

基于 GIS 和信息量模型的京张高铁滑坡易发性评价

张向营^{1,2,3}, 张春山^{1,2}, 孟华君^{1,2}, 王 鹏⁴, 李焕彬⁴

(1. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081;

2. 国土资源部新构造运动与地质灾害重点实验室, 北京 100081;

3. 北京市城建勘测设计研究院有限责任公司, 北京 100101;

4. 中国地质大学(北京), 北京 100083)

摘要: 新建京张铁路不仅是 2022 年北京冬奥会的配套交通保障设施, 同时也是京包兰交通廊道的重要组成部分。在京张高铁沿线滑坡灾害调查的基础上, 对影响滑坡灾害发育的相关因子进行统计分析, 选取斜坡坡高、坡度、坡向、归一化植被指数、工程地质岩组、活动断裂、河流、年平均降雨量、地震和人类工程活动等 10 个要素作为评价模型计算的基本变量和数值化参数, 采用基于 GIS 的信息量模型法对在建京张高铁沿线及邻区进行了滑坡灾害易发性评价, 并将评价结果划分为 5 个等级: 极低易发区、低易发区、中易发区、高易发区和极高易发区。结合野外调查成果, 对评价结果的可信度进行了检验分析, 评价结果与实际灾害发生情况基本吻合, 研究结果可为京张高铁建设、减灾防灾提供基础依据。

关键词: 滑坡灾害; GIS; 信息量模型; 易发性评价; 京张高铁

中图分类号: P642.22

文献标识码: A

LANDSLIDE SUSCEPTIBILITY ASSESSMENT OF NEW JING-ZHANG HIGH-SPEED RAILWAY BASED ON GIS AND INFORMATION VALUE MODEL

ZHANG Xiangying^{1,2,3}, ZHANG Chunshan^{1,2}, MENG Huajun^{1,2}, WANG Peng⁴,
LI Huanbin⁴

(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. Beijing urban construction survey and design institute limited liability company, Beijing 100101, China;

4. College of Earth Science and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: New Jing-Zhang high-speed railway is not only an important supporting transportation infrastructure for the 2022 winter Olympics in Beijing, but also an important part of the eastern section of the "eight vertical and eight horizontal" Jinglan corridor that the state plans to implement. Based on the investigation of the landslide disaster along the Jing-Zhang high-speed railway, a statistical analysis on the correlation factors affecting the development of geological disasters are made in this article. A total of 10 variables are analyzed as input variables, namely topography (height, slope and aspect), vegetation

基金项目: 中国地质调查局项目 (DD20160267); 国家自然科学基金 (41502339); 中国地质科学院基本科研业务专项经费 (YYWF201523)

作者简介: 张向营 (1993-), 男, 硕士研究生, 主要从事地质灾害、工程地质方面的研究。Email: dzxy2011@163.com

通讯作者: 张春山 (1964-), 男, 博士, 研究员, 主要从事地质灾害、地应力、环境地质等方面的工作。E-mail: zhangcs401@sina.com

收稿日期: 2017-02-20; 修回日期: 2017-12-01

吴芳编辑

coverage ratio, engineering rock group, fault, river, rainfall, earthquake and human activity of the study area. The results of landslide susceptibility assessment based on GIS and information value model of New Jing-Zhang High-speed Rail will be divided into 5 grades: extremely high susceptible, high susceptible, moderate susceptible, low susceptible and extremely low susceptible. The results of the model preferably inosculate with the field surveying, and the results of this article can provide a valid basis for the railway construction in the future.

Key words: landslide hazard; GIS; information value model; susceptibility assessment; New Jing-Zhang high-speed railway

0 引言

2013年,北京牵手张家口成功申办了2022年冬季奥运会,作为冬奥会的重要基础配套设施,京张高铁连接了北京城区、延庆区和张家口三个冬奥会赛区,全长174公里,于2016年开工建设,它是世界上第一条设计时速为350公里的有砟轨道高速铁路。线路要穿越北京盆地、八达岭山区、官厅水库、怀涿盆地等多种地形地貌单元,沿线地区地质环境十分复杂,具有孕育滑坡灾害的多种条件。因此,随着各项铁路工程的相继开工建设,对铁路沿线滑坡灾害发育特征和滑坡灾害易发性区划的需求也更加紧迫。

自20世纪60年代GIS技术出现后,国内外研究者将众多数学模型如逻辑回归模型^[1-2]、证据权重法^[3]、层次分析法^[4-5]、神经网络模型^[6]、Newmark模型^[7]等引入GIS中,用于滑坡灾害易发性评价,并且取得了较好的研究成果。对于滑坡灾害易发性评价方法和体系的选择,各种评价模型各有特点,适用的范围不一,各学者^[8-14]从不同角度对国内外灾害风险评估和管理的方法与流程进行了综述,但目前还没有形成统一的方法和标准。虽然目前对铁路等线性工程滑坡灾害危险评估已有相关的国家级要求和地方标准,但各单位评价的因子和方法也不尽相同。因此需要结合区域自身的地质地理背景和灾害发育特征,建立适合铁路等线性工程的评价指标和方法。

吴树仁^[15]认为区域地质灾害风险区划一定要强调定性分析为主、定量计算为辅的基本原则。基于GIS系统的信息量模型,是通过计算各影响因子对斜坡变形破坏所提供的信息量值,作为滑坡危险性区划定量指标,既能将专家的主观经验和客观数据很好的结合起来,又便于推广应用^[16-19]。因此,在区域滑坡灾害调查、野外工程勘探、收

集研究区资料的基础上,基于地理信息系统(GIS)和信息量模型,开展了在建京张高铁沿线滑坡灾害易发性评价工作。

1 地质背景

1.1 区域地质背景

根据区域构造单元划分,全线均处于中朝准地台一级构造单元内,跨华北断拗、燕山沉降带及内蒙地轴三个二级构造单元。该区域属阴山东西向复杂构造带东延部分,断裂构造十分发育,压性断裂为主,常呈北东向、东西向分布。研究区内发育多条活动断层(见图1),有四条全新世活动断裂与京张高速铁路相交,分别为怀涿盆地北缘断裂、新保安—沙城断裂、延矾盆地北缘断裂和南口—孙河断裂。

1.2 研究区滑坡灾害发育概况

根据研究区已开展的1:5万县、市滑坡灾害调查与区划报告,对重要地区进行了野外实地调查。调查发现:铁路沿线及邻区共发育滑坡45个,滑体主要由黄土和松散残坡积层组成,滑动面主要发育在黄土体中或基岩与黄土的接触面上,主要分布在八达岭山区、怀来县南北山麓地带(见图2)。

2 基于GIS进行滑坡易发性评价的信息量模型

2.1 信息量模型

1948年美国数学家、信息论创始人Shannon在《A Mathematical Theory of Communication》一文中提出了“信息量法”的概念,并在概率论知识和逻辑推理方法的基础上,推导出了信息量的计算公式^[20]。信息量模型最初被应用在矿产普查勘探等领域,通过野外地质调查,把区域成矿因子



图1 研究区活动断裂简图

Fig. 1 Active faults in the study area

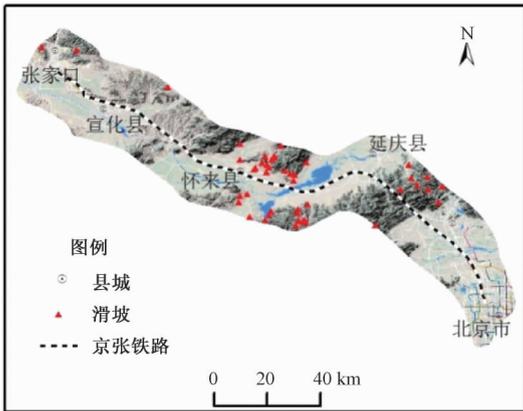


图2 研究区滑坡分布图

Fig. 2 Distribution map of landslides in the study area

量化,即用信息量值的大小来说明各影响因子对区域成矿事件的贡献度。随着评价体系的完善,信息量模型被越来越多的地质灾害学者所接受。

信息量模型的核心观点为:滑坡是否发生与预测过程中所采集数据的数量和质量有关,是用信息量来衡量的^[21]。

$$I(Y, x_1, x_2, \dots, x_n) = \ln \frac{P(Y, x_1, x_2, \dots, x_n)}{P(Y)} \quad (1)$$

式中: Y 事件表示滑坡发生; $I(Y, x_1, x_2, \dots, x_n)$ 为因素组合 x_1, x_2, \dots, x_n 对滑坡地质灾害所提供的信息量, $P(Y, x_1, x_2, \dots, x_n)$ 为因素 x_1, x_2, \dots, x_n 组合条件下滑坡地质灾害发生的概率, $P(Y)$ 为滑坡灾害

发生概率。

根据条件概率运算法则,式(1)可写成:

$$P(Y, x_1, x_2, \dots, x_n) = I(Y, x_1) + I_{x_1}(Y, x_2) + \dots + I_{x_1, x_2, \dots, x_{n-1}}(Y, x_n) \quad (2)$$

式中: $I_{x_1}(Y, x_2)$ 为在因素 x_1 存在时,因素 x_2 对滑坡地质灾害提供的信息量。

模型建立过程如下:

①计算各因素 x_i 对滑坡灾害发生事件 (L) 提供的信息量值 $I(L, x_i)$, 运算公式如下:

$$I(L, x_i) = \ln \frac{N_i/N}{S_i/S} \quad (3)$$

式中: S 为研究区内评价单元总数; N 为研究区内含有滑坡灾害的单元数; S_i 为研究区内含有评价因素 x_i 的单元数; N_i 为分布在评价因素 x_i 的单元数。

②计算单个栅格内总的信息量值:

$$I_i = \sum_{j=1}^n \ln \frac{N_j/N}{S_j/S} = \sum_{i=1}^n \ln \frac{N_i/S_i}{N/S} \quad (4)$$

式中: I_i 为单个栅格内总信息量值; n 为因子个数; N/S 为研究区灾害分布密度, 一般情况下为一定值; N_i/S_i 为灾害在某图层特定类别内的分布密度。

③用 I_i 作为该栅格滑坡灾害发生的度量指标, 其数值越大, 说明该单元发生滑坡灾害的可能性就越大, 易发性就越高。

2.2 基于 GIS 的信息量评价方法

基于 GIS 的信息量评价模型, 把 GIS 强大的空

间处理能力和信息量评价模型的客观真实性有效地结合起来。在评价过程中,首先利用 ArcGIS 软件提取出各影响因子图层,然后将栅格化后的各因子图层分别与滑坡灾害分布图进行空间叠加,得到滑坡灾害在各图层中的分布密度,再通过空间分析工具将各因子图层进行空间叠加,生成滑坡灾害易发性信息量图。最后,基于自然断点法将滑坡灾害易发性信息量图进行重分类,得到研究区的滑坡灾害易发性区划图。

3 影响因子的提取与分析

综合考虑研究区的实际地质情况、评价资料的可获得性、尺度大小和研究区精度等信息,权衡出评价所需的因子,然后将滑坡灾害特征数据接入综合信息模型,进行京张高铁沿线的滑坡灾害易发性评价分区。结合研究区实际情况和资料详实度,确定了此次评价所需的因子:地形地貌(坡度、坡高、坡向)、归一化植被指数、工程地质岩组、地质构造(断裂)、河流侵蚀、年平均降雨量、地震和人类工程活动。

3.1 地形地貌

此次评价所采用的地形地貌因子(坡度、坡高、坡向)是在 30 m 精度 DEM 数据基础上进行提取,然后在 ArcGIS 平台中将地形地貌因子与滑坡灾害发育特征进行空间分析,依次得到坡度、坡高、坡向等要素的信息量值。

(1) 坡度

斜坡坡度不仅影响斜坡内部的应力状态,还与降雨入渗、地表径流、植被发育、地下水的补径排等都有十分紧密的联系^[22]。综合考虑研究区内灾害发育情况和斜坡坡度之间的关系,将坡度分为四个等级。从图 3a 中可以看出,坡度与滑坡灾害并不简单的线性相关,研究区内滑坡灾害大多发育在 20~40° 的斜坡中,由此形成了“单峰式”相关性曲线。

(2) 坡高

坡高与斜坡体稳定性有密切的关系,直接影响灾害体的发育和分布。京张高铁穿越的地貌单元依次为北京盆地、八达岭山区、怀涿盆地、宣化盆地、张家口盆地,地貌单元的不同,决定了斜坡体高差的大小。采用等距划分法将坡高划分四个等级,通过对滑坡灾害发育的高差规律进行统计分析得到:

随着坡高的增加,灾害体密度相应的增加,坡高与灾害发育呈正相关关系的(见图 3b)。

(3) 坡向

坡向的不同,造成山坡的小气候和水热比有较显著差异,使得阳坡比阴坡孕灾条件更好。但通过对研究区滑坡进行坡向相关性统计(见图 4)分析发现,区内崩滑体除 SWW 向坡外,其余各个坡向都较发育,阳坡和阴坡之间并没有明显差异,甚至阴面坡发育的灾害数量还大于阳面坡。究其原因,可能是由于盆地内黄土冲沟纵横发育,支沟流向不定,导致的灾害体滑向不一致,再加上铁路沿线灾害调查为线性调查,没有大区域面状调查更有规律性。

3.2 植被覆盖率

由于植被根系的力学锚固效应和水文效应的存在,使得斜坡体的整体性和稳定性会有所提高,因此,植被的发育与地质灾害的发育通常呈负相关的关系。植被覆盖率的获取,是利用 ENVI 软件平台,首先把 Landsat8 遥感影像进行图像预处理,然后计算出归一化植被指数(NDVI),最后通过波段运算得到植被覆盖率。把研究区内植被覆盖率划分为三个等级,发现植被覆盖率在 0~0.27,即植被覆盖率低的地区灾害最为发育,这也符合我们的常识(见图 3c)。

3.3 工程岩组

铁路沿线及邻区出露地层多样,岩性与地貌单元变化有较强的空间吻合性,八达岭山区和各盆地边缘山麓地带基岩广泛出露,华北平原北京段、怀涿盆地、宣化盆地及张家口盆地内部均被第四系沉积物所覆盖。根据工程岩组与灾害发育规律的统计分析,把研究区工程岩组分为松散沉积物,软硬相间碎屑岩、浅变质岩,坚硬碎屑岩,碳酸盐岩,坚硬深变质岩、侵入岩 5 个类别。从工程岩组与灾害的相关性规律来看(见图 3d),由于软弱相间岩层中软弱夹层的存在使得坡体稳定性大大降低,因此其灾害发育密度是最大的;而松散沉积物中由于沉积物固结程度较弱,斜坡稳定性较差,再加上切坡建房等人类工程活动,使得第四系松散沉积物中发育的灾害体数量也较为可观。但随着岩体的完整性及强度的提高,灾害体发育的数量总体是降低的。

3.4 断裂

研究区内发育多条断裂,以及伴生的小断层和构造节理裂隙的存在,以往的研究表明,区域

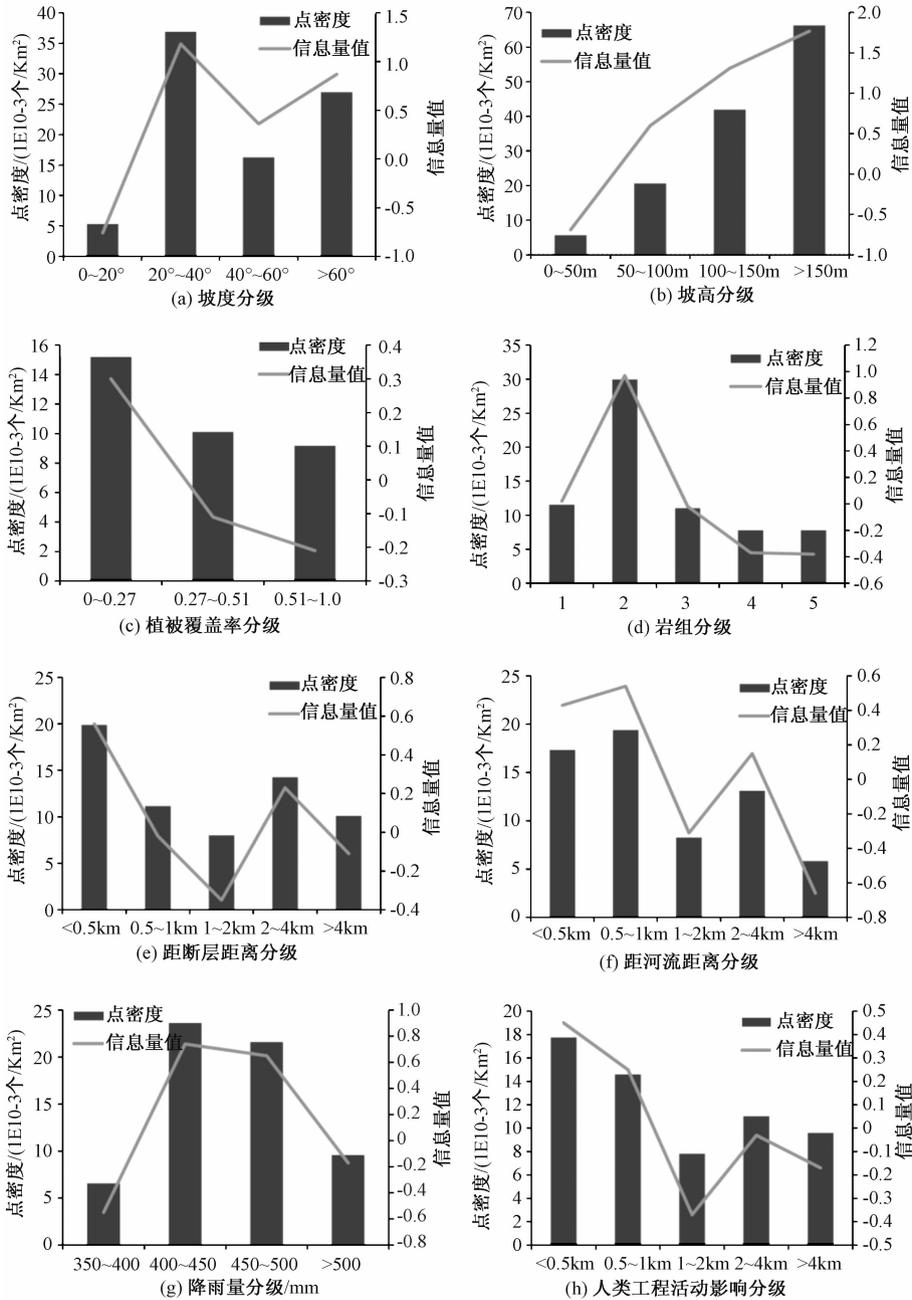


图3 各评价因子与滑坡的相关性

Fig. 3 Correlation between landslide and evaluation factors

性大断裂往往控制次生地质灾害的发育并呈带状分布^[23-24]。研究区内发育有多条活动断裂,将与断裂的距离划分为五个等级进行缓冲区分析。从统计结果(见图3e)可以发现:虽然在2 km~4 km的范围,灾害体密度有所增加,但从整体来看,随着距离的增加灾害点密度是随之减小的。

3.5 河流侵蚀

水文地质因素在灾害体孕育、发展过程中有着十分重要的作用。距离河流的远近,通常指示

坡脚河流侵蚀及坡体“水文地质”特征;库水位的变化造成孔隙水的改变,随之抗剪强度的下降影响库岸边坡稳定性。研究区内有官厅水库、桑干河和洋河等水系,因此要考虑水文地质这一重要因素。地表水的冲蚀作用也是通过地表径流的影响范围分析来实现。根据灾害的分布规律和水系的相对位置,将水系影响区划分为5个类别。通过对水系距离与灾害的相关性进行回归分析可发现:随着远离水系,灾害发育是呈下降趋势的,

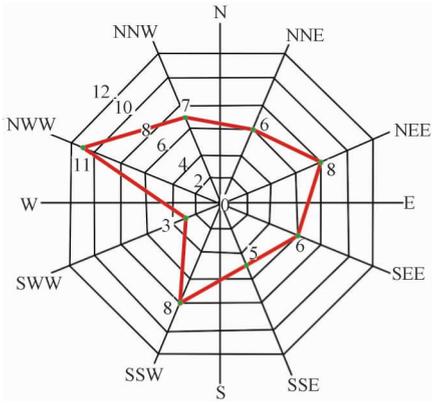


图 4 坡向与地质灾害的相关性

Fig. 4 Relation between geological disaster and aspect

两者呈负相关关系 (见图 3f)。

3.6 降雨量

张家口地区属于温带半干旱大陆性季风气候, 降水一般集中在每年的 7、8、9 三个月。降雨是该地区滑坡灾害发育的主要触发因素, 在岩体风化破碎或节理发育时, 当遇上暴雨和连日阴雨时, 容易引发各种地质灾害^[25]。将研究区累年平均年降雨划分为四个等级, 从相关性分析中可以发现随着降雨量的增加, 整体上灾害体发育数量呈上升趋势, 虽然降雨量大于 500 mm 的地区, 灾害点密度稍有降低, 究其原因, 可能是该地区植被覆盖率较高, 导致岩土体结构相对稳定。从整体上讲, 降雨量与滑坡呈正相关关系 (见图 3g)。

3.7 地震

地震作用与研究区滑坡灾害的孕育密切相关, 地震动峰值加速度 (Peak acceleration of ground motion, 简称 PGA) 作为衡量地震动强弱的重要参量之一, 被广泛应用, 因此选取地震动峰值加速度作为评价指标。根据《中国地震动参数区划图》(GB 18306-2015), 铁路全线地震动峰值加速度区划值为 0.10 g~0.20 g (见图 5), 地震基本烈度在 VI、VII、VIII 度。

3.8 人类工程活动

城乡建设的快速发展对滑坡灾害的孕育具有加速及诱发作用, 如交通道路等线性工程的边坡开挖、切坡建房等都直接或间接地对滑坡产生影响, 因此重点考虑了研究区内的铁路和高速公路对滑坡的影响。将距交通线路的距离划分为五个等级进行缓冲分析, 从统计结果 (见图 3h) 可以发现: 从整体来看, 随着距离的增加灾害点密度是随之减小的, 两者呈负相关关系。

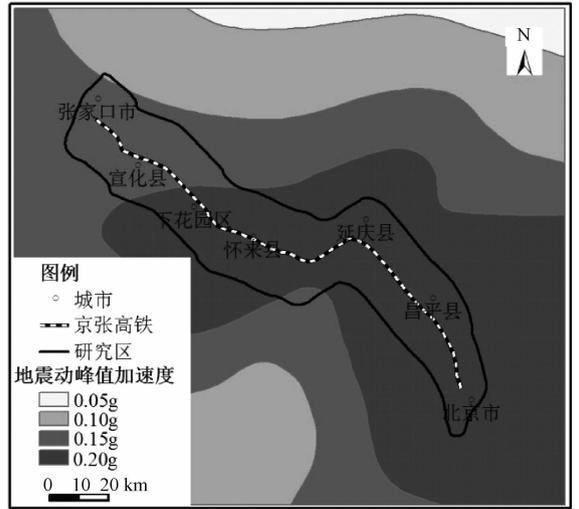


图 5 地震动峰值加速度区划

Fig. 5 Peak acceleration of ground motion zoning

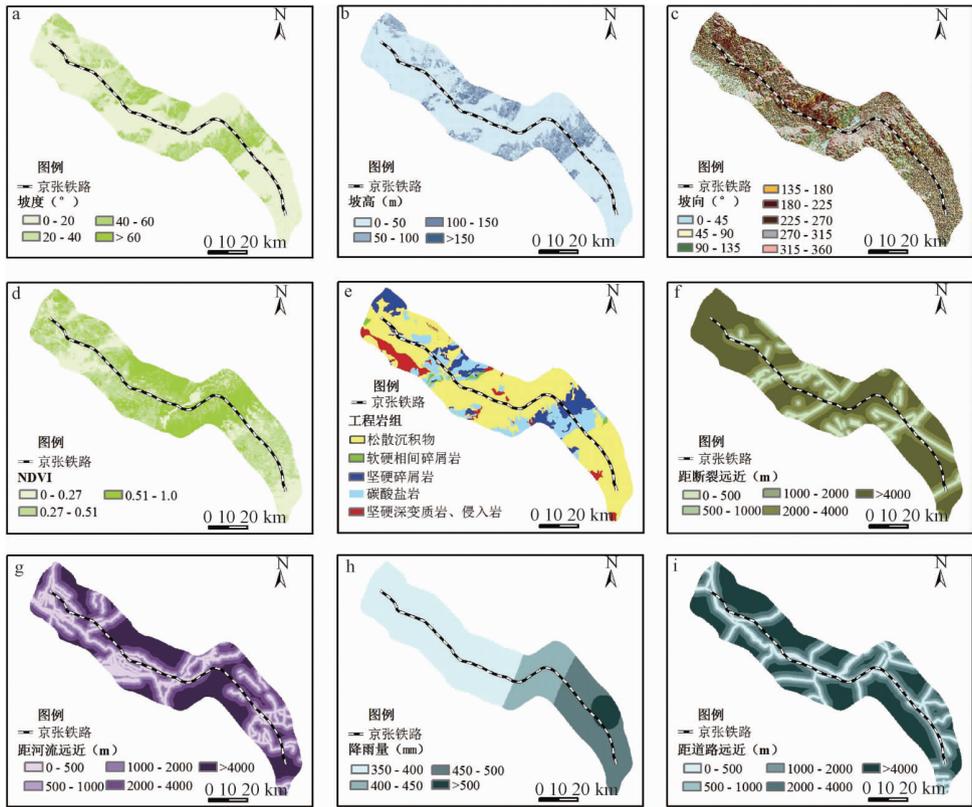
4 地质灾害易发性评价与分析

4.1 致灾因子信息量模型的计算与易发性评价

根据上述研究区滑坡灾害相关性影响因子统计分析结果, 选取地形地貌 (斜坡坡高、坡度和坡向)、归一化植被指数、工程地质岩组、活动断裂、河流侵蚀、年平均降雨、地震和人类工程活动等 10 个指标作为信息量模型计算的基本变量和数值化参数, 结合 ArcGIS 缓冲区分析功能, 得到了各因子的专题图 (见图 6), 各因子图层栅格单元大小为 100 m × 100 m。

利用 ArcGIS 栅格计算器功能, 可以得到滑坡灾害致灾因子量化表 (见表 1)。由滑坡灾害致灾因子量化表可得, 信息量值有正有负, “正值”表明该因素区间对灾害形成的贡献量大于区域本底值或平均水平, 利于灾害发生; “负值”表明该因素区间不利于灾害发生, “0 值”该区域区间对灾害形成的贡献水平中等, 与区域因素本底值相当。从信息量值的排列顺序可以发现: 坡高、坡度、降雨、工程岩组等是控制本地区滑坡孕育的主要因素。

根据计算得到的信息量值, 对各因子图层进行重新赋值, 得到各因子图层对滑坡灾害的信息量图, 利用 ArcGIS 的空间分析功能, 把单因子的信息量图层进行叠加运算, 得到综合信息量分布图。利用 ArcGIS 中的重分类工具将综合信息量分布图进行重新分类, 使用自然断点法将京张铁路



a—坡度；b—坡高；c—坡向；d—NDVI；e—工程岩组；f—距断裂距离；g—距河流距离；h—年降雨量；i—距道路距离

图6 各因子重分类专题图

Fig. 6 The classified distribution maps of various factors

表1 信息量与计算参数

Table 1 Information and calculation parameters

因子	类别	信息量值	排序	因子	类别	信息量值	排序
工程岩组	松散沉积物	0.0187	22	坡度	0 ~ 20°	-0.7591	44
	软硬相间碎屑、浅变质岩	0.9738	4		20 ~ 40°	1.1824	3
	坚硬碎屑岩	-0.3741	38		40 ~ 60°	0.3615	14
	碳酸盐岩	-0.0248	25		> 60°	0.8687	5
	坚硬深变质岩、侵入岩	-0.3752	39		坡向	0 ~ 45°	-0.2027
断层	< 500 m	0.5850	9	45 ~ 90°		0.2429	17
	500 ~ 1000 m	-0.0154	35	90 ~ 135°		-0.1197	29
	1000 ~ 2000 m	-0.3451	18	135 ~ 180°		-0.3618	36
	2000 ~ 4000 m	0.2308	28	180 ~ 225°		0.0186	23
	> 4000 m	-0.1148	13	225 ~ 270°		-0.8150	45
河流	< 500 m	0.4261	11	270 ~ 315°		0.5644	24
	500 ~ 1000 m	0.5392	34	315 ~ 360°	0.2095	19	
	1000 ~ 2000 m	-0.3150	20	坡高	0 ~ 50 m	-0.6947	43
	2000 ~ 4000 m	0.1470	42		50 ~ 100 m	0.6000	8
> 4000 m	-0.6626	41	100 ~ 150 m		1.3104	2	
降雨量	350 ~ 400 mm	-0.5459	6		> 150 m	1.7675	1
	400 ~ 450 mm	0.7361	7		人类工程活动	< 500 m	0.4505
	450 ~ 500 mm	0.6462	31	500 ~ 1000 m		0.2548	16
	> 500 mm	-0.1664	24	1000 ~ 2000 m		-0.3715	37
地震动	0.15 g	-0.4974	40	2000 ~ 4000 m		-0.0263	26
	0.20 g	0.1381	21	> 4000 m		-0.1651	30
植被覆盖率	0 ~ 0.27	0.2974	15				
	0.27 ~ 0.51	-0.1122	27				
	0.51 ~ 1.0	-0.2097	33				

沿线滑坡易发性划分为 5 个等级: 极低易发区、低易发区、中易发区、高易发区、极高易发区 (见图 7)。

延庆城区, 承德市张三营镇, 怀来县西部至鸡鸣驿乡, 宣化区顾家营镇往西北至张家口南。主要地貌单元为北京盆地、怀涿盆地南部、宣化盆地南部。这些地区的共同特点是大都位于盆地内部, 地势起伏不大。该区面积约 2737.43 km², 占全区总面积的 56.93%。

(2) 地质灾害中易发区

主要分布在昌平区百善镇往西北延伸至南口镇一带、延庆区康庄镇、八达岭镇东北, 怀来县东花园镇, 小南辛堡乡、存瑞乡、土木乡的部分地区, 宣化区东北部, 顾家营镇北部。这些地区的特点是位于盆地与基岩山区过渡地带, 灾害规模多以中小型为主, 在降雨和人类工程活动的影响下较易发生地质灾害。该区面积约 970.82 km², 占全区总面积的 20.19%。

(3) 地质灾害极高和高易发区

主要分布在延庆区八达岭山区、新保安镇北部山区、和张家口东南部。这些地区的特点是位于基岩山区内, 岩性复杂, 构造发育; 冲沟切割深, 斜坡体临空面陡峭, 稳定性差; 或处于人类工程活动强烈地区, 在降雨和人类工程活动的影响下容易发生灾害, 危害性大。该区面积约 1099.53 km², 占全区面总面积的 22.86%。

5 主要结论

(1) 基于 GIS 的信息量模型, 从京张高铁沿线的地形地貌、植被覆盖率、地质构造、工程岩组、河流侵蚀、降雨量、地震和人类工程活动等 8 个方面选取了 10 个评价指标, 根据信息量值大小, 确定坡高、坡度、降雨、工程岩组等是控制本地区滑坡孕育的主要因素。通过空间叠加分析, 得到了在建京张高铁沿线滑坡易发性区划图, 将评价结果划分为 5 个等级: 极低易发区、低易发区、中易发区、高易发区和极高易发区。

(2) 对易发性评价结果进行了解释和分析, 通过样本抽查发现, 评价区划图能够较好的将滑坡发育情况反映出来, 随着易发性等级的逐步提高, 灾害实际发生的比率随之增大, 各危险等级与其对应的实际灾害发生情况较吻合, 评价结果较理想。

(3) 研究结果可以为京张高铁建设、沿线滑坡灾害防治、灾害评估预测研究提供基础依据, 同时可为京张高铁地质灾害风险管理提供技术参考。

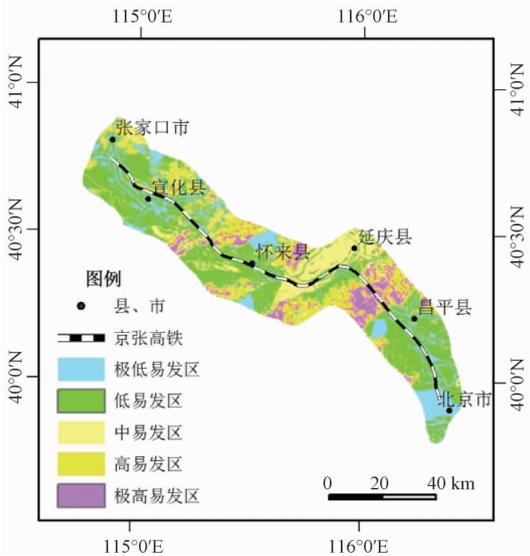


图 7 新建京张高铁滑坡灾害易发性区划图
Fig. 7 Landslide susceptibility assessment map of New Jing-Zhang High-speed railway

4.2 易发性评价结果分析

通过对比研究区易发性区划结果和实际灾害分布关系可知, 在建京张铁路易发性分区与已有的滑坡分布具有较好的相关性 (见表 2), 随着易发性等级的逐步提高, 灾害实际发生的比率 b/a (即等级中的灾害密度与研究区总的灾害密度的比值) 随之增大, 且中易发区、高易发区和极高易发区包含的灾害比例已经超过 85%, 说明这种划分方法得出的危险等级与实际灾害发生情况较吻合, 划分结果比较理想。

表 2 划分的易发性等级与实际灾害分布的对比

Table 2 Comparison between evaluation results and actual disaster distribution

危险度	单元数	a/%	c/个	b/%	b/a
极低易发区	83340	17.33	0	0	0
低易发区	190403	39.60	4	7.40	0.1868
中易发区	97082	20.19	19	35.18	1.7424
高易发区	73358	15.25	15	20.78	1.3626
极高易发区	36595	7.61	16	29.64	3.8948
总计	490778	100	54	100	

注: a 为本类易发性等级的面积占研究区总面积的百分比; b 为落在该易发性分区内的灾害占灾害点总数的百分比; c 为落在该类易发性分区内的灾害数量。

(1) 地质灾害极低和低易发区

主要分布在北京市区, 昌平区大部分地区,

参考文献/References

- [1] Ohlmacher G C, Davis J C. Using multiple logistic regression and GIS technology to predict landslide hazard in northeast Kansas, USA [J]. *Engineering Geology*, 2003, 69 (3/4): 331 ~ 343.
- [2] Dai B F C, Lee C F. Landslide characteristics and slope instability modeling using GIS, Lantau Island, Hong Kong [J]. *Geomorphology*, 2002, 42 (3/4): 213 ~ 228.
- [3] Guo C B, Montgomery D R, Zhang Y S, et al. Quantitative assessment of landslide susceptibility along the Xianshuihe fault zone, Tibetan Plateau, China [J]. *Geomorphology*, 2015, 248: 93 ~ 110.
- [4] Wang QQ, Li W P. A GIS-based comparative evaluation of analytical hierarchy process and frequency ratio models for landslide susceptibility mapping [J]. *Physical Geography*, 2017, 38 (4): 318 ~ 337.
- [5] 杜国梁, 张永双, 高金川, 等. 基于 GIS 的白龙江流域甘肃段滑坡易发性评价 [J]. *地质力学学报*, 2016, 22 (1): 1 ~ 11.
DU Guoliang, ZHANG Yongshuang, GAOJinchuan, et al. Landslide susceptibility assessment based on GIS in Bailongjiang watershed, Gansu province [J]. *Journal of Geomechanics*, 2016, 22 (1): 1 ~ 11. (in Chinese with English abstract)
- [6] 向喜琼, 黄润秋. 基于 GIS 的人工神经网络模型在地质灾害危险性区划中的应用 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2000, 11 (3): 23 ~ 27.
Xiang Xiqiong, Huang Runqiu. Application of GIS-based artificial neural networks on assessment of geohazardrisk [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2000, 11 (3): 23 ~ 27. (in Chinese with English abstract)
- [7] Zhang Y S, Yang Z H, Guo C B, et al. Predicting landslide scenes under potential earthquake scenarios in the Xianshuihe fault zone, Southwest China [J]. *Journal of Mountain Science*, 2017, 14 (7): 1262 ~ 1278.
- [8] Dai F C, Lee C F, Ngai Y Y. Landslide risk assessment and management: an overview [J]. *Engineering Geology*, 2002, 64 (1): 65 ~ 87.
- [9] 张春山, 吴满路, 张业成. 地质灾害风险评估方法及展望 [J]. *自然灾害学报*, 2003, 12 (1): 96 ~ 102.
ZHANG Chunshan, WU Manlu, ZHANG Yecheng. Method and prospect of geological disaster risk assessment [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2003, 12 (1): 96 ~ 102. (in Chinese with English abstract)
- [10] 马寅生, 张业成, 张春山, 等. 地质灾害风险评估的理论与方法 [J]. *地质力学学报*, 2004, 10 (1): 7 ~ 18.
MA Yinsheng, ZHANG Yecheng, ZHANG Chunshan, et al. Theory and approaches to the risk evaluation of geological hazards [J]. *Journal of Geomechanics*, 2004, 10 (1): 7 ~ 18. (in Chinese with English abstract)
- [11] Van Westen C J, VanAsch T W J, Soeters R. Landslide hazard and risk zonation—why is it still so difficult? [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2006, 65 (2): 167 ~ 184.
- [12] 石菊松, 石玲, 吴树仁. 滑坡风险评估的难点和进展 [J]. *地质论评*, 2007, 53 (6): 797 ~ 806.
SHI Jusong, SHI Ling, WU Shuren. Difficulties and problematical aspects of landslide risk assessment: an overview [J]. *Geological Review*, 2007, 53 (6): 797 ~ 806. (in Chinese with English abstract)
- [13] 胡瑞林, 范林峰, 王珊珊, 等. 滑坡风险评估的理论与方法研究 [J]. *工程地质学报*, 2013, 21 (1): 76 ~ 84.
HU Ruilin, FAN Linfeng, WANGShanshan, et al. Theory and method for landslide risk assessment-current status and future development [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2013, 21 (1): 76 ~ 84. (in Chinese with English abstract)
- [14] 缪信, 汤明高, 王自高, 等. 地质灾害危险性评价模型的比较分析与应用 [J]. *水利水电技术*, 2016, 47 (4): 119 ~ 122.
MIAO Xin, TANGMinggao, WANG Zigao, et al. Comparative analysis and application of model for assessment on risk of geological hazard [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2016, 47 (4): 119 ~ 122. (in Chinese with English abstract)
- [15] 吴树仁, 石菊松, 张春山, 等. 地质灾害风险评估技术指南初论 [J]. *地质通报*, 2009, 28 (8): 995 ~ 1005.
WU Shuren, SHI Jusong, ZHANG Chunshan, et al. Preliminary discussion on technical guideline for geohazard risk assessment [J]. *Geological Bulletin of China*, 2009, 28 (8): 995 ~ 1005. (in Chinese with English abstract)
- [16] 高克昌, 崔鹏, 赵纯勇, 等. 基于地理信息系统和信息量模型的滑坡危险性评价——以重庆万州为例 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25 (5): 991 ~ 996.
GAOKechang, CUI Peng, ZHAO Chunyong, et al. Landslide hazard evaluation of Wanzhou based on GIS information value method in the three gorges reservoir [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25 (5): 991 ~ 996. (in Chinese with English abstract)
- [17] 阮沈勇, 黄润秋. 基于 GIS 的信息量法模型在地质灾害危险性区划中的应用 [J]. *成都理工学院学报*, 2001, 28 (1): 89 ~ 92.
RUANShenyong, HUANG Runqiu. Application of GIS-based information model on assessment of geological hazards risk [J]. *Journal of Chengdu University of Technology*, 2001, 28 (1): 89 ~ 92. (in Chinese with English abstract)
- [18] 辛鹏. 陕西省麟游县地质灾害危险性评价 [D]. 北京: 中国地质科学院, 2010.
XINPeng. Study on landslide hazard assessment in Linyou county in Shaanxi province [D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 2010. (in Chinese with English abstract)
- [19] 王涛. 汶川地震重灾区地质灾害危险性评估研究 [D]. 北京: 中国地质科学院, 2010.
WANG Tao. Study on seismic landslide hazard assessment

- in Wenchuan earthquake severely afflicted area [D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Science, 2010. (in Chinese with English abstract)
- [20] Shannon C E. A mathematical theory of communication [J]. Bell Labs Technical Journal, 1948, 27 (4): 623 ~ 656.
- [21] Clerici A, Perego S, Tellini C, et al. A procedure for landslidesusceptibility zonation by the conditional analysis method [J]. Geomorphology, 2002, 48 (4): 349 ~ 364.
- [22] 李晓慧. 宝成铁路凤县段地质灾害危险性评价 [D]. 北京: 中国地质大学 (北京), 2010.
- Li Xiaohui. Geological hazard risk assessment of Bao-Cheng railway in Fengxian country [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing). 2010. (in Chinese with English abstract)
- [23] 郭长宝, 张永双, 王涛, 等. 南北活动构造带中段地质灾害与重大工程地质问题概论 [J]. 地质力学学报, 2017, 23 (5): 707 ~ 722.
- GUO Changbao, ZHANG Yongshuang, WANG Tao, et al. Discussion on geological hazards and major engineering geological problems in the middle part of the north-south active tectonic zone, China [J]. Journal of Geomechanics, 2017, 23 (5): 707 ~ 722. (in Chinese with English abstract)
- [24] 崔玉龙, 邓建辉. 金沙江永善—水富段滑坡分布规律及其形成模式 [J]. 水利水电技术, 2017, 48 (2): 143 ~ 147.
- CUI Yulong, DENG Jianhui. Distribution law and forming mode of landslides along Yongshan-Shuifu section of Jinsha River [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2017, 48 (2): 143 ~ 147. (in Chinese with English abstract)
- [25] 张向营, 张春山, 孟华君, 等. 地震扰动区泥石流起动阈值研究现状及展望 [J]. 灾害学, 2017, 32 (1): 221 ~ 227.
- ZHANG Xiangying, ZHANG Chunshan, MENG Huajun, et al. The review and development trend of critical threshold value of debris flow in earthquake-influenced area [J]. Journal of Catastrophology, 2017, 32 (1): 221 ~ 227. (in Chinese with English abstract)