

文章编号: 1004-4574(2008) 03- 0147- 06

# 基于 GIS的热带雨林地区滑坡敏感性分析 马来西亚金马伦高原个案研究

胡德勇, 李 京, 陈云浩, 苏 伟

(1 三维信息获取与应用教育部重点实验室, 首都师范大学资源环境与旅游学院, 北京 100037; 2 资源环境与地理信息系统北京市重点实验室, 北京 100037; 3 民政部 教育部减灾与应急管理研究院 北京师范大学, 北京 100875)

摘要: 滑坡敏感性分析对灾害评价和预测具有重要的作用。以马来西亚金马伦高原为研究区, 选择坡度、坡向、地表曲率、岩性、构造、土地覆盖、地貌类型、道路和排水系统等 9 个要素作为评价因子, 探讨运用 GIS 和 RS 技术获取、管理滑坡灾害信息, 和热带雨林地区湿热环境下滑坡灾害敏感性的分析方法。条件概率模型和逻辑回归模型分别应用于滑坡灾害敏感性分析与制图, 通过比较滑坡敏感性的计算结果与历史滑坡信息, 验证了两种方法的有效性, 结果显示, 条件概率模型和逻辑回归模型的预测精度分别为 77. 3% 和 83. 6%, 逻辑回归法具有较好的描述精度; 滑坡敏感性分析中土地利用和土地覆盖、道路设施等因素具有较高权重, 人类对雨林的垦殖和开发提升了该地区滑坡发生的敏感度。

关键词: GIS 热带雨林; 滑坡敏感性; 条件概率模型; Logistic 回归模型

中图分类号: P694 文献标识码: A

## GIS-based susceptibility analysis of landslide in tropical rainforest area: a case study of Cameron Highland, Malaysia

HU De-yong LI Jing CHEN Yun-hao SU Wei

(1. Key Laboratory of 3D Information Acquisition and Application of Ministry of Education, Capital Normal University, Beijing 100037, China  
2. Key Laboratory of Resources Environment and GIS of Beijing Municipal Beijing 100037, China 3. Academy of Disaster Reduction and  
Emergency Management Ministry of Civil Affairs & Ministry of Education, Beijing Normal University Beijing 100875 China)

**Abstract** It is very important to analyze the landslide susceptibility for hazard evaluation and prediction. The aim of this study is to analyze and compare the landslide susceptibility using different evaluation models for Cameron Highland, Malaysia, and nine factors are selected such as topographic slope, topographic aspect, topographic curvature, lithology, distance from lineament, land use and land cover, geomorphic characteristics, distance from road and drainage and so on. Based on GIS and RS technology, the methods to extract and manage the landslide information, as well as landslide susceptibility analysis of tropical rainforest environment are discussed. Conditional probability and logistic regression model are applied to susceptibility analysis and mapping, and the analysis accuracy is about 77. 3% and 83. 6% respectively through the comparison and validation between landslide susceptibility index and landslide occurrence location, so the logistic regression model is recommended. At the same time, the landslide factors such as land use and land cover, distance from road take much higher weight, which means that land reclamations and exploitation are mostly causative of landslide in this tropical rainforest region.

**Key words** GIS, tropical rainforest, landslide susceptibility, conditional probability model, logistic regression model

收稿日期: 2007- 07- 23 修订日期: 2007- 11- 16

基金项目: 国际科技合作计划项目 (2007DFA20640); 国家高技术研究发展计划项目 (2007AA120306)

作者简介: 胡德勇 (1974 - ), 男, 博士, 主要从事遥感与 GIS 在资源环境、自然灾害等领域的应用研究, Email: deyonghu@ires.cn

滑坡是世界上十大自然灾害之一,是仅次于地震和洪水的一种严重的地质灾害,对滑坡灾害有效地预测预报是防灾减灾的重要环节<sup>[1]</sup>。未来滑坡的时空预测,可以通过历史滑坡失稳因素的特征分析来进行,滑坡稳定性评价、滑坡影响因子敏感性分析对预测具有重要的意义<sup>[2]</sup>。遥感(RS)、地理信息系统(GIS)为滑坡灾害敏感性分析提供了一种切实有效的工具,并产生了许多基于GIS的滑坡分析模型,代表性的有指标分析模型<sup>[3]</sup>、统计分析模型<sup>[4]</sup>、概率分析预测模型<sup>[5]</sup>、物理确定模型<sup>[6-7]</sup>、神经网络模型<sup>[8]</sup>和模糊集预测模型<sup>[9]</sup>等。这些模型均具有各自的优势和不足,如物理确定性模型很难找到一个适合于具有多种不确定因素的复杂介质模型,因此模型的通用性不强;指标分析方法、概率统计方法以及模糊预测的方法所建立的模型一般仅适用于特定的研究地区,不同研究区的预测结果具有较大的差异。

本文以马来西亚金马伦高原为研究区,探讨遥感和地理信息技术支持下,热带雨林地区滑坡相关影响因子敏感性分析的原理和方法,运用概率模型和统计回归模型来分析坡度稳定性和滑坡影响因子相互关系,绘制滑坡敏感性专题地图,并对敏感性分析结果进行对比分析,为热带雨林地区滑坡灾害空间预测提供方法支持。

## 1 研究区和数据

### 1.1 研究区概况

本研究区金马伦高原位于马来西亚中部 Pahang州西北角,东北和西部分别毗邻 Kelantan州和 Perak州,地理坐标为东经 101 20 ~ 101 36,北纬 4 19 ~ 4 37,面积约为 690km<sup>2</sup>。图 1 为研究区地理位置示意图和历史滑坡分布示意图。

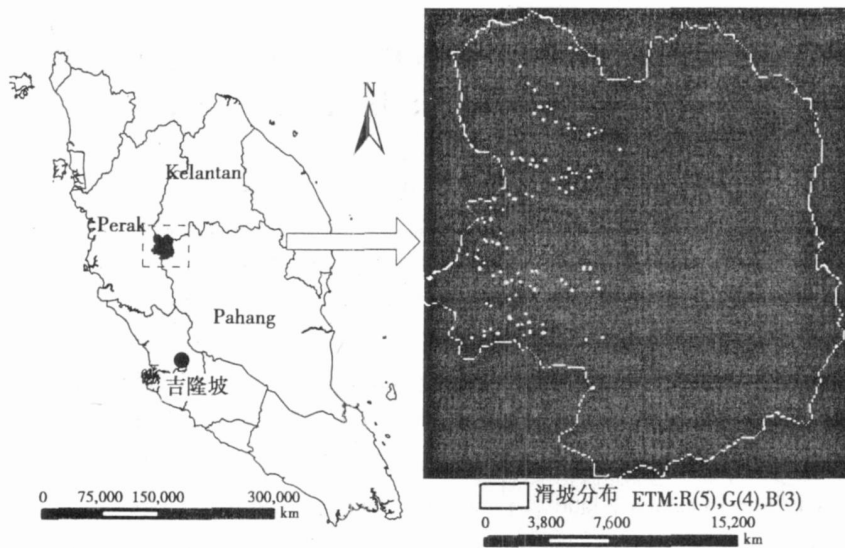


图 1 研究区位置示意图(右图为 ETM 影像叠加滑坡信息)

Fig 1 Location of study area in Malaysia(ETM images and landslide sites)

该区为马来半岛中部山地区,光照充足,降水丰富,以茶叶生产闻名于世。植被类型在平地区主要为经济林,包括油棕、橡胶、咖啡和茶叶等,山地丘陵区主要为热带雨林,树木高大,植被冠层浓密。基岩岩床主要由花岗岩组成,近年来,滑坡灾害频繁发生,造成人员伤亡和经济损失,如 2000 年发生的一次滑坡造成 6 人死亡,公路损毁;2004 年也出现了几次大的滑坡,但是没有人员伤亡。

### 1.2 数据处理

在 GIS 支持下对遥感影像进行解译和信息提取,可以快速地获取监测区地形地貌、地质构造、地层岩性、土地利用、植被覆盖、水系、城镇居民点以及主要的建筑物、滑坡灾害点及其分布情况等<sup>[10]</sup>;同时,多时相遥感影像的运用,可以获取滑坡时空分布序列。土地利用是地表变化较快的一个特性,通过遥感信息提取可以

实时监测土地利用变化,这里将覆盖研究区的 Landsat ETM 影像进行配准、正射纠正等预处理,提取土地利用、土地覆盖等相关信息;历史滑坡数据来自于滑坡存档资料、航片解译定位和野外调查,共查出研究区境内的滑坡 339个。

根据热带雨林地区的具体特点和前人研究结果<sup>[11]</sup>,选取坡度、坡向、地表曲率、岩性、构造、土地覆盖、地貌类型、道路和排水系统等 9个因子作为评价参数。地形、地貌、道路和排水系统等相关信息来自于 1:50000 比例尺地形图,岩性和构造信息来自于 1:50000 比例尺地质数据库,通过背景数据的采集,将所有评价数据集中到空间数据库和属性数据库中,依托 GIS 平台进行滑坡敏感性分析和评价。

敏感性分析需要考虑多种要素的影响,为便于多种专题数据层的空间分析和叠加,利用 GIS 软件栅格分析功能,结合滑坡敏感性评价的专业模型来完成多层数据的综合,栅格单元的大小可以依据公式(1)计算得出<sup>[12]</sup>:

$$G_s = 7.49 + 0.0006S - 2.0 \times 10^{-9}S^2 + 2.9 \times 10^{-15}S^3 \tag{1}$$

式中,  $G_s$  为适宜格网大小,  $S$  为原始等高线数据精度的分母。计算出最佳网格单元为 32.85m,这里将所有矢量数据转换和重采样为 30m × 30m 的栅格数据层,为进一步的滑坡敏感性分析和评价做好准备。

## 2 敏感性分析及结果验证

滑坡灾害的发生是灾害体所处的地质环境变异的结果,而地质环境是一个由众多因素确定的复杂体系。在进行敏感性分析和滑坡预测时,为了定量分析滑坡发生和孕灾环境、致灾因子之间的关系,假定历史滑坡的发生和相关影响因素的空间信息密切相关,并且在这些因素的作用下,未来滑坡依然会发生。因此,滑坡发生可以表述为:

$$L = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \tag{2}$$

式中  $L$  为滑坡灾害,  $x_1, x_2, \dots, x_n$  为滑坡灾害的影响因子,譬如地形坡度、地质地貌、土地覆盖等因素。

滑坡敏感性分析即采用一定的数理分析方法,分析  $x_1, x_2, \dots, x_n$  等因子对  $L$  的敏感度,即分析不同指标对灾害的影响程度大小,我们可以利用  $L$  事件(滑坡灾害的发生)的概率来定量地描述滑坡的敏感性。

### 2.1 基于条件概率法的敏感性分析

单个因子对滑坡发生的影响程度可以通过条件概率来表示,实际计算时可用频率来进行条件概率估算<sup>[13]</sup>,即:

$$P(x_{ij}) = p(L/x_{ij}) = \frac{P(L, x_{ij})}{P(x_{ij})} = \frac{N_i N}{S_i S} \tag{3}$$

式中,  $P(x_{ij})$  为指标  $x_{ij}$  滑坡发生的条件概率,  $S$  为研究区总单元数,  $N$  为研究区已知滑坡单元总数,  $S_i$  为  $X_i$  的单元个数,  $N_i$  为有指标  $X_i$  的滑坡单元个数。对单元各因子的条件概率求和,既可确定该单元的滑坡发生的概率,以作为滑坡敏感性的评价指标  $L_{SI}$  (landslide susceptibility index)。

$$I_{LS} = \sum_{i=1}^n P(x_i) \tag{4}$$

运用上述方法,分别计算坡度、坡向、地表曲率、土地覆盖类型、地貌类型、岩性、距离道路、河流和构造线的远近等的滑坡发生频率,获取评价因子的条件概率值,各个影响因子的分类分级情况见表 1。结果分析可以看出,北坡较其它坡向为易滑区;土地覆盖中的人为垦殖地区(草地、园地、橡胶林、茶叶/咖啡等)和城镇等地区的敏感度较高,为滑坡灾害多发区;离道路愈近愈易发生滑坡。因此人类活动对雨林地区的破坏,促成滑坡发生的敏感性增加,是该地区重要的致灾因子。

依照式(4),运用 GIS 软件的叠加分析功能,可以求出研究区所有评价单元的滑坡敏感性指数 ( $I_{LS}$ ),并绘制滑坡敏感性分析专题图(图 2)。通过滑坡信息的叠加,可以看出历史滑坡主要分布于  $L_{SI}$  较高地区,该专题图可以表示研究区滑坡敏感性特性。

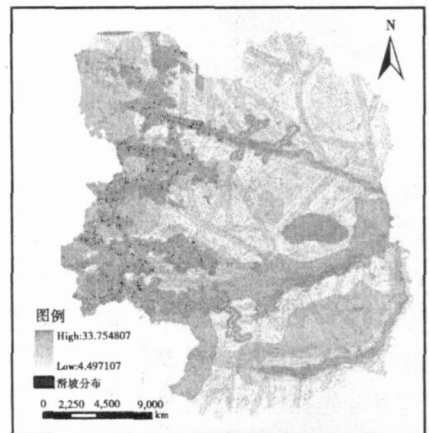


图 2 基于条件概率模型的滑坡敏感性专题图  
Fig 2 Special landslide susceptibility map based on conditional probability model

表 1 条件概率法获取的各评价因子的权重

Table 1 Weights of evaluation factors based on conditional probability model

因子	类别	条件概率	因子	类别	条件概率	因子	类别	条件概率
坡向	北	1.450	地貌	坡麓堆积带	2.509	河流	0.50	2.962
	东北	0.699		河漫滩	1.842		50~100	1.203
	东	1.129		裸山和缓坡	0.320		100~150	1.118
	东南	1.032		裸山、陡坡、切谷	1.191		150~200	1.037
	南	0.861		倾斜坡	1.467		200~250	0.999
	西南	1.063		坡麓切割带	0.710	>250	0.905	
	西	1.115		丘陵、切谷	0.879	坡度	2	1.454
	西北	0.823		山地、倾斜坡	2.270		2~6	1.454
曲率	<-0.5	1.100	山脊和高山	1.193	6~10		1.746	
	-0.5~-0.3	1.062	缓坡和切谷	0.477	10~14	1.399		
	-0.3~-0.1	1.023	岩性	变质岩(千枚岩、 石英云母片岩混合) 细到中等粒度的	4.243	10~18	1.100	
	-0.1~0.1	0.882		花岗岩	8.059	18~21	0.951	
	0.1~0.3	1.027		中到粗粒度的斑 岩黑云母花岗岩	0.829	21~25	0.778	
	0.3~0.5	0.971	道路	50~100	7.596	25~30	0.703	
	>0.5	1.045		100~150	5.663	30~35	0.658	
	土地覆盖	林地		0.322	150~200	4.206	35~83	0.831
草地		5.844		200~250	3.287	构造	0~100	1.197
园地		4.842		250~300	2.264		100~200	1.324
橡胶林		4.263	300~350	1.219	200~300		1.319	
灌木		1.843	350~400	0.389	300~400		0.808	
林农轮作		0	400~450	0.304	400~500		0.781	
茶叶 咖啡		6.449	450~500	0.180	>500	0.490		
城镇		10.630						

2.2 基于逻辑回归分析模型的敏感性分析

滑坡灾害的发生与不发生就是一种二分类因变量,因此可以凭借 Logistic 统计分析方法建立定量评价的数学模型<sup>[14]</sup>。Logistic 回归模型是二分类因变量(因变量 y 只取两个值)进行回归分析时经常使用的统计分析方法,分组数据 Logistic 回归分析是将概率进行 Logistic 变换后得到的 Logistic 线性回归模型,相当于广义线性模型。

Logistic 回归模型中,假设用 P 表示出现成功结果的概率, Q 表示失败的概率, x<sub>1</sub>, x<sub>2</sub>, ..., x<sub>m</sub> 表示对结果影响的 m 个因素,用 Logistic 回归公式表示出现成功和失败结果的概率分别为:

$$P = \frac{e^{0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_m x_m}}{1 + e^{0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_m x_m}} \quad (5)$$

$$Q = \frac{1}{1 + e^{0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_m x_m}} \quad (6)$$

可以看出,出现某种结果的概率与有关因素之间呈曲线关系。取自然对数有:

$$\ln(P/Q) = 0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_m x_m$$

其中 β<sub>0</sub>, β<sub>1</sub>, ..., β<sub>m</sub> 称为 Logistic 回归系数。

通过 (5) 可以计算出现成功事件的概率 P 值,即发生概率的大小,它可作为滑坡灾害敏感性指数 I<sub>L</sub> 来描述滑坡灾害发生的可能性高低。

这里首先在已有的栅格数据上进行滑坡发生和未发生点采样,获取研究区 26 828 个像元滑坡样本和 32 001 个像元未发生滑坡样本,然后将样本数据输出成文本文件,采用统计分析软件进行逻辑回归分析,得到各个影响因子的逻辑回归系数值(表 2)。利用式 (5) 计算各个评价单元发生滑坡的概率,各个系数即表 2 中的逻辑回归系数,最后绘制滑坡敏感性专题图(图 3)。

表 2 Logistic 回归系数  
Table 2 Logistic regression coefficient

	常数项	坡向	曲率	地貌	岩性	土地利用	排水	道路	坡度	构造
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
系 数	54 266	0.066	- 0.038	- 0.217	- 19.059	3.360	0.303	0.0509	- 0.056	- 0.068

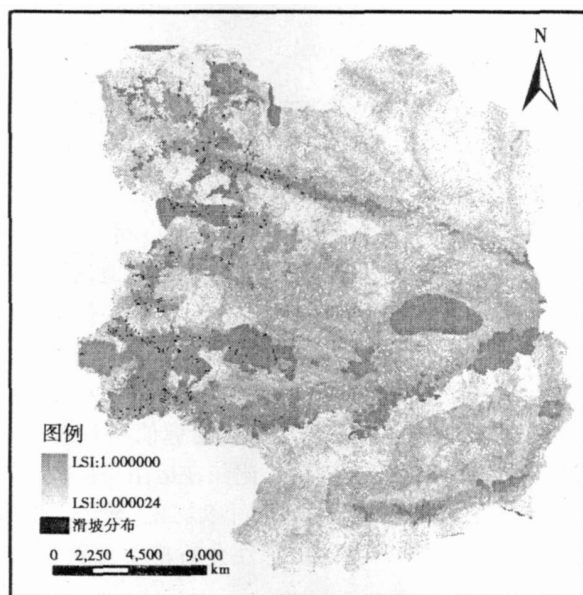


图 3 基于逻辑回归模型的滑坡敏感性专题图

Fig 3 Special landslides susceptibility map based on Logistic regression model

### 2.3 结果验证和比较

比较滑坡敏感性的计算结果和滑坡灾害发生的位置,可以评价敏感性分析的有效性,成功率验证法是评价滑坡预测精度的常用方法之一<sup>[5, 11, 13]</sup>,它是建立在两个假设前提条件下的: 其一是滑坡的发生和地形、地质、地貌、土地覆盖、土壤、道路和排水系统等空间信息密切相关; 二是未来滑坡可以再次被特定的因素诱发,譬如暴雨和地震等,在该研究区中,两个假定条件都符合。

这里将敏感性指数  $I_{LS}$  规一化到 0~100 范围内,按照降序进行排列,然后等分成 100 个单位,分别计算各个单位内滑坡灾害发生的百分比,得到滑坡发生累计频率-滑坡敏感性指数曲线图(图 4)。很显然,整个绘图区的面积可以表示为 1,代表滑坡预测与敏感性分析的精度为 100%,频率累计曲线下部 and X 轴围成的面积可以定量地描述滑坡预测成功率的大小。

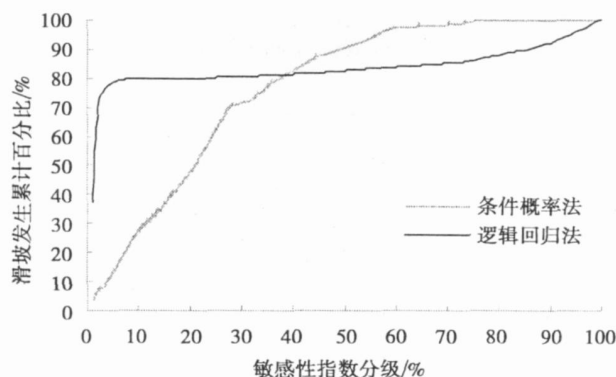


图 4 滑坡发生累计频率与敏感性指数的关系

Fig 4 Relationship between accumulative landslide frequency and susceptibility index

从结果对比图上可以看出,对于 100-90% (X轴 10%处)的敏感性指数,条件概率法可以概括 24.6%的滑坡灾害,而 Logistic回归分析可以概括 79.7%的滑坡发生,显然后者精度较高;100-70% (X轴 30%处)分别为 71.2%和 80.5%的滑坡发生。累计频率曲线和 X轴包围的面积分别为 0.773和 0.836因此我们可以说条件概率和 Logistic回归模型的预测精度分别为 77.3%和 83.6%,逻辑回归法具有较好的描述精度。

### 3 结论和讨论

(1)运用 GIS和 RS来获取孕灾背景数据、监测和管理灾害信息,已成为滑坡灾害研究中的一项重要内容。概率模型、统计分析模型和 GIS的结合,便于分析滑坡各个相关影响因子,量化评价因子的作用分值大小,有效表达滑坡灾害的敏感性指数,对滑坡预测预报具有重要的意义。

(2)从滑坡敏感性概率分析可以看出,土地利用和土地覆盖、道路等因素具有较高滑坡发生概率,说明该研究区人类活动致灾影响显著。人口的急剧增加,对雨林的无节制地砍伐、破坏、垦殖和开发等活动,造成斜坡失稳,在突发性暴雨等的诱发下,酿成滑坡灾害,造成经济损失和人员伤亡。所以,应该制定有效保护措施,加大环境治理力度,杜绝滥砍滥伐和过度开发。

(3)在通常的定量化分析过程中,一般要用到各个相关因子的评价标准,评价标准是一个阶跃函数,即不同级别间的分界点是跳跃的,这就造成分界点两端即使指标值相差很小但分属不同级别,而同一级别首尾指标值又相差较大,因而具有一定程度的不合理性。比如在运用条件概率进行分类分析时,就受到阶跃函数的影响。将统计回归分析方法用于滑坡敏感性分析,可以弱化阶跃的特性,有利于评价单元的横向对比。研究中,基于条件概率模型和逻辑回归模型的敏感性分析精度分别为 77.3%和 83.6%,逻辑回归法具有较高的描述精度。

致谢:感谢马来西亚国家遥感中心 MARS (Application of Malaysia Airborne Remote Sensing Project) 项目提供相关研究数据。

### 参考文献:

- [1] 陈剑,杨志法,刘衢秋. 滑坡的易滑度分区及概率预报模式[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(13): 2392-2396
- [2] 兰恒星,伍法权,周成虎,等. 基于GIS的云南小江流域滑坡因子敏感性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(10): 1500-1506
- [3] Pike R J. Quantifying landslide-terrain types from digital elevation models[J]. Mathematical Geology, 1998, 20(5): 491-511
- [4] Carrara A. Multivariate methods for landslide hazard evaluation[J]. Mathematical Geology, 1983, 15: 403-426
- [5] Chung C F, Fabbri A G. Probabilistic prediction models for landslide hazard mapping[J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 1999, 65(12): 1388-1399
- [6] Montgomery D R, Dietrich W E. A physically based model for the topographic control on shallow landsliding[J]. Water Resource Research, 1994, 30(4): 1157-1171
- [7] Dietrich E W, Reiss R, Hsu M L, et al. A process-based model for colluvial soil depth and shallow landsliding using digital elevation data[J]. Hydrological Processes, 1995, 9: 383-400
- [8] Anon M K, Das Gupta A S, Gupta R P. An artificial neural network approach for landslide hazard zonation in the Bhagirathi (Ganga) valley, Himachal Pradesh[J]. International Journal of Remote Sensing, 2004, 25(3): 559-572
- [9] Binaghi E, Luze L, Madella P. Slope instability zonation: A comparison between certainty factor and fuzzy Dempster-Shafer approaches[J]. Natural Hazards, 1998, 17: 77-97
- [10] 张继贤. 3S支持下的滑坡地质灾害监测、评估与建模[J]. 测绘工程, 2005, 14(2): 1-5
- [11] LEE S. Application of logistic regression model and its validation for landslide susceptibility mapping using GIS and remote sensing data[J]. International Journal of Remote Sensing, 2005, 26(7): 1477-1491
- [12] 李军,周成虎. 基于栅格GIS滑坡风险评价方法中网格大小选取分析[J]. 遥感学报, 2003, 7(2): 86-92
- [13] LEE S, Choi J M, In K. Probabilistic landslide hazard mapping using GIS and remote sensing data at Boun, Korea[J]. International Journal of Remote Sensing, 2004, 25(11): 2037-2052
- [14] 李雪平,唐辉明,陈实. 基于GIS的Logistic回归在区域滑坡空间预测中的应用[J]. 公路交通科技, 2005, 22(6): 152-155