第 57 卷 第 6 期 2024 年 (总 238 期)

ュヒ 西 地 质

NORTHWESTERN GEOLOGY

Vol. 57 No. 6 2024(Sum238)



引文格式:孟晓捷,郭小鹏,薛强,等.黄土地质灾害评价因子地形起伏度提取最佳尺度研究:以榆林市米脂县为例[J]. 西北地质,2024,57(6):234-243. DOI: 10.12401/j.nwg.2023181

Citation: MENG Xiaojie, GUO Xiaopeng, XUE Qiang, et al. Research on Optimal Scale for Extraction of Relief Amplitude in Loess Geological Hazards Assessment Factors: a Case Study of Mizhi County, Yulin City[J]. Northwestern Geology, 2024, 57(6): 234–243. DOI: 10.12401/j.nwg.2023181

黄土地质灾害评价因子地形起伏度提取最佳尺度研究: 以榆林市米脂县为例

孟晓捷,郭小鹏*,薛强,冯卫,洪勃

(自然资源部黄土地质灾害重点实验室,中国地质调查局西安地质调查中心,陕西西安 710119)

摘 要:目前地质灾害相关评价工作中,部分研究人员对于"地形起伏度"(也称相对坡高)选 取最佳窗口单元进行提取存在着一定程度的随意性和主观性,致使取得的地形起伏度参数与研 究区实际情况相比存在一定的误差。后续地灾评价中,无论采用以栅格为基础的信息量模型还 是现今普遍流行的各类机器学习方法,其评价因子本身的误差甚至错误会导致评价结果可靠性 降低。笔者基于ArcGIS平台,利用陕西省榆林市米脂县分辨率为2m的DEM数据,采用均值变 点分析法,通过两轮分析,数量分别为10×10和1×1的矩形窗口逐渐逼近研究区地形起伏度的最 佳统计单元,计算出该县地形起伏度为0~256.60m,最佳统计单元为59×59的窗格,栅格单元边 长为2m,提取窗格边长为118m,对应提取面积为13924m²。随后依据陕北黄土地区历史滑坡及 崩塌的易发坡高统计将米脂县地形起伏度等分为<20m、20~40m、40~60m、60~80m、>80m 等5个区间,受原始地形条件及削坡建房、建厂等综合影响,40~80m为灾害隐患发育的主要区间, 灾害隐患点占比为88.60%。结合米脂县地质灾害隐患点信息量值和灾害点密度对比曲线,结果 显示二者有很好的相关性,体现了地形起伏度统计单元选取和区间划分的合理性。本研究所采 用的高精度 DEM 数据的计算及分析结果,首先避免了目视寻找拐点的弊端,其次在黄土高原地 区千沟万壑的地貌条件中能够满足数字地形分析与精细化地质灾害调查的需求,可为黄土高原 区地质灾害评价防治及黄河中上游流域的水土流失治理与生态环境保护提供一定的技术支撑。 关键词:黄土地质灾害;地形起伏度;均值变点法;最佳窗口单元;米脂县

中图分类号: P694 文献标志码: A 文章编号: 1009-6248(2024)06-0234-10

Research on Optimal Scale for Extraction of Relief Amplitude in Loess Geological Hazards Assessment Factors: a Case Study of Mizhi County, Yulin City

MENG Xiaojie, GUO Xiaopeng*, XUE Qiang, FENG Wei, HONG Bo

(Key Laboratory for Geo-hazards in Loess Area, MNR, Xi'an Center of China Geological Survey, Xi'an 710119, Shaanxi, China)

Abstract: In the current evaluation of geological hazards, there is a certain degree of arbitrariness and subjec-

基金项目:中国地质调查局三级项目"西北黄土地区县域地质灾害隐患综合遥感精细识别示范" (DD20230436)资助。

收稿日期: 2023-04-25;修回日期: 2023-09-20;责任编辑: 贾晓丹

作者简介:孟晓捷(1986-),男,高级工程师,从事地质灾害调查与风险评价工作。E-mail:270405820@qq.com。

^{*}通讯作者:郭小鹏(1991-),男,助理研究员,从事地质灾害调查、滑坡防治方法研究工作。E-mail:sjcgxp@163.com。

tivity in selecting the best window unit scale for the extraction of relief amplitude (also named relative slope height). The certain error exists as compared the obtained relief amplitude parameters with the actual situation in the study area. During the disaster assessment, using grid-based information models or various popular machine learning methods can lead to a reduction in the reliability of the evaluation results due to the errors of the evaluation factors. In the current study, we use DEM data (2 m resolution) of Mizhi County, adopt 10×10 , 1×1 rectangular windows for the relief amplitude extraction based on ArcGIS platform, and use the mean change-point analysis to calculate the relief amplitude of Mizhi County from 0-256.60 m, and the best statistical cell is 59×59 with the grid length of 2 m, and the side length of the extraction window is 118m and square is 13 924 m². Afterwards, according to the statistics on the slope height easily inducing historical landslides and collapses in the loess region of northern Shaanxi Province, the relief amplitude in Mizhi County is divided into five intervals: <20 m, 20-40 m, 40-60 m, 60-80 m and >80 m. Due to the comprehensive influence of the original terrain conditions, slope cutting and building of houses, factories, etc., 40-80 m is the main interval for the development of disaster hazards, with a proportion of 88.60% of disaster hazard points. The comparison curves of information value and hazard point density of each interval were made, which demonstrates the reasonableness of the selection of the statistical unit and the division of the interval of the relief amplitude. The calculation and analysis results of high-precision DEM data adopted first avoid the drawbacks of visually searching for inflection points, and secondly meet the needs of digital terrain analysis and refined geological hazard investigation in the mountainous terrains of the Loess Plateau region. The method and the results can provide technical support for the evaluation and prevention of geological hazards in the Loess Plateau area and the management of soil erosion and ecological environment protection in the middle and upper reaches of the Yellow River basin. Keywords: loess geological hazard; relief Amplitude; mean change-point analysis; best window unit;

地形起伏度也称为地势起伏度、地表起伏度(游 珍等,2018)或相对高度(张锦明等,2011),作为描述 地形地貌条件的因子之一,是描述一个区域的海拔高 差与地表切割程度的宏观性指标(Ghimire M, 2001), 通常表征地表侵蚀和物质坡移的势能(宿星等,2017)。 其概念最早由原苏联科学家(A·H·斯皮里顿诺夫, 1956)提出后,广泛应用于中国地理科学及地貌学领 域研究,随后在资源环境评价及人文社科领域与人口、 经济等社会相互关系的研究中也受到相当的重视(封 志明等, 2007, 2011)。地形起伏度计算通常为:分析 区域窗口内的海拔最高值与海拔最低值之差。计算 地形起伏度的关键在于确定分析窗口的大小,随着统 计窗口半径的增大,地形起伏度也随之变化,到达某 一临界点就趋于稳定,该临界点就是确定地形起伏度 的最佳统计单元。确定最佳分析区域的大小,决定着 地形起伏度提取是否有效(朱红春等,2005)。

针对地形起伏度最佳提取窗口的研究,众学者采 用不同尺度的 DEM 在国内不同区域进行了研究工作, 结果因 DEM 栅格大小、研究区域地貌特征而有所不 同。有学者针对全国地形起伏度分别通过 1:20 万地 形图进行穿插采样获得 600 个样点(涂汉明等, 1990), 并结合 1:5 万地形图进行小区采样作为补充,得出 全国地形起伏度最佳统计单元面积为 21 km²;或是通 过分辨率为 90 m 的 SRTM-DEM 数据,采用人工作图、 最大高差、模糊数学及均值变点法进行分析,得出中 国地形起伏度最佳统计单元面积为 2.25 km²(赵斌滨 等, 2015);针对黄土高原区,刘元等(2021)基于分辨 率 12.5 m 的 ALOS_PALSRA_DEM 数据,采用均值变 点法得出榆林市地形起伏度最佳统计单元面积为 5.062 5 km²; 宁婷等(2022)通过分辨率 30 m 的 ASTER-GDEM 和分辨率 90 m 的 SRTM-DEM 数据,采用均值 变点法得出山西省地形起伏度最佳统计单元面积分 别为 0.705 65 km²和 1.166 45 km²。

由于地形起伏度所描述的斜坡特征是黄土地质 灾害发生的重要影响因素(郭芳芳等,2008;张明媚等, 2020),故近年来在地质灾害评价领域中,地形起伏度 (或称相对坡高)作为影响地质灾害发生的因子之一, 常常结合层次分析法、信息量法及其他机器学习方法 来进行分析和评价(张志沛等,2020;吴常润等,2020; 邱维蓉等,2020)。但由于地质灾害研究与地理研究

Mizhi County

等方向融合程度及相互交流深度不够,在评价中对于 地形起伏度如何选取最佳提取单元缺乏深入思索和 探讨,大多数是人为主观的判断统计单元数量(伍剑 波等,2022),有着较强的随意性,所取得的地形起伏 度参数与研究区实际情况相比存在一定的误差。后 续地质灾害评价中,其评价因子本身的误差甚至错误 也会导致评价结果可靠性降低。

笔者利用陕西省榆林市自然资源局提供的分辨 率为2m的航测DEM数据来研究榆林市米脂县的地 形起伏度最佳统计单元面积,并分析该县地质灾害隐 患点在不同地形起伏度条件下的斜坡空间分布关系, 研究采用高精度DEM数据的计算及分析结果,在黄 土高原地区千沟万壑的地貌条件中能够满足数字地 形分析与精细化地质灾害调查的需求,可为黄土高原 区地质灾害评价和防治以及黄河中游流域的水土流 失与生态环境保护和规划提供一定的技术支撑。

1 研究区概况

米脂县位于陕西省北部榆林市,坐标 E 109°49′~ 110°29′, N 37°39′~38°05′,下辖共 9 个镇(街道办),206 个行政村,面积为 1178.8 km²。县域整体地貌可划分为

200 km

黄土梁峁丘陵区和河谷阶地区。大部分地表被第四系 黄土所覆盖,只在较大河谷两侧裸露少量基岩,以三叠 系为主,岩层倾向大致向西,倾角一般较小,多不超过 5°。米脂县地貌发育与整个陕北黄土高原一致,是黄 土覆盖与流水冲刷此消彼长的结果,属于典型的黄 土高原丘陵沟壑区,地形切割强烈,千沟万壑绵延数十 千米。地势总体西北高东南低,海拔818.06~1259.73 m (图1)。该县中部为无定河水系,东部为黄河水系,与 中间高耸的黄土丘陵沟壑一起构成了黄土高原重要的 地质灾害及生态修复的重点研究区域。

1999年以来,中国地质调查局依次在黄土区开展 了县(市)地质灾害调查(1:10万)、地质灾害详查 (1:5万)、重要城镇地质灾害风险调查(1:1万)等 不同比例尺的工作,初步摸清了黄土区地质灾害发育 特征及情况,建立并逐步完善了群测群防体系,显著 减轻了地质灾害所带来的人员伤亡和社会损失(张茂 省等,2021;孙萍萍等,2022;薛强等,2023)。

但榆林市位于黄土高原北部,地质环境复杂且脆弱,加上削坡修路、切坡建房等人类工程促使崩滑流 灾害呈不断上升趋势(唐亚明,2015),黄土区还面临 着气候暖湿化,降雨线北移、极端降雨频发(李双双等, 2020)和汛期延长的新形势。2021年陕北经历了22

高程 (m)

1 259.73



图1 研究区地理位置图 Fig. 1 Location of research area

轮强降雨过程,使得以往地灾调查基础上所划分的地 质灾害低易发区发生了大量的灾害,如2021年发生 在府谷县和子洲县两期地质灾害伤亡事件,均不在隐 患点之列,暴露出当前地质灾害调查精度低,风险底 数不清,防治能力总体偏弱的问题。

因此围绕着"隐患在哪里、风险有多高?"的问题和摸清榆林市黄土地质灾害家底,针对性实施精准防控的目标,2022年3月,榆林市政府与西安交通大学统筹部署实施地灾隐患大核查工作,依靠多年来对黄土区地质灾害发育特征的统计分析结果,利用高精度 DEM 和遥感对黄土地质灾害进行有效的早期识别,努力把地质灾害风险和损失降到最低。对米脂县进行地质灾害大核查后可知:该县发育有4406处地质灾害隐患点,其中滑坡隐患258处,崩塌隐患4146处,为地质灾害的高发易发区域,具有点多面广、隐蔽性强和危害性大的特点。

2 米脂县地形起伏度提取方法

2.1 数据来源及处理

本研究采用 2 m 分辨率的 DEM 数据,由榆林市 自然资源局所提供,可满足大比例尺调查及地质灾害 调查斜坡单元高精度刻化,其坐标系为 CGCS2000,投 影参数为 CGCS2000_3_Degree_GK_Zone_37,数据格 式为 ArcGIS 的 img 格式。需要说明的是,米脂县西 北角 4 km 处有一块面积为 8.07 km² 的飞地,隶属郭兴 庄镇,与米脂县并不接壤,单独对这块飞地所做的地 形起伏度提取后结果为 0~65.46 m,处于米脂县提取 的地形起伏度区间(0~256.60 m),为了保证地形起伏 度提取所需数据的连续性,本研究不涵盖此飞地面积, 另外飞地有灾害点 22 处也剔除在外,不参与后期分 析。因此本研究中米脂县的面积为1170.73 km²,涉及 米脂县的灾害总数为4384 处。

2.2 提取方法选择

关于地形起伏度的提取最佳单元的计算,前人通 常采用人工作图法(赵斌滨等,2015)、最大高差法(涂 汉明等,1990)、模糊数学法(涂汉明等,1990)、 CUSUM分析算法(王志恒等,2014)及均值变点法(陈 学兄等,2016)等方法。人工作图法是通过拟合地势 起伏度值随单元面积的变化曲线,人工判断拐点,易 受主观影响;最大高差法及模糊数学法的应用易受研 究区的范围和出图比例尺的调整而有所变化,还要考 虑不同地貌类型过渡的影响;CUSUM分析算法其本 质上与均值变点接近,均为统计学的方法,只是表达 形式和置信区间有所区别。笔者考虑在地灾评价中 通常需要采用最快速、最稳妥且最适配于作图及统计 软件的方法,因此采用均值变点法。

地形起伏度的提取,通过 ArcGIS 的 GRID 模块采 用固定半径窗口进行移动来实现。矩形窗口通过在 DEM 栅格数据逐点移动访问窗口内的每个栅格像元 (图 2),并识别出窗口内所有输入像元值的值,运算后 可得最大值、平均值、差值等关键信息,从而实现对栅 格数据的拓展分析(刘新华等,2001)。起伏度的数值 会随着统计窗格面积变化而呈现出 logarithmic 曲线。 根据地形起伏度定义及地貌发育理论(王让虎等,2016), 该曲线必然存在一个变化趋势由陡变缓的拐点,对应 的窗格值即为最佳统计单元面积。均值变点法可以避 免目视寻找拐点的弊端,直接提取最准确的拐点所在。



图2 地形起伏度提取窗口工作示意图

Fig. 2 The window operating of relief amplitude extraction

2.3 均值变点法计算原理

(1)计算各窗口下单位地势度T。由于栅格精度

达到2m,逐步计算地形起伏度的运算量过大,因而笔 者令起始窗口为10×10,终止窗口为500×500,窗口半 径增幅为10,移动步距为10。

$$T_i = \frac{t_i}{s_i} i = 10, 20, 30, 40 \cdots 500$$
(1)

式(1)中,*T_i*为各不同半径窗口的单位起伏度,单 位为 m;*t_i*为该分析窗口所统计出的平均地形起伏度, 单位为 m;*s_i*为该分析窗口的统计面积,单位为 m²;*i* 为所采用的窗口半径数量。

(2)对步骤(1)所计算出的单位地势度 T 取对数 lnT,得到新的一组非线性数列样本 X,数列 X 可表示 为{X_i, *i*=10,20,30,40······,500};然后计算数列 X 的算 术平均值 X和离差平方和 S:

$$\overline{X} = \sum_{i=10}^{n} \frac{X_i}{n-1}$$
 (n = 50) (2)

$$S = (Xi - \overline{X}) \qquad (n = 50) \qquad (3)$$

(3)对于每个 k(k≥2), 将数列 X分成前后两组数 列, 即 {X₂, X₃…X_{k-1}}和 {X_k, X_{k+1}…X₅₀}, 随后分别计算前 后两个数列的算术平均值 \overline{X}_{kl} , \overline{X}_{k2} , 以及两段样本的离差平方和之和 S_{l} 。

(4)计算 *S* 与 *S_i* 的差值Δ*S*,通过做出Δ*S* 与窗口大小的曲线来寻找由陡变缓的区间,随后在区间内将窗口增幅改为 1,重复上述 4 个步骤,逐步逼近所要寻找的最佳窗口大小:

 $\Delta S = S - S_i \qquad (i = 1, 2, 3, 4 \cdots , 50) \qquad (4)$

3 米脂县地形起伏度提取计算

3.1 窗口为 10×10 的地形起伏度提取

针对米脂县精度为 2m 的 DEM 栅格数据, 笔者采用 ArcGIS 软件焦点分析工具进行提取, 以窗口数量间隔为 10 先求得均值变点法的变化区间, 即计算 10×10、20×20、30×30、……500×500 的平均地形起伏度, 各窗口所对应的地形起伏度见表 1。

表1 窗口数量、面积与平均地形起伏度关系统计表

Tab. 1 Statistics on the number and area of rectangular windows with the average relief amplitude

窗口 数量 (个)	窗口面积 (m ²)	平均地形起伏 度(m)	窗口 数量 (个)	窗口面积 (m ²)	平均地形起伏 度(m)	窗口 数量 (个)	窗口面积 (m ²)	平均地形起伏 度(m)
10	400	12.291 2	180	129 600	98.692 5	350	490 000	124.642 1
20	1 600	24.208 9	190	144 400	100.804 5	360	518 400	125.769 5
30	3 600	34.308 0	200	160 000	102.803 6	370	547 600	126.871 0
40	6 400	42.892 3	210	176 400	104.701 2	380	577 600	127.947 2
50	10 000	50.254 8	220	193 600	106.507 4	390	608 400	128.9990
60	14 400	56.641 4	230	211 600	108.2303	400	640 000	130.028 2
70	19 600	62.249 4	240	230 400	109.8784	410	672 400	131.036 5
80	25 600	67.230 3	250	250 000	111.459 3	420	705 600	132.024 3
90	32 400	71.699 8	260	270 400	112.978 7	430	739 600	132.991 6
100	40 000	75.745 1	270	291 600	114.442 5	440	774 400	133.9396
110	48 400	79.434 4	280	313 600	115.8560	450	810 000	134.8693
120	57 600	82.820 3	290	336 400	117.223 4	460	846 400	135.781 3
130	67 600	85.947 1	300	360 000	118.548 5	470	883 600	136.6766
140	78 400	88.848 7	310	384 400	119.835 5	480	921 600	137.5567
150	90 000	91.552 3	320	409 600	121.086 0	490	960 400	138.421 9
160	102 400	94.081 3	330	435 600	122.301 8	500	1 000 000	139.272 5
170	115 600	96.456 1	340	462 400	123.486 8			

为了分析平均起伏度和窗口步距及对应面积之间的相关性,将表1的平均起伏度与窗口面积曲线进行拟合,得到矩形窗口的拟合曲线(图3),其对应的指数拟合方程分别为: $y=35.964 \ln(x)-86.76$,相关系数 $R^2 = 0.9911$ 。由于采用高精度 2m 分辨率的 DEM 数

据进行计算,得到的相关系数高达 0.99 以上,体现了 数据的精确性。为了避免目视寻找而产生误差,采用 均值变点法计算分析,结合图 4、表 2 可知, ΔS 变化曲 线先增后减,其中曲线最高点对应的变化点的窗口数 量约为 60,由于窗口步距为 10,其ΔS 的拐点位于窗口



图3 矩形窗口提取地形起伏度拟合曲线

Fig. 3 Fitting curve of rectangular windows extracting the average relief amplitude



图4 矩形窗口ΔS 变化曲线(步距 10)

Fig. 4 Rectangular window difference variation curve (step distance of 10)

Tab. 2 Substee results of the mean-change-point method for rectangular window											
窗口	ΔS	窗口	ΔS	窗口	ΔS	窗口	ΔS				
数量(个)	$(S-S_i)$	数量(个)	$(S-S_i)$	数量(个)	$(S-S_i)$	数量(个)	$(S-S_i)$				
10	4.260 8	140	6.537 2	270	3.8843	400	1.572 3				
20	6.052 9	150	6.330 6	280	3.693 5	410	1.408 0				
30	6.946 6	160	6.121 7	290	3.505 1	420	1.245 3				
40	7.403 4	170	5.911 9	300	3.3190	430	1.084 3				
50	7.6176	180	5.701 9	310	3.135 1	440	0.924 9				
60	7.6860	190	5.492 7	320	2.953 4	450	0.7670				
70	7.662 1	200	5.284 6	330	2.773 9	460	0.6107				
80	7.577 3	210	5.078 1	340	2.5964	470	0.4559				
90	7.4514	220	4.873 5	350	2.421 0	480	0.302 5				
100	7.297 3	230	4.671 1	360	2.247 5	490	0.1506				
110	7.123 6	240	4.470 8	370	2.076 0	500					
120	6.9364	250	4.272 9	380	1.906 3						
130	6.7399	260	4.077 4	390	1.7384						

表 2 矩形窗口均值变点法统计结果表(步距为 10) Tab. 2 Statistics results of the mean-change-point method for rectangular window

数量 50~70, 对应窗口面积区间分别为10 000~19 600 m², 需要采用第二轮窗口半径数量为1 的均值变点法 来确定拐点位置所在。

3.2 窗口为 1×1 的地形起伏度提取

由于 DEM 栅格精度达到 2 m,运算量偏大,上一 轮已分别通过 10×10步距(20 m×20 m)的矩形窗口采 用均值变点法求得ΔS 变化区间对应的窗口数量区间 为 50~70。为了进一步求出详细的窗口大小,本轮通 过 1×1步距求得矩形窗口数量所对应的ΔS 拐点位置, 即为它们的地形起伏度最佳提取面积。由表 3 和图 5 可知,经过两轮均值变点法计算,研究区提取地形起 伏度最佳统计单元为 59×59 窗格,栅格单元边长为 2 m,提取窗格边长为 118 m,对应提取面积大小为 13 924 m²。

4 米脂县地形起伏度与地质灾害发育 关系分析

4.1 地形起伏度的划分

参照前文计算结果,以窗格数量 59(边长为118 m) 来提取米脂县地形起伏度,结果为 0~256.60 m,平均 值为 56.040 7 m,标准差为 17.851 7 m。为了便于在地 质灾害相关评价中将地形起伏度单因子进行分类,依 据陕北黄土地区历史滑坡及崩塌的易发坡高统计结 果(孙萍萍等,2019)将该县地形起伏度等分为 5 个区 间: <20 m、20~40 m、40~60 m、60~80 m、>80 m (图 6)。其中<20 m 的边坡多分布于沟谷内及无定 河河道,>80 m 的边坡多分布于黄土沟壑的斜坡上方。

Tab. 3 Statistics results of the mean-change-point method for rectangular window

窗口	窗口	ΔS	窗口	窗口	ΔS	窗口	窗口	ΔS
数量(个)	面积(m ²)	$(S-S_i)$	数量(个)	面积(m ²)	$(S-S_i)$	数量(个)	面积(m ²)	$(S-S_i)$
50	10 000	0.013 9	57	12 996	0.064 2	64	16 384	0.049 8
51	10 404	0.025 9	58	13 456	0.065 6	65	16 900	0.043 6
52	10 816	0.036 2	59	13 924	0.065 7	66	17 424	0.036 5
53	11 236	0.044 8	60	14 400	0.064 7	67	17 956	0.028 6
54	11 664	0.051 9	61	14 884	0.062 6	68	18 496	0.0198
55	12 100	0.057 4	62	15 376	0.059 3	69	19 044	0.010 3
56	12 544	0.061 5	63	15 876	0.055 1	70	19 600	







distance of 1)

4.2 地形起伏度对地质灾害分布的影响

"信息量法"最早由美国数学家 Shannon C E(1948)推导出计算公式。20世纪 80 年代以来,该方 法被引入地灾预测研究中,结合 GIS 技术可快速、动态地对研究区做出分析评价。其模型计算公式(下式 为单因子信息量求值)为:

$$I = Ln \frac{N_i/N}{S_i/S} \tag{5}$$

式中: I 为影响因子对滑坡提供的信息量; N 为研 究区已发生滑坡总个数; S 为研究区总面积; N_i 为分布 在因子各类别中滑坡的个数; S_i 为区内评价因子的面



图6 米脂县地形起伏度和地质灾害隐患点分布图 Fig. 6 Relief amplitude and distribution of geological hazard potential sites in Mizhi County

积。最终计算出的 I 为该影响因子的信息量值,其值 越大表示越有利于滑坡的发生,即滑坡的易发性越高 (孟庆华, 2011; 孟晓捷等, 2022)。

经米脂县地质灾害大核查可知,该县除去郭兴庄 飞地外发育有4384处地质灾害隐患点,其中滑坡隐患 257 处, 崩塌隐患 4 129 处。米脂县面积为 1 170.73 km², 灾害点密度为 3.744 7 处/km²。在 ArcGIS 平台中将灾 害信息与地形起伏度分布图层采用信息量法进行空

间分析(图 6),得出相关统计数据(表 4)。由表可知, 96.92%的灾害隐患(4249处)分布于坡高>40m以上 的地区;受原始地形条件及削坡建房、建厂等综合影 响, 坡高 40~80 m 的边坡为灾害隐患发育的主要区间, 灾害隐患点占比为 88.60%, 这与野外调查所看到的现 场情况基本一致(图 7a、图 7b)。坡高<20 m 的边坡 多分布于沟谷底部、无定河两岸国道旁(图 7c)及黄土 梁峁沟壑的边缘地区,该区域内灾害点数量最少。

Τa	ıb. 4	I T	he :	inf	orma	tion	val	ue	base	on	cl	assi	fica	tio	n oi	f re	lief	f amp	lit	ud	e

地形起伏 度分级	分级面积(km ²)	灾害点 数量(个)	灾害点百分比	分级灾害 点密度	信息量I	
≪20 m	45.80	20	0.46%	0.436 7	-2.148 9	
$20\sim40~m$	134.80	115	2.62%	0.853 1	-1.479 2	
$40\sim 60~m$	494.51	1 658	37.82%	3.352 8	-0.110 5	
$60\sim 80~m$	407.80	2 226	50.78%	5.458 6	0.3769	
>80 m	87.82	365	8.33%	4.156 1	0.1043	



(a). 前马家园则村李保元屋后滑坡





(c). 吴家沟村 210 国道岩质崩塌

图7 米脂县灾害隐患图片

Fig. 7 Pictures of potential hazards in Mizhi County

另外据表4的统计数据,得出各区间的地质灾害 隐患点信息量值和灾害点密度对比曲线(图 8)。由图 可知,在各地形起伏度区间内地质灾害隐患点信息量



图8 米脂县地形起伏度信息量值与 分级灾害点密度对比图

Fig. 8 Comparison curve between relief amplitude information quantity value and classified hazard density in Mizhi County

值和灾害点密度有着较好的相关性,说明本研究地形 起伏度统计单元的选取和区间划分是合理的。

结论 5

(1)基于陕西省榆林市米脂县2m分辨率的DEM 数据,采取10×10步距矩形窗口逐步提取地形起伏度, 并与窗口面积曲线进行拟合,得到的拟合曲线相关性 高达 0.99 以上, 体现了采用高分辨率 DEM 数据进行 分析的精确性。

(2)结合均值变点法针对拟合曲线"由陡变缓" 的拐点进行最佳统计单元提取,避免了目视寻找拐点 的弊端。经过两轮计算得到米脂县地形起伏度最佳 统计单元为 59×59 的窗格, 栅格单元边长为 2 m, 提取 窗格边长为 118 m, 对应提取面积大小为 13 924 m²。 依据陕北黄土地区历史滑坡及崩塌的易发坡高统计

将米脂县地形起伏度等分为5个区间:<20m、20~ 40m、40~60m、60~80m、>80m。采用信息量法得 到各区间面积分别为45.80km²、134.80km²、494.51km²、 407.80km²、87.82km²,对应的灾害隐患点数量分别为 20处、115处、1658处、2226处、365处。受原始地 形条件及削坡建房、建厂等综合影响,40~80m为灾 害隐患发育的主要区间,灾害隐患点占比为88.60%。

(3)根据各区间的地质灾害隐患点信息量值和灾 害点密度对比曲线,得出在各地形起伏度区间内两者 有着较好的相关性,也从侧面验证了地形起伏度统计 单元选取和区间划分的合理性。该结果可为黄土高 原区地质灾害评价、防治及黄河中游流域的水土流失 与生态环境保护和规划提供一定的技术支撑。

致谢: 衷心感谢西安交通大学张茂省教授团队, 在米脂县对笔者所在的地质灾害大核查项目的认真 指导。在项目开展当中,包括资料收集及野外调查 过程中得到了榆林市自然资源和规划局、米脂县自 然资源和规划局、米脂县各镇(街道办)和各村干部 的大力支持和帮助,在此一并表示衷心感谢!也感 谢项目组所有成员的艰辛付出。

参考文献(References):

A•И•斯皮里顿诺夫. 地貌制图学[M]. 北京: 地质出版社, 1956. A•И•СЛИРИДОНОВ. Geomorphological Cartography[M]. Beijing: Geological PublishingHouse, 1956.

- 陈学兄,张小军,常庆瑞,等.陕西省地形起伏度最佳计算单元 研究[J].水土保持通报,2016,36(3):265-270.
- CHEN Xuexiong, ZHANG Xiaojun, CHANG Qingrui, et al. A Study on Optimal Statistical Unit for ReliefAmplitude of Land Surface in Shaanxi Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2016, 36(3): 265–270.
- 封志明, 唐焰, 杨艳昭, 等. 中国地形起伏度及其与人口分布的 相关性[J]. 地理学报, 2007, 18(2): 237-246.
- FENG Zhiming, TANG Yan, YANG Yanzhao, et al. Relief degree of land surface in China and its correlation with population distribution[J]. Acta Geographica Sinica, 2007, 18(2); 237–246.
- 封志明,张丹,杨艳昭,等.中国分县地形起伏度及其与人口分 布和经济发展的相关性[J].吉林大学社会科学学报,2011, 51(1):146-160.
- FENG Zhiming, ZHANG Dan, YANG Yanzhao, et. al. Relief degree of land surface in China at county levelbase on GIS and its correlation between population density and economic development[J]. Jilin University Journal Social Science Edition, 2011, 51(1): 146–160.
- 郭芳芳,杨农,孟晖,等.地形起伏度和坡度在区域滑坡灾害评价中的应用[J].中国地质,2008,35(1):131-143.

- GUO Fangfang, YANG Nong, MENG Hui, et al. Application of the relief amplitude and slope analysis toregional landslide hazard assessments[J]. Geology in China, 2008, 35(1): 131–143.
- 刘新华,杨勤科,汤国安.中国地形起伏度的提取及在水土流失 定量评价中的应用[J].水土保持通报,2001,21(1):57-59.
- LIU Xinhua, YANG Qinke, TANG Guo'an. Extraction and application of relief of China based on DEM andGIS method[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2001, 21(1): 57–59.
- 李双双, 汪成博, 延军平, 等. 面向事件过程的秦岭南北极端降水时空变化特征[J]. 地理学报, 2020, 75(5): 989-1007.
- LI Shuangshuang, WANG Chengbo, YAN Junping, et. al. Variability of the event-based extreme precipitationin the south and north Qinling Mountains[J]. Acta Geographica Sinica, 2020, 75(5): 989–1007.
- 刘元, 韩磊. 基于不同分辨率 DEM 的黄土高原地形起伏度研究 [J]. 河南科技, 2021, 27: 89–94.
- LIU Yuan, HAN Lei. Study on Relief Amplitude of the Loess Plateau Based on DEM with DifferentResolutions[J]. Henan Science and Technology, 2021, 27: 89–94.
- 孟庆华.秦岭山区地质灾害风险评估方法研究—以陕西凤县为 例[D].北京:中国地质科学院,2011:62.
- MENG Qinghua. Study on the Methods of Geohazards Risk Assessment in Qinling Mountain—A case studyof Feng County, Baoji City, Shaanxi Province[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 2011: 62.
- 孟晓捷,张新社,曾庆铭,等.基于加权信息量法的黄土滑坡易 发性评价——以1:5万天水市麦积幅为例[J].西北地质, 2022,55(2):249-259.
- MENG Xiaojie, ZHANG Xinshe, ZENG Qingming, et al. The Susceptibility Evaluation of Loess LandslideBased on Weighted Information Value Method—Taking 1 : 50 000 Map of Maiji District of Tianshui City AsAn Example[J]. Northwestern Geology, 2022, 55(2): 249–259.
- 宁婷,崔伟,马晓勇,等.基于均值变点法提取地形起伏度的影响因素分析——以黄河流域(山西段)为例[J].测绘通报, 2022,(2):159-163.
- NING Ting, CUI Wei, MA Xiaoyong, et al. Analysis of factors affecting the extraction of relief amplitude bymean change point method: taking the Yellow River Basin in Shanxi as an example[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2022, (2): 159–163.
- 邱维蓉,吴帮玉,潘学树,等.几种聚类优化的机器学习方法在 灵台县滑坡易发性评价中的应用[J].西北地质,2020, 53(1):222-233.
- QIU Weirong, WU Bangyu, PAN Xueshu, et al. Application of Several Cluster-optimization-based MachineLearning Methods in Evaluation of Landslide Susceptibility in Lingtai County[J]. Northwestern Geology, 2020, 53(1): 222–233.
- 宿星,魏万鸿,郭万钦,等.基于 SRTM DEM 的地形起伏度对天水市黄土滑坡的影响分析[J].冰川冻土,2017,39(3):616-622.
- SU Xing, WEI Wanhong, GUO Wanqin, et al. Analyzing the impact of relief amplitude to loess landslidesbased on SRTM DEM in

Tianshui Prefecture [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2017, 39(3): 616–622.

- 孙萍萍,张茂省,程秀娟,等.黄土高原地质灾害发生规律[J]. 山地学报,2019,37(5):737-746.
- SUN Pingping, ZHANG Maosheng, CHENG Xiujuan, et. al. On the Regularity of Geological Hazards on theLoess Plateau in China[J]. Mountain Research. 2019, 3 7(5): 737-746.
- 孙萍萍,张茂省,贾俊,等.中国西部黄土区地质灾害调查研究 进展[J].西北地质,2022,55(3):96-107.
- SUN Pingping, ZHANG Maosheng, JIA Jun, et. al. Geo- hazards research and investigation in the LoessRegions of Western China[J]. Northwestern Geology, 2022, 55(3): 96–107.
- 唐亚明,张茂省,李政国,等.国内外地质灾害风险管理对比及 评述[J].西北地质,2015,48(2):238-246.
- TANG Yaming, ZHANG Maosheng, LI Zhengguo, et. al. Review and Comparison onInland and Overseas Geo-hazards Risk Management[J]. Northwestern Geology, 2015, 48(2): 238–246.
- 涂汉明, 刘振东. 中国地势起伏度最佳统计单元的求证[J]. 湖 南大学学报(自然科学版), 1990, 12(3): 266–271.
- TU Hanming, LIU Zhendong. Demonstrating on optimum statistic unit of relief amplitude in China[J]. Journal of Hubei University(Natural Science), 1990, 12(3): 266–271.
- 王让虎,张树文,蒲罗曼,等.基于 ASTERGDEM 和均值变点分析的中国东北地形起伏度研究[J].干旱区资源与环境, 2016,30(6):49-54.
- WANG Ranghu, ZHANG Shuwen, PU Luoman, et al. Analysis on the relief amplitude in northeast China Based on ASTER GDEM and mean change point method[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2016, 30(6): 49–54.
- 王志恒, 胡卓玮, 赵文吉, 等. 应用累积和分析算法的地形起伏 度最佳统计单元确定[J]. 测绘科学, 2014, 39(6): 59-64.
- WANG Zhiheng, HU Zhuowei, ZHAO Wenji, et al. Extracting optimum statistical unit for relief degree of land surface with CUSUM algorithm[J]. Science of Surveying and Mapping, 2014, 39(6): 59–64.
- 吴常润,赵冬梅,刘澄静,等.基于 GIS 和信息量模型的陇川县 滑坡易发性评价[J].西北地质,2020,53(2):308-320.
- WU Changrun, ZHAO Dongmei, LIU Chengjing, et al. Landslide Susceptibility Assessment of LongchuanCounty Based on GIS and Information Value Model[J]. Northwestern Geology, 2020, 53(2): 308–320.
- 伍剑波, 孙强, 张泰丽, 等. 地形起伏度与滑坡发育的相关
 性——以丽水市滑坡为例[J]. 华东地质, 2022, 43(2):
 235-244.
- WU Jianbo, SUN Qiang, ZHANG Taili, et al. Research for the correlation between relief amplitude and landslides: a case study of Lishui City[J]. East China Geology, 2022, 43(2); 235–244.
- 薛强,张茂省,董英,等.基于 DEM 和遥感的黄土地质灾害精细 化风险识别——以陕北黄土高原区米脂县为例[J].中国 地质,2023,50(3):907-923.
- XUE Qiang, ZHANG Maosheng, DONG Ying, et al. Refinement risk

identification of loess geo-hazards based on DEM and remote sensing——Taking Mizhi County in the Loess Plateau of Northern Shaanxi as anexample[J]. Geology in China, 2023, 50(3): 907–923.

- 游珍,封志明,杨艳昭,等.中国 1km 地形起伏度数据集[J].全 球变化数据学报,2018,2(2):151-155.
- YOU Zhen, FENG Zhiming, YANG Yanzhao, et. al. Relief Degree of Land Surface Dataset of China (1 km)[J]. Journal of Global Change Data & Discovery, 2018, 2(2): 151–155.
- 张茂省,薛强,贾俊,等.地质灾害风险管理理论方法与实践 [M].北京:科学出版社,2021.
- ZHANG Maosheng, Xue Qiang, Jia Jun, et. al. Theory, Method and Practice of Geological Hazard RiskManagement[M]. Beijing: Science Press, 2021.
- 张锦明,游雄.地形起伏度最佳分析区域研究[J].测绘科学技术学报,2011,28(5):369-373.
- ZHANG Jinming, YOU Xiong. Investigating Optimum Statistical Unit of Relief[J]. Journal of Geomatics Science and Technology, 2011, 28(5): 369–373.
- 张明娟,薛永安.斜坡地质灾害敏感性评价中地势起伏度提取 最佳尺度研究[J].太原理工大学学报,2020,51(6):881-888.
- ZHANG Mingmei, XUE Yong'an. Optimal Scale for Extracting Relief Amplitude in Slope Geological Hazard Sensitivity Evaluation[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2020, 51(6): 881–888.
- 张志沛,魏在豪.基于加权信息量模型的滑坡灾害易发性评价——以灞桥区为例[J].科学技术与工程,2020,20(9): 3492-3500.
- ZHANG Zhipei, WEI Zaihao, et al. Landslide Susceptibility Assessment Based on Weighted InformationValues Model: Take Baqiao District as an Example[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(9): 3492–3500.
- 赵斌滨,程永锋,丁士君,等.基于 SRTM-DEM 的中国地势起伏 度统计单元研究[J].水利学报,2015,(SI):284-290.
- ZHAO Binbin, CHENG Yongfeng, DING Shijun, et al. Statistical unit of relief amplitude in China based on SRTM-DEM[J]. Shuili Xuebao, 2015, (S1): 284–290.
- 朱红春,陈楠,刘海英,等.自1:10000比例尺 DEM 提取地形起 伏度——以陕北黄土高原的实验为例[J].测绘科学,2005, 30(4):86-88.
- ZHU Hongchun, CHEN Nan, LIU Haiying, et al. Research on the relief based on 1: 10000 DEMs-A casestudy in the loess plateau of north Shaanxi province[J]. Science of Surveying and Mapping, 2005, 30(4): 86–88.
- Ghimire M. Geo-hydrological hazard and risk zonation of Banganga watershed using GIS and remote sensing[J]. Journal of Nepal Geological Society, 2001, 23: 99–110.
- Shannon C E. A mathematical theory of communication[J]. Bell Labs Technical Journal, 1948, 27(4): 623–656.