

# 基于 GIS 与 Logistic 模型的公路泥石流易发性分析

邹强<sup>1,2</sup>, 王青<sup>1</sup>, 刘延国<sup>1</sup>

(1. 西南科技大学 环境与资源学院, 四川 绵阳 621010; 2. 中国科学院 水利部成都山地灾害与环境研究所 中国科学院 山地灾害与地表过程重点实验室, 四川 成都 610041)

**摘要:** 分析了泥石流形成与演化的物质条件、能量条件和环境条件。选取坡度、高程、坡面粗糙度、地层岩性、距断裂距离、地震烈度、土地利用类型作为泥石流易发性评价因子, 引入 Logistic 回归分析方法, 建立了泥石流易发性分析模型。定量分析了 G318 川藏公路段泥石流易发性, 结果表明, 该公路全线大部分处于泥石流中高易发区, 其中, 高易发区与中易发区占总面积的 78.61%, 主要分布在大渡河、澜沧江、金沙江、怒江、帕隆藏布江等大江大河的峡谷区段, 这些地区在公路修复和规划重建中应做好泥石流的预测、预报及防治。

**关键词:** 泥石流; 易发性; Logistic 模型; 公路安全

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2014)03-0185-05

中图分类号: P694

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2014.03.036

## Evaluation Method of Debris-flow Susceptibility Using GIS and Logistic Model

ZOU Qiang<sup>1,2</sup>, WANG Qing<sup>1</sup>, LIU Yan-guo<sup>1</sup>

(1. College of Environmental and Resource, SWUST, Mianyang, Sichuan 621010, China; 2. Institute of Mountain Hazards and Environment/Key Laboratory of Mountain Hazards and Earth Surface Process, CAS, Chengdu, Sichuan 610041, China)

**Abstract:** The formation conditions of debris flow were analyzed and the seven key indexes of hill slope, elevation, hill surface roughness, rock stratum, distance to faults, seismic intensity of earthquake and land use type were chosen for evaluating the susceptibility of debris flow. A model of debris flow susceptibility was established by introducing logistic regression, and the evaluation and mapping of debris flow susceptibility were completed for the highways. Subsequently, this proposed method was applied in a case study carried out on the Sichuan-Tibet section of national highway G318. Analysis of debris flow susceptibility for the whole highway showed that 78.61% of the total study area was situated in debris flow-prone areas, including the canyon areas of Dadu, Lanchang, Jinsha, Nu and Palongzangbu Rivers. It is suggested that sufficient attentions should be paid in debris flow forecast and prevention in road reconstruction and line selection for new highway.

**Keywords:** debris flow; susceptibility; Logistic model; highway safety

泥石流作为山区环境中一种常见的自然现象, 由于其形成过程复杂, 暴发突然, 来势凶猛, 破坏力强, 常给山区道路造成毁灭性的灾害。随着山区资源开发与路网建设力度的加大, 泥石流灾害对道路的危害日益突出。如何定量分析泥石流的发生可能性对道路的正常运营具有重大的现实意义。泥石流灾害易发性分析是通过分析研究区泥石流致灾因子的变化情况, 估计其发生概率, 并在此基础上完成易发性评价与制图, 可为泥石流的预测与风险分析提供基础信息。

自 20 世纪 90 年代, 泥石流易发性评价成为泥石流灾害研究的热点, 在全国范围内展开, 涌现出许多突破性的研究成果, 如全国泥石流灾害分布与灾害区

划图<sup>[1]</sup>、西藏泥石流监测方法<sup>[2]</sup>等。随着泥石流易发性分析的理论和方法的不断深入与完善, 信息技术的发展及广泛应用, 特别是遥感(RS)与地理信息系统(GIS)技术为泥石流易发性研究提供了强有力的空间分析功能, 使得空间数据集成分析更加快捷、精准, 泥石流易发性评价也从过去单一、定性研究向综合化、定量化发展<sup>[3-9]</sup>。目前, 泥石流易发性评价工作的关键在于针对不同的评估目的、不同的区域尺度, 对相关空间数据进行处理和分析, 开发出可靠性强的分析评价模型。

本文拟探讨基于 GIS 与 Logistic 模型的公路泥石流易发性评价的原理与方法, 并选择 G318 川藏公路段为研究区进行相关理论与技术的实证研究。

收稿日期: 2013-11-01

修回日期: 2013-11-04

资助项目: 四川省科技支撑计划项目“川藏交通干线四川段泥石流灾害风险评估研究”(2012SZ0075); 中国科学院“西部之光”人才培养计划项目“川藏交通干线泥石流灾害风险评估”(Y3R2440440)

作者简介: 邹强(1982—), 男(汉族), 四川省宜宾市人, 博士, 讲师, 主要从事山地灾害与 GIS 应用研究。E-mail: zouqiang@swust.edu.cn.

## 1 研究区概况

川藏公路东起四川省成都,西止西藏拉萨,是连接西藏与西南地区其他城市的主要交通命脉。受青藏高原强烈隆升的影响,川藏公路途径地区,地势西高东低,自东向西跨越不同的地貌单元,公路沿线地层较复杂,从上元古界震旦系到新生界第四系均有分布,全线地质构造活动强烈,空间展布东西差异明显。东部地区北东向构造带主要以龙门山断裂带为主;中部地区近南北向构造带以横断山褶皱带为主,主要包括“三江断裂”<sup>[10]</sup>——金沙江断裂带、澜沧江大断裂带、怒江大断裂带,对公路沿线的地貌格局起着主要的控制作用;中西部地区为中段南北向构造与西段东西向构造的过渡区域,断裂、褶皱及花岗岩体呈北北西向

展布;西部地区的断裂及褶皱呈东西向展布,为雅鲁藏布江断裂与三江断裂之间的缓冲地带。川藏公路沿线地区地处西藏东南部,地势对气候控制明显,直接影响公路沿线的降水、气温、湿度等气候因素。此外,受西南季风的控制,公路沿线地区降水较丰富。

川藏公路是中国泥石流灾害最为严重的交通干线之一,仅帕隆藏布沿江线路长 271 km,灾害点有 399 处,危害长度达 71.63 km<sup>[10-11]</sup>。古乡沟、培龙沟、米堆沟、瓦达沟等都是比较典型的泥石流沟,历史上数次大规模泥石流<sup>[11-15]</sup>,给川藏公路造成严重的生命财产损失。G318 川藏公路段泥石流分布状况如图 1 所示。随着经济建设的发展,频繁的泥石流灾害,使公路线路路况日趋恶化,车毁人亡事件时有发生,阻车断道十分严重。

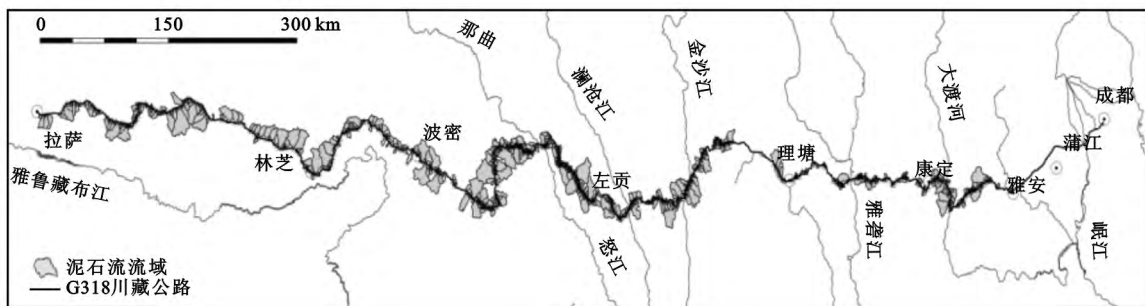


图 1 G318 川藏公路段泥石流分布

## 2 研究方法

泥石流易发性评价的目的在于分析泥石流在一定的致灾因子作用下发生的可能性或概率。目前,泥石流易发性分析方法主要包括定性与定量两类方法。定性方法是借助于泥石流的理论知识、经验认识对泥石流发展变化规律进行科学分析与判断,一般用于区域性的泥石流研究,如专家知识法<sup>[16]</sup>、层次分析法(AHP)<sup>[17]</sup>、加权线性组合法(WLC)<sup>[18]</sup>。定量方法是根据数据资料,应用科学的方法建立反映地质灾害与其控制因素之间关系的数学模型,进而实现量化评价的一类方法,如确定性方法<sup>[19]</sup>、人工智能法<sup>[20]</sup>和多元统计法<sup>[21]</sup>。泥石流易发程度的特点是因变量的取值范围介于“1”(泥石流发生)和“0”(泥石流不发生)这两个值之间,这要求建立的模型必须保证因变量的取值范围为 $[0, 1]$ 。二项 Logistic 模型所需的假设简单,不要求满足误差分布趋于正态分布的假设,也不要求自变量符合正态分布的条件,模型对识别变量的分布未作任何要求<sup>[22]</sup>,可以用来预测具有二项特点的因变量概率问题,因此,该模型符合泥石流易发性评价的建模要求。

基于 GIS 与 Logistic 回归模型的泥石流易发性分析方法包括三方面的内容:(1) 关键影响因子确定;(2) 因子指标量化;(3) Logistic 回归模型构建。

### 2.1 泥石流影响因子确定

泥石流的发生是一个复杂的系统过程,影响因素很多,包括地质条件、地形地貌条件、气候条件、水文条件、植被条件和人类活动等,各因素的影响作用也不尽相同。道路泥石流影响因子的选择的主要依据研究区内泥石流的形成条件、发育现状和灾害分布,从泥石流形成与演化的物质条件、能量条件和环境条件 3 个方面出发,选取坡度、高程、坡面粗糙度,地层岩性、距断裂距离,地震烈度,土地利用类型等 7 个相对稳定的评价因子构建指标体系,进而研究泥石流易发性。

针对川藏公路沿线泥石流发生的实际情况,充分考虑资料的可获取性与研究尺度,高程、坡度和坡面粗糙度可通过地形数据获取,地层、岩性、断裂等地质信息可通过研究区地质图提取,土地利用类型可依据研究区土地利用数据,参考第二次全国土地调查技术规范(TDT 1014—2007)进行划分。

## 2.2 因子量化方法

在泥石流易发性分析过程中,由于各个评价因子的量纲不同,各个评价因子作为回归模型中的自变量首先需要进行标准化处理,以获取同一尺度的量化指标值,便于进行后续分析与计算。本文用每个影响因子的各个 II 级分类因子中泥石流灾害点的个数与各个 II 级分类因子的面积的比值作为各个 II 级分类因子的指标值。计算表达式如下。

$$x_{i,j} = \frac{N_{i,j}}{S_{i,j}} \quad (1)$$

式中:  $x_{i,j}$ ——各类 II 级因子的指标值(条/km<sup>2</sup>);  $S_{i,j}$ ——各类 II 级因子的面积(km<sup>2</sup>);  $N_{i,j}$ ——各类 II 级因子中泥石流数(条),  $i=1,2,\dots,n$ (影响因子序号),  $j=1,2,\dots,m$ (各影响因子 II 级分类因子序号)。

按照式(1)计算出一个初始指标值  $x_{i,j}$ ,然后再把  $x_{i,j}$  进行标准化处理。标准化处理方法如下:

$$I_{i,j} = \frac{x_{i,j}}{\sum_{j=1}^m x_{i,j}} \quad (2)$$

式中:  $I_{i,j}$ ——各类 II 级因子的标准化值。

## 2.3 Logistic 回归分析方法

Logistic 回归模型是二值响应变量(因变量)对回归变量(自变量)的分析,其结果是预测某种事件的发生概率。在泥石流易发性评价过程中,各因子数据作为自变量,泥石流的发生与否作为分类因变量(0 代表泥石流不发生,1 代表泥石流发生),实现泥石流易发性评价模型的构建。

Logistic 回归模型中的响应变量为二值变量,记为  $Y$ ,只取 2 个值:0 和 1。令  $P$  为泥石流发生的概率,取值范围(0,1),则  $1-P$  为泥石流不发生的概率。对于  $n$  个泥石流影响因子  $X_1, X_2, \dots, X_n$ ,当  $X_1 = x_1, X_2 = x_2, \dots, X_n = x_n$  时,  $Y=1$  的泥石流发生概率为  $P(YH=1 | X_1 = x_1, X_2 = x_2, \dots, X_n = x_n)$ 。考虑 Logistic 变换<sup>[19]</sup>,以灾害发生的概率  $P$  为因变量,影响因子集  $X_1, X_2, \dots, X_n$  为自变量,建立模型:

$$\ln \left[ \frac{P(Y=1 | X_1 = x_1, X_2 = x_2, \dots, X_n = x_n)}{1 - P(Y=1 | X_1 = x_1, X_2 = x_2, \dots, X_n = x_n)} \right] = \alpha_0 + \alpha_1 X_1 + \alpha_2 X_2 + \alpha_3 X_3 + \dots + \alpha_n X_n \quad (3)$$

对(3)式进行等价变换:

$$P(Y=1 | X_1 = x_1, X_2 = x_2, \dots, X_n = x_n) = \frac{e^{C_0 + C_1 X_1 + C_2 X_2 + \dots + C_n X_n}}{1 + e^{C_0 + C_1 X_1 + C_2 X_2 + \dots + C_n X_n}} \quad (4)$$

模型中  $C_0$  是常数项,  $C_1, C_2, \dots, C_n$  是回归系数。通过对已知样本的求解,即可确定回归系数。

式(4)中,如果逻辑回归系  $C_1, C_2, \dots, C_n$  确定,则根据不同的指标值  $x_{i,j}$ ,计算研究区泥石流发生概率

$P$  值。根据  $P$  值大小,划分泥石流发生可能性等级,完成泥石流易发性分区。

## 3 易发性评价模型

依据研究区 1:5 万 DEM 数据,1:25 万地质图,全国土地利用类型数据以及沿线泥石流数据,分析各个 II 级分类因子的面积和泥石流分布数量,采用公式(1)计算 II 级分类因子的指标值,再依据公式(2)对各类评价因子进行标准化处理,获取统一尺度的量化指标值。各个影响因子的分类分级情况和计算结果如表 1 所示。

采用各关键因子数据类的标准化值作为逻辑回归模型的自变量,泥石流易发概率作为因变量,依据 Binary Logistic Regression 分析,确定各个关键因子与泥石流发生的相关系数,即为二项逻辑回归模型中各个关键因子参数的系数。Logistic 回归分析结果中,除坡度的系数所对应的 sig 值(0.076)略大于 0.05 外,其余均小于 0.05,可以认为分析结果通过 5% 显著性水平检验。因此,依据各个因子系数值,构建 Logistic 回归模型:

$$P = \frac{e^Z}{1 + e^Z} \quad (5)$$

$$Z = -5.547 + 1.555 I_{ELE} + 0.824 I_{SLO} + 0.755 I_{ROU} + 9.952 I_{LIT} + 2.550 I_{FAU} + 7.218 I_{EAR} + 6.197 I_{LAN} \quad (6)$$

式中:  $I_{ELE}, I_{SLO}, I_{ROU}, I_{LIT}, I_{FAU}, I_{EAR}, I_{LAN}$ ——高程、坡度、坡面粗糙度,地层岩性、距断层距离,地震烈度,土地利用的因子参数。

## 4 结果与分析

根据构建的 Logistic 回归模型,用式(6)计算每一网格单元各个影响因子的值,再用式(5)计算综合评价图层中每一单元的泥石流灾害易发性指数(发生概率)。依据泥石流易发性指数计算结果,按照自然断点法将研究区分为微易发区、低易发区、中易发区、高易发区等 4 级,并制作泥石流易发性评价分区图(图 2)。

分析结果表明,泥石流高易发区的面积为 12 655.51 km<sup>2</sup>,占总面积的 36.22%;泥石流中易发区的面积为 14 812.66 km<sup>2</sup>,占总面积的 42.39%;泥石流低易发区的面积为 6 071.65 km<sup>2</sup>,占总面积的 17.38%;泥石流微易发区的面积为 1 402.92 km<sup>2</sup>,占总面积的 4.01%。从公路全线范围看,大渡河、澜沧江、金沙江、怒江、帕隆藏布江等大江大河的峡谷区段,泥石流易发性指较大,而高原面与成都平原区的公路沿线泥石流易发性指数较小。

表 1 各评价因子分级与量化指标值

因子	分级序号	II 级因子	II 级因子中泥石流条数/条	II 级因子面积/km <sup>2</sup>	指标值/(条·km <sup>-2</sup> )	标准化值
高程/km	1	≤1	16	3 271.53	0.004 9	0.024 4
	2	1~2	54	1 111.52	0.048 6	0.242 3
	3	2~3	175	2 122.32	0.082 5	0.411 3
	4	3~4	458	8 653.82	0.052 9	0.264 0
	5	>4	231	19 839.45	0.011 6	0.058 1
坡度/(°)	1	0~10	3	7 271.85	0.000 4	0.003 4
	2	10~20	96	7 641.00	0.012 6	0.102 1
	3	20~30	517	8 131.34	0.063 6	0.516 7
	4	30~40	305	6 946.90	0.043 9	0.356 8
	5	> 40	13	5 007.55	0.002 6	0.021 1
坡面粗糙度	1	1.0~1.1	147	18 734.65	0.007 8	0.048 3
	2	1.1~1.2	487	6 963.85	0.069 9	0.430 2
	3	1.2~1.3	227	4 131.82	0.054 9	0.338 0
	4	1.3~1.4	55	2 345.24	0.023 5	0.144 3
	5	>1.4	18	2 823.07	0.006 4	0.039 2
地层岩性	1	软	92	4 266.56	0.021 6	0.175 6
	2	较软	87	4 511.33	0.019 3	0.157 1
	3	中等	422	12 542.36	0.033 6	0.274 0
	4	较硬	130	6 081.28	0.021 4	0.174 1
	5	硬	203	7 540.12	0.026 9	0.219 3
距断层距离/km	1	≤10	795	26 074.76	0.030 5	0.282 0
	2	10~20	48	4 244.20	0.011 3	0.104 6
	3	20~30	31	2 314.53	0.013 4	0.123 9
	4	30~40	40	1 677.83	0.023 8	0.220 5
	5	>40	20	687.32	0.029 1	0.269 1
地震烈度/度	1	<VI	0	1 347.55	0.000 0	0.000 0
	2	VI—VII	72	4 996.17	0.014 4	0.141 2
	3	VII—VIII	423	12 710.30	0.033 3	0.326 0
	4	VIII—IX	132	5 025.79	0.026 3	0.257 3
	5	>IX	307	10 918.84	0.028 1	0.275 5
土地利用	1	常绿林、稀树林	287	10 520.26	0.027 3	0.207 7
	2	灌丛、坡草地	482	18 085.46	0.026 7	0.203 0
	3	平原草地、荒漠草原	44	1 458.32	0.030 2	0.229 8
	4	河流、湖泊、冰川	94	2 659.26	0.035 3	0.269 2
	5	裸岩、砾石、农田	27	2 275.35	0.011 9	0.090 4

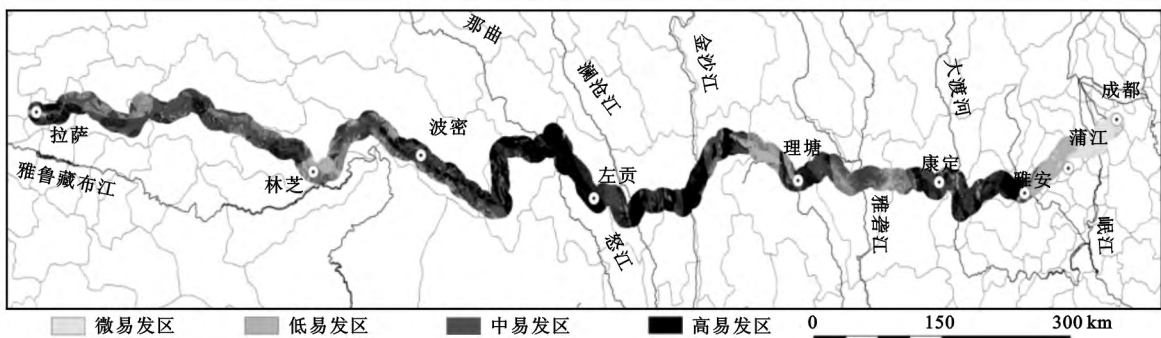


图 2 G318 川藏公路段泥石流易发性评价分区

将研究区内 934 条历史泥石流灾害位置与泥石流易发性区划结果进行对比,发现共有 493 条泥石流

位于高易发区,占灾害总数的 52.8%;中易发区有 385 条泥石流,占灾害总数的 41.2%;微易发区没有

泥石流发生(表2)。上述分析说明,本文的易发性评价结果具有可靠性。

表2 泥石流易发性评价结果

易发等级	易发分区	面积/km <sup>2</sup>	占总面积百分比/%	泥石流数量/条
1	微	1 402.92	4.01	0
2	低	6 071.65	17.38	56
3	中	14 812.66	42.39	385
4	高	12 655.51	36.22	493

## 5 结论

分析了泥石流形成与演化过程中孕灾因子对泥石流易发性的空间关系,建立了一套结合GIS和Logistic回归模型的交通干线泥石流易发性定量分析与制图流程包括:(1)建立基础数据库,选取关键影响因子;(2)划分评价单元,计算各评价因子的易发性指标值;(3)建立评价模型,计算综合易发指数;(4)进行泥石流易发性分区。

本文选取坡度、地面高程、坡面粗糙度、地层岩性、距断裂距离、地震烈度、土地利用类型为泥石流易发性评价因子,引入Logistic回归分析方法,构建泥石流易发性评价模型。定量分析G318川藏公路段泥石流易发性,结果表明,泥石流高易发区与中易发区占总面积的78.61%,主要分布在大渡河、澜沧江、金沙江、怒江、帕隆藏布江等大江大河的峡谷区段;而微易发区仅占总面积的4.01%,主要分布在高原面与成都平原地区。

中国的长大交通干线,如川藏公路,青藏铁路,沿途穿过多个差异巨大的地貌单元,地势高差和气候差异显著,地质条件复杂。道路安全不仅面临高山峡谷区、山地灾害频发区等灾害环境,还面临着全球变化诱发超大规模地表灾害,具有巨大的工程风险。为此,确定交通干线泥石流灾害主控因素,精确判定泥石流发生与危害程度,建立交通干线泥石流灾害风险分析与预警平台意义重大,此方面的研究工作还需进一步完善。

### [参考文献]

[1] 唐邦兴,柳素清,刘世建.中国泥石流分布及其灾害危险区划图[M].成都:成都地图出版社,1991.  
 [2] 崔鹏,陈晓清,程尊兰,等.西藏泥石流滑坡监测与防治[J].自然杂志,2010,32(1):19-25.  
 [3] Carrara A. Multivariate models for landslide hazard evaluation[J]. Mathematical Geology, 1983,15(3):403-426.  
 [4] 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.

- [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] Cascini L. Applicability of landslide susceptibility and hazard zoning at different scales[J]. Engineering Geology, 2008,102(3):164-177.  
 [7] Rapolla A, Nocera S D, Matano F, et al. Susceptibility regional zonation of earthquake-induced landslides in Campania, Southern Italy[J]. Natural Hazards, 2012, 61(1):115-126.  
 [8] 唐川.云南怒江流域泥石流敏感性空间分析[J].地理研究,2005,24(2):178-185.  
 [9] 邹强,崔鹏,张建强,等.长江上游地区泥石流灾害敏感性量化评价研究[J].环境科学与技术,2012,35(3):159-167.  
 [10] 罗德富,朱平一,陈瑞,等.川藏公路南线(西藏境内)山地灾害及防治对策[M].北京:科学出版社,1995.  
 [11] 蒋忠信.西藏帕隆藏布河谷崩塌滑坡、泥石流的分布规律[J].地理研究,2002,21(4):495-503.  
 [12] 何易平,胡凯衡,韦方强,等.川藏公路帕隆藏布流域段泥石流活动特征[J].水土保持学报,2001,15(3):76-80.  
 [13] 游勇,程尊兰,胡平华,等.西藏古乡沟泥石流模型试验研究[J].自然灾害学报,1997,6(1):52-58.  
 [14] 朱平一,程尊兰.川藏公路培龙沟泥石流输砂堵江成因探讨[J].自然灾害学报,2000,9(1):80-83.  
 [15] 李德基,游勇.西藏波密米堆冰湖溃决浅议[J].山地学报,1992,10(4):219-224.  
 [16] 朱阿兴,裴韬,乔建平,等.基于专家知识的滑坡危险性模糊评估方法[J].地理科学进展.2006,25(4):1-12.  
 [17] Ouri A E, Amirian S. Landslide hazard zonation using MR and AHP methods and GIS techniques in Langan watershed, Ardabil, Iran[C]//International conference on ACRS. Beijing, China, 2009:19-22.  
 [18] Ayalew L, Yamagishi H, Ugawa N. Landslide susceptibility mapping using GIS-based weighted linear combination; The case in Tsugawa area of Agano River, Niigata Prefecture, Japan[J]. Landslides, 2004(1):73-81.  
 [19] 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.  
 [20] Lee S, Ryu J H, Lee M J, et al. Use of an artificial neural network for analysis of the susceptibility to landslides at Boun, Korea [J]. Environmental Geology, 2003,44(7):820-833.  
 [21] Ayalew L, Yamagishi H. The application of GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Kakuda—Yahiko Mountains, Central Japan[J]. Geomorphology, 2005,65(1):15-31.  
 [22] 王济川,郭志刚. Logistic 回归模型:方法与应用[M].北京:高等教育出版社,2001.