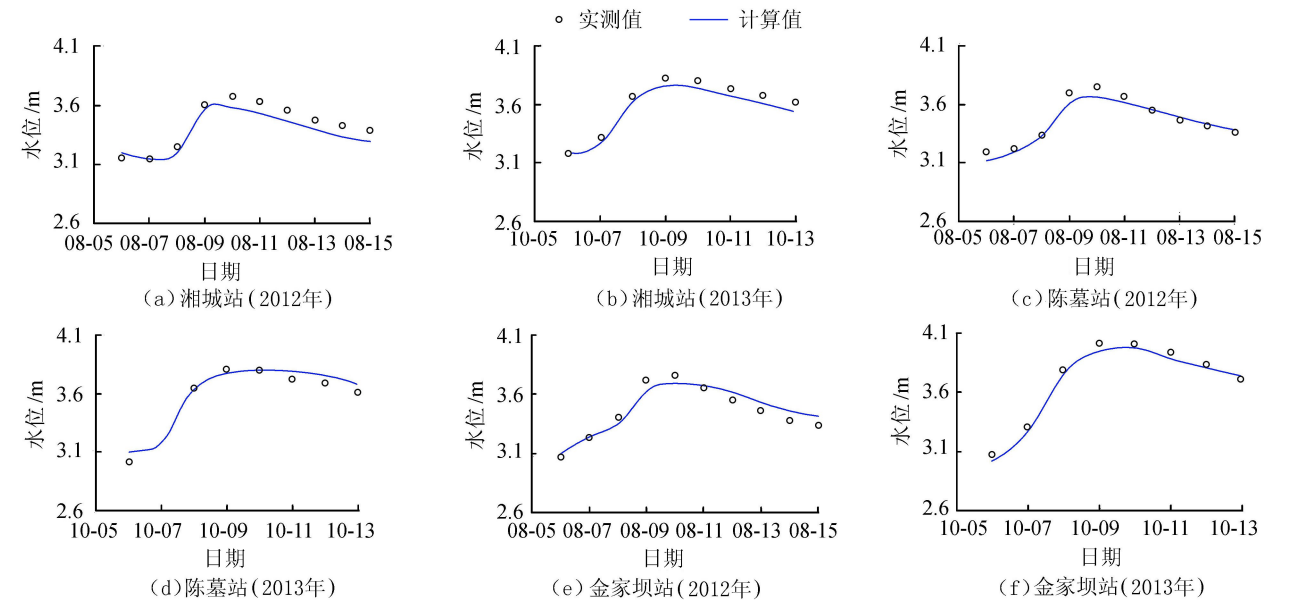


图2 部分水位站实测水位与计算水位对比

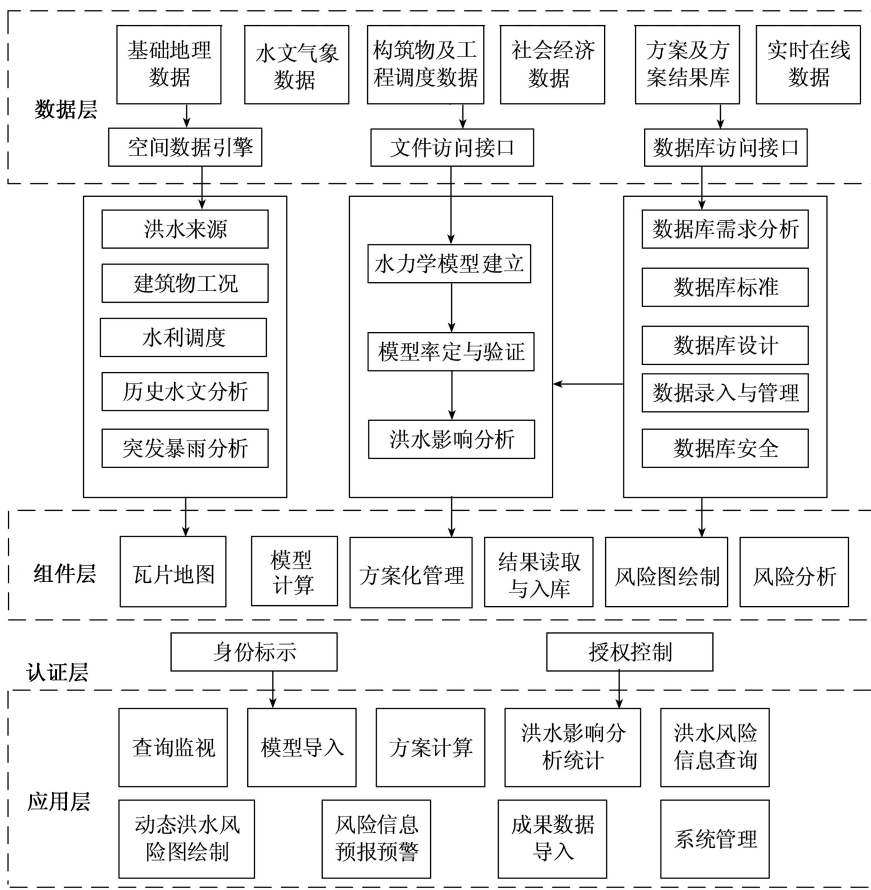


图3 系统架构

静态洪水风险图是对洪水风险图成果进行分类展示,任意计算方案的洪水风险图都可以保存入库并显示。点击“静态风险图”菜单,系统会以分类表格的形式罗列出该区域的风险图研究成果,包括名称、类型、相关的说明以及风险图图件(图4)。已完成的静态洪水风险图有3类:①历史洪水风险图,主要是2009年、2012年、2013年典型年洪水风险图。②不同频率设计暴雨下内涝洪水风险图,包括

20年、50年、100年一遇最大24h设计暴雨;50年、100年一遇最大15d设计暴雨;“91北”、“99南”最大30d设计暴雨下的洪水风险图。③溃堤洪水风险图,经调研和论证后假定部分堤防发生溃堤,从而编制的溃堤洪水风险图。

动态计算即为改变降雨及边界等参数的动态洪水风险方案计算,计算结果保存在“结果查看”中,并能生成动态洪水风险图。



图4 系统主界面

实时预报是动态计算的延伸,将降雨和边界条件与实时水雨情数据库连接,系统一方面能对实时的降雨、水文站点水位、河道流量等数据进行查询分析;另外一方面,可以用实时水雨情为变动参数调用模型滚动计算,展现当前水雨情下水动力模型模拟预测的洪水风险信息。系统还设置了研究区域重要关注点(断面、河道水位、流量),并给关注点设置预警阈值,当模型滚动计算中关注点出现超出预警阈值时,能进行洪水预报预警。

结果查看是以模型计算的结果为依据,动态展示一维水位流量变化过程、二维洪水演进过程,自动生成洪水淹没风险图、洪水淹没历时风险图及洪水到达时间洪水风险图。

2.2 动态洪水风险图编制

动态洪水风险图通过调用系统中的水动力模型,进行降雨条件的任意更改,如改变成其他设计频率的降雨,或者依据天气预报情况更改区域内水文站点的降雨,同时还可以改变其他边界条件,如改变边界的水位过程、潮位过程、水闸泵站的参数、溃口的位置等,实现对任意洪水方案的快速模拟,图 5 为动态洪水风险图更改参数设置的界面。

动态风险图参数的更改包括 5 个部分:方案信息、降雨条件、边界条件、泵站、水闸及溃口。“方案信息”是对新计算方案基本信息的设置和保存,方案信息包括:方案名称、计算开始时间、计算结束时间、输出步长和方案描述信息。“降雨条件”提供降雨时序数据的查看及批量修改,降雨时序数据柱状图展示,雨量站的地图定位。“边界条件”提供水位时序数据的查看和批量修改,水位过程线展示,边界点的地图定位。“泵站”提供泵站参数的更改和设置,包括:泵站的起排水位、终排水位和排水能力,可分别按行政区划分片批量设置,也可以单独设置每

个泵站的参数。“水闸”提供水闸参数的更改和设置,与泵站类似,可以批量修改也可以单独设置。“溃口”可以假设溃口,进行溃口、漫堤的动态洪水分析计算。

参数更改设置完成后,通过模型模拟计算接口驱动 MIKE11 水动力模块、MIKE21 水动力模块和 MIKE FLOOD 耦合模型,迅速进行洪水风险分析计算,计算结果导出到数据库接口,并按照一定的表结构导入到数据库中,形成一个新方案洪水风险图数据,本文模型较为精细,82 904 个计算网格,模拟 24 h 暴雨内涝的时间约为 20 min。以新方案计算数据为基础,通过风险图配图、添加辅助信息、说明信息和洪水风险统计信息,在结果查看模块中生成新的洪水风险图,从而完成一个动态洪水风险图的编制。洪水风险的时空模拟结果可以在“结果查看”中进行回放、暂停及动画展示。动态洪水风险图可以用 JPG 等不同格式的不同图幅、比例尺和分辨率查看和输出。

3 结 语

本文基于大量实测数据,采用一、二维耦合技术建立了阳澄淀泖区平原河网水动力模型,该模型包括河道 949 条,泵站 480 个,水闸 86 个,计算网格 82 904 个。模型的建立充分考虑了平原复杂河网间水量的交换、水工建筑物的影响及调度、圩区及城市大包围的影响等。采用历史洪涝数据对模型进行了率定和验证,绝大部分水位误差小于 5 cm,精度较高,能够用于该地区其他洪水方案的洪水风险分析和洪水风险图的编制。

通过多学科交叉、多模型耦合及先进的计算机软件,研发了基于 Web 技术、GIS 技术和数据库技术的动态洪水风险图编制系统。该系统将水动力模型通过接口嵌入其中,实现已完成方案的洪水风险图



图 5 动态风险图计算参数更改界面

查询及动态展示;对任意组合洪水方案进行快速模拟计算,生成动态洪涝风险图;与实时水雨工情数据库连接,滚动计算并预报预警。系统能为防洪减灾、洪水管理、城市规划避洪抢险提供决策依据。当然,该系统还需要进一步完善,如需要进一步提高模型的运行速度,今后考虑将其他水文模型及水动力模型入库,实现任意模型的选择、模拟及洪水预报预警。

参考文献:

[1] VOUSDOKAS M,VOUKOUVALAS E,MENTASCHI L, et al. Developments in large-scale coastal flood hazard mapping[J]. Natural Hazard and Earth System,2016,16(8): 1841-1853.

[2] GUSYEV M, GADEKE A, CULLMANN J, et al. Connecting global and local-scale flood risk assessment: a case study of the Rhine River basin flood hazard[J]. Flood Risk Management,2014,9(4):343-354.

[3] MENTZAFIOU A, MARKGIANNI V, DIMITRIOU E. The use of geospatial technologies in flood hazard mapping and assessment: case study from River Evros[J]. Pure and Applied Geophysics,2017,174(2):679-700.

[4] BUCHELE B, KREIBICH H, KRON A, et al. Flood-risk mapping: contributions towards an enhanced assessment of extreme events and associated risks[J]. Natural Hazards & Earth System Sciences,2006,6(4):485-503.

[5] MOTEVALLI A, VAFAKHAH M. Flood hazard mapping using synthesis hydraulic and geomorphic properties at watershed scale[J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment,2016,30(7):1889-1900.

[6] BALDASSARRE G D, CASTELLARIN A, MONTANARI A, et al. Probability-weighted hazard maps for comparing different flood risk management strategies: a case study[J]. Natural Hazards,2009,50(3):479-496.

[7] ZHONG Guihui, LIU Shuguang, HAN Chao, et al. Urban flood mapping for Jiaxing City based on hydrodynamic modeling and GIS analysis[J]. Coastal Research,2014,68:168-175.

[8] 李娜,程晓陶,邱绍伟.上海市城区洪水风险图制作[J].中国防汛抗旱,2009,19(6):38-41.(LI Na, CHENG Xiaotao, QIU Shaowei. Flood risk map making in Shanghai City[J]. China Flood & Drought Management, 2009,19(6):38-41.(in Chinese))

[9] 王炜.二维洪水数值模拟在太浦河洪水风险图编制中的应用[D].上海:同济大学,2008.

[10] 李昌志,黄金池,何晓燕,等.丹江口水库洪水风险图编制[J].中国防汛抗旱,2008,18(4):63-66.(LI Changzhi, HUANG Jinchi, HE Xiaoyan, et al. Flood risk map making in Danjiangkou Reservoir[J]. China Flood & Drought Management, 2008,18(4):63-66.(in Chinese))

[11] 李航,于德万,刘心玲.松花江洪水风险图编制及管理应用[J].东北水利水电,2016(3):43-44.(LI Hang,

YU Wande, LIU Xinling. Flood risk mapping in Songhua River and its management application[J]. Water Resources & Hydropower of Northeast China,2016(3):43-44.(in Chinese))

[12] 王静,喻朝庆,程晓陶,等.太湖流域大尺度洪水分析中圩区影响洪涝分布的模型[J].水利水电技术,2010,41(9):91-96.(WANG Jing, YU Chaoqing, CHENG Xiaotao, et al. Simulating the impacts of polder areas on distribution of flooding in Taihu Basin for broad scale flood analysis[J]. Water Resources and Hydropower Engineering,2010,41(9):91-96.(in Chinese))

[13] 叶爱民,刘曙光,韩超,等. MIKEFLOOD 耦合模型在杭嘉湖流域嘉兴地区洪水风险图编制工作中的应用[J].中国防汛抗旱,2016,26(2):56-60.(YE Aimin, LIU Shuguang, HAN Chao, et al. Application of MIKE FLOOD coupling model in flood risk mapping at Jiaxing area of Zhejiang Province[J]. China Flood & Drought Management,2016,26(2):56-60.(in Chinese))

[14] 徐宗学,刘浏.太湖流域气候变化检测与未来气候变化情景预估[J].水利水电科技进展,2012,32(1):1-7.(XU Zongxue, LIU Liu. Detection of climate change and projection of future climate change scenarios in Taihu Lake Basin[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2012,32(1):1-7.(in Chinese))

[15] 关颖慧.长江流域极端气候变化及其未来趋势预测[D].杨凌:西北农林科技大学,2015.

[16] HALL J W, EWANS E P, PENNING-ROWSELL E C, et al. Quantified scenarios analysis of drivers and impacts of changing flood risk in England and Wales: 2030—2100[J]. Environmental Hazards,2003,5(3/4):51-65.

[17] 叶剑春,章杭慧.太湖流域洪水风险管理实践与思考[J].水利水电科技进展,2015,35(5):136-141.(YE Jianchun, ZHANG Hanghui. Practices and thinking of flood risk management in Taihu Lake Basin[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2015,35(5):136-141.(in Chinese))

[18] Danish Hydraulic Institute. A modelling system for rivers and channels, MIKE 11 reference manual[R] Denmark: Danish Hydraulic Institute,2014.

[19] Danish Hydraulic Institute. MIKEFLOOD 1D-2D modelling user manual[R] Denmark: Danish Hydraulic Institute,2014.

[20] 程文辉,王船海,朱琰.太湖流域模型[M].南京:河海大学出版社,2006.

[21] 江苏省水文总站.江苏省暴雨洪水图集[G].南京:江苏省水文总站,1984.

[22] 曹鸣鹏,赵伟,许林英. J2EE 技术及其实现[J].计算机应用,2001,10(21):20-23.(CAO Mingpeng, ZHAO Wei, XU Linying. The J2EE technology and its implementation[J]. Computer Applications, 2001,10(21):20-23.(in Chinese))

(收稿日期:2017-01-09 编辑:郑孝宇)