

澠池县地质灾害敏感因子分析及易发性评价

Sensitivity Factor Analysis and Susceptibility Evaluation of Geological Hazards in Mianchi County

杨智强, 魏中凯, 李锐鹏

(河南省地质矿产勘查开发局第四地质勘查院, 河南 郑州 450000)

摘要: 为有效评价不同孕灾因子对地质灾害发育的敏感性及易发性, 以澠池县为实例背景, 开展了地质灾害孕灾条件分析, 通过确定系数法、信息量模型分别评价孕灾因子对地质灾害的敏感性及易发性。结果表明: 县域内的孕灾因子相对较多, 主要包括地貌因子、高程因子、坡度因子、地质构造因子及地层岩性因子; 在敏感性分析方面, 5类孕灾因子的敏感性存在较大差异, 敏感性由高向低顺序为: 高程因子 > 坡度因子 > 地质构造因子 > 地貌因子 > 地层岩性因子; 在易发性分析方面, 高易发区的分布面积比例为 17.66%, 中易发区的分布面积比例为 30.53%, 低易发区的分布面积比例为 28.52%, 非易发区的分布面积比例为 23.29%。通过研究, 可为该县灾害防治提供坚实的理论基础。

关键词: 孕灾因子; 确定系数法; 信息量模型; 敏感性; 易发性

中图分类号: P642 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2024) 03-0086-06

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2024.03.017

YANG Zhiqiang, WEI Zhongkai, LI Ruipeng

(The Fourth Geological Exploration Institute of Henan Geology and Mineral Bureau, Zhengzhou 450000, China)

Abstract: In order to effectively evaluate the sensitivity and susceptibility of different disaster factors to geological disaster development, Mianchi County was taken as an example background to conduct an analysis of its geological disaster pregnant conditions. The sensitivity and susceptibility of geological disaster pregnant factors to disasters were evaluated using the coefficient determination method and information quantity model, respectively. The analysis results show that Mianchi County has relatively many disaster inducing factors, mainly including geomorphic factors, elevation factors, slope factors, tectonics factors and formation lithology factors; In terms of sensitivity analysis, there are great differences in the sensitivity of the five types of hazard factors. The sensitivity order is: elevation factor > slope factor > tectonics factor > geomorphic factor > formation lithology factor; In terms of susceptibility analysis, the distribution area proportion of high susceptibility areas is 17.66%, the distribution area proportion of medium susceptibility areas is 30.53%, the distribution area proportion of low susceptibility areas is 28.52%, and the distribution area proportion of non susceptibility areas is 23.29%. Through the study, a solid theoretical foundation can be provided for disaster prevention and control in Mianchi County.

Keywords: geological hazards; determination of coefficient method; information quantity model; sensitivity; susceptibility

0 引言

近年, 我国地质灾害较为频发, 造成了大量的人员伤亡及经济损失。为有效指导地质灾害防治, 开展县域范围内的地质灾害敏感性分析及易发性评价显得格外重要^[1-3]。目前, 已有不少学者开展了相

作者简介: 杨智强 (1987—), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 地质 (水工环地质)。

收稿日期: 2023-05-21

关研究,其中,在地质灾害敏感性分析方面,李霞等^[4]利用证据权法开展了滑坡敏感性分析;薛永安等^[5]通过确定系数法和支持向量机开展灾害敏感性评价。在灾害易发性分析方面,徐奎等^[6]采用强化学习评估了山洪灾害的易发性;马啸等^[7]基于随机森林模型和频率比模型评价了滑坡灾害的易发性。上述研究虽取得了相应成果,但限于地质灾害发育的区域性特征差异,仍有必要结合具体项目区开展针对性研究。以澠池县为例,先结合其地质条件,开展地质孕灾条件分析,并通过确定系数法、信息量模型分别开展评价孕灾因子对灾害的敏感性及其易发性,以期为县域内灾害防治提供一定的技术指导。

1 工程概况

1.1 地质条件

1.1.1 地形地貌

澠池县属秦岭余脉,南北地貌差异较大,有显著分区特征,可分为4类地貌类型,其中,县域东北部为构造中山地貌,约占县域面积的4.80%,相对高差为300~500 m,地形起伏较大;县域北部为剥蚀低山地貌,约占县域面积的47.91%,地形形态多具“V”形,地形复杂;县域中南部为剥蚀丘陵地貌,约占县域面积的42.73%,相对高差为40~80 m,起伏相对较小;河谷阶地地貌主要沿河流展布,约占县域面积的4.56%,高差30~80 m,起伏相对较小。

1.1.2 地层岩性

区内第四系地层主要以粉质黏土、黏土及砾石层为主,县域内广泛分布。下覆基岩主要为沉积岩,其次是岩浆岩,沉积岩岩性主要含白云岩、砂岩、灰岩、泥岩等;岩浆岩岩性主要含石英斑岩、石英脉及重晶石脉。

1.1.3 地质构造

区内地质构造较发育,其中,褶皱构造主要包括岱嵯寨背斜和澠池向斜,还有少量次级褶皱;断裂构造主要包含北东向断裂构造和北西向断裂构造,各发育有3组断层。

1.1.4 水文地质条件

按照赋存条件,县域内各类地下水均有发育,其补给来源主要为降雨,排泄方式主要为蒸发、向河流排泄。

2 灾害发育特征

县域范围内地质灾害总数主要包括132处,灾害类型主要为滑坡、崩塌、泥石流、地面塌陷及地裂缝,各类灾害的发育特征存在一定差异。

为充分掌握澠池县县域范围内的灾害发育特征,再对其主要的孕灾条件进行分析。

2.1 地形地貌的孕灾条件

地形地貌是地质灾害形成的必要孕灾因素,重点从地貌、高程及坡度三方面分析地形地貌对地质灾害的控制作用。

(1) 地貌。对不同地质灾害在各地貌中的分布个数进行统计,结果见表1。由表1可知,滑坡、崩塌及泥石流主要发育在剥蚀低山地貌中;地面塌陷、地裂缝主要发育在剥蚀丘陵地貌中。

表1 不同灾害与地貌关系分布统计
Table 1 Distribution statistics of different disasters and landforms /处

地貌	构造中山	剥蚀低山	剥蚀丘陵	河谷阶地
滑坡	2	34	8	2
崩塌	1	17	24	2
泥石流	0	4	0	0
地面塌陷	0	2	33	2
地裂缝	0	0	1	0

(2) 高程。结合县域内高程分布特点,划分为5个高程区间,即区间1(≤ 300 m)、区间2(300~500 m)、区间3(500~700 m)、区间4(700~1000 m)和区间5(≥ 1000 m),各区间对应分布比例依次为3.79%、38.64%、49.24%、8.33%及0。

(3) 坡度。坡度可影响斜坡临空条件,进而对灾害发育产生较大影响,也将斜坡坡度划分为5个区间,即区间1($< 10^\circ$)、区间2($10^\circ \sim 20^\circ$)、区间3($20^\circ \sim 30^\circ$)、区间4($30^\circ \sim 45^\circ$)及区间5($> 45^\circ$),对应分布比例依次为18.18%、12.88%、4.55%、8.33%及56.06%。

2.2 地质构造的孕灾条件

县域范围内地质构造较为发育,可能影响岩体结构的完整性,因此,开展地质构造的孕灾条件分析十分必要。

以灾害点到断层距离 d 为指标,按其大小进行区间划分统计,在 $d < 0.3$ km时,灾害点发育有29处,所占比例为21.97%;当 0.3 km $\leq d < 1.0$ km

岩土力学

时, 灾害点发育有 34 处, 所占比例为 25.76%; 当 $1.0 \text{ km} \leq d < 2.0 \text{ km}$ 时, 灾害点发育有 22 处, 所占比例为 16.67%; 当 $2.0 \text{ km} \leq d < 4.0 \text{ km}$ 时, 灾害点发育有 24 处, 所占比例为 18.18%; 当 $4.0 \text{ km} \leq d < 6.0 \text{ km}$ 时, 灾害点发育有 10 处, 所占比例为 7.58%; 当 $d \geq 6.0 \text{ km}$ 时, 灾害点发育有 13 处, 所占比例为 9.85%。

区内地质灾害与构造发育具相关性, 规律性特征较为显著, 其多发育于褶皱密集和断裂交汇等构造复活部位, 具有沿构造线方向密集展布的特点。

2.3 地层岩性的孕灾条件

结合调查成果, 县域内滑坡、崩塌灾害共计发育有 90 处, 地层岩性类型主要包括三类, 即碎石类斜坡、黏性土类斜坡和黄土类斜坡, 各类斜坡结构的影响规律如下:

(1) 碎石类斜坡。斜坡结构类型为碎石类的滑坡 11 处、崩塌 2 处, 该类斜坡滑体自坡脚至坡顶皆由残坡积碎石土地层构成。碎石土质地松散, 工程地质特性差, 抗拉强度低, 极易在临空面附近形成卸荷裂隙; 碎石土渗透性强, 遇水时强度急剧降低, 易形成滑动面, 可沿坡底坡脚剪出。

(2) 黏性土类斜坡。县域内有 5 处黏性土滑坡, 该类斜坡斜体松散, 保水性强; 开挖坡脚使土体平衡状态被破坏, 坡体失去支撑而松弛, 大气降水滞留于滑坡体上部, 改变了土体的含水条件, 更易导致滑坡发生。

(3) 黄土类斜坡。县域内共发育 30 处滑坡、41 处崩塌, 主要集中于道路沿线, 分布于南部低山丘陵区, 在北部中低山区零星分布。此类斜坡的稳定性除与粉质黏土的工程地质性质密切相关外, 还与土体中发育的古土壤层有关; 古土壤较黄土状土而言, 黏土含量高, 结构更为致密, 成为土体中的相对隔水层, 在粉质黏土与古土壤接触带易形成含水量相对较高的软弱结构面, 从而控制滑坡的形成。

综上, 县域内地质灾害发育的孕灾条件相对较多, 其各类孕灾因子共同作用易致地质灾害发生。

3 地质灾害敏感因子分析

3.1 敏感性评价方法的构建

确定系数法 (Certain Factor, CF) 是一种概率

统计方法, 其属双变量统计范畴, 可对各孕灾因子间的敏感性进行合理评价。据 CF 基本原理, 将其计算公式表示为:

$$CF = \begin{cases} \frac{P_a - P_s}{P_a (1 - P_s)} & P_a \geq P_s \\ \frac{P_a - P_s}{P_s (1 - P_a)} & P_a < P_s \end{cases} \quad (1)$$

式中: P_a 为孕灾因子对应灾害点数与其面积的比值; P_s 为孕灾因子对应灾害点数与灾害区面积之比。

CF 值一般处于 $[-1, 1]$, 可通过其评价灾害的易发程度, 其中, 当 CF 处于 $(0, 1]$ 区间时, 说明灾害易发程度较高, 其值越大, 易发性更强; 当 CF 处于 $[-1, 0)$ 区间时, 说明灾害易发程度较低, 其值越小, 易发性更弱; 当 CF 等于 0 时, 说明灾害随机性强, 不能确定其易发程度。

在 CF 值计算结果基础上, 进一步构建出灾害敏感性评价指数 E_i :

$$E_i = CF_{i, \max} - CF_{i, \min} \quad (2)$$

式中: $CF_{i, \max}$ 为 CF 最大值; $CF_{i, \min}$ 为 CF 最小值。

根据 E_i 值即可评价孕灾因子对灾害发育的敏感性, 其值越大, 说明其敏感性越强; 反之, 敏感性越低。

3.2 敏感性评价结果分析

据表 2 可知, 剥蚀低山地貌的 CF 值相对最大, 且仅其 CF 值为正值, 说明其滑坡灾害的易发程度相对较高, 其余三类地貌的滑坡灾害易发程度相对较低; 按照 CF 值大小排序, 得到四类地貌类型在滑坡灾害上的易发程度由强至弱排序为: 剥蚀低山地貌 > 河谷阶地地貌 > 剥蚀丘陵地貌 > 构造中山地貌。

当高程 $< 300 \text{ m}$ 、 $\geq 1000 \text{ m}$ 时, 均未见滑坡灾害发育, 且在 $[300 \text{ m} \sim 700 \text{ m})$ 高程范围内, 滑坡灾害发育程度较高; 同时, 按照 CF 值大小排序, 得到高程条件下的易发程度由强至弱的排序为: $[300 \sim 500 \text{ m}) > [500 \sim 700 \text{ m}) > [700 \sim 1000 \text{ m}) > (< 300 \text{ m} \text{ 及 } \geq 1000 \text{ m})$ 。

当坡度属 $[10^\circ \sim 20^\circ)$ 区间时, CF 值相对最大, 说明滑坡灾害的易发程度较高, 且坡度属 $[0^\circ \sim 10^\circ)$ 、 $[30^\circ \sim 45^\circ)$ 区间时, CF 值为负值, 说明其对应滑坡灾害的易发程度较低; 按照 CF 值大小排序, 得到坡度条件下的滑坡灾害易发程度由强至弱的区间排序为: $[10^\circ \sim 20^\circ) > [45^\circ \sim 90^\circ) > [20^\circ \sim 30^\circ) > [0^\circ \sim$

表 2 各孕灾因子的敏感性分析结果

Table 2 Sensitivity analysis results of various pregnancy risk factors

孕灾因子	区间/类别	面积/km ²	滑坡/个	$P_a (1 - P_s)$	$P_s (1 - P_a)$	CF
地貌	剥蚀低山	189.38	2	0.055	0.032	-0.681
	剥蚀丘陵	596.45	34		0.446	
	河谷阶地	568.05	8		0.032	-0.573
	构造中山	67.12	2		0.031	-0.083
高程/m	<300	51.03	0	—	0.032	-1.000
	[300~500)	277.84	12	0.042	—	0.258
	[500~700)	713.77	27	0.037	—	0.148
	[700~1000)	307.24	7	—	0.032	-0.304
	≥1000	71.12	0	—	0.032	-1.000
坡度/°	[0~10)	705.12	12	—	0.032	-0.483
	[10~20)	381.9	24	0.061	—	0.501
	[20~30)	211.43	8	0.037	—	0.149
	[30~45)	100.11	1	—	0.032	-0.699
	[45~90)	22.45	1	0.043	—	0.282
到断层距离/m (地质构造)	[0~300)	209.47	14	0.065	—	0.532
	[300~1000)	344.76	11	—	0.031	-0.016
	[1000~2000)	284.58	8	—	0.032	-0.136
	[2000~4000)	254.31	8	—	0.031	-0.030
	[4000~6000)	178.91	5	—	0.032	-0.662
≥6000	148.97	3	—	0.032	-0.386	
地层岩性	碎石类斜坡	401.87	11	0.049	—	0.308
	黏性土类斜坡	265.48	5	—	0.032	-0.659
	黄土类斜坡	753.65	30	0.072	—	0.618

10°) > [30°~45°)。

研究区内距离断裂构造 4000 m 以外的滑坡非常少见；总体来讲，距离断裂构造越近的区域，发生滑坡的可能性也会越大，其中距离断裂构造 300 m 范围内发生滑坡的可能性最大，是滑坡的易发区，其 CF 值达到了 0.532。

地层岩性因子的敏感性分析结果。黄土类斜坡的 CF 值为 0.618，易发程度相对最大，且碎石类斜坡的 CF 值也为正值，说明此两类岩土类型斜坡与滑坡发育的相关性高，发生滑坡的可能性大；黏性土类斜坡的 CF 值为负值，说明其不易发生滑坡灾害。按照 CF 值大小排序，得到地层岩性条件下的易发程度由强至弱的排序为：黄土类斜坡 > 碎石类斜坡 > 黏性土类斜坡。

对 5 个孕灾因子的易发性分析，经计算公式计算，得到各因子的评价指数 E_i 值依次为：地貌因子为 1.127，高程因子为 1.258，坡度因子为 1.200，地质构造因子为 1.194，地层岩性因子为 0.967。

对比 5 个因子的 E_i 值可知，其差异相对不大，

说明此 5 类因子对滑坡灾害的敏感性相当，按敏感性由大到小排序为：高程因子 > 坡度因子 > 地质构造因子 > 地貌因子 > 地层岩性因子。

4 地质灾害易发性评价

4.1 易发性评价方法构建

信息量模型可有效评价特定环境条件下，孕灾因子对引发灾害的可能性大小，其实现方式为：通过某因素的发生频率与区域灾害的发生频率进行比较，其值越大，致灾可能性越大。

据信息量模型的基本原理，将某孕灾因子相应状态对灾害的信息量计算公式表示为：

$$I_{A_j-B} = \ln \frac{N_j/N}{S_j/S} \quad (3)$$

式中： I_{A_j-B} 为对应条件下的信息量； A 为孕灾因子； j 为孕灾因子的划分区间； B 是灾害类型； N_j 为对应条件下的灾害分布个数； N 为调查区灾害分布总数； S_j 为对应条件下的栅格单元数； S 为调查区栅格单元总数。

根据值可判断灾害发生的可能性，其判据为：

岩土力学

当 I_{A_j-B} 值大于 0 时, 说明对应条件下灾害发生的信息量较大, 灾害发生可能性较大。

当 I_{A_j-B} 值小于 0 时, 说明对应条件下灾害发生的信息量较小, 灾害发生可能性较小。

当 I_{A_j-B} 值等于 0 时, 无法判断其对灾害发生的可能性影响规律。

由于某孕灾因子可划分为若干状态, 将进一步将所有状态对灾害发生的总信息量计算公式表示为:

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

式中: I 为某孕灾因子对灾害发生的总信息量; n 为某孕灾因子对应的状态总数。

参数 I 可作为某孕灾因子对灾害发生的易发性指数, 可用其评价灾害易发程度, 其值越大, 说明灾害的易发程度较高。

4.2 易发性评价结果分析

以地貌因子、高程因子、坡度因子、地质构造因子及地层岩性因子作为易发性评价的基础因子。基于式 (3) 计算各孕灾因子在不同状态条件下的信息量计算, 结果见表 3。

表 3 各因子在不同状态条件下的信息量
Table 3 Information content of each factor under different state conditions

孕灾因子 A	j	N_j	N	S_j	S	I_{A_j-B}	I
地貌	剥蚀低山	57	132	645 285	1 509 103	0.009 8	-1.328 3
	剥蚀丘陵	66	132	613 706	1 509 103	0.206 6	
	河谷阶地	6	132	57 136	1 509 103	0.182 8	
	构造中山	3	132	192 976	1 509 103	-1.727 5	
高程/m	<300	21	132	475 467	3 395 494	0.127 6	-0.396 2
	[300~500)	55	132	1 319 671	3 395 494	0.069 6	
	[500~700)	48	132	900 602	3 395 494	0.315 5	
	[700~1000)	8	132	510 730	3 395 494	-0.909 0	
	≥1000	0	132	189 024	3 395 494	0	
坡度/°	[0~10)	76	132	1 730 702	3 395 704	0.121 9	-2.072 8
	[10~20)	47	132	924 134	3 395 704	0.268 8	
	[20~30)	7	132	497 179	3 395 704	-1.015 6	
	[30~45)	2	132	218 882	3 395 704	-1.447 9	
	[45~90)	0	132	24 807	3 395 704	0	
地质构造距断层距离/m	[0~300)	29	132	221 109	1 509 103	0.405 1	-0.272 6
	[300~1000)	33	132	371 434	1 509 103	0.015 6	
	[1000~2000)	23	132	304 573	1 509 103	-0.146 9	
	[2000~4000)	24	132	270 937	1 509 103	0.012 6	
	[4000~6000)	9	132	187 163	1 509 103	-0.598 3	
地层岩性	≥6000	14	132	153 887	1 509 103	0.039 3	-0.015 4
	碎石类斜坡	44	132	169 230	1 506 768	-0.298 4	
	黏性土类斜坡	26	132	424 765	3 373 848	-0.245 6	
	黄土类斜坡	62	132	181 665	1 506 768	0.528 6	

不同孕灾因子或状态条件下的灾害易发性信息量相对存在较大差异, 按因子不同, 对不同状态的易发性评价总结如下:

(1) 地貌因子。除构造中山的信息量为负值以外, 其余 3 个地貌的信息量均为正值, 并按其 I_{A_j-B} 状态信息量将 4 类地貌的灾害易发程度由大到小排序为: 剥蚀丘陵 > 河谷阶地 > 剥蚀低山 > 构造中山。

(2) 高程因子。不同高程对应信息量亦是不同, 其中, 当高程属 [500~700 m) 时的信息量值相对

最大, 为 0.3155, 易发程度相对最高; 当高程属 [700~1000 m) 时的信息量相对最小, 为 -0.9090, 说明易发程度相对最低。

(3) 坡度因子。不同坡度信息量变化介于 -1.4479 ~ 0.2688, 易发程度变化范围较大, 其中, [10~20°) 对应的易发程度相对最高, [30~45°) 对应的易发程度相对最低。

(4) 地质构造因子。当灾害点到断层距离不同时, 其对应的易发程度也随之不同, (下转第 96 页)