

# 逻辑回归模型在玉树地震滑坡危险性评价中的应用与检验\*

许冲 徐锡伟

(中国地震局地质研究所活动构造与火山重点实验室 北京 100029)

**摘要** 2010年4月14日07时49分(北京时间),青海省玉树县发生了Ms7.1级大地震。作者基于高分辨率遥感影像解译与现场调查验证的方法,圈定了2036处本次地震诱发滑坡。这些滑坡受地震地表破裂控制强烈,规模相对较小,常常密集成片分布。滑坡类型多样,以崩塌型滑坡为主,还包括滑动型、流滑型、碎屑流型、复合型等类型的滑坡。本文基于地理信息系统(GIS)与遥感(RS)技术,应用逻辑回归模型开展玉树地震滑坡危险性评价,并对结果合理性进行检验。应用GIS技术建立玉树地震滑坡灾害及相关滑坡影响因子空间数据库,选择高程、斜坡坡度、斜坡坡向、斜坡曲率、与水系距离、坡位、断裂、地层岩性、归一化植被指数(NDVI)、公路、同震地表破裂、地震动峰值加速度(PGA)共12个因子作为玉树地震滑坡影响因子,在GIS平台下将这些因子专题图层栅格化。应用逻辑回归模型得到每个因子分级的回归系数,然后建立滑坡危险性指数分布图。利用玉树地震滑坡空间分布图对滑坡危险性指数图进行检验,正确率达到83.21%。滑坡危险性分级结果表明,在占研究区总面积4.97%的“很高危险度”的较小范围内,实际发育滑坡数量为766个,占总滑坡面积的比例高达37.62%,表明地震滑坡危险性评价结果良好。不同危险性级别的滑坡点密度统计结果表明,滑坡点密度随着危险性级别的升高而非常迅速的升高。

**关键词** 玉树地震滑坡 逻辑回归模型 危险性评价

中图分类号:P642 文献标识码:A

## LOGISTIC REGRESSION MODEL AND ITS VALIDATION FOR HAZARD MAPPING OF LANDSLIDES TRIGGERED BY YUSHU EARTHQUAKE

XU Chong XU Xiwei

(Key Laboratory of Active Tectonics and Volcanoes, Institute of Geology, Chinese Earthquake Administration, Beijing 100029)

**Abstract** At 07:49 (Beijing time) on April 14, 2010, a catastrophic earthquake with Ms 7.1 struck Yushu County, Qinghai Province, China. 2036 landslides were interpreted from aerial photographs and remote sensing images, verified by selected field checking. The spatial distribution of the landslides was evidently strongly controlled by the locations of the main surface fault ruptures. The landslides commonly occurred close together. Most of the landslides were small. The landslides were of various types. They were mainly shallow, disrupted landslides, but also included rock falls, deep-seated landslides, liquefied landslides, and compound landslides. The aim of this study was to apply and validate logistic regression model for the Yushu earthquake triggered landslide hazard mapping. The Geographic Information Systems (GIS) and Remote Sensing (RS) technologies were used. A spatial database was developed and

\* 收稿日期:2011-06-20;收到修改稿日期:2011-11-21.

基金项目:科学技术部国际科技合作项目(2009DFA21280),国家自然科学基金项目(40821160550 & 40974057)和中国地震局地质研究所基本科研业务专项(IGCEA0905 & ZGCEA1120)资助。

第一作者简介:许冲,从事地震滑坡与活动构造研究. Email: xc11111111@126.com

analyzed using GIS technology. It includes the landslides and associated controlling parameters which may have influence on the occurrence of landslides. The twelve factors that influence landslide occurrence were created in raster data format base on GIS platform. They include elevation, slope angle, slope aspect, slope curvature, slope position, drainages, lithology, faults, roads, normalized difference vegetation index (NDVI), co-seismic main surface fault-ruptures, and peak ground acceleration (PGA). the coefficients of the evaluation variables were estimated using logistic regression model and were used to calculate the landslide hazard index for the entire study area within a GIS environment. The validation result showed a success rate of 83.21% between the hazard map and the locations of Yushu earthquake triggered landslides. The landslide hazard assessment rank result showed that the "very high hazard" level covers about 4.97% of the total study area but has a number of 766 landslides (37.62% of the total landslides number), which representing good quality of the landslide hazard map. The sequence of the landslide number density percentage descends expeditiously accompany with the hazard level decreasing.

**Key words** Yushu earthquake triggered landslides, Logistic regression model, Hazard evaluation

## 1 引言

由于地震诱发滑坡往往会造造成重大的人员伤亡与财产损失,近年来,地震滑坡受到了广泛的关注。开展地震滑坡研究对地震灾区的滑坡防灾减灾,灾区恢复重建具有重要的意义。2010年4月14日,在青海省玉树藏族自治州玉树县,发生了Ms7.1级地震<sup>[1]</sup>。震中位置为33.224°N, 96.666°E,震源深度为17km,震级Mw6.9<sup>[2]</sup>。据震后调查结果,玉树地震地质灾害造成了8人死亡、14人受伤,造成的经济损失高达60万元左右<sup>[1,3~5]</sup>。

地震触发滑坡危险性评价研究是地震事件发生后,关于地震滑坡的一个重要研究方向。逻辑回归模型是一种常用的,基于多元统计理论的,滑坡危险性评价方法,该方法可以解决因子相依性的问题,对于因子之间权重的给定具有一定的优势。该方法在国内外滑坡危险性评价研究中得到了较多的应用,如:Pradhan等<sup>[6]</sup>基于逻辑回归模型,采用遥感与GIS技术,选择斜坡坡度、斜坡坡向、曲率、水系、岩性、土地覆盖类型、与线状构造距离、岩土类型、NDVI、降水量共10个滑坡影响因子,开展了马来西亚槟岛的滑坡危险性评价,结果正确率为86.62%; Pradhan与Lee<sup>[7]</sup>基于人工神经网络方法,选择坡度、坡向、斜坡曲率、高程、与道路距离、与河流距离、岩性、与断层距离、土壤类型、土地覆盖类型、NDVI共11个滑坡影响因子开展滑坡危险性评价,并与滑坡发生频率与逻辑回归2种滑坡危险性评价方法进行对比,表明基于人工神经网络方法得到的评价结果正确率最高; Chen与Wang<sup>[8]</sup>选择斜坡高程、地层岩性、坡度、地表覆盖物质、与水系距离、斜坡与倾

角差、土地覆盖类型、坡向与倾向差作为滑坡评价因子,将逻辑回归模型应用于加拿大麦肯齐谷滑坡危险性评价; Yilmaz<sup>[9]</sup>以托卡特与土耳其交界的吉县为研究区,选择了高程、坡度、坡向、流力指数、地形湿度指数、与断裂距离、与水系距离、地层岩性共8个滑坡影响因子,将滑坡发生频率、逻辑回归、人工神经网络3种模型分别应用于滑坡危险性评价工作,三者的正确率分别为0.826、0.842与0.852; Greco等<sup>[10]</sup>以意大利,卡拉布里亚,阿斯普罗蒙特作为研究区,选择岩体类型、土体利用类型、高程、坡度、顺坡向曲率,垂直坡向曲率共6个滑坡影响因子,开展滑坡危险性评价; Thapa与Esaki<sup>[11]</sup>以尼泊尔中部的阿格拉 Khola 流域为研究区,以坡度、坡向、工程地质条件、斜坡复杂度、土地利用5个因子为滑坡触发因子,开展滑坡危险性评价研究; Dai等<sup>[12]</sup>、Dai与Lee<sup>[13]</sup>基于逻辑回归模型开展了香港地区滑坡危险性评价的研究; 胡德勇等<sup>[14]</sup>以马来西亚金马伦高原为研究区,选择斜坡高程、斜坡坡向、斜坡坡度、地表曲率、构造类型、地貌类型、土地覆盖、水系与道路作为评价因子,基于SVM与逻辑回归2种滑坡评价模型,开展滑坡评价与空间预测工作,结果正确率分别为95.9%与86.2%; 李雪平与唐辉明<sup>[15,16]</sup>巫山县新址西区作为研究区,基于逻辑回归模型,开展滑坡危险性评价研究工作。

作者前期关于玉树地震滑坡的调查<sup>[17]</sup>与空间分布规律<sup>[1]</sup>研究成果与汶川地震滑坡评价成果<sup>[18,19]</sup>为顺利开展基于逻辑回归模型的地震滑坡危险性评价研究奠定了良好的基础。作者在2010年玉树地震后开展了地震滑坡特征与分布调查研究工作<sup>[17]</sup>,总结了玉树地震滑坡发生的特点与类型,分析了地震滑坡的多种发生机制,对玉树地震滑坡

的多个控制变量也进行了分析<sup>[1]</sup>。在汶川地震滑坡研究方面,分别基于层次分析法<sup>[18]</sup>与确定性系数分析方法<sup>[19]</sup>,选择多个地震滑坡内动力与外力影响因素,开展汶川地震滑坡危险性评价研究工作,取得了令人满意的成果,尤其是在基于确定性系数方法<sup>[19]</sup>研究中,选择了多种不同的因子组合,分别开展模型的训练工作,为理解不同因子组合下滑坡的评价情况提供了科学参考。本文拟基于地理信息系统(GIS)与遥感(RS)技术,应用逻辑回归模型开展玉树地震滑坡危险性评价,并对评价结果的正确率进行检验。

## 2 Logistic 模型介绍

Logistic 回归模型是二分类因变量(因变量  $Z$  只取 2 个值)常用的统计分析方法。滑坡发生的概率与影响因子之间的关系可表示为:

$$Z = B_0 + B_1X_1 + B_2X_2 + \dots + B_nX_n \quad (1)$$

$$P = 1/(1 + e^{-Z}) \quad (2)$$

式中,  $P$  代表滑坡发生的概率;  $Z$  代表变量叠加后的线性权重之和;  $B_i$  是回归系数,输出结果范围为 0~1, 0 表示发生滑坡的概率为 0%, 1 表示发生滑坡的概率为 100%。

将玉树地震滑坡分布点数据作为滑动样本,共得到 2036 个滑坡样本。对于不滑样本的选择,采用在未滑区域上随机选择 2036 个点,这样得到了所需要的滑坡样本点与非滑坡样本点。与二元概率统计方法不同的是,Logistic 回归模型属于多元统计方法,其根据实际的滑坡点样本与不滑点样本,去进行各个影响因子之间的综合评价,该方法可以较好的解决因子间相互依赖的问题。

## 3 玉树地震及诱发滑坡

青海玉树 Ms7.1 级地震产生的地表破裂带走向约 300°, 65km 长,性质为左旋走滑,挤压鼓包与张裂缝相间排列或雁列式裂缝是地表破裂带的主要类型,破裂带实测最大水平位错约 1.8m<sup>[20~22]</sup>。作者在地震滑坡野外考察的基础上,开展灾后航空相片与高分辨率遥感影像目视解译工作,基于此建立了玉树地震滑坡空间分布数据,包含了 2036 个用多边形要素表示的玉树地震滑坡<sup>[1, 16]</sup>。结果表明玉树地震滑坡受地震地表破裂控制强烈,它们主要分布在 1 个以地表破裂带为大致中心线,面积约为

1455.3km<sup>2</sup> 的矩形区域内,本文就以这个矩形区域作为研究区开展工作<sup>[1]</sup>。玉树地震触发滑坡规模相对较小,常常密集成片分布,类型多样,以崩塌型滑坡为主,还包括滑动型、流滑型、碎屑流型、复合型等滑坡<sup>[17]</sup>。这些滑坡的总面积 1.194km<sup>2</sup>, 单体滑坡平均面积 586.4m<sup>2</sup>。研究区内滑坡面积百分比为 0.082%; 滑坡点密度为 1.4 个·km<sup>-2</sup>。图 1 为玉树地震滑坡与同震地表破裂空间分布图。图 2 为一些典型的玉树地震触发滑坡照片。

## 4 玉树地震滑坡影响因子分级及回归系数

影响因子分级与回归系数的确定是地震滑坡评价中的关键,结合研究区内的地形、地质、地震与其它资料,综合考虑对玉树地震滑坡的多种影响因素,选择斜坡高程、斜坡坡度、斜坡坡向、斜坡曲率、水系、坡位、断裂、地层岩性、公路、NDVI、同震地表破裂、PGA 共 12 个对地震滑坡有影响的因子(表 1),进行地震滑坡危险性评价。根据 1:50,000 地形图上的等高线、高程点、水系等信息,制作数字高程模型(DEM),其空间分辨率为 5×5m,研究区内高程范围是 3589.7~5181.4m,依据 200m 一个间隔 jinxing 高程分类。坡度、坡向、曲率、坡位这 4 个因子图层均是根据 DEM 在 ArcGIS 软件中导出的,它们的分辨率与 DEM 一样,都是 5×5m(表 1)。水系提取自地形图,将水系按照 100m 缓冲区进行分类。岩性与断裂为地震滑坡的两个重要的地质影响因子,本文使用的岩性与断裂因子均来自于 1:200,000 地质图(图 3)。地震动峰值加速度(PGA)来自于 USGS<sup>[2]</sup>公布的 PGA 等值线图。公路图层来自 1:50,000 地形图与基于 SPOT 5 数据的解译,将公路线状图按照 100m 缓冲区进行分类。NDVI 数据由震前的 Landsat ETM 数据处理而成。将所有矢量化格式的影响因子图层栅格化为 5×5m 分辨率的栅格格式的因子专题图层。

应用 SPSS 软件对得到的 4072 个训练样本(2036 个滑坡样本点,2036 个非滑坡样本点)进行逻辑回归分析,得到了每个因子分级的回归系数,影响因子分级的回归系数越大,表明该因子内这个分级的滑坡危险度越高。如坡度,回归系数随着坡度的增加而增加,这表明了坡度越大,滑坡危险度越高。图 4 为所有影响因子分级的回归系数值曲线。每个因子的最后一个分级的回归系数值均为 0,与

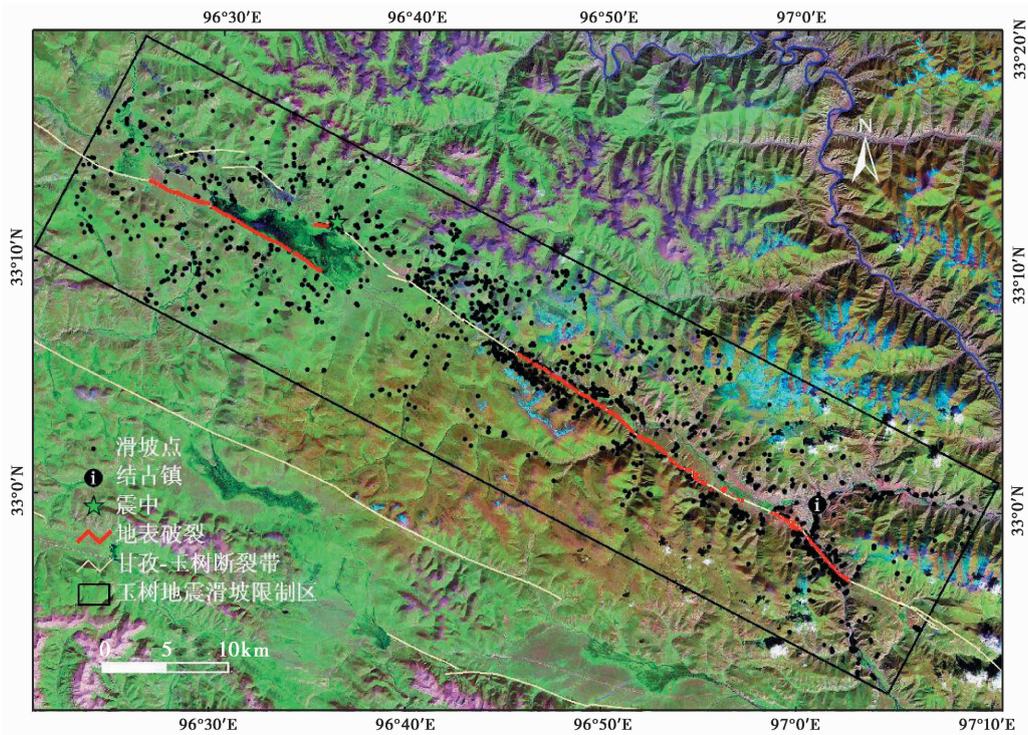


图1 玉树地震滑坡与同震地表破裂空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of landslides and co-seismic surface fault-ruptures triggered by Yushu earthquake

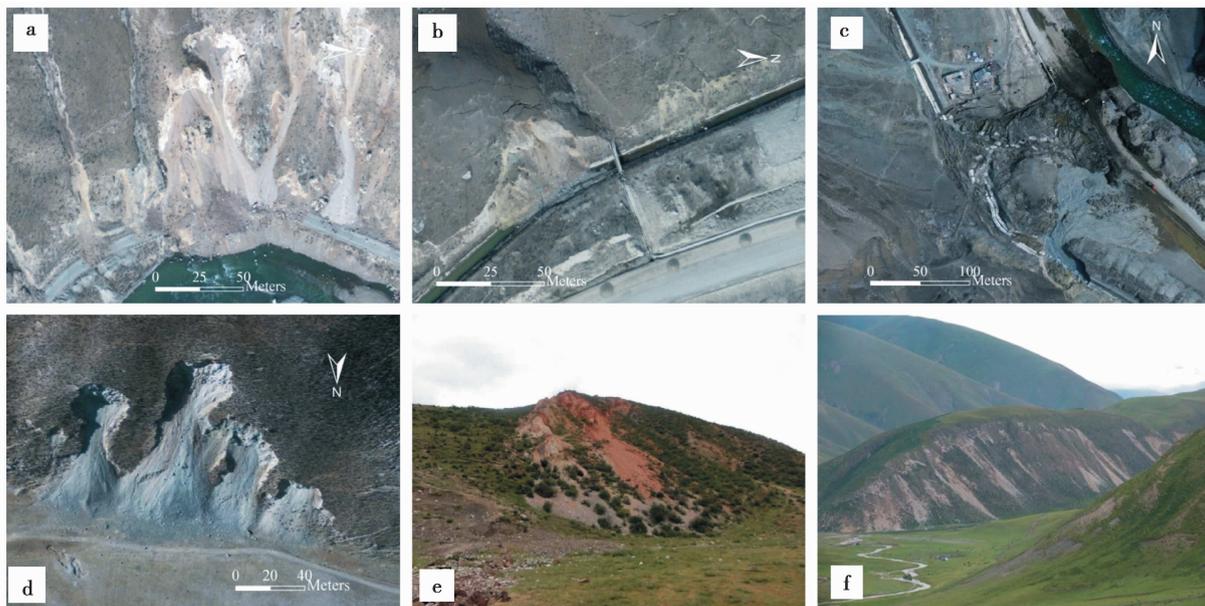


图2 玉树地震滑坡照片

Fig. 2 Several typical landslides triggered by the 2010 Yushu earthquake

其它影响因子分级进行对比,若值为正,表明该因子分级的滑坡危险度比最后一个因子分级大;若值为负,表明该因子分级的滑坡危险度比最后一个因子分级小。整个回归分析结果的常数值  $B_0$  为  $-5.992$ 。在坡向因子分级中,平坦的分级回归系数

值为空,这是因为该分级内没有训练样本,所以将因子分级的回归系数设定成1个足够低的值,以保证该分级的滑坡危险度足够低,本研究选择这个足够低的值与  $B_0$  相等,为  $-5.992$ 。

表1 影响因子及其分类标准

Table 1 Controlling parameters and their classes for the study area

影响因子	分级数量	分类标准
高程/m	7	1. <3800; 2. 3800~4000; 3. 4000~4200; 4. 4200~4400; 5. 4400~4600; 6. 4600~4800; 7. >4800
坡度/(°)	9	1. <5; 2. 5°~10°; 3. 10°~15°; 4. 15°~20°; 5. 20°~25°; 6. 25°~30°; 7. 30°~35°; 8. 35°~40°; 9. >40°
坡向	9	1. Flat; 2. N; 3. NE; 4. E; 5. SE; 6. S; 7. SW; 8. W; 9. NW
曲率	12	1. <-1; 2. -1~-0.1; 3. -0.1~-0.05; 4. -0.05~-0.01; 5. -0.01~-0.005; 6. -0.005~-0; 7. 0~0.005; 8. 0.005~0.01; 9. 0.01~0.05; 10. 0.05~0.1; 11. 0.1~1; 12. >1
坡位	6	1. 山脊; 2. 上坡; 3. 中坡; 4. 平坡; 5. 下坡; 6. 谷底 <sup>[23]</sup>
水系/m	11	1. 0~100m; 2. 100~200m; 3. 200~300m; 4. 300~400m; 5. 400~500m; 6. 500~600m; 7. 600~700m; 8. 700~800m; 9. 800~900m; 10. 900~1000m; 11. >1000m
地层岩性	11	1. $Q_4^h$ ; 2. $Q_4^{al-pl}$ ; 3. N; 4. $T_3bt$ ; 5. $T_3kn^3$ ; 6. $T_3kn^2$ ; 7. $T_3kn^1$ ; 8. $T_2jl^2$ ; 9. $T_2jl^1$ ; 10. C-P; 11. 花岗岩
与断层距离/m	11	1. 0~50; 2. 50~100; 3. 100~150; 4. 150~200; 5. 200~250; 6. 250~300; 7. 300~350; 8. 350~400; 9. 400~450; 10. 450~500; 11. >500
NDVI	14	1. <0; 2. 0~0.05; 3. 0.05~0.1; 4. 0.1~0.15; 5. 0.15~0.2; 6. 0.2~0.25; 7. 0.25~0.3; 8. 0.3~0.35; 9. 0.35~0.4; 10. 0.4~0.45; 11. 0.45~0.5; 12. 0.5~0.55; 13. 0.55~0.6; 14. >0.6
与公路距离/m	11	1. 0~100; 2. 100~200; 3. 200~300; 4. 300~400; 5. 400~500; 6. 500~600; 7. 600~700; 8. 700~800; 9. 800~900; 10. 900~1000; 11. >1000
与地表破裂/m	21	1. 0~500; 2. 500~1000; 3. 1000~1500; 4. 1500~2000; 5. 2000~2500; 6. 2500~3000; 7. 3000~3500; 8. 3500~4000; 9. 4000~4500; 10. 4500~5000; 11. 5000~5500; 12. 5500~6000; 13. 6000~6500; 14. 6500~7000; 15. 7000~7500; 16. 7500~8000; 17. 8000~8500; 18. 8500~9000; 19. 9000~9500; 20. 9500~10000; 21. >10000
PGA/g	8	1. >0.38; 2. 0.34~0.38; 3. 0.30~0.34; 4. 0.26~0.30; 5. 0.22~0.26; 6. 0.18~0.22; 7. 0.14~0.18; 8. <0.14

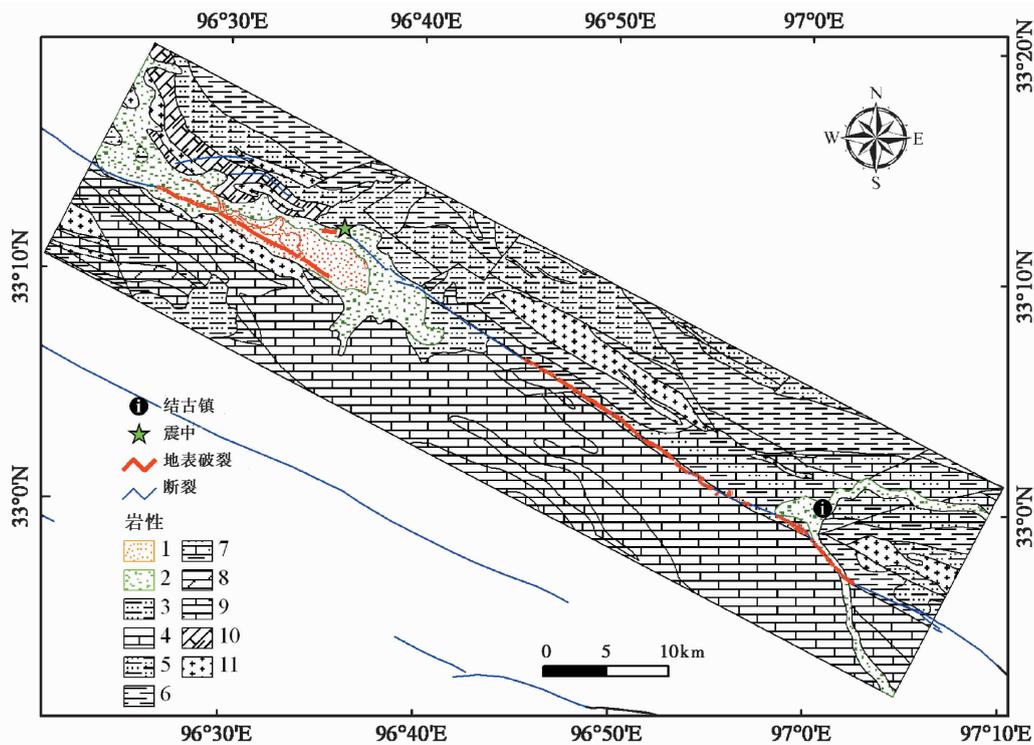


图3 研究区地层岩性图

Fig. 3 Geological map of the study area

- $Q_4^h$ , 湖沼淤泥, 泥炭沉积; 2.  $Q_4^{al-pl}$ , 冲积、洪积砾石层; 3. N, 石英细砂岩, 底部为角砾岩; 4.  $T_3bt$ , 石英砂岩、粉砂岩, 灰岩夹板岩; 5.  $T_3kn^3$ , 石英砂岩、长石石英砂岩夹千枚状板岩、炭质板岩; 6.  $T_3kn^2$ , 绿泥、绿帘阳起片岩, 斜长、钠长角闪片岩, 变安山岩、玄武岩、火山角砾岩夹大理岩; 7.  $T_3kn^1$ , 灰色长石砂岩、长石石英砂岩夹粉砂岩、板岩、灰岩; 8.  $T_2jl^2$ , 灰白色块层状灰岩夹白云岩; 9.  $T_2jl^1$ , 钙质凝灰质板岩、硬砂质长石石英砂岩夹灰岩; 10. C-P, 灰色长石石英砂岩、含砾不等粒砂岩、石英砂岩互层, 夹板岩及灰岩透镜; 11. 花岗岩, 石英闪长岩, 辉绿岩

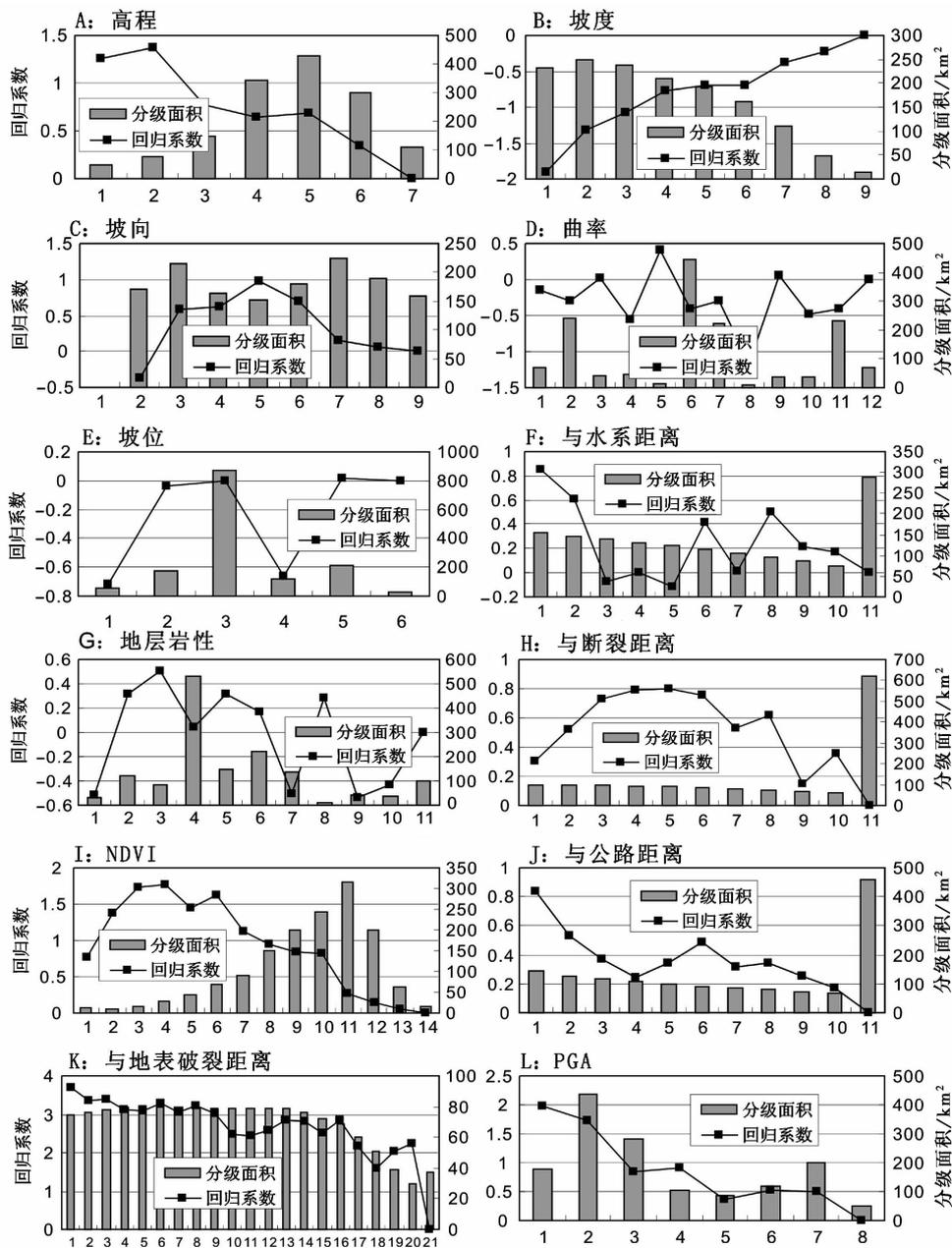


图4 各个因子分级的回归系数

Fig. 4 Coefficients of the evaluation variables

## 5 建立地震滑坡危险性图

在得到所有影响因子的回归系数之后,依据回归系数给每个影响因子的分级赋予相对应的权重值,然后通过对各个影响因子层的叠加操作,来获得研究区的地震滑坡危险性索引(Landslide Hazard Index, LHI)图。叠加公式如式(3):

$$Z = B_0 + W_{\text{Elevation}} + W_{\text{Slope}} + W_{\text{Aspect}} + W_{\text{Curvature}} + W_{\text{Position}} + W_{\text{Drainage}} + W_{\text{Lithology}} +$$

$$W_{\text{Fault}} + W_{\text{Road}} + W_{\text{NDVI}} + W_{\text{Rupture}} + W_{\text{PGA}} \quad (3)$$

得到线性权重之和  $Z$  值的范围为  $-36.139 \sim 5.430$ , 根据式(2)计算出最终的滑坡发生的概率  $P$ , 从而得到滑坡危险性索引图。输出结果范围为  $0 \sim 1$ ,  $0$  表示发生滑坡的概率为  $0\%$ ,  $1$  表示发生滑坡的概率为  $100\%$ 。所以,以每  $0.2$  为 1 个级别,将研究区危险性分为极高危险区 ( $0.8 \sim 1$ ) 高危险区 ( $0.6 \sim 0.8$ )、中危险区 ( $0.4 \sim 0.6$ )、低危险区 ( $0.2 \sim 0.4$ )、极低危险区 ( $0 \sim 0.2$ )。图 5 为滑坡危险性分区图。

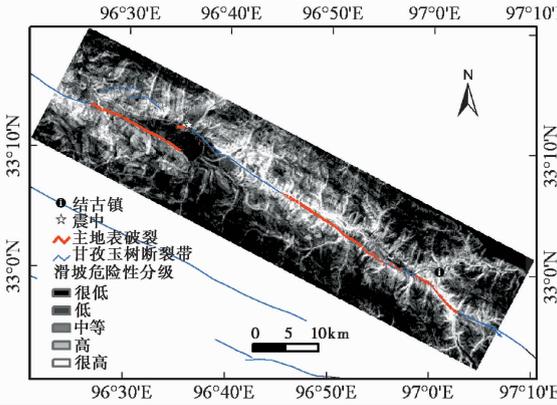


图5 玉树地震滑坡危险性评价结果图

Fig. 5 Hazard maps of Yushu earthquake triggered landslide

## 6 结果评价与检验

运用实际滑坡数量百分比累加-危险性面积百分比累积曲线下面积方法对2种结果的正确率进行定量检验。将危险性评价索引结果按照1%的面积间隔从高到低分为100等分,分别求取这100个级别内的滑坡发生的数量百分比,构建危险性结果百分比累加与滑坡百分比累积曲线,即结果评价曲线(图6)。曲线下面积为83.21%,表明该方法的正确率为83.21%,结果是理想的。

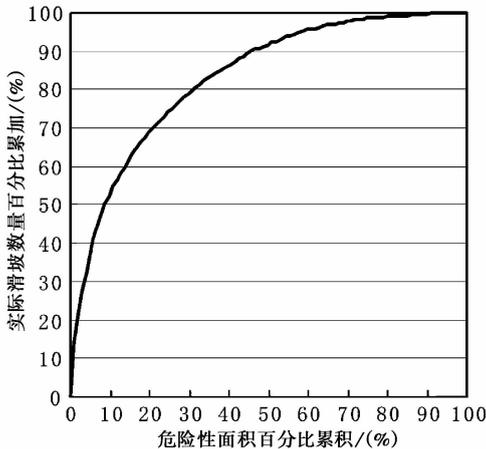


图6 滑坡危险性评价结果评价曲线

Fig. 6 Success rate for landslide hazard maps

表2与图7是对每个危险性分类的面积与其中发生的滑坡数量的统计结果,结果表明,很高危险区面积为72.30km<sup>2</sup>,占总研究面积的4.97%,其中实际发生滑坡数量为766个,占滑坡总数的37.62%,分级内滑坡点密度为10.59个·km<sup>-2</sup>;高危险区面积为174.27km<sup>2</sup>,占总研究面积的11.97%,其中实际发生滑坡数量为561个,占滑坡

表2 滑坡危险性分级统计

Table 2 Landslide statistic result in different landslide hazard rank

滑坡危险性	分级面积/km <sup>2</sup>	分级面积百分比	滑坡数量	滑坡分级数量百分比	分级内滑坡点密度
很低	567.70	39.01	88	4.32	0.16
低	377.61	25.95	251	12.33	0.66
中等	263.42	18.10	370	18.17	1.40
高	174.27	11.97	561	27.55	3.22
很高	72.30	4.97	766	37.62	10.59

总面积的27.55%,分级内滑坡点密度为3.22个·km<sup>-2</sup>;中危险区面积为263.42km<sup>2</sup>,占总研究面积的18.10%,其中实际发生滑坡数量为370个,占滑坡总数的18.17%,分级内滑坡点密度为1.40个·km<sup>-2</sup>;低危险区面积为377.61km<sup>2</sup>,占总研究面积的25.95%,其中实际发生滑坡数量为251个,占滑坡总数的12.33%,分级内滑坡点密度为0.66个·km<sup>-2</sup>;很低危险区面积为567.70km<sup>2</sup>,占总研究面积的39.01%,其中实际发生滑坡数量为88个,占滑坡总数的4.32%,分级内滑坡点密度为0.16个·km<sup>-2</sup>。可以看出,滑坡点密度随着危险性级别的升高而非常迅速的升高。

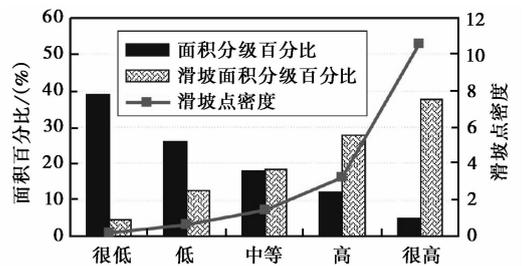


图7 不同危险性级别滑坡统计

Fig. 7 Histogram showed relative distribution of various hazard levels and landslide occurrence

## 7 结论

(1)基于GIS与RS技术,应用逻辑回归模型开展玉树地震滑坡危险性评价,并对结果进行检验,得到结果的正确率为83.21%,这一结果是理想的。

(2)检验结果表明,在占研究区总面积4.97%的很高危险度的较小范围内,实际发育滑坡数量为766个,占总滑坡面积的比例高达37.62%,表明基于逻辑回归模型的地震滑坡危险性评价结果良好。最后基于5类不同危险性级别的滑坡统计图表明,滑坡分布点密度随着危险性级别的升高而非常迅速的升高。

## 参 考 文 献

- [1] 许冲, 徐锡伟, 戴福初, 等. 2010年4月14日玉树地震滑坡空间分布与控制变量分析[J]. 工程地质学报, 2011, **19**(4): 505~510.  
Xu Chong, Xu Xiwei, Dai Fuchu, et al. Analysis of spatial distribution and controlling parameters of landslides triggered by the April 14, 2010 Yushu earthquake. Journal of Engineering Geology, 2011, **19**(4): 505~510.
- [2] USGS, Magnitude 6.9-southern Qinghai, China, 2010 April 13 23: 49: 38 UTC. 2010, <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqinthenews/2010/us2010vacp/>.
- [3] 殷跃平, 张永双, 马寅生, 等. 青海玉树 Ms7.1 级地震地质灾害主要特征[J]. 工程地质学报, 2010, **18**(3): 289~296.  
Yin Yueping, Zhang Yongshuang, Ma Yinsheng, et al. Research on major characteristics of geohazards induced by the Yushu Ms7.1 earthquake. Journal of Engineering Geology, 2010, **18**(3): 289~296.
- [4] 殷跃平, 田廷山, 李文渊, 等. 青海玉树地震地质灾害调查[R]. 2010, <http://www.gcdz.org/CN/article/downloadArticleFile.do?attachType=PDF&id=8550>.  
Yin Yueping, Tian Tingshan, Li Wenyuan, et al. Investigation on Yushu Earthquake Triggered Geological Hazards. 2010, <http://www.gcdz.org/CN/article/downloadArticleFile.do?attachType=PDF&id=8550>.
- [5] 赵家绪, 李玉军, 张力征, 等. 青海玉树“4·14”地震灾区地质灾害应急排查报告[R]. 2010.  
Zhao Jiayu, Li Yujun, Zhang Lizheng, et al. Report of Emergency Investigation on “4·14” Yushu Earthquake Triggered Geological Hazards. 2010.
- [6] Pradhan B, Talib JA, Lee S. Application of remote sensing data in determining regional landslide hazard analysis by using logistic regression model and GIS. 27th Asian Conference on Remote Sensing (ACRS2006), 2006.
- [7] Pradhan B, Lee S. Landslide susceptibility assessment and factor effect analysis; backpropagation artificial neural networks and their comparison with frequency ratio and bivariate logistic regression modelling. Environmental Modelling and Software, 2010, **25**(6): 747~759.
- [8] Chen ZH, Wang JF. Landslide hazard mapping using logistic regression model in Mackenzie valley, Canada. Natural Hazards, 2007, **42**(1): 75~89.
- [9] Yilmaz I. Landslide susceptibility mapping using frequency ratio, logistic regression, artificial neural networks and their comparison; A case study from Kat landslides (Tokat—Turkey). Computers and Geosciences, 2009, **35**(6): 1125~1138.
- [10] Greco R, Sorriso-Valvo M, Catalano E. Logistic Regression analysis in the evaluation of mass movements susceptibility: The Aspromonte case study, Calabria, Italy. Engineering Geology, 2007, **89**(1-2): 47~66.
- [11] Thapa PB, Esaki T. GIS-based quantitative landslide hazard prediction modelling in natural hillslope, Agra Khola watershed, central Nepal. Bulletin of the Department of Geology, 2007, **10**: 63~70.
- [12] Dai FC, Lee CF, Li J, Xu ZW. Assessment of landslide susceptibility on the natural terrain of Lantau island, Hong Kong. Environmental Geology, 2001, **40**(3): 381~391.
- [13] Dai FC, Lee CF. Landslide characteristics and slope instability modeling using GIS, Lantau island, Hong Kong. Geomorphology, 2002, **42**(3-4): 213~228.
- [14] 胡德勇, 李京, 陈云浩, 等. GIS支持下滑坡灾害空间预测方法研究. 遥感学报[J], 2007, **11**(6): 852~859.  
Hu Deyong, Li Jing, Chen Yunhao, et al. GIS-based landslide spatial prediction methods, a case study in Cameron Highland, Malaysia. Journal of Remote Sensing, 2007, **11**(6): 852~859.
- [15] 李雪平, 唐辉明. 基于GIS的分组数据 Logistic 模型在斜坡稳定性评价中的应用. 吉林大学学报(地球科学版)[J], 2005, **35**(3): 361~365.  
Li Xueping, Tang Huiming. Application of Gis based grouped data logistic model in evaluation of slope stability. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2005, **35**(3): 361~365.
- [16] 李雪平, 唐辉明. 贝叶斯信息标准在滑坡因子敏感性分析中的应用[J]. 岩土力学, 2006, **27**(8): 1393~1397.  
Li Xueping, Tang Huiming. Application of Bayesian information criterion to sensitivity analysis of landslide factor. Rock and Soil Mechanics, 2006, **27**(8): 1393~1397.
- [17] 许冲, 徐锡伟, 于贵华. 玉树地震滑坡分布调查及其特征与形成机制[J]. 地震地质, 2012, **34**(1): 47~62.  
Xu Chong, Xu Xiwei, Yu Guihua. Study on the characteristics, mechanism, and spatial distribution of Yushu earthquake triggered landslides. Seismology and Geology, 2012, **34**(1): 47~62.
- [18] 许冲, 戴福初, 姚鑫, 等. GIS支持下基于层次分析法的汶川地震区滑坡易发性评价[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, **28**(S2): 3978~3985.  
Xu Chong, Dai Fuchu, Yao Xin, et al. GIS-based landslide susceptibility assessment using analytical hierarchy process in Wenchuan earthquake region. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, **28**(S2): 3978~3985.
- [19] 许冲, 戴福初, 姚鑫, 等. 基于GIS与确定性系数分析方法的汶川地震滑坡易发性评价[J]. 工程地质学报, 2010, **18**(1): 15~26.  
Xu Chong, Dai Fuchu, Yao Xin, et al. Study on Wenchuan earthquake-induced landslide susceptibility evaluation based on Gis platform and certainty factor analysis method. Journal of Engineering Geology, 2010, **18**(1): 15~26.
- [20] Xu XW, Yu GH, Sun XZ. Yushu earthquake slip: Implication of great earthquake migration along boundary fault system of Bayan Har block, Tibetan Plateau. American Geophysical Union, Fall Meeting 2010, 2010, abstract #T22A-04.
- [21] Pan J, Li H, Xu Z, Li N, Wu F, Guo R, Zhang W. Surface rupture characteristics and rupture mechanics of the Yushu earthquake (Ms7.1), 14/04/2010. American Geophysical Union, Fall Meeting 2010, 2010, abstract #T54B-08.
- [22] 张军龙, 陈长云, 胡朝忠, 等. 玉树 Ms7.1 地震地表破裂带及其同震位移分布[J]. 地震, 2010, **30**(3): 1~12.  
Zhang Junlong, Chen Changyun, Hu Chaozhong, et al. Surface rupture and coseismic displacement of the Yushu Ms7.1 earthquake, China. Earthquake, 2010, **30**(3): 1~12.
- [23] Weiss AD. Topographic position and landforms analysis. 2006. [http://www.jennessent.com/downloads/tpi-poster-tnc\\_18x22.p](http://www.jennessent.com/downloads/tpi-poster-tnc_18x22.p).