

基于 WebGIS 的洪泽湖地区洪水预报预警系统

寇嘉玮¹, 董增川¹, 周洁^{1,2}, 朱振业¹, 张翔宇³

(1. 河海大学 水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 2. 浙江华东工程数字技术有限公司, 浙江 杭州 311100; 3. 黄河水利科学研究院, 河南 郑州 450003)

摘要: 为了加强洪泽湖地区洪水风险管理,保障淮河下游防洪安全,采用 WebGIS 与水文学、水力学模型相结合,将一、二维耦合的水动力学模型内嵌于 B/S 系统进行洪水预报预警的方法。构建了一维洪泽湖地区河道、二维洪泽湖湖面及周边滞洪区相耦合的洪水演进模型,在此基础上开发了基于 WebGIS 的洪泽湖地区洪水预报预警系统,实现了对降雨、洪水进行实时监控、预报和对预警关注地点水位、流量变化、洪水淹没和超标洪水预警信息的可视化展示。系统进一步提升了洪泽湖地区的防洪数字化水平,可为避险减灾提供决策支持。

关键词: 洪水预报; 洪水演进模型; 一维—二维耦合; WebGIS; 预报预警系统; 洪泽湖

中图分类号: TV122; X43

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2017)06-0145-06

The flood forecasting and warning system of the Hongze Lake area based on WebGIS

KOU Jiawei¹, DONG Zengchuan¹, ZHOU Jie^{1,2}, ZHU Zhenye¹, ZHANG Xiangyu³

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Zhejiang Huadong Engineering Digital Technology CO., LTD, Hangzhou 311100, China; 3. Yellow River Institute of Hydraulic Research, Zhengzhou 450003, China)

Abstract: In order to strengthen the flood risk management of Hongze Lake area and ensure the flood control safety of the lower reaches of Huaihe, by combining WebGIS with hydrology and hydrodynamic model, a 1D-2D coupled hydrodynamic model is embedded into the B/S system to forecast and warn flood. A 1D river, 2D lake and detention basin coupled flood routing model was built, on this basis, the flood forecasting and warning system of the Hongze Lake area is developed based on WebGIS. The rainfall and flood can be real-time monitored and forecasted, the water level and flow changes at the concerns, with the flood risk and over-level flood warning information can be visualized. The system further improved the digital level of flood control of the Hongze Lake area, and can provide decision support for emergency escape and disaster reduction.

Key words: flood forecast; flood routing model; 1D-2D coupled; WebGIS; forecasting and warning system; Hongze Lake

1 研究背景

洪泽湖周边滞洪区位于洪泽湖大堤以西,废黄河以南,泗洪县西南高地以东,以及盱眙县的沿湖、沿淮地区。涉及淮安、宿迁两市的淮阴区、洪泽县、盱眙县和宿城区、泗洪县、泗阳县六县区部分地区,还有省属洪泽湖、三河农场,面积约 2 132 km²。区内地势外高内低,唯一排水出路即洪泽湖湖区。上

游入湖河流主要有淮河干流、怀洪新河、徐洪河、新汴河、新濉河、老濉河;下游泄洪出湖河道主要有淮河入江水道、入海水道、分淮入沂、苏北灌溉总渠、废黄河^[1]。按照国务院批准的淮河防御特大洪水方案,当洪泽湖水位上涨到 14.5 m 时,洪泽湖周边滞洪区需破圩滞洪^[2]。当洪泽湖水位达到 16.0 ~ 17.0 m 时,滞洪区最大水深可达 4 ~ 5 m,滞洪库容可达 30 × 10⁸ ~ 40 × 10⁸ m³。

收稿日期:2017-06-09; 修回日期:2017-08-15

基金项目:全国重点地区洪水风险图编制项目(江苏省)(20158028006)

作者简介:寇嘉玮(1993-),女,陕西西安人,硕士研究生,研究方向为水资源管理。

建国以来,淮河流域于 1954、1991、2003、2007 年发生过大水,虽未直接运用滞洪区但均出现破坏、倒房情况,给洪泽湖地区人民带来较大损失。目前滞洪区撤退道路少且标准低;沿湖挡堤堤身单薄、矮小,又无防浪设施;避洪与通讯报警设施十分落后。因此,进行洪泽湖地区洪水预报预警系统研究对于减轻或避免人民生命财产损失意义重大。

近年来,WebGIS 在我国洪水灾害管理方面的应用主要针对雨情、水情、工情等信息的管理和决策支持系统的构建,如万洪涛等^[3]构建了流域级洪水管理系统,沈晓娟等^[4]构建了洪泽湖防洪决策支持系统,姜腾腾^[5]构建了城市内涝灾害情景模拟与辅助决策支持系统等。基于 WebGIS 开发的针对暴雨内涝、水库、水环境等方面自然灾害的预报预警系统较多^[6-8],其中对地质灾害预报预警的研究较为成熟,代表性的有 2003 年殷坤龙等^[9]开发的浙江省地质灾害实时预警预报系统。现有基于 WebGIS 开发的洪水预报预警系统多采用 C/S 和 B/S 相结合的架构,如徐帮树、贾超等^[10-11]的研究,纯 B/S 架构的较为少见;开发语言多使用 .NET,如蒙正杰^[12]、宋阁庆^[13]的研究,另有采用 .NET 与 JavaScript 相结合^[14]或借助 Flex^[15]进行的开发等。区别于已有研究,本研究将一二维耦合的水动力学模型内嵌于系统,采用纯 B/S 架构,主要借助 Java 和 JavaScript 语言进行系统开发,实现了实时洪水预报、洪水淹没和预警信息的可视化操作与展示,有助于提高区域的防洪数字化和智能化水平。

2 模型构建

2.1 构建方法

构建了一维河道与二维湖面及周边滞洪区相耦合的洪水演进模型,对洪泽湖地区洪水演进进行模拟。对研究区内主要河道建立河网水动力学模型,以获得各时刻河道内的水面线、流量等,并模拟水工建筑物调度、蓄滞洪区运用、溃口等对河网水文条件的影响。采用一维非恒定流微分方程,即圣维南 (de Saint Venant) 方程组,微分形式如下:

连续方程:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + B_w \frac{\partial Z}{\partial t} = q_L \quad (1)$$

动量方程:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + 2u \frac{\partial Q}{\partial x} + (gA - Bu^2) \frac{\partial A}{\partial x} + g \frac{n^2 |u| Q}{R^4/s} = q_L V_x \quad (2)$$

式中: t 为时间坐标, s; x 为空间坐标, m; Q 为流量, m^3/s ; Z 为水位, m; u 为断面平均流速, m/s ; n 为河道糙率; A 为过水断面面积, m^2 ; B 为主流断面宽度, m; B_w 为水面宽度 (包括主流宽度仅起调蓄作用的附加宽度), m; R 为水力半径, m; q_L 为单位河长的旁侧入流量, m^3/s ; V_x 为入流沿水流方向的速度, m/s , 假定旁侧入流垂直于水流方向, 则 V_x 为 0。方程组的求解采用分级解法, 先求出河网中各汉点的水位, 再通过消元法求解河段任意节点的水力参数。

对洪泽湖区及其周边滞洪区, 建立二维非恒定流水动力学模型。采用浅水方程来模拟洪水在淹没区域内耕地、林地、山丘、道路等二维面上演进的情况, 控制方程如下:

连续方程:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + u \frac{\partial M}{\partial x} + v \frac{\partial N}{\partial y} = q \quad (3)$$

动量方程:

$$\frac{\partial M}{\partial t} + u \frac{\partial M}{\partial x} + v \frac{\partial M}{\partial y} + gh \frac{\partial Z}{\partial x} + g \frac{n^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^2/s} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + u \frac{\partial N}{\partial x} + v \frac{\partial N}{\partial y} + gh \frac{\partial Z}{\partial y} + g \frac{n^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^2/s} = 0 \quad (5)$$

式中: t 为时间坐标, s; x, y 为空间坐标, m; H 为水深, m; Z 为水位, m; 其中 $Z = Z_0 + H$; Z_0 为底高程, m; q 为源汇项, m^3/s ; M, N 分别为 x, y 方向上的单宽流量, m^3/s , 其中 $M = Hu, N = Hv$; u, v 分别为 x, y 方向上的平均流速, m^3/s ; n 为糙率; g 为重力加速度, m/s^2 ^[16]。为更好地适应洪泽湖的复杂边界, 采用基于非结构网格的有限体积法对控制方程进行离散, 采用 ADI 法 (Alternating Direction Implicit method, 交替方向隐式法) 进行求解。

在河道入湖口及与洪泛区连接处耦合一、二维洪水演进模型。耦合计算通过补充连接断面处物理量之间的关系 (水位、流量相等) 实现——一维模型为二维模型提供入流量、作为二维模型的控制边界, 二维模型则返回该边界的计算水位给一维模型进行下一时段的计算^[17]。一、二维模型根据不同的水量交换方式通过若干个耦合点进行动态连接, 控制方程如下:

$$Z_1 = Z_2 \quad (6)$$

$$Q_1 = \int u_k h_k d_k \quad (7)$$

式中: Z_1, Z_2 分别为一、二维模型在连接断面处的水

位, m ; Q_1 为一维模型在连接断面处的流量, m^3/s ; u_k 为二维模型在连接断面法向上的流速, m/s ; h_k 为水深, m ; d_k 为一、二模型连接处的断面坐标, m ^[18]。

2.2 河道设置与网格剖分

河道包括上边界流量对应的淮河、怀洪新河、新汴河、濉河、徐洪河等 128 条实测河道, 322 条圩内河道, 如图 1 所示。断面包括 128 条实测河道的 953 个实测断面。采用适应性较强的非结构不规则三角形网格对计算区域进行剖分, 共剖分网格 85 894 个, 网格大小随地形地势和阻水建筑物的分布灵活确定, 其中洪泽湖周边滞洪区的网格面积不超过 0.1 km²; 湖区网格适当放大, 面积不超过 1 km²; 阻水建筑物作为网格边界, 对对应区域网格进行适当加密, 如图 2 所示。

2.3 边界条件设置

将洪泽湖湖区与周边滞洪区作为一个整体, 其中, 洪泽湖周边滞洪区外围上游河道入流过程以及下游三河闸、二河闸、高良涧闸的出流过程等作为模型外边界条件, 洪泽湖与周边滞洪区之间的水量交换、滞洪区内的圩区、计算区域内的阻水建筑物与过水建筑物、闸门调度等作为模型内边界条件。在通湖河道与洪泽湖湖区、进洪口门与滞洪区、实测河道与滞洪区连接处设置了总计 446 个耦合点。

2.4 参数率定与模型验证

模型参数主要有地形糙率系数与干湿边界。一维河道糙率根据项目区地形、地貌和河道实际情况初定; 二维模型中各类下垫面的糙率按照《洪水风险图编制技术细则》和《水力计算手册》进行初定。为保证模型计算的连续性与稳定性, 设置了干湿边界, 水深阈值参考洪泽湖地区已有研究^[17]进行初定。

采用 1991、2006 两个实况年的降雨资料和洪泽

湖的出湖水位资料对模型参数进行率定。糙率率定结果见表 1, 干湿边界取值如下: Drying depth = 0.005 m, Flooding depth = 0.05 m, Wetting depth = 0.07 m。

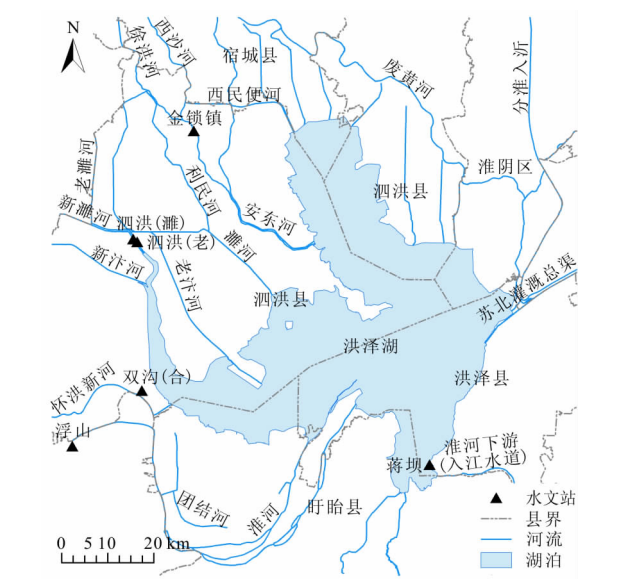


图 1 洪泽湖地区河道图

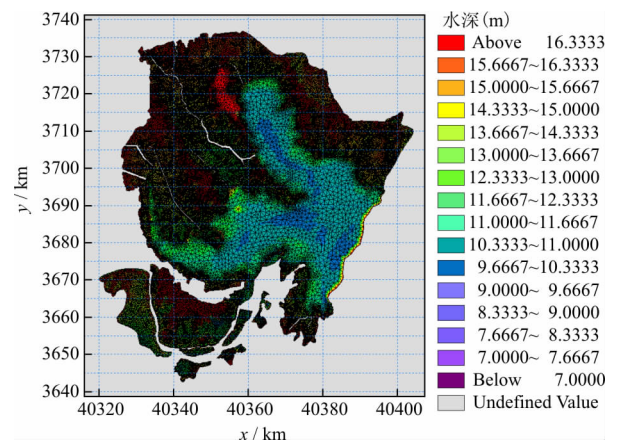


图 2 洪泽湖地区网格剖分图

表 1 不同下垫面糙率取值

河道	水面	稻田	荒草地	林地	绿地	高草地	旱地	园地	居民地
0.023 ~ 0.033	0.022 ~ 0.035	0.075	0.030	0.130	0.040	0.050	0.030	0.040	0.300

采用 2003 和 2007 年的降雨、洪泽湖出湖水位及蒋坝、老子山、临淮头、香城庄、尚嘴 5 个水位站的水位资料对模型进行验证。由图 3 可知, 各站计算水位与实测数据基本一致, 2003 年平均水位差的绝对值分别为 0.06、0.09、0.08、0.09、0.084 m, 最大水位差的绝对值分别为 0.17、0.17、0.16、0.15、0.16 m; 2007 年平均水位差的绝对值分别为 0.07、0.05、0.073、0.079、0.09 m, 最大水位差的绝对值分

别为 0.18、0.18、0.17、0.15、0.15 m, 均小于《细则》规定的最大误差 0.2 m, 水位变化趋势、最高洪水位到达时间基本一致, 基本能够反映模型模拟的合理性、准确性。以蒋坝和老子山站为例, 模型验证结果如图 3。

模型计算结果包含计算范围内河道水位线或某一点的水位、流量以及洪水水深、淹没历时、流速等在区域面上的动态分布情况。以“现状工况, 淮河

100 a 一遇洪水,滞洪区同时破坏滞洪”计算方案为例,分别截取某时刻的最大水深和最大淹没历时分布图,如图4。在GIS中对计算结果进行统计得到此方案下洪水最大淹没面积为950.197 km²,最大淹没历时为40 d。其中,最大水深为<0.5 m、0.5~

1 m、1~2 m、2~3 m、>3 m 的区域面积分别为86.316、145.810、285.538、176.120、256.413 m²;最大淹没历时为<12 h、12 h~1 d、1~3 d、3~7 d、>7 d 的区域面积分别为0.663、1.201、7.564、17.289、923.48 m²。

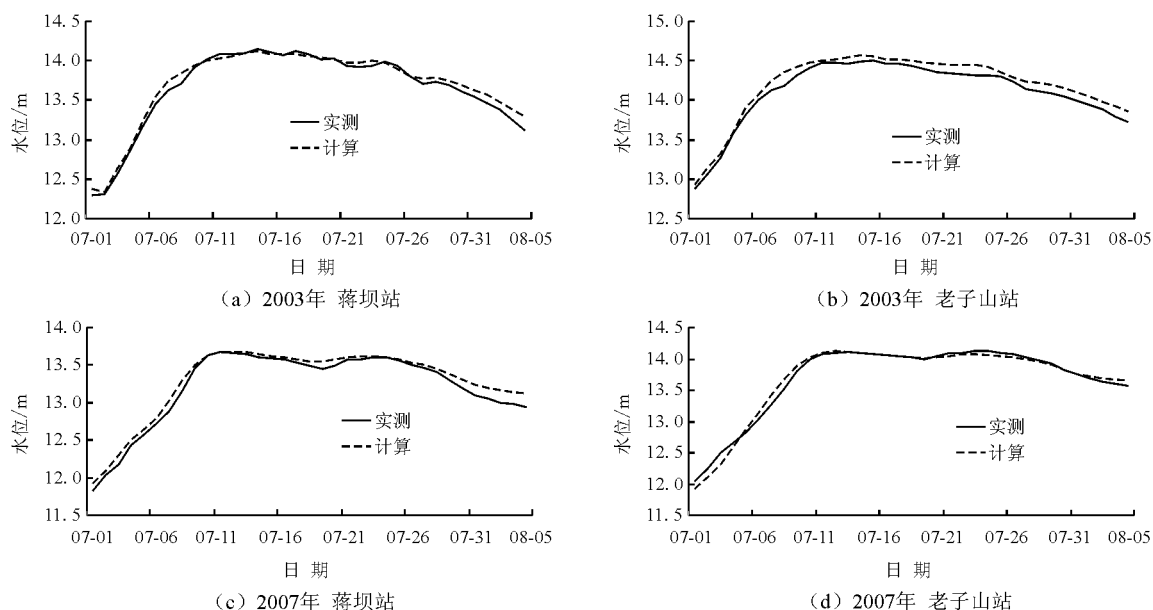


图3 水文站水位实测值与计算值对比

3 系统开发

基于WebGIS开发的系统具有分布式、互操作及数据/服务集成等特点,响应迅速、安全性高、数据整合度好、跨平台性能强,开发者运用ArcGIS Server提供的服务可搭建轻量级的高性能GIS应用程序^[19]。

系统充分利用WebGIS强大的空间表达、空间分析及动态预测功能,管理GIS要素、将地图或地理处理任务嵌入系统中,通过浏览器实现与用户的动态交互,为决策者展现更加全面、直观、有效的洪水综合信息。选用WebGIS 2.0(包括Web服务,REST架构与Ajax技术等)技术进行开发。利用ArcGIS Server将地理信息发布为各类服务,借助ArcGIS API for JavaScript调用这些服务,从而在系统中集成地图及GIS功能。当用户访问地图数据时,GIS服务器接收Web服务器发送的请求,通过接口驱动洪水模型进行计算并更新数据库,通过GIS服务器对模型实时运行结果进行可视化表达。系统工作流程如图5所示。

3.1 系统结构设计

采用结构化软件设计方法,将系统自上而下划

分为应用表现层、核心服务层和数据层3个层次。为使各模块与模型实现独立开发与有效协同,避免数据格式的反复转换,采用纯B/S(浏览器/服务器)架构与松散耦合结构——利用GIS服务进行地理信息处理及空间分析,利用洪水模拟模型进行数值计算^[20]。系统在信息数据库和模型数据库的支持下,以GIS服务作为内核支撑,通过核心服务层各模块进行洪水计算、数据处理和辅助决策后,在应用表现中展示地图、模型结果和统计分析数据。系统结构设计如图6所示。

数据层集成了地理信息数据库、基础信息数据库和洪水模拟模型。将水文模型、水动力学模型与基础信息数据库及地理信息数据库进行连接,模型与数据库之间通过服务层提供的接口进行信号传输。

核心服务层负责请求的转发、业务逻辑的调用和事务的管理,提供各类服务接口和数据标准,分为数据管理模块、洪水模型接口模块、Web信息发布模块、GIS信息处理模块与系统配置模块等。通过REST架构的HTML数据流来实现跨平台、跨模块之间的数据支持,是系统数据处理的核心、各功能模块互操作的媒介。使用不同开发环境(My Eclipse、Visual Studio等)和不同程序语言(Java、JavaScript、

HTML、CSS、C#、Python 等)开发的各模块通过 Web 服务完成服务发布与中转。

应用表现层负责系统与使用者的交互,提供了统

一的消息接口,支持多种浏览器向核心服务层推送请求以操作系统工作流。从功能上划分为信息管理界面、模型设置界面、结果展示界面和损失统计界面。

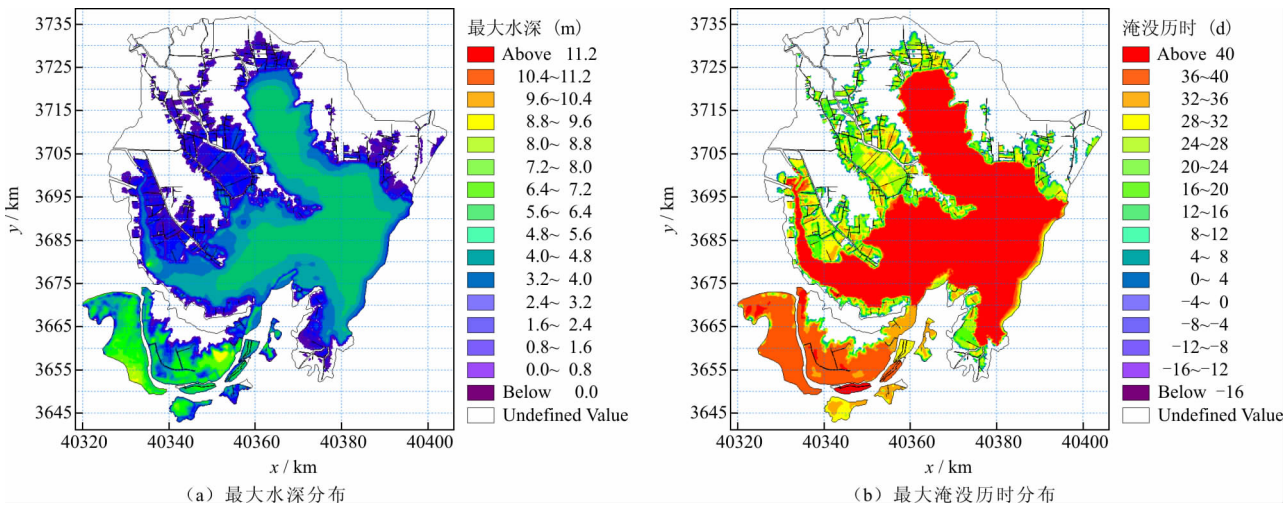


图 4 某时刻最大水深、最大淹没历时分布图

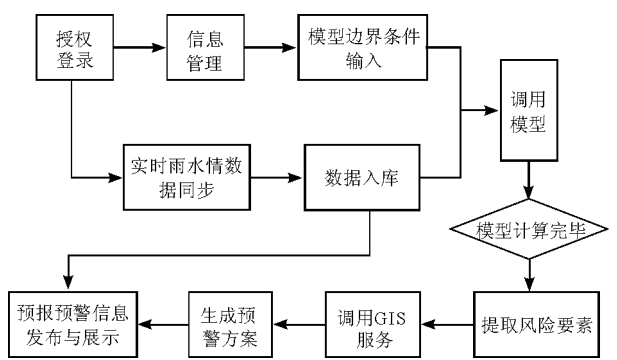


图 5 系统工作流程

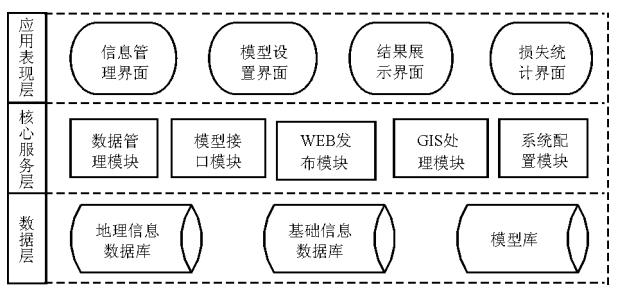


图 6 系统结构设计

3.2 数据库设计

在统一数据格式与规范下,根据数据入库方式,将数据库分为基础信息数据库和地理信息数据库。采用 Oracle 10g 作为数据库管理平台。

基础信息数据库从内容上划分为洪水数据库和算法数据库。洪水数据库主要存储洪泽湖地区的数据资料包括:(1)历史水文、社会经济和洪灾损失资

料等;(2)实时雨水情数据,包含气象站雨量数据、降水预报数据与水文站实时水位、流量数据等;(3)模型边界、参数等。这些数据可自动或人工修改新增资料入库。算法数据库包含模型计算所需算法和数据图形转换公式等,用来支撑对数据的分析和计算,以及数据和可视化元素之间的映射转换^[21]。

借助 GIS 中间件创建 Oracle 平台下的企业级地理信息数据库,主要存储雨量站、水位站、溃口等矢量点数据;道路、线状水系、圩区及堤防等矢量线数据;行政区划、面状水系、土地利用和洪水风险要素等矢量面数据。其中,洪水风险要素按网格存储,要素字段包括网格编码、最大淹没水深、最大淹没历时、洪水最大流速、洪水到达时间和标记字段。

3.3 功能设计

系统的功能目标是:滚动监测天气变化,预报站点雨水情,快速发布洪水预警信息,并提供情景模拟功能,为决策者提供关于告警事件的综合信息服务。在实现基本的流域概况、气象、基础地理信息和静态洪水风险图管理的基础上,预报预警系统重点实现了以下功能:

(1) 雨水情预报信息查询。读取数据库中实时更新的站点雨水情数据,提供点选、下拉菜单、文本输入与地图交互检索等形式供用户查询区域内各雨量站当日、近 3 d 和近 7 d 降雨量;各水文、水位站的当前水位、流量。查询结果以统计图表和 GIS 图形等方式展现,站点水情查询界面如图 7 所示。

(2) 洪水淹没信息查询。从模型实时计算结果

中提取洪水淹没信息,在 GIS 图中以分级色彩显示各网格最大淹没水深。洪水风险要素的最大淹没水深与最大淹没历时等特征值可点击 GIS 图进行查询,界面如图 8 所示。

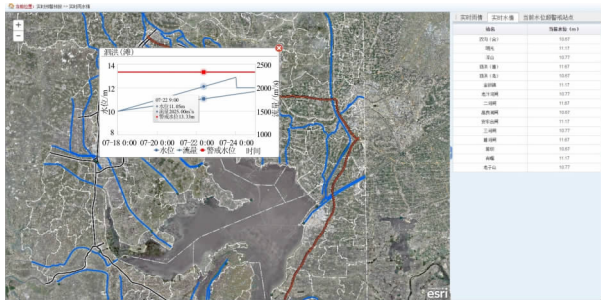


图 7 站点水情查询界面

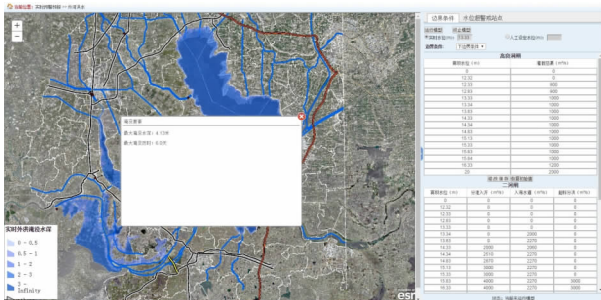


图 8 洪水淹没信息查询界面

(3) 超标洪水预警。用户设置边界条件,包括初始水位、淮河入湖流量过程为主的上边界和高良涧闸、二河闸、三河闸 3 个下边界的水位流量关系后,Web 服务器远程驱动模型进行实时或模拟洪水计算后发布超标洪水预警信息。可采用实时预报结果作为初始值,也可手动在线逐单元或离线模板上传修改。洪水模拟操作界面如图 9 所示。

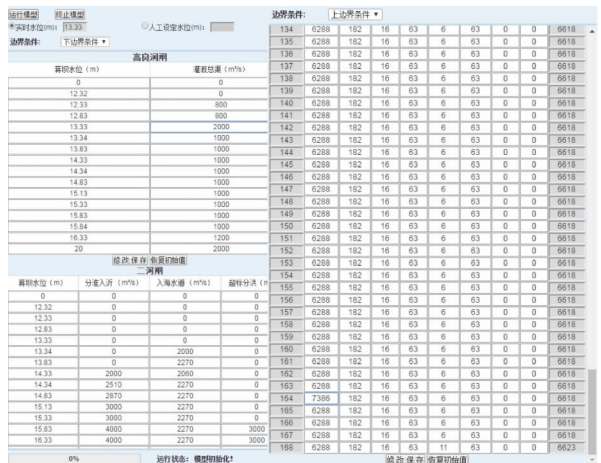


图 9 洪水模拟操作界面

当预警关注点的水位超过警戒值时站点旁将循

环缩放警戒动画并显示告警站点的名称、水位警戒值及实时最高水位,如图 10 所示。

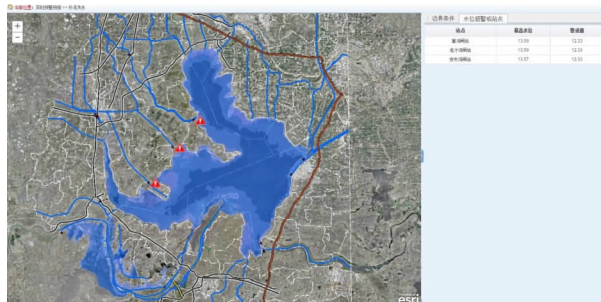


图 10 超标洪水预警界面

4 结 论

洪泽湖地区是我国雨洪灾害多发地区和重点防洪区域,被列入全国重点地区洪水风险图编制项目,洪水预报预警系统研究是该项目重要组成部分。研究得到如下结论:

(1) 构建的一维河道与二维湖面及滞洪区相耦合的洪水演进模型,经验证,与历史洪水拟合较好,用于洪水水位、流量预报是适宜的。

(2) 建立的洪泽湖地区雨、洪、灾信息库,实现了对水雨情报和洪水风险多维数据的一体化管理,是今后进一步提升防洪减灾预报预警水平的基础。

(3) 基于 WebGIS 2.0 技术,依托洪水信息库与模型开发了洪水预报预警系统,实现了对洪泽湖地区未来 7 d 内降雨与洪水的实时预报及洪水淹没和超标洪水预警信息的可视化展示,有助于决策者快速、准确地预估洪水情势,制定避洪策略。研究证明,WebGIS 是一种高效的数据管理和分析手段,在防灾减灾、洪水预报预警等方面具有良好的应用前景。今后应就 WebGIS 在洪水预报预警方面开展进一步研究,开发合适的系统平台、功能模块、网络拓扑结构等。本项成果完成时间不长,因此也需要进一步检验、修改完善和提升。

参考文献:

- [1] 周 洁,董增川,朱振业. 洪泽湖周边滞洪区洪水风险分析[J]. 水电能源科学,2017,35(4):63-66.
- [2] 何孝光,苏长城,贾 健. 洪泽湖周边滞洪区分级运用研究[J]. 江苏水利,2007(4):38-39.
- [3] 万洪涛,程晓陶,胡昌伟. 基于 WebGIS 的流域级洪水管理系统集成与应用[J]. 地球信息科学学报,2009,11(3):363-369.

(下转第 157 页)

所以,此方案是一新型的可行性较高的调水方案。

参考文献:

- [1] 侍克斌,岳春芳,何春梅,等. 西部南水西调前期研究——疆外跨流域调水可行性初探[J]. 新疆农业大学学报,2012,35(1):1-6.
- [2] 李波. 新形势下新疆水资源开发利用应对策略研究[J]. 水利规划与设计,2015(9):35-39.
- [3] 罗敏,古丽·加帕尔,郭浩,等. 2000-2013年塔里木河流域生长季NDVI时空变化特征及其影响因素分析[J]. 自然资源学报,2017,32(1):50-63.
- [4] 岳春芳,侍克斌,曹伟. 新疆水资源开发方式的利弊分析[J]. 节水灌溉,2014(7):60-62.
- [5] 邓铭江,周海鹰,徐海量,等. 塔里木河下游生态输水与生态调度研究[J]. 中国科学(技术科学),2016,46(8):864-876.
- [6] 葛晓音. 如何实现塔里木盆地水资源的高效利用[J]. 黑龙江水利科技,2017,45(4):123-124.
- [7] 艾萨江·麦麦提,谢葆. 若羌县水资源合理利用分析[J]. 地下水,2015,37(4):51-52.
- [8] 阿布都热合曼·哈力克,卞正富,瓦哈甫·哈力克. 且末绿洲生态安全及其维护[J]. 干旱区资源与环境,2009,

23(8):14-20.

- [9] 胡雪瑛,武胜利,刘强吉,等. 54年来和田地区潜在蒸散量的变化特征及影响因素[J]. 水土保持研究,2017,24(1):145-150.
- [10] 徐智敏,高尚,崔思源,等. 哈密地区煤田生态脆弱区保水采煤的水文地质基础与实践[J]. 煤炭学报,2017,42(1):80-87.
- [11] 石司宇,田继军,王长江,等. 新疆吐哈盆地页岩气富集条件与有利区预测[J]. 中国地质,2016,43(2):564-574.
- [12] 杨力行,郑祖国,姜卉芳,等. 南水西调初步设想——兼论水资源的高效利用与合理调配[J]. 八一农学院学报,1995,18(1):36-41.
- [13] 杨力行. 新疆可持续大开发中水利建设的战略构想[J]. 新疆社会经济,2000(2):9-13.
- [14] 何建新,刘亮,岳春芳,等. 南水西调——保护青藏高原气候及生态环境的利器[J]. 水资源与水工程学报,2011,22(4):136-139.
- [15] 王欣,侍克斌,岳春芳,等. 新疆跨区域调水可行性前期研究——怒江调水入疆可行性初探[J]. 水资源与水工程学报,2016,27(3):138-142+147.

(上接第150页)

- [4] 沈晓娟,陈梅. 洪泽湖防洪决策支持系统的构建[C]//2012中国水文学学术讨论会,2012:661-665.
- [5] 姜腾腾. 面向减灾预案的城市内涝灾害情景模拟与辅助决策支持系统研究[D]. 天津:天津理工大学,2016.
- [6] 叶青. 城市暴雨内涝气象监测预警系统的设计与实现[D]. 西安:电子科技大学,2012.
- [7] 刘恒. 中小型水库防洪减灾预报预警关键技术研究[J]. 人民黄河,2015,37(7):37-40.
- [8] 陈吉江,宋立松,毛洪翔. 基于WebGIS的水域保护监视预警系统[J]. 水电能源科学,2011,29(2):136-139.
- [9] 殷坤龙,张桂荣,龚日祥,等. 基于Web-GIS的浙江省地质灾害实时预警预报系统设计[J]. 水文地质工程地质,2003,30(3):19-23.
- [10] 徐帮树,贾超,王育奎,等. 城市防汛预警决策支持系统研究及应用[J]. 山东大学学报(工学版),2011,41(2):167-172.
- [11] 贾超,徐帮树,韩永军,等. 济南城市防汛预警决策支持系统研究[J]. 中国水利,2010(5):42-44.
- [12] 蒙正杰. 钦江流域洪水预报预警系统研究[D]. 南宁:广西大学,2012.
- [13] 宋阁庆. 基于ArcGIS Server的洪水预报与预警系统设

计研究[D]. 兰州:西北师范大学,2009.

- [14] 王召贤. 山洪灾害监测预报系统的研究与实现[D]. 西安:电子科技大学,2013.
- [15] 王丽君. 基于RIA技术的县级山洪预警WEBGIS发布系统[D]. 长春:吉林大学,2014.
- [16] 衣秀勇,关春曼,果有娜,等. DHI MIKE FLOOD洪水模拟技术应用与研究[M]. 北京:中国水利水电出版社,2014.
- [17] 虞邦义,倪晋,杨兴菊,等. 淮河干流浮山至洪泽湖出口段水动力数学模型研究[J]. 水利水电技术,2011,42(8):38-42.
- [18] Smagorinsky J. General Circulation Experiment with Primitive Equations[J]. Monthly Weather Review, 1963, 91(3):99-164.
- [19] 刘光,曾敬文,曾庆丰. WebGIS从基础到开发实践[M]. 北京:清华大学出版社,2015.
- [20] 陈志泊. 数据库原理及应用教程(第3版)[M]. 北京:人民邮电出版社,2014.
- [21] 杨丹,宋英华,洪志坤,等. 洪涝灾害数据可视化预警系统研究[J]. 中国安全科学学报,2016,26(5):158-163.