

杜国梁, 张永双, 吕文明, 等. 基于加权信息量模型的藏东南地区滑坡易发性评价[J]. 灾害学, 2016, 31(2): 226-234.
[Du Guoliang, Zhang Yongshuang, Lv Wenming, et al. Landslide Susceptibility Assessment Based on Weighted Information Value Model in Southeast Tibet[J]. Journal of Catastrophology, 2016, 31(2): 226-234.]

基于加权信息量模型的藏东南地区滑坡易发性评价*

杜国梁¹, 张永双^{1,2}, 吕文明³, 张广泽⁴, 周成灿³, 郭长宝^{1,2}

(1. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081;

2. 国土资源部新构造与地质灾害重点实验室, 北京 100081; 3. 西藏地质环境监测总站, 西藏 拉萨 830000;

4. 中铁二院成都地勘岩土工程有限公司, 四川 成都 610031)

摘要: 藏东南地区位于青藏高原中东部, 地形和地质构造都极为复杂, 是我国地质灾害发育最为严重的地区之一。在区域地质灾害调查和相关因素分析的基础上, 对藏东南地区滑坡发育特征进行了分析。滑坡影响因素相关性分析结果表明: 研究区内滑坡多发育于较坚硬—较软弱层状砂板岩、粉砂岩、泥岩、页岩岩组, 较硬层状砂岩、灰岩岩组, 松散堆积物岩组内, 以及地形坡度大于 45° , 高程2 500~4 000 m区域内; 滑坡发育密度受断裂影响大, 随着断裂密度的增大, 其与河流、道路距离的减小而增大。根据上述分析结果, 综合选取地层岩性、坡度、坡向、地面高程、断裂密度、河流和公路7个因素作为评价因子, 采用基于GIS的加权信息量评价模型对研究区滑坡易发性进行评价, 并将研究区划分为极高易发、高易发、中易发、低易发和不易发等五个等级, 通过成功率曲线(AUC)方法检验, 评价结果具有较高的准确性。其中, 极高易发区主要沿嘉黎断裂、怒江断裂和澜沧江断裂等区域大型活动断裂带和主干河流两侧分布; 高易发区主要分布在主干河流两侧极高易发区边界向两侧扩展的区域; 中易发区主要位于大江、大河及深切峡谷的支流两岸, 及断裂密度相对较大的区域; 低易发区主要在水系发育程度较低、断裂密度较小的区域分布; 不易发区主要分布在断裂不发育、人类工程活动微弱的高山地带以及地形相对平缓的区域。此评价结果对藏东南地区滑坡发育特征和重大滑坡灾害防治规划具有重要的指导作用。

关键词: 藏东南; GIS; 加权信息量法; 滑坡; 易发性

中图分类号: P649; X43 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2016)02-0226-09

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2016.02.042

藏东南地区地处印度板块与欧亚板块碰撞带附近, 新构造活动强烈, 地质环境条件复杂, 是我国崩塌、滑坡和泥石流等地质灾害发育最为严重的地区之一^[1-4]。其中典型滑坡, 如川藏公路102道班滑坡1991年大规模滑动时, 滑坡体积达 $510 \times 10^4 \text{ m}^3$, 其前缘伸进帕隆藏布河床, 直达对岸, 之后每年均发生多次滑动, 停车断道时有发生^[5]; 发生于2000年的西藏波密札木弄沟易贡滑坡, 最大滑动距离达6.7~7.0 km, 滑坡体积超过 $3 \times 10^8 \text{ m}^3$, 滑坡堆积体造成易贡藏布堰塞, 之后发生溃决, 造成雅鲁藏布江大峡谷下游的印度20座桥梁荡然无存, 5000多人无家可归^[6], 等等。然

而由于藏东南地区因受高海拔、交通条件差、人烟稀少等因素的制约, 对该地区地质灾害的调查研究相对还比较少, 研究程度低, 尤其是对于区域性地质灾害发育分布规律和易发性评价工作十分欠缺。近年来, 随着该区滇藏铁路、川藏铁路、大江大河水电开发等工程的相继规划建设, 对该区域地质灾害发育特征和地质灾害易发性特征的需求也更加紧迫。因此, 本文在资料收集、区域地质灾害调查和相关因素分析的基础上, 采取加权信息量评价模型, 对藏东南地区滑坡灾害开展易发性评价研究, 旨在为该地区的重大工程规划建设和地质灾害防治规划提供参考。

* 收稿日期: 2015-03-16 修回日期: 2015-09-28

基金项目: 国家科技基础性工作专项课题(2011FY110100-2); “十二五”国家科技支撑课题(2011BAK12B09); 中国地质调查局项目(12120113038000); 中铁二院科研计划(二院科字201303); 国家自然科学基金项目(41402321)

作者简介: 杜国梁(1989-), 男, 山西运城人, 博士研究生, 研究方向为工程地质与地质灾害. E-mail: 756591925@qq.com

1 地质背景

1.1 自然地理

研究区位于西藏东南部, 横跨林芝、昌都两个行政区, 属于温带湿润与半湿润高原气候, 日照多、辐射强烈、积温少、气温随高度和纬度的升高而降低, 昼夜温差大。研究区地势总体上中部和西北部高, 向西南部和东部有减缓的趋势, 平均海拔约 4 000 m。区内河流水系密集, 地表水资源丰富, 大型区域型河流主要有雅鲁藏布江、怒江、澜沧江、金沙江和帕隆藏布江等(图 1)。

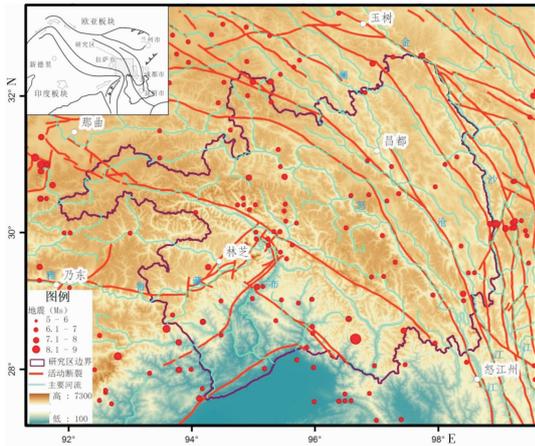


图 1 研究区地质背景图

1.2 地质构造

研究区位于青藏高原东构造结东北部, 地质背景复杂、构造活动强烈, 区域性断裂主要有嘉黎断裂、雅鲁藏布江断裂、怒江断裂、澜沧江断裂等, 控制着研究区的地形地貌演化、斜坡结构及地层岩性的完整性。研究区地层岩性比较复杂, 自元古宇至第四系均有出露, 以砂砾岩、砂板岩、砂泥岩、砂页岩、片岩、变粒岩、片麻岩、灰岩、大理岩及酸性 - 中酸性、基性 - 中基性火山岩为主。

2 藏东南地区滑坡数据库

对于滑坡区域易发性评价来说, 地质灾害数据的建立是主要工作之一, 也是评价结果的最重要的依据。本次工作, 收集了研究区已开展的 1: 5 万、1: 10 万县、市地质灾害调查与区划报告, 并对重要地区开展了野外地质灾害调查, 在 ArcGIS 软件平台上建立了滑坡灾害数据库。藏东南地区共发育有滑坡 1 662 处(图 2), 滑坡的发育与地形地貌、地质构造、岩土体类型等因素密切相关, 而强降雨、地震、人类工程活动是滑坡的直接诱发因素。统计分析表明, 研究区滑坡在空间展布上具有一定的规律性: 主要沿大江、大河、深切峡谷两岸成条带状展布(图 2, 图 3); 且谷坡愈

陡, 越有利于滑坡的发生; 在断裂构造带密集发育的地区, 滑坡灾害易密集发育; 此外, 由于人类工程活动对自然边坡的改造破坏, 沿公路两侧的区域也是滑坡的易发区(图 3, 图 4)。

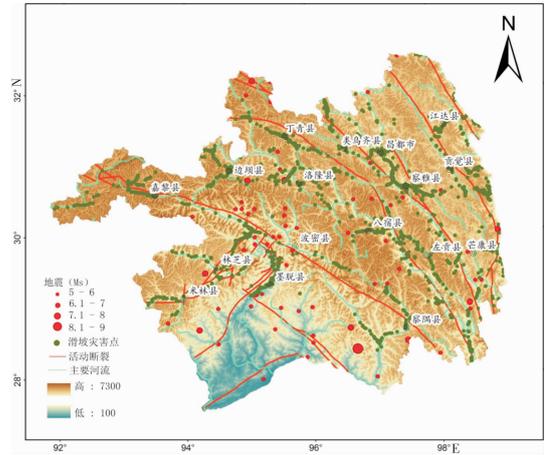


图 2 研究区滑坡分布图



图 3 察雅县吉塘镇如给村澜沧江左岸滑坡(镜向 E)



图 4 八宿县东巴村八宿电站滑坡(镜向 NE)

3 基于加权信息量滑坡易发性评价方法

地质灾害易发性评价是在地质灾害编目的基础上, 分析评价各影响因子在组合条件下地质灾害发生的可能性, 是进行地质灾害危险性、风险评价以及风险管理的基础^[7]。地质灾害易发性评

价常用的评价模型主要有：层次分析法、人工神经网络、逻辑回归、证据权、信息量模型、模糊判别、复合模型等^[8-11]。其中，信息量模型是统计分析模型的一种，由于其物理意义明确、操作简单，在滑坡易发性评价研究和实践中得到了广泛的应用。但是信息量模型的统计分析属于“暗箱”操作，它只反映了因子特定类别在组合情况下对灾害发生的影响，并未充分考虑各因子对滑坡灾害发生影响程度的差异^[12]。为此，本文对各因子的相对重要性进行人为干预，引入了专家经验，采用层次分析法加权的的信息量评价模型。

3.1 信息量法

信息量法是 1948 年由美国数学家、信息论的创始人 Shannon 在题为在“通讯的数学理论”的论文中提出，并应用概率论知识和逻辑方法推导出了信息量的计算公式。20 世纪 80 年代，晏同珍教授首次将信息论引入到滑坡灾害预测研究中，后来被专家学者广泛应用到灾害评价领域^[13]。信息预测的观点认为，滑坡灾害产生与否是与预测过程中所获取的信息的数量和质量有关，是用信息量大小来衡量的。信息量越大，表明越有利于灾害的发生^[14]，各因素信息量可用下式表示：

$$I(x_i, H) = \ln \frac{S_i/A_i}{S/A} \quad (1)$$

式中： $I(x_i, H)$ 为因素 x_i 对滑坡发生所提供的信息量； S_i 为分布在包含影响因素 x_i 的已发生的滑坡个数； A_i 为影响因素 x_i 所占单元面积。

3.2 层次分析法

层次分析法是一种多目标决策分析的方法。该方法把复杂的决策思维系统划分为多个目标或准则，并在决策过程中把主观因素和客观因素有机地结合起来。通过建立判断矩阵、排序计算和一致性检验，使得到的最后结果非常具有说服力。同时，由于层次分析法可将人们主观性的依据用数量的形式表达出来，避免由于人的主观性导致权重预测与实际情况相矛盾的现象，使得决策更具条理性和科学性。经过多年的研究和应用实践，不少研究者开始将 GIS 技术与 AHP 方法相结合，大大提高了传统的 AHP 方法在地学研究中的应用效果^[15-16]。

3.3 加权信息量模型

为充分考虑不同影响因素对滑坡灾害发生影响程度的差异，采用层次分析法对信息量值进行赋权，其表达式如下：

$$I = \sum_{i=1}^n w_i I_i = \sum_{i=1}^n w_i \ln \frac{S_i/A_i}{S/A} \quad (2)$$

式中： I 为评价区某单元的信息量； w_i 为第 i 个因子的权重值； I_i 为第 i 个评价因子特定类别提供的信息量； S_i 为包含第 i 个因子特定类别的滑坡个数， A_i 为第 i 个因子特定类别所占单元的面积； S 为评价区滑坡的总个数； A 为评价区的总面积。

4 评价因子分析

滑坡的发生是一个复杂过程，受多种因素的影响。本文根据研究区滑坡发育特征以及前人的研究成果梳理和分析，选取了地层岩性、坡度、坡向、高程、断裂密度、河流、公路 7 个因素作为评价因子，并在 ArcGIS 平台上制作了各因子的栅格图层，采用网格大小为 30 m × 30 m，共划分出 244 327 594 个网格。在此基础上，基于层次分析法确定各因子的权重，进一步计算加权信息量值，并利用加权信息量值对各评价因子的敏感程度进行了分析。

4.1 权重的计算

应用层次分析法对所选取的 7 个评价指标进行分析，划分相互联系的有序层次，建立评价模型层次结构。按照各评价因子之间的内在关系，评价采用通用的 1~9 标度方法，对各因子进行两两比较建立判断矩阵，进行层次排序，确定各因子的权重值，并进行一致性检验。计算得到矩阵的最大特征值为 7.24，进行归一化处理得到各影响因子的权重为 {0.22, 0.19, 0.07, 0.05, 0.25, 0.12, 0.10}。一致性指标 CI 值为 0.04，一致性比例值 CR 为 0.03，小于 0.1，表明层次排序结果具有较满意的一致性。层次排序结果见表 1。

表 1 UU 因子层次排序结果一览表

评价因子	地层岩性	坡度	坡向	高程	断裂密度	河流	公路
地层岩性	1	2	3	3	1/2	2	3
坡度	1/2	1	3	3	1	2	2
坡向	1/3	1/3	1	2	1/4	1/2	1/2
高程	1/3	1/3	1/2	1	1/4	1/2	1/2
断裂密度	2	1	4	4	1	2	2
河流	1/2	1/2	2	2	1/2	1	2
公路	1/3	1/2	2	2	1/2	1/2	1
权重	0.22	0.19	0.07	0.05	0.25	0.12	0.10

4.2 评价因子敏感性分析

本文采用信息量法对藏东南地区滑坡影响因子进行敏感性分析。通过对各个评级因子进行分类，并计算各类的信息量值，信息量值越大，表明滑坡发生的概率越大，确定了各滑坡影响因子中有利利于滑坡发生的分类区间(表 2)。

(1) 地层岩性

地层岩性是地质灾害发生的物质基础。根据岩土体的软硬程度将研究区的地层岩性划分为五类岩组：(1) 较坚硬—较软弱层状砂板岩、粉砂岩、泥岩、页岩岩组；(2) 较坚硬层状、硬块状片岩、片麻岩、混合岩岩组；(3) 坚硬—较坚硬块状侵入岩岩组；(4) 较硬层状砂岩、灰岩岩组；(5) 松散堆积物岩组(图 5a)。对各岩组的加权信息量

值进行计算(表2), 得到: 在较坚硬—较软弱层状砂板岩、粉砂岩、泥岩、页岩岩组, 较硬层状砂岩、灰岩岩组, 松散堆积物岩组岩组中滑坡发生的可能性最大(图6a)。

表2 滑坡影响因子加权信息量一览表

影响因子	因子子集	滑坡个数/个	栅格数量	面积/km ²	信息量	权重	加权信息量	排序
工程地质岩组	(1)较坚硬—较软弱层状砂板岩、粉砂岩、泥岩、页岩岩组	829	101979767	91781.79	0.257	0.22	0.057	3
	(2)较坚硬层状、硬块状片岩、片麻岩、混合岩岩组	267	47037011	42333.31	-0.261		-0.057	4
	(3)坚硬—较坚硬块状侵入岩岩组	163	46114200	41502.78	-0.944		-0.208	5
	(4)较硬层状砂岩、灰岩岩组	306	31340444	28206.4	0.521		0.115	1
	(5)松散堆积物岩组	97	10284622	9256.16	0.471		0.104	2
坡度	<10°	18	36291489	32662.34	-3.404	0.19	-0.647	5
	10°~30°	167	128729422	115856.48	-2.017		-0.383	4
	30°~45°	327	70491033	63441.93	-0.179		-0.034	3
	45°~60°	367	8241711	7417.54	3.084		0.586	2
	>60°	404	573933	516.54	7.067		1.343	1
坡向	北	116	29479956	26531.96	-0.409	0.07	-0.029	8
	东北	217	33219167	29897.25	0.315		0.022	1
	东	183	32005967	28805.37	0.123		0.009	3
	东南	137	28874467	25987.02	-0.146		-0.01	6
	南	177	29030700	26127.63	0.215		0.015	2
	西南	163	32762778	29486.5	-0.078		-0.005	5
	西	173	30688422	27619.58	0.102		0.007	4
	西北	117	28266133	25439.52	-0.343		-0.024	7
高程	<2500m	208	26473633	23826.27	0.208	0.05	0.01	4
	2500~3000m	146	10361500	9325.35	1.051		0.053	3
	3000~3500m	396	16465222	14818.7	1.822		0.091	1
	3500~4000m	504	30827811	27745.03	1.265		0.063	2
	4000~5000m	402	125850956	113265.86	-1.091		-0.055	5
	>5000m	6	34348478	30913.63	-5.283		-0.264	6
断裂密度	<0.02km/km ²	106	51251033	46125.93	-1.718	0.25	-0.429	6
	0.02~0.05km/km ²	67	27819733	25037.76	-1.498		-0.374	5
	0.05~0.1km/km ²	364	61872789	55685.51	-0.209		-0.052	4
	0.1~0.15km/km ²	365	40964789	36868.31	0.389		0.097	3
	0.15~0.2km/km ²	344	29236156	26312.54	0.791		0.198	2
	>0.2km/km ²	416	33183044	29864.74	0.882		0.221	1
与河流的距离	0~200m	365	3592222	3233	3.901	0.12	0.468	1
	200~400m	235	3587889	3229.1	3.267		0.392	2
	400~600m	154	3551667	3196.5	2.672		0.321	3
	600~800m	70	3532222	3179	1.543		0.185	4
	>800m	838	230063556	207057.2	-0.901		-0.108	5
与公路的距离	0~200m	259	7283222	6554.9	2.386	0.1	0.239	1
	200~400m	254	7258444	6532.6	2.363		0.236	2
	400~1000m	658	21209556	19088.6	2.189		0.219	3
	>1000m	491	208576333	187718.7	-1.531		-0.153	4

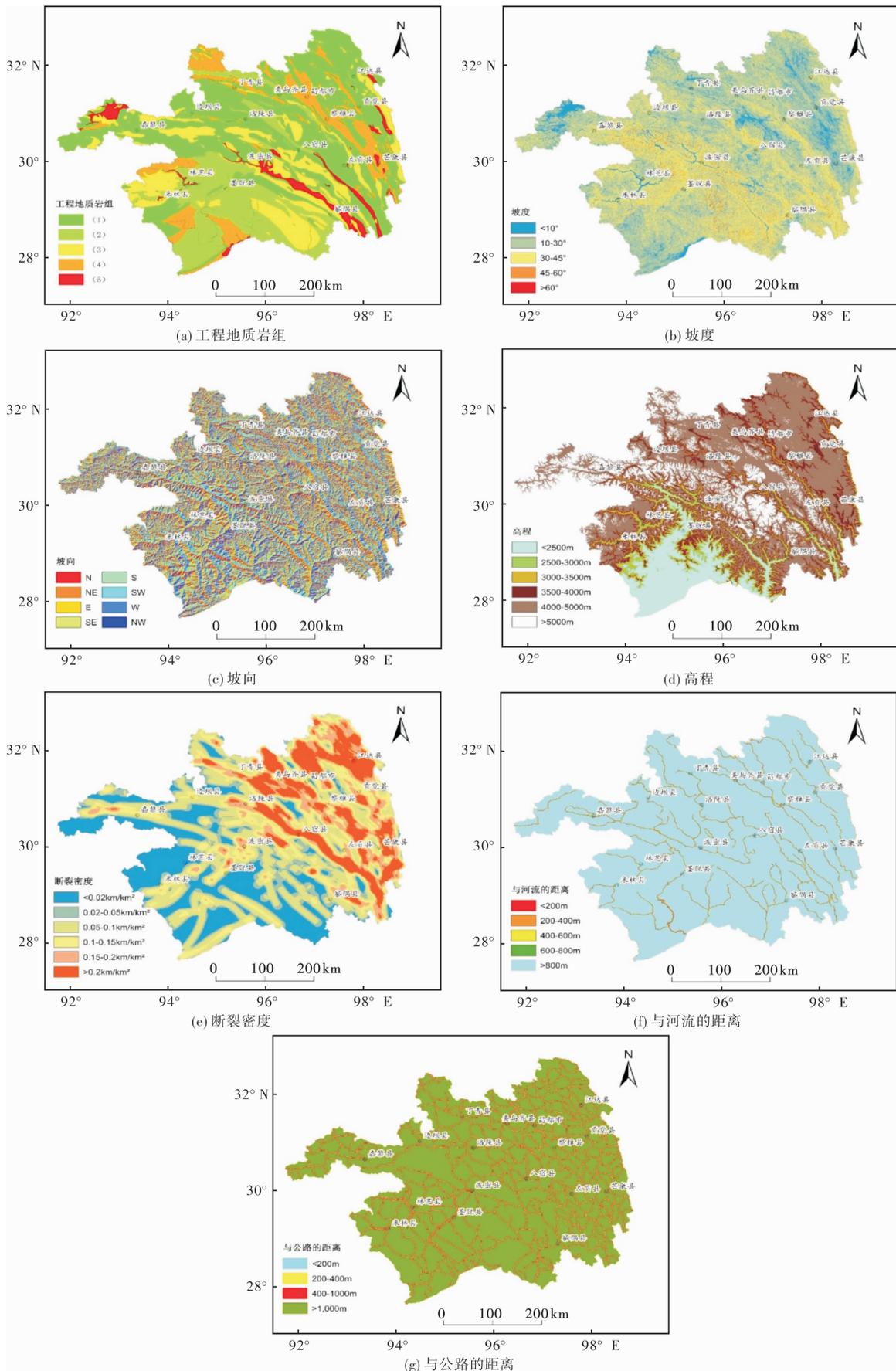


图5 滑坡影响因子分级图

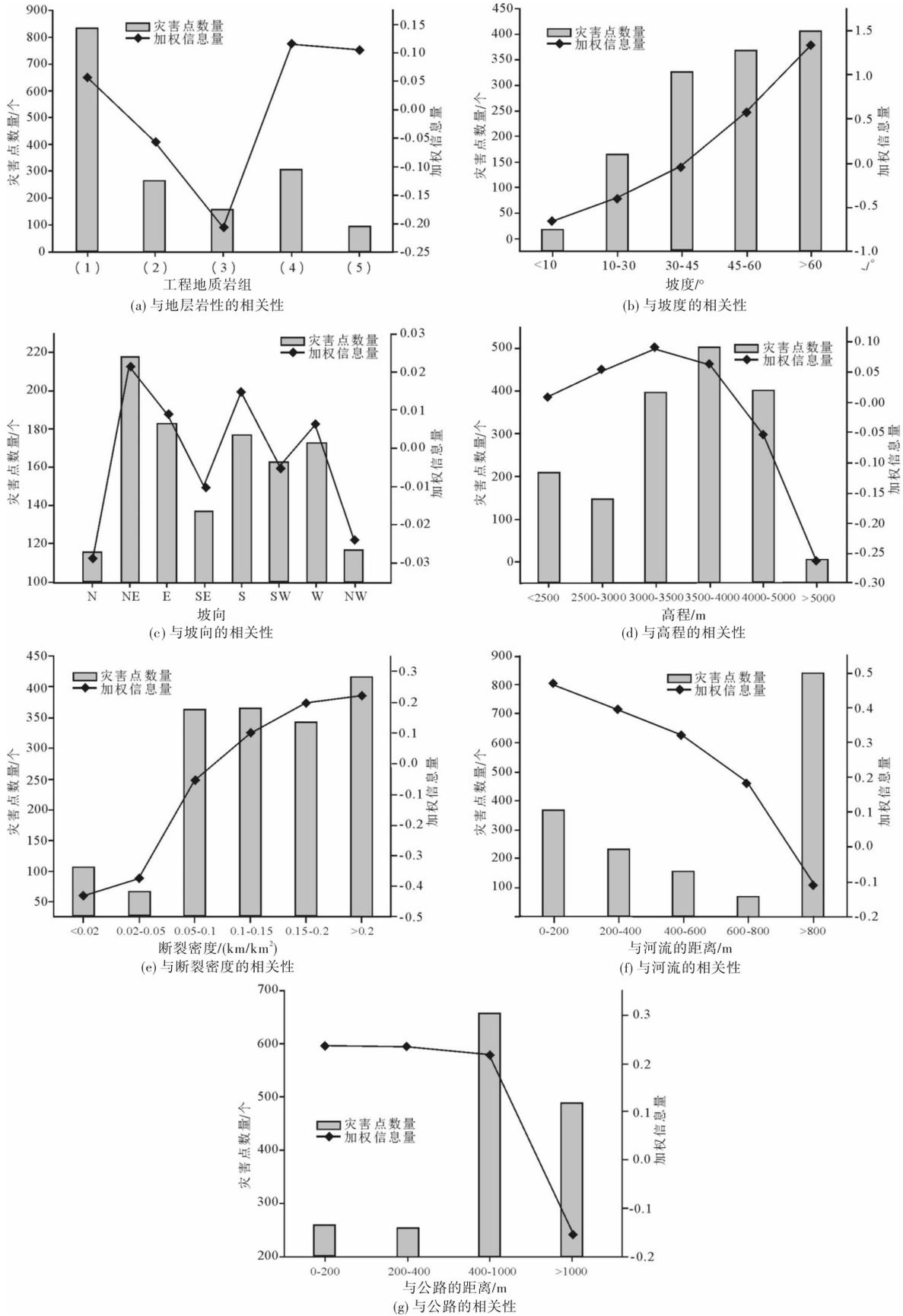


图6 影响因素灾害数量、加权信息量相关性统计图

(2) 坡度
坡度对滑坡的发生具有明显的控制作用, 坡

度不仅决定山体斜坡的应力分布特征, 而且还影响着地表径流、坡体松散物质的堆积, 从而对滑

坡灾害的发生产生直接影响。本文将坡度划分为： $<10^\circ$ ， $10^\circ \sim 30^\circ$ ， $30^\circ \sim 45^\circ$ ， $45^\circ \sim 60^\circ$ ， $>60^\circ$ 五个等级，坡度分级见图 5b。对子集的加权信息量进行计算，坡度加权信息量值一览表见表 2，分析计算结果表明：随着坡度的增大，研究区滑坡灾害发生的概率增加，两者呈正相关关系(图 6b)。

(3) 坡向

不同坡向的太阳辐射强度不同，进而影响了坡面的水分蒸发，风化程度和植被覆盖度。此外，在地震诱发滑坡方面，因为地震波和地面运动的强度具有显著的方向性，黄润秋等认为在垂直发震断裂方向最强，崩滑灾害滑动的优势方向与发震断裂的空间展布方向基本垂直^[17]。通过对不同坡向的加权信息量值进行分析可知(表 2)，研究区在坡向为东北、东、南、西方向易发生崩滑灾害，与 NW—SE 方向成正交或斜交(图 6c)。

(4) 高程

高程与植被类型、植被覆盖率、岩土体的含水率、人类工程活动以及降雨都具有一定的相关性，从而对滑坡灾害的分布产生着影响。本次评价将研究区高程划分为 $<2\ 500\text{ m}$ ， $2\ 500 \sim 3\ 000\text{ m}$ ， $3\ 000 \sim 3\ 500\text{ m}$ ， $3\ 500 \sim 4\ 000\text{ m}$ ， $4\ 000 \sim 5\ 000\text{ m}$ 和 $>5\ 000\text{ m}$ 六个等级(图 5d)。对各分区的加权信息量值进行计算得知，高程在 $2\ 500 \sim 4\ 000\text{ m}$ 范围最易发生滑坡灾害，此高程范围主要为集水区域，地表径流强烈，有利于滑坡发生(图 6d)。

(5) 断裂密度

断裂密度是指单位面积内断裂的长度。地球表面的断层破裂是地球深部地应力的表现，与地震的发生有着直接的关系^[18]，断裂密度反映了深大断裂的分布，崩滑灾害受深大断裂的控制^[19]。此外，断裂密度也反应了区域地表的破碎程度。研究区发育有澜沧江断裂、怒江断裂、八宿断裂、嘉黎断裂等大型活动断裂带，断裂走向主要为 NW—SE 方向，本文以 10 km 为半径绘制了断裂密度图，并将断裂密度划分为 $<0.02\text{ km/km}^2$ ， $0.02 \sim 0.05\text{ km/km}^2$ ， $0.05 \sim 0.1\text{ km/km}^2$ ， $0.1 \sim 0.15\text{ km/km}^2$ ， $0.15 \sim 0.2\text{ km/km}^2$ ， $>0.2\text{ km/km}^2$ 六个区段(图 5e)。各区段的断裂密度加权信息量值见表 2，分析表明，随着断裂密度的增大，加权信息量值增大，两者呈正相关关系(图 6e)。

(6) 河流

河流对斜坡体坡脚的浸润、冲刷、淘蚀也加速了斜坡体的变形破坏，从而导致区内地质灾害发生。地表水系愈发育，地表切割愈强，孟晖等(2004)认为，晚第四纪时期青藏高原的快速隆升主导了河谷的深切作用，成为青藏高原东缘地质灾害发生与分布的主要内动力控制因素^[20]。本次评价以 200 m 为间距对河流进行缓冲，缓冲为： $<200\text{ m}$ ， $200 \sim 400\text{ m}$ ， $400 \sim 600\text{ m}$ ， $600 \sim 800\text{ m}$ ，

$>800\text{ m}$ 五个缓冲区。研究区水系缓冲分区见图 5f。对各缓冲区的加权信息量进行计算可知，滑坡的发生随着与水系的距离的增加而减小，两者呈负相关关系(图 6f)。

(7) 公路

距离公路越近人类工程活动相对较频繁，此外，公路工程中不可避免的会出现削坡、坡顶加载的工程施工，这些工程常常会改变斜坡的自然地貌，干扰和改变了地质环境原有的特征和规律，破坏了斜坡的结构，在削坡处很可能会出现崩滑灾害。本文将公路缓冲为： $<200\text{ m}$ ， $200 \sim 400\text{ m}$ ， $400 \sim 1\ 000\text{ m}$ ， $>1\ 000\text{ m}$ 四个缓冲区(图 5g)。对道路各缓冲带的加权信息量进行计算，其计算结果见表 2。计算结果表明：距离主要公路 1000 m 范围内人类工程活动比较频繁，崩塌滑坡发生的可能性大(图 6g)。

5 评价结果及检验

5.1 滑坡区域易发性评价结果

根据各影响因子的加权信息量计算结果，对影响因子的栅格图层进行重分类，生成各影响因子的加权信息量栅格图层。利用 ArcGIS 软件的空间分析功能完成各影响因子进行加权信息量的叠加，并对叠加图层按照自然断点法进行分级，划分为极高易发区、高易发区、中易发区、低易发区和不易发区 5 个等级(图 7)。

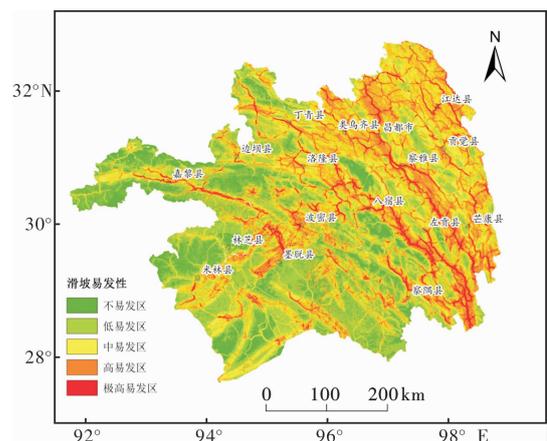


图 7 藏东南地区滑坡易发性分区图

5.2 结果检验

ROC 曲线即受试者工作特征曲线，曲线下方面积(AUC)被用来评价模型的精度，在医学诊断试验评价中应用较多，近些年在地质灾害易发性评价结果检验中也取得了广泛应用。一般认为：在 $AUC > 0.5$ 的情况下，AUC 越接近 1，说明模型的精度越好，AUC 为 $0.5 \sim 0.7$ 时，准确性较差，AUC 为 $0.7 \sim 0.9$ 时具有较好的确定性，AUC 为 0.9 以上，说明准确性极好。因此，本文利用滑坡易

表 3 易发性分区统计表

易发分区	栅格总数	面积/ km ²	面积百分比/ %	灾害点个数/ 个	点密度/(个/ km ²)
不易发区	42783481	38505.13	17.59	18	0.0005
低易发区	76202532	68582.28	31.33	133	0.0019
中易发区	73585260	66226.73	30.25	349	0.0053
高易发区	38801110	34921.00	15.95	547	0.0157
极高易发区	11883539	10695.19	4.89	615	0.0575

发性成功率曲线对评价结果的有效性进行检验^[21-22]。以加权信息量的从高到底的累计面积百分比为横轴, 滑坡数量的累计百分比为纵轴, 绘制滑坡易发性成功率曲线(图 8)。曲线下的面积为 82.3%, 说明该评价模型的正确率为 82.3% (AUC 值), 表明了整套评价方法适合于研究区滑坡灾害的易发性评价。

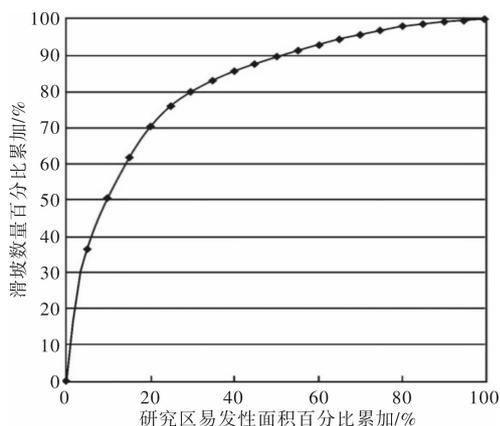


图 8 区域滑坡易发性评价结果 ROC 曲线图

5.3 评价结果分析

对研究区易发性分区结果与灾害点数量、灾害点密度的关系进行分类统计并分析(表 3), 得到: 研究区滑坡极高易发区的面积 10 695.19 km², 占研究区总面积的 4.89%, 极高易发区主要沿区域性活动断裂带和主干河流两侧分布; 在高程上, 该区域主要位于集水高程区, 地表径流强烈, 人类工程活动频繁。滑坡高易发区面积为 34 921.00 km², 占研究区总面积的 15.95%, 主要沿着怒江、澜沧江、雅鲁藏布江等主干河流两侧极高易发区的边界向两侧扩展。中易发区面积 66 226.73 km², 占研究区总面积的 30.25%, 主要分布在大江、大河及深切峡谷的支流两岸, 以及断裂密度相对较大的区域。低易发区面积 68 582.28 km², 占研究区总面积的 31.33%, 主要在水系发育程度较低、断裂密度较小的区域分布。不易发区面积 38 505.13 km², 占研究区总面积的 17.59%, 主要分布在断裂不发育、人类工程活动微弱的高山地带以及地形相对平缓的区域。此外, 研究区随着易发性的增高, 滑坡灾害点数量、点密度随之快速增大, 呈正相关关系(图 9)。

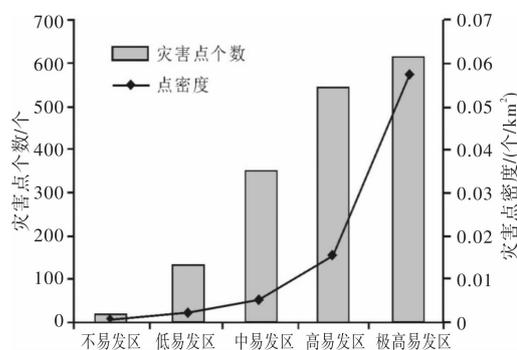


图 9 易发区滑坡数量、密度趋势图

5 结论

本文以藏东南地区滑坡灾害发育特征和易发性为研究对象, 选取地层岩性、坡度、坡向、高程、断裂密度、河流、公路 7 个因素作为评价因子, 采用基于 GIS 的加权信息量评价模型对研究的滑坡进行易发性评价。

(1) 对各因子的加权信息量值分析表明: 研究区内滑坡多发育于较坚硬—较软弱层状砂板岩、粉砂岩、泥岩、页岩岩组, 较硬层状砂岩、灰岩岩组, 松散堆积物岩组等区域内, 以及地形坡度大于 45°, 或者 2 500 ~ 4 000 m 高程区域内; 滑坡发育密度和概率受断裂影响大, 随着断裂密度的增大, 与河流、公路距离的减小而增大。

(2) 评价结果将研究区划分为极高易发、高易发、中易发、低易发和不易发五个等级。其中, 极高易发区主要沿区域性活动断裂带和主干河流两侧分布; 高易发区主要分布在主干河流两侧极高易发区边界向两侧扩展的区域; 中易发区主要位于大江、大河及深切峡谷的支流两岸, 及断裂密度相对较大的区域; 低易发区主要在水系发育程度较低、断裂密度较小的区域分布; 不易发区主要分布在断裂不发育、人类工程活动微弱的高山地带以及地形相对平缓的区域。

(3) 评价结果经检验, 本次区域滑坡易发性评价结果的成功率(AUC)值达 82.3%, 具有较高的准确性, 评价结果对藏东南地区滑坡灾害防治规划具有一定的指导意义。

致谢 中国地质科学院地质力学研究所汪西海教授级高工参加了部分野外地质调查工作, 感谢中国地质科学院地质力学研究所姚鑫副研究员、

杨志华博士对本文给予的指导, 审稿专家对本文提出了许多建设性的修改意见, 在此一并表示感谢。

参考文献:

- [1] 杨志法, 尚彦军, 张路青, 等. 川藏公路地质灾害及其防治对策研究—以八宿至林芝路段为例[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [2] 张永双, 胡道功, 吴中海, 等. 滇藏铁路沿线地壳稳定性及重大工程地质问题[M]. 北京: 地质出版社, 2009.
- [3] 王培清, 徐国涛, 何强. 西藏藏东南地区典型地质灾害成因及防治技术浅析[J]. 西藏大学学报: 自然科学版, 2013, 28(1): 16-20
- [4] 郭佳宁, 山克强, 程捷. 藏东南地区滑坡发育规律分析[J]. 资源与产业, 2009, 11(2): 132-139.
- [5] 廖秋林, 李晓, 李守定, 等. 水岩作用对川藏公路102滑坡形成与演化的影响[J]. 工程地质学报, 2003, 11(4): 390-395
- [6] Yin Y P, Xing A G. Aerodynamic modeling of the Yigong gigantic rock slide-debris avalanche, Tibet, China[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2012, 71(1): 149-160
- [7] 邱海军. 区域滑坡崩塌地质灾害特征分析及其易发性和危险性评价研究—以宁强县为例[D]. 西安: 西北大学, 2012.
- [8] 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(Supp. 2): 3978-3985
- [9] 兰恒星, 伍法权, 王思敬. 基于GIS的滑坡CF多元回归模型及其应用[J]. 山地学报, 2002, 20(6): 732-737.
- [10] YESILNACAR E, TOPAL T. Landslide susceptibility mapping: a comparison of logistic regression and neural networks methods in a medium scale study, Hendek region (Turkey) [J]. Engineering Geology, 2005, 79(3/4): 251-266.
- [11] 范强, 巨能攀, 向喜琼, 等. 证据权法在滑坡易发性分区中的应用—以贵州桐梓河流域为例[J]. 灾害学, 2015, 3(1): 124-130.
- [12] 范林峰, 胡瑞林, 曾逢春, 等. 加权信息量模型在滑坡易发性评价中的应用—以湖北省恩施市为例[J]. 工程地质学报, 2012, 20(4): 508-513.
- [13] 张俊峰, 何政伟, 汪宙峰. 基于GIS的信息量法在天山公路地质稳定性评价系统中的应用[J]. 测绘科学, 2008, 33(2): 279-284.
- [14] 殷坤龙, 朱良峰. 滑坡灾害空间区划及GIS应用研究[J]. 地学前缘, 2001, 8(2): 170-171, 179.
- [15] 石菊松, 张永双, 董诚, 等. 基于GIS技术的巴东新城区滑坡灾害危险性区划[J]. 地球学报, 2005, 26(3): 275-282.
- [16] 郭长宝, 张永双, 蒋良文, 等. 基于GIS的滇藏铁路丽江—香格里拉段工程地质条件分区研究[J]. 现代地质, 2009, 23(3): 545-552.
- [17] 黄润秋, 李为乐. 汶川大地震触发地质灾害的断层效应分析[J]. 工程地质学报, 2009, 17(1): 19-28
- [18] 刘峰. 基于GIS技术的断层地震性分析—以南北地震带与中央造山带交汇地区为例[D]. 北京: 中国地震局地质研究所, 2010.
- [19] 李剑锋, 陈建平, 孙岩. 基于GIS异常信息提取的地震灾害分析[J]. 地质通报, 2011, 30(5): 756-765.
- [20] 孟晖, 张岳桥, 杨农. 青藏高原东缘中段地质灾害空间分布特征分析[J]. 中国地质, 2004, 31(2): 218-224.
- [21] Evangelin Ramani Sujatha I, G Victor Rajamanickam, P Kumaravel. Landslide susceptibility analysis using Probabilistic Certainty Factor Approach: A case study on Tevankarai stream watershed, India[J]. Indian Academy of Sciences. 2012, 121(5): 1337-1350.
- [22] Kamp U, Growley B. J., Khattak G. A., et al. GIS-based landslide susceptibility for the 2005 Kashmir earthquake region [J]. Geomorphology. 2008, 101(4): 631-642.

Landslide Susceptibility Assessment Based on Weighted Information Value Model in Southeast Tibet

Du Guoliang¹, Zhang Yongshuang^{1,2}, Lv Wenming³,
Zhang Guangze⁴, Zhou Chengcan³ and Guo Changbao^{1,2}

- (1. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China;
2. Key Laboratory of Neotectonic Movement and Geohazard, Ministry of Land and Resources, Beijing 100081, China;
3. Tibet Institute of Geological Environment Monitoring, Lhasa 830000, China;
4. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

Abstract: Southeast Tibet located in the east-central Tibetan plateau where the topography and geological structures is complex. The region is one of the areas seriously suffered from landslide disasters in China. Based on the geological disaster investigation and the correlative factors analysis, it is concluded that landslides generally occur at soft-hard layer of sandy slate, phyllite, mudstone, slate; hard layer of sandstone, limestone and loose sediments. The areas which slope gradient slope are greater than 45° and the elevation range from 2500m to 4000m also occur landslides frequently. And the landslides density is greatly influenced by fault. With the increase of fault density and decrease of distance to drainages and roads, the landslide occurrence is increasing. According to above analysis, seven typical factors are selected as evaluation factors including the formation lithology, slope, slope direction, elevation, fracture densities, drainages and roads. The evaluation model based on weighted information value is established to analyze landslide susceptibility in Southeast Tibet. The resulting susceptibility map showed five classes of landslide susceptibility, i. e. extremely high, high, moderate, low, stability. The extremely high grade areas are mainly distributed along the both side of active faults and major rivers. The high grade areas expand along the both side of extremely high grade areas border. The moderate grade areas are mostly along the tributaries of the great rivers and deep-cutting valleys, as well as the areas with relatively high fracture densities. The low grade areas have relatively low fracture densities, and there are no great rivers pass through. The stability areas are primarily distribute in the areas where is lack of faults and high mountain areas where human engineering activity is weak, as well as areas where is relatively flat. By examination, the evaluation result has high accuracy. It provides a reference for learning the development characters of the landslide and disaster prevention plan in southeast Tibet.

Key words: Southeast Tibet; GIS; weighted information value; landslide; susceptibility