某拟建高速公路地质灾害易发性评价

谈树成[1,2]，刘雪斌[1]，谢亚亚[1]，杨林[1]，赵志芳[1]

(1. 云南大学 资源环境与地球科学学院，昆明 650091；2. 云南省地理研究所高原山地灾害与环境研究中心，昆明 650223)

摘　要：高原山地地区地质灾害多发频发，对重大建设项目安全危害极大，开展拟建高速公路区域地质灾害易发性评价研究，对后期线路选址及地质灾害防治具有重要的理论和实际意义。在分析现状地质灾害特征的基础上，从气象水文、地形地貌、岩土类型及构造、人类工程活动 4 个方面选取对地质灾害发育贡献程度较大的因子，基于 GIS 技术，结合层次分析法(AHP)和信息量法对拟建施甸至链子桥段高速公路进行地质灾害易发性评价，并将评价结果划分为高易发区、中易发区和低易发区。通过研究区已有地质灾害编目对评价结果进行验证，结果表明，AHP_信息量模型在拟建工程地质灾害易发性评价中可操作性强，评价结果可靠性高。

关键词：地质灾害；高速公路；易发性评价；AHP；信息量

中图分类号：P954　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1005-3409(2019)03-0373-08

Assessment on Susceptibility of Geohazard for a Proposed Expressway

TAN Shucheng[1,2], LIU Xuebin[1], XIE Yaya[1], YANG Lin[1], ZHAO Zhifang[1]

(1. *School of Resources Environment and Earth Science, Yunnan University, Kunming*, 650091, *China*;
2. *Tableland Mountain Hazards and Environment Research Center, Institute of Geography, Kunming* 650223, *China*)

Abstract: The frequent occurrence of geological disasters in the plateau and mountainous areas has caused great harm to the safety of important construction projects. Research on the susceptibility assessment of geological disasters on the proposed expressway has important theoretical and practical significance for the site selection and prevention of geological disasters in the later stag. Based on the analysis of the characteristics of current geological hazards, factors that contribute to the development of geological disasters were selected from four aspects: meteorological hydrology, topography, geotechnical type and structure, and human engineering activities. Based on GIS technology, combined with analytic hierarchy process (AHP) and information content model, we carried out the susceptibility assessment of geohazard for the proposed Shidian-Qingziqiao expressway. The assessment results were divided into high probable, mid-probable and low probable areas, the catalogues of existing geological disasters were used to verify the results, which indicates that the AHP_information model is highly operable in the assessment of the geological hazard susceptibility of the proposed project, and the reliability of the assessment result is high.

Keywords: geological disasters; expressway; susceptibility assessment; AHP; information content model

高速公路等重要工程建设项目在施工及营运期间易遭受地质灾害危害，开展拟建高速公路区域地质灾害易发性评价研究，对后期线路选址及地质灾害防治具有重要的理论和实际意义。地质灾害易发性评价，是指在查明研究区地质环境背景的基础上，回答该区哪儿更易于发生地质灾害这样一个空间概率问题，是地质灾害危险性评价和风险管理的基础[1-2]。常用的易发性评价方法有层次分析法、模糊综合评判法、信息量法、逻辑回归法、支持向量机和人工神经网络法等，这些方法前人已进行了大量研究，并取得了重大的成果[3-12]。但是，已有的研究其评价区域多以面状区域为主，且大部分采用单一的评价方法，涉及

收稿日期：2018-07-22　　**修回日期**：2018-08-12

资助项目：中国地质调查局“全国矿产资源开发环境遥感监测”项目(121201203000160009)；云南大学服务云南行动计划项目(2016ZD07)；第二批“云岭学者”人才培养项目(C6153001)；金沙江—嘉陵江流域新增矿山恢复治理面积遥感调查编号(DD2018980514)

第一作者：谈树成(1970—)，男，河南省信阳市光山县人，教授，博士，研究方向：地质灾害、环境地质及矿产资源评价研究。E-mail：shchtan@ynu.edu.cn

通信作者：刘雪斌(1993—)，男，云南大理人，硕士研究生，研究方向地质灾害、环境地质。E-mail：1281522312@qq.com

重要线状工程的组合评价模型较少。高速公路等线状工程具有延伸长、空间跨度大、影响范围广等特点，加之沿线地质灾害孕灾环境复杂、诱发因素多样，单一的评价方法难免显得力不从心。基于此，本文采用层次分析法结合信息量法的组合评价模型，能较好地解决影响因素众多、难以量化的地质灾害定量评价问题，同时也能极大改善可靠度与效率、定性与定量间的矛盾。本文评价结果可为拟建高速公路设计、施工及营运期间防灾减灾工作提供科学依据，对类似线状工程地质灾害易发性评价具有借鉴意义。

1 研究区概况与数据源

1.1 区域概况

拟建施甸至链子桥段高速公路位于云南省施甸县境内东侧，横贯南北，线路全长65.95 km，总投资106.5亿元，属重要工程建设项目[13]。依据《地质灾害危险性评估规范(DZT0286—2015)》，以拟建线路轴线为中心，向两侧外延约500 m，若在500 m范围内存在滑坡、崩塌等地质灾害时，延伸至斜坡坡顶，存在泥石流时外扩至泥石流流域分水岭，当在500 m范围内存在山脊分水岭、河道时，以河道或山脊分水岭为限，据此确定研究区范围约136.23 km^2。研究区地貌类型为溶蚀断块中山地貌、溶蚀洼地地貌、构造侵蚀、剥蚀低中山地貌，地面海拔611～2 200 m。气候以低纬度高原季风气候为主，属中亚热带气候，年均降雨量600～1 200 mm。沿线发育的水系主要有勐波罗河及姚关河。主要出露第四系(Q)、三叠系(T)、泥盆系(D)、志留系(S)、奥陶系(O)、寒武系(∈)和印支期侵入岩(β)，研究区内地质构造发育，发育有姚关断裂(F_1)、摆榔断裂(F_2)、蚌冬断裂(F_3)等3条区域性断层及吴家庄背斜、外大坝向斜等2条褶皱。研究区内人类工程活动主要为道路切坡及村镇居民区建设。

据拟建高速公路地质灾害遥感及实地调查，确定研究区内发育崩塌2处(均为岩质崩塌，为道路及采矿形成的人工边坡)，滑坡5处(类型涵盖岩质滑坡、土质滑坡及岩土质、土岩质滑坡，区内滑坡均为道路、公路修建时切坡、堆填所形成)，泥石流3条(均为粘性泥石流)，潜在不稳定斜坡21处(类型涵盖岩质、土质及岩土质、土岩质潜在不稳定斜坡，主要为区内道路、公工程建设等人类活动形成的人工边坡)，共31个地质灾害点[13]。

1.2 数据源

本文进行易发性评价包括的数据源如下：(1) 研究区1∶20万地质图，用于提取岩土体类型、断层褶皱等。(2) 由施甸县气象局提供的气象站点年均降雨量，经过克里金插值得到研究区年均降雨数据。(3) 1∶5万地形图(数字地图)，用于提取高程、坡度、坡向、道路、水系等。(4) 下载自地理空间数据云平台的研究区域L1级4月份Landsat8卫星影像，用于计算研究区植被指数NDVI。

2 研究方法

2.1 评价指标因子的选取

分析研究地质灾害现状与主控因素间的关系，是深入了解研究区内地质灾害发育、演化规律的前提及基础。故指标体系的选取也应建立在对区内现状地质灾害发育特征的了解基础上，选取对灾害发生贡献较大的因子作为易发性评价指标并据此进行评价指标的分级。本文将从气象水文、地形地貌、植被发育程度、岩土体类型、地质构造及人类工程活动等角度分析区内现状地质灾害发育与主控因素间的相关关系。

2.1.1 气象和水文

(1) 气象。研究区位于施甸县东部和龙陵县东南部区域，属亚热带季风气候，降雨丰富，且降雨时间集中，根据现状地质灾害与降雨量间的统计关系，见图1，地质灾害主要发育在年平均降雨量大于900 mm的地区，并且地质灾害数量随着年平均降雨量的增加有逐步递增的趋势(图1A)，据此将降雨量划分为3级，分别为：0～900 mm，900～1 000 mm，>1 000 mm。

(2) 水文。研究区属怒江流域，沿拟建线路分布多条河流及多个水库。研究区内含响水凹水库、蒋家寨水库、三丘田水库；沿线河流有姚关河及其支流，姚关河汇入东侧的勐波罗河，勐波罗河由北向南汇入怒江。研究区内高程总体落差较大，水侵蚀能力强。局部区域为河谷地貌，沟谷多发育常流水，与拟建线路斜交、直交。

流水对岸坡具有明显的冲刷、掏蚀效应，破坏岸坡稳定性。根据现状地质灾害与水系空间位置间的统计分析(图1B)，绝大多数地质灾害发育在距河流约0～600 m范围内，且距离水系越远，地质灾害数量有明显降低的趋势。据此将距水洗据悉分为4级，分别为0～200 m，200～400 m，400～600 m，>600 m。

2.1.2 植被覆盖 地表植被根系对松散土体具有稳固作用，一般植被发育的区域，地质灾害发育较少。本文采用归一化植被指数(NDVI)值反映植被覆盖程度。NDVI一般在[−1,1]，其值越趋近1，植被覆盖越高。跟据现状地质灾害与归一化植被指数(NDVI)的统计分析(图2C)，大多数地质灾害发育在NDVI<0.25的区间，且地质灾害随植被覆盖程度的降低而升高。据此

将研究区的归一化植被指数（NDVI）划分为五级：0～0.2，0.2～0.25，0.25～0.3，0.3～0.5。

2.1.3　海拔　研究区海拔主要分布于 600～2 200 m，由于海拔的差异，风化作用对地表的改造作用的强弱和方式存在明显差异。海拔低的区域植被发育，气候潮湿，地表岩体吸收的太阳能辐射较少，主要以生物风化作用及化学风化作用为主。海拔高的区域植被较不发育，气候干燥寒冷，裸露基岩吸收的太阳能辐射较多，昼夜温差大，主要以物理风化为主。跟据现状地质灾害与其海拔分布值的统计分析（图 1D），地质灾害点主要集中在海拔较高的区域，且随着海拔的增高，地质灾害数量明显升高。据此，将高程值分为 4 级，分别为：600～1 000 m，1 000～1 400 m，1 400～1 800 m，1 800～2 200 m。

2.1.4　坡度和坡向

（1）坡度。坡度一定程度上反映地形复杂程度，是重要的孕灾条件之一。通常认为，坡度越大，发生地质灾害的概率也越大。据现状地质灾害数量与坡度之间统计分析关系（图 1E）可知，现状地质灾害主要发育在坡度为 15°～35°区域，且在不同坡度梯度均有分布，但主要集中在陡坡区域，并随着坡度的增加，地质灾害数量也呈增加态势。据此将研究区坡度分为 4 级，分别为：0°～15°，15°～25°，25°～35°，>35°。

（2）坡向。坡向差异对降雨、风速及光照等影响风化速率的因子均有影响，通过对现状地质灾害在不同坡向的发育程度（图 1F）得知：地质灾害在西向坡的斜坡上不发育；南向坡和北向坡也发育较少；北东向、南东向和东向的地质灾害点较为集中，共发育 23 个地质灾害点，占总地质灾害总量的 76.7%。将研究区坡向分为 8 级，分别为：0°～45°，45°～90°，90°～135°，135°～180°，180°～225°，225°～270°，270°～315°，315°～360°。

2.1.5　岩土类型和构造

（1）岩土体类型。岩土体软硬程度和软弱结构面组合对岩体整体强度起决定性作用。研究区内地层岩性多变，岩土体类型繁多，地质灾害在不同岩土类型中发育程度亦大不相同。据表 1 可知，地质灾害在硬夹软岩土类型中最为发育，共发育 17 个灾害点，在较坚硬岩组中共中等发育 10 个，松散土体中发育 3 个，在坚硬岩组中若发育，仅发育 1 个。可见灾害点发育程度与岩石坚硬程度呈负相关关系。依据《岩土工程勘察规范（GB50021—2001）》（2009 年版），将研究区分为 6 类工程岩土体类型，分别为：第四系冲洪积砂砾石、砾石及黏土多层土体，坚硬块状辉绿岩岩组，坚硬中厚层石英砂岩岩组，较坚硬中厚层状变质砂岩夹板岩岩组，较坚硬中至厚层状中等岩溶化灰岩、白云岩岩组，较坚硬中厚层状砂岩夹软弱中厚层状页岩岩组。

（2）构造。区域性断裂带和褶皱带中岩体破碎，完整性差，地质灾害往往密集发育，并沿构造呈带状分布，统计研究区现状地质灾害与距离断层距离的关系（图 1G）。可知地质灾害主要发育于构造线 1 000 m 的区域内，共发育 26 个灾害点。而且距构造线越近，地质灾害发育程度明显增高。据此以构造线为中心，运用 ArcGIS 缓冲区分析功能，建立多级缓冲区，共划分为 5 个区域，分别为 0～200 m，200～400 m，400～800 m，800～1 200 m，>1 200 m。

表 1　不同岩土类型中灾害点个数及占比统计

岩土类型	编号	地层代号	灾害个数/个	占比/%
砂、砾、黏土多层土体	1	Qh，Qp	3	9.7
坚硬块状辉绿岩岩组	2	$\beta\mu$	0	0
坚硬中厚层石英砂岩岩组	3	O_1m	1	3.2
较坚硬碎中至厚层状变质砂岩夹板岩岩组	4	$\in gn^1$，$\in gn^2$，$\in gn^3$，$\in gn^4$	7	22.6
较较坚硬中厚层状中等岩溶化灰岩、白云岩岩组	5	D_1，D_2hy，S_3，T_2h，T_3d^2，O_1l	3	9.7
较坚硬中厚层状砂岩夹软弱中厚层状页岩岩组	6	O_2s-O_2p，O_3p，T_3nn	17	54.8

2.1.6　道路和居民区

（1）道路。城镇、乡村等道路和居民区工程建设，对地质环境的扰动及破坏较大，易加剧和诱发地质灾害。根据统计分析现状地质灾害与已建道路和居民区的距离关系（图 1H），可知地质灾害主要分布在距离已建道路 40 m 范围内，共发育 26 个灾害点，总占比 83.9%，同时随着距离的增加，地质灾害数量逐渐减少。根据现状地质灾害与距道路距离的关系，将道路指标分为 5 级，分别为：0～20 m，20～40 m，40～80 m，80～120 m，>120 m。

（2）居民区。研究区内居民区呈散点状分布，多为村级居民区，农业耕作活动频繁，无大型工程建设活动。据（图 1I）可知，地质灾害在居民点附近不同空间距离上发育数量均为 3～4 个，因此，居民生活生产活动对地质灾害的形成无明显贡献，地质灾害发育程度与距离居民区远近间的关联性较差，无明显线性关系，故不考虑此因子。

根据以上分析，本文拟建高速公路易发性评价指标因子确定如下：多年平均降雨量、距水系距离、NDVI、高程、坡度、坡向、岩土体类型、距断层距离、距道路距离等 9 个指标因子。

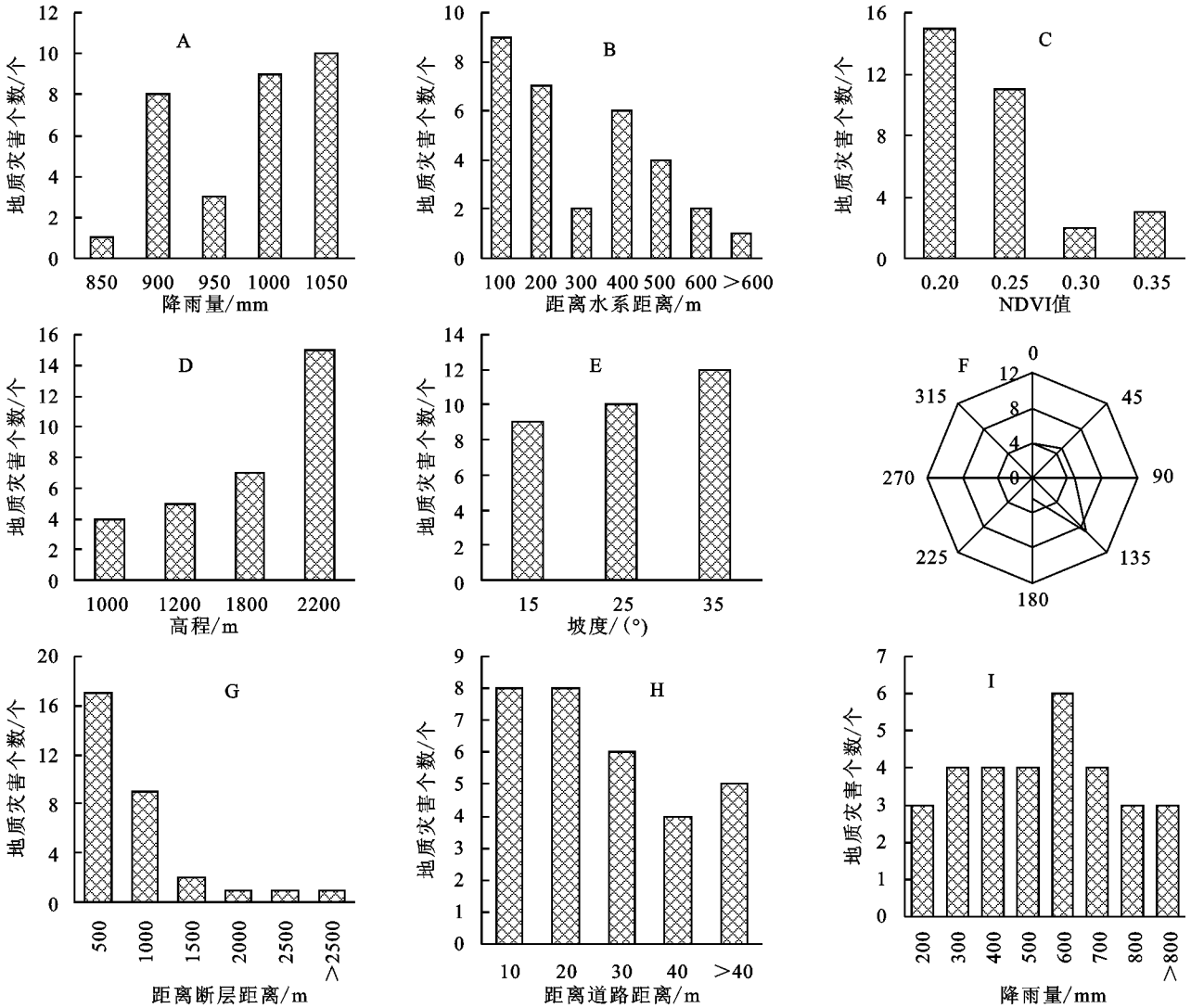

图1 地质灾害主控因素与灾害点个数关系

2.2 评价单元的确定

基于特定大小格网的评价方法中,格网大小的确定尚没有确定的标准。适宜网格大小的选取主要依靠专家的知识和经验,原始地形数据是网格单元选取首要考虑的因素[14]。目前,常用的基于专家经验的计算公式为:

$$GS=7.49+0.000\,6S-2.0\times10\sim9S^2+2.9\times10\sim15S^3 \tag{5}$$

式中:GS为适宜网格的大小;S为原始等高线数据精度的分母。本次评价选用1∶5万地形图海拔数据,根据专家经验公式求得GS=32.852 5,综合考虑NDVI栅格数据空间分辨率,本次评价格网大小取30×30 m,运用ArcGIS软件中数据管理工具生成30×30 m规则格网,据此将研究区划分为80 584个评价单元,研究区评价因子如图2(A—J)所示。

2.3 评价方法

地质灾害本身是一个复杂的系统,地质灾害系统具有开放性、非线性和复杂性的特点。层次分析法(AHP)能够量化将行业专家的经验判断,广泛应用于地质灾害评价中[15]。信息量法通过把反映影响区域稳定性因素的实测值转化成信息量值作为易发性区划的定量指标[16]。二者结合,能将专家的经验判断与概率计算统一,弥补信息量法忽略各因子间相对重要性以及层次分析法难以做到因子内部量化的缺陷,也使主观分析和客观实际相结合。

2.3.1 *层次分析法*(AHP)

(1) 建立结构层次模型。通过对研究区的地质灾害现状的分析,确定易发性评价目的及所选择的评价因子,综合分析系统所涉及的目标、范围、准则、约束条件,确定综合评价体系中各因子之间的关系,并根据指标的隶属关系进行上下分层排列,建立地质灾害易发性评价指标体系层次分析模型。本次评价以地质灾害易发性作为目标层,以气象水文、地形地貌、岩性构造、人类工程活动作为准则层,以对该区地质灾害易发性影响较为明显的9个因子作为方案层。

（2）构造判断矩阵。采用 1～9 标度法[16]，根据地质灾害易发性评价指标体系确定的隶属关系，对不同层次各因子间的相对重要性进行判断，确定权重，最终建立 $A-B$ 层、$B-C$ 层判断矩阵。

（3）相对权重及一致性检验。为避免判断矩阵偏离一致性条件，在软件下计算以上矩阵的最大特征根 λ_{max} 及对应的特征向量，并根据公式（1—2）验证判断矩阵的一致性。

$$CI=\frac{\lambda_{max}-n}{n-1} \tag{1}$$

式中：；CI（consistency index）为一致性指标；λ_{max} 为判断矩阵的最大特征根；n 为判断矩阵的阶数。

$$CR=\frac{CI}{RI} \tag{2}$$

式中：；CR（consistency ratio）为一致性比例；RI（random index）为随机一致性指标。

当 CR＜0.1 时，认为判断矩阵的一致性是可以接受的，否则应对判断矩阵进行调整修正，直至判断矩阵通过一致性检验为止。

最终将准则层对方案层（$B-C$）归一化后的权重 Wi 在目标层（A）下再次归一化后，得到目标层对方案层（$A-C$）的排序权重如表 2 所示。

表 2　因子权重及计算过程

层次 C	层次 $B-C$				层次 $A-C$
	B_1	B_2	B_3	B_4	排序权值
	0.15	0.3722	0.3722	0.1056	
C_1	0.6667				0.1000
C_2	0.3333				0.0500
C_3		0.1891			0.0704
C_4		0.3509			0.1306
C_5		0.3509			0.1306
C_6		0.1091			0.0406
C_7			0.6667		0.2481
C_8			0.3333		0.1241
C_9				1	0.1056

2.3.2　信息量法

（1）信息量模型。信息量模型预测法采用地质灾害发生过程中熵的减少来表征地质灾害事件产生的可能性，认为地质灾害的产生与预测过程中所获取信息的数量和质量有关，是用信息量来衡量的，信息量越大，表明发生地质灾害的可能性越大[17]，其表达式（3）如下：

$$I(Y,x_1,x_2,\cdots,x_n)=\ln\frac{P(Y,x_1,x_2,\cdots,x_n)}{P(Y)} \tag{3}$$

式中：$I(Y,x_1,x_2,\cdots,x_n)$ 为因素组合 $x_1,x_2,\cdots,x_n$ 对地质灾害提供的信息量；$P(Y,x_1,x_2,\cdots,x_n)$ 为在因素组合 $x_1,x_2,\cdots,x_n$ 下地质灾害的发生概率；$P(Y)$ 为地质灾害的发生概率。

由于影响地质灾害易发性的因子诸多，相应的因子组合形态亦多样，样本统计数量往往受到限制，故采用简化的单因素信息量模型分步计算，再综合叠加分析，相应的信息量模型改写为：

$$I=\sum_{i=1}^{n}I_i=\sum_{i=1}^{n}\ln\left(\frac{N_i/N}{S_i/S}\right) \tag{4}$$

式中：I 为预测区某单元信息量预测值；N_i 为分布在因素 x_i 内发育地质灾害的单元数；N 为研究区发育地质灾害的单元总数；S_i 为具有因素 x_i 属性的单元总数；S 为区内划分单元总数。

（3）因子分级信息量值。根据前文对评价因子选取与分级研究分析，将 9 个影响因子分为 43 个分级，将研究区划分为 80 584 个评价单元。运用 ArcGIS 软件中空间分析和空间连接工具，以各因子栅格分级图为底图，将栅格值赋给评价单元格，并提取信息量模型中各指标单元格个数。通过模型公式（公式 4），得到分级的信息量表（表 3）。为节省表格空间，将岩土体类型用数字代替，其中 1 为第四系冲洪积砂、砾、黏土多层土体，2 为坚硬块状辉绿岩岩组，3 为坚硬中厚层状石英砂岩岩组，4 为坚硬碎中厚层状变质砂岩夹板岩岩组，5 为较坚硬中至厚层状中等岩溶化灰岩、白云岩岩组，6 为较坚硬中厚层状砂岩夹软弱中厚层状页岩岩组。

2.3.3　AHP_信息量模型　结合层次分析法及信息量法对影响地质灾害易发性因子运算和分析所取得的成果，将各因子权重值与各因子分级信息量值相乘，得到各因子下各分级的综合信息量值。AHP_信息量评价模型如下：

$$I_Z=\sum W_i\times I_{ij} \tag{6}$$

式中：I_Z 为评价单元的综合信息量值；W_i 为第 i 个因子的权重；I_{ij} 为第 i 个因子分级 j 的信息量值。

基于信息量值确定易发程度分区界线值常用的方法有突变点法、等间距法和自然断点法等。自然断点法（Natural Break）运用聚类分析原理，以组间方差最大、组内方差最小为聚类结束条件。因此，通过自然断点法计算得到的分级结果，不同分级之间差异最大，符合地质灾害易发性分区“区内相似、区间相异”的原则。本次评价基于地质灾害易发性综合信息量值栅格图，选择自然断点法对研究区进行地质灾害易发性分区，共划分为 3 级，分别为：高易发区（－0.114 306～0.975 986），中易发区（－0.580 264～－0.114 306），低易发区（－1.266 15～－0.580 318）。进行重分类后，存在诸多噪点，使用 ArcGIS 邻域分析工具，以 90×90 m 方格范围进行多次栅格平滑，得到最终研究区地质灾害易发性分区图（图 2）。

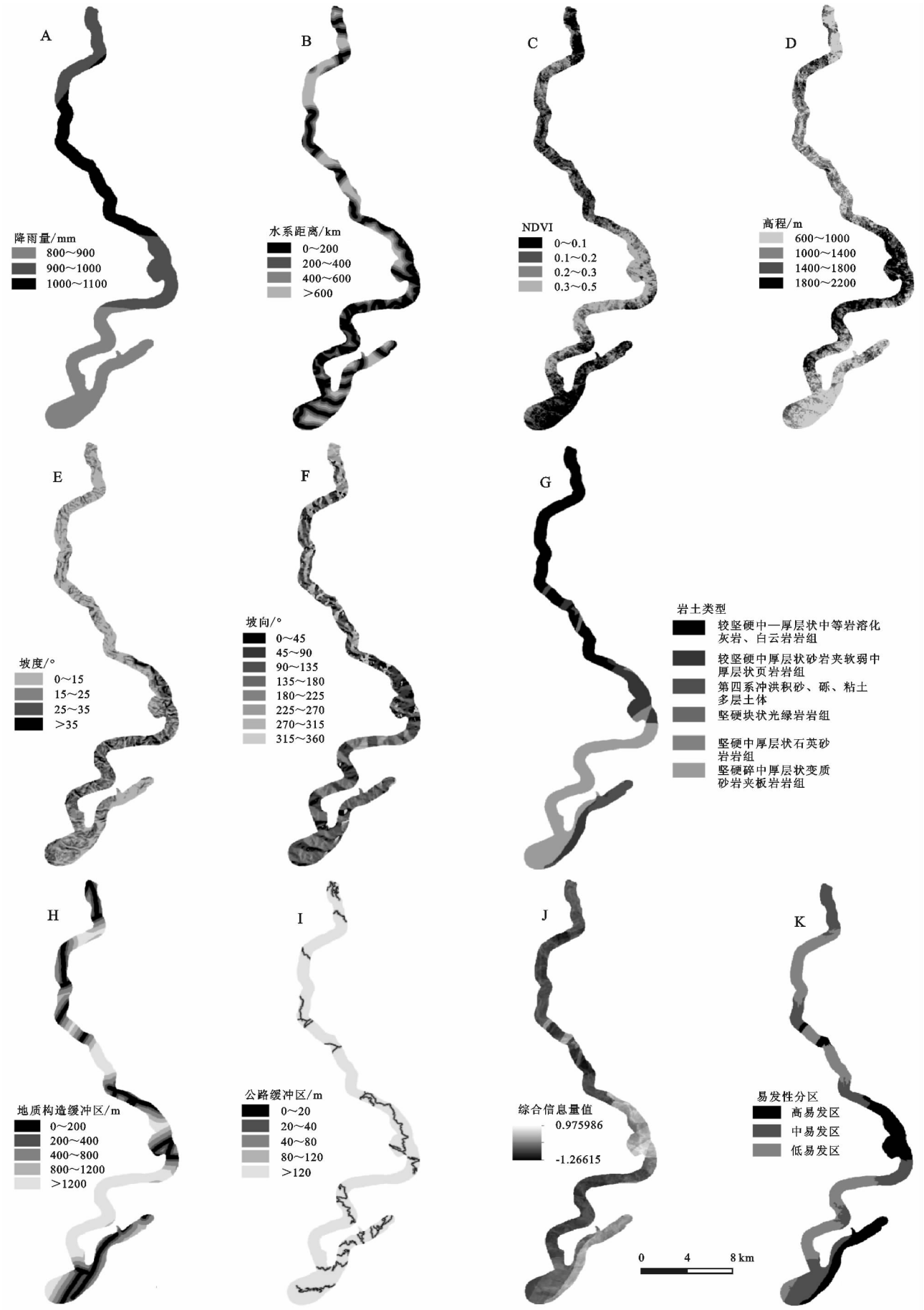

图2 指标因子(A—I)图与易发性评价结果(J—K)

表 3　信息量值计算结果

类别	评价因子	分级	编号	信息量计算			信息量值
				N_i	S_i	N/S	
气象水文	降雨量	800～900 mm	1	90	33771	0.005845	−0.785363161
		900～1000 mm	2	296	27485	0.005845	0.611148668
		1000～1100 mm	3	85	19328	0.005845	−0.28447395
	水系距离	0～200 m	4	249	32735	0.005845	0.26343767
		200～400 m	5	137	21405	0.005845	0.090786001
		400～600 m	6	82	12420	0.005845	0.121840786
		＞600 m	7	3	14024	0.005845	−3.307728244
	植被覆盖程度	0～0.1	8	193	27029	0.005845	0.20020944
		0.1～0.2	9	136	22907	0.005845	0.01564196
		0.2～0.3	10	98	15766	0.005845	0.061541371
		0.3～0.5	11	44	14882	0.005845	−0.68153318
地形地貌	海拔	600～1000 m	12	193	27029	0.005845	0.20020944
		1000～1400 m	13	136	22907	0.005845	0.01564196
		1400～1800 m	14	98	15766	0.005845	0.061541371
		1800～2200 m	15	44	14882	0.005845	−0.68153318
	坡度	＜15°	16	113	29878	0.005845	−0.43530499
		15°～25°	17	197	28418	0.005845	0.170610597
		30°～35°	18	146	18427	0.005845	0.304219256
		＞35°	19	15	3861	0.005845	−0.408446401
	坡向	0°～45°	20	60	10488	0.005845	−0.021457569
		45°～90°	21	124	15200	0.005845	0.333415753
		90°～135°	22	128	15136	0.005845	0.369383867
		135°～180°	23	133	14566	0.005845	0.446088698
		180°～225°	24	18	10210	0.005845	−1.198566259
		225°～270°	25	6	6327	0.005845	−1.818637106
		270°～315°	26	0	4415	0.005845	—
		315°～360°	27	2	4242	0.005845	−2.51745806
岩土类型及构造	岩土体类型	1	28	44	5543	0.005845	0.306083379
		2	29	0	596	0.005845	—
		3	30	111	1752	0.005845	2.383201824
		4	31	51	31810	0.005845	−1.293525458
		5	32	19	26722	0.005845	−2.106618602
		6	33	246	14161	0.005845	1.089269444
	地质构造	0～200 m	34	105	16328	0.005845	0.09550854
		200～400 m	35	165	13341	0.005845	0.749533089
		400～800 m	36	133	15481	0.005845	0.385165278
		800～1200 m	37	50	9637	0.005845	−0.119157236
		＞1200 m	38	18	25797	0.005845	−2.125456833
人类工程活动	道路影响带	0～20 m	39	148	6834	0.005845	1.309731735
		20～40 m	40	74	6189	0.005845	0.715721186
		40～80 m	41	5	10265	0.005845	0.223177678
		80～120 m	42	38	7941	0.005845	−0.200023437
		＞120 m	43	136	49355	0.005845	−0.751954577

3　结果与分析

3.1　易发性分区结果验证

本文通过现状地质灾害点空间分布判断分区结果的的合理性及可靠性。经统计分析得:易发性高易发区内分布有 23 个地质灾害点,占地质灾害点总数的 74.2%。中易发区内分布有 6 个地质灾害点,占地质灾害点总数的 19.4%。低易发区内分布有 2 个地质灾害点,占地质灾害点总数的 6.4%。现状地质灾害在易发性高易发区内强发育,在中易发性中等发育,在低易发性内弱发育。从验证结果来看,本次评价分区合理,可靠性较高。

3.2　地质灾害易发性分区评价

利用 ArcGIS 统计工具,对基于 AHP_信息量法得到研究区地质灾害易发性分区进行统计分析(表 4),地质灾害高易发区面积为 19.4 km^2,共布置线路 16.621 km。主要分布于研究区中部及东南部,该区域水系发育,海拔高差大,切割深,地形坡度较陡,岩

性以砂岩夹页岩为主，部分区域为第四系卵、砾石黏土，岩体风化程度高，且局部区段存在软弱夹层。受区域性断裂影响，岩体节理裂隙发育，完整性差。加之该区路网密度大，且处于多雨区，易发生地质灾害。中易发区 25.9 km^2，分布于研究区北部及中南部，该区水系发育，海拔高差较小，地势较为平坦，岩性多为灰岩、白云岩和变质砂岩夹板岩，地质构造中等发育，灰岩坚硬、性脆，受区域构造影响，岩体破碎。该区路网密度较大，处多雨区，较易发生地质灾害。低易发区 27.2 km^2，研究区北部及南部均有分布，该区水系发育，地形平坦。岩性多为灰岩、白云岩及变质砂岩夹板岩，岩体强度大。地质构造弱发育。道路密度小，处少雨区，地质灾害不易发。

表4 易发性分区结果统计

易发性分区	面积/km^2	占比/%	里程
高易发区	19.4	26.8	K15+400－K15+850，K17+500－K18+370，K25+750－K32+300，K57+200－K65+951
中易发区	25.9	35.7	K0+000－K4+300，K13+550－K15+400，K22+300－K25+750，K32+300－K36+380，K41+420－K43+320，K48+620－K52+400，K53+690－K57+200
低易发区	27.2	37.5	K4+300－K13+550，K15+850－K17+500，K18+370－K22+300，K36+380－K41+420，K43+320－K48+640，K52+400－K53+690

4 结论

（1）对研究区现状地质灾害进行分析，根据影响因子与现状地灾的统计关系确定分级标准。确定对研究区内地质灾害发育起主要控制作用的降雨量、水系影响带、植被覆盖程度、高程、坡度、坡向、岩土类型、地质构造及道路影响带9个因子作为易发性评价指标并分级。此法在地质灾害影响因子确定及分级中具有科学性、合理性、可操作性。

（2）根据研究区现状地质灾害的分析，发现年平均降雨量大于900 mm的地区，距河流600 m范围内，距离构造线1 000 m的区域内，NDVI＜0.25，海拔较高、坡陡的东南坡，以及岩土类型为硬夹软的地区地质灾害发育集中。

（3）结合层次分析法和信息量法对研究区进行了地质灾害易发性评价，并进行分区。根据历史灾害点对评价结果进行验证，表明耦合层次分析法和信息量法的评价模型在线状工程地质灾害评价中可操作性强，结果可靠。

（4）该拟建高速公路，地质灾害高易发区面积为19.4 km^2，共布置线路16.621 km。主要分布于研究区中部及东南部，在公路建设及日后运营中应加强高易发区的地质灾害防治工作，保障拟建高速公路的安全运营。

参考文献：

[1] 田春山，刘希林，汪佳. 基于CF和Logistic回归模型的广东省地质灾害易发性评价[J]. 水文地质工程地质，2016，43(6)：154-161，170.

[2] 唐川，马国超. 基于地貌单元的小区域地质灾害易发性分区方法研究[J]. 地理科学，2015，35(1)：91-98.

[3] 曹璞源，胡胜，邱海军，等. 基于模糊层次分析的西安市地质灾害危险性评价[J]. 干旱区资源与环境，2017，31(8)：136-142.

[4] 王小江，孙书勤，卢鹏飞. 层次分析法在重庆某县地质灾害危险性评价中的应用[J]. 地球与环境，2014，42(3)：419-423.

[5] 常青，刘琳，苗利勇. 基于模糊综合评判法临潼区地质灾害危险性评价[J]. 中国人口·资源与环境，2014，24(S1)：355-358.

[6] 王宁涛，彭轲，黎清华，等. 基于RS和GIS的地质灾害易发性定量评价：以湖北省五峰县为例[J]. 地学前缘，2012，19(6)：221-229.

[7] 冯杭建，周爱国，俞剑君，等. 浙西梅雨滑坡易发性评价模型对比[J]. 地球科学，2016，41(3)：403-415.

[8] Devkota K C, Regmi A D, Pourghasemi H R, et al. Landslide susceptibility mapping using certainty factor, index of entropy and logistic regression models in GIS and their comparison at Mugling-Narayanghat road section in Nepal Himalaya[J]. Natural Hazards, 2013, 65(1): 135-165.

[9] 邱海军，曹明明，刘闻，等. 基于3种不同模型的区域滑坡灾害敏感性评价及结果检验研究[J]. 地理科学，2014，34(1)：110-115.

[10] 傅文杰. GIS支持下基于支持向量机的滑坡危险性评价[J]. 地理科学，2008，28(6)：838-841.

[11] Conforti M, Pascale S, Robustelli G, et al. Evaluation of prediction capability of the artificial neural networks for mapping landslide susceptibility in the Turbolo River catchment (northern Calabria, Italy)[J]. Catena, 2014, 113(1): 236-250.

[12] Peng L, Niu R, Huang B, et al. Landslide susceptibility mapping based on rough set theory and support vector machines: A case of the Three Gorges area, China[J]. Geomorphology, 2014, 204(1): 287-301.

[13] 索海泉. 云南省施甸县施甸至勐简高速公路施甸至链子桥段建设项目地质灾害危险性评估报告[R]. 昆明：湖南中核建设工程公司，2017. 3-4.

[14] 李军，周成虎. 基于栅格GIS滑坡风险评价方法中格网大小选取分析[J]. 遥感学报，2003，7(2)：87-89.

[15] 王哲，易发成. 基于层次分析法的绵阳市地质灾害易发性评价[J]. 自然灾害学报，2009，18(1)：14-23.

[16] 高治群，薛传东，尹飞，等. 基于GIS的信息量法及其地质灾害易发性评价应用：以滇中晋宁县为例[J]. 地质与勘探，2010，46(6)：1112-1118.