

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2016.03.16

GIS 支持下基于因子分析法的都汶路沿线 地质灾害易发性评价

孟祥瑞¹, 裴向军¹, 刘清华¹, 张 雄², 胡云华³

(1. 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059;
2. 四川省蜀通岩土工程公司, 四川 成都 610041; 3. 四川省第三测绘工程院, 四川 成都 610500)

摘要: 在国道 317 线都江堰至汶川段沿线约 11 065 km² 的区域内, 以震后遥感影像解译为基础结合野外地质调查, 得到 2 100 多个地质灾害点。基于 GIS 技术分析了坡度、坡向、地形起伏度、地层岩性、断层距离、降雨强度、植被覆盖等因素同灾害点分布的关系, 并以此为基础对各因素进行标准化赋值; 选取样本数据, 运用因子分析法确定了各因素的权重并建立研究区地质灾害易发性评价模型; 利用评价模型在 GIS 平台下对研究区的地质灾害易发性进行评价, 并依照自然间断点法将研究区划分为高度易发区、中高度易发区、中度易发区、中低度易发区、低度易发区和极低度易发区 6 类; 利用 AUC 对评价结果进行验证, AUC 值达到 75.48%, 表明评价结果准确率显著, 评价分区效果良好。

关键词: 公路沿线; 地质灾害; 易发性评价; GIS; 因子分析法

中图分类号: P642.23

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2016)03-0106-10

GIS-Based susceptibility assessment of geological hazards along the road from Dujiangyan to Wenchuan by factor analysis

MENG Xiangrui¹, PEI Xiangjun¹, LIU Qinghua¹, ZHANG Xiong², HU Yunhua³

(1. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China; 2. Sichuan Shutong Geotechnical Engineering Company, Chengdu, Sichuan 610041, China; 3. The Third Surveying and Mapping Engineering Institute in Sichuan Province, Chengdu, Sichuan 610500, China)

Abstract: Along the national road 317 between Dujiangyan and Wenchuan, 2100 geological hazards are got in 11065km² area by interpreting the remote sensing map and field investigation after Wenchuan earthquake. Based on the relationship analysis between geological hazards distribution and the factors include slope angel, slope aspect, terrain fluctuation, stratum, distance to the fault, rainfall intensity and vegetation cover. There concludes the standard value of each factor. The model of geo-hazards susceptibility assessment of study area is built by confirming the weight of each factor. Every factor is gotten through analysis sample data with the method of factor analysis. With the method of nature break under the GIS platform within the certain model. The study area is divided into 6 areas include high susceptibility area, medium high susceptibility area, medium susceptibility area, medium low susceptibility area, low susceptibility area and extremely low susceptibility area. The result whose value of AUC is 75.48%, which is proved to be accurate and the effect of zoning is pretty good.

Keywords: area along the road; geological disaster; susceptibility assessment; GIS; factor analysis

收稿日期: 2015-11-03; 修订日期: 2015-11-26

基金项目: 四川测绘地理信息局支撑课题(J2014ZC12); 地理空间信息工程国家测绘地理信息局重点实验室开放研究基金(201419)

第一作者: 孟祥瑞(1993-), 男, 硕士, 主要从事地质灾害及地质工程研究。E-mail: 452652713@qq.com

0 引言

地质灾害是指在自然或者人为因素的作用下形成的,对人类生命财产安全及环境产生威胁和破坏的地质作用及现象,常见的有崩塌、滑坡、泥石流等。地质灾害的发生受区域的地质环境、气象水文条件以及人类工程活动等因素的影响,因此,地质灾害的发生具有一定的可预测性。依据一定的影响因素对地质灾害发生的可能性进行评价以预防地质灾害可能造成的损失,并对人类日常生活和建设活动提供指导具有重大意义。这种将评价区域的地质环境、气象条件、人类活动、灾害历史等因素作为指标构建体系,依据评价区实际情况对各指标赋值并建立模型得到评价结果的综合评价方法即为地质灾害易发性评价^[1]。

伴随着 GIS(地理信息系统)技术的发展,GIS 在地质灾害易发性评价中应用越来越多。通过对区域遥感数据进行解译,结合区域内的地形地貌、地质构造、气象水文等一系列的空间信息,在 GIS 平台下对这些数据进行分析,为评价指标的选取和权重分析提供依据,为评价模型的建立提供有力支持。本文对汶川地震极震区国道 317 线都江堰到汶川县段(下文简称“都汶路”)沿线地质灾害进行了解译和调查,并依靠 GIS 平台对该区域的地形地貌、气象水文、人类活动等建立数据库,对各因素和地质灾害分布的关系进行分析统计,在此基础上建立了适当的评价模型对都汶路沿线的地质灾害易发性进行评价。

1 研究区概况

都汶路为连接都江堰市区与汶川县政府驻地威州镇的公路(图 1),是成都平原进入川西北高原的主要门户,也是汶川地震重灾区的重要生命线,保证都汶路的畅通对于地震灾区人民的生产生活有重大意义。都汶路主体位于汶川县境内的岷江河谷内,属于青藏高原东部边缘的龙门山地区,位于龙门山系和邛崃山系之间,为中山峡谷地区,属我国三大阶梯中由第一阶梯青藏高原向第二阶梯四川盆地及边缘山地过渡地带。研究区从整体地势来看西北高东南低,高山、中高山、中山、低山和河谷均有分布,山高谷深,地形切割强烈,山体临空条件好。沿线出露基岩主要以三叠系须家河组碎屑岩(主要为砂岩)、泥盆系地层(主要为千枚岩和灰岩)、以及元古代侵入岩体(主要为花岗岩)为主。

研究区范围是以公路两岸小流域的分水岭为边界进行划定。区内最主要的地质构造为北川-映秀断裂

(即龙门山中央断裂),由映秀镇中滩铺-枫香树沟横穿岷江而过,该断裂是“5·12”汶川大地震的发震断裂。都汶路沿线的地质灾害对道路交通安全有非常不利的影响,对都汶路沿线进行地质灾害易发性评价十分必要。

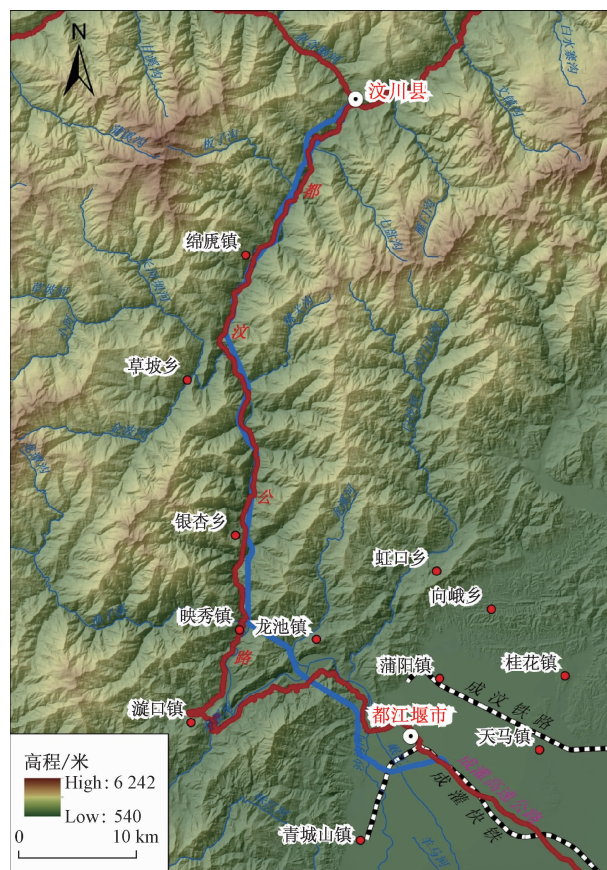


图 1 研究区交通示意图

Fig. 1 Traffic diagram of study area

2 评价指标选取与赋值

评价指标的选取,从地质条件、自然条件和人类活动三方面着手,其中地质条件最为主要,包含了灾害点密度、坡度、坡向、地形起伏度、地层岩性和断层距离这六项指标;自然条件从气象和植被两方面选取对地质灾害发生影响较大的降雨强度与植被覆盖两个指标;人类工程活动主要考虑都汶路的修建对两岸地质灾害产生的影响^[2]。在确定指标后,对指标和灾害点发育分布的关系进行分析,结合分析结果和专家经验法、自然间断点法、标准化法等方法对各指标赋予 0~1 范围内的值,值越高表示对灾害发生影响越大。

2.1 灾害点密度

在考虑地质灾害发生的可能性时,原有地质灾害

的影响是非常重要的。原有的地质灾害会产生大量的松散物质,在相同的外界条件下,这些松散物质更易再次失稳引发新的地质灾害。本文以研究区内近期多波段遥感影像为基础对灾害点进行遥感解译,得到研究区内崩塌滑坡地质灾害点的分布数据(图2),利用ArcGIS对灾害点进行密度分析,得到研究区的灾害点密度数据(图3),并按自然间断法^[3]对密度数据进行聚类分析,将数据划分为5组。依照分类结果将灾害点密度数据(个/km²)按照0~1、1~3、3~6、6~10、10以上的分组划分为五个范围,并分别赋值0.2、0.4、0.6、0.8和1。

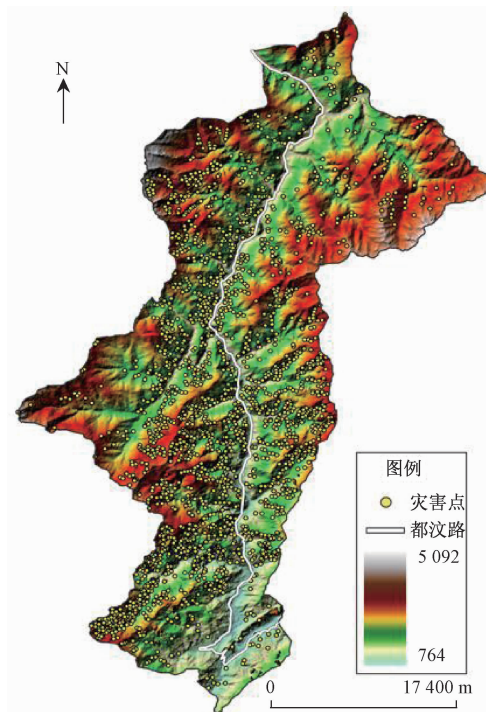


图2 灾害点分布

Fig. 2 Geological hazards distribution

2.2 坡度

坡度是地质灾害易发性评价的一个重要因素。通常情况下,地形坡度越大,坡体重力在下滑方向上分量越大,坡体失稳的可能性增加^[4-5]。本文基于研究区DEM数据,利用ArcGIS表面分析功能得到研究区的坡度栅格数据(图4)。以解译得到的灾害点矢量数据作为掩膜,在ENVI中将该掩膜作为感兴趣区提取得到每一个灾害点所对应的坡度值,对得到的信息进行统计得到灾害点与坡度的关系(图5)。由统计结果可见,灾害点主要集中于30°~50°之间,其数量占到了全部灾害点数量的65%,灾害点密度在40°以后迅速升高,并且在60°~70°之间到达顶峰。可见,坡度对

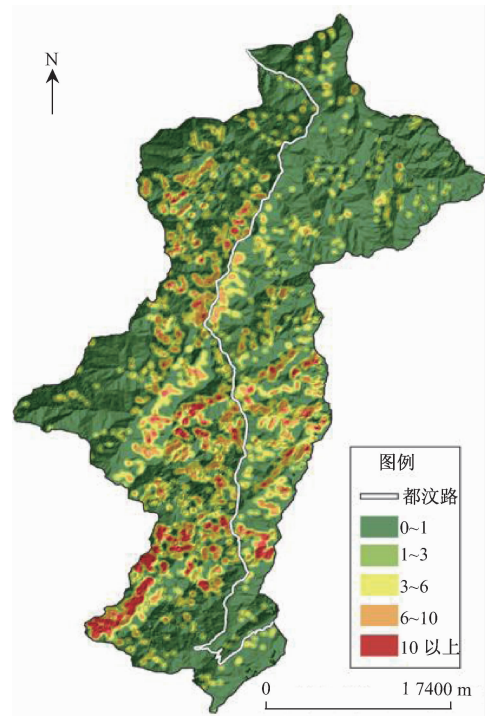


图3 地质灾害点密度

Fig. 3 Density of hazards

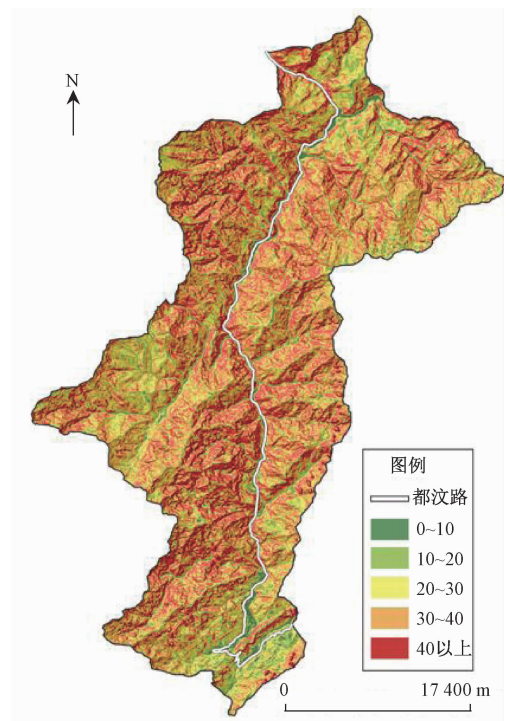


图4 坡度

Fig. 4 Slope angel

地质灾害的发育影响显著,随着坡度的增加地质灾害暴发的可能性增加。依照评价结果,利用各坡度范围内灾害点密度的相对高低来表征坡度对灾害发生影响

程度的大小(后文部分指标采取相同原则),对坡度按照 $0^{\circ} \sim 10^{\circ}$ 、 $10^{\circ} \sim 20^{\circ}$ 、 $20^{\circ} \sim 30^{\circ}$ 、 $30^{\circ} \sim 40^{\circ}$ 、 40° 以上分别赋值 0.2、0.4、0.6、0.8 和 1。

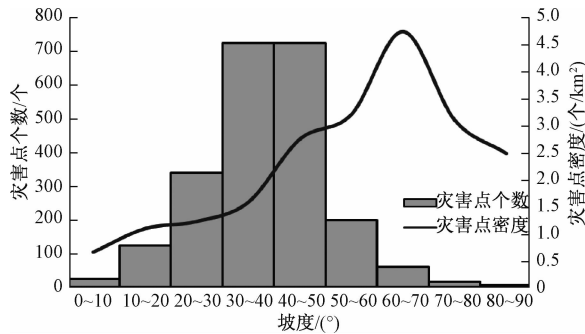


图5 灾害点分布与坡度关系

Fig. 5 Relationship between geological hazard distribution and slope angel

2.3 坡向

坡向对灾害的分布有重要影响,不同坡向的斜坡受到的太阳辐射强度不同,影响了斜坡的水蒸发量、植被覆盖、坡面侵蚀等诸多因素,进而改变了斜坡地下水孔隙压力的分布及岩土体物理力学特征,使得斜坡稳定性产生差异^[6];同时,研究区是汶川地震极震区,灾害点在坡向上的分布与地震又有着很大的关系,体现出明显的断层逆冲方向效应和背坡效应(图6),灾害点多分布在坡向与断层逆冲方向相同以及坡向背对震源位置的斜坡之上,通过对研究区 DEM 数据进行表面分析得到坡向栅格数据,提取灾害点的坡向信息,所得的统计结果(图7)很好地体现了这一系列效应:灾害点在断层逆冲方向和背坡方向即南东、东及北东向斜坡上灾害点数量更为发育。

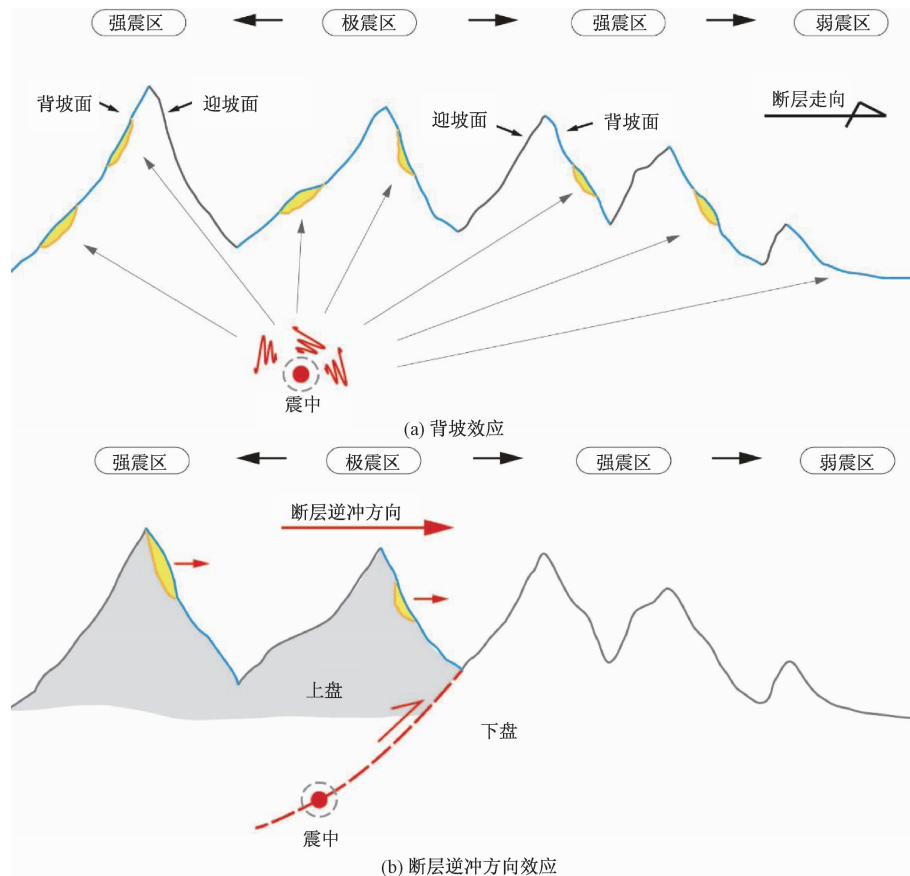


图6 背坡效应和断层逆冲方向效应

Fig. 6 Back slope effect and direction of fault thrust effect

由图7可以看出灾害点在具体方向上的分布有以下规律:南东($112.5^{\circ} \sim 157.5^{\circ}$)坡向上的地质灾害最发育,占总数的22%,东向($67.5^{\circ} \sim 112.5^{\circ}$)次之,占总数的20%,北东向($22.5^{\circ} \sim 67.5^{\circ}$)较多,灾害点占总数的14%,而北向($337.5^{\circ} \sim 22.5^{\circ}$)和西向

($247.5^{\circ} \sim 292.5^{\circ}$)最少,共占总数的13%。依据统计结果,按坡向南东、东、北东与南、北西与南西、北与西分别赋值1、0.8、0.6、0.4、0.2。

2.4 地形起伏度

地形起伏度是描述一定区域内高程变化的参数,

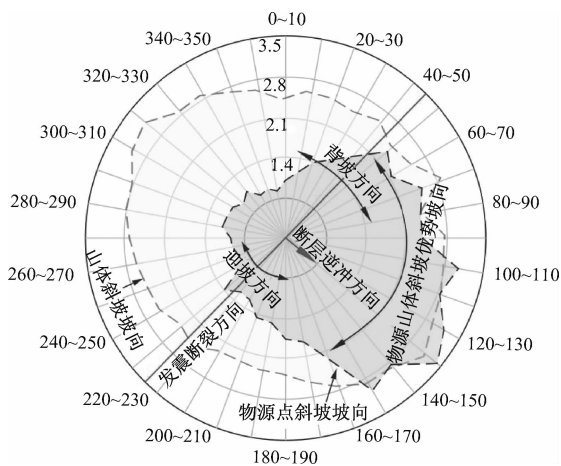


图7 灾害点分布与坡向关系

Fig. 7 Relationship between geological hazards distribution and slope direction

研究区位于岷江河谷两岸,海拔高差大,地形切割强烈,因而地形起伏度是影响地质灾害发育的一个重要因素,地形起伏度越大,表明岩土体的临空条件越好,地质灾害越容易发育^[7]。在 ArcGIS 中进行邻域分析可以在 DEM 的基础上得到研究区的地形起伏度栅格数据(图8),仍然利用灾害点做掩膜提取灾害点的地形起伏度数据,统计分析后得到的结果见图9。

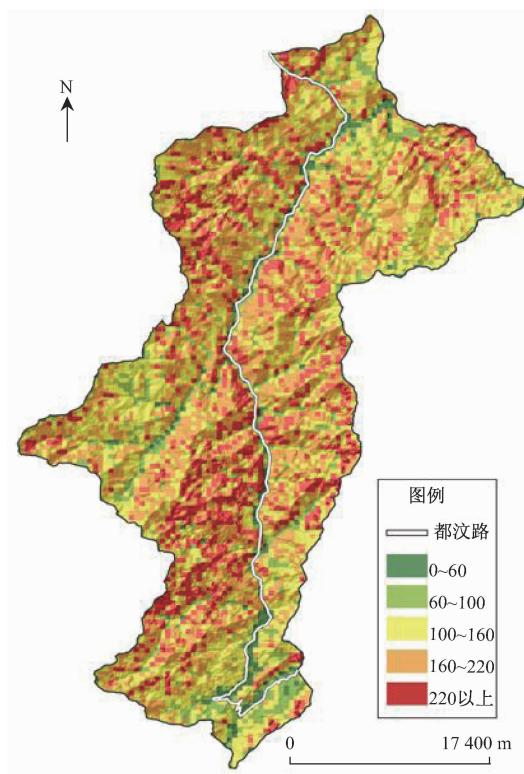


图8 地形起伏度

Fig. 8 Terrain fluctuation

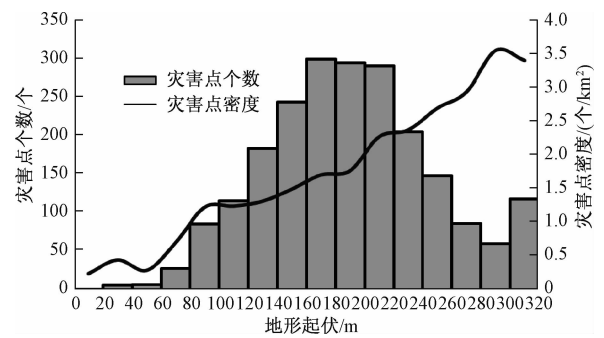


图9 灾害点分布与地形起伏度关系

Fig. 9 Relationship between geological hazards distribution and terrain fluctuation

由图9可看出,地质灾害多发生在地形起伏160~220 m 的范围内,占到了总数的52%。由于研究区内各起伏度范围的总面积不同,所以不能直观反映起伏度与地质灾害分布的关系,而灾害点密度则较为直观反映了两者的关系,随着起伏度增加,灾害点密度迅速上升。依统计结果中各起伏度范围内灾害点密度的相对高低,按0~60、60~100、100~160、160~220、220以上(单位 m)对起伏度分别赋值0.2、0.4、0.6、0.8、1。

2.5 地层岩性

地层岩性及其结构特征是影响地质灾害发育和分布的重要内在因素之一。依照研究区内出露基岩的硬度将基岩按照硬岩、较硬岩、较软岩、软岩以及土体进行分类(图10)。统计灾害点所处位置的岩性可以发现大部分的崩滑灾害发生在通常认为稳定性更好的硬岩地层上,其数目占总数的74%,而软岩中则较少。研究区硬岩主要岩性以花岗岩为主,本文通过光学显微镜对研究区内花岗岩铸体薄片进行了鉴定和分析。发现岩体中存在大量裂纹,将矿物切割成大小不等角砾,在外力作用特别是强震作用下,岩石中的各类裂纹发生贯通,裂纹尺度向宏观发展,使得岩体强度骤降,最终失稳,造成研究区地质灾害多发生在花岗岩区的现象。地层岩性的赋值依照软硬岩的划分标准分别对硬岩、较硬岩、较软岩、软岩、土体^[8]赋值1、0.8、0.6、0.4、0.2。

2.6 断层距离

距发震断层越远,地质灾害分布数量和密度越小,这是由于地震波在传递过程中能量会发生损耗,距发震断层的远近就决定了地震波到来时能量的强弱,因而也控制了地质灾害的规模;此外,断裂带的存在会对周围的地质环境产生影响,造成断裂带附近岩体破碎,

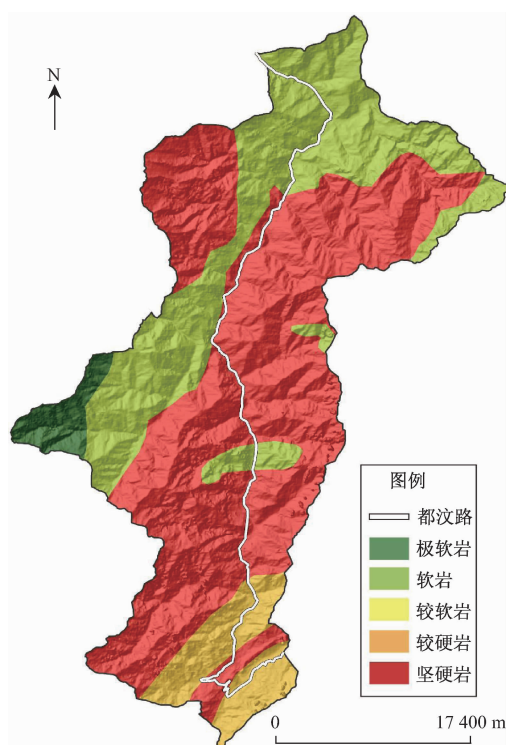


图10 地层岩性

Fig. 10 Stratum

客观上也增加了地质灾害发生的可能性。以5 km为间隔对距断层不同距离的灾害点数量和密度进行统计得到断层距离与灾害点的关系(图11)。

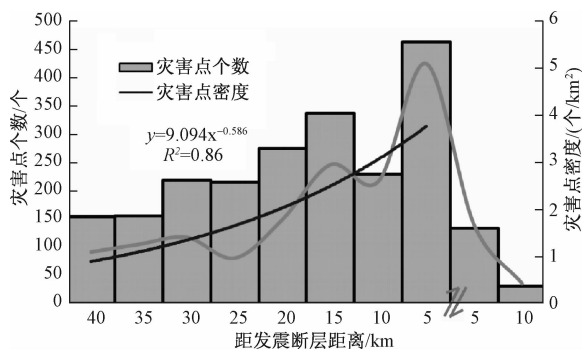


图11 灾害点分布与断层距离关系

Fig. 11 Relationship between geological hazards distribution and distance to the fault

从图11可以看出,地质灾害多发育在断层的上盘,有明显的上盘效应;总体上距离断层越近灾害越发育,灾害点的发育密度与断层距离呈指数关系,对灾害点密度同断层距离进行拟合,可以得到两者的指数函数关系式如下:

$$y = 9.094x^{-0.586} \quad (1)$$

式中: y ——灾害点密度/(个/ km^2);

x ——距断层距离/km,相关性系数0.773。

结合以上结果,以断层距离(km)上盘0~5、上盘5~15、上盘15~20、上盘20~40、下盘0~10进行分组并分别赋值1、0.8、0.6、0.4、0.2。

2.7 降雨强度

降雨是触发地质灾害,特别是不稳定斜坡、滑坡、泥石流等地质灾害的重要因素。研究区属亚热带季风气候,年降雨量较大且多集中在夏季,其中7~9月份三个月的降雨量占全年的绝大部分。在每年雨季,大量且集中的降雨使得雨水渗入岩土体,使岩土体的含水量增大,致使斜坡下滑力增加、滑动面的抗剪强度降低,崩塌滑坡等地质灾害发生的可能性提高,所以降雨对于崩塌滑坡泥石流等自然灾害的发生有激发作用,在其他条件相同的情况下,降雨量越大越容易引发地质灾害^[9]。将研究区按照年降雨量400~600 mm、600~800 mm、800 mm以上进行分区并分别赋值0.2、0.6、1。

2.8 植被覆盖

植被覆盖度对地质灾害发生的可能性有直接影响,这是由于植被的根茎具有根固作用,可减缓坡面水流的流动速度,其深入地底的根系可以加固坡体,从而大幅度减少坡面的破坏,降低坡面发生地质灾害的可能性。通常,植被覆盖度越高的地方,发生地质灾害的可能性越低^[10]。植被覆盖程度的好坏采取NDVI(归一化植被指数,利用绿色植被对卫星不同波段探测信号的反射值计算分析得到,能反映植物生长的状况,NDVI值为正且值越高时,植被覆盖情况越好)来进行描述。分析灾害点所处区域的NDVI值并统计分析结果(图12),可见灾害点多分布在植被覆盖较差的地方,灾害点个数总体上满足随着NDVI值升高而递减的规律。植被覆盖这一指标的赋值可直接对NDVI值进行归一化,其计算公式如下(式2):

$$B = \frac{NDVI - NDVI_{\min}}{NDVI_{\max} - NDVI_{\min}} \quad (2)$$

式中: $NDVI$ ——某一栅格的NDVI值;

$NDVI_{\min}$ ——研究区内NDVI最小值;

$NDVI_{\max}$ ——研究区内NDVI最大值。

2.9 人类工程活动

人类工程活动是在人地界面上进行的,离不开一定的自然环境,且与地质环境的关系尤为密切。人类的工程活动会对地质环境产生扰动,引起地质环境各要素及总体环境效应的变化。研究区内的主要人类工程活动是都汶公路的修建,由于修建过程中会开挖坡脚、开凿隧道等,会对周围地质环境产生不利影响,客

观上增加地质灾害发生的可能性。对都汶公路进行缓冲区分,按照距离公路^[11-12]0~200 m、200~500 m、500 m以上对公路两侧进行分区,并对这三个区域分别赋值1、0.5、0。

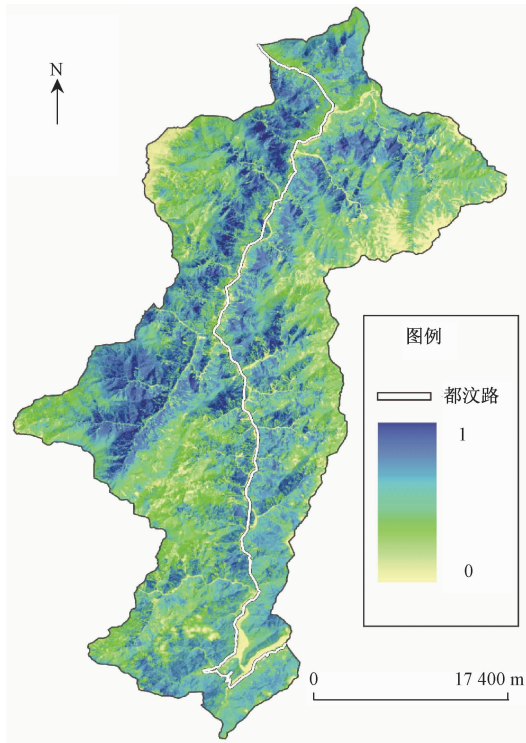


图 12 植被覆盖 (NDVI 指数)

Fig. 12 Vegetation cover (NDVI)

3 评价模型建立

构建评价模型,即对所选取的指标赋予权重以得到灾害易发性的计算公式。本文在进行指标权重的赋值时为了避免常在此类评价中使用的层次分析法带来的主观影响,尝试采取能较为客观反映指标之间相关性的因子分析法进行权重分析。

3.1 因子分析法

因子分析是一种将多变量化简的技术,目的是分解原始变量,从中归纳出潜在的“类别”,相关性较强的指标归为一类,每一类变量代表了一个共同因子,而不同类之间的相关性则很小,这样将原来的多个相互关联的指标组合成相互独立的少数几个能充分反映总体信息的因子,从而在不丢掉主要信息的前提下解决了变量间的多重共线性问题^[13]。因子分析的本意是进行降维,但是由于因子分析法可以通过分析各个因子之间的相关性,提取主成分,并且表征出各个成分因子的贡献度,因此,也可以用来确定

指标的权重。

假定 p 个变量 $x_1 \sim x_p$ 在 n 个样本中对 p 个变量观测的结果构成了 1 个 $n \times p$ 阶的原始数据矩阵:

$$X = \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1p} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2p} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{np} \end{pmatrix} \quad (3)$$

通常,为了消除变量间在数量级上或量纲上的不同,在进行因子分析之前都对变量先进行标准化。假定标准化后的变量为 $z_1, z_2, \cdots, z_p$ 。因子分析的基本假设是 p 个标准化变量可由 p 个新的标准化变量因子 $F_1, F_2, \cdots, F_p$ 线形表示:

$$z_j = a_{j1}F_1 + a_{j2}F_2 + \cdots + a_{jp}F_p \quad (j = 1, 2, \cdots, p) \quad (4)$$

式中: $a_{ij} (i, j = 1, 2, \cdots, p)$ 构成矩阵 A 为因子载荷矩阵。假定上式中 p 个因子是按它们的方差贡献由大到小排列,通常选择 m 个方差贡献较大的因子,一般来说 m 个因子的累积贡献率应在 85% 以上。但在本文中,为了能够完全保留样本数据的所有信息,在进行因子分析时保留所有成分因子,即 $m = p$ 。因子 $F_j (j = 1, 2, \cdots, p)$ 对全部变量的方差贡献为 A 第 j 列元素的平方和:

$$V_j = \sum_{i=1}^p a_{ij}^2 \quad (5)$$

它是衡量公共因子相对重要性的指标, V_j 越大,表明 F_j 的贡献越大,所以,通常可以用公共因子的方差贡献率来作为权重。实际上,若将公共因子按方差贡献率由大到小排序,特征值也按由大到小顺序排列,各成分因子的权重如式 6:

$$F_j = \frac{\lambda_j}{\sum_{j=1}^p \lambda_j}, \lambda_j = \sum_{i=1}^p a_{ij}^2 = V_j \quad (6)$$

那么具体到各具体指标的权重算法即为:

$$B_i = \sum_{j=1}^m (a_{ij} \times F_j) \quad (7)$$

式中: B_i ——某指标的权重;

F_j ——第 j 个成分的贡献率。

3.2 样本提取与分析

在研究区范围内以 2km 为平均间距布置了 288 个样本点,仍然利用 ENVI 将这些取样点作为感兴趣区提取各个指标赋值图层上的信息,对 288 个点的指标评分值进行因子分析(由于公路因子对评价区的影响为条带状,其赋值栅格也为明显的条带状,故而不与

其他指标进行统一的因子分析,直接赋予平均权重 $10/9=0.1111$)。

通过因子分析得到的 A 矩阵见表 1;所有成分因子的最大特征值以及各成分因子的贡献大小见表 2。在得到 A 矩阵(表 1)与各成分的权重(表 2)以后,即可通过式 7 得到的所有指标权重。综合考虑上人类工程活动所占的 0.111 的权重,即可得到所有 9 个指标的权重(表 3),灾害点密度、坡度、坡向、地形起伏度、地层岩性、断层距离、降雨强度、植被覆盖、工程活动的

权重分别为 0.081、0.134、0.036、0.194、0.129、0.064、0.069、0.182、0.111,总和为 1。其中地形起伏度所占的权重最高,表明在研究区地形切割的强烈程度这一因素对地质灾害的发育有重要作用;坡度、地层岩性和植被覆盖这 3 个指标权重也较高,表明其对研究区地质灾害发育也有较大影响。

研究区地质灾害易发性的计算公式如下:

$$A = 0.081B_1 + 0.134B_2 + 0.036B_3 + 0.194B_4 + 0.129B_5 + 0.064B_6 + 0.069B_7 + 0.182B_8 + 0.111B_9 \quad (8)$$

表 1 因子分析结果

Table 1 The results of factor analysis

成分因子	1	2	3	4	5	6	7	8
灾害点密度	0.665	-0.130	-0.152	0.245	-0.508	-0.274	0.353	-0.012
坡度	0.649	0.437	-0.189	-0.306	0.226	-0.023	0.059	-0.450
坡向	0.214	0.135	-0.765	0.503	0.242	0.062	-0.154	0.106
地形起伏度	0.573	0.596	0.069	-0.296	0.039	0.089	0.077	0.456
地层岩性	0.529	-0.237	0.450	0.221	0.430	-0.459	-0.113	0.063
断层距离	0.701	-0.293	0.069	-0.087	-0.323	0.204	-0.513	-0.027
降雨强度	0.436	-0.638	0.048	-0.003	0.277	0.479	0.306	0.027
植被覆盖	0.077	0.538	0.523	0.557	-0.070	0.315	0.024	-0.124

表 2 各成分贡献率

Table 2 The contribution rates of each factor

成分因子	1	2	3	4	5	6	7	8
特征值	2.206	1.421	1.133	0.860	0.740	0.669	0.528	0.443
贡献率	27.5%	17.8%	14.2%	10.7%	9.3%	8.4%	6.6%	5.5%

表 3 各指标权重

Table 3 The weight of each index

指标	灾害点密度	坡度	坡向	地形起伏度	地层岩性	断层距离	降雨强度	植被覆盖	工程活动
权重	0.081	0.134	0.036	0.194	0.129	0.064	0.069	0.182	0.111

4 评价结果

4.1 结果描述

在得到评价区地质灾害易发性的评价模型后,按求得指标的权重在 ArcGIS 中对各指标图层进行叠加分析,即可得到研究区地质灾害易发性的评价结果。将所得结果的栅格图层按照自然间断点法(Natural Break)^[3]进行分区,划分为高度易发区、中高度易发区、中度易发区、中低度易发区、低度易发区和极低度易发区六类,得到地质灾害易发性分区图(图 13)。

从评价结果的空间分布(图 13)来看,易发性高的地区主要分布在映秀镇与银杏乡境内以及公路沿线,特别是映秀镇向卧龙方向以及都汶公路映秀镇至银杏乡路段两侧地质灾害易发性很高,在降雨等不良作用

下发生失稳破坏的可能性很高,应予以重视并对这些地段进行特别防护。

从评价结果的数据统计(表 4)上来看,极低度易发区、低度易发区和中低度易发区总面积为 5 360.12 km²,占研究区面积的 48.44%,分布于该区的地质灾害点个数为 328 个,仅占总体个数的不足 15%,平均灾害点密度也仅为 0.06 个/km²;而高度和极高度易发区两者总面积为 3 033.19 km²,占研究区面积的约 25%,但分布于该区域的灾害点个数达到了 1478 个,占总体灾害点个数的 67.55%,超过了总体个数的 2/3,灾害点发育的密度也达到了 0.48 个/km²,是前述灾害点密度的 7 倍,因此也表明高度易发区和极高度易发区受地质灾害威胁的可能性更高。各区具体统计数据见表 4。

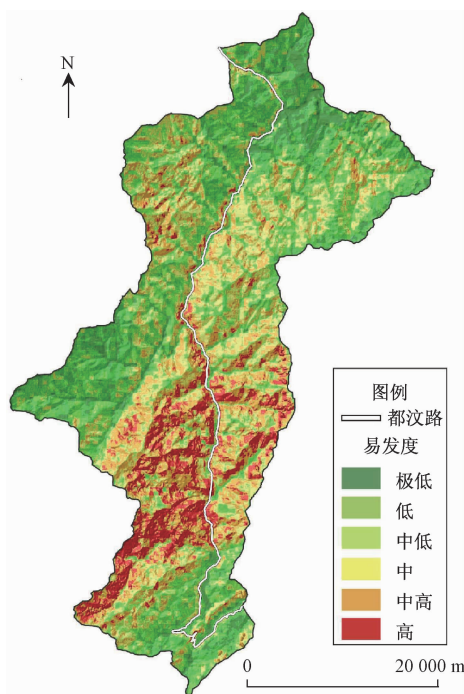


图 13 地质灾害易发性区划

Fig. 13 Geological hazards susceptibility zoning

表 4 分区结果统计表

Table 4 Result statistics

分区	面积/ km ²	面积占 比/%	灾害点 个数/个	灾害点 占比/%	灾害点密度/ (个/km ²)
极低	845.25	7.64	25	1.14	0.02
低	2 008.56	18.16	92	4.20	0.04
中低	2 506.30	22.65	211	9.64	0.08
中	2 671.96	24.15	382	17.46	0.14
中高	1 996.65	18.04	719	32.86	0.36
高	1 036.54	9.36	759	34.70	0.73
总计	11 065.26	100	2 188	100	—

4.2 结果验证

评价所得结果从空间分布以及数据分析上看来,与实际情况相符,为了从统计学角度进一步检验所建模型与评价结果的准确性,通过构建预测地质灾害易发性面积百分比累积与实际灾害点数量百分比累积评价结果检验曲线^[14],采用曲线下的面积百分比 AUC (Area Under Curve)^[15-17] 定量衡量评价结果的准确性。

地质灾害易发性评价结果检验曲线见图 14, AUC 值为 75.48%, 即定量衡量评价结果的准确率为 75.48%, 检验结果显示:地质灾害易发性评价结果检验曲线呈现出明显的凸形,表明发生在极高风险区和高危险区内的地质灾害数量更多,地质灾害易发性评价结果的准确率较高。

综合统计分析结果与 AUC 检验结果,证明本文所建立的模型在研究区有较好的适用性,评价结果较为

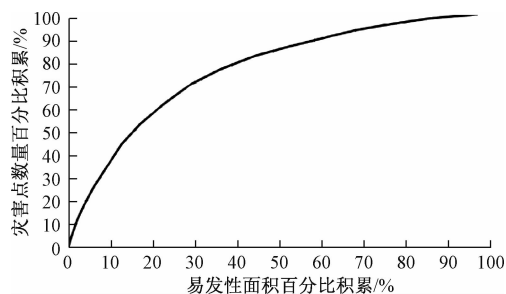


图 14 易发性评价结果检验曲线

Fig. 14 Result test curve of susceptibility assessment

符合实际情况。

5 结论

(1) 结合研究区实际情况,选取了 9 个具有代表性的评价指标,分析各个指标对灾害分布的影响,探讨了研究区地质灾害分布发育的规律。发现灾害点发育程度随坡度、地形起伏度的增加而上升,但随着离断层距离的增加以及植被覆盖度的升高而降低;除此以外,研究区的灾害点多发育在花岗岩地区,且灾害点在坡向的分布上表现出明显的背坡效应和断层逆冲方向效应。

(2) 利用因子分析法对数据进行分析得到较为客观的指标权重,发现地形起伏度所占的权重最高,表明研究区地形切割的强烈程度对地质灾害的发育起最重要的作用;坡度、地层岩性和植被覆盖这 3 个指标权重也较高,表明其对该地区地质灾害发育也有较大影响;

(3) 按照求得的权重对研究区进行地质灾害易发性分区,发现易发性高的地区主要分布在映秀镇与银杏乡以及公路沿线,特别是映秀镇向卧龙方向的河谷两岸;对分区结果进行统计分析,发现超过 2/3 地质灾害点分布在占研究区总面积约 25% 的高度易发区和中高度易发区,而中低度易发区、低度易发区和极低度易发区的灾害则很少。

(4) 对易发性评价结果进行 AUC 检验,得到的 AUC 值达到了 75.48%,表明定量衡量评价结果的准确率为 75.48%,准确率显著,评价结果较为符合实际情况。

参考文献:

- [1] 张春山,吴满路,张业成. 地质灾害风险评价方法及展望[J]. 自然灾害学报,2003(1):96-102.
ZHANG Chunshan, WU Manlu, ZHANG Yecheng. Method and prospect of geological disaster risk assessment[J]. Journal of Natural Disasters, 2003 (1): 96-102.
- [2] 吕镁娜,黄健民,邓雄文,等. 应用递进分析法对广

- 州金沙洲地区地质灾害的评价分区[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2014, 25(4): 89-96.
- LYU Meina, HUANG Jianmin, DENG Xiongwen, et al. Evaluation of geological in Jinshazhou with AMFP [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2014, 25(4): 89-96.
- [3] De Smith, Godchild, Longley. Geospatial Analysis-5th Edition [EB/OL]. 2015, <http://www.spatialanalysisonline.com/HTML/index.html>.
- [4] 杨秀梅. 基于GIS的地质灾害危险性评价[D]. 兰州: 兰州大学, 2008: 33-41.
- YANG Xiumei. Geological hazard risk assessment based on GIS [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2008: 33-41.
- [5] 周建伟. 汶川县城地质灾害危险性评价研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2010: 25-29.
- ZHOU Jianwei. Geological hazard risk evaluation research of Wenchuan county [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2010: 25-29.
- [6] 黄润秋. 强震山区城镇及工程建设场地选址工程地质评价[R]. 成都: 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 2012: 32-34.
- HUANG Runqiu. Geological evaluation of site selection for urban and engineering construction in strong earthquake areas [R]. Chengdu: State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, 2012: 32-34.
- [7] 张丽, 黄敬军, 武健强, 等. 江苏省地质灾害区划评价[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2015, 26(2): 81-86+102.
- ZHANG Li, HUANG Jingjun, WU Jianqiang, et al. Zonation of geological hazards in Jiangsu province [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2015, 26(2): 81-86+102.
- [8] 张春山, 孙炜锋, 谭成轩, 等. 四川汶川Ms8级地震重灾区地质灾害危险性评价和预测[J]. 地质通报, 2009(8): 1138-1145.
- ZHANG Chunshan, SUN Weifeng, TAN Chengxuan, et al. Assessment of geo-hazard in severely damaged region by Wenchuan Ms 8 earthquake, Sichuan province, China [J]. Geological Bulletin of China, 2009(8): 1138-1145.
- [9] 齐信, 唐川, 铁永波, 等. 基于GIS技术的汶川地震诱发地质灾害危险性评价—以四川省北川县为例[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2010(2): 160-167.
- QI Xin, TANG Chuan, TIE Yongbo, et al. Hazard assessment of geohazards triggered by the Wenchuan earthquake using GIS technology [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2010(2): 160-167.
- [10] 王磊, 王运生, 陈云, 等. 基于GIS的四川广安区地质灾害危险性评价[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2013, 24(1): 98-117.
- WANG Lei, WANG Yunsheng, CHEN Yun, et al. Geological hazard assessment based on GIS in Guang'an, Sichuan province [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2013, 24(1): 98-117.
- [11] 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(1): 15-26.
- XU Chong, DAI Fuchu, YAO Xin, et al. GIS platform and certainty factor analysis method based Wenchuan earthquake-induced landslide susceptibility evaluation [J]. Journal of Engineering Geology, 2010(1): 15-26.
- [12] 李永红, 向茂西, 贺卫中, 等. 陕西汉中汉台区地质灾害易发性和危险性分区评价[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2014, 25(3): 107-113.
- LI Yonghong, XIANG Maoxi, HE Weizhong, et al. Assessment of the susceptible degree and degree of risk of geological hazard in Hantai district of Shaanxi [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2014, 25(3): 107-113.
- [13] 耿金花, 高齐圣, 张嗣瀛. 基于层次分析法和因子分析的社区满意度评价体系[J]. 系统管理学报, 2007, 16(6): 673-677.
- GENG Jinhua, GAO Qisheng, ZHANG Siying. Community satisfaction evaluation system's research based on AHP and factor analysis [J]. Journal of Systems & Management, 2007, 16(6): 673-677.
- [14] 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(S2): 3978-3985.
- XU Chong, DAI Fuchu, YAO Xin, et al. GIS-based landslide susceptibility assessment using analytical hierarchy process in Wenchuan earthquake region [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009(S2): 3978-3985.
- [15] Ulrich Kamp, Benjamin J. Growley, Ghazanfar A. Khattak, et al. GIS-based landslide susceptibility mapping for the 2005 Kashmir earthquake region [J]. Geomorphology, 2008, 101(4): 631-642.
- [16] Christian Conoscenti, Cipriano Di Maggio, Edoardo Rotigliano. GIS analysis to assess landslide susceptibility in a fluvial basin of NW sicily (Italy) [J]. Geomorphology, 2008, 94(3-4): 325-339.
- [17] J. L. Zêzere, R. A. C. Garcia, S. C. Oliveira, et al. Probabilistic landslide risk analysis considering direct costs in the area north of Lisbon (Portugal) [J]. Geomorphology, 2008, 94(3-4): 467-495.