

基于虚拟地理环境的堰塞湖溃决风险评估^①

朱 军^{②*} 胡 亚^{*} 李 毅^{**} 曹云刚^{*} 胡良喜^{***}

(^{*}西南交通大学地球科学与环境工程学院遥感信息工程系 成都 610031)

(^{**}中国科学院遥感应用研究所遥感科学国家重点实验室 北京 100101)

(^{***}四川安县水务局 绵阳 622651)

摘 要 针对现有堰塞湖溃决风险评估流程不清晰及信息化程度低的问题,基于虚拟地理环境(VGE)技术开展了堰塞湖溃决风险评估及影响分析的研究。提出了 VGE 体系架构,设计了堰塞湖溃决风险评估基本流程,给出了堰塞体危险性判别、溃决洪水演进模拟、堰塞湖风险等级划分等关键步骤及实现方法,并对其进行了详细阐述。建立了 VGE 原型系统,选择案例区域进行了溃决风险评估试验。试验结果证明,上述堰塞湖溃决风险评估方案有助于提高堰塞湖溃坝风险预测与应急处置效率。

关键词 虚拟地理环境(VGE), 堰塞湖, 溃坝, 风险评估, 洪水演进

0 引 言

在堰塞湖安全处置、下游居民安全转移等决策过程中,进行堰塞湖溃坝风险及其洪水影响分析具有重要的意义^[1]。国内外就堰塞湖进行库区淹没分析、灾害损失评估、溃决风险评估、处置流程等方面已开展了不少的研究,如王光谦等开展了汶川地震唐家山堰塞湖泄流过程的数值模拟研究和堰塞湖应急处置计算分析研究^[2,3],陈晓清与程根伟等选择堰塞湖的坝高、最大库容和坝体结构作为分级指标,建立了堰塞湖溃决危险性评估方法^[4,5],杨启贵等对堰塞湖安全分类、规模和等别划分、建筑物级别、洪水标准及安全标准等提出了一些设想^[6],严祖文阐述了堰塞湖天然坝体安全应急评估的基本方法和原则^[7],张煜等基于空间信息技术成果进行了堰塞湖特征参数快速获取及影响分析评估^[8],根据 2008 年四川地震期间堰塞湖研究成果,水利部制定了堰塞湖风险等级划分标准^[9]等。

然而,由于堰塞湖问题十分复杂,涉及的不确定因素较多,现有的研究成果主要集中在历史资料的统计分析和经验判断层面,或运用单一方法进行风险分析,而运用定量与定性相结合的方法进行风险

评价的研究较少^[1],且现有工作多基于手工完成,信息化程度不高,评估效率低下,严重时可能导致错误出现。虚拟地理环境(virtual geographic environment, VGE)和实验地理学的理论方法已经被广泛应用于数码城市、交通管理、虚拟森林、地质灾害、危机管理等多个领域^[10-17]。VGE 是在融合地理信息系统(GIS)的基础上发展起来的、在由空间数据共享提升到地理知识和经验共享的新型地理学语言框架的基础上提出的一门新型地理学语言,是在数据和模型基础上构建的、同时表达地理静态和动态现象的、面向更多用户的沉浸式虚拟环境,它以综合的方法研究地理问题,是一个新知识的生成环境^[18]。VGE 的发展有助于为堰塞湖溃决风险的定量与定性相结合的评估提供一种新的研究思路。本文将侧重开展基于 VGE 的堰塞湖溃决风险评估研究。

1 系统框架设计及关键技术

1.1 系统框架设计

整个 VGE 系统框架被设计成为包括计算机网络层、数据层、核心功能服务层、多维表现层、用户工作层的 5 层结构体系(见图 1)。计算机网络层是建立 VGE 系统的软硬件技术支撑环境,是实现系统的

① 863 计划(2009AA12Z207),国家自然科学基金(41001252),中央高校基本科研业务费专项资金(SWJTU09ZT01)和成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室开放基金(GZ2006-09)资助项目。

② 男,1976 年生,博士,副教授;研究方向:虚拟地理环境,地理信息科学;联系人, E-mail: vgezj@163.com (收稿日期:2010-09-15)

物理载体和前提;数据层包括多种分辨率的数字高程模型和遥感影像数据、人口城镇与交通等专题图数据、水情雨情和防灾工程历史等信息,实现 VGE 服务系统的数据集成与共享,是建立系统的基础,其中影像数据及高程数据为 ArcGIS 支持的 GeoTiff 格式,专题图数据为 Shp 格式,水情雨情和防灾工程信息为数据库表存储;核心服务层是整个系统的核心,提供基础专业支持服务,其基于空间分析、淹没分

析、数据库接口等模型,为堰塞湖溃决损失评估、堰塞体稳定性评估提供基础参数,进而选择查表法或数值分析法进行溃决风险等级评估;多维表现层提供多维感知的虚拟地理场景展现、多种情况下的溃决洪水演进模拟等,以提高系统的空间认知效率;用户工作层直接面向用户,用户通过交互界面可进行三维可视化查询、显示及分析等操作,得到溃决风险专题图与统计表等评估结果。

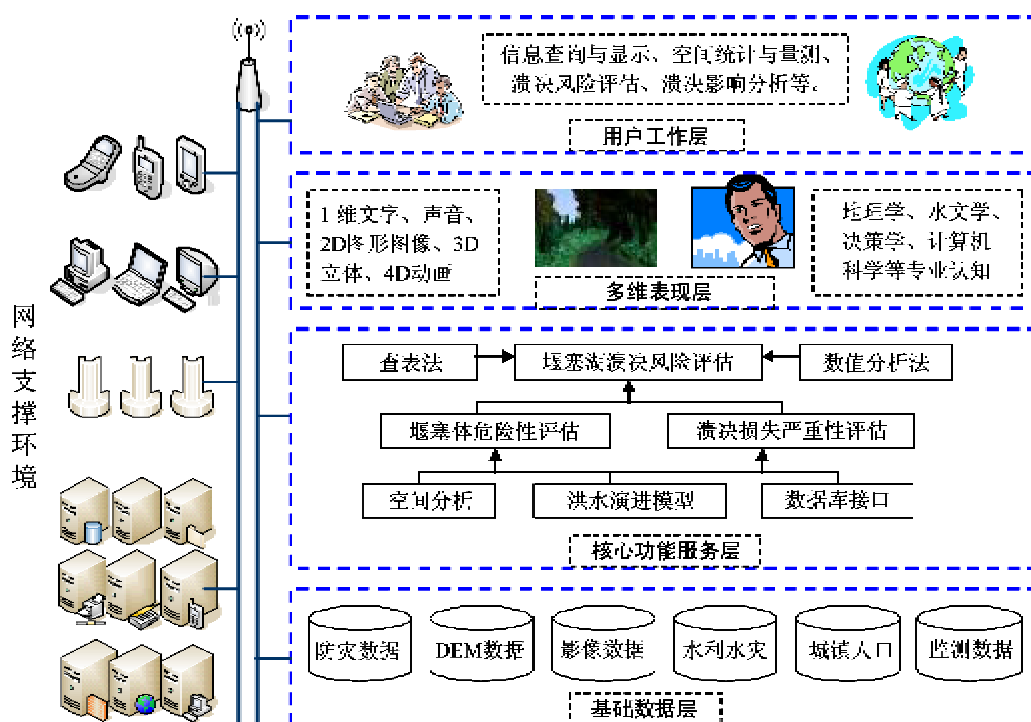


图1 用于堰塞湖溃决风险评估的 VGE 体系结构

1.2 堰塞湖溃决风险评估流程

影响堰塞湖溃决的因素十分复杂,其中最为关键的是堰塞体内因和外因这两方面因素,它直接关系到堰塞体溃决的可能性以及溃决后果的严重性。影响堰塞体的稳定性或危险性的因素选为堰塞体物质组成、堰塞湖库容、堰塞体高度、堰塞湖流域面积 4 个。其中,堰塞体物质组成用于评价坝体松散、自重、渗透稳定性,堰塞湖库容决定堰塞湖最大蓄水能力,堰塞体高度是评价坝遭遇漫顶和管涌破坏时的重要变量,堰塞湖流域面积决定着河道的流量和水能。选取影响溃决后果严重性的评估因子时,主要考虑以人为本,重点考虑一旦溃决后下游受影响的风险人口、重要城镇、公共或重要设施 3 方面因子。论文设计的堰塞湖溃决风险评估流程如图 2 所示,可选择查表法或数值分析法进行溃决风险等级的评估。

查表法评估步骤如图 2 实线箭头指向所示。在初期资料缺乏时,可采用地貌无量纲堆积体指数法 (DBI) 进行堰塞体危险性快速评估,即考虑堰塞体体积、流域面积和堰塞体高度 3 个因素进行判别^[7]。在后期资料齐全时,可选择多指标综合评价体系进行堰塞体危险性评估,其与 DBI 方法相比,考虑了堰塞体物质组成这个因素,忽略了流域面积因素,堰塞湖的危险程度被分为极高危险型、高危险型、中危险型和低危险型 4 类^[6]。在进行堰塞湖溃决损失严重性评估时,根据堰塞湖影响区的风险人口、重要城镇、公共或重要设施等情况,可将堰塞湖溃决损失严重性划分为极严重、严重、较严重和一般四类^[9]。在完成堰塞体危险性判断和溃决损失严重性评价后,就可以参考堰塞湖风险等级划分表确定堰塞湖风险等级^[9]。

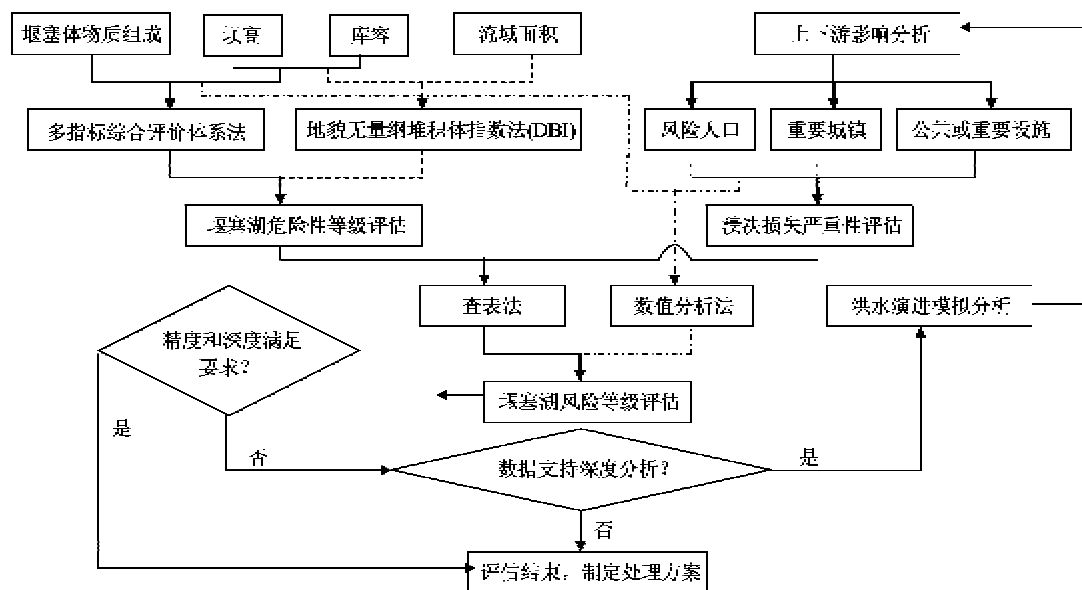


图2 堰塞湖溃决风险评估流程

另外一种评估方法是数值分析法,过程为图2中虚线箭头指向,其基于风险理念,采用模糊数学方法对堰塞湖的风险等级进行评判。数值分析方法主要考虑堰塞体内因和外因两方面因素,选取堰塞体失事可能性和失事后果严重性两方面指标^[9]。堰塞体风险等级评判指标既有定量指标,又有定性指标。定量指标的数值通过调查、计算的方式得到,定性指标的数值需根据掌握的资料和专家经验综合确定。在采用库容、坝高、堰塞体材料组成、风险人口、重要城镇、公共或重要设施作为基本风险评估指标的基础上,专家可依据实际情况增加或减少评估指标。

1.3 洪水演进模拟

洪水演进模拟用于进行溃决损失严重性评估,整个洪水演进模拟计算流程如图3所示。首先进行溃坝参数确定,包括溃决形式、溃口形态、溃决历时、起溃水位等。由于堰塞体溃决方式和溃口形态具有一定的不确定性,实际工作中可依据河谷和堰塞坝形态做大致判断,再根据已有的经验公式做进一步分析确定。一种典型的做法是:首先根据堰塞体岩土结构状况,在1/10溃、1/5溃、1/3溃、1/2溃、全溃、漫顶不溃等溃决方式中拟定几种可能的溃决方式进行计算模拟;然后进行坝址溃决洪水计算溃决流量,包括计算方法选择(数值或经验)、水量计算平衡流量过程、瞬时全溃坝址洪峰流量计算、瞬时局部溃决坝址洪峰流量计算;继而开展溃决洪水演进计算模拟,包括一维非恒定流水模型计算、资料齐全时二维溃决演进数学模型计算、资料缺乏时估算下

游沿程洪峰流量(由于溃决洪水属于非稳定流,溃决洪水分析计算还没有一致认可的方法,在实际应用中,可采用多种方法分析计算各种可能的溃坝洪水);最后根据不同时刻的淹没范围和最大水深,确定淹没人口、淹没城镇和重要公共设施等,进行溃决损失严重性评估。

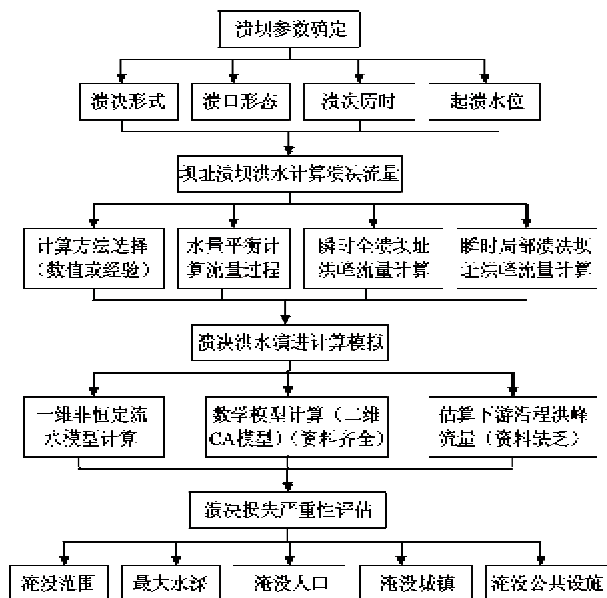


图3 洪水演进模拟计算流程

2 原型系统开发与初步试验

2.1 原型系统开发

VGE 原型系统最好能够含基础的地理信息资料,以满足在堰塞湖形成初期资料缺乏的情况下也

能够进行初步风险评估的要求。数字地球是可以整合海量地理数据的、多分辨率的、真实地球的三维表示,是可以在其上增加与地球有关的数据,实现在不同分辨率水平上对地球进行三维浏览的虚拟地球系统。近年来涌现了大量的数字地球软件及应用,比如 Google 公司的 Google Earth、NASA 的 World Wind、微软的 Virtual Earth、ERSI 公司的 ArcGIS Online 等,这些平台含有大量高精度全球卫星影像和粗略的高程数据,这些可在线访问的数据可用于堰塞湖溃决初步评估。为了有效地集成上述在线资源数据,本文选择开源代码 osgEarth 进行原型系统开发。osgEarth 是一个基于 OSG 开发的实时地形模型加载和渲染工具,基于 osgEarth 可较容易编写插件从在线数字地球服务器端读取数据,并实时地进行处理和显示。

根据上述方案,本文利用 Visual Studio 2005 .NET、OpenGL、OpenSceneGraph 和 osgEarth 开发了一个支持堰塞湖溃决风险评估的三维可视化原型系统。实验硬件环境为 HP6910p 笔记本,其处理器为 Intel 双核 1.80GHz,内存 2GB,显卡为 ATI Mobility Radeon X2300,操作系统为 Windows XP。图 4 为用于堰塞湖溃决风险评估的 VGE 系统,支持在线读取并显示注册获得授权后的 Google Earth 和 Google Map 等数据。

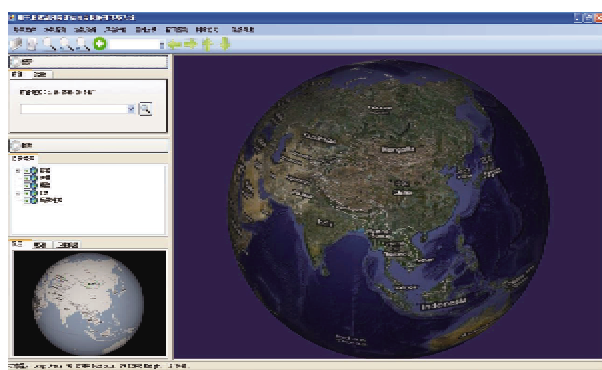


图 4 用于堰塞湖风险评估的 VGE 系统

2.2 案例区域数据

论文选择肖家桥堰塞湖作为案例区域,其位于四川省安县茶坪乡和晓坝镇交界的茶坪河上游,属于龙门山南段茶坪山的东南坡。堰塞湖紧邻汶川地震的发震构造——龙门山主中央断裂带,系地震时茶坪河右岸肖家桥山坡受震动形成滑坡,堵塞河道而成。为了进行堰塞湖风险评估,论文收集了灾后高分辨率的 Ikonos 影像及对应的 1:5 万比例尺数据,

空间范围为 ($104^{\circ}00' \sim 104^{\circ}45'$, $31^{\circ}20' \sim 31^{\circ}50'$),其中,堰塞湖核心区域有灾后拍摄的无人机影像数据,通过处理后可获得 1:1 万比例尺的数字高程模型。这些基础空间数据直接保存为 Geotiff 数据格式,其可直接导入系统用于三维地形环境的构建,同时也可通过系统提供的空间量测功能提取肖家桥堰塞湖的基本几何特征参数,获得堰塞湖库容、堰塞体高度、堰塞湖流域面积 3 个参数。也收集了较完整的安县人口、水系、交通等专信息资料,其可保存为 Shp 格式文件数据,可以直接加载到系统中进行专题图叠加显示与属性查询,用于风险评估的风险人口、重要城镇、重要或公共设施 3 因子的获取。此外,通过现场勘查可获得堰塞体物质组成数据,其保存在后台数据库中。

2.3 风险评估试验

首先进行堰塞体危险性判别,系统量测得到坝高近 70m,宽约 200m,长约 270m,最大库容近 2000 万 m^3 ,茶坪河流域汇水面积约 740 km^2 ,根据坝高、库容、流域面积利用 DBI 计算的结果为 3.4133,显示堰塞体为不稳定。经过实地获取肖家桥堰塞湖坝体组成以碎块石为主,此时可由多指标综合评价体系计算坝体稳定性,计算结果是堰塞体危险性为高风险。其次,进行堰塞湖溃决损失严重性判断,在初期缺乏详细资料时,可粗估肖家桥堰塞湖溃决将影响游晓坝、桑枣、安昌、黄土、花菱、界牌等 6 镇、45 村、7 个社区、11.4 万人生命财产安全,以及沿岸县级 6 个重点企业,成青路、永安路 2 条主要交通干线。采用溃决损失严重性评估模块计算的结果为严重,通过查表法得出,肖家桥堰塞湖风险等级为高风险,查表法整个计算界面如图 5 所示。

也选择用数值分析进行了堰塞湖溃决风险等级评估,对肖家桥堰塞湖选择堰塞体物质组成、堰塞体高度、堰塞湖库容、风险人口、重要城镇、公共或重要设施 6 个评价指标,采用定性与定量相结合的方法确定值域,评估结果如图 6 所示。与查表法相比,数值分析法对指标权重确定影响较大,需由专家综合确定给出。

本试验进行了后期资料丰富的情况下的溃决洪水演进模拟计算,以进一步进行溃决损失严重性评估。以 2008 年 5 月 31 日观测坝前水深 61.5m,蓄水容量为 1400 万 m^3 为例,进行了全溃情形下洪水演进模拟,结果如图 7 所示,约 33min 演进到晓坝镇,约 59min 演进到桑枣镇,约 2h 46min 演进到安昌镇,受直接影响的为下游晓坝和桑枣,而对安昌、



图 5 查表法得堰塞湖溃决风险等级



图 6 数值分析法得堰塞湖溃决风险等级

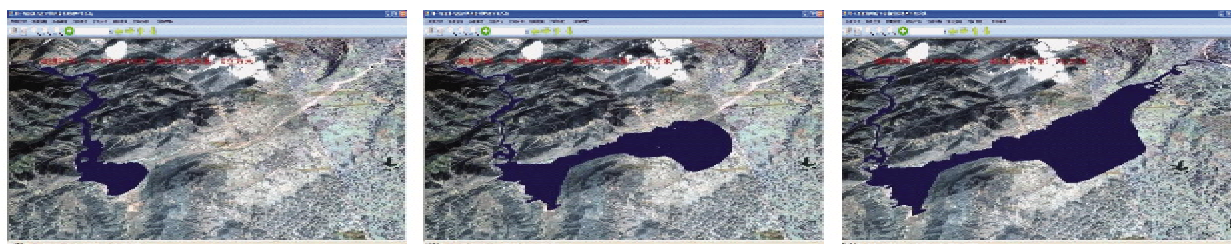


图 7 溃决洪水演进可视化模拟

黄土、花菱、界牌等 4 镇影响较小,洪水在河道中演进。也对溃决可能出现的形式,按 1/10、1/5、1/3、1/2 和全溃 5 种形式进行了溃决洪水演进模拟,以辅助细化制定不同情况下的应急预案。

VGE 原型系统能够集成堰塞湖相关的信息资料,包括遥感影像、数字高程模型 (DEM) 数据和各种专题图数据,提供基本的空间分析与查询功能,支持堰塞湖库容、堰塞体坝高、坝宽等基本信息的空间量测。完整的溃决风险评估流程和交互式界面有助于避免过程繁琐的计算,提高堰塞湖溃决风险评估

效率,减少出错机率。同时,洪水演进模块可支持堰塞湖溃决时空演进模拟计算与可视化分析,模拟不同情况下的溃决影响,进行损失严重性评估和制定应急处置预案。试验结果证明本论文提出的方法具有可行性和有效性。

3 结 论

堰塞湖作为一种自然灾害由来已久,但是由于堰塞湖问题十分复杂,堰塞湖溃决风险和影响预测

过程相关研究主要集中在历史资料的统计分析和经验判断上,定量评价研究方面的系统性研究成果不多,还存在许多关键技术问题亟待研究解决^[1]。本文通过构建 VGE 系统开展堰塞湖溃决风险评估及影响分析的研究。研究结果证明,基于 VGE 进行堰塞湖溃决风险评估方案,具有多方面的优势,包括:(1)集成空间数据与空间分析功能,提供溃决评估需要的基础空间信息;(2)减少繁琐的过程计算,减少出错的几率;(3)有效集成地理模型,开展溃决洪水时空过程模拟与分析;(4)实现可视化显示、查询与分析,能够提高认知效率。下一步打算集成元胞自动机、多智能体系统与洪水溃决模型,构建新型溃决风险评估模型,处理多种因素对溃决现象和时空变化过程模拟的影响,提高评估模型的适用范围和准确率。

参考文献

- [1] 匡尚富,汪小刚,黄金池等. 堰塞湖溃坝风险及其影响分析评估. 中国水利,2008,16:16-21
- [2] 王光谦,钟德钰,张红武等. 汶川地震唐家山堰塞湖泄流过程的数值模拟. 科学通报,2008,53(24):3127-3133
- [3] 王光谦,傅旭东,李铁建等. 汶川地震灾区堰塞湖应急处置中的计算分析. 中国水土保持科学,2008,6(5):1-6
- [4] 陈晓清,崔鹏,程尊兰等. 5·12汶川地震堰塞湖危险性应急评估. 地学前缘(中国地质大学(北京);北京大学),2008,15(4):244-249
- [5] 程根伟,范继辉,程尊兰. 四川5·12地震灾区滑坡堰塞坝溃决灾害风险评估. 西南民族大学学报·自然科学版,2008,34(6):1086-1090
- [6] 杨启贵,周和清. 堰塞湖等级划分及安全标准构想. 2008,39(22):17-18,45
- [7] 严祖文,魏迎奇,蔡红等. 堰塞湖天然坝安全性状评估研究. 水利水电技术,2009,40(2):74-77,81
- [8] 张煜,陈鹏霄,芦云峰. 堰塞湖特征参数快速获取及影响分析评估. 人民长江,2008,39(22):96-98
- [9] 堰塞湖风险等级划分标准. 中华人民共和国水利部,2009年5月发布
- [10] 林珏,黄凤茹,闫国年. 虚拟地理环境研究的兴起于实验地理学新方向. 地理学报,2009,64(1):7-20
- [11] 朱庆,林珏. 数码城市地理信息系统—虚拟城市环境中的三维城市模型初探. 武汉:武汉大学出版社,2004
- [12] MacEachren A M, Cai G, Sharma R, et al. Enabling collaborative geoinformation access and decision-making through a natural, multimodal interface. *International Journal of Geographical Information Science*, 2005, 19(3):293-317
- [13] Batty M, Jiang M. Local movement: agent-based models of pedestrian flow. Submitted to the Centre for Advanced Spatial Analysis (CASA). <http://eprints.ucl.ac.uk/225>, 1998
- [14] 闫国年,夏秋勤,张宏. “没有围墙的GIS实验室”建设研究. 见:香山会议“社会信息化与人地关系”资料集. 北京:香山科学会议第169次学术讨论会筹备组,2001. 18-27
- [15] 吴立新,陈学习,车德福. 一种基于GTP的地下真3D集成表达的实体模型. 中国图像图形学报,2007,12(8):1430-1435
- [16] 毛善君,熊伟. 煤矿虚拟环境系统的总体设计及初步实现. 煤炭学报,2005,30(5):571-575
- [17] 石松. 协同虚拟地理环境中场景建模及群体交互研究——以HLA支持下的虚拟森林环境构建为例: [博士论文]. 福州:福州大学,2008
- [18] 林珏,徐丙立. 关于虚拟地理环境研究的几点思考. 地理与地理信息科学,2007,23(2):1-7

Dam-break risk assessment of barrier lake based on virtual geographic environment

Zhu Jun*, Hu Ya*, Li Yi**, Cao Yungang*, Hu Liangxi***

(* Department of Remote Sensing and Information Engineering, Faculty of Geosciences and Environmental Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031)

(** State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101)

(*** Anxian County Water Authority of Sichuan Province, Mianyang 622651)

Abstract

This study mainly focused on design of a new method for assessment of the dam-break risks of barrier lakes using the virtual geographic environment (VGE) technique to improve the low-informative level status of the present approaches. A systematical and functional VGE framework firstly was proposed, and a flowchart for assessment of the dam-break risks of barrier lakes was designed. Then some key technical steps and their implementations, respectively for assessment of barrier body risks, simulation of dam-break flood routing, analysis of loss severity and risk classification of barrier lakes, were also given and discussed in detail. Finally, a prototype system was implemented to support dynamic dam-break risk assessment of the Xiaojiaqiao barrier lake in Anxian county, Sichuan province. The results prove that the scheme addressed in this paper can improve the efficiency of the forecasting analysis and the emergency response of dam-break risks of barrier lakes.

Key words: virtual geographic environment(VGE), barrier lake, dam-break, risk assessment, flood routing simulation