

北京东部山区地质灾害危险性评价

蔡佳明

(中色资源环境工程股份有限公司,北京 101300)

摘要: 地质灾害危险性评价是地质灾害风险管理重要一环。以北京东部山区斜坡地质灾害为例,选取归一化植被指数(NDVI)、起伏度、坡度、降雨、坡向、距道路距离、距断层距离、工程地质岩组8个因子,基于信息量法和主成分分析(PCA)加权信息量法对斜坡类地质灾害危险性进行预测,运用地理探测器评价各因子对地质灾害危险性的解释力。结果表明:地质灾害高危险区主要分布在东北部,低危险区分布在西部河谷及西南部平原区。两种评价方法都能很好预测研究区危险性,普通信息量法精度更高,但空间上在平原区PCA加权信息量法预测更合理。地理探测器结果表明距道路距离对普通信息量模型评价结果解释力达54.8%;地形起伏度、降雨、工程地质岩组对PCA加权评价结果解释力分别为55.8%、32.6%、28%,其他因子解释力较小。评价结果可为研究区应急管理及防灾减灾工作提供参考。

关键词: 信息量法;主成分分析;地质灾害;地理探测器

中图分类号: P694;P56;X4 **文献标识码:** A

RISK ASSESSMENT OF GEOLOGICAL DISASTERS IN MOUNTAINOUS AREAS EAST OF BEIJING

CAI Jia-ming

(Resources & Environmental Engineering Co., Ltd, Beijing 101300, China)

Abstract: The Risk assessment of geological disaster susceptibility is one of the important processes of geological disaster risk management. In the eastern Beijing, for example, select the normalized vegetation(NDVI), undulation, slope, rainfall, aspect, road distance, fault distance, engineering geological rock group 8 factors, based on information and PCA weighted information method for regional prediction of slope geological disaster, and use the geographical detector to evaluate the interpretation of geological disaster prone. The results show that the high risk area of geological disasters is mainly distributed in the northeast, and the low danger area is distributed in the western valley and the southwest plain area. Both evaluation methods can predict the risk of the research area well, and the general information method has higher accuracy, but the PCA is more reasonable in the plain area. The results of geographic detector show that the explanatory power of road distance is 54.8%; the explanatory power of PCA weighted evaluation results of topographic relief, rainfall and engineering geological rock groups is 55.8%, 32.6% and 28% respectively, while other factors are small. The evaluation results can provide reference for emergency management and disaster prevention and mitigation in the study area.

Key words: information value model; principal component analysis; geological disaster; geographic detector

地质灾害是在自然或人为因素下形成的危及人类生命财产安全的地质作用或现象,常见如崩塌、滑坡、泥石流、地面塌陷、地裂。我国是世界上地质灾害最严重的国家之一,地质灾害严重制约着山地丘陵区社会经济发展^[1]。科学有效地进行地质灾害易发性、危险性评价能够指导在事前完善风险管理措施,对其造成的人员伤亡、财产损失、影响规模进行控制。不同评价因子、评价单元、评价方法所预测的结果合理性差别巨大。地质灾害危险性评价一般过程为选取相应孕灾因子数据,确定评价单元及模型,建立相应指标。常用评价单元有栅格单元、斜坡单元、唯一条件单元、地貌单元^[2-3],评价方法有定性和定量方法,定性分析方法依赖于人工经验,如层次分析法^[4]。近年来,随着 GIS 和 RS 技术的发展,评价指标体系愈加丰富与完善,评价方法更加多元化,包括频率比法^[5]、证据权法^[6]、信息量法^[7]、确定性系数法^[8-9]、因子分析^[10]、回归分析^[11]、地理加权回归^[12]、神经网络^[13-14]等统计、回归与分类算法。此外,多模型耦合评价方法也逐渐运用到易发性与危险性评价中,如确定性系数法、信息量法与逻辑回归耦合评价^[15-16]、确定性系数与支持向量机耦合评价^[17]、聚类分析与信息量耦合评价^[18]、信息量和机器学习与神经网络耦合评价^[19-20]等,多模融合的评价方法在评价精度、合理性等方面比单一模型具有更明显的优越性。本文选取两种信息量模型对北京东部山区地质灾害危险性进行对比研究,分析评价结果的精度及合理性,可为研究区及相似地理条件的区域防灾减灾工作提供参考和指导。

1 研究区概况

研究区位于北京市东部,总面积约 600 km²,地势东北高,西南及南部低,区内大部分为低山、中山地貌,山前为环带状浅山丘陵,河谷处为平原,区内流经主要河流为洳河;本区为温带大陆性季风气候,四季分明,年平均气温 11.7 °C,年降水量 629.4 mm,降水时空不均,夏季占全年降水量的 72%。区内燕山期、印支期构造活动强烈,地层较简单,除少量太古界变质岩外,出露的均为中元古界沉积地层及第四系残积、冲洪积地层,主要岩性为白云岩、白云质砂岩。受地形地貌、构造、岩性等下垫面性质及降雨时空不均和人类工程活动的影响,孕灾地质条件复杂,发育较多斜坡类地质灾害,地理位置见图

1。

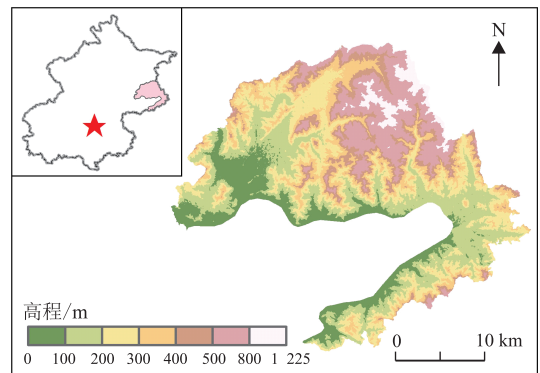


图 1 研究区地理位置

2 材料与方法

2.1 数据来源

样本数据为地质灾害调查崩塌、滑坡地质灾害及隐患数据,研究区共发育斜坡类地质灾害及隐患样本数据 630 处,评价单元采用规则格网,依据经验公式^[21],采用 30 m × 30 m 网格,研究区共分为 688 004 个评价单元。

2.2 评价因子

崩塌滑坡等斜坡类灾害多因边坡失稳造成^[22],研究区多为降雨型诱因的突发地质灾害,下垫面地形地貌、地质构造以及地层岩性的条件,降雨的时空不均,加之削坡建房、道路建设等破坏斜坡稳定性的人类工程活动强度大,因此地质灾害较易发。通过分析孕灾环境背景,选取归一化植被指数、地形起伏度、坡度、降雨、坡向、距道路距离、距断层距离、工程地质岩组 8 个因子作为危险性评价指标因子,采用自然段点法分级的连续因子能够很好反映指标因子内部空间差异,且通过统计验证能反映地质灾害发育密度差异并且使分类不冗余,综合地质灾害与各因子关系确定采用自然断点法进行连续指标分类(图 3),各指标如下:

(1) 归一化植被指数(NDVI)

归一化植被指数反映地表植被发育状况,植被覆盖对斜坡演变及其稳定性、水土流失具有一定影响。于地理空间数据云获取研究区 2021 年 6~8 月 Landsat-8OLI 遥感影像数据,通过式(1)计算研究区夏季 NDVI:

$$NDVI = (NIR - R) / (NIR + R) \quad (1)$$

式中,NIR 为近红外波段;R 为可见光红色波段。

(2) 起伏度

地形地貌条件是控制斜坡类灾害发育的基本条件^[8]。起伏度影响着自然地貌条件及人类工程活动强度,基于研究区 30 m 数字高程模型计算起伏度,并通过自然段点法重分类为 5 个级别。

(3) 坡度

地形坡度通过影响坡体表面径流、坡体内地下水的补给以及表面堆积物、内部物质的运移改变坡体应力分布,继而影响其稳定性。

(4) 降雨

降雨是研究区斜坡类地质灾害发生的重要诱发因素。本区降雨时空不均,夏季占全年降雨量的 70% 以上,空间上具有从东北至西南逐渐降低的趋势,降雨形成的地表水对斜坡体完整性具有机械外力破坏作用;而入渗到坡体内部的部分则加速了岩土体风化松散,增加了坡体重力,降低了坡体的抗剪能力及稳定性。

(5) 坡向

不同坡向因斜坡光照、水热条件不同,在小气候及微环境上存在差异,坡体物质外部风化条件不同,导致斜坡岩土体力学性质的差异,进而形成了不同坡向上稳定性差异。按照等分法将空间坡向分为 8 个方向。统计不同坡向上发生的斜坡地质灾害数量及面积,由图 2 可知,斜坡地质灾害发生具有明显的南、西南、西偏向。

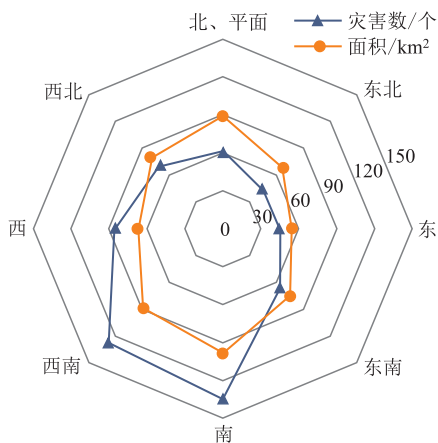


图 2 坡向与地质灾害关系

(6) 距道路距离

人类工程活动是地质灾害重要的诱发因素,研究区多为山区,道路建设、削坡建房、矿产开采是主要的人类工程活动。道路建设多对原有斜坡进行开挖改造,使原有斜坡失去稳定性。研究区道路与地质灾害关系明显,距离道路距离越近,灾害数量和密度越大,按照 0~100 m、100~200 m、200~300 m、300~500 m、>500 m 的距离将研究区分为 5 类。

(7) 距断层距离

地质构造尤其是活动断裂通过对岩土体结构进行破坏,为崩塌滑坡等地质灾害创造条件,经统计,研究区距断层距离越近的范围,地质灾害点越密集。根据构造影响尺度范围,将距断层距离分为 0~500 m、500~1 000 m、1 000~1 500 m、1 500~2 000 m、>2 000 m 此 5 类。

(8) 工程地质岩组

地层岩性与地质灾害的活动关系密切,影响着斜坡类地质灾害发育的规模和类型。结构完整、坚硬致密的岩土体中地质灾害很少发育,而结构破碎、松散的岩土体多利于地质灾害发育。研究区主要地层岩性为坚硬碳酸盐岩、碎屑沉积岩、太古界斜长角闪片麻岩,火成岩极少。研究区工程地质岩组分为坚硬岩组、较坚硬岩组、松散岩组 3 类。

2.3 评价因子相关性分析

评价因子的多重共线性会导致信息量模型评价精度降低,因此在进行信息量法计算前对评价因子进行皮尔逊相关性检验,结果见表 1。除起伏度与坡度相关系数大于 0.5 相关性较高外,起伏度与其他因子相关性及其他因子之间相关性较小,因此保留所有因子参与计算。

2.4 研究方法

2.4.1 信息量法

信息量模型以各种致灾因子条件组合下综合信息量值的大小来反映评价单元的危险性高低。具体是通过各个评价因子进行分类分级,统计各因子各级别单元总数与地质灾害分布单元数量的关系,结合地质灾害分布单元总数及研究区划分单元总

表 1 评价因子相关性系数矩阵

评价因子	NDVI	起伏度	坡度	降雨	坡向	距道路距离	距断层距离	工程地质岩组
NDVI	1							
起伏度	0.474	1						
坡度	0.315	0.553	1					
降雨	0.305	0.370	0.210	1				
坡向	-0.053	0.034	-0.020	0.031	1			
距道路距离	0.236	0.352	0.292	-0.023	-0.030	1		
距断层距离	-0.160	-0.217	-0.118	-0.043	-0.023	0.012	1	
工程地质岩组	-0.363	-0.483	-0.366	-0.181	-0.009	-0.330	0.124	1

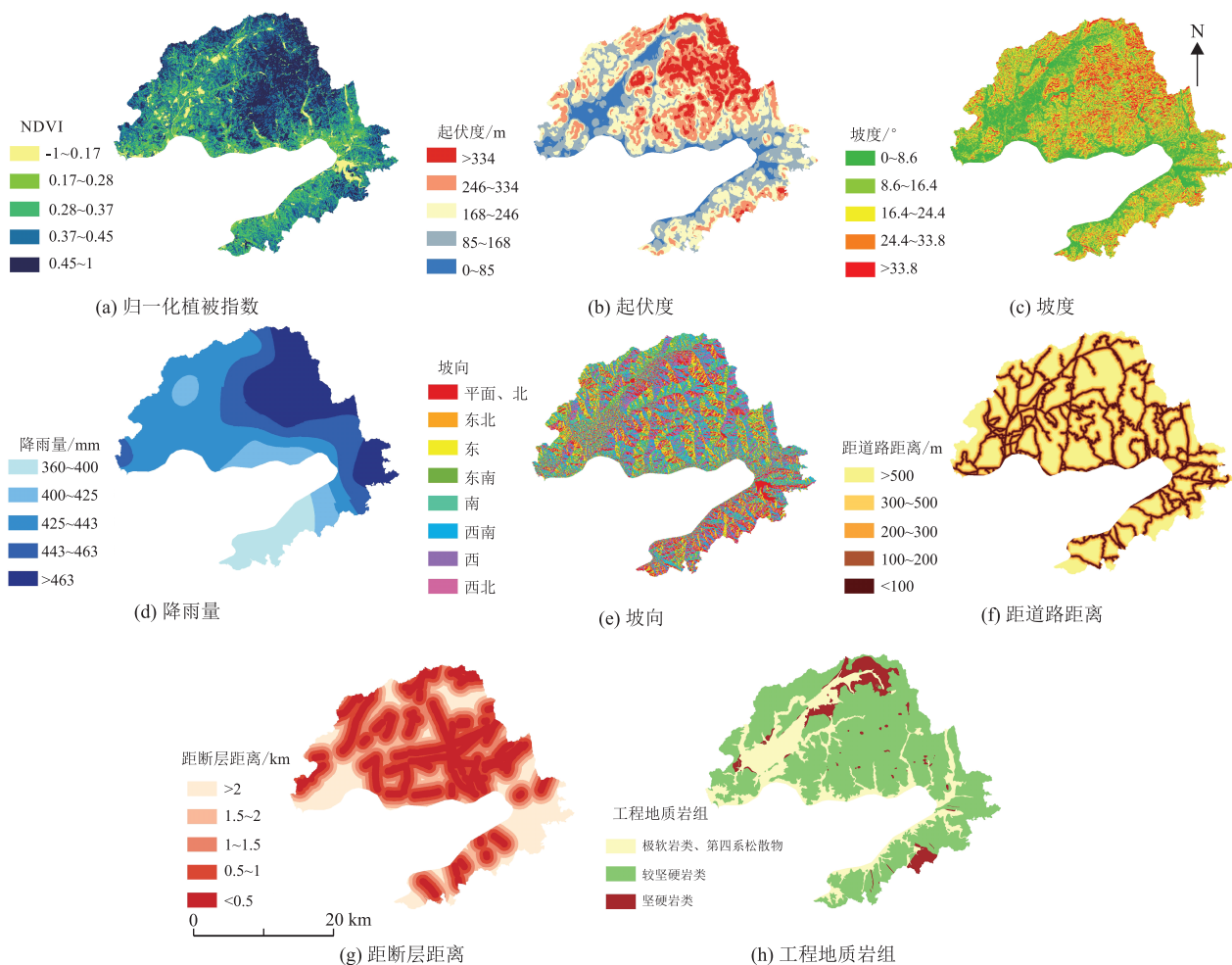


图3 评价因子分级图

数,通过式(2)计算单个因子某一分级状态下的信息量值,将同一评价单元所有因子信息量叠加即为该评价单元综合信息量值。

$$I_{xj} = \ln \frac{N_j/N}{S_j/S} \quad (j = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (2)$$

式中, I_{xj} 为对应因子 X 、 j 状态(或区间)下本类地质灾害发生的信息量; N_j 为因子 X 、 j 状态(或区间)下地质灾害分布的单元总数或地质灾害点数量; N 为调查区本类地质灾害分布的单元总数或地质灾害点总数; S_j 为因子 X 、 j 状态(或区间)分布的单元数或面积; S 为调查区单元总数或面积。

2.4.2 主成分分析(PCA)

主成分分析是一种将多变量降维处理的统计方法,通过对初始变量进行正交变换,将各原始变量转化为互不相关的新变量,每个新变量都是初始变量的重新组合,按新变量解释初始变量的方差大小按从大到小排列作为各个主成分。主成分分析能够有效解决变量间的共线性问题,如式(3),主成分 j 特征值占总特征值之和的比例 F_j 表示主成分 j 解释

初始变量总方差的大小,初始因子 i 在主成分 j 上的系数 a_{ij} 与 F_j 乘积表示因子在该主成分上的贡献度,其在所有主成分上的贡献度之和即为因子 i 相对权重。假设有 m 个初始变量,通过选取和初始变量数量相同的主成分,通过式(4)可计算初始变量 i 的相对权重,然后通过归一化求得各指标因子权重。由于影响地质灾害危险性各因素本身并不是等价的,因此采用 PCA 法求得各因子权重,通过式(5)计算因子 $X_1 - X_m$ 的加权信息量,以此代表地质灾害危险性高低。

$$F_j = \frac{\lambda_j}{\sum_{j=1}^m \lambda_j} \quad (3)$$

$$W_i = \sum_{j=1}^m (a_{ij} \times F_j) \quad (4)$$

$$A = W_1 X_1 + W_2 X_2 + W_3 X_3 + \dots + W_m X_m \quad (5)$$

式中, F_j 为主成分 j 特征值占总特征值之和的比例; λ_j 为主成分 j 的特征值; W_i 为因子 i 的相对权重; a_{ij} 为因子 i 在主成分 j 上的系数; A 为主成分分析加权信息量。

表 2 评价因子分级及信息量值

评价因子	因子状态	灾害数	面积/km ²	信息量	排序
工程地质岩组	坚硬	70	39.77	0.545	4
	较坚硬	434	442.68	-0.041	17
	松散	129	138.22	-0.090	18
坡度/°	0~8.6	141	157.62	-0.132	19
	8.6~16.4	229	171.81	0.266	8
	16.4~24.4	151	148.98	-0.007	15
	24.4~33.8	83	100.45	-0.212	23
	>33.8	29	41.29	-0.374	29
坡向	北	61	88.72	-0.395	31
	东北	44	67.46	-0.448	33
	东	45	54.54	-0.213	24
	东南	65	75.07	-0.165	22
	南	135	98.88	0.291	7
	西南	128	89.02	0.342	6
	西北	85	67.06	0.216	9
起伏度/m	0~85	7	56.10	-2.102	41
	85~168	170	150.97	0.098	13
	168~246	236	195.38	0.168	11
	246~334	167	141.63	0.144	12
	>334	53	75.87	-0.380	30
降雨量/mm	360~400	21	58.09	-1.038	38
	400~425	27	60.76	-0.832	36
	425~443	148	229.21	-0.458	34
	443~463	121	121.60	-0.026	16
	>463	316	149.99	0.724	3
NDVI	<0.17	27	25.61	0.032	14
	0.17~0.28	121	46.75	0.930	2
	0.28~0.37	223	176.15	0.215	10
	0.37~0.45	180	220.44	-0.223	25
	0.45~1	82	151.01	-0.631	35
距断层距离/km	<0.5	272	172.37	0.435	5
	0.5~1	119	146.86	-0.231	27
	1~1.5	96	118.15	-0.228	26
	1.5~2	66	75.51	-0.155	21
	>2	80	107.81	-0.319	28
距道路距离/m	<100	469	110.46	1.425	1
	100~200	59	87.44	-0.414	32
	200~300	32	73.87	-0.857	37
	300~500	29	117.03	-1.416	39
	>500	44	231.78	-1.682	40

2.4.3 地理探测器

地理探测器是一种用于探究空间分层异质性,揭示其驱动因素的统计学方法。将研究区分为几个子区域,如子区域方差之和小于区域总方差,则存在空间分异性;如果某个自变量因子对因变量有重要影响,那么自变量和因变量的空间分布应相似^[23]。地理探测器中因子探测器主要用于探测自变量因子 X 对因变量 Y 的空间分异解释程度。以普通信息量值及加权信息量值作为因变量,将各个评价因子作为解释变量来探究影响地质灾害危险性的背后驱动力。

3 结果与分析

3.1 信息量法与 PCA 加权信息量法评价结果分析

评价因子各状态下的信息量见表 2,通过 SPSS 软件进行 PCA 分析,结果见表 3,经计算各指标权重见表 4。表 2 中评价因子各状态信息量最大为距道路 100 m 的 1.425,最小为起伏度 0~85 m 的 -2.102。道路因子各状态间方差最大,表明其与地质灾害发育分布规律更明显,距离道路越近,灾点数量越多。

将信息量法和 PCA 加权的的信息量值通过自然段点法分为极高、高、中、低、极低危险区,结果见图 4、表 5。普通信息量法的极高、高、中、低、极低危险区面积分别为 67.34 km²、98.20 km²、187.78 km²、

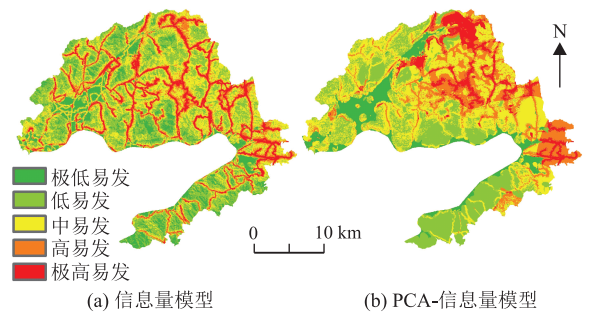


图 4 评价结果分区

表 3 主成分分析结果

成分因子	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7	PC8
NDVI	-0.747	0.16	0.098	0.015	-0.181	0.315	0.101	0.515
起伏度	0.473	0.485	0.172	-0.119	-0.382	-0.093	0.585	0.032
坡度	-0.117	0.609	0.361	0.093	0.388	-0.513	-0.209	0.136
降雨	0.582	-0.537	0.131	0.16	0.264	-0.136	0.141	0.471
坡向	-0.051	-0.224	0.575	0.558	-0.509	-0.102	-0.161	-0.105
距道路距离	-0.412	-0.285	0.57	-0.151	0.406	0.086	0.412	-0.242
距断层距离	0.354	0.004	0.513	-0.62	-0.127	0.254	-0.375	0.073
工程地质岩组	0.381	0.376	0.107	0.449	0.323	0.626	-0.036	-0.054
特征值	1.577	1.192	1.116	0.969	0.943	0.863	0.754	0.585
方差贡献率(%)	19.712	14.903	13.956	12.111	11.792	10.792	9.425	7.311

表 4 评价指标权重

指标因子	NDVI	起伏度	坡度	降雨	坡向	距道路距离	距断层距离	工程地质岩组
权重	-0.008	0.215	0.138	0.179	0.007	0.046	0.038	0.385

表 5 危险性分区结果

评价方法	危险等级	分级面积/km ²	面积占比	灾害数量	灾害占比	灾害面积频率比
信息量法	极低危险区	73.82	0.119	3	0.005	0.040
	低危险区	192.06	0.310	34	0.054	0.173
	中危险区	187.78	0.303	48	0.076	0.250
	高危险区	98.20	0.159	110	0.174	1.096
	极高危险区	67.34	0.109	438	0.692	6.362
PCA-信息量法	极低危险区	54.37	0.088	7	0.011	0.126
	低危险区	164.21	0.265	25	0.039	0.149
	中危险区	219.51	0.355	116	0.183	0.517
	高危险区	129.60	0.209	207	0.327	1.562
	极高危险区	51.52	0.083	278	0.439	5.278

192.06 km²、73.82 km²，对应的灾害数量 438、110、48、34、3 个，PCA 加权信息量法极高、高、中、低、极低危险区面积分别为 51.52 km²、129.60 km²、219.51 km²、164.21 km²、54.37 km²，对应灾害数量 278、207、116、25、7 个。由灾害面积频率比可知普通信息量法相对 PCA 在极高危险区频率比更高，在极低危险区频率比更低，表明普通信息量法评价效果更好；在高危险区频率比小于 PCA，低危险区频率比大于 PCA，表明对这两个危险等级评价效果不如 PCA。从空间分布上看，普通信息量法的极高和高危险区具有明显沿道路两侧分布特征，而 PCA 加权信息量法的极高和高危险区则集中连片分布于研究区东北及东部部分地区，普通信息量法其他等级危险区分布相对 PCA 加权信息量法也较为分散。由评价因子各状态信息量值可知，普通信息量法结果受道路因子的信息量影响明显，其方差解释了大部分总信息量的方差，因此其危险性结果分区图与道路因子分区相关性明显，极高和高危险区沿道路呈明显条带状分布，通过统计两种方法的信息量直方图，可知普通法方差和值域更大，在山区高危险区评价效果更好，但距离道路近的区域总信息量十分高，盖过其他因子的影响，导致平原区道路密集、降雨较少、地形地貌条件好等不利于地质灾害发生的区域同样划为极高、高危险区。加权信息量通过权重削弱了道路对结果的影响，在平原区评价更合理。

3.2 模型精度评价及影响因素分析

ROC 曲线已广泛应用于地质灾害危险性评价结果分析中，其线下面积越接近于 1，表明模型的效果越好。普通法和 PCA 加权法的 ROC 曲线见图 5，曲线线下面积 AUC 值分别为 0.857 和 0.788，两种方法 AUC 都较高，都能很好地预测研究区斜坡

地质灾害危险性，普通信息量法 AUC 更高是由于研究区斜坡地质灾害与距道路距离评价因子的关系十分明显，评价结果受单个因子主导，危险性分区也与道路单因子分布强相关性，而 PCA 加权信息量法通过权重削弱了道路因子对结果的影响，模型精度略有下降，但空间上，在平原道路密集区评价更合理。

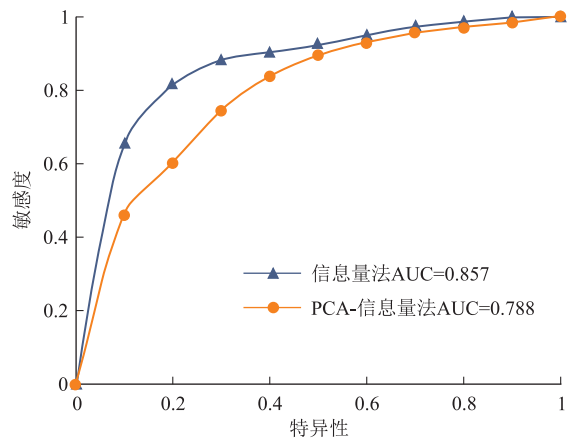


图 5 ROC 曲线

地理探测器因子探测能探究全局地理空间分布的背后驱动力，地理探测器因子探测结果见表 6，普通信息量法道路对结果的解释力达 54.8%，降雨和起伏度解释力分别为 10.3%、12.8%，除道路外其他因子对结果解释力都较小；由于地质灾害危险程度是多种因素共同作用的结果，PCA 法消除了道路的强影响，起伏度、降雨、工程地质岩组对结果解释力分别为 55.8%、32.6%、28%，综合普通信息量法和 PCA 加权信息量法，表明除距道路距离外，起伏度、降雨、工程地质岩组类型同样对危险性评价结果有重要的解释作用。

表 6 地理探测器因子探测结果

危险性指标因子	NDVI	起伏度	坡度	降雨	坡向	距道路距离	距断层距离	工程地质岩组
信息量法 q statistic	0.045	0.128	0.032	0.103	0.085	0.548	0.087	0.012
PCA-信息量法 q statistic	0.109	0.558	0.105	0.326	0.005	0.025	0.054	0.280

4 结论

通过分析研究区斜坡类地质灾害与孕灾因子、诱灾因素关系,选取 8 个因子采用信息量法和 PCA 加权信息量法对斜坡类地质灾害危险性进行预测评价,运用地理探测器探究影响地质灾害危险性背后驱动力,得到结论如下:

(1) 两种方法都能很好地预测研究区危险性,ROC 曲线及 AUC 值表明普通信息量法精度更高,但空间上,平原区,PCA 加权法对极高和较高危险区评价结果更合理。

(2) 研究区极高和高危险区主要分布于东北部及东部,而低危险和极低危险区主要分布在西部河谷及平原区。

(3) 研究区斜坡类地质灾害危险性主要受距道路距离影响,工程地质岩组类型、降雨、地形起伏度同样具有较强的解释力。

参考文献

- [1] 房浩,李媛,杨旭东,等. 2010~2015 年全国地质灾害发育分布特征分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2018, 29(5): 1-6.
- [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] 赵晓燕,谈树成,李永平. 基于斜坡单元与组合赋权法的东川区地质灾害危险性评价[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2021, 43(2): 299-305.
- [4] 金艳珠,谈树成,虎雄岗,等. 基于层次分析法与 GIS 相结合的岩溶塌陷地质灾害易发性分区评估——以云南省师宗县为例[J]. 热带地理, 2012, 32(2): 173-178.
- [5] 邓小龙,李丽慧,李星星,等. 北京市平谷区地质灾害易发性评价研究[C]. 中国科学院地质与地球物理研究所 2015 年度(第 15 届)学术论文汇编——工程地质与水资源研究室[C]. 中国科学院地质与地球物理研究所, 2016: 556-567.
- [6] 薛文洋,高猛,朱亚胜. 基于 ArcGIS 与证据权法的崩塌易发性评价[J]. 世界有色金属, 2019, (13): 154-156.
- [7] 王佳佳,殷坤龙,肖莉丽. 基于 GIS 和信息量的滑坡灾害易发性评价——以三峡库区万州区为例[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(4): 797-808.
- [8] 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, 18(1): 15-26.
- [9] 刘艳芳,方佳琳,陈晓慧,等. 基于确定性系数分析方法的秭归县滑坡易发性评价[J]. 自然灾害学报, 2014, 23(6): 209-217.
- [10] 孟祥瑞,裴向军,刘清华,等. 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[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2016, 27(3): 106-115.
- [11] 蒋卫国,饶品增,曹冉,等. 基于多回归模型和空间精度验证的地质灾害易发性评价研究(英文)[J]. Journal of Geographical Sciences, 2017, 27(4): 439-462.
- [12] 饶品增,曹冉,蒋卫国. 基于地理加权回归模型的云南省地质灾害易发性评价[J]. 自然灾害学报, 2017, 26(2): 134-143.
- [13] 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): 26-30.
- [14] 刘飞,秦胜伍,乔双双,等. 基于神经网络模型的斜坡地质灾害易发性评价:以吉林永吉为例[J]. 世界地质, 2019, 38(4): 1166-1176.
- [15] 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.
- [16] 樊芷吟,苟晓峰,秦明月,等. 基于信息量模型与 Logistic 回归模型耦合的地质灾害易发性评价[J]. 工程地质学报, 2018, 26(2): 340-347.
- [17] 李远远,梅红波,任晓杰,等. 基于确定性系数和支持向量机的地质灾害易发性评价[J]. 地球信息科学学报, 2018, 20(12): 1699-1709.
- [18] 何静,刘强,许丁友,等. 基于聚类-信息量耦合模型下的广元市滑坡灾害易发性评价[J]. 测绘与空间地理信息, 2020, 43(12): 25-31.
- [19] 黄立鑫,郝君明,李旺平,等. 基于 RBF 神经网络-信息量耦合模型的滑坡易发性评价——以甘肃岷县为例[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2021, 32(6): 116-126.
- [20] 周超,殷坤龙,曹颖,等. 基于集成学习与径向基神经网络耦合模型的三峡库区滑坡易发性评价[J]. 地球科学, 2020, 45(6): 1865-1876.
- [21] 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): 86-92+161.
- [22] 罗守敬,王珊珊,付德荃. 北京山区突发性地质灾害易发性评价[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2021, 32(4): 126-133.
- [23] 王劲峰,徐成东. 地理探测器:原理与展望[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 116-134.