

2010 年海地太子港地震触发滑坡危险性区划和合理性检验

许冲

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1月12日海地 M_w 7.0 级地震触发了数以万计的滑坡。本文应用二元统计分析模型、地理信息系统与遥感技术,开展海地地震区滑坡危险性区划研究,并对结果合理性及模型预测功能进行检验。地震前后多源高分辨率遥感数据目视解译结果表明,海地地震触发了 30828 处滑坡。选择高程、坡度、坡向、曲率、与水系距离、地震动峰值加速度(PGA)、与恩里基约-芭蕉园断裂距离、沿恩里基约-芭蕉园断裂距离 8 个地震滑坡影响因子进行海地地震滑坡危险性区划。将这 30828 处滑坡随机分为训练样本与预测样本两类,分别进行模型的建立与测试,训练样本包括滑坡总数的 70%(21579 处滑坡,覆盖面积为 11.18km²);预测样本包括滑坡总数的 30%(9249 处滑坡,覆盖面积为 4.56km²)。基于滑坡训练样本、8 个滑坡影响因子、权重系数模型(二元统计方法模型)和 GIS 技术,构建了滑坡危险性概率分布图。结果合理性检验表明了模型的正确率为 84.966%,预测率为 84.547%,两者都表明了实际滑坡位置与滑坡危险性结果图具有良好一致性。按照滑坡危险性索引值的大小,将研究区分为非常高、高、中等、低、非常低 5 类。本文证明了在地震滑坡危险性区划中,权重系数模型作为一种二元统计方法具有良好的建模与预测能力,可为海地地震灾区恢复重建中滑坡的防灾减灾工作提供参考。

关键词 2010 年海地地震;滑坡;统计分析;地理信息系统;滑坡危险性区划

中图分类号 P642.22

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.12.007

2010 Port-au-Prince, Haiti Earthquake Triggered Landslide Hazard Mapping and Its Validation

XU Chong

Key Laboratory of Active Tectonics and Volcano, Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China

Abstract Tens of thousands of landslides were triggered by the January 12, 2010 Port-au-Prince, Haiti earthquake (M_w 7.0). The main purpose of this study was to apply and verify the hazard mapping techniques of earthquake triggered landslide by Bivariate Statistics (BS) method, Geographical Information System (GIS) and remote sensing technologies in the Haiti earthquake struck area. A total of 30828 landslides were delineated in the study area from visual interpretation of multi-source and high resolution remote sensing images pre- and post-earthquake. Eight factors, including elevation, slope angle, slope aspect, slope curvature, distance from drainages, Peak Ground Acceleration (PGA), distance from the Enriquillo-Plantain Garden Fault (EPCF) and distance along the Enriquillo-Plantain Garden Fault (EPCF) were selected as impact factors for the Haiti earthquake triggered landslide hazard mapping. The 30828 landslides were randomly partitioned into two subsets: A training dataset, which contained 70% (21579 landslides, with a total area of 11.18km²), was used for building the model; and a testing dataset containing 30% (9249 landslides, with a total area of 4.56km²) was used for model testing. Landslide hazard probability index map was then generated using the training dataset, the eight landslide impact factors, the weight index modeling, a BS method, and GIS technology. The validation results showed a success rate of 84.966% between the hazard probability index map and the training dataset. The predictive rate of 84.547% was obtained from comparing the testing dataset and the landslides hazard probability index map. Both the success rate and the predictive rate showed sufficient agreement between the landslide hazard map and the existing landslides data. The resulting landslide hazard map showed five classes of landslide hazard, such as very high, high, moderate, low and very low. This paper showed weight index modeling, as a BS method in earthquake triggered landslide hazard mapping

收稿日期:2012-11-05;修回日期:2013-04-22

基金项目:国家自然科学基金项目(41202235);中国地震局地质研究所基本科研业务专项(IGCEA1215);国家科技支撑计划项目(2012BAK15B01)

作者简介:许冲,副研究员,研究方向为地震滑坡与活动构造,电子信箱:xc1111111@126.com

owned high predictive ability. The results of landslide hazard mapping might help planners to choose favorable locations for reconstruction in the Haiti earthquake struck area.

Keywords 2010 Haiti earthquake; landslides; statistical analysis; Geographic Information Systems; landslide hazard mapping

0 引言

地震滑坡往往造成巨大的人员伤亡与财产损失^[1-4]。2010年1月12日16:53(当地时间),海地太子港发生了 M_w 7.0级毁灭性大地震^[5],这次地震触发了数以万计的滑坡,标识出滑坡危险区对地震区的滑坡防灾减灾与将来的规划都具有重要意义。

一些研究^[6-13]将 GIS 与遥感技术应用于滑坡灾害调查与危险性区划研究中。滑坡危险性区划方法包括启发式模型^[14-17]、条件概率模型^[18-25]、逻辑回归模型^[26]、人工神经网络^[27-31]和支持向量机模型^[32-34]等。本文采用一种条件概率模型——权重系数模型,开展地震滑坡危险性区划研究。基于多源高分辨率遥感影像开展 2010 年海地地震滑坡目视解译工作,基于 GIS 平台建立一个详细的海地地震滑坡编录图,以进行滑坡危险性分析。选择高程、坡度、坡向、曲率、与水系距离、地震动峰值加速度 (PGA)、与恩里基约-芭蕉园断裂距离、沿恩里基约-芭蕉园断裂距离 8 个地震滑坡影响因子构建地震滑坡危险性区划图。结果合理性检验表明,模型的成功率为 84.966%,预测率为 84.547%。地震滑坡危险性区划图可以对滑坡的危险性进行分区,为地震滑坡防灾减灾提供参考、为海地地震区重建过程中的场地选址适宜性提供帮助。本文数据主要来自作者的前期工作,参见许冲等^[13,35]。

1 2010 年海地地震构造概况

海地位于 $72^{\circ}9'32.206''W \sim 73^{\circ}1'48.58''W$ 之间, $18^{\circ}8'30.363''N \sim 18^{\circ}34'8.86''N$ 之间(图 1)。研究区内的高程范围为 0~2275.88m,面积约为 3192.85km²。研究区内的斜坡坡度大体较缓,平均坡度为 15.24°。2010 年 1 月 12 日海地地震发生于加勒比板块与北美板块交界区域,震中位于恩里基约-芭蕉园断裂附近(图 1),是加勒比板块与北美板块压扭汇聚的结果^[36]。本次地震机制复杂,包括逆冲与左旋走滑两个分量^[37-39]。起初认为该地震是海地南部半岛的恩里基约-芭蕉园断裂错动的结果,但是后来的研究认为本次地震的发震断裂是距离恩里基约-芭蕉园断裂很近的一条未被识别的隐伏断裂^[5,38,40,41]。余震

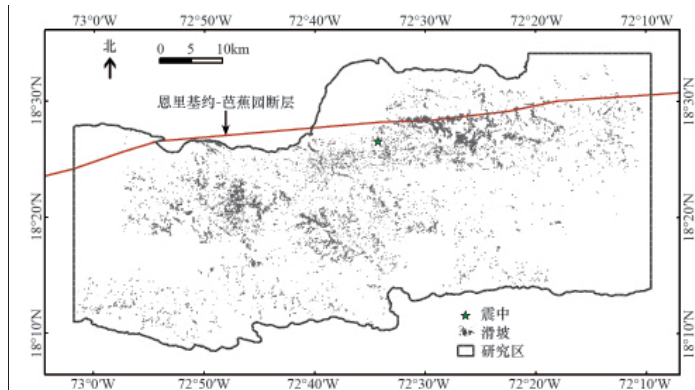


图 1 研究区位置与 2010 年海地地震滑坡分布
Fig. 1 Location of the study area and distribution of landslides triggered by the 2010 Haiti earthquake

序列大体分布于震中以西长 60km、宽 30km 范围内,包括震级大于或等于 4.5 级的 59 次余震。两次最大的余震分别为 M_w 6.0 级和 M_w 5.9 级,分别发生于主震 7min 后和 2010 年 1 月 20 日。这些余震主要表现为走滑性质,仅有几个余震表现为逆冲性质^[39,42]。

2 2010 年海地地震滑坡

一个详细而准确的滑坡编录图是地震滑坡危险性分析工作的基本条件^[43]。Google Earth 上的高分辨率多源遥感影像使得建立一个完整的海地地震滑坡编录图成为可能。海地地震滑坡编录图包含了 30828 处滑坡灾害,分布在面积约为 3192.85km² 的区域内(图 1)。一些滑坡阻断了公路、堵塞了河道或溪流(图 2),威胁着海地部分地区的基础设施,造成了一些灾害^[37,42,44],这些滑坡的覆盖面积约为 15.74km²。滑坡面积百分比(LAP)表示滑坡面积占区域面积的比为 0.493%。滑坡点密度(LND)表示每平方公里内的滑坡数量,为 9.655/km²。海地地震滑坡的类型主要为分布在恩里基约-芭蕉园断裂附近的风化玄武岩与灰岩中的崩塌与岩滑。图 2 为海地地震触发滑坡的典型照片^[37]。

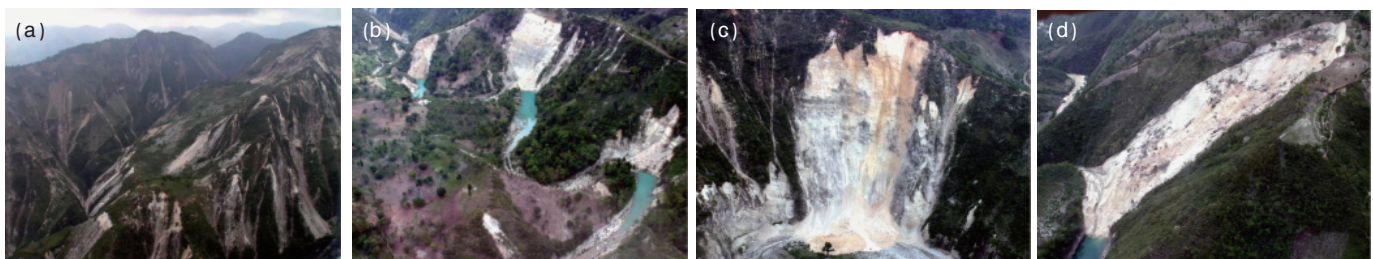


图 2 2010 年海地地震滑坡触发的滑坡照片
Fig. 2 Photos of landslides triggered by the 2010 Haiti earthquake

3 滑坡影响因子

搜集相关数据并构建滑坡影响因子数据库是地震滑坡危险性分析中的一个重要步骤,本文研究共选择了8个地震滑坡影响因子进行滑坡危险性分析,这些因子分别为:高程、坡度、坡向、曲率、与水系距离、地震动峰值加速度、与恩里基约-芭蕉园断裂距离、沿恩里基约-芭蕉园断裂距离。

3.1 地形因子

基于 30m×30m 分辨率的 ASTER GDEM (先进星载热发射和反射辐射仪全球数字高程模型),采用重采样方法,构建了 5m×5m 分辨率的 DEM(数字高程模型)数据(图 3(a))。该 DEM 包括 18438 行,9477 列,共 127714027 个栅格(5m×5m),大约为 44031.13km²。坡度、坡向、斜坡曲率图层均是基于该

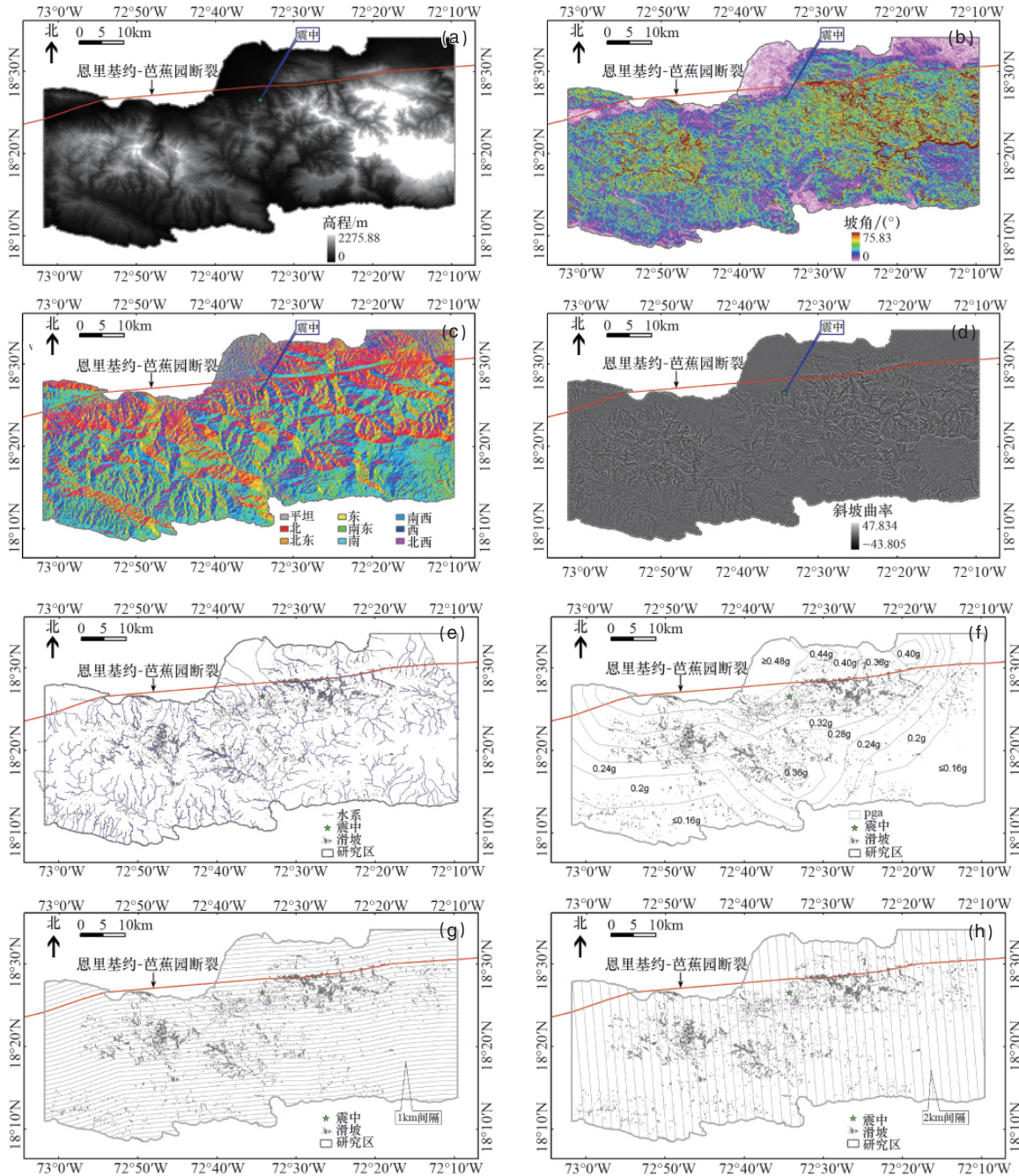


图 3 8 个地震滑坡影响因子: 高程(a),坡度(b),坡向(c),曲率(d),水系(e),地震动峰值加速度(f),与恩里基约-芭蕉园断裂距离(g),沿恩里基约-芭蕉园断裂距离(h)

Fig. 3 Eight thematic maps of landslides impact factors: Elevation (a), slope angle (b), slope aspect(c), slope curvature(d), drainages(e), PGA(f), distance from the Enriquillo-Plantain Garden fault (EPGF) (g), distance along the Enriquillo-Plantain Garden fault (EPGF) (h)

DEM 导出的。研究区内的高程范围是 0~2275.88m。选择高程间隔为 200m, 按照高程将研究区分为 10 类, 分别为 <200, 200~400, 400~600, 600~800, 800~1000, 1000~1200, 1200~1400, 1400~1600, 1600~1800, >1800m。

坡度是分析地震滑坡危险性的主要因子之一, 是滑坡危险性制图中的常用因子。研究区内的坡度范围是 0~75.83°。坡度间隔为 5°, 按照坡度将研究区分为 11 类, 分别为 0~5°, 5°~10°, 10°~15°, 15°~20°, 20°~25°, 25°~30°, 30°~35°, 35°~40°, 40°~45°, 45°~50°, >50°, 研究区内的坡度图见图 3(b)。坡向是另一个基于 DEM 提取的因子, 可以将其定义为参照北方的最大坡面的地形指向。坡向与斜坡是干燥或降雨、风、是否暴露在阳光下有密切关系, 这些可能决定着滑坡的发生。对于地震滑坡, 坡向或者还通过地震波的传播方向, 地壳的运动方向影响滑坡发生。按照坡向将研究区分为 9 类, 分别为平坦、北、北东、东、南东、南、南西、西、北西。图 3(c) 为研究区坡向图。关于斜坡曲率, 正值代表凸坡, 负值代表凹坡, 越接近 0 值代表斜坡越平坦, 研究区内的曲率范围为 -43.805~47.834m⁻¹。将曲率按照如下标准分为 12 类, 分别为 <-2m⁻¹, -2~-1m⁻¹, -1~-0.5m⁻¹, -0.5~-0.2m⁻¹, -0.2~-0.1m⁻¹, -0.1~0m⁻¹, 0~0.1m⁻¹, 0.1~0.2m⁻¹, 0.2~0.5m⁻¹, 0.5~1m⁻¹, 1~2m⁻¹, >2m⁻¹。研究区内的斜坡曲率分布图见图 3(d)。

研究区内的水系分布图(图 3(e))提取自 DEM, 并且基于卫星影像进行了重新解译校正, 然后基于该水系分布图构建了水系缓冲区图, 缓冲距离设为 100m, 按照距离水系将研究区分类标准分为 11 类, 分别为 0~100, 100~200, 200~300, 300~400, 400~500, 500~600, 600~700, 700~800, 800~900, 900~1000, >1000m。然后将该图转化为 5m×5m 分辨率的栅格图, 进行滑坡危险性分析。

3.2 地震因子

选择地震动峰值加速度(PGA)、与恩里基约-芭蕉园断裂距离、沿恩里基约-芭蕉园断裂距离 3 个地震因子作为海地地震滑坡影响因子分析滑坡危险性。PGA 数据来自于美国地质调查局^[45], 研究区均经历了较强烈的震动, 将研究区内的 PGA 分为 9 类, 分别为 ≤0.16g, 0.20g, 0.24g, 0.28g, 0.32g, 0.36g, 0.40g, 0.44g, ≥0.48g。研究区内的 PGA 分布见图 3(f)。

将与恩里基约-芭蕉园断裂距离的缓冲区设置为 1km, 再将该缓冲区图转换为 5m×5m 分辨率的栅格数据(图 3(g)), 在研究区内, 恩里基约-芭蕉园断裂的北盘被分为 7 个类, 南盘被分为 32。此外, 地震同震滑移大小、断裂的几何习性与不同段落断裂释放应力的的大小对地震滑坡发生也起着作用, 因此选择了沿恩里基约-芭蕉园断裂距离作为一个地震滑坡影响因子进行地震滑坡危险性分析。沿恩里基约-芭蕉园断裂距离设置为 2km, 结果将研究区分为 47 类, 将矢量格式的沿恩里基约-芭蕉园断裂图转化为 5m×5m 分辨率大小的栅格格式以进行更进一步的应用(图 3(h))。

4 基于权重系数模型的滑坡危险性分析

滑坡危险性分析需要模型训练样本和模型检验样本。关于如何选择训练样本与滑坡样本, 并没有统一的规则。本文将 30828 处滑坡划分出 70% (21579 处滑坡, 面积为 11.18km²) 作为模型训练样本, 剩下的 30% 作为模型检验样本 (9249 处滑坡, 面积为 4.56km²)。使用滑坡训练样本进行模型建立与成功率分析, 使用检验样本进行模型预测功能检验。

本文采用一种二元统计分析方法——权重系数模型, 进行地震滑坡危险性分析研究。在权重系数模型中, 因子分级的权重系数值定义为该分级内的滑坡面积百分比(LAP)与整个研究区滑坡面积百分比比值的自然对数。用下面的数学公示表示:

$$W_i = \ln(LAP_i/LAP_{all}) = \ln[(A_{Li}/A_{Ni})/(A_{Lall}/A_{Nall})] \quad (1)$$

式中, W_i 为该因子分级的权重, LAP_i 为该分级内的滑坡面积(训练样本)百分比, LAP_{all} 为整个研究区内的滑坡面积(训练样本)百分比, A_{Li} 为该分级内的滑坡面积(训练样本), A_{Ni} 为该分级的面积, A_{Lall} 为整个研究区内的滑坡面积(训练样本), A_{Nall} 为整个研究区的面积。 LAP_i/LAP_{all} 为整个分级内的滑坡频率比, A_{Lall} 和 A_{Nall} 值分别为 11.18、3192.85km²。

在得到所有 8 个影响因子的所有分级的权重系数(W_i)后, 在 GIS 软件中应用叠加数学计算方法制作一个滑坡危险性指数索(LHI)引图, 如下式:

$$LHI = W_{i,elevation} + W_{i,slope} + W_{i,aspect} + W_{i,curvature} + W_{i,DisFromDrainages} + W_{i,PGA} + W_{i,DisFromFault} + W_{i,DisAlongFault} \quad (2)$$

式中, $W_{i,elevation}$, $W_{i,slope}$, $W_{i,aspect}$, $W_{i,curvature}$, $W_{i,DisFromDrainages}$, $W_{i,PGA}$, $W_{i,DisFromFault}$, $W_{i,DisAlongFault}$ 分别为不同因子分级的权重值, 这些因子分别为高程、坡度、坡向、曲率、与水系距离、地震动峰值加速度、与恩里基约-芭蕉园断裂距离、沿恩里基约-芭蕉园断裂距离。基于这些因子, 应用 ArcGIS 软件得到了一个叠加的滑坡危险性指数图, 最终的滑坡危险性指数范围是 -17.386~7.762。

5 结果检验与滑坡危险性区划

分别应用滑坡训练样本和评价样本进行模型的成功率和预测率检验, 成功率代表模型的建模能力, 预测率代表模型的预测能力。两者均是通过对比实际滑坡的发生位置与滑坡危险性指数得到。应用建立的评价结果曲线(图 4)下的面积来定量表征模型的成功率和预测率, 该曲线下的面积解释了实际滑坡与制作的滑坡危险性指数图之间的拟合程度。本研究的滑坡成功率和预测率对应的曲线下面积分别为 0.84966 和 0.84547, 表明该滑坡危险性评价模型的成功率与预测率分别为 84.966%、84.547%, 由此认为该模型是可靠的。

将滑坡危险性索引值按照 -3, -1, 1, 3 的间隔点分为 5 类, 分别对应滑坡极低危险区, 低危险区、中等危险区、高危险区和极高危险区, 制作滑坡危险性分级区划图。每个分级的滑坡危险性索引值的范围分别为 -17.386~-3, -3~-1, -1~1, 1~3, 3~7.762。滑坡危险性区划图见图 5。

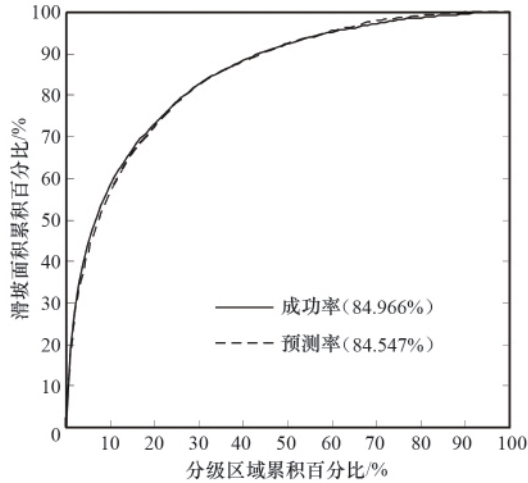


图4 表征模型成功率与预测率的曲线下面积

Fig. 4 Area Under Curve (AUC) representing the success rate and prediction rate

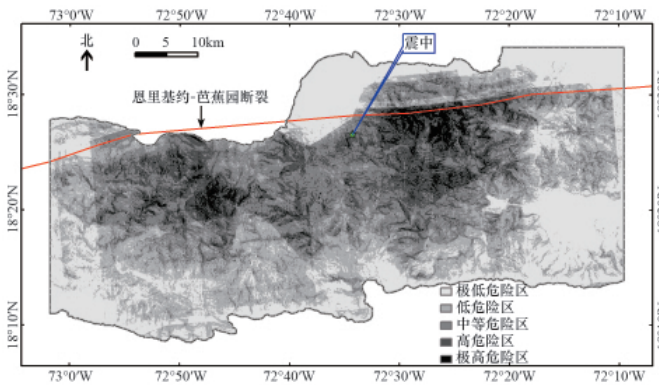


图5 2010年海地地震滑坡危险性区划图

Fig. 5 Landslide hazard map related with the 2010 Haiti earthquake

6 结论

基于GIS技术与遥感影像,采用权重系数模型(一种二元统计方法)构建2010年海地地震滑坡危险性索引图。本文中的滑坡分布索引图是基于独立地震事件的,若要使用多时相的滑坡分布索引图进行模型的建立与检验显然是不实际的,因为地震的复发周期一般较长。因此,将2010年海地地震滑坡编录图分为训练样本和检验样本两组。基于8个滑坡影响因子:高程、坡度、坡向、曲率、与水系距离、地震动峰值加速度、与恩里基约-芭蕉园断裂距离、沿恩里基约-芭蕉园断裂距离,二元统计方法构建了滑坡危险性指数图。结果的合理性检验表明了模型的成功率为84.966%,预测率为84.547%,两者均是较高的值,表明结果是合理的。在一个详细的滑坡编录图的基础上,权重系数模型可以作为一个精确的工具,开展地震滑坡危险性区划研究。本文可以为震后重建决策人员在滑坡防灾减灾工作中提供有用的参考与建议。本文还展示了地震滑坡危险性评价工作中的二元统计模型的良好建模能力。

参考文献 (References)

- [1] Keefer D K. Landslides caused by earthquakes [J]. Geological Society of America Bulletin, 1984, 95(4): 406-421.
- [2] Xu C, Xu X W. Comment on "Spatial distribution analysis of landslides triggered by 2008.5.12 Wenchuan Earthquake, China" by Shengwen Qi, Qiang Xu, Hengxing Lan, Bing Zhang, Jianyou Liu [Engineering Geology 116 (2010) 95-108][J]. Engineering Geology, 2012, 133-134: 40-42.
- [3] Xu C, Xu X W, Yu G H. Landslides triggered by slipping-fault-generated earthquake on a plateau: an example of the 14 April 2010, M_s 7.1, Yushu, China earthquake [J]. Landslides, 2012, doi: 10.1007/s10346-012-0340-x.
- [4] 许冲, 戴福初, 徐锡伟. 汶川地震滑坡灾害研究综述. 地质论评, 2010, 56(6): 860-874.
Xu Chong, Dai Fuchu, Xu Xiwei. Geological Review, 2010, 56 (6): 860-874.
- [5] Calais E, Freed A, Mattioli G, et al. Transpressional rupture of an unmapped fault during the 2010 Haiti earthquake[J]. Nature Geoscience, 2010, 3(11): 794-799.
- [6] Chacon J, Irigaray C, Fernandez T, et al. Engineering geology maps: landslides and geographical information systems [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2006, 65(4): 341-411.
- [7] Brenning A. Spatial prediction models for landslide hazards: review, comparison and evaluation [J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2005, 5(6): 853-862.
- [8] 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. Seismology and Geology, 2012, 34(1): 47-62.
- [9] 许冲. 汶川地震滑坡详细编录及其与全球其他地震滑坡事件对比[J]. 科技导报, 2012, 30(25): 18-26.
Xu Chong. Science & Technology Review, 2012, 30(25): 18-26.
- [10] 许冲, 戴福初, 陈剑, 等. 汶川 $M_s 8.0$ 地震重灾区次生地质灾害遥感精细解译[J]. 遥感学报, 2009, 13(4): 754-762.
Xu Chong, Dai Fuchu, Chen Jian, et al. Journal of Remote Sensing, 2009, 13(4): 754-762.
- [11] 许冲, 戴福初, 姚鑫. 汶川地震诱发滑坡灾害的数量与面积 [J]. 科技导报, 2009, 27(11): 79-81.
Xu Chong, Dai Fuchu, Yao Xin. Science & Technology Review, 2009, 27(11): 79-81.
- [12] 许冲, 戴福初, 姚鑫, 等. 基于GIS的汶川地震滑坡灾害影响因子确定性系数分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(S1): 2972-2981.
Xu Chong, Dai Fuchu, Yao Xin, et al. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(S1): 2972-2981.
- [13] 许冲, 徐锡伟. 俯冲带地区压扭断裂型地震触发滑坡及其剥蚀厚度空间分布规律分析[J]. 工程地质学报, 2012, 20(5): 732-744.
Xu Chong, Xu Xiwei. Journal of Engineering Geology, 2012, 20 (5): 732-744.
- [14] Pandey A, Dabral P P, Chowdary V M, et al. Landslide hazard zonation using remote sensing and GIS: A case study of Dikrong river basin, Arunachal Pradesh, India [J]. Environmental Geology, 2008, 54 (7): 1517-1529.
- [15] Saha A K, Gupta R P, Arora M K. GIS-based landslide hazard zonation in the Bhagirathi (Ganga) Valley, Himalayas[J]. International Journal of Remote Sensing, 2002, 23(2): 357-369.
- [16] 许冲. 青海玉树 2010-04-14 地震发震构造与地震滑坡危险性初步

评价[J]. 工程地质计算机应用, 2012(1): 1-14.

Xu Chong. Engineering Geological Computer Applications, 2012(1): 1-14.

[17] 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. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(S2), 3978-3985.

[18] Nefeslioglu H A, Gokceoglu C, Sonmez H. An assessment on the use of logistic regression and artificial neural networks with different sampling strategies for the preparation of landslide susceptibility maps [J]. Engineering Geology, 2008, 97(3-4): 171-191.

[19] Yilmaz I, Keskin I. GIS based statistical and physical approaches to landslide susceptibility mapping (Sebinkarahisar, Turkey)[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2009, 68(4): 459-471.

[20] Xu C, Xu X W, Lee Y H, et al. The 2010 Yushu earthquake triggered landslide hazard mapping using GIS and weight of evidence modeling [J]. Environmental Earth Sciences, 2012, 66(6): 1603-1616.

[21] Xu C, Xu X W, Dai F C, et al. Landslide hazard mapping using GIS and weight of evidence model in Qingshui river watershed of 2008 Wenchuan earthquake struck region[J]. Journal of Earth Science, 2012, 23(1): 97-120.

[22] Oh H J, Lee S. Cross-validation of logistic regression model for landslide susceptibility mapping at Geneoung areas, Korea [J]. Disaster Advances, 2010, 3(2): 44-55.

[23] 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. Journal of Engineering Geology, 2010, 18(1): 15-26.

[24] 许冲, 戴福初, 徐锡伟. 基于 GIS 平台与证据权的地震滑坡易发性评价. 地球科学, 2011, 36(6): 1155-1164.

Xu Chong, Dai Fuchu, Xu Xiwei. Earth Science, 2011, 36 (6): 1155-1164.

[25] Xu C, Xu X W. Controlling parameters analyses and hazard mapping for earthquake triggered landslides: An example from a square region in Beichuan County, Sichuan Province, China [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2012. doi: 10.1007/s12517-012-0646-y.

[26] 许冲, 徐锡伟. 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[J]. 工程地质学报, 2012, 20(3): 326-333.

Xu Chong, Xu Xiwei. Journal of Engineering Geology, 2012, 20 (3): 326-333.

[27] Sezer E A, Pradhan B, Gokceoglu C. Manifestation of an adaptive neuro-fuzzy model on landslide susceptibility mapping: Klang valley, Malaysia [J]. Expert Systems with Applications, 2011, 38 (7): 8208-8219.

[28] Arora M K, Das Gupta A S, Gupta R P. An artificial neural networks approach for landslide hazard zonation in the Bhagirathi (Ganga) Valley, Himalayas [J]. International Journal of Remote Sensing, 2004, 25 (3): 559-572.

[29] Xu C, Xu X W, Dai F C, et al. Comparison of different models for susceptibility mapping of earthquake triggered landslides related with the 2008 Wenchuan earthquake in China[J]. Computers & Geosciences, 2012, 46: 317-329.

[30] Pradhan B, Pirasteh S. Comparison between prediction capabilities of neural network and fuzzy logic techniques for landslide susceptibility mapping[J]. Disaster Advances, 2010, 3(3): 26-34.

[31] 许冲, 徐锡伟. 基于 GIS 与 ANN 模型的地震滑坡易发性区划 [J]. 地质科技情报, 2012, 31(3): 116-121.

Xu Chong, Xu Xiwei. Geological Science and Technology Information, 2012, 31(3): 116-121.

[32] Xu C, Dai F C, Xu X W, et al. GIS-based support vector machine modeling of earthquake-triggered landslide susceptibility in the Jianjiang River watershed, China [J]. Geomorphology, 2012, 145-146: 70-80.

[33] Yilmaz I. Comparison of landslide susceptibility mapping methodologies for Koyulhisar, Turkey: Conditional probability, logistic regression, artificial neural networks, and support vector machine[J]. Environmental Earth Sciences, 2010, 61(4): 821-836.

[34] 许冲, 徐锡伟. 基于不同核函数的 2010 年玉树地震滑坡空间预测模型研究. 地球物理学报, 2012, 55(9): 2994-3005.

Xu Chong, Xu Xiwei. Chinese Journal of Geophysics, 2012, 55 (9): 2994-3005.

[35] Xu C, Xu X W, Yu G H. Earthquake triggered landslide hazard mapping and validation related with the 2010 Port-au-Prince, Haiti earthquake[J]. Disaster Advances, 2012, 5(4): 1297-1304.

[36] Wdowinski S, Hong S H. Postseismic deformation following the 2010 Haiti earthquake: groundwater flow in response to a sudden uplift [R]. 2010. http://sss.terrasar-x.dlr.de/papers_sci_meet_4/oral/HYD0746_wdowinski_hong.pdf.

[37] Jibson R W, Harp E L. Field Reconnaissance Report of Landslides Triggered by the January 12, 2010, Haiti Earthquake [R/OL]. U.S. Geological Survey Open-File Report 2011-1023, 2011. <http://pubs.usgs.gov/of/2011/1023/>.

[38] Hayes G P, Briggs R W, Sladen A, et al. Complex rupture during the 12 January 2010 Haiti earthquake [J]. Nature Geoscience, 2010, 3(11): 800-805.

[39] Koehler R D, Mann P. Field observations from the January 12, 2010, Haiti earthquake: implications for seismic hazards and future post-earthquake reconnaissance investigations in Alaska [M]. Fairbanks: State of Alaska, Department of Natural Resources, Division of Geological & Geophysical Surveys, 2011.

[40] Hashimoto M, Fukushima Y, Fukahata Y. Fan-delta uplift and mountain subsidence during the Haiti 2010 earthquake [J]. Nature Geoscience, 2011, 4(4): 255-259.

[41] Prentice C, Mann P, Crone A, et al. Seismic hazard of the Enriquillo-Plantain Garden fault in Haiti inferred from palaeoseismology[J]. Nature Geoscience, 2010, 3(11): 789-793.

[42] Eberhard M O, Baldrige S, Marshall J, et al. The MW 7.0 Haiti earthquake of January 12, 2010: USGS/EERI Advance Reconnaissance Team report [R/OL]. U.S. Geological Survey Open-File Report 2010-1048, 2010. <http://pubs.usgs.gov/of/2010/1048/>.

[43] Harp E L, Keefer D K, Sato H P, et al. Landslide inventories: The essential part of seismic landslide hazard analyses [J]. Engineering Geology, 2011, 122(1-2): 9-21.

[44] Stumpf A, Kerle N. Object-oriented mapping of landslides using Random Forests [J]. Remote Sensing of Environment, 2011, 115 (10): 2564-2577.

[45] US Geological Survey. Shakemap us2010rja6 [EB/OL]. 2010. <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/shakemap/global/shake/2010rja6/>.

(责任编辑 吴晓丽)