

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2010.01.005

基于 GIS 的水库洪水风险图编制

王 军,梁忠民,施 晔

(河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室,江苏 南京 210098)

摘要:利用水文学方法、水库溃坝洪水计算模型及二维水力学数学模型分别对水库库区洪水风险和水库溃坝洪水风险进行分析,利用 Microsoft Visual Basic 6.0 对 ArcGIS 进行二次开发,将风险信息按照一定的方式自动显示在地图上,从而实现了水库洪水风险图的自动编制,并将该方法应用于江苏省石梁河水库洪水风险图的编制。应用结果表明,通过该方法编制的水库洪水风险图可以为当地防汛部门制订科学合理的防洪调度方案和抗洪救灾措施提供科学依据和技术支撑。

关键词:水库 溃坝洪水 GIS 洪水风险图

中图分类号:TV122.4

文献标识码:A

文章编号:1000-1980(2010)01-0020-06

洪水风险图是一种融合地理、社会经济信息、洪水特征信息,通过资料调查、洪水计算和成果整理,以地图形式直观反映某一地区发生某一频率的洪水后可能淹没的范围和水深,从而可以预知和分析不同量级洪水可能造成的风险和灾害的专题地图,它可以为相关部门的防洪减灾决策提供指导和决策依据^[1-2]。洪水风险图的编制在发达国家已发展较为成熟^[3-4],而在我国的发展却刚刚起步。随着我国治水理念的改变,编制洪水风险图将成为我国防洪减灾迫切需要开展的重点工作之一^[5]。洪水风险图按照编制对象的不同可分为江河湖泊洪水风险图、蓄滞洪区洪水风险图、水库洪水风险图^[1]。其中,水库洪水风险图是反映水库库区及水库溃坝情况下洪水风险信息的专题地图。水库建成后,存在的洪水风险主要有 2 种:(a)库区的淹没风险。因为水库水位一般维持在防洪高水位以下,在防洪高水位以上的库区范围会有农作物等的分布,当发生较大洪水时,农作物等将有可能被淹。(b)水库溃坝洪水对下游区域造成的淹没风险。因此,水库洪水风险图可以分为水库库区洪水风险图和溃坝洪水风险图。

地理信息系统(GIS)是利用计算机强大的计算能力实现自动或半自动存储、处理、分析和管理空间数据的一种技术^[6-8]。它融合了数据库、软件工程、人工智能、网络技术等^[6]主流技术,凭借其强大的空间处理、图形展现、地图处理等众多优点,已经成为很多重要领域的有力工具,并且在洪水风险的自动编制上,GIS 也大有作为。利用 GIS 技术可高效、准确地半自动化自动化编制洪水风险图。同时基于 GIS 进行二次开发,还可以开发出符合用户特殊需求的洪水风险图管理系统。

我国水库众多^[9-11],现有大坝总数超过 8.5 万座,居世界首位。由于我国大坝大都修建于 20 世纪 50~70 年代,设计标准低,工程质量差^[12],而且很多大坝年久失修,带病运行,每逢遭遇大水,必定存在溃坝隐患,并可能导致库区及水库下游地区重大经济损失和生命财产损失。因此,水库洪水风险图的编制对防汛部门了解水库发生重大洪水灾害时可能产生的后果,并制订和采取有效的避险措施具有重要的意义。

随着 GIS 技术的兴起与成熟,基于 GIS 的水库洪水风险图的编制渐渐成为人们研究的热点。本文利用水文学方法、水库溃坝洪水计算模型及二维水力学数学模型分别对水库库区洪水风险和水库溃坝洪水风险进行分析,利用 Microsoft Visual Basic 6.0 对 ArcGIS 进行二次开发,将分析所得风险信息按照一定的方式自动显示在地图上,从而实现了水库洪水风险图的自动编制。

1 水库洪水风险分析方法

洪水风险是指未来可能引起灾害性后果的洪水发生的概率或频率。洪水风险分析的主要内容为(a)引

收稿日期:2008-11-10

基金项目:江苏省创新基金(CX08B_105Z)、国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2007CB714104)、国家自然科学基金(50779013)、教育部博士点基金(20070294018)、高等学校学科创新引智计划(B08048)

作者简介:王军(1982—),男,安徽亳州人,博士研究生,主要从事防灾减灾及水文不确定性分析研究。E-mail:wfmjy@hhu.edu.cn

起灾害性后果的不同频率洪水的特征值或洪水过程 (b)不同频率洪水引起的灾害性后果 ,如淹没范围、淹没水深、淹没历时、洪灾损失等。根据水库洪水风险可能发生的实际情况 ,可将水库洪水风险分为库区洪水风险和水库溃坝洪水风险。

1.1 库区洪水风险

库区洪水风险信息主要是指不同频率洪水对应的淹没范围及淹没水深 ,库区洪水风险分析的步骤如下 : (a)通过水库调洪演算 ,确定不同频率洪水的库区水位过程及淹没水位 ,利用库区水量平衡方程和库容曲线 ,联合求解不同频率洪水库区水位过程。(b)由水位数据和地面高程数据推求库区不同位置的淹没水深。(c)结合数字地面高程模型确定不同频率洪水时水库库区淹没范围及淹没水深分布。

1.2 水库溃坝洪水风险

水库溃坝洪水风险信息包括溃坝条件下水库下游区域的洪水最大淹没范围、最大淹没水深分布、淹没历时分布、流速分布 ,以及不同时刻洪水演进过程的不同水文要素信息等。水库一旦溃坝 ,溃坝洪水会冲出河道 ,四处奔袭 ,这种下垫面地物复杂、水流路径不定的情况需要用二维水力学数学模型进行模拟和分析。而二维水力学数学模型所模拟的溃坝处的入流过程就是溃口发展相应的洪水过程 ,因此要运用二维水力学数学模型 ,首先要分析溃坝溃口洪水过程 ,才能推求出溃坝洪水引起的下游淹没信息。实际上 ,溃坝有瞬间溃坝和渐进溃坝 2 种形式 ,这里仅研究渐进溃坝的洪水风险问题。

1.2.1 溃坝洪水过程计算

1.2.1.1 大坝溃口宽度确定

如有相关调查资料和统计资料 ,则根据资料确定大坝最终溃口宽度 ,如缺乏资料 ,根据《洪水风险图编制导则(试行)》^[1]中的规定 ,溃口形状按梯形断面考虑 ,并参考陆吉康等^[13]提出的经验公式进行计算。

最终溃口平均宽度计算的经验公式为

$$B_m = 0.1803KV_r^{0.32}H_b^{0.19} \tag{1}$$

式中 : H_b ——溃决有效高度(水库大坝溃决时刻水位减坝址断面平均底高程) ; V_r ——水库有效下泄库容 ; B_m ——最终溃口的平均宽度 ,即梯形溃口上下宽度的平均值 ; K ——修正系数 ,漫顶造成的溃决 $K = 1$,管涌造成的溃决 $K = 1.4$ 。

t 时溃口平均宽度 B_t 的计算公式为

$$B_t = B_0 + \frac{(B_m - B_0)t}{T_f} \tag{2}$$

有

$$B_t = \begin{cases} B_0 & (t = 0) \\ B_m & (t > T_f) \end{cases}$$

其中

$$T_f = 0.00254KV_r^{0.53}H_b^{-0.90}$$

$$K = 1.0 \sim \frac{H_b + 15.3}{H_b}$$

式中 : B_0 ——初始宽度 ; T_f ——溃口发展历时 ; t ——溃口时间。

1.2.1.2 大坝溃口底高程确定

在溃口发展历时 T_f 内 ,大坝溃口底高程是不断变化的 ,假定在溃口发展历时 T_f 内 ,大坝溃口纵向按线性比例扩大 ,则溃口底高程

$$h_b = \begin{cases} h_d - (h_d - h_{bm})\left(\frac{t}{T_f}\right)^{\rho_0} & (0 < t \leq T_f) \\ h_{bm} & (t > T_f) \end{cases} \tag{3}$$

式中 : h_b ——溃口底高程 ; h_d ——坝顶高程 ; h_{bm} ——最终溃口底高程 ; ρ_0 ——反映溃口非线性程度的参数 ,取值范围为 $1 \leq \rho_0 \leq 4$ 。

1.2.1.3 溃坝泄流流量计算

假定溃坝断面水流流态与宽顶堰流流态类似 ,则溃坝泄流流量可按堰流公式进行计算 :

$$Q(t) = mB_t\sqrt{2g}H_t^{3/2} \tag{4}$$

式中 : m ——流量系数 ,近似取 0.385 ; H_t —— t 时溃口底部高程以上水头 ,即 t 时库水位与 h_b 的差值。

1.2.2 溃坝洪水沿程演进计算

在求出水库溃坝溃口洪水过程的基础上,采用二维水力学数学模型进行水库溃坝洪水的沿程演进计算,以推求溃坝洪水在下游区域形成的淹没水深、淹没范围、流速流量分布、淹没历时等风险信息。

二维水力学数学模型由连续方程和水流沿 x 和 y 方向的动量方程组成。连续方程为

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial (uh)}{\partial x} + \frac{\partial (vh)}{\partial y} = 0$$

(5)

动量方程为

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial z}{\partial x} + g \frac{n^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} = 0$$

(6)

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial z}{\partial y} + g \frac{n^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} = 0$$

(7)

式中: t ——时间; n ——曼宁糙率系数; u, v —— x, y 方向的流速; z, h —— (x, y) 处的水位与水深;

$g \frac{n^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}}, g \frac{n^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}}$ —— x, y 方向的水流运动阻力。

二维水力学数学模型的求解步骤如图 1 所示。

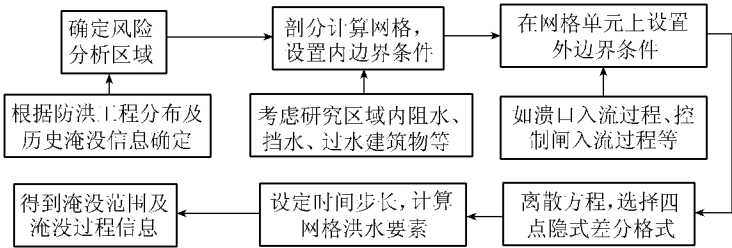


图 1 二维水力学数学模型的求解步骤

Fig. 1 Generic steps for solving two-dimensional hydraulic model

2 GIS 支持下水库洪水风险图编制方法

由于水库风险分为库区洪水风险和水库溃坝洪水风险,因此分析时二者要分别进行考虑。如果要使库区洪水风险图能够反映洪水风险信息,则需要绘制不同频率设计洪水的库区淹没范围图和淹没水深分布图。由于洪水的到达时间、淹没历时、淹没水深变化过程等信息是防汛部门组织民众避险的重要依据,所以水库溃坝洪水风险图需包括最大淹没范围图、最大水深分布图、最大流速分布图、到达时间分布图、淹没历时分布图以及溃坝洪水演进过程中不同时刻的淹没范围图、淹没水深分布图、流速分布图、流向分布图等。以上各种洪水风险图需采用一定的颜色标注才可以清晰地反映洪水风险信息。根据《洪水风险图编制导则(试行)》^[1]的规定,采用灰(RGB:128 128 128)、蓝(RGB:0 0 255)、绿(RGB:0 255 0)、黄(RGB:255 255 0)、橙(RGB:255 165 0)、红(RGB:255 0 0)6种颜色分别标注5年一遇、10年一遇、20年一遇、50年一遇、100年一遇、1000年一遇洪水风险区域及最大淹没范围。其他洪水风险图用相应淹没范围的颜色分级标注。同时,各洪水风险图层只有与防洪工程分布图、水系图层、地形图层、行政区划图层等叠加显示,才能为防汛管理提供依据。

各种GIS软件都具有图层渲染功能,为了实现洪水风险图的自动编制,笔者采用世界GIS领袖ESRI公司的ArcGIS桌面软件处理原始空间数据,利用ArcObject(AO)提供的高层开发控件和组件以及可视化开发语言VB进行应用程序开发。洪水风险图编制的技术路线为:

- a. 利用AO提供的接口(ILayer)新建一个用来存储各频率设计洪水或溃坝洪水淹没信息的洪水风险图层。
- b. 对新建图层进行网格剖分。需要指出的是,剖分网格时要充分考虑研究区域内的阻水建筑物、挡水建筑物、过水建筑物等复杂边界条件。计算网格中的地形信息即高程值是计算的基础,因此剖分网格时要融合对应网格的高程信息。可以根据资料实际拥有情况,通过对DEM、高程点、等高线的处理来获得计算网格的高程信息。完整洪水风险原始图层,可以是矢量格式的,也可以是栅格格式的。
- c. 将洪水风险分析计算得到的各个网格的洪水风险信息,包括最大水深、最大流速、到达时间、淹没历

时、洪水演进过程中不同时刻的淹没水深、流速等 , 分别作为洪水风险图层的一个属性信息写入该图层属性表的相应字段中。

d. 针对不同的洪水风险图 , 利用 AO 的图层描述接口(IRenderer) 颜色方案接口(IcolorRamp) , 并按照设定的色彩方案 , 以属性表中相应字段的取值进行分类即可对该图层进行渲染 , 从而实现洪水风险图层的自动编制。

e. 将渲染完毕的洪水风险图层与其他基础图层进行叠加 , 即可得到相应洪水要素的洪水风险图。洪水风险图可以通过开发的应用程序查看 , 也可以通过 ArcGIS 软件查看。

3 水库洪水风险图编制实例

江苏省石梁河水库位于新沭河中游 , 苏鲁两省的赣榆、东海、临沭县三县交界处 , 是一座具有综合功能的大(2)型均质土坝水库。水库按 100 年一遇设计 , 2000 年一遇校核。石梁河水库一旦溃坝 , 对下游的赣榆、东海两县产生极大的威胁 , 并可能使两县遭受巨大的社会经济、生命财产、生态环境等损失 , 同时可能导致下游新沭河堤防溃决并威胁下游的连云港市。因此 , 石梁河水库洪水风险图对相关部门指导当地人民防灾减灾具有重要意义。

3.1 库区洪水风险图

采用上述库区洪水风险分析方法 , 结合石梁河水库实际水文数据 , 分析得到的不同频率洪水库区水位如下 : 50 年一遇洪水库区最高水位为 25.99 m ; 100 年一遇洪水库区最高水位为 26.72 m ; 1000 年一遇洪水库区最高水位为 27.53 m ; 2000 年一遇洪水库区最高水位为 27.86 m。

结合石梁河水库洪水频率分析结果 , 用不同频率最高水位减去库区 DEM , 即可得到库区洪水风险信息 , 按重现期从小到大分别采用不同的色彩方案对相应频率洪水风险信息进行渲染 , 从而得到不同频率洪水库区洪水风险图。库区不同频率叠加淹没范围和 2000 年一遇洪水淹没水深分布分别如图 2 和图 3 所示。

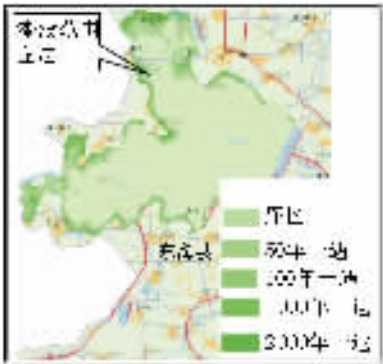


图 2 库区不同频率叠加淹没范围

Fig. 2 Superposed submerged area in reservoir region with floods of different frequencies

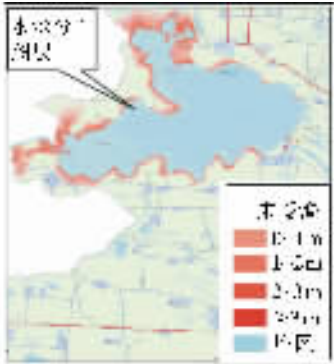


图 3 库区 2000 年一遇洪水淹没水深分布

Fig. 3 Distribution of water depth in reservoir region under flood with return period of 2000 years

3.2 溃坝洪水风险图

根据上述二维水力学数学模型的求解步骤 , 结合石梁河水库实际情况 , 划定研究区域 (图 4) , 并剖分网格。网格剖分采用研究区域内的新沭河堤防、海堤、汾灌高速公路等确定计算边界 , 并从地图上提取该边界。网格剖分采用专业软件 GAMBIT , 根据地形数据的实际情况 , 将网格大小设计为 500 m × 500 m。石梁河水库有主坝和老副坝 , 以老副坝为例 , 其溃坝洪水计算网格如图 4 所示。

用式 (5)~(7) 推求溃坝洪水过程 , 并将此洪水过程作为二维水力学数学模型的入流条件 , 根据下垫面地物分布情况设定糙率 , 运行模型 , 可以求出每一个计算网格的淹没要素值 , 进而可根据溃坝洪水风险分析结果 , 绘制最大水深分布图、最大淹没范围图、最大流速分布图、到达时间分布图以及



图 4 研究区域及老副坝溃坝计算网格

Fig. 4 General situation of study area and calculation grids of dam-break

洪水演进过程任意时刻水文要素的分布图.老副坝溃坝洪水最大水深分布和到达时间分别如图 5 和图 6 所示.

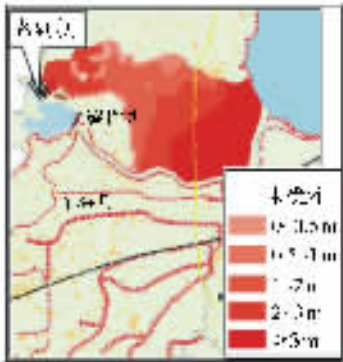


图 5 老副坝溃坝洪水最大水深分布

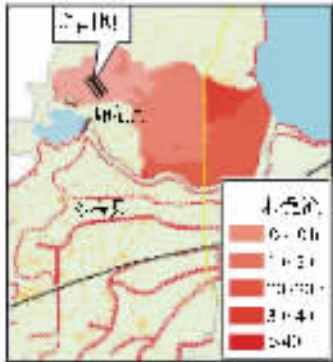


图 6 老副坝溃坝洪水到达时间

Fig. 5 Distribution of maximum water depth of dam-break flood

从图 5 和图 6 可以看出洪水淹没水深分布和到达时间分布.由于研究区域历史上没有发生过溃坝事件,不可能通过实测数据来定量地验证模型计算结果,故定性分析如下.(a)如图 5 所示,洪水最大水深分布符合研究区域内水库附近为丘陵、下游为平原、周边是堤防、从西北向东南方向高程递减的特点,因此该计算结果是合理的.(b)如图 6 所示,由于汾灌高速公路的阻水作用,汾灌高速公路左侧和右侧的洪水到达时间有较为明显的差别,该公路右侧附近有一片颜色较深的区域,从地形信息可知,该处高程较高,所以洪水到达时间较长.因此,该计算结果也是合理的.

4 结 语

本研究基于 GIS 组件式技术,利用 Microsoft Visual Basic 6.0 对 ArcGIS 进行二次开发,并将水文学方法与水力学洪水分析方法相耦合,从而实现了水库洪水风险图的自动编制.应用结果表明,该水库洪水风险图编制方法合理可行,采用此方法编制的石梁河水库洪水风险图可以为连云港市制订科学合理的防洪调度方案和抗洪救灾措施提供科学依据和技术支撑.但是,从石梁河水库洪水风险图编制的研究中也发现了如下一些问题.(a)实际上,水库库容包括静库容和动库容,而动库容的确定历来都是库容计算的难点,因此水库尤其是大型水库库区洪水风险图的编制需考虑动库容并对动库容进行分析,才能使洪水风险图信息更为准确.(b)水库溃坝有瞬间溃和渐进溃 2 种形式,这 2 种溃坝形式在物理机制上有很大差异,形成的泄流过程截然不同,因而洪水演进过程会产生很大差异.由于正确的洪水分析方法是洪水风险图信息准确的基础,是保证洪水风险图具有科学性、合理性、实用性的基础,因此这 2 种溃坝形式的发生条件及泄流公式值得进一步研究.

参考文献:

[1] 国家防汛抗旱总指挥部办公室.洪水风险图编制导则(试行)[K].北京:国家防汛抗旱总指挥部办公室,2005.

[2] 曹东,金东春.洪水风险图及其作用[J].东北水利水电,1998(8):8-10.(CAO Dong, JIN Dong-chun. Flood risk map and its functions[J]. Water Resource & Hydropower of Northeast China, 1998(8): 8-10. (in Chinese))

[3] 马建明,许静,朱云枫,等.国外洪水风险图编制综述[J].中国水利,2005(17):29-31.(MA Jian-ming, XU Jing, ZHU Yun-feng, et al. General introduction of flood hazard mapping in other countries[J]. China Water Resources, 2005(17): 29-31. (in Chinese))

[4] 李娜,向立云,程晓陶.国外洪水风险图制作比较及对我国洪水风险图制作的建议[J].水利发展研究,2005(6):28-32.(LI Na, XIANG Li-yun, CHENG Xiao-tao. Comparison of foreign drawing flood risk map and suggestions for how to draw flood risk map in our country[J]. Water Resources Development Research, 2005(6): 28-32. (in Chinese))

[5] 张志彤.落实“两个转变”大力推进洪水风险图编制工作[J].中国水利,2005(17):5-6.(ZHANG Zhi-tong. Implementing “two transfers” and making great efforts on flood hazard mapping work[J]. China Water Resources, 2005(17): 5-6. (in Chinese))

[6] 李娜.基于 GIS 的洪灾风险管理系统[D].北京:中国水利水电科学研究院,2002.

[7] 王静,王军,梁忠民.基于 GIS 的连云港市区城市洪水风险图管理系统研究[C]//高丹盈,左其亭.中国水论坛第四届学术

研讨会论文集.北京 :中国水利水电出版社 2006 :1112-1116.

[8] 党安荣 ,贾海峰 ,易善桢 ,等.地理信息系统应用指南 [M].北京 :清华大学出版社 2002.

[9] 杨旭.水库洪水风险图的制作 [J].江西水利科技 ,1999(增刊 1) 32-87.(YANG Xu. Work out the flood risk figures of reservoirs [J]. Jiangxi Hydraulic Sciences & Technology ,1999(S1) 32-87.(in Chinese))

[10] 唐永祥 ,夏雨丰.二维溃坝洪水计算方法在洪水风险图编制中的应用 [J].浙江水利科技 ,2004(3) 32-33.(TANG Yong-xiang ,XIA Yu-feng. Application of two-dimensional calculation method for dam breach flood to making flood risk diagram [J]. Zhejiang Hydrotechnics 2004(3) 32-33.(in Chinese))

[11] 姜树海 ,范子武 ,吴时强.洪灾风险评估和防洪安全决策 [M].北京 :中国水利水电出版社 2005.

[12] 李雷 ,王仁钟 ,盛金保 ,等.大坝风险评价与风险管理 [M].北京 :中国水利水电出版社 2006.

[13] 陆吉康 ,林秉南 ,龚振 沅 ,等.棱柱体河道的溃坝波 [J].江西水利科技 ,1985(1) 57-60.(LU Ji-kang ,LIN Bing-nan ,GONG Zhen-yun ,et al. Dam-break flood spread of prism channe [J]. Jiangxi Hydraulic Sciences & Technology ,1985(1) 57-60.(in Chinese))

Mapping of flood risk of reservoirs using GIS technology

WANG Jun , LIANG Zhong-min , SHI Ye

(State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering , Hohai University , Nanjing 210098 , China)

Abstract : Hydrological methods , dam-break flood models and two-dimensional hydraulic models were employed to analyze the risk of flooding in reservoir regions and flooding caused by dam breakage. The secondary development of ArcGIS was performed using Microsoft Visual Basic 6.0 , and risk information was automatically displayed on a map in a certain way so as to realize the automatic mapping of flooding risk of reservoirs. The proposed method was applied to the Shilianghe Reservoir in Jiangsu Province. The results show that the flood risk map obtained with the proposed method can provide a scientific basis and technical support for local departments to compile schemes for flood prevention and operation and to take measures for flood control and disaster mitigation.

Key words : reservoir ; dam-break flood ; GIS ; flood risk map