李剑波,施帅,任栋.基于GIS与加权信息量模型的渭南市华州区地质灾害易发性评价[J].地震工程学报,2026,48(6):1479-1488.DOI:10.20000/j.1000-0844.20250707001

Li Jianbo, Shi Shuai, Ren Dong. Evaluation of geological hazard susceptibility in Huazhou District, Weinan City, based on GIS and weighted information value model[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2026, 48(6): 1479-1488. DOI: 10.20000/j.1000-0844.20250707001

基于GIS与加权信息量模型的渭南市华州区地质灾害易发性评价

李剑波,施 帅,任 栋

(陕西省一三一煤田地质有限公司,陕西 渭南 715499)

摘要:渭南市华州区位于陕西省渭南市西南部,地形地貌多样,地质灾害分布较广,严重威胁人民生命财产安全。为提高区域地质灾害评价精度,选用科学的评价模型至关重要。研究选取坡度、坡高、坡向、多年平均降雨量、工程地质岩组、地貌类型、水系流域及距公路距离等8项指标,基于地理信息系统(GIS)和加权信息量模型,开展华州区地质灾害易发性评价。结果表明:地貌单元类型为研究区地质灾害发育的主控因素,多年平均降雨量为重要触发因素。将研究区划分为非易发区、低易发区、中易发区和高易发区,面积分别为276.68、478.82、294.96和88.54 km^2,灾害点密度与易发性分区结果吻合较好。研究成果可为渭南市华州区地质灾害防治工作提供科学参考。

关键词:渭南市华州区;地质灾害;易发性分区;层次分析法;信息量模型

中图分类号:P694; X43 **文献标志码**:A **文章编号**:1000-0844(2026)06-1479-10

DOI:10.20000/j.1000-0844.20250707001

Evaluation of geological hazard susceptibility in Huazhou District, Weinan City, based on GIS and weighted information value model

Li Jianbo, Shi Shuai, Ren Dong

(*Shaanxi 131 Coal field Geology Co., Ltd., Weinan 715499, Shaanxi, China*)

Abstract: Huazhou District, located in the southwestern part of Weinan City, Shaanxi Province, is characterized by diverse landforms and widespread geological hazards that threaten public safety and property. To improve the accuracy of regional geological hazard susceptibility assessment, selecting an appropriate modeling approach is essential. This study considers eight evaluation indicators—slope gradient, slope height, slope aspect, mean annual precipitation, engineering geological rock and soil type, landform type, surface water basin, and distance to roads—and integrates them within a geo-

收稿日期:2025-07-07

基金项目:陕西省渭南市华州区地质灾害综合防治体系建设项目

第一作者简介:李剑波(1996-),男,陕西渭南人,硕士,工程师,研究方向:水工环地质调查。E-mail: 574380523@qq.com。

通信作者:施 帅(1983-),男,陕西渭南人,工程师,研究方向:水工环地质调查。E-mail: 859205150@qq.com。

graphic information system platform. A weighted information value model is then applied to evaluate the geological hazard susceptibility of Huazhou District. The results indicate that landform type is the primary controlling factor governing geological hazard occurrence, whereas mean annual precipitation is the key triggering factor. The study area is classified into four susceptibility zones: nonprone, low, moderate, and high susceptibility, covering 276.68, 478.82, 294.96, and 88.54 km^2, respectively. The spatial distribution of historical hazard sites shows strong agreement with the susceptibility map, confirming the reliability of the model. These findings provide a robust scientific basis for disaster prevention planning and risk mitigation in Huazhou District, Weinan City.

Keywords: Huazhou District, Weinan City; geological hazards; susceptibility zoning; analytic hierarchy process; informative model

0 引言

地质灾害是指受自然因素或人为活动诱发、与地质作用相关的各类灾害现象，涵盖山体崩塌、滑坡、泥石流、地面塌陷、地裂缝及地面沉降等。其中，崩塌、滑坡和泥石流是导致人员伤亡的主要灾害类型[1-2]，不仅破坏生态环境，还对人民生命财产安全构成严重威胁[3]。因此，开展区域地质灾害空间分布规律及发生概率研究，对指导地质灾害防治具有重要意义。此类研究立足于自然与人为因素[4]，采用科学方法预测灾害空间分布规律与发生概率，即地质灾害易发性评价[5]。

自20世纪80年代以来，国内外学者通过筛选适宜的评价指标，借助数学模型确定指标权重，并利用叠加分析开展区域易发性评价[6]。目前，常用的地质灾害易发性评价模型可分为定性方法与定量方法。定性方法主要包括层次分析法[7-8]、模糊综合评价法[9]、德尔菲法[10]等；定量方法则涵盖证据权法[11]、信息量法[12-13]、随机森林模型[14]、主成分分析法[15]、变异系数法[16]、贡献权重法[17]等。

随着地理信息技术的发展，单一模型的评价方法已难以满足实际应用需求，多种模型融合的综合评价方法逐渐成为主流[18]。丁赞等[19]结合层次分析法与变异系数法，开展黄冈市地质环境承载力研究；杜国梁等[20]基于逻辑回归-信息量法，对川藏交通廊道滑坡易发性进行评估；田逸楠等[21]、姜锡宸等[22]、焦伟之等[23]、寸得欣等[18]分别运用层次分析-信息量模型，对果洛州、雅安市、新邵县大新镇及富源县等地进行了地质灾害评价，结果均表现出较强针对性与较高可靠性。

针对渭南市华州区风险调查评价中单一模型在科学性与灵活性方面的不足，本研究采用层次分析法与信息量模型相结合的方式，融合主观权重和客观信息量值，旨在进一步提升该区地质灾害易发性评价的科学性与准确性。

1 研究区概况及数据来源

1.1 研究区概况

渭南市华州区位于陕西省渭南市西南部，地处109°36′0″～110°2′48″E、34°12′27″～34°36′27″N，南北长41.1 km，东西宽27.7 km，区域面积1 139 km^2。地势南高北低，海拔334～2 646 m；北部为渭河平原，南部属秦岭高中山区，地形起伏大。地质构造复杂，以秦岭山前断裂、金堆城断裂为界，自北向南划分为渭河断凹、太华台拱、金堆城台凹；地层自太古界太华群至第四系均有出露，南部以太古界太华群和下元古界地层为主，北部以第四系为主。区内地貌包括秦岭高中山、山前洪积扇、黄土台塬及渭河平原。

经资料收集和实地调研，渭南市华州区现有在册地质灾害隐患点47处，灾害点数量较多且呈局部密集分布(图1)。其中，崩塌38处，占80.85%；滑坡8处，占17.02%；泥石流1处，占比2.13%(表1)。

从空间分布看，区内地质灾害点面结合、局部集聚。地质灾害点主要分布于瓜坡镇、大明镇、高塘镇和金堆镇。其中，崩塌最为发育，滑坡次之；泥石流仅发育1处，位于金堆镇，且邻近矿山尾矿库。

1.2 数据来源与评价单元划分

渭南市华州区地质灾害基础数据均源自全区1∶5万地质灾害风险调查评价成果。其中，数字高程模型(Digital Elevation Model，DEM)分辨率为12.5 m，并基于该数据提取坡度、坡高、坡向等评价因子。

降雨量数据来自华州区气象局；工程地质岩组和地貌单元信息引自渭南市华州区区域地质图；地

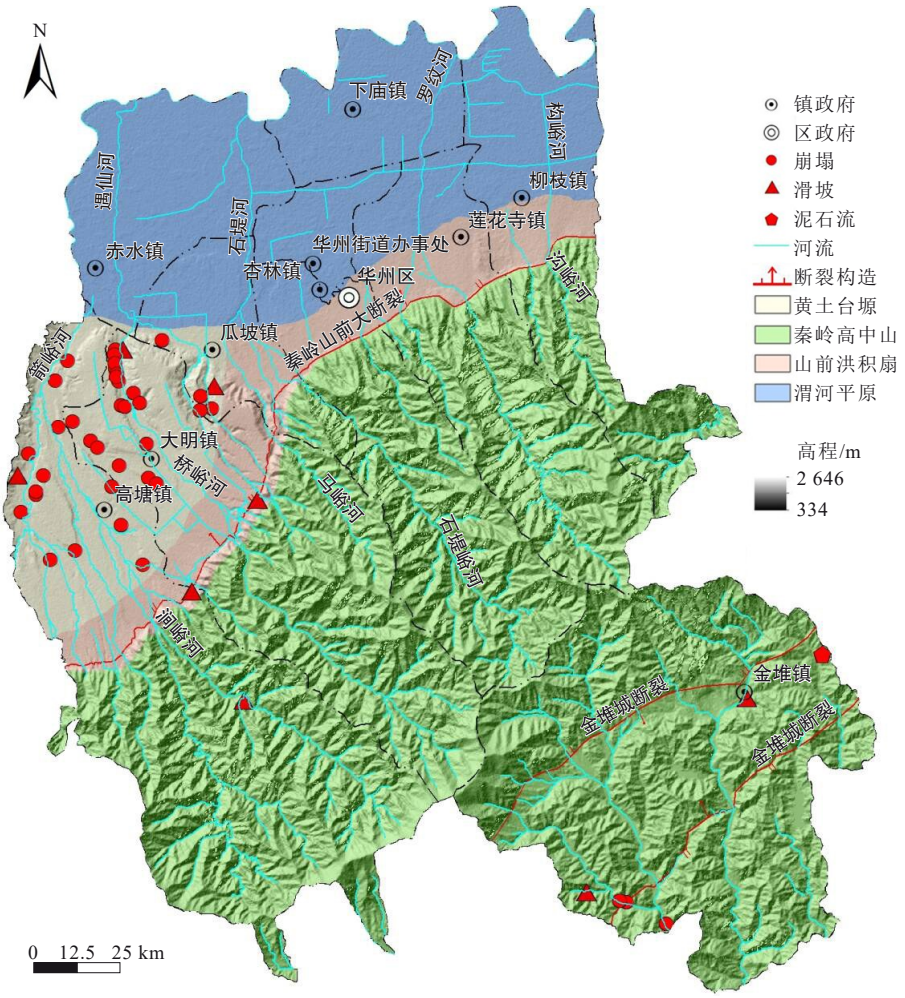


图 1　研究区地质灾害分布情况

Fig. 1　Spatial distribution of geological hazards in the study area

表 1　渭南市华州区地质灾害类型统计表

Table 1　Statistics of geological hazard types in Huazhou District, Weinan City

类型	滑坡	崩塌	泥石流	合计
数量/处	8	38	1	47
占比/%	17.02	80.85	2.13	100

表水系数据源于渭南市华州区水务局提供的水系分布图；道路数据由渭南市华州区交通运输局提供。

以 12.5 m×12.5 m 单栅格为基本评价单元，对研究区开展易发性评价，借助地理信息系统（Geographic Information System，GIS）对各指标进行空间处理与叠加分析，坐标系统统一采用2000国家大地坐标系。

2　评价指标的选取与分级

地质灾害的发生与所处地质环境紧密相关。地质环境是由工程地质、气象水文、地形地貌等多要素耦合控制的复杂系统[24]。基于渭南市华州区地质灾害发育特征及孕灾地质条件的实地调查，本研究构建了地质灾害易发性评价指标体系，选取因子如下：

2.1　坡度

坡度的改变会明显影响斜坡的应力分布情形。随着坡度增大，临空面的不稳定性及斜坡内部应力也会相应增加，致使斜坡更易发生变形，进而引发地质灾害[25]。

如图2(a)所示，研究区的坡度被划分为6类。经数据统计，华州区地质灾害点主要分布在[20°，45°)的坡度范围内，总计46处，占比97.87%，且以崩塌为主。在此坡度区间内，地质灾害的分布数量与坡度呈正相关趋势。

2.2　坡高

坡高指单个斜坡单元最高点和最低点的海拔差值，是评价坡体稳定的重要因素之一。如图2(b)所示，研究区坡高划分为6类。统计结果显示，华州

区地质灾害集中发生于坡高[0,30) m范围的斜坡上,大于90 m的区域无灾害点分布。总体来看,随坡高增加,地质灾害数量逐渐减少,区内灾害主要发育于沟边陡坡及人工切坡地段。

2.3 坡向

坡向差异会导致斜坡结构与含水状态的不同,进而影响斜坡稳定性[23]。如图2(c)所示,将研究区坡向划分为8类:崩塌集中分布于南坡[112.5°, 247.5°),共20处,占总数的42.55%;其次是西坡[247.5°, 337.5°),共12处,占25.53%;东坡[22.5°, 112.5°)和北坡[337.5°, 22.5°)分别发育8处和7处,合计占比31.92%。

2.4 多年平均降雨量

降雨是直接引发或间接加剧地质灾害的主要

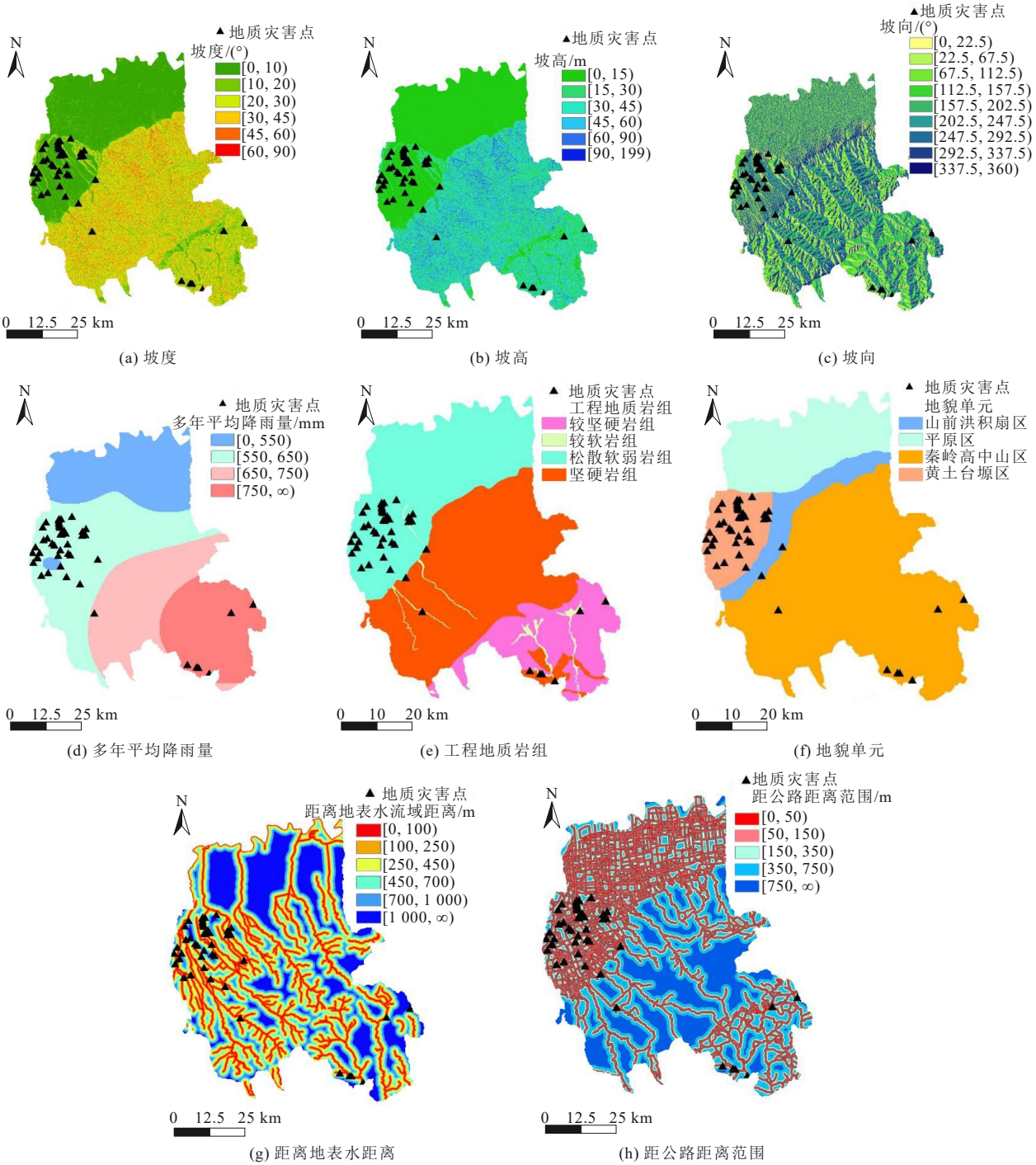


图2 评价因子分级情况

Fig. 2 Classification of evaluation factors

因素之一，其降雨量和降雨强度均与地质灾害发育密切相关[5,26]。

据渭南市华州区自然资源部门统计，1983年至今，研究区共发生地质灾害23次，其中崩塌12次、滑坡9次、泥石流2次，多集中于7—9月，与月平均降水量峰值期吻合，表明降水是关键触发因素（表2、图3）。

表2　渭南市华州区地质灾害历史数据统计

Table 2　Statistical data of historical geological hazards in Huazhou District, Weinan City

发生时间	灾害类型	死亡人数/损毁财产
1983-07	崩塌	死亡4人
1984-10-13	滑坡	死亡6人
1984-10-14	滑坡	死亡4人
1985-05-11	滑坡	死亡3人
1987-08-10	崩塌	死亡4人
1988-04-13	泥石流	大量农田、道路、房屋毁坏，污染河道几十千米
2006-10-06	滑坡	死亡12人
2011-07	滑坡	房屋2间
2012-08	崩塌	厨房1间
2013-08	崩塌	厨房及厕所各1间
2015-08	滑坡	寺庙大门
2017-07	崩塌	房屋1间
2018-08	滑坡	堵塞河道
2019-09	滑坡	房屋1间
2020-07	崩塌	猪舍3间、厕所1间
2020-08	崩塌、滑坡	房屋1间
2020-09	泥石流	房屋3间
2023-07	崩塌	道路50 m，房屋变形8间
2023-08	崩塌	道路30 m，房屋变形6间
2024-09	崩塌	道路120 m

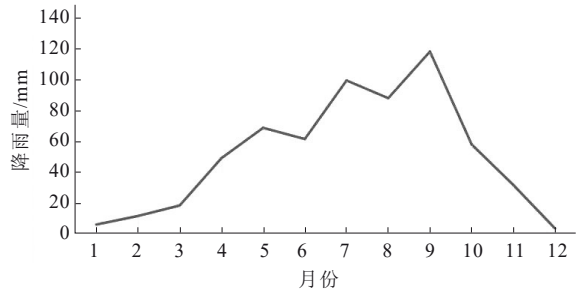


图3　渭南市华州区月平均降水量变化曲线（2010—2024年）

Fig. 3　Monthly average precipitation variation curve in Huazhou District, Weinan City (2010—2024)

本次研究基于华州区气象局2010—2024年的月累计降雨量数据，绘制了多年平均降雨量等值线图［图2(d)］；将区域降雨量划分为[0,550) mm、[550,650) mm、[650,750) mm、[750,∞) mm 4个区间，结果显示地质灾害主要分布于[550,650) mm区间。

2.5　工程地质岩土体类型

不同类型工程地质岩组因岩性和岩体结构存在差异，地质灾害发育程度有所不同[27]。地层及岩土体结构是地质灾害产生的物质基础。依据地层出露和工程地质特征，华州区工程地质岩土体类型可分为4大类：坚硬块状侵入岩类、较坚硬块状变质岩类、软弱层状碎屑岩类和松散软弱岩组类，分类结果如图2(e)所示。在空间分布上，地质灾害主要集中于松散软弱岩组区域——该类岩组结构疏松、力学强度低，为灾害发生提供了有利条件，导致其灾害点分布更为密集。

2.6　地貌单元

地貌对地质灾害的发生、发展及演化具有重要影响。研究区地势南高北低，地貌类型可划分为秦岭高中山区、山前洪积扇区、黄土台塬区及平原区。其中，黄土台塬区与秦岭高中山区为主要地貌类型，地质灾害发育程度显著高于其他类型；其余地貌类型灾害分布相对较少，分类结果如图2(f)所示。

基于灾害分布特征，研究区内地质灾害发育呈现明显的地貌分异性，尤以黄土台塬区最为集中，表明该地貌类型为区域地质灾害发育的主控因素。

2.7　地表水流域范围

研究区内地质灾害的发育与水系关系密切。河流作用形成的多级阶地普遍存在土质疏松、坡度陡立的特征；现场调查表明，人类切坡建房、修路等工程活动亦是诱发地质灾害的重要因素。基于此，利用GIS对地表水流域进行欧氏距离分析，将工作区划分为[0, 100) m、[100, 250) m、[250, 400) m、[400, 700) m、[700, 1 000) m以及[1 000 m, ∞) m 6个区间，分类结果如图2(g)所示。

2.8　距公路距离范围

研究区公路沿线人类工程活动强烈，尤其在黄土台塬区与秦岭高中山区，切坡现象十分普遍，构成地质灾害的高发区域。距离公路越近，灾害易发性越高。本次评价对道路进行欧式距离分析，将研究区划分为[0, 50) m、[50, 150) m、[150, 350) m、[350, 750) m以及[750, ∞) m 5个区间，分类结果如图2(h)所示。

各评价指标分级详列于表3。

表 3 渭南市华州区地质灾害评价因子信息量及权重值

Table 3 Information values and weights of geological hazard evaluation factors in Huazhou District, Weinan City

一级因子	二级因子	地质灾害点数量/处	分级面积/km^2	灾害点密度/(个/km^2)	信息量值	加权信息量值
坡度/(°)	[0, 10)	0	419.40	0	0	0
	[10, 20)	0	195.57	0	0	0
	[20, 30)	13	207.07	0.06	0.419 6	0.033 6
	[30, 45)	33	248.71	0.13	1.168 0	0.093 4
	[45, 60)	1	66.29	0.02	−1.006 2	−0.080 5
	[60, 90]	0	1.96	0	0	0
坡高/m	[0, 15)	23	473.73	0.05	0.162 6	0.014 6
	[15, 30)	13	239.01	0.05	0.276 2	0.024 9
	[30, 45)	8	213.57	0.04	−0.096 8	−0.008 7
	[45, 60)	2	129.87	0.02	−0.985 6	−0.088 7
	[60, 90)	1	75.37	0.01	−1.134 7	−0.102 1
	[90, 199)	0	7.44	0	0	0
坡向/(°)	[0, 22.5),[337.5, 360)	7	164.36	0.04	0.031 6	0.001 9
	[22.5, 67.5)	3	143.91	0.02	−0.682 8	−0.041 0
	[67.5, 112.5)	5	155.37	0.03	−0.248 6	−0.014 9
	[112.5, 157.5)	10	103.07	0.10	0.854 9	0.051 3
	[157.5, 202.5)	4	115.81	0.03	−0.177 9	−0.010 7
	[202.5, 247.5)	6	130.39	0.05	0.109 0	0.006 5
	[247.5, 292.5)	7	171.15	0.04	−0.008 8	−0.000 5
	[292.5, 337.5)	5	154.95	0.03	−0.245 9	−0.014 8
多年平均降雨量/mm	[0, 550)	0	255.84	0	0	0
	[550, 650)	40	388.42	0.10	0.914 6	0.182 9
	[650, 750)	1	261.26	0	−2.377 8	−0.475 6
	[750, ∞)	6	233.49	0.03	−0.473 6	−0.094 7
工程地质岩组	松散软弱岩组	38	527.06	0.07	0.558 0	0.072 5
	较软岩组	4	17.74	0.23	−0.594 6	−0.077 3
	较坚硬岩组	3	175.67	0.02	−1.750 4	−0.227 6
	坚硬岩组	2	418.54	0.005	1.005 3	0.130 7
地貌单元	平原区	0	229.04	0	0	0
	黄土台塬区	37	110.86	0.33	2.292 6	0.504 4
	山前洪积扇区	2	90.57	0.02	−1.553 0	−0.341 7
	秦岭高中山区	8	708.53	0.01	0.559 0	0.123 0
地表水流域范围/m	[0, 100)	5	155.20	0.03	−0.552 5	−0.060 8
	[100, 250)	17	196.80	0.09	0.956 8	0.105 2
	[250, 450)	14	214.20	0.07	0.508 6	0.056 0
	[450, 700)	6	204.01	0.03	−0.065 2	−0.007 2
	[700, 1 000)	3	158.26	0.02	−1.080 5	−0.118 9
	[1 000, ∞)	2	210.54	0.01	−1.401 3	−0.154 1
距公路距离范围/m	[0, 50)	22	125.71	0.18	1.444 8	0.158 9
	[50, 150)	19	184.79	0.10	0.913 0	0.100 4
	[150, 350)	5	191.15	0.03	−0.455 9	−0.050 1
	[350, 750)	1	184.02	0.01	−2.027 3	−0.223 0
	[750, ∞)	0	453.33	0	0	0

3　地质灾害易发性评价

3.1　评价方法

3.1.1　信息量模型

信息量模型以区域地质灾害调查为基础，选取影响灾害发育的主要因素。通过计算各评价单元内单因素(x)在特定分级(y)下的灾害发生频率与研究区总频率之比，获得该因素的信息量，计算公式为：

$$I_{xy}=\ln\frac{\frac{N_{xy}}{N}}{\frac{S_{xy}}{S}}\ (x=1,2,3,\cdots,n;\ y=1,2,3,\cdots,k) \tag{1}$$

式中：I_{xy}为评价因素x在分类y下的信息量；N_{xy}为评价因素x在分类y下的灾害单元数；N为研究区灾害单元总数；S_{xy}为因素x在分级y内的评价单元数；S为研究区评价单元总数。

3.1.2　层次分析法模型

鉴于信息量模型未能反映各评价指标对地质灾害影响程度的差异，本研究引入层次分析法确定各指标权重。层次分析法是一种定性与定量相结合的多目标决策的系统解析方法[18]，具体计算流程如图4所示。

本次构建的判断矩阵如表4所列。经计算，矩阵最大特征值λ_{max}=8.61。已有研究表明，8阶矩阵的随机一致性指标RI=1.41，据此计算得到一致性比率CR=0.06<0.1，表明该矩阵具有良好的一致性，符合研究预期，所得权重结果合理。

3.1.3　加权信息量模型

加权信息量模型通过融合各指标不同分级的信息量值与对应权重进行计算，得到各分级的加权信息量值I[18]，计算公式：

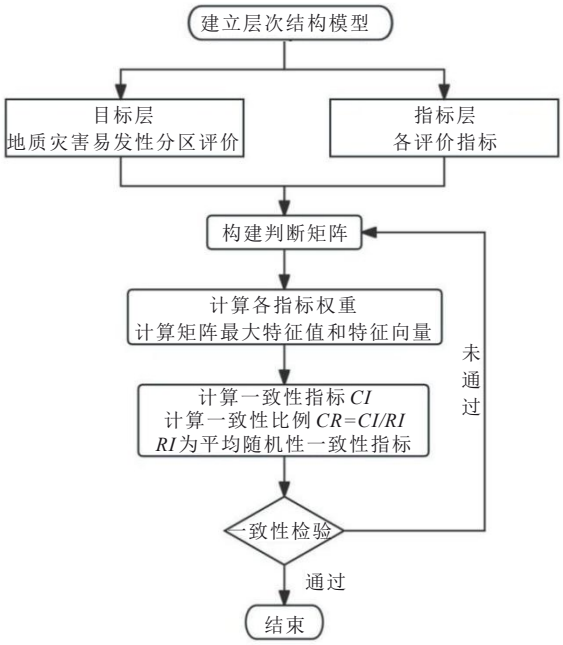


图4　层次分析法流程

Fig. 4　Flowchart of the analytic hierarchy process

$$I=I_{xy}W_x \tag{2}$$

式中：I_{xy}为评价因素x在分类y下的加权信息量值；W_x为评价指标x的权重。

各指标分级加权信息量值列于表3。其中，加权信息量值最高的为地貌单元类(0.504 4)，最低的为多年平均降雨量类(−0.475 6)。

3.2　基于GIS的信息量模型计算与结果

利用GIS平台将各评价指标的加权信息量值进行空间叠加运算，求得各评价单元的综合信息量值$I_{综}$，计算公式为：

$$I_{综}=\sum_{x=1}^{n}I_{xy}W_x$$

式中：n为评价指标的数量。

表4　渭南市华州区地质灾害评价因子判断矩阵及权重

Table 4　Judgment matrix and weights of geological hazard evaluation factors in Huazhou District, Weinan City

评价因子	坡度	坡高	坡向	多年平均降雨量	工程地质岩组	地貌单元	地表水流域范围	距公路距离范围	权重
坡度	1.00	2.00	2.00	0.33	0.33	0.33	1.00	0.50	0.08
坡高	0.50	1.00	2.00	0.50	0.50	0.33	1.00	2.00	0.09
坡向	0.50	0.50	1.00	0.50	0.50	0.33	1.00	0.33	0.06
多年平均降雨量	3.00	2.00	2.00	1.00	2.00	1.00	2.00	2.00	0.2
工程地质岩组	3.00	2.00	2.00	0.50	1.00	0.50	1.00	1.00	0.13
地貌单元	3.00	3.00	3.00	1.00	2.00	1.00	2.00	2.00	0.22
地表水流域范围	1.00	1.00	1.00	0.50	2.00	0.50	1.00	1.00	0.11
距公路距离范围	2	0.5	3	0.5	1	0.5	1	1	0.11

通过对8个评价指标的信息量栅格图层进行叠加分析，得到综合信息量值范围为[－0.212 5，1.133 7)。采用自然断点法对该范围进行重分类，生成渭南市华州区地质灾害易发性分区图(图5)。

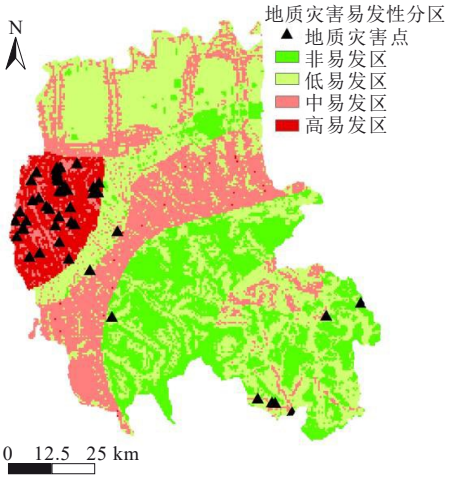


图5 渭南市华州区地质灾害易发性评价分区

Fig. 5 Susceptibility zoning map of geological hazards in Huazhou District, Weinan City

渭南市华州区地质灾害易发性分区统计数据详列于表5。结果显示，研究区地质灾害点集中于高易发区和中易发区(面积分别为88.54 km^2和294.96 km^2)，共计40处。灾害点密度与易发性等级呈显著正相关(高、中、低和非易发区分别为0.40个/km^2、0.20个/km^2、0.01个/km^2和0.01个/km^2)。综上所述，本次评价结果较为可靠。

地质灾害的空间分布与易发性分区结果具有高度一致性，高易发区集中分布了绝大多数灾害点，是防治工作的重点区域。结合GIS空间分析，高易发区主要分布于华州区南部黄土台塬区及部分山前洪积扇区；该区域地形坡度大、岩土体松散软弱，且受人类工程活动影响显著，与评价指标的高信息量值分布特征相符。中易发区主要位于黄土台塬区与平原区的过渡地带及部分近地表水流域区域，地质环境较复杂，具备一定的灾害发生潜势。低易发区和非易发区则主要分布于平原区及北部坚硬岩组出露区，该区域地形平缓、岩土体稳定性好，灾害发生的可能性较低。

表5 渭南市华州区地质灾害易发性分区统计表

Table 5 Statistical summary of geological hazard susceptibility zones in Huazhou District, Weinan City

分区等级	灾害数量/处	分区面积/km^2	面积占比/%	灾害占比/%	灾点密度/(个/km^2)	信息量值区间
非易发区	4	276.68	24.29	8.51	0.01	[－1.154 8，－0.212 5)
低易发区	3	478.82	42.04	6.38	0.01	[－0.212 5，0.146 5)
中易发区	5	294.96	25.90	10.64	0.02	[0.146 5，0.744 4)
高易发区	35	88.54	7.77	74.47	0.40	[0.744 4，1.133 7)

4 结论

(1) 本研究基于地理信息系统(GIS)，采用加权信息量模型对渭南市华州区开展地质灾害易发性评价。选取坡度、坡高、坡向、多年平均降雨量、工程地质岩组、地貌类型、地表水流域范围及距公路距离共8项评价因子，将研究区划分为非易发区、低易发区、中易发区和高易发区。

(2) 评价结果显示，渭南市华州区地质灾害高易发区和中易发区面积分别为88.54 km^2和294.96 km^2，共分布灾害点40处；高易发区、中易发区、低易发区和非易发区的点密度分别为0.40个/km^2、0.20个/km^2、0.01个/km^2和0.01个/km^2。点密度与易发性等级呈显著的正相关，表明本次评价结果可靠性较高。

(3) 研究认为，地貌单元类型是控制渭南市华州区地质灾害发育的主控因素，而多年平均降雨量则是重要触发因素。

(4) 高易发区集中了绝大部分地质灾害，是今后防治工作的重点区域；中易发区地质环境较为复杂，具备潜在的成灾条件，亦需加强监测与防范。

参考文献(References)

[1] 王瑛，林齐根，史培军. 中国地质灾害伤亡事件的空间格局及影响因素[J]. 地理学报，2017，72(5)：906-917.
Wang Ying, Lin Qigen, Shi Peijun. Spatial pattern and influencing factors of casualty events caused by landslides[J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(5): 906-917.

[2] 刘传正，陈春利. 中国地质灾害防治成效与问题对策[J]. 工程地质学报，2020，28(2)：375-383.
Liu Chuanzheng, Chen Chunli. Achievements and countermeasures in risk reduction of geological disasters in China[J]. Journal of Engineering Geology, 2020, 28(2): 375-383.

[3] 刘瑞，罗书斌，徐源，等. 基于地理信息系统与斜坡单元的峨

边县地质灾害易发性评价[J]. 科学技术与工程，2023，23(18)：7678-7685.
Liu Rui，Luo Shubin，Xu Yuan，et al. Geological hazard vulnerability assessment in Ebian County based on geographic information system and slope unit[J]. Science Technology and Engineering，2023，23(18)：7678-7685.

[4] 吕文茜，王雁林，陈新建，等. 2001—2022年陕北黄土地区地质灾害时空分布及引发因素分析[J]. 灾害学，2024，39(4)：207-212.
Lü Wenqian，Wang Yanlin，Chen Xinjian，et al. Spatial and temporal distribution and analysis of triggering factors of geologic hazards in the loess area of northern Shaanxi from 2001 to 2022[J]. Journal of Catastrophology，2024，39(4)：207-212.

[5] 王毅，方志策，牛瑞卿，等. 基于深度学习的滑坡灾害易发性分析[J]. 地球信息科学学报，2021，23(12)：2244-2260.
Wang Yi，Fang Zhice，Niu Ruiqing，et al. Landslide susceptibility analysis based on deep learning [J]. Journal of Geo-Information Science，2021，23(12)：2244-2260.

[6] 张凌煜，薛东剑，陈磊，等. 基于超效率数据包络分析-信息量模型的沧源县地质灾害危险性评价[J]. 科学技术与工程，2022，22(29)：12782-12790.
Zhang Lingyu，Xue Dongjian，Chen Lei，et al. Risk assessment of geological hazards in Cangyuan County based on super-efficiency data envelopment analysis-information model[J]. Science Technology and Engineering，2022，22(29)：12782-12790.

[7] 贾丽娜，陈世昌. 基于AHP和GIS的舟曲地质灾害易发性评价[J]. 西北地质，2024，57(1)：23-33.
Jia Lina，Chen Shichang. Geological hazard susceptibility evaluation based on AHP and GIS in Zhouqu County，Gansu[J]. Northwestern Geology，2024，57(1)：23-33.

[8] 杨吉红，李剑，颜良宇，等. 基于层次分析法和GIS的地质灾害易发性评价[J]. 路基工程，2024(5)：39-43.
Yang Jihong，Li Jian，Yan Liangyu，et al. Evaluation of geological hazard vulnerability based on hierarchical analysis method and GIS[J]. Subgrade Engineering，2024(5)：39-43.

[9] 吴润霖，党星海，周兆叶，等. 岷县地质灾害易损性模糊综合评价[J]. 地理空间信息，2021，19(3)：86-89，108，
Wu Runlin，Dang Xinghai，Zhou Zhaoye，et al. Fuzzy comprehensive evaluation of the vulnerability of geological disasters in Min County[J]. Geospatial Information，2021，19(3)：86-89，108.

[10] 狄靖月，徐辉，许凤雯，等. 基于逆推法和德尔菲法的地质灾害气象服务效益评估[J]. 气象，2019，45(5)：705-712.
Di Jingyue，Xu Hui，Xu Fengwen，et al. Benefit assessment of geological hazard meteorological services based on inverse algorithm and evaluation method of Delphi[J]. Meteorological Monthly，2019，45(5)：705-712.

[11] 冯振，陈亮，王立朝，等. 区域地质灾害易发性评价的证据权法原理与实践[J]. 地质通报，2024，43(7)：1255-1265.
Feng Zhen，Chen Liang，Wang Lichao，et al. Principle and application of the weight-of-evidence method in regional landslide susceptibility assessment [J]. Geological Bulletin of China，2024，43(7)：1255-1265.

[12] 陈立华，李立丰，吴福，等. 基于GIS与信息量法的北流市地质灾害易发性评价[J]. 地球与环境，2020，48(4)：471-479.
Chen Lihua，Li Lifeng，Wu Fu，et al. Evaluation of the geological hazard vulnerability in the Beiliu City based on GIS and information value model[J]. Earth and Environment，2020，48(4)：471-479.

[13] 张重，龚健，李靖业，等. 基于信息量模型的三江源东部草地退化易发性评价：以青海省果洛州为例[J]. 资源科学，2022，44(3)：464-479.
Zhang Zhong，Gong Jian，Li Jingye，et al. Grassland degradation susceptibility assessment of the eastern area of the Three Rivers Source region based on the information quantity model：a case study of Golog Tibetan Autonomous Prefecture，Qinghai Province[J]. Resources Science，2022，44(3)：464-479.

[14] 翟文华，王小东，吴明堂，等. 基于频率比模型和随机森林模型耦合的地质灾害易发性评价[J]. 自然灾害学报，2023，32(6)：74-82.
Zhai Wenhua，Wang Xiaodong，Wu Mingtang，et al. Geological disaster susceptibility evaluation based on coupling of frequency ratio model and random forest model[J]. Journal of Natural Disasters，2023，32(6)：74-82.

[15] 洪增林，李永红，张玲玉，等. 一种基于主成分分析法的区域性地质灾害危险性评估方法[J]. 灾害学，2020，35(1)：118-124.
Hong Zenglin，Li Yonghong，Zhang Lingyu，et al. A method of regional geological hazard assessment based on principle component analysis[J]. Journal of Catastrophology，2020，35(1)：118-124.

[16] 王念秦，蒲凯超，李仁伟. 基于变异系数法的临潼区地质环境承载力综合评价[J]. 地下水，2018，40(2)：77-80.
Wang Nianqin，Pu Kaichao，Li Renwei. Comprehensive evaluation of geological environment carrying capacity for Lin Tong District based on variation coefficient method [J]. Ground Water，2018，40(2)：77-80.

[17] 杨海龙，樊晓一. 基于贡献权重法的苏宝河流域地震滑坡本底因子敏感性分析[J]. 路基工程，2016(3)：1-5.
Yang Hailong，Fan Xiaoyi. Sensitivity analysis of root factors of seismic landslide in subaohe basin based on contribution weight method[J]. Subgrade Engineering，2016(3)：1-5.

[18] 寸得欣，令狐昌卫，马一奇，等. 基于GIS和加权信息量模型的富源县地质灾害易发性评价[J]. 科学技术与工程，2024，24(18)：7563-7573.
Cun Dexin，Linghu Changwei，Ma Yiqi，et al. Evaluation of susceptibility to geological hazardin in Fuyuan County based on GIS and weighted information model[J]. Science Technology and Engineering，2024，24(18)：7563-7573.

[19] 丁赞，沈铭. 基于层次分析法和变异系数法的黄冈市地质环境承载力研究[J]. 资源环境与工程，2019，33(增刊1)：70-74，91.

Ding Zan, Shen Ming. Study on the bearing capacity of geological environment in Huanggang City based on analytic hierarchy process and variation coefficient method[J]. Resources Environment & Engineering, 2019, 33(S1): 70-74, 91.

[20] 杜国梁, 杨志华, 袁颖, 等. 基于逻辑回归-信息量的川藏交通廊道滑坡易发性评价[J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(5): 102-111.
Du Guoliang, Yang Zhihua, Yuan Ying, et al. Landslide susceptibility mapping in the Sichuan-Tibet traffic corridor using logistic regression-information value method[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48(5): 102-111.

[21] 田逸楠, 乃尉华, 师德扬, 等. 基于信息量模型-层次分析法的县域地质灾害风险评价: 以新疆乌恰县为例[J]. 新疆地质, 2024, 42(3): 425-430.
Tian Yinan, Nai Weihhua, Shi Deyang, et al. Geological hazard risk assessment based on information method analytic hierarchy process: an example from Wuqia County, Xinjiang Autonomous Region[J]. Xinjiang Geology, 2024, 42(3): 425-430.

[22] 姜锡宸, 刘桃. 基于层次分析-信息量模型的地质灾害风险性评价研究: 以四川省雅安市为例[J]. 地质灾害与环境保护, 2024, 35(3): 37-44.
Jiang Xichen, Liu Tao. Geological hazard risk assessment study based on AHP-information coupling model: a case study of Ya'an City in Sichuan Province[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2024, 35(3): 37-44.

[23] 焦伟之, 张明, 谢鑫鹏, 等. 基于GIS与加权信息量模型的城镇地质灾害易发性评价: 以大新镇为例[J]. 安全与环境工程, 2022, 29(4): 119-128.
Jiao Weizhi, Zhang Ming, Xie Xinpeng, et al. Susceptibility evaluation of urban geological disaster based on GIS and weighted information value model: a case study of Daxin Town[J]. Safety and Environmental Engineering, 2022, 29(4): 119-128.

[24] 毕结昂, 徐佩华, 宋盛渊, 等. 基于信息量-逻辑回归耦合模型的玛纳斯河流域地质灾害易发性评价[J]. 工程地质学报, 2022, 30(5): 1549-1560.
Bi Jie'ang, Xu Peihua, Song Shengyuan, et al. Assessment of the susceptibility to geological hazards in the Manas River basin based on the coupled information value-logistic regression model[J]. Journal of Engineering Geology, 2022, 30(5): 1549-1560.

[25] 田仕雄, 张路飞, 孟思宇, 等. AHP-信息量模型在斜坡类地质灾害易发性评价中的应用[J]. 河北地质大学学报, 2022, 45(6): 62-68.
Tian Shixiong, Zhang Lufei, Meng Siyu, et al. Application of AHP-informational quantity model in assessment of susceptibility of slope geological disasters[J]. Journal of Shijiazhuang University of Economics, 2022, 45(6): 62-68.

[26] 李威, 王蒙, 张钊, 等. 舟曲立节北山高位滑坡变形特征及成因研究[J]. 地震工程学报, 2025, 47(6): 1303-1314.
Li Wei, Wang Meng, Zhang Zhao, et al. Deformation characteristics and genetic mechanism of the Lijie North Mountain high-position landslide in Zhouqu County[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2025, 47(6): 1303-1314.

[27] 聂德新. 岩体结构理论在中国的广泛、成功应用及进展[J]. 工程地质学报, 2014, 22(4): 625-637.
Nie Dexin. Widely successful application and advancement of the rock mass structure theory in China[J]. Journal of Engineering Geology, 2014, 22(4): 625-637.

(本文编辑:张向红)