

基于 WEBGIS 和四库一体技术的三峡库区 滑坡灾害预测预报系统研究

王佳佳, 殷坤龙

(中国地质大学 工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 在三峡库区开展的地质灾害稳定性评价、危险性区划、风险分析以及滑坡灾害预测预报所获成果的基础上, 利用三期灾害地质图编绘、专业监测中崩塌滑坡预报模型和预报判据等资料, 根据气象、库水位变化、人类工程活动、滑坡监测等信息, 开发基于 WEBGIS 和四库一体技术的滑坡灾害预测预报系统。该系统主要包括区域滑坡灾害危险性评价、单体滑坡灾害时间预报、滑坡涌浪计算、灾情评估以及信息实时发布等功能模块, 集成 20 多种适应于库区地质环境规律和滑坡灾害发育特点的模式; 四库一体模式(模型库、方法库、数据仓库、知识库)即以模型为主导, 调用方法, 提取数据, 模型求解, 最后将专家决策结果作为知识源存入知识库。该系统在示范区巴东新城区和典型滑坡八字门和白水河滑坡上进行试运行, 取得较好的应用成果, 该系统的设计与实现为库区地质灾害预警决策和应急指挥提供技术支持, 为库区人民生命和财产安全提供强有力的保障。

关键词: 边坡工程; 滑坡灾害; 预测预报; WEBGIS; 四库一体

中图分类号: P 642

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2014)05 - 1004 - 10

LANDSLIDE HAZARD PREDICTING SYSTEM BASED ON WEBGIS AND INTEGRATED DATABASES IN THREE GORGES RESERVOIR AREA

WANG Jiajia, YIN Kunlong

(Faculty of Engineering, China University of Geoscience, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract: A hazard forecasting system of landslide was developed using WEBGIS and an integrated technique of four databases on the basis of the previous research results in aspects of geological hazard stability, hazardous zonation, risk evaluation and landslide prediction of in the area of Three Gorges Reservoir. The data utilized in the system including the compiled geological maps, the landslide prediction models and the forecasting criterion in professional monitoring, the weather, the fluctuation of the water level in the reservoir, the human activities and the monitored results of landslides. The system has a main function module including the hazard assessment of regional landslide, the temporal forecasting of the individual landslide, the calculation of the landslide surge, and the real time information release. It integrated more than twenty models describing the landslide development of the geological environment in the area of the reservoir. The four databases integrated include a model base, a method base, a data warehouse and a knowledge base. The governing model base calls the method base to extract data from the warehouse base, solves the problems designated and finally deposits the expert's decision as the source of knowledge in the knowledge base. Good results were achieved in the trial runs of the system in the cases of New Badong County, Bazimen landslide and Baishuihe landslide.

Key words: slope engineering; landslide hazard; landslide prediction; WEBGIS; integrated four bases

收稿日期: 2013 - 07 - 04; **修回日期:** 2013 - 10 - 30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41101515; 51009097); 中国地质调查局项目(1212011220173)

作者简介: 王佳佳(1988 -), 男, 2010 年毕业于中国地质大学(武汉)地理信息系统专业, 现为博士研究生, 主要从事地质灾害预测预报与风险评价方面的研究工作。E-mail: keyu0001@163.com。通讯作者: 殷坤龙(1963 -), 男, 现任教授、博士生导师。E-mail: yinkl@126.com

1 引言

三峡库区因其独特的地质环境与地质构造,自古以来就是滑坡灾害的高发地区。自 2003 年三峡库区蓄水以来,在降雨、库水位涨落及人类工程活动等外界因素作用下,库区地质环境受到严重的影响,滑坡灾害频发,并具有频率高、分布地域广以及高突发性等特点。因此,对库区滑坡灾害进行有效的防治是保护库区人民生命财产安全,实现库区社会长治久安及经济、环境和谐发展的十分重要的工作。然而,在采取单一工程治理措施已不能很好地满足库区滑坡灾害防灾减灾任务的情况下,开展基于 WEBGIS 技术的滑坡灾害预测预报系统研究,成为当前滑坡防治研究的突破和创新点^[1-6]。

WEBGIS 是一种典型的 GIS 技术和计算机网络技术结合的产物,是利用万维网技术对传统 GIS 的扩展和完善。它提供广泛的基于 Web 的 GIS 服务,以支持在分布式环境下实现空间地理数据的存储、管理、制图、地理处理、空间分析和地图可视化等 GIS 功能。将 WEBGIS 技术应用在地质灾害预测预报领域,可以很方便地提供各种预测预报模型的网络在线计算以及灾情信息实时发布等功能,能够很大程度上提高预测预报效率和准确性。目前,很多学者结合 GIS 技术进行过滑坡灾害系统研究。张桂荣等^[7]结合实时降雨信息,在浙江省开展了基于 WEBGIS 的区域地质灾害预警预报系统研究;欧阳祖熙等^[8]针对库区地质灾害的特点,讨论了运用 3S 技术与地面监测网相结合监测滑坡和库岸变形的有关问题,介绍了在万州、巫山和奉节等地初步建立的三峡库区库岸与滑坡变形监测及灾害预警系统;王威等^[9]应用三维 GIS 技术,开发了一套滑坡灾害监测预警系统,并在四川雅安地区滑坡灾害中验证了系统的有效性;谢谟文等^[10]基于 ArcGIS Server 平台,结合 SQL Server 数据库,开发适用于滑坡的安全监测网络地理信息系统(GIS)。综上所述,以往基于 WEBGIS 技术的滑坡灾害预警系统,简单地应用了关系型数据库的空间和属性数据存储管理功能,将预警模型与 GIS 平台进行了有效的集成。但是滑坡灾害预警预报是一项应急工作,需要快速、智能的数据通道来提取和分析海量滑坡灾害信息,普通关系型数据库只能单一的存储和提取少量数

据,效率十分低下,并且不能完成面向主题和类型的时空数据的查询检索、快速提取、统计分析以及信息挖掘等任务。

鉴于以上思考,本文介绍的三峡库区滑坡灾害预测预报系统提出了四库一体模式的滑坡灾害防治决策支持的思路。首先,根据预测预报业务流程提取相应的业务数据,构建面向主题的滑坡灾害数据仓库;在搜集资料和理论分析的基础上建立适应于三峡库区的滑坡灾害预警预报模型库和方法库,以模型为主导,调用方法,提取数据仓库的数据,对模型进行求解;最后将专家决策结果作为知识源存入知识库中。三峡库区滑坡灾害预测预报系统是预警指挥系统的重要组成部分,旨在通过对区域、移民新城区及单体灾害点(体)的稳定性评价,对地质灾害的变化趋势进行预测预报,对地质灾害失稳体可能产生的涌浪进行预测,对可能造成的灾情进行预评估。为各级政府和地质灾害主管部门建立一个能够及时发现险情、迅速鉴定险情、高效有序应对和处置险情的技术平台^[11-12]。

2 系统设计

2.1 系统结构

三峡库区滑坡灾害预测预报系统采用基于浏览器/服务器(B/S)的架构。系统建立在基础数据库和数据仓库的基础上,利用模型方法库与专家知识库的相关内容支持,实现基础数据的可靠性检验、提取、转换等操作。预测预报系统的各项模块功能主要包括:区域滑坡灾害空间预测、单体滑坡灾害时间预报、滑坡涌浪计算、灾情评估、滑坡灾害预测预报信息发布等。依据系统的业务流程、数据操作流程以及各模块之间功能实现的逻辑关系,将系统的总体逻辑结构划分为4个层次,即数据采集层、操作处理层、分析应用层以及公共信息数据层。其中,数据采集层主要负责基础数据、监测数据、灾害数据以及管理数据的采集、传输、共享和发布;操作处理层是完成基础数据库到数据仓库的数据可靠性检测、提取与转换,以及面向主题数据仓库的查询检索、统计分析与数据挖掘;分析应用层主要对预测预报业务进行分析处理,并将处理结果通过公共信息数据层来发布和共享。由此构建的系统逻辑结构如图1所示。

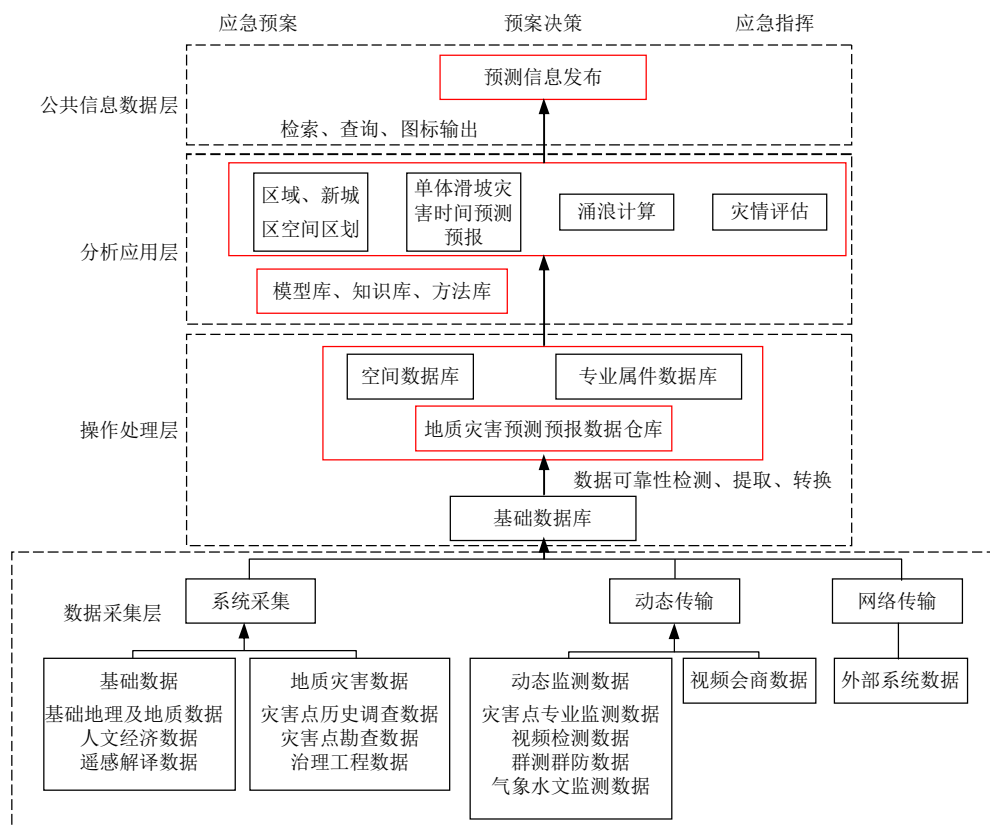


Fig.1 Framework of the system

2.2 四库一体模式

数据仓库。数据仓库(DW)是决策支持系统(DSS)和联机分析应用中原始数据的结构化数据环境，同时也是一个面向主题的、集成的、相对稳定的、反映历史变化的数据集合。它主要研究和解决从数据库中获取信息的问题。

由于地质灾害的突发性和危害性, 预测预报系统要求集成具备一定适应性的方法库和模型库, 能够针对各类地质灾害信息进行快速查询、检索、统计、分析及应用, 同时要求系统具备一定学习能力, 即能够在海量空间和属性数据库中快速寻找和挖掘有用的信息, 并形成知识库来提供快速、准确的决策支持。因此, 数据仓库可以为滑坡灾害预警决策提供时序化、面向主题的多源信息。

数据仓库的建设主要包括：数据获取、数据管理与数据使用。首先收集和分析业务需求，建立数据模型和数据仓库的物理设计；然后从操作型数据库中抽取、净化和转换数据到数据仓库；完善数据查询检索以及数据挖掘功能，并更新数据仓库(见图 2)。数据仓库技术为滑坡灾害预测预报的智能化发展提供了必要的技术基础^[13]。

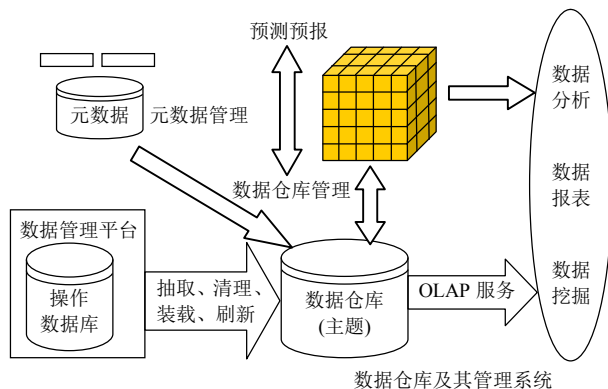


图 2 系统数据仓库结构

Fig.2 Structure of date warehouse of the system

模型库。模型库是预测预报系统的重要组成部分。收集不同类型研究区滑坡数据以及国内外成熟的滑坡灾害预测预报模型。在反复验算和结果对比分析的基础上提取适应于三峡库区滑坡变形破坏规律的模型。系统集成包括了空间预测、时间预报、涌浪计算以及灾情评估等模块中的 20 多个模型。

方法库。方法库是存储方法模块的工具，它包含一些通用性和灵活性都比较强的计算方法，这些计算方法主要分为数据预处理、统计分析、数值模

拟以及通用基本算法等。方法库能够完成与模型库之间的协同工作, 根据业务需求从方法库中调用基本计算方法构建相应业务模型, 一个业务模型可以同时调用多个方法库中计算方法, 不同的模型可以同时调用方法库中同一类计算方法。因此, 方法库提供了一个软件工程重要的思想, 使多源计算方法资源共享成为可能。方法库的构成如图 3 所示。

知识库。知识库是知识工程中结构化、易操作、易利用、有组织知识集群, 是针对某一领域问题求解的, 需要采用某种知识表示方式在计算机中存储、组织、管理和使用的知识片集合。预测预报系统的知识库中包含了滑坡灾害预测预报过程的历史经验和专门知识。这些知识包括该研究领域的相关理论知识、事实数据以及由专家经验得到的启发式知识, 如预测预报有关的定义、定理和运算法则以及常识性知识等。知识库的构成如图 4 所示。

四库一体。系统四库一体模式即通过数据仓库、

模型库、方法库和知识库之间的数据生产、数据交流和数据挖掘过程, 来实现地质灾害预测预报的智能化。数据仓库是包含数据空间维度和时间维度的立体数据, 其本身可以完成一部分的数据挖掘和判断提取的任务; 调用模型库和方法库中的模型和方法, 分析、计算经过数据仓库整理和分析的数据, 得到多样化的预测预报结果; 将多种预测结果存入知识库中, 调用模型库中德尔菲多模型评判方法, 给国内地质灾害预测预报专家发送知识问卷。问卷包含了单次预测预报的基础数据和预测结果。根据专家反馈得出最终的地质灾害预测预报结果, 并存入知识库中, 此时知识库自动建立一种地质灾害类型、预测预报判据和适应性模型的对应关系。系统在运行过程中会自动丰富知识库这种对应关系, 针对不同区域大小、不同地质环境的滑坡灾害, 能够自适应选择对应模型、方法和预报判据。随着系统应用实例的增加, 系统智能化能力越强。

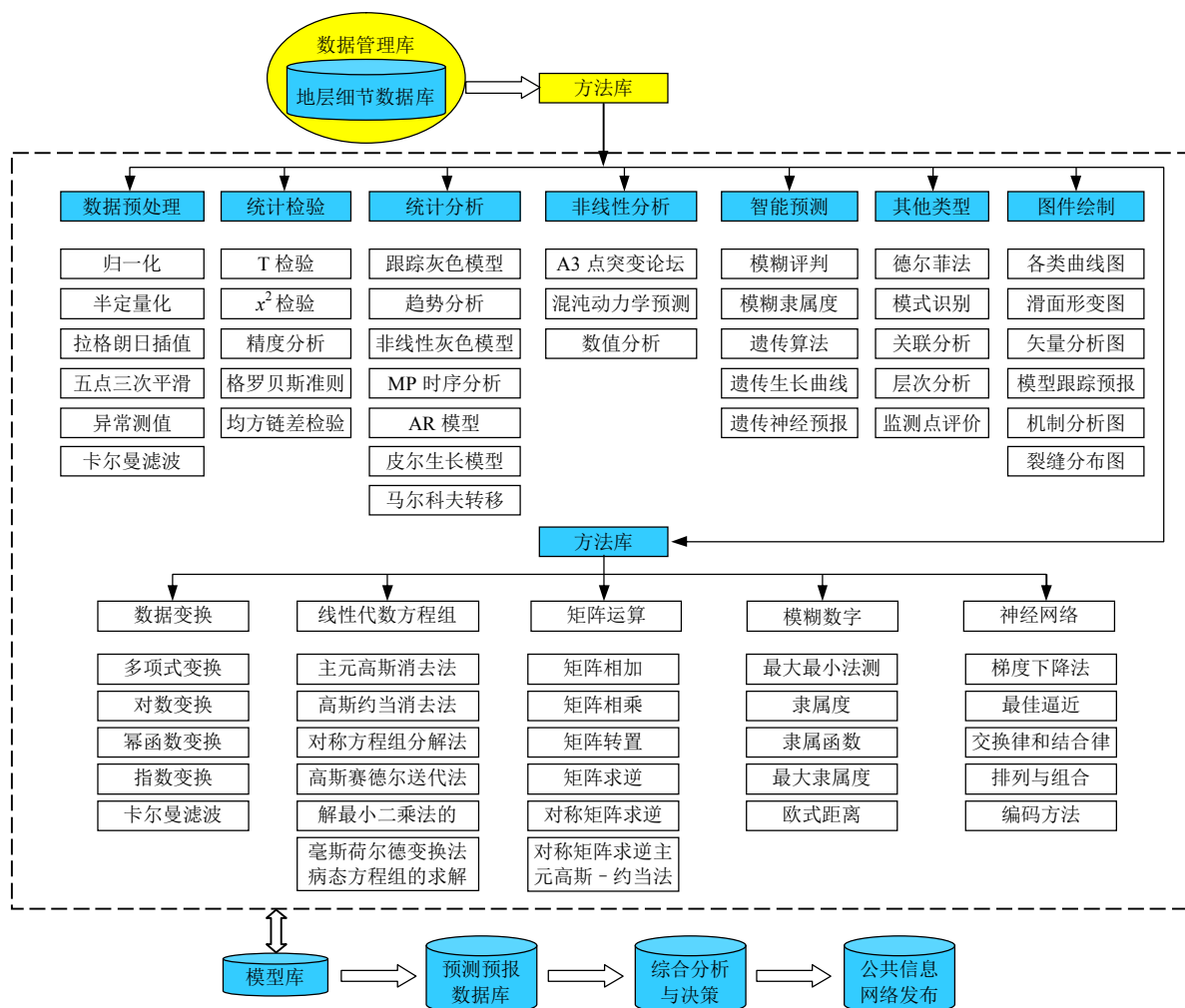


图 3 系统方法库结构

Fig.3 Structure of method base of the system

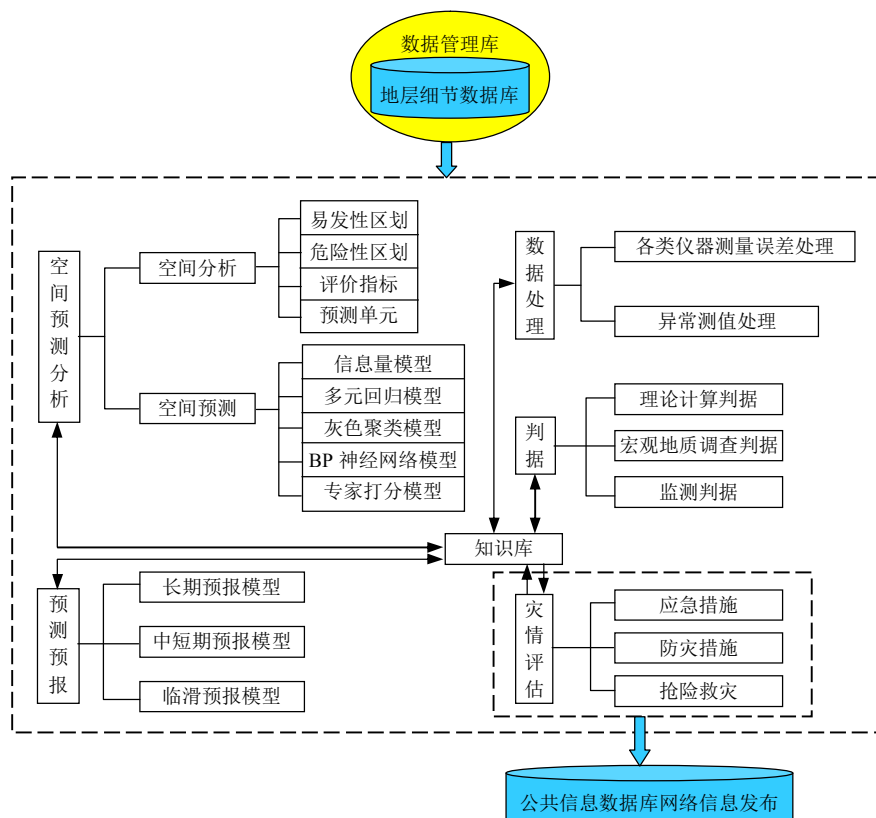


图4 系统知识库结构

Fig.4 Structure of knowledge base of the system

3 功能模块

三峡库区滑坡灾害预测预报工作均围绕滑坡灾害而展开，基础数据主要包括地理和地质数据，用以建立空间和属性数据库。

区域空间危险性区划是选择适合区域地质灾害易发性评价的指标和参数，从不同层次和尺度圈定地质灾害易发区，并结合降雨和库水位变化数据划定区域危险性等级。单体滑坡时间预报分为稳定性计算、监测数据处理与分析、预报模型与判据研究、变形趋势分析等。涌浪预测主要是通过反演分析、过程模拟、数值分析等方法，综合确定涌浪计算参数，以灾害点稳定性评价和预测预报判据为基础，计算滑坡失稳的滑速、入江方量和涌浪规模。灾情评估主要是对滑坡本身和涌浪可能引起的灾情进行预评估。综合分析决策是对区域危险性区划、单体灾害点的多种预测结果、灾情评估结果进行综合决策，最终将结果以信息发布的方式服务于社会。系统业务功能流程如图5所示。

3.1 区域滑坡灾害空间预测

区域滑坡灾害危险性预测评价研究主要包括预

测评价指标体系的建立、评价模型的集成开发和应用、预测结果分析和验证3个方面内容。其中，指标体系建立过程中可以对指标进行添加、删除、编辑、因素状态分级以及指标间相关性分析。在评价指标体系建立过程中，依据滑坡在各因素状态下发生的滑坡频率曲线和信息量曲线的突变点为等级划分的临界值来确定因素状态。该方法充分考虑各因素状态对滑坡不同的影响情况，使划分的各因素状态对滑坡影响的差异性最大化，体现因素状态分级的层次性和合理性。通过指标相关性分析，由指标间相关性大小为依据来选择预测指标。各指标权重的确定主要有模型分析和专家评价2种方式。该模块中集成了6类区域空间预测模型：信息量模型、多元回归模型、聚类分析模型、BP神经网络模型、专家打分模型和时空耦合模型。根据适应性条件选择合适的模型开展静态因素影响下的滑坡灾害易发性区划，在此基础上，集成降雨及库水位变动的动态作用。对于降雨影响因素，应用历史降雨资料，建立适合本区的有效降雨量模型，确定降雨量阈值。并依据区域易发性区划网格和降雨量预测结果，形成网格化的预测降雨量信息，划分降雨量危险等级，通过静态的地质灾害易发性评价和动态的降雨预测

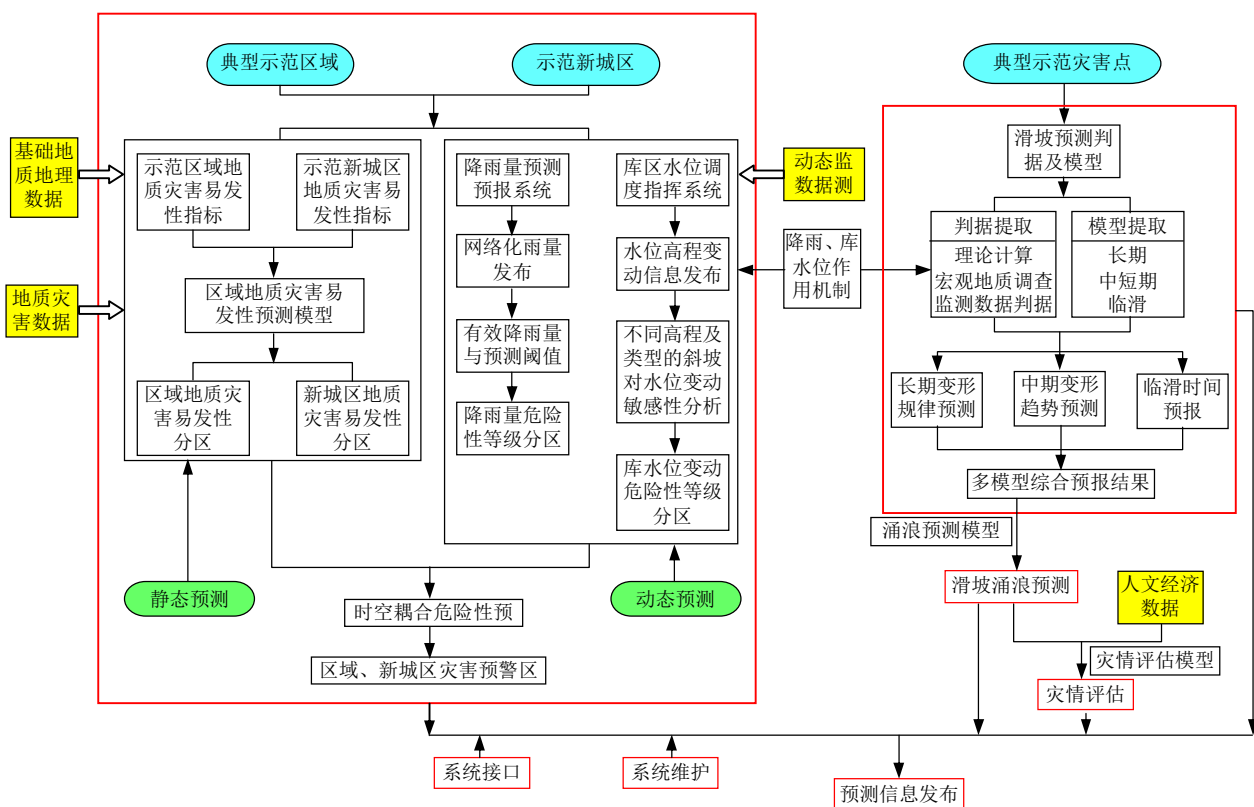


图 5 系统业务功能流程图

Fig.5 Flow chart of the system function

耦合,划分危险性等级。对于库水位变动因素,应用历史库水位调度资料及对应时间段的库岸斜坡变形监测资料,研究不同高程及类型斜坡对不同水位变速的敏感性,按照敏感性大小对斜坡进行分类,并选取合适的指标参数计算其权重。依据库区水位调度指挥系统发布的动态水位变动信息,结合水位变动敏感性指标分析结果,进行库水位变动条件下危险性等级分区。

3.2 单体滑坡时间预报

该模块包括 4 个层次。第一层为获取滑坡基础地质数据、物理力学参数和监测数据，建立计算模型；第二层为提取滑坡稳定性评价和预测预报模型判据，通过对已有的预测预报模型与判据的修正与完善，提高预测预报的精度；第三层为滑坡灾害的时间预报，并对多模型预报结果进行分析，结合滑坡体综合信息预报方法，建立预测预报专家系统；第四层为决策支持与信息发布，政府主管单位根据灾害体时间预报的结果，进行灾情信息发布，建立防灾预案。

根据滑坡所处的变形破坏阶段,选择预报的类型、内容以及相应的预报方法。因此,有效地判定滑坡变形所处的阶段,成为滑坡定量预报工作中非

常关键的因素。系统中采用定量判断与以综合信息为依据的定性判别。系统中涉及到的滑坡灾害预报判据有：稳定性系数、可靠概率等理论计算判据，滑坡位移、变形速率、地下水位、推力、声发射参数、位移-时间曲线的切线角等监测判据及宏观地质信息预报判据。预测预报系统所应用的预报模型分为长期预报模型、中短期预报模型以及临滑预报模型。

3.3 涌浪计算

以前述的典型灾害点稳定性评价和预测预报判据为基础,确定处于危险的滑坡。根据监测和调查资料,分析渗流场、应力场和位移场的变化与降雨和库水位涨落之间的关系,比较监测资料和数值模拟结果得到的渗流场区别,对相关参数进行校正,从而达到准确预测未来渗流场和位移场的目的。根据已有滑坡的力学参数,通过类比、反分析、数值分析方法确定滑坡与实际渗流场对应工况下抗剪强度参数,并进一步确定滑坡动摩擦因数,结合实际水上和水下地形及水深、过水断面等参数,分别计算滑坡速度、入江方量和涌浪规模、传播衰减。

3.4 灾情评估

由涌浪预测结果确定灾害影响范围, 由风险分

析模块进行风险分析, 得出灾害强度分布图。根据遥感、基础地理及人文经济信息, 得出滑坡灾害直接影响及灾害发生后涌浪影响范围内可能影响的居民财产分布情况; 通过 GIS 输出模块, 绘制重大设施分布图, 从而进行易损性分析。最后对灾害影响范围内的人口伤亡风险及经济损失进行风险评估。通过图形辅助编辑功能, 编制地质灾害及其涌浪危害范围及受灾损失程度分布图, 并可打印输出。

滑坡灾害体的直接影响范围包括灾害体自身范围、灾害牵引周界、灾害体前缘滑程范围等。灾害发生后所引起涌浪的影响范围包括航道内、传播浪两岸爬坡范围。受传播浪高的影响, 航道内受危害对象主要是船舶。受爬坡浪冲击、淹没等影响, 两岸爬坡范围内受危害对象主要是居民、土地及建筑物。根据地质灾害危险性评估的结果, 基于 GIS 技术圈定滑坡灾害危害范围、涌浪传播距离、高度和沿途爬坡的高度。根据不同作用形式和作用的强度划分风险区, 分析受灾害影响范围内的损失情况。具体主要分为 3 个步骤: 滑坡灾害危险性评价、承灾体易损性评价以及风险评价。

3.5 信息发布

滑坡灾害空间数据信息和综合图件的 Web 发布技术应用研究, 是利用 Internet 技术在 Web 上发布滑坡灾害信息。因此, 连接互联网的任何一个终端都能快速、准确地进入滑坡灾害预测预报系统的 WEBGIS 应用程序, 并进行滑坡灾害信息的查询检索、统计分析和预测预报。从而真正实现滑坡灾害信息的共享与开放^[14]。

4 系统实现

4.1 开发环境

三峡库区滑坡灾害预测预报系统的设计与实现是建立在一系列的软、硬件环境基础上的, 表 1 给

出了系统开发过程中应用到的主要开发工具。

4.2 系统应用

三峡库区滑坡灾害预测预报系统自建成后于 2012 年 10 月在库首—巴东段典型示范区和巴东县新城区开展了区域滑坡灾害危险性评价示范性研究, 并选取库区八字门滑坡和白水河滑坡分别进行单体滑坡时间预报、涌浪计算和灾情评估等研究。

4.2.1 区域滑坡危险性评价应用

巴东新城区属三峡库区迁建城市, 城区地质环境条件复杂, 受地质灾害影响, 曾 3 次选址, 2 次搬迁。巴东县城主要出露的地层为三叠系中统巴东组(T₂b)及第四系。巴东县城沿江发育滑坡灾害 40 多个, 其中长江北岸发育 15 个滑坡, 大部分发育于长江南岸, 即巴东县主要的居民区和经济开发区^[15]。

巴东新城区危险性评价主要流程包括: (1) 评价指标系的建立; (2) 模型计算; (3) 结果检验。在建立指标体系过程中, 可以对指标进行添加、删除、编辑以及因素状态分析。同时, 系统基于矢量和栅格 2 种 GIS 数据模型集成了 5 种空间预测模型, 可以很方便地对比分析不同模型的计算结果。图 6 所示为系统空间预测指标分析界面。界面从数据库读取研究区已有的指标因素, 并提供对因素的增加、删除和编辑功能。因素的编辑包括因素状态分级, 相关性分析等。图 7(a)为应用信息量模型结合 GIS 栅格数据模型得到的区域危险性分区; 图 7(b)为应用时空耦合模型结合 GIS 矢量边坡单元模型计算的区域危险性分区结果。其中危险性划分 5 个等级, 分别用高、较高、中、较低和低表示地质灾害危险性程度依次减小。

4.2.2 单体滑坡及次生灾害评价

单体滑坡灾害的预测预报主要包括滑坡灾害时间预报和次生涌浪灾害评价。其中, 时间预报是依据各类监测数据对滑坡体变形阶段的位移变化趋势、位移矢量角、破坏概率等进行预测, 以及对失稳阶段的破坏时间进行预报; 滑坡次生涌浪灾害评价是对库岸滑坡失稳破坏后以一定速度滑入水体中产生的初始涌浪、传播浪和岸坡爬坡浪的计算以及对滑坡灾害体影响范围和次生涌浪灾害影响范围内的人口和人文经济损失进行灾情预评估。

选取三峡库区秭归县八字门滑坡进行时间预测预报分析, 八字门滑坡位于湖北省秭归县归州镇香溪村香溪河右岸, 距河口为 0.8 km, 距三峡坝址为 38 km, 属堆积层滑坡, 岸坡为内倾边坡。该滑坡发育在侏罗系香溪组(J₁x)地层中, 香溪组砂泥岩夹煤

表 1 系统开发环境

Table 1 System developing environment

软件类型	产品名称
数据库服务器操作系统	Windows 2003 Server
应用服务器操作系统	Windows 2003 Server
客户端操作系统	Windows 2000, Windows XP
数据库	Oracle 10g
地图发布服务器	ArcGIS Server 9.3
空间数据管理工具	ArcGIS 9.3
空间数据引擎	ArcSDE 9.3
桌面 GIS 开发组件	ArcGIS Engine 9.3
系统开发工具	Visual Studio .NET 2005

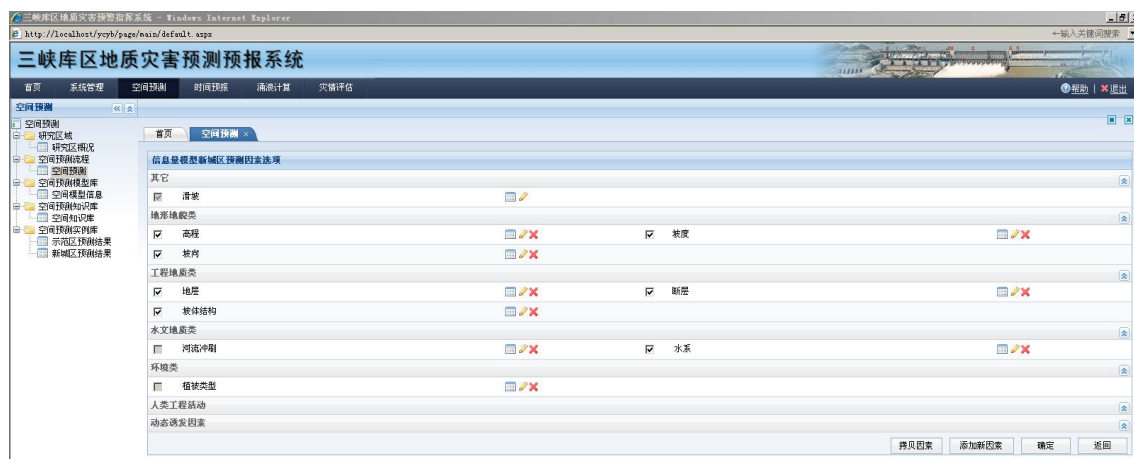
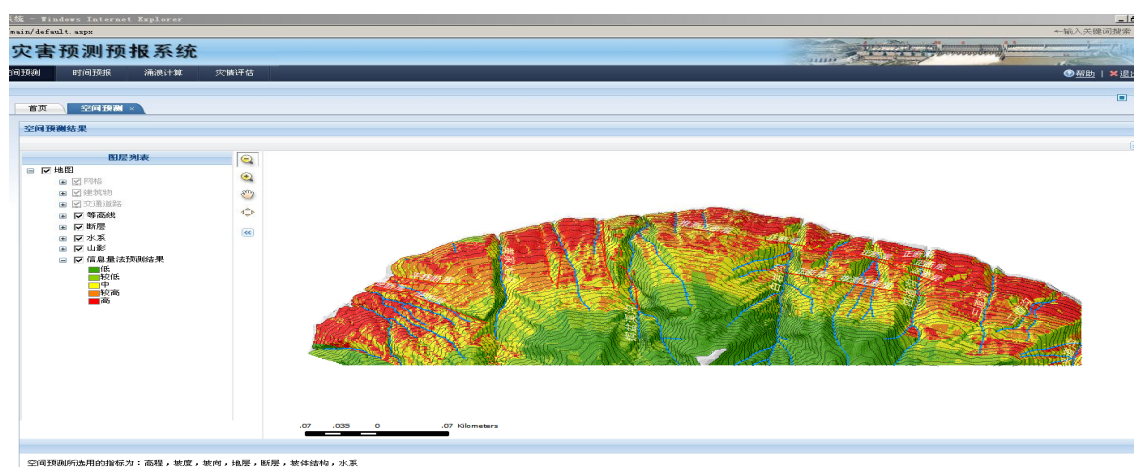
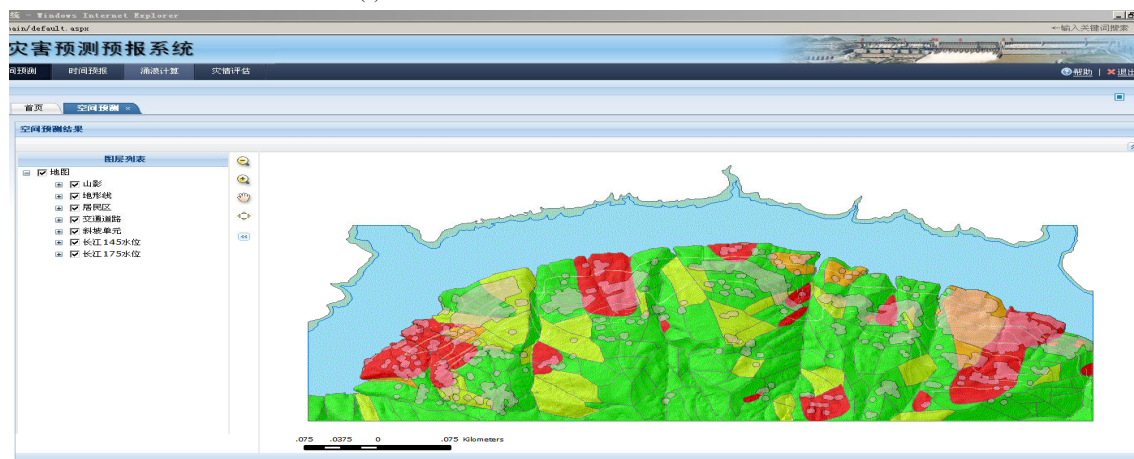


图 6 巴东新城区滑坡危险性评价指标体系构建界面

Fig.6 Interface of hazard assessment index system building of the New Badong County



(a) 基于 GIS 栅格数据模型的滑坡灾害危险性区划



(b) 基于 GIS 矢量数据模型(斜坡单元)的滑坡灾害危险性区划

图 7 巴东新城区滑坡危险性分区

Fig.7 Landslide risk zone in New Badong County

层,强度低,遇水易软化,易风化^[16]。选取库区秭归县境内白水河滑坡开展滑坡涌浪灾害评价研究。白水河滑坡位于长江南岸,距三峡大坝坝址 56 km。滑坡长度为 600 m、宽度为 700 m,滑体平均厚度约 30 m,体积为 $1\,260 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。滑坡体处于长江宽河

谷地段、为单斜地层顺向坡^[17]。单体滑坡时间预报主要流程为:(1) 滑坡变形阶段判别;(2) 模型计算;(3) 结果检验。其中,依据滑坡稳定性分析结果准确地判断滑坡所处的变形阶段是时间预测预报的关键。在综合分析滑坡的基础地质地理信息的基础上,

结合数据仓库的数据分析和数据挖掘技术以及模糊数学理论,对滑坡所处的变形阶段进行判别,最后选择对应于不同变形阶段的长期预报、中短期预报以及临滑预报等模型进行计算和结果分析。滑坡次生涌浪灾害评价主要流程包括:(1)滑坡速度计算;(2)涌浪计算;(3)灾情评估。滑坡在降雨和库水位涨落条件下发生失稳和破坏,准确地模拟计算其运动轨迹和速度是进行涌浪计算和灾情评估的基础;涌浪计算包括初始涌浪、对岸爬坡浪、传播浪以及

传播沿岸爬坡浪计算等;灾情评估是对滑坡失稳范围以及涌浪影响范围的人口和人文经济损失进行预评估。系统应用部分效果如图 8, 9 所示。图 8 为滑坡灾害时间预报中 BP 神经网络模型参数选择界面,主要参数包括:预测类型、灾害点名称、位移序列起始时间、最大训练次数以及预测时间段;图 9(a)为多模型预测位移曲线综合图;图 9(b)为白水河滑坡涌浪预测结果,主要为涌浪影响范围图和涌浪影响范围内人口和经济损失统计结果。

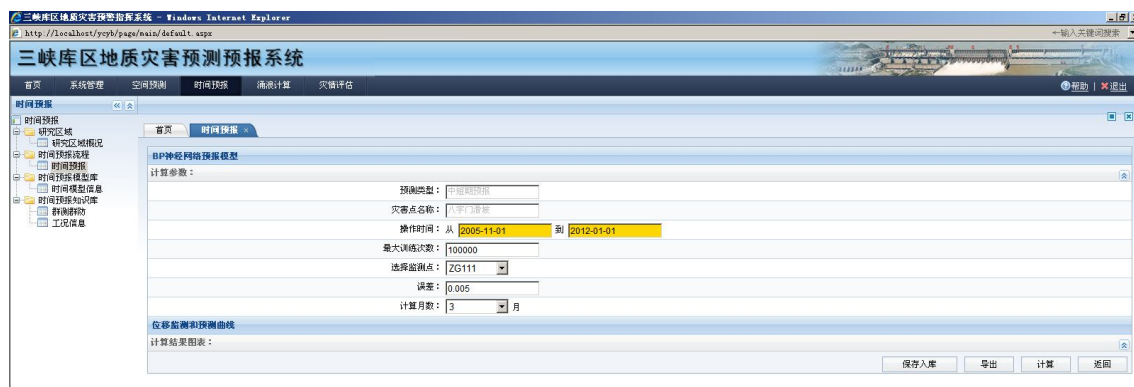
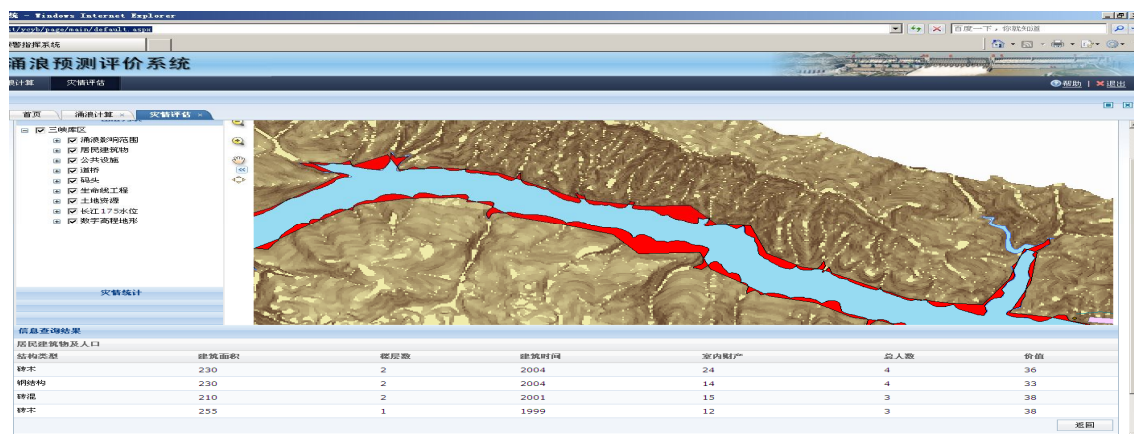


图 8 时间预报模型参数选择

Fig.8 Selection of parameters of time forecasting model



(a) 滑坡灾害时间预测预报结果



(b) 滑坡涌浪预测评价结果

图 9 滑坡灾害时间预报及涌浪评价结果

Fig.9 Landslide time prediction and landslide generated wave hazard evaluation

5 结 论

(1) 基于 WEBGIS 技术, 结合数据仓库、专家知识库、方法库和模型库, 设计和实现了三峡库区滑坡灾害预测预报系统。系统集成包括了区域滑坡灾害空间预测、单体滑坡灾害时间预报以及滑坡涌浪次生灾害评价三类适应于三峡库区特殊地质环境和地质灾害发育特点的二十多种预测预报模型。

(2) 提出以四库一体模式为理论基础的滑坡灾害预测预报及防治决策支持的思路, 即以预报模型为主导, 调用数据和方法来求解模型; 将预警预报过程中专家经验和决策结果进行提取, 并转换成知识库存入知识库中。该体系保证了信息系统具备自主学习的能力, 为滑坡灾害预测预报智能化研究提供支持。

(3) 归纳总结滑坡灾害预测预报和滑坡灾害评估业务流程及数据流程, 建立系统总体结构, 开发包含区域和单体滑坡灾害预测预报、多源信息快速检索查询和分析处理、预测预报判据提取与利用、涌浪预测、预警预报模型方法、灾害预评估、信息发布等功能模块的三峡库区滑坡灾害预测预报系统。

(4) 选择地质环境背景复杂、地质灾害发育、受库水水位变动较敏感、人类工程活动频繁、监测数据较完整的库区秭归—巴东沿江两岸、巴东移民新城区及区内 2 个典型滑坡作为示范区, 选取库区秭归县境内 2 个比较典型的库岸滑坡白水河滑坡和八字门滑坡, 利用所建预测预报系统, 进行试验运行, 通过系统试验运行, 优化完善系统。

参考文献(References):

- [1] 陈 剑, 杨志法, 李 晓. 三峡库区滑坡发生概率与降水条件的关系[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(17): 3 052 - 3 056.(CHEN Jian, YANG Zhifa, LI Xiao. Relationship between landslide probability and rainfall in Three Gorges Reservoir area[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(17): 3 052 - 3 056.(in Chinese))
- [2] 吴振君, 邓建辉, 闵 弘. 基于 GIS 的滑坡监测信息管理与分析系统[J]. 岩土力学, 2004, 25(11): 1 739 - 1 743.(WU Zhenjun, DENG Jianhui, MIN Hong. GIS-based management and analysis system for landslide monitoring information[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(11): 1 739 - 1 743.(in Chinese))
- [3] 梁桂兰, 徐卫亚, 何育智, 等. 边坡工程监测信息可视化分析系统研发及应用[J]. 岩土力学, 2008, 29(3): 849 - 853.(LIANG Guilan, XU Weiya, HE Yuzhi, et al. Visual system development and application of data analysis for slope engineering[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(3): 849 - 853.(in Chinese))
- [4] 夏元友, 卢 清, 刘峻岭. 基于 GIS 的三峡库区滑坡稳定性评价系统[J]. 计算机工程, 2009, (21): 242 - 243.(XIA Yuanyou, LU Qing, LIU Lingwei. Landslide stability evaluation system of Three Gorges Reservoir area based on GIS[J]. Computer Engineering, 2009, (21): 242 - 243.(in Chinese))
- [5] 贾明涛, 王李管, 潘长良. 基于监测数据的边坡位移可视化分析系统[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(8): 1 324 - 1 328.(JIA Mingtao, WANG Liguang, PAN Changliang. Visual analysis system for slope displacement based on monitored data[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(8): 1 324 - 1 328.(in Chinese))
- [6] 何政伟, 黄润秋, 许 强, 等. 基于 ARCGIS 的地质灾害防治信息与决策支持系统的研制[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2004, (4): 601 - 606.(HE Zhengwei, HUANG Runqiu, XU Qiang, et al. Development about prevention and cure information and decision support system of the geological hazard on ARCGIS[J]. Journal of Jilin University: Earth Science, 2004, (4), 601 - 606.(in Chinese))
- [7] 张桂荣, 殷坤龙, 刘礼领, 等. 基于 WEBGIS 和实时降雨信息的区域地质灾害预警预报系统[J]. 岩土力学, 2005, 26(8): 1 312 - 1 317.(ZHANG Guirong, YIN Kunlong, LIU Liling, et al. A real-time regional geological hazard warning system in terms of WEBGIS and rainfall[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(8): 1 312 - 1 317.(in Chinese))
- [8] 欧阳祖熙, 张宗润, 丁 凯, 等. 基于 3S 技术和地面变形观测的三峡库区典型地段滑坡监测系统[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(18): 3 203 - 3 210.(OUYANG Zuxi, ZHANG Zongrun, DING Kai, et al. Slope monitoring system of Three Gorges area based on 3S techniques and ground deformation observation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(18): 3 203 - 3 210.(in Chinese))
- [9] 王 威, 王水林, 汤 华, 等. 基于三维 GIS 的滑坡灾害监测预警系统及应用[J]. 岩土力学, 2009, 30(11): 3 379 - 3 385.(WANG Wei, WANG Shuilin, TANG Hua, et al. Application of 3D GIS to monitoring and forecast system of landslide hazard[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(11): 3 379 - 3 385.(in Chinese))
- [10] 谢谟文, 柴小庆, 贾 宁, 等. 滑坡实时监测网络地理信息系统研发及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(10): 2 090 - 2 102.(XIE Mowen, CHAI Xiaoqing, JIA Ning, et al. Development and application of real-time monitoring Web-GIS for landslides[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(10): 2 090 - 2 102.(in Chinese))
- [11] 石菊松, 石 玲, 吴树仁. 利用 GIS 技术开展滑坡制图的技术方法与流程[J]. 地质通报, 2008, 27(11): 1 810 - 1 821.(SHI Jusong, SHI Ling, WU Shuren. Techniques and procedures of applications of the GIS technique in landslide map making[J]. Geological Bulletin of China, 2008, 27(11): 1 810 - 1 821.(in Chinese))
- [12] 刘 斌. 基于 WEBGIS 的滑坡灾害空间预测与系统开发研究——以三峡坝区至巴东段为例[博士学位论文][D]. 武汉: 中国地质大学, 2009.(LIU Bin. Zonation of landslide hazard and its system programming based on WEBGIS—taking section from the Three Gorges Dam to Badong Town as an example[Ph. D. Thesis][D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2009.(in Chinese))
- [13] 朱传华. 三峡库区地质灾害数据仓库与数据挖掘应用研究[博士学位论文][D]. 武汉: 中国地质大学, 2010.(ZHU Chuanhua. Study of data warehouse and data mining application on geohazard in Three Gorges Reservoir area[Ph. D. Thesis][D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2010.(in Chinese))
- [14] 殷坤龙. 滑坡灾害预测预报[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2004: 24 - 26.(YIN Kunlong. Landslide hazard prediction and evaluation[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2004: 24 - 26.(in Chinese))
- [15] 柴 波, 殷坤龙, 肖拥军. 巴东新城区库岸斜坡软弱带特征[J]. 岩土力学, 2010, 31(8): 2 501 - 2 506.(CHAI Bo, YIN Kunlong, XIAO Yongjun. Characteristics of weak-soft zones of Three Gorges Reservoir shoreline slope in new Badong County[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(8): 2 501 - 2 506.(in Chinese))
- [16] 张桂荣, 程 伟. 降雨及库水位联合作用下秭归八字门滑坡稳定性预测[J]. 岩土力学, 2011, 32(增 1): 476 - 482.(ZHANG Guirong, CHENG Wei. Stability prediction for Bazimen landslide of Zigui County under the associative action of reservoir water level fluctuation and rainfall infiltration[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(Supp.1): 476 - 482.(in Chinese))
- [17] 杜 娟, 殷坤龙, 柴 波. 基于诱发因素响应分析的滑坡位移预测模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(9): 1 783 - 1 789.(DU Juan, YIN Kunlong, CHAI Bo. Study of displacement prediction model of landslide based on response analysis of inducing factors[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(9): 1 783 - 1 789.(in Chinese))