

文章编号:1672-3961(2011)02-0167-06

城市防汛预警决策支持系统研究及应用

徐帮树, 贾超, 王育奎, 张金存

(山东大学土建与水利学院, 山东 济南 250061)

摘要:由于济南经济增长和城市规模的扩大,城市防洪问题日益突出,在广泛收集济南市地理数据、工情数据、历史水雨情数据和灾情数据基础上,建设水雨情自动采集系统和防汛信息数据库。研究城市洪水仿真模型,预测河道洪水演进过程和低洼地区积水状况。建设了城市洪水预案库,为将来可能发生的汛情提供参考,研究汛情简报自动生成和预警发布机制。基于上述研究,开发了济南市防汛GIS平台,实现实时预报洪水过程及可能造成的淹没情况,为快速决策提供科学依据。

关键词:城市防汛;预警决策支持系统;洪水仿真;预案库;汛情简报

中图分类号:TV877 **文献标志码:**A

Study of urban early-warning decision-making support system of flood control and its application

XU Bang-shu, JIA Chao, WANG Yu-kui, ZHANG Jin-cun

(School of Civil and Hydraulic Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: In recent years, city flood control is too increasingly outstanding with urban economics and scope increasing rapidly in Jinan. The government not only puts emphasis on the engineering measure, but also non-engineering measure development. All kinds of data were gathered including geography data, water facilities, historical rainfall and water data and flood disaster data. Rainfall and water auto-collection systems were built. Predicting the evolving course of river flood and the water-accumulating depth of the low-lying region were based on the urban flood simulation model. Flood control pre-plan database was developed for providing consultation for future analogous flood disasters. Flood briefing and flood issuing mode were studied. GIS flat was developed based on the above-mentioned works for providing decision-making foundations.

Key words: urban flood control; early warning decision-making support system; flood simulation; information pre-plan database; flood briefing

0 引言

随着社会经济的快速发展,城市防洪是目前全世界关注的重大问题。济南市地处黄河下游南岸,泰山山脉以北,数百年来经常遭受暴雨灾害的侵袭,对人民群众生命财产造成严重损害。例如:2007年7月18日17时至22时,济南市遭遇大暴雨袭击,平均降雨量134 mm,市区1 h最大降雨量达到151 mm,2 h最大降雨量167.5 mm,3 h最大降雨量

达到180 mm。济南市绝大多数县(区)因此受灾,直接经济损失达13亿元。1987年8月26日至27日,济南出现罕见的特大暴雨,小清河上游出现了特大洪水。当时的暴雨中心在市区,解放桥最大降雨量340 mm。降雨从8月26日12时起至27日3时止,中间间歇2 h,实际降雨历时13 h。济南市市区平均降雨量达294 mm。这次洪水灾害造成了国家及人民生命财产的重大损失。

济南市由于特殊的地理、气候特点,在防洪方面有不同于国内外(诸如北京、上海、重庆等大中城

收稿日期:2010-09-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50909056,50820135907);教育部科学技术研究重点资助项目(108158)

作者简介:徐帮树(1974-),男,博士,副教授,主要研究方向为岩土工程数值计算及GIS三维分析. E-mail: xubangshu@sdu.edu.cn

市)的特殊性。从气候特点说,济南属暖温带季风气候,夏季降水集中,全年降水的一半以上集中在7、8两个月;从地理特点说,济南是“南高北低一面坡”,而且南有广袤群山承接降水,北有黄河大堤阻隔洪水去路,洪水的唯一出路就是小清河。所以每遇大雨,南部山区的降水形成强大径流顺势奔腾而下,涌入市区,极易发生洪灾。简要而言,济南市在城市防洪方面主要有以下几个特点:①洪水陡涨陡落,历时短,源短流急。发生大暴雨时,洪峰常在2~3 h内发生。②流域面积小,小清河黄台桥之上流域面积321 km²,汇流历史短。③城市下垫面条件特殊,属于半山区性城市。④城区内有腊山分洪工程和小清河城区段综合整治工程。腊山分洪工程建成后,可以减轻兴济河洪水对城区的压力,但城区段综合整治工程建成后,将会发生防洪与景观、通航等的矛盾,增加防洪压力^[1-3]。

近年来,随着济南社会经济的跨越式发展,城市规模也在迅速扩大,城市防洪问题也日益突出,目前的防汛系统已不能适应城市快速发展的要求。本系统立足济南市在防洪方面具有的特点,可及时采集、传送、加工、处理雨、水、工情信息,借助自主研发的洪水预报模型,结合数字化、可视化形象显示,实现实时预报洪水过程及可能造成的淹没情况,为快速决策提供科学依据,以便提前采取有效措施,最大限度地减少洪涝灾害造成的损失。

1 实现的主要功能

系统的研究范围为大辛河入清口以上的小清河流域内城区集水区域。模型外边界北至黄河堤防,西南至二环路,东至大辛河流域边界,总面积273.5 km²。采用数据库、计算机、网络、地理信息系统和通讯等技术,在理论研究的基础上,开发汛情预警决策支持系统平台,主要实现以下功能:全面收集济南市水雨情历史数据、基础地理数据、DEM(digital elevation model)数据、历史灾情数据,建立济南市防汛基础数据库;利用现有的济南市雨量站、水位站等监测站点,实现水雨情信息实时查询、地图显示,掌握当前的防汛态势;研发城区河道洪水预报,道路和街区积水预测等模型,根据当前水雨情信息和气象预报信息,预报济南城区关键河道断面水位、流量变化过程,预报城区易涝低洼地区淹没范围和水深;利用实时或分析的结果,自动给出河道水位、城区积水预警参考等级,并提供人工修正的功能;利用GIS技术集成防洪工程、实时水雨情、城区积水风险分析结

果等信息,提供更直观、准确地信息服务和技术支持。

2 洪水仿真模型开发

本系统采用自主开发的洪水仿真模型。该模型是二维不规则网格水动力学模型,通过求解圣维南方程组实现产汇流与洪水演进的模拟。该模型能够综合考虑城市化过程中流域地形地貌变化及各种防洪排涝工程措施的影响,对江河泛滥、高潮与暴雨内涝等不同类型的洪水及其组合在城市区域的生成、发展和演变过程进行模拟^[4,5]。

2.1 模型基本方程

模型建立在一、二维非恒定流方程的基础上,其二维连续方程是

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = q \quad (1)$$

动量方程:

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial (uM)}{\partial x} + \frac{\partial (vM)}{\partial y} + gH \frac{\partial Z}{\partial x} + g \frac{n^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{H^{\frac{1}{3}}} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial (uN)}{\partial x} + \frac{\partial (vN)}{\partial y} + gH \frac{\partial Z}{\partial y} + g \frac{n^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{H^{\frac{1}{3}}} = 0 \quad (3)$$

式中, H 为水深; Z 为水位; q 为源汇项,模型中代表有效降雨强度; M 、 N 分别为 x 、 y 方向的单宽流量; u 、 v 分别为流速在 x 、 y 方向的分量; n 为糙率系数; g 为重力加速度。

一维非恒定流基本方程为

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial l} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial H}{\partial l} = -gAS_l \quad (4)$$

式中, Q 为流量; A 为计算断面的过水面积; S_l 为摩擦阻坡降。

产流系数按空间地表的不同情况线性内插,设在基本不透水区域产流系数为0.9,天然植被集水区域为0.5,其余部分按不透水面积比例线性内插,其计算基本公式为

$$\text{CIM} = 0.5 + (0.9 - 0.5) \times A_{XY} \quad (5)$$

式中,CIM为产流系数; A_{XY} 为不透水面积百分比。

2.2 边界条件处理

2.2.1 降雨边界条件

考虑到模型要为防汛预警决策提供支持的需求,本次研究所开发的暴雨洪水仿真模型能够适应实际降雨时空分布不均匀的特征,将济南市城区雨量站的空间位置分布信息和不同时段降雨量作为输入条件进行模拟计算。

模型采用距离加权反比插值法,将离散的雨量站降雨量通过处理,得到模型每个网格形心处的降雨数据。按照反距离加权法,假定离网格形心越近的雨量站其降雨量数据对网格的影响越大,且离网格点(A,B)最近的*N*个雨量站到网格形心(X_c, Y_c)的距离有关。

设*N*个雨量站的坐标为(X_i, Y_i) ($i = 1, \dots, N$),令雨量站(X_i, Y_i)到网格形心(X_c, Y_c)的距离为 D_{ik} ,则有

$$D_{ik} = \sqrt{(X_i - X_c)^2 + (Y_i - Y_c)^2} \quad (6)$$

求出离网格形心(X_c, Y_c)最近的*N*个雨量站到网格形心的距离 D_{ik} ($i = 1, \dots, N$)后,则网格形心(X_c, Y_c)处的估计雨量值为

$$Z_{(X_c, Y_c)} = \frac{\sum_{i=1}^N \left(\frac{Z_i}{D_{ik}} \right)}{\sum_{i=1}^N \left(\frac{1}{D_{ik}} \right)} \quad (7)$$

式中, $Z_{(X_c, Y_c)}$ 为网格形心(X_c, Y_c)处的估计雨量值; Z_i 为雨量站*i*处的观测值。

2.2.2 入口边界条件

研究范围的边界上有多处入流,包括东部小清河干流入口、虹吸干河入口和北太平河入口及南部山区入流。由于在这些入口处或其邻近区域均未设立水文观测站,无法得到模型运行所需的边界处实测水位、流量过程,所以本次研究采用瞬时单位线法对入口边界的洪水过程进行计算,并将边界入流计算模块集成到暴雨洪水仿真模型内。瞬时单位线法所需的相关参数由《山东省水文图集》中查得。

2.3.3 出口边界条件

由于边界出口处无水位-流量关系,故采用曼宁公式推算出口流量:

$$Q = \omega C \sqrt{Ri} \quad (8)$$

式中, ω 为过水断面面积; C 为谢才系数; R 为水力半径; i 为水力坡度。

2.3 模型结构及运行方式

模型由数据前处理、主体计算模块和计算结果后处理3部分组成。根据不同的功能要求,模型可以分为3种不同的运行方式,即验证计算、实时监测

计算和预报计算。

3 洪水仿真预案库建设

本研究在大量收集流域地形、水文气象、基础地理数据等资料的基础上,通过理论研究、数值仿真,结合地理信息技术,建立河流洪水演进模型和城区积水模型,并将模型生成的预案嵌入到防汛决策支持系统中,提高防汛决策指挥过程的前瞻性、及时性和科学性,避免决策失误,提高济南市防汛工作能力。

洪水仿真预案中模拟了多种典型降雨强度、降雨历时下,洪水在地表和市区内河道的流动状况,包括河道内重要断面的流量、水位变化过程和重点积水道路和低洼地区的流速、流向、积水深度等。洪水仿真预案中给出了以下预报、预警信息:①小清河、护城河等河道关键断面上的水位、流量变化过程,突出显示可能发生险情的时间和地段;②城区未来0.5 h、1 h、2 h、5 h、10 h或更长时段内的洪水淹没区域和淹没深度,主要是易发生险情路段的积水深度、积水时间。这些预报、预警结果,以城市地理信息为背景,以风险分布图、动画、直方图、表格等直观形式显示输出,为制定防洪方案提供决策依据。主要进行了如下研究:

(1) 由DEM提取流域水系、划分子流域。

(2) 利用降雨产汇流理论和水动力学理论等,建立物理性分布式水文水动力学模型,模拟城区主要河流和积水区域的洪水涨落过程。

(3) 综合考虑防汛指挥调度工作需求、预案可用性、气象部门天气预报信息特点、济南暴雨洪水特征等因素,制作了以下5类、共计34个洪水仿真预案:①针对红、橙、黄、蓝4色暴雨预警的4个预案,见表1;②历史典型特大暴雨(19620713、19870826、20070718)在当前下垫面条件下的灾情仿真的3个预案,见表2;③基于城市设计暴雨(重现期分别为10年一遇、20年一遇、50年一遇、100年一遇)的4个预案,见表3;④针对中雨、大雨、暴雨、特大暴雨等多种降雨强度等级的18个预案,见表4;⑤针对济南气象局“未来3h降雨定量预报”的5个预案,见表5。

表1 四级预警暴雨预案表

Table 1 The pre-plan of four grade warning flood

预案名称	预案启动阈值	预案编制原则
暴雨蓝色预警	12 h内降雨量将达到50 mm以上,或者已达到50 mm以上且降雨可能持续	降雨过程采用芝加哥雨型模拟,主雨峰位置设计以济南多年暴雨特征为依据,并考虑最不利情形
暴雨黄色预警	6 h内降雨量将达50 mm以上,或者已达50 mm以上且降雨可能持续	
暴雨橙色预警	3 h内降雨量将达50 mm以上,或者已达50 mm以上且降雨可能持续	
暴雨红色预警	3 h内降雨量将达100 mm以上,或者已达100 mm以上且降雨可能持续	

表2 历时典型特大暴雨预案表
Table 2 The pre-plan of classic history flood

预案名称	预案启动阈值	预案编制原则
2007-7-18	7h 降雨达到 142mm 以上且持续	短历时特大强暴雨
1987-8-26	14h 降雨达到 230mm 以上且持续	长历时特大暴雨
1962-7-13	6h 降雨达到 210 mm 以上且持续	短历时特大暴雨

表3 城市设计暴雨预案表
Table 3 The pre-plan of city design flood

预案名称	预案启动阈值	预案编制原则
10 年一遇	2 h 内降雨量将达 82.1 mm,或已达 82.1 mm 以上且降雨可能持续	市政雨型
20 年一遇	2 h 内降雨量将达 97.7 mm,或已达 97.7 mm 以上且降雨可能持续	
50 年一遇	2 h 内降雨量将达 118.8 mm,或已达 118.8 mm 以上且降雨可能持续	
100 年一遇	2 h 内降雨量将达 133.4 mm,或已达 133.4 mm 以上且降雨可能持续	

表4 短期天气预报预案表
Table 4 The pre-plan of shot-date weather forecast

预案名称 降水强度等级	预案启动阈值		预案编制原则
	24 h 降水总量/mm	12 h 降水总量/mm	
中雨	10.0 ~ 24.9	5.0 ~ 14.9	依据气象局发布的未来 12 h、24 h 天气预报,按照降雨强度等级,制作“中雨~特大暴雨”18 个等级的预案。降雨量取用预报区间上限值。降雨过程根据《山东省水文图集》设计。
中雨-大雨	17.0 ~ 37.9	10.0 ~ 22.9	
大雨	25.0 ~ 49.9	15.0 ~ 29.9	
大雨-暴雨	33.0 ~ 74.9	23.0 ~ 49.9	
暴雨	50.0 ~ 99.9	30.0 ~ 69.9	
暴雨-大暴雨	75.0 ~ 174.9	50.0 ~ 104.9	
大暴雨	100.0 ~ 249.9	70.0 ~ 139.9	
大暴雨-特大暴雨	175.0 ~ 299.9	105.0 ~ 169.9	
特大暴雨	≥250.0	≥140.0	

表5 短时定量降水预案表
Table 5 The pre-plan of shot-date and fix quantify rainfall

预案名称	预案启动阈值	预案编制原则
3h_50mm	3 h 内降雨量将达 50 mm 以上,或者已达 50 mm 以上且降雨可能持续。	依据济南气象局发布的“未来三小时降雨量预报”。降雨过程采用芝加哥雨型模拟,主雨峰位置设计以济南多年暴雨特征为依据。
3h_80mm	3 h 内降雨量将达 80 mm 以上,或者已达 80 mm 以上且降雨可能持续。	
3h_100mm	3 h 内降雨量将达 100 mm 以上,或者已达 100 mm 以上且降雨可能持续。	
3h_150mm	3 h 内降雨量将达 150 mm 以上,或者已达 100 mm 以上且降雨可能持续。	
3h_200mm	3 h 内降雨量将达 200 mm 以上,或者已达 200 mm 以上且降雨可能持续。	

4 GIS 平台开发

4.1 系统构架设计

系统平台设计依据“层服务模型思想”,利用分层原理,根据信息表达类型、应用范围、使用层面的不同,将平台的数据和应用资源划分为不同的层次^[6-8]。通过层次划分,每一层实现一种相对独立的功能,这样将庞大的共享平台分解为若干个逻辑平台,这些平台的定义将降低平台的复杂度,为信息共享平台的设计和建设提供清晰的接口,降低信息共享平台认识和建设的难度,为共享平台的建设提供较好的规范蓝本,如图 1。

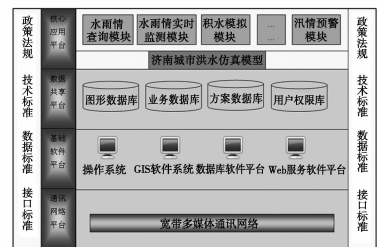


图1 系统架构设计

Fig.1 Design of system structure

该平台分为 4 个逻辑平台:通讯网络平台;基础软件平台;数据共享平台;核心应用平台。各平台的具体职能表现:① 通讯网络平台。通过宽带多媒体通讯网络主要实现 GIS 系统的网络发布及网络查询。通过电话、计算机进行信息查询,并能够通过打

印机、传真机及绘图仪进行查询信息的打印输出。

② 基础软件。该平台主要是布设实现该系统的主要软件平台,主要有操作系统、GIS 软件平台(Arc-GIS 9.2 系列)、数据库软件平台(SQL server 2005)、Web 服务器软件平台(internet information services)。③ 数据共享平台。主要是进行数据及模型的存储。包括图形数据库、业务数据库、方案数据库及用户权限库。④ 核心应用平台。本系统的核心平台,主要实现本系统平台中所包括的主要功能模块,如水雨情查询模块、水雨情实时监测、积水模拟模块、汛情预警模块、地图整饰打印模块等。此外,本系统还包括一系列的标准,如技术标准、数据标准和接口标准。

4.2 系统表现模式的设计

本系统采用 C/S 和 B/S 相结合的模式,主要功能集中于 C/S,部分查询浏览功能放到 B/S 中实现。其中 C/S 模式下的功能模块主要包括 GIS 基本功能、水情查询、雨情查询、工情查询、积水模拟、预案查询、地图打印、设置、系统管理等模块;B/S 模式下的功能模块主要包括 GIS 基本功能、水情查询、雨情查询、积水模拟结果的查看等功能。

4.3 系统功能模块

系统实现的主要功能模块如下:① 水情查询模块可以查询单个或多个测站的实时、时段、日、月、年的水位和流量数据。可以从测站下拉框中选择要查询的测站,也可以直接从地图上选择要查询的测站。② 雨情查询模块可以查询单个或多个测站的实时、时段、日、月、年的降雨量数据。可以从测站下拉框中选择要查询的测站,也可以直接从地图上选择要查询的测站,水雨情查询结果都是以曲线图或柱状图+表格的形式展现,见图 2。③ 工情查询模块可以查看水库、溢洪道、水闸及输水洞的工程指标信息,以及泵站的信息,见图 3。④ 积水模拟模块集成了济南城市洪水仿真模型,不仅可以根据历史降雨数据,再现历史城区淹没情况,还可以根据天气预报数据,预测未来城区淹没情况。利用模型计算的结果,可以查看河道、道路、网格等的最大水深值以及过程线,河道和道路的预警信息,实现城区积水深度变化的动态展示,见图 4。⑤ 预案查询模块提供了 4 场设计暴雨和 three 场历史暴雨可供选择。选择一个预案后,可以查看该预案道路的最大水深渲染图、河道的最大水位或流量渲染图,以及对应的过程线和预警信息。⑥ 汛情预警模块可以根据实时的水雨情,生成汛情简报,为相关人员做决策提供辅助的工具,见图 5。⑦ 典型降雨模块可以查看历史上典型

降雨的水位、雨量数据,并根据雨量数据生成降雨量等值线。查看典型降雨的多媒体信息,如图片、视频。还包括整饰打印模块、状态切换模块、系统设置与管理模块。

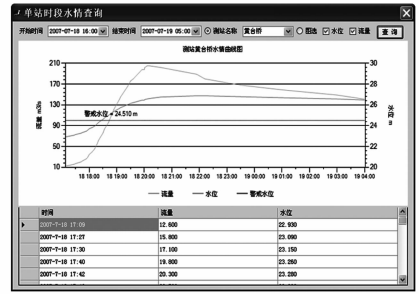


图 2 水情查询
Fig. 2 Water circs query



图 3 工情查询
Fig. 3 Project crics query

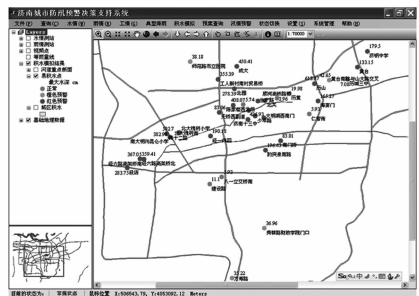


图 4 积水模拟结果查询
Fig. 4 Query of seeper simulate result



图 5 汛情预警发布
Fig. 5 Proclamation of flood warning

5 总结

本文在水雨情信息采集系统建设、城市洪水仿

真模型研发、洪水仿真预案库建设的基础上,采用GIS、数据库、网络、通讯等技术,自主开发了“济南市城市防汛预警决策支持系统”平台。该系统为快速决策提供科学依据,以便提前采取有效措施,最大限度地减少洪涝灾害造成的损失。本文研究成果可为其它城市防汛预警决策支持系统建设提供借鉴。

参考文献:

- [1] 曹升乐, 娄平平. 济南城区洪涝灾害成因分析[J]. 水文学, 2009, 29(2):87-89.
CAO Shengle, LOU Pingping. Cause of urban flood disasters in Jinan City[J]. Journal of China Hydrology, 2009, 29(2):87-89.
- [2] 贾超, 李术才, 曹升乐. 济南城市防洪现状及对策分析[J]. 灾害学, 2009, 24(1):31-34.
JIA Chao, LI Shucui, CAO Shengle. Analysis on situation and strategy of urban flood control in Jinan[J]. Journal of Catastrophology, 2009, 24(1):31-34.
- [3] 于翠松, 王艳玲. 小清河流域的防洪问题及对策[J]. 水利发展研究, 2002, 2(5):39-41.
YU Cuisong, WANG Yanling. Flood controlling and countermeasure for Xiaoqing River[J]. Water information, 2002, 2(5):39-41.
- [4] 李娜, 仇劲卫, 程晓陶, 等. 天津市城区暴雨沥涝仿真模拟系统的研究[J]. 自然灾害学报, 2002, 11(2):112-118.
LI Na, QIU Jinwei, CHENG Xiaotao, et al. Study on simulation system of rainstorm waterlogging in Tianjin City[J]. Journal of Natural Disasters, 2002, 11(2):112-118.
- [5] 李娜, 向立云, 温世民. 蓄滞洪区规划与管理信息系统开发研究——以大黄铺洼为例[J]. 灾害学, 2005, 20(4):101-105.
LI Na, XIANG Liyun, WEN Shimin. Research on planning and management information system of destention basin: taking Dahuangpuwa detection basin as an example[J]. Journal of Catastrophology, 2005, 20(4):101-105.
- [6] 李观义. 基于GIS的洪灾损失评估技术及其应用[J]. 地理与地理信息科学, 2003, 19(4):97-100.
LI Guanyi. Flood loss assessment technique and its application based on GIS[J]. Geography and Geo-information Science, 2003, 19(4):97-100.
- [7] 汪妮, 解建仓, 张永进, 等. 黄河水文信息智能化服务模式的初步研究[J]. 水利学报, 2005, 36(1):100-104.
WANG Ni, XIE Jiancang, ZHANG Yongjin, et al. Study on intelligent service mode of hydrological information on Yellow River[J]. Journal of hydraulic engineering, 2005, 36(1):100-104.
- [8] 相恒茂, 王峰, 陈宝行. 浅析东平湖三维防汛决策支持系统[J]. 山东国土资源, 2007, 23(8):20-22.
XIANG Hengmao, WANG Feng, CHEN Baohang. Study on three dimensional flood controlling and countermeasures supporting system of Dongping Lake[J]. Land and Resources in SHANDONG Province, 2007, 23(8):20-22.

(编辑:孙培芹)