

3“S”技术在单体滑坡风险评估中的应用

张东辉^{1,2}, 赵英俊¹, 薛东剑², 崔欣¹, 张川¹

(1. 核工业北京地质研究院遥感信息与图像分析技术国家级重点实验室, 北京 100029;

2. 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, 成都 610059)

摘要: 本文研究了采用3“S”技术的单体滑坡灾害风险评估的原理,对单体滑坡的致灾因素和评估模型做了全面的界定。分析了光学遥感数据和干涉雷达技术在单体滑坡遥感信息提取的应用。对地理信息系统在评估过程中的应用进行了详细阐述,着重分析了数字高程模型、空间分析手段以及决策支持系统的作用。

关键词: 遥感;地理信息系统;单体滑坡;风险评估

中图分类号: P208 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9250(2011)01-0069-07

我国是世界上受滑坡危害最严重的国家之一。研究处于人口活动范围的单体滑坡,并制定合理的风险规避方案,将为国民经济建设和国民人身安全保障提供科学的依据。“数字滑坡技术”和“空间信息技术”将成为更准确的定性、定位、定量的单体滑坡调查手段。自上世纪90年代初开始,InSAR技术开始被广泛应用于滑坡监测,提高了监测数据的精度,减少了人为因素对预报结果的影响^[1-3]。结合GPS和InSAR,定期监测滑坡体的位移,对变形数据进行分析处理^[4]。随着空间信息技术的进步,以遥感、地理信息技术和全球定位技术为代表的对地观测技术和空间信息获取技术在滑坡信息提取与建模中取得了广泛的应用^[5]。研究表明,第一,光学遥感数据多采用高精度遥感数据,建立单体滑坡的解译特征、实现识别滑坡的活动性、辨识滑坡的类型、估算滑坡体积甚至可以实现滑坡特征的精细解译^[6,7]。第二,干涉雷达和差分干涉雷达等遥感手段将是单体滑坡监测的重要趋势。结合GPS技术的应用,将实现滑坡灾害的良好监测效果^[3]。第三,GIS不仅可以管理、编辑、分析、建模、计算和显示滑坡时空数据特征,而且结合专家支持系统的开发,将实现灾害信息的快速提取^[8-10]。

1 单体滑坡灾害风险评估原理

1.1 单体滑坡的概念及致灾因素

广义上将斜坡上岩、土体以各种方式顺坡向下运动统称为滑坡。狭义的定义是斜坡岩土在重力作用为主下,由于多种原因改变坡体内一定部位的软弱带(或面)中的应力状态,或因其它物理、化学作用降低其强度,及因地震或其它作用破坏其结构,该带在应力大于强度下产生剪切破坏,带上的岩土失稳而作整体或几大块向下和向前滑动的现象称之为滑坡。单体滑坡致灾包括内在因素和外在因素。第一,地形地貌条件。滑坡的地形一般是滑坡后部有陡斜坡或者断壁,其下连续凹地或平坦地带,继续向下是缓斜坡,缓斜坡继续向下是较陡的斜坡。地貌条件主要考虑地貌单元、相对高度、坡度、坡长、平面形态、剖面形态以及临空条件等山坡形态的作用。第二,地质条件。地层岩性是发生滑坡的物质基础。容易发生滑动的地层岩性软弱,在外营力作用下因强度降低而形成滑动带。第三,气候条件。大气降水及其引起的水位涨落是诱发滑坡的主要因素。第四,水文条件。水文地质条件对边坡稳定性的影响主要表现在地下水位的埋深及地下水的补、径、排条件两方面。第五,植被条件。树木可以减少降雨入

收稿日期:2010-05-12;改回日期:2010-12-15

基金项目:国家863重点项目“高效能SAR航空遥感应用系统”课题—“滑坡、泥石流灾害风险评估与应用示范数据(2007AA120306)”。

第一作者简介:张东辉(1985—),男,博士研究生,主要从事3S综合应用技术研究。E-mail: donghui222@qq.com.

渗量,降低地下水位,减少水的侵蚀能力。第六,人为活动条件。人类工程活动中开挖、人工爆破、堆积加载等是诱发斜坡失稳的极其重要的外动力。

1.2 单体滑坡灾害风险评估原理

单体滑坡灾害风险评估定义为各种因子对单体滑坡灾害发生的机率及其对人类社产生危害的程度进行描述的定量过程。第一,单体滑坡灾害风险评估的内容。联合国自然灾害风险的定义将地质灾害风险表述为在一定的区域时间限度内,特定的地质灾害对人类生命财产、经济、资源环境等可能造成的损失,定量表达为风险度=危险度×易损度。第二,单体滑坡灾害风险评估的步骤。单体滑坡风险

评估分为评估要素和范围的确定、指标体系的建立、风险评估模型的选取和风险评估及区划制图等四大步骤。第三,单体滑坡灾害风险评估指标体系。经过系统科学的分析,形成评估的指标系列,再进行实地调查分析,建立单体滑坡灾害风险评估指标体系(图1)。第四,单体滑坡灾害风险评估模型。目前常见的灾害风险评估模型有:多元回归分析法、聚类分析法、模糊综合评判法、神经网络法、信息量法、信息权法、层次分析法、专家打分法、统计分析法、概率分析法、灰色关联分析法、野外现场分析判断、指数加权模型、可拓物元综合评判模型和GIS计算机技术分析。

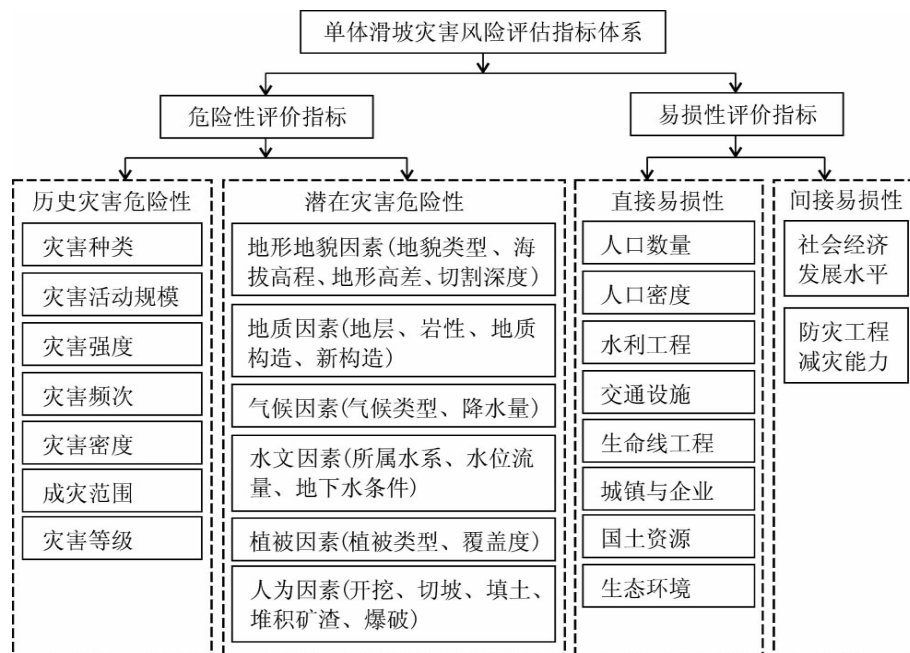


图1 单体滑坡灾害风险评估指标体系

Fig. 1 Risk evaluation index system of single landslide

2 RS技术在单体滑坡灾害风险评估中的应用

2.1 光学遥感数据的应用

光学遥感技术应用于滑坡灾害的研究,提取相关因子的信息,对于分析灾害环境背景具有很好的效果。此外,利用高精度遥感数据解译调查,可直接根据影像识别单体滑坡灾害点,勾绘灾害范围并确定其类别和性质,查明产生原因、规模大小、危害程度、分布规律和发展趋势。

(1) 滑坡发育环境信息的提取

第一,地形地貌遥感信息提取。解译标志有图形特征、水系特征、色调和阴影等。宏观地貌为构造

高中山和断陷盆地,中观和微观地貌主要包括河谷、阶地、河床、冲积锥和洪积扇等。第二,地质条件遥感信息提取。地层岩性的解译标志有图形、图案和色调特征。滑坡在图像上常沿线性构造密集带或环形构造边缘呈线状或带状分布。第三,水文遥感信息提取。水文的遥感解译标志是色调和形状。在ETM+543波段合成的假彩色图像上水体呈深蓝色或黑色调,而在MSS754红外彩色合成图像上水体呈蓝色。第四,植被遥感信息提取。可见光中绿光波段0.52~0.59 μm对区分植物类别敏感;红光波段0.63~0.69 μm对植被覆盖度和植物生长状况敏感。通过各种植被指数模型可进行某些地物的提取和植被覆盖率等级的空间分析,常用的模型包

括比值植被指数(RVI)、归一化植被指数(NDVI)和差值植被指数(DVI)等。第五,人类活动遥感信息提取。铁路在 ETM543 卫星遥感图像上多呈蓝色调。公路与铁路相似,为线状或带状,但转弯较急、曲率半径小。矿山水利水电工程在 ETM+753 卫星图像上呈黄色、浅黄或白色。

(2) 单体滑坡灾害信息的提取

遥感技术可直接根据影像识别单体滑坡灾害点,勾绘灾害范围并确定其类别和性质,在 GIS 的支持下,甚至可以进行体积等要素的量算。第一,滑坡活动性遥感信息提取。单体滑坡在遥感图像上呈现簸箕形、舌形和长椅形等特殊形状,构成解译的直接标志。间接标志是可以看到明显的滑坡壁、滑坡台阶、封闭洼地、滑坡舌和裂隙等。第二,滑坡体积遥感信息提取。较精确的定量需要在经几何校正的航空图像上借助立体测量工具进行或采用计算机数字测图的方法。首先,利用遥感图像和地形图,计算出滑坡体的表面积及其在后缘或前缘上的投影面积;接着,绘制滑坡体的纵剖面图,确定滑坡体的所属类型;其次,按三角函数原理计算滑坡体的平均厚度;最后,根据滑坡体在后缘或前缘上的投影面积与平均厚度的乘积,得出滑坡体的体积。

2.2 干涉雷达技术的应用

表 1 可应用于滑坡监测的卫星雷达系统

Table 1 Satellite radar systems that can be applied to landslide monitoring

卫星	国家	时间(a)	高度(km)	波长(cm)	分辨率(m)	扫描宽度(km)	周期(d)
ERS-1	欧空局	1991	782-785	5.6(C)	30	102.5	35
ALMAZ-1	俄罗斯	1991	300	10.0(S)	15-30	45	10个月
JERS-1	日本	1992	568	23.5(L)	18	75	44
ERS-2	欧空局	1995	782-785	5.6(C)	30	102.5	35
Radarsat-1	加拿大	1995	793-821	5.6(C)	9-25	50-500	24
Envisat-1	欧空局	2000	799.5	5.6(C)	30	50-100	35
Radarsat-2	加拿大	2002	793-821	5.6(C)	9-25	50-500	24

2.3 单体滑坡遥感信息提取方法

(1) 遥感数据的选择

目前用于滑坡检测的遥感数据源包括多光谱、全色和雷达图像,实际应用中根据研究目标选择相应尺度的遥感数据,满足不同尺度的滑坡检测要求(表 2)。

(2) 遥感数字图像处理

在实现滑坡遥感信息提取之前,需进行一系列数字图像处理,使得提取的信息更具可信度。第一,几何纠正目的是消除传感器成像几何形态引起的变形、传感器外方位元素变化的影响、地球表面起伏的

干涉雷达在滑坡灾害中除了可以进行地形制图,生成大范围高精度的数字高程模型及坡度测量外,在其基础上发展起来的雷达差分干涉测量对动态变化的高分辨率、高灵敏度及宽覆盖率使得该技术在地表下陷和滑坡监测等方面有重要的意义。

(1) 合成孔径雷达干涉测量原理

合成孔径雷达干涉技术(InSAR)使用双天线方式,或重复轨道方式所获得的同一地区的两幅微波图像在满足干涉相干条件时,进行相位相干处理产生干涉条纹,通过对干涉图像进行解缠,得出每一点的相位,即地面点到雷达的斜距及高程。InSAR 能穿透云层且全天候;能以厘米量级地表形变,提供静态和动态信息;可提取详细的地形高程图。

(2) 单体滑坡形变的监测方法

利用 InSAR 监测滑坡的步骤有:第一,选择合适的雷达卫星系统,选取研究时间,获得相应的雷达数据(表 1);第二,进行精确的空间配准,计算出同一点的相位差,生成干涉条纹图;第三,干涉图生成之后进行滤波,主要有简单的滤波方法和基于坡度估计的自适应滤波法;第四,通过相位解缠绕得到绝对相位变化,即地表的变形。通常采用的相位解缠绕方法有枝剪法和最小二乘法两种方法。

影响、大气折射的影响和地球自转的影响等引起的几何误差。第二,辐射校正目的是尽可能消除辐射误差影响,恢复图像真值。第三,图像增强目的是改变图像的灰度等级;突出边缘或线状地物;消除边缘和噪声;合成彩色图像和压缩图像数据量。第四,图像分类目的是将图像中每个像元根据在不同波段的光谱高度、空间结构特征或其他信息,按某种规则划分为不同的类别。第五,图像融合目的是提高图像空间分辨率、改善图像几何精度、改善分类精度、替代或修改图像的缺陷或提高变换检测能力。

表 2 常应用于滑坡检测的遥感影像资料

Table 2 Remote sensing images usually used in landslide detection

遥感影像	波段数	分辨率(m)	扫描宽度(km×km)	周期(d)	应用
MSS	5	80	185×185	16	规模、
TM-5	7	30	185×185	16	规模、分布
ETM+	8	15(pan)	185×185	16	规模、分布
SPOT-4	4	10(pan)	60×60	26	规模、分布、原因
IKONOS-2	4	1(pan)	11×11	1~3	规模、分布、原因、趋势
QuickBird	4	0.61(pan)	16.5×16.5	1~6	规模、分布、原因、趋势
CBERS	5	19.5	113×113	26	规模、分布
JERS	HH 极化	18	75×75	44	位移观测
IRS	2	5.8(pan)	70×70	5	规模、分布、原因
RADARSAT	HH 极化	8~100	50×50500×500	1~5	位移观测
ERS-1,2	VV 极化	25	100×100	26	位移观测

3 GIS技术在单体滑坡灾害风险评估中的应用

3.1 数字高程模型的应用

(1) 滑坡体空间信息量算

DEM最基础的应用是计算研究区内任意点的高程。空间信息量算是滑坡空间信息分析量化的基础。第一,质心量算。在描述滑坡体目标空间分布最有用的单一量算量就是滑坡体的质心位置。单体滑坡的质心是滑坡体稳定性均匀分布的平衡点,通过目标坐标值加权平均值计算:

$$X_G = \frac{\sum_i W_i X_i}{\sum_i W_i} \quad Y_G = \frac{\sum_i W_i Y_i}{\sum_i W_i} \quad (1)$$

式中, i 为离散滑坡体, W_i 为该滑坡体的目标权重, X_i, Y_i 为其坐标;第二,形状量算。单体滑坡的

外观多种多样,在DEM数据基础上,可以对其进行形状系数的量算:

$$r = \frac{P}{2\sqrt{\pi} \times \sqrt{A}} \quad (2)$$

式中, P 为滑坡体周长, A 为滑坡体覆盖面积。如果 $r < 1$,滑坡体为紧凑型; $r = 1$,为标准圆; $r > 1$,为膨胀型。

(2) 滑坡体空间立体透视图

滑坡体的透视立体图能直观地反映单体的立体形态,实用高效,更接近人们的直观视觉。对滑坡体进行局部放大,改变高程值的放大程度以夸大立体形态;可改变视点的位置以便从不同的角度进行观察滑坡;可使立体图形转动,更好地研究地形的空间形态。通过调整观察的参数值,可从不同方位和距离绘制形态各不相同的透视图(图2)。

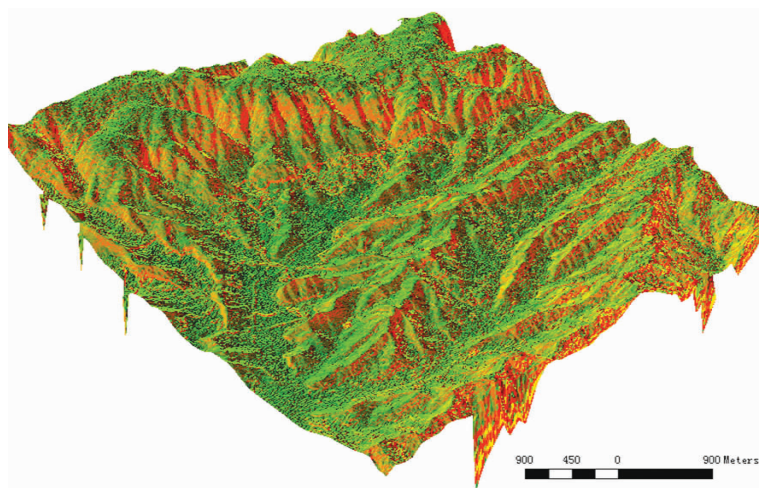


图 2 滑坡体空间信息立体透视图

Fig. 2 Stereoscopic perspective view of landslide dimensional spatial information

(3) 地形地貌信息计算

由 DEM 派生的地形属性可由高程数据直接计算得到,如坡度因子,坡向、剖面积、体积和表面积(图 3)。第一,坡度和坡向。坡度定义为水平面与局地表面之间的正切值,包含两部分:坡度指的是高度变化的最大值比率,用百分比表示,而坡向是该变化比率最大值的方向,按从正北方向起算的角度测量。坡度和坡向的计算通常使用 3×3 窗口在 DEM

高程矩阵中连续移动并完成整幅图的计算。第二,剖面积、体积和表面积。根据 DEM 可计算任意横断面的面积。在 DEM 数据上画一条剖面线,可计算其与 DEM 网格边交点 $P_i(X_i, Y_i, Z_i)$ 的剖面积。表面积将网格分解成三角形,由三角形的点坐标 (x_i, y_i, z_i) 计算通过三个顶点的斜面三角形的面积,累加得表面积;体积计算由四棱柱体积累加得到,棱柱体上表面用抛物双曲面拟合,下表面为水平面。

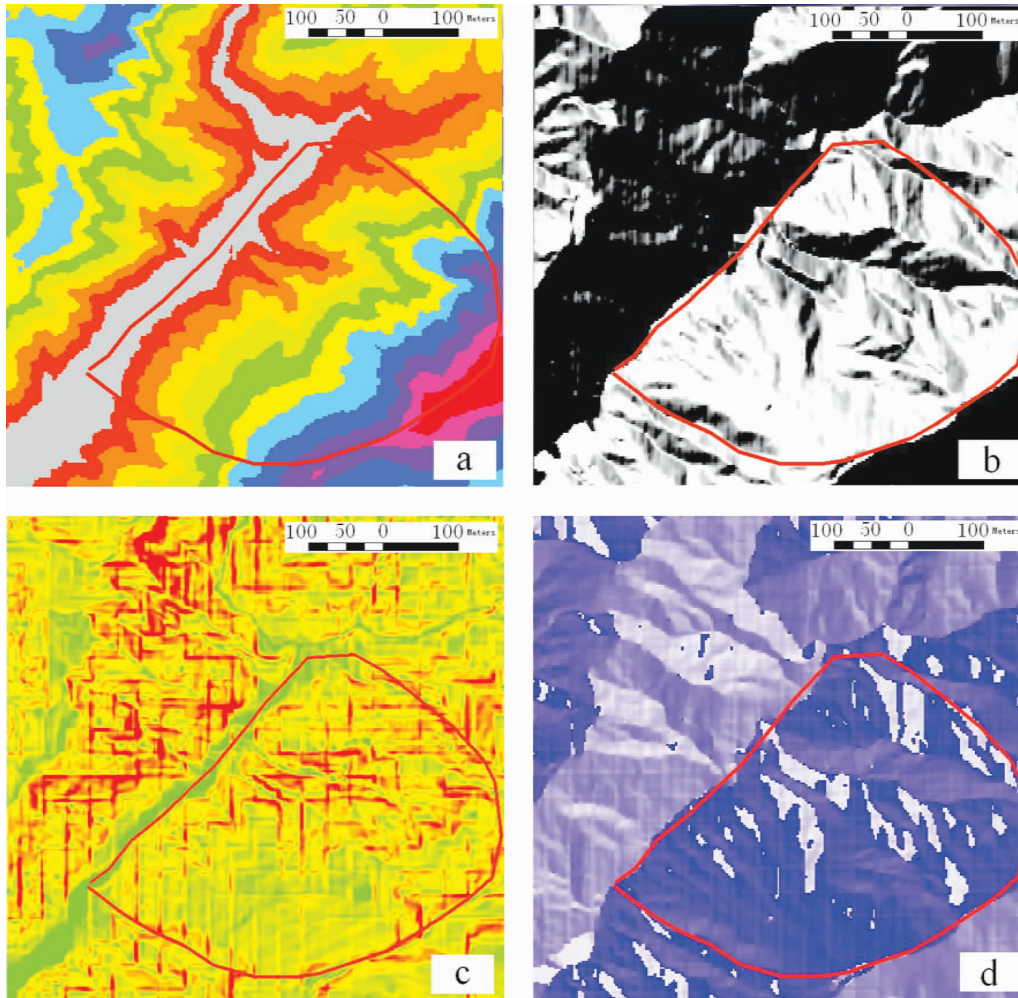


图 3 文家坝滑坡地形地貌计算结果:TIN+等高线(图 3-a)、山体阴影(图 3-b)、坡度(图 3-c)、坡向(图 3-d)

Fig. 3 Topography results of the Wenjiaba landslide: TIN + contour(fig3-a); hillshade(Fig. 3-b); slope(Fig. 3-c); aspect(fig3-d)

3.2 空间分析手段的应用

(1) 缓冲区分析

在滑坡灾害应用中,基于栅格结构作缓冲区分析,可以模拟一些地物要素对邻近对象的作用过程,离滑坡体越远作用力越弱。可以将断裂带和水系作为阻力表面,单体滑坡为主体,用推移或扩散的方法计算得到一定范围内每个栅格单元的断裂带和水系的作用程度。

(2) 叠加分析

斜坡稳定性的空间预测与评价主要是考虑控制滑坡发生的基本因素和影响因素对斜坡稳定性的贡献,将其按照一定的数学方法进行叠加和组合,来判明斜坡稳定性程度或危险性级别。叠加运算过程是:第一,将环境地质因素拆分为多个单因素特征,尽量避免因素重复。第二,对这些数据层进行相关性分析,剔除干扰因素和相关性过高的图层;第三,

叠加运算,处理空间数据和其对应的属性数据,或再叠加处理进行分析。叠加操作可确定各因素在滑坡灾害形成中所占地位及确定导致滑坡失稳的主控因素。

3.3 信息管理与决策支持系统的开发

在对单体滑坡理论研究比较成熟的基础上,建立相应的评价与决策支持系统(图4)。第一,构建单体滑坡涉及的空间数据与属性数据的标准;第二,将建立的各种风险评估模型集成应用到决策支持系统中;第三,利用系统对指定单体滑坡风险进行快速

评估,规避滑坡风险。应用型GIS有很多形式,从开发实现的角度考虑可概括为三种形式:独立开发、宏语言开发和集成二次开发。作为一个可运行的单体滑坡灾害风险评估系统,应由三层结构体系组成:数据层、中间服务层和应用层。数据层主要是一些存在于后端的数据源,包括存储单体滑坡基础数据、滑坡发育数据和社会经济统计数据;中间服务层存储风险评估的模型库;应用层是集成模型库对数据库操作的结果,得出相关决策的依据。

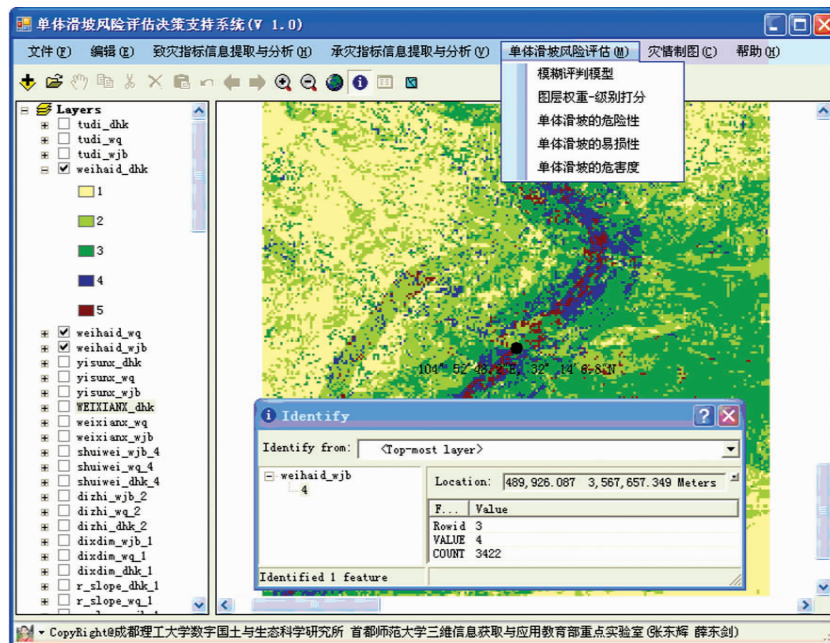


图4 单体滑坡灾害风险评估决策支持系统主界面

Fig. 4 Main interface of risk assessment decision support system for single landslides

4 结论与讨论

研究表明,采用遥感数据作为单体滑坡信息的获取手段,地理信息系统作为空间数据管理与分析的手段,风险评估危险性、易损性和危害性三级模式作为单体滑坡灾害风险评估的理论基础,可以体系化地将RS和GIS技术应用于单体滑坡的风险评估任务中,得到很好的研究效果。采用3“S”手段研究

过程中,个别数据的无法获取以及多源数据的分辨率难以最优化协调,多采用降维和插值等处理,势必造成一定的人为误差。因此,地质工程的方法,例如极限平衡理论、有限元和块体等方法,是进行滑坡稳定性分析的另一种思路,这些方法应和空间信息技术互补作用,相互的交叉分析能产生很好的效果,是进一步探讨的关键。

参 考 文 献

- [1] Xue D, Yang H. A concurrent engineering-oriented design database representation model[J]. Computer-Aided Design, 2004, 36(8): 947-964.
- [2] 杨武年, 濮国梁, CAUNEAU F, 等. 长江三峡库区地质灾害遥感图像信息处理及其监测和评估[J]. 地质学报, 2005, 79(3): 423-426.
- [3] 李学军. InSAR技术在大同矿区地面沉降监测中的应用研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2007.

- [4] 李自立. 滑坡变形监测反演参数及稳定性研究[D]. 西安:长安大学, 2005.
- [5] 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. 吉林大学学报(地球科学版), 2004, 34(4): 601—606.
- [6] 唐川, 朱静, 张翔瑞. GIS 支持下的地震诱发滑坡危险区预测研究[J]. 地震研究, 2001, 24(1): 570—571.
- [7] 邓辉. 高精度卫星遥感技术在地质灾害调查与评价中的应用[D]. 成都: 成都理工大学, 2007.
- [8] 向喜琼, 黄润秋. 地质灾害风险评价与风险管理[J]. 地质灾害与环境保护, 2000, 15(1): 320—322.
- [9] Temesgen B, Mohammed M U, Korme T. Natural hazard assessment using GIS and remote sensing methods with particular reference to the landslides in the wondogenet area[J]. Phys Chem Earth, 2001, 26(9): 605—615.
- [10] 向中林, 顾雪祥, 董树义. 三维地质建模及可视化在危机矿山找矿中的应用研究—以沂南金矿为例[J]. 地球与环境, 2009, 37(2): 62—64.

Application of RS and GIS Technology in Disaster Risk Assessment of Single Landslide

ZHANG Dong-hui^{1,2}, Zhao Ying-jun¹, XUE Dong-jian², CUN Xin¹, Zhang Chuan¹

(1. National Key Laboratory of Remote Sensing Information and Imagery Analyzing Technology, Beijing Research Institute of Uranium Geology, Beijing 100029, China; 2 National Laboratory of Geo-hazard Prevention and Geo-environment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: This paper analyzed the theories of disaster risk assessment of single landslide using 3“S” technology, and studied briefly the hazard indexes and assessment models. In addition, optical RS and InSAR were used to extract the information on single landslide and also discuss the application of GIS, emphasizing the operations of DEM, spatial analysis and decision-making system in the assessment process.

Key words: remote sensing; geographic information system; single landslide; disaster risk assessment