第19卷第3期
2013年9月

地 质 力 学 学 报
JOURNAL OF GEOMECHANICS

Vol. 19 No. 3
Sep. 2013

文章编号： 1006-6616（2013）03-0295-09

GIS在滑坡稳定性评价中的应用
——以汉源县二蛮山为例

谭春洪[1]，朱志铭[1]，周凯睿[2]，边菁生[1]，
魏　源[3]，邹祖银[1]，张云奇[4]

（1. 四川农业大学城乡建设学院，四川 都江堰 611830；
2. 四川农业大学经济管理学院，四川 成都 611130；
3. 四川农业大学商学院，四川 都江堰 611830；
4. 四川农业大学旅游学院，四川 都江堰 600830）

摘　要： 采用野外调查与室内实验相结合的方法，以四川汉源县二蛮山作为研究对象，通过对滑坡发生的环境条件、发育特征和机理进行分析，选取了滑坡体特征、地质构造、高程、坡向、坡度、地震、降雨等因素作为研究分析变量，将GIS与模糊数学评价方法相结合，开发滑坡稳定性评价插件，对研究区域进行危险性区划，尽量避免易发生地质灾害的区域，减小人员伤亡和财产损失。研究结果表明，滑坡的发生区域主要集中在高程1600 m左右、坡度30°—50°地段，随着高度和坡度的增大，发生滑坡的可能性也逐渐增加。

关键词： 二蛮山；滑坡稳定性；GIS；模糊数学

中图分类号： P642.22　　　　**文献标识码：** A

0　引言

滑坡是一种常见的地质灾害，边坡不稳定造成的滑坡问题已成为全球性的三大自然灾害之一[1]，它是指在一定地形、地质条件下，由于各种自然或人为因素破坏了原有的力学平衡条件，使得边坡处于不稳定状态，在自重或其他作用下，沿一定的软弱带作整体的、缓慢的、间歇的甚至是突发的向前向下移动的不良地质现象[2]，如2010年7月27日四川汉源二蛮山在地震、强降雨等影响下发生滑坡，损失十分惨重。

滑坡稳定性评价是滑坡灾害研究的热点问题，也是难点[3]。滑坡发生的原因有环境条件和诱发条件，受滑坡体特征、地层岩性、地质构造、地形地貌、地震和降雨等多个因素影响，深入系统地研究主导因素和诱发因素与滑坡的发生和空间分布规律之间的关系，对防灾

收稿日期： 2013-03-20

基金项目： 国家自然科学基金项目（41102224）；四川农业大学"大学生创新性实验计划"项目（121062672）

作者简介： 谭春洪（1992-），男，四川农业大学城乡建设学院地理信息系统专业在读本科生。E-mail：18081029448@163. com

联系作者： 邹祖银（1974-），男，副教授，在读博士，主要从事道路与铁道工程科研教学工作。E-mail：zouzyin@gmail. com

减灾工作有重要的应用价值。

GIS 在边坡灾害方面的应用始于 20 世纪 70 年代后期，20 世纪 80 年代，特别是进入 20 世纪 90 年代以来其应用日趋广泛。近年来，随着人们对边坡防灾的重视和边坡灾害研究理论与方法的逐步完善，GIS 在边坡稳定性分析中的应用快速发展，目前 GIS 在边坡灾害研究中的应用主要有斜坡信息管理、滑坡与动静态环境因素相关分析、滑坡灾害空间预测系统和斜坡灾害预警系统等 4 个方面[4~9]。本文以汉源县二蛮山滑坡体为研究对象，通过野外调查和室内实验，分析了该滑坡的基本特征和形成机理。在此基础上，应用 GIS 手段进行数据采集与建库、显示与编辑、存储与管理以及空间分析，利用内置的 VBA (Visual Basic for Application) 开发平台对其进行二次开发、结构定制和功能扩展，开发滑坡稳定性评价模块，从而实现灾害预测预报功能，希望能有效预防灾害发生，提高预防及减少地质灾害的能力，特别对余震、降雨比较频繁的区域有着重要意义。

1 研究区概况

2010 年 7 月 27 日，受极端天气和持续强降雨的影响，四川汉源县二蛮山山体突发滑坡，滑坡长 1.6 km，高 620 m，滑坡体约 120×10^4 m^3，造成居住于左侧斜坡上的双合村一组 5 户 20 人在滑坡－碎屑流的高速运动过程中被掩埋。二蛮山沟谷原为一高频泥石流沟，堆积于沟谷中段的松散物质于主滑坡结束约 30 min 后，在重力影响下形成第二次滑坡，滑坡体到达万工集镇，造成部分房屋被掩埋，91 户（涉及 391 人）房屋倒塌，414 户 1338 人房屋受到影响，1500 人被迫紧急转移[10]。本次滑坡具有突发性、隐蔽性强、危害性大等特点，值得关注重视。

二蛮山位于万工集镇背后，地理坐标为北纬 29°18′，东经 102°42′，总体呈东西向展布；三面环水，流经研究区的有白岩河和大渡河，对二蛮山岩土体侧蚀严重；西南侧为一高频泥石流大沟，滑坡源位于大沟上段右侧斜坡上，万工集镇处于沟口部位的堆积扇上，而双合村一组村民居住地处于大沟中下段的左侧斜坡上（见图 1）。研究区属亚热气候带，干热少雨，暴雨季节（6—9 月）降水量占全年的 70.6%，且多以夜间阵雨和暴雨为主，是滑坡、泥石流活动的高峰期，而地下水类型主要是松散堆积层孔隙水，其次是基岩裂隙水和碳酸盐岩溶隙水[11]。本次滑坡在成灾机理、动力特征以及成灾模式等方面比较复杂，据相关文献，二蛮山滑坡分为主滑坡与二次滑坡两部分（见图 2），主滑坡又可分为滑源区、携卷滑塌区、主堆积区，二次滑坡又分为滑源区和堆积区[12]。

2 滑坡机理分析

“7.27”汉源二蛮山滑坡泥石流地质灾害是内外力共同耦合作用的结果，受该地区特殊的地质构造、地形地貌、岩性、地震和降雨等多因素影响，其中地震和降雨起主导控制作用；但在对具体区域进行评价时，往往因客观条件限制，并不需要所有的因素都参与评价，而应根据研究区的实际情况具体选择。

2.1 地形地貌条件

二蛮山山体地处高山峡谷区，属高中山地形，坡向南西，沟谷纵坡坡度平均 27°，滑坡区为一险峻高陡斜坡，稳定性差，地形复杂，上陡下缓，区内地形高差悬殊大（相对高差

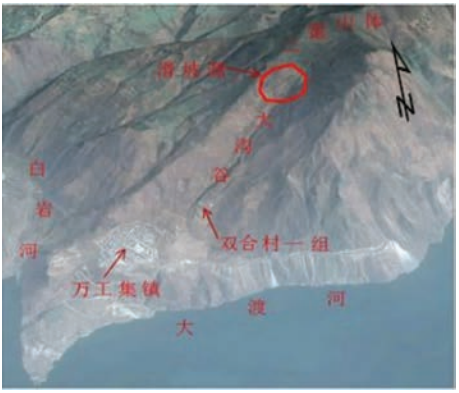

图 1　滑坡体概况

Fig. 1　The situation of landslide body

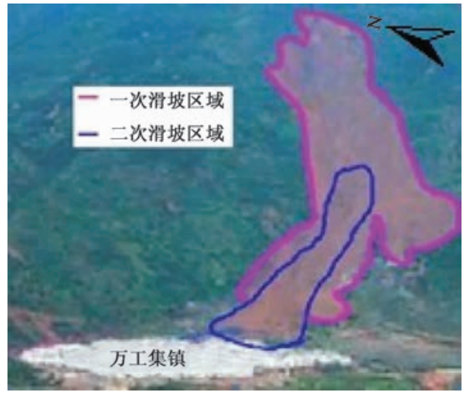

图 2　滑坡体特征

Fig. 2　The features of landslide body

近千米)，处于高势能区，使滑坡具有高速启动的位能条件，为滑坡的发生提供了基本环境条件，从而引起滑坡。

2.2　地层岩性

本区主要由二叠系峨眉山玄武岩和梁山组、阳新组构成。玄武岩岩体内柱状节理发育，表层岩体风化严重，塬面破碎；梁山组以钙质、炭质黏土岩为主；阳新组以生物碎屑灰岩、白云岩为主，区内主要是生物碎屑灰岩，灰岩表层风化溶蚀强烈，陡峻且凹凸不平，多发育溶蚀沟槽。滑坡源主要位于沟谷左岸的玄武岩斜坡上，陡峭崎岖，加之“5.12”汶川地震使斜坡产生了一定的变形、破坏，造成土质疏松，地形破碎，为滑坡提供了物质基础，也为地下水渗入提供了良好的通道[12]。

2.3　降雨的诱发作用

2010 年 7 月 23—27 日，汉源县出现连续强降雨天气过程，降雨主要集中在 24—25 日，累计降雨量达到 163 mm，尤其 7 月 25 日小时降雨量达到 50 mm（见图 3)，超过短时特大暴雨标准（≥50 mm/h）。在 7 月 23 日降雨过程中，滑源区斜坡便出现局部开裂，滑坡量较小；随后在 7 月 25 日二蛮山大沟内暴发了特大滑坡泥石流灾害，一部分滑坡体沿着山体快速向下移动，另一部分抛向了山腰左侧村民居住的区域；至 7 月 27 日滑源区斜坡出现剧烈变形和崩滑，致使沟槽及两旁碎屑物质缓缓滑向沟口堆积扇上的万工集镇。强降雨造成土壤含水饱和，岩土软化，从而降低了岩层间的抗滑力，增大了下滑力，并对滑源区斜坡坡脚严重掏蚀，导致斜坡失稳，是诱发此次特大山洪泥石流灾害的直接原因。

3　数据与方法

3.1　数据源分析

本研究以 SRTM（Shuttle Radar Topography Mission，航天飞机雷达地形测绘）为基础数据，此数据带有空间特征和属性特征，包括高程、坡度、坡向等信息，可免费使用且广泛应用于地质研究中，具有现势性好、分辨率高和精度高等特点；同时结合研究区地形图、降雨和地质等数据进行分析。本研究所用的软件平台是 ArcGIS 10.1，为美国 Esri 公司研发产品，具有空间数据采集、存储与管理、查询检索、专题制图、数据输出、空间分析以及二次开发等功能。

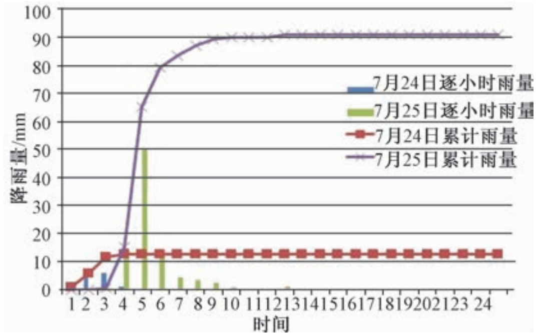

图 3　滑坡前 48 h 逐小时和累计降雨量

Fig. 3　Hourly and accumulated rainfall before 48 hours of landslide occuring

3.2　研究方法

本文主要研究思路是对 SRTM-DEM 数据进行预处理，利用 ArcGIS 的空间分析功能提取高程、坡向和坡度等派生数据，建立针对研究区的坡度、坡向和高程等评价指标图形库，并建立基础属性数据库。GIS 与模糊数学评价方法相结合，并基于 ArcGIS 平台开发出评价插件，输入滑坡相关的具体预测参数，如高程、最大月（日）降雨量、平均月（日）降水量等，运行模型，计算每一个评价单元的所有指标，得出潜在危险系数；在此基础上，使用 ArcGIS 的重分类功能对危险系数进行分级，合理划分灾害危险区划范围，进而专题制图绘制出研究区域危险区划评价图，对灾害发生的可能性做出迅速评价；最后与现场实地考察和其他研究结果对比，进行成果检验分析。本文评价体系包括评价单元选取、评价指标的选取及量化、选定评价模型、危险性分析与分级和评价结果制图等内容。

3.2.1　评价单元选取

本文根据滑坡机理和地貌特征，将斜坡共划分为约 200 个单元（见图 4）。

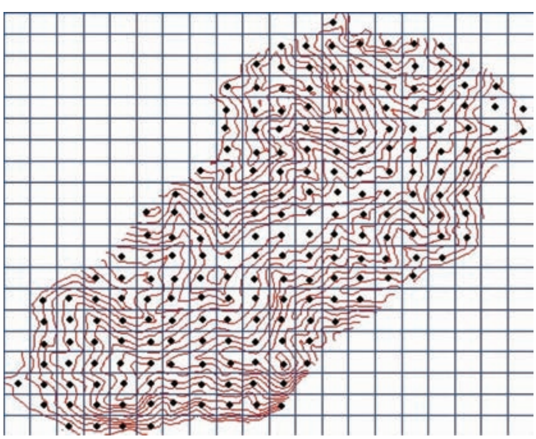

图 4　评价单元划分图

Fig. 4　A map showing division of the evaluation unit

3.2.2　构建评价指标体系

结合现场调查研究和室内实验，对灾害发育条件、特征及机理进行分析，选取了 7 种主要成灾因子，即滑坡体特征、地质构造、地震、坡度、坡向（见图 5）、高程（见图 6）及降雨量。但是由于条件限制，地震资料收集难度大，因此本文主要研究降雨诱发型滑坡，深

入系统地研究降雨与滑坡发生和空间分布规律之间的关系。

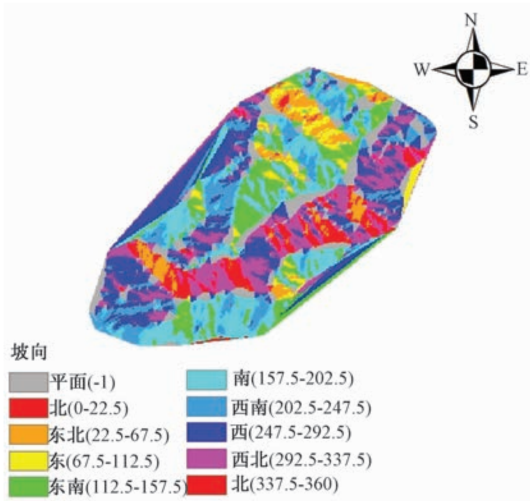

图 5　坡向图

Fig. 5　A map of aspect

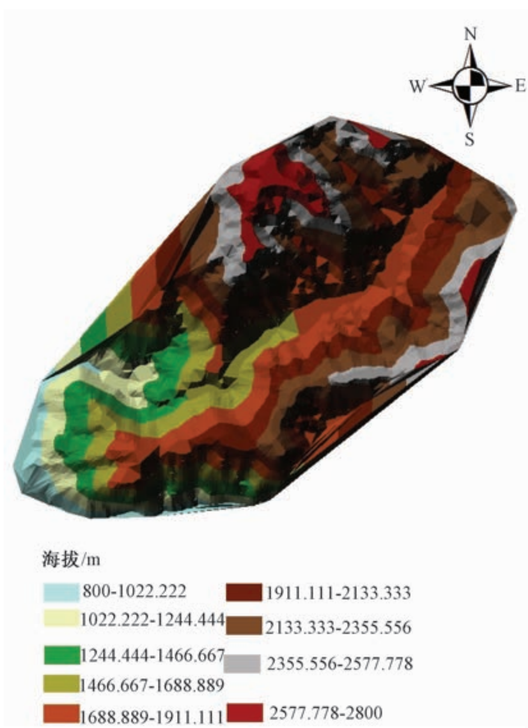

图 6　高程图（黑色为阴影效果）

Fig. 6　A map of elevation

3.2.3　评价模型

边坡稳定性分析评价受制于诸多因素，具有耦合性、复杂性、不确定性等特点。本文运用模糊数学综合评判方法加以分析和判别，把这些具有模糊概念的自然属性量化，通过数学

函数使其转变为定量计算[13]。

模型计算公式为：

$$H = K(R_1 F_{\text{坡度}} + R_2 F_{\text{坡向}} + R_3 F_{\text{高程}} + R_4 F_{\text{岩}} + R_5 F_{\text{雨}}) \tag{1}$$

式中：H——安全系数；$F_{\text{坡度}}$，$F_{\text{坡向}}$，$F_{\text{高程}}$，$F_{\text{岩}}$，$F_{\text{雨}}$——单元地形坡度、坡向、高程、单元岩性及单元降雨量危险性等级；K——效应增大修正系数，R_1，R_2，R_3，R_4，R_5——单元地形坡度、坡向、高程、单元岩性及单元降雨量的影响系数（即权重系数），本文中的取值分别为 0.225，0.114，0.286，0.175 和 0.200。

降雨量是本文主要的分析变量。利用 ANSYS 对二蛮山滑坡坡体进行建模，FLAC3D 模拟降雨滑坡过程，得出引起滑坡的降雨临界值，进而确定降雨对滑坡的影响系数（即参数建议值）[14]。针对本区的特点，本文按高程把研究区划分为 0.8～1.0 km，1.0～1.2 km，1.2～1.4 km，1.4～1.6 km 和大于 1.6 km 等 5 个区域，并结合层次分析法（AHP）将坡度划分为 0°～10°、10°～20°、20°～30°、30°～60°和 >60°等 5 个等级，将坡向划分为平面、SW 和 S、NW 和 W、SE 和 E 以及 NE 和 E 等 5 种类型，将岩性划分为土层、灰岩和玄武岩等 3 种类型，输入不同降雨量进行预测。

3.2.4 评价结果及分析

本文基于 ArcGIS 平台，利用内置的 VBA（Visual Basic for Application）进行二次开发、结构定制和功能扩展，开发滑坡稳定性评价模块（见图 7），从而实现灾害预测预报功能。

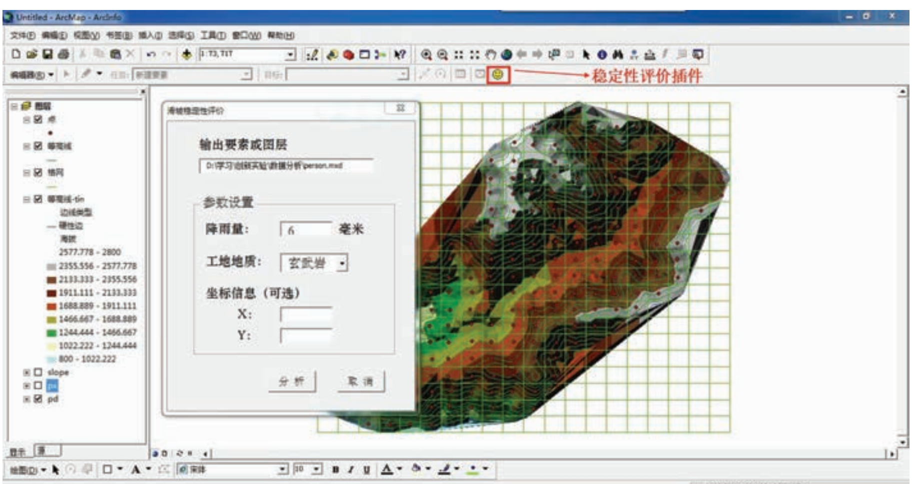

图 7 评价插件运行界面

Fig. 7 The running interface of evaluation plugin

输入相应降雨预测参数，可对不同降雨量进行分析。使用 ArcGIS 重分类功能对危险系数进行分级（见表 1），合理划分灾害危险区划范围，通过专题制图绘制出研究区域危险性评价图，将研究区域划分为低、中和高 3 个不同危险性等级的区域，并可给出各区域占研究区总面积的比例。

按照以上危险性分区原则和方法，结合已有研究基础，对二蛮山山体进行地质灾害危险区划分，结果如图 8 所示。由图 8 可以看出，滑体集中在北坡中部，其中高度危险区（红色区域）面积约占 7.5%，主要集中在大沟上段右侧斜坡，高程在 1600 m 左右，与二蛮山滑坡实际灾情基本吻合，需要密切关注留意；中度危险区（黄色区域）面积约占 13.7%，大

表 1　划分标准与面积比例

Table 1　The standard and proportion scale

安全系数	危险性等级	面积比例/%
$H \leqslant 0.2$	高	7.5
$0.2 < H \leqslant 0.5$	中	13.7
$H > 0.5$	低	79.8

部分处于高程 1300 m 左右，分布于高度危险区（红色区域）周围，容易受影响形成次级滑坡灾害；低风险区（绿色区域）面积占 79.8%。

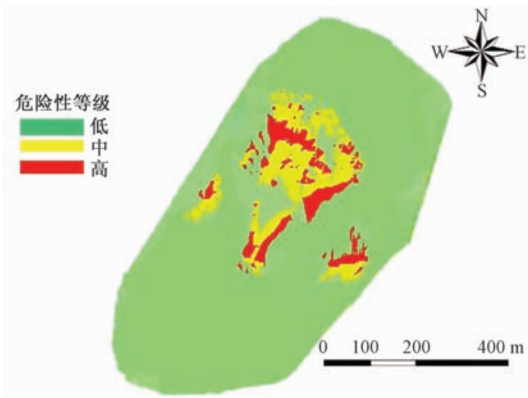

图 8　降雨量为 6 mm 时危险性评价图

Fig. 8　A risk assessment map for the 6 mm rainfall

4　结论与认识

本文以汉源县二蛮山滑坡为例，在不考虑地震的作用下，主要研究降雨对滑坡产生的影响，并在此基础上进行滑坡危险性预测。

安全系数（H）和危险区所占面积比例的分析结果均表明，该区滑坡灾害主要发生在高程大于 1.4 km 的地段。研究区约 21.2% 的面积处于 30°—50°的坡度地段，随着高度和坡度的增大，发生滑坡的可能性也增加。

采用 GIS 与模糊数学综合评判方法相结合进行滑坡稳定性评价，其评价结果与实地考察分析和极限平衡法计算结果基本相符，较好地反映了滑坡体实际状态。但是由于滑坡泥石流灾害问题的复杂性，仍然存在着许多有待于进一步完善的地方，例如前期评价因子选取、区间划分、区划结果的准确性、各影响因子参数建议值、不同研究区域评价预测模型选取等问题还有待于更加深入的研究。

本研究可为震后滑坡体稳定性评价提供参考，对做好强余震预报和次生灾害防治工作具有重要意义，尤其对受大地震影响严重、余震频繁、降雨充沛的地区具有参考价值。

参　考　文　献

[1]　武胜波. 滑坡地质灾害防治工程问题的探讨 [J]. 城市建设理论研究，2011，34：1~4.

WU Sheng-bo. Discussion on control engineering of landslide geological disasters [J]. City Construction Theory Research, 2011, 34: 1 ~ 4.

[2] 王振强. 重大滑坡阶段演绎稳定性分析与综合安全度 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2010: 1 ~ 80.
Wang Zhenqiang. The interpretation of a major landslide stage stability analysis and integrated safety [D]. Chongqing: Chongqing Jiao tong University, 2010: 1 ~ 80.

[3] 汪华斌, 吴树仁. 滑坡灾害风险评价的关键理论与技术方法 [J]. 地质通报, 2008, 27 (11): 1764 ~ 1770.
WANG Hua-bin, WU Shu-ren. Key theory and method of landslide hazard risk assessments [J]. Geological Bulletin of China, 2008, 27 (11): 1764 ~ 1770.

[4] 许冲, 戴福初. 基于 ArcGIS 的边坡稳定性评价系统研究 [J]. 工程地质计算机应用, 2008, 49 (1): 23 ~ 27.
XU Chong, DAI Fu-chu. Study on the slope stability evaluation system based on ArcGIS [J]. Engineering Geology and Computer Application, 2008, 49 (1): 23 ~ 27.

[5] 王磊, 张春山, 杨为民, 等. 基于 GIS 的甘肃省甘谷县地质灾害危险性评价 [J]. 地质力学学报, 2011, 17 (4): 388 ~ 401.
WANG Lei, ZHANG Chun-shan, YANG Wei-min, et al. Risk assessment of geohazards by using GIS in Gangu County, Gansu Province [J]. Journal of Geomechanics, 2011, 17 (4): 388 ~ 401.

[6] 楚敬龙, 杜加强, 滕彦国, 等. 基于 GIS 的重庆市万州区滑坡灾害危险性评价 [J]. 地质通报, 2008, 27 (11): 1875 ~ 1881.
CHU Jing-long, DU Jia-qiang, TENG Yan-guo, et al. Landslide hazard evaluation for Wanzhou District, Chongqing City, China using GIS [J]. Geological Bulletin of China, 2008, 27 (11): 1875 ~ 1881.

[7] 陶志刚, 孙忠强, 郭占飞, 等. 耦合多种成灾因素下的边坡稳定性分析 [J]. 地下空间与工程学报, 2011, 7 (3): 593 ~ 598.
TAO Zhi-gang, SUN Zhong-qiang, GUO Zhan-fei, et al. Slope stability analysis under the condition of coupling multiple factors causing the landslide [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2011, 7 (3): 593 ~ 598.

[8] 黄润秋, 王运生, 董秀军. 2009 年 8.6 四川汉源猴子岩崩滑的现场应急调查及危岩处理 [J]. 工程地质学报, 2009, 17 (4): 445 ~ 448.
HUANG Run-qiu, WANG Yun-sheng, DONG Xiu-jun. The 6^{th} August 2009 field urgent investigation on the geohazard of the rock fall dammingin Houziyan, Shunhe, Hanyuan, Sichuan [J]. Journal of Engineering Geology, 2009, 17 (4): 445 ~ 448.

[9] Guthrie R H, Evans S G, Catane S G, et al. The 17 February 2006 rock slide-debris avalanche at Guinsaugon Philippines: A synthesis [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2009, 68 (2): 201 ~ 213.

[10] 郭锋, 刘钊, 邓潇. 汉源县万工泥石流抢险中的几点做法 [J]. 水利水电技术, 2011, 42 (9): 62 ~ 64.
GUO Feng, LIU Zhao, DENG Xiao. Rescue of Hanyuan County million workers in the debris flow points of [J]. Water Resources and hydropower Engineering, 2011, 42 (9): 62 ~ 64.

[11] 牛彦博. 汉源二蛮山高速滑坡启程阶段孔隙水压力效应分析 [J]. 工程地质学报, 2013, 21 (1): 70 ~ 75.
NIU Yan-bo. Effect of pore water pressure on set-out range of high speed landslide of Ermanshan in Hanyuan City [J]. Journal of Engineering Geology, 2013, 21 (1): 70 ~ 75.

[12] 许强, 董秀军, 邓茂林, 等. 2010 年 7.27 四川汉源二蛮山滑坡 - 碎屑流特征与成因机理研究 [J]. 工程地质学报, 2010, 18 (5): 610 ~ 622.
XU Qiang, DONG Xiu-jun, DENG Mao-lin, et al. The Ermanshan rock slide debris flow of July 27, 2010 in Hanyuan, Sichuan: Characteristics and failure mechanism [J]. Journal of Engineering Geology, 2010, 18 (5): 610 ~ 622.

[13] 杜继隐. 降雨型地质灾害预报预警——以黄土高原和秦巴山区为例 [M]. 北京: 科学出版社, 2010.
DU Ji-yin. Rainfall-triggered geologic disaster forecast and warning: Taking loess plateau and Qinba mountain areas as examples [M]. Beijing: Science Press, 2010.

[14] 陶骞, 刘超, 朱志铭, 等. 多工况下汉源二蛮山滑坡机理数值模拟 [J]. 地质力学学报, 2012, 18 (4): 440 ~ 450.
TAO Qian, LIU Chao, ZHU Zhi-ming, et al. Numerical simulation of landslide mechanism at Ermanshan in Hanyuan under different conditions [J]. Journal of Geomechanics, 2012, 18 (4): 440 ~ 450.

APPLICATION OF GIS IN LANDSLIDE STABILITY EVALUATION: A CASE STUDY FOR ERMANSHAN LANDSLIDE

TAN Chun-hong[1], ZHU Zhi-ming[1], ZHOU Kai-rui[2], BIAN Jing-sheng[1],
WEI Yuan[3], ZOU Zu-yin[1], ZHANG Yun-qi[4]

(1. *Urban and Rural Development College of Sichuan Agricultural University*, *Dujiangyan* 611830, *China*;
2. *Economics and Management College of Sichuan Agricultural University*, *Chengdu* 611130, *China*;
3. *Business College of Sichuan Agricultural University*, *Dujiangyan* 611830, *China*;
4. *Tourism College of Sichuan Agricultural University*, *Dujiangyan* 611830, *China*)

Abstract: In this paper, the method of theoretical knowledge, field surveys and laboratory experiments were used to analyze the environmental conditions, development characteristics and mechanism of the Ermanshan landslide in Hanyuan County, selecting the characters of landslide, geological structure, elevation, aspect, slope, earthquake, rainfall and other factors as analysis variables. We combine GIS with fuzzy mathematical evaluation method, develop the landslide stability evaluation plug-in, and then divide the risk regionalization of study area, in order to avoid occurrence of geological hazards in the area, reduce casualties and property losses. The results show that the landslide areas are mainly concentrated on the elevation at about 1600 m and 30° to 50° slope area. With the increase of height and slope, the possibility of landslides is raised.

Key words: Ermanshan; landslide stability; GIS; fuzzy mathematics