

桂先刚,梁收运,赵红亮,等.基于分形的巴谢河流域滑坡空间分布格局及其影响因素分析[J].地震工程学报,2020,42(1):250-258.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.01.250

GUI Xiangang, LIANG Shouyun, ZHAO Hongliang, et al. Spatial Distribution Pattern of Landslides and Its Influencing Factors in the Baxie River Basin Based on Fractal Theory[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2020, 42(1): 250-258. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2020.01.250

基于分形的巴谢河流域滑坡空间分布格局 及其影响因素分析

桂先刚, 梁收运, 赵红亮, 陈卓, 张洪伟

(兰州大学 西部灾害与环境力学教育部重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 定量研究区域滑坡空间分布规律, 揭示不同类型滑坡的分布格局, 对预测和评价滑坡危险性有重要指导意义。基于 ArcGIS 空间分析功能及分形理论的关联维数和盒计维数, 分析了巴谢河流域黄土滑坡及黄土-泥岩滑坡的空间分布格局及其影响因素。结果表明: 区域滑坡个体关联具有多尺度分形, 黄土滑坡与黄土-泥岩滑坡分别在 8 km、12 km 尺度上存在阈值, 滑坡个体在该阈值尺度前后呈现不同的相关程度, 且黄土滑坡个体空间的关联程度和聚集程度均高于黄土-泥岩滑坡; 黄土-泥岩滑坡分布范围广、形态复杂, 其面积展布盒计维数大于黄土滑坡; 地层岩性及坡度对两类滑坡分布格局的影响较大, 沟壑密度次之, 起伏度影响较小。

关键词: 滑坡; 分形分维; 空间分布格局; 影响因素分析

中图分类号: P642.22

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2020)01-0250-09

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2020.01.250

Spatial Distribution Pattern of Landslides and Its Influencing Factors in the Baxie River Basin Based on Fractal Theory

GUI Xiangang, LIANG Shouyun, ZHAO Hongliang, CHEN Zhuo, ZHANG Hongwei

(Key Laboratory of Mechanics on Disaster and Environment in Western China, Ministry of Education, Lanzhou University, Lanzhou 730000, Gansu, China)

Abstract: Quantitative study of the spatial distribution and revelation of the distribution patterns of different types of landslides are of great significance in predicting and evaluating their risk. Based on the spatial analysis function of ArcGIS and the correlation and box dimensions of fractal theory, spatial distribution patterns and influencing factors in landslides of different types were analyzed. The research showed that: (1) landslides in the Baxie River basin can be divided into 164 loess types with an area of $3.21 \times 10^6 \text{ m}^2$, and 85 loess-mud types with an area of 6.05×10^6

收稿日期: 2018-09-20

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2014CB744701); 国家自然科学基金(41272326)

第一作者简介: 桂先刚(1989-), 男, 贵州铜仁人, 硕士生, 从事地质工程方面研究。E-mail: guixg16@lzu.edu.cn。

通信作者: 梁收运(1965-), 男, 陕西蒲城人, 教授, 从事工程地质方面研究。E-mail: shouyunl@163.com。

m^2 。(2) Individual associations of regional landslides have multi-scale fractals. Loess landslides and loess-mud landslides have thresholds on scales of 8 km and 12 km, respectively. Individual landslides have different degrees of spatial correlation at any scale smaller or larger than the threshold scale, and the degree of spatial correlation and aggregation of loess landslides are always higher than those of loess-mud landslides. Area distribution box dimensions of loess-mud landslides are greater than those of loess landslides, indicating that loess-mud landslides have a wider distribution area and more complex distribution characteristics. (3) Analysis of influencing factors showed that the formation lithology and slope angle exert the biggest influence on the distribution patterns of regional landslides, followed by ravine density. Formation lithology and its combination directly determine landslide type and the complexity of the distribution of the landslide area. Distribution gradients of different types of landslides are not the same. Although the degree of undulation has an important impact on the development of landslides, it has less influence on the quantity and area distribution of both types of landslides.

Keywords: landslides; fractal dimension; spatial distribution pattern; influencing factors analysis

0 引言

滑坡是黄土地区的主要地质灾害之一,具有范围分布广、发生频率高、危害大等特点,严重威胁灾区人民生命财产安全,制约着社会经济的发展^[1-2]。定量研究滑坡发育程度和活动强度有助于提高防灾减灾的能力。滑坡的发生是内部地质环境因素与外界扰动环境因素综合作用的结果^[3]。由于这些内外因素分布的不规则性和复杂性,导致了区域滑坡分布的空间异质性^[4-5],同时也造成滑坡的规模和位置空间格局尤为复杂^[6]。实际上,滑坡灾害系统在形成及演化过程中不断地与外界发生物质和能量交换,是一个复杂的非线性系统,因而,对滑坡的评估变得尤为困难^[7]。近年来,分形理论逐渐成为研究自然界复杂现象的一种新方法,在滑坡地质灾害研究中的应用日益增多。许强^[8]研究得到向家坝水电站库区滑坡等地质灾害发育的频率与规模之间满足很好幂律规律。这种规律在区域滑坡分布中广泛存在^[9]。滑坡的发生往往伴随着其时空维和关联维的降低^[10]。易顺民^[11]系统地研究了西藏樟木地区滑坡活动空间分布,认为在一定尺度上滑坡空间分布结构具有很好的自相似性。WU 等^[12]对巴东县 11 处滑坡边界轨迹进行分形计算,认为分维值大小对应滑坡稳定程度,值越大,稳定性越差。LI 等^[13]通过滑坡分形丛集分布关系,提出了一种有效的滑坡易发性制图方法。区域滑坡空间分布在二维平面上表现为不规则的复杂图像。SEZER 等^[14]运用 FRACEK 软件来计算各种运动物体的分形维数,认为分维值越大,其形态就越复杂。YANG

等^[15]计算了三个时段的滑坡分形维数,认为分形维数可作为描述二维滑坡空间分布复杂性的替代指标。邱海军等^[4]根据不同规模黄土滑坡的关联维数,定量探讨了区域滑坡空间分布结构及其成因,认为关联维数越大,其聚集程度及空间占据能力就越弱。

可见,分形理论在滑坡空间分布特征、滑坡预测及评价等方面得到了广泛应用。但现有分形研究多是针对区域滑坡及单类滑坡进行的,对不同类型的滑坡空间分布格局研究较少见。深入探讨不同类型滑坡空间分布差异规律,对改进区域滑坡敏感性分析和危险性评价方法具有重要的意义。因此,本文基于分形理论的关联维数及盒计维数,从滑坡个体关联性和滑坡面积展布情况来阐明其分布格局,并揭示差异原因,以期对区域滑坡预测评价提供依据。

1 研究区概况及数据源

巴谢河流域位于黄河中上游,地处黄土高原西部的第三系临夏盆地内。地理坐标为 $103^{\circ}15' \sim 103^{\circ}45'E, 35^{\circ}27' \sim 35^{\circ}40'N$,流域面积约 432 km^2 。属半干旱大陆性气候,多年平均气温 5.6°C ,无霜期为 138 天,近 30 年降雨量 $375.6 \sim 682.6 \text{ mm}$ 。整体地势西高东低,高程为 $1\ 842 \sim 2\ 483 \text{ m}$,相对高差 641 m (图 1)。研究区内地层产状近水平,流域内未发现大型断裂、褶皱,构造较简单。区内黄土堆积厚度大、结构疏松,梁峁相间、沟谷纵横,地形切割强烈、水土流失严重。特殊的地质条件,导致区内滑坡地质灾害频发,新老滑坡交错重叠、密集成群。区内

发育多个灾难性大滑坡,如1983年洒勒山滑坡、1985年红庄滑坡等^[16]。到目前,该区滑坡仍不断发生,是滑坡灾害的重灾区。2016年6月10日,陈何村就发生了约 $2.4 \times 10^5 \text{ m}^3$ 的滑坡,毁坏公路,掩埋车辆^[17]。本文在大量滑坡调查的基础上,结合解译

的2002—2015年4期GoogleEarth遥感影像资料,在遥感影像图上解译出滑坡,并圈出滑坡边界,保存为*.Shape文件导入Arcgis10.3软件中,计算出各滑坡面的中心及面积。用滑坡面中心坐标代替为滑坡点坐标,建立了研究区滑坡编录数据库(图1)。

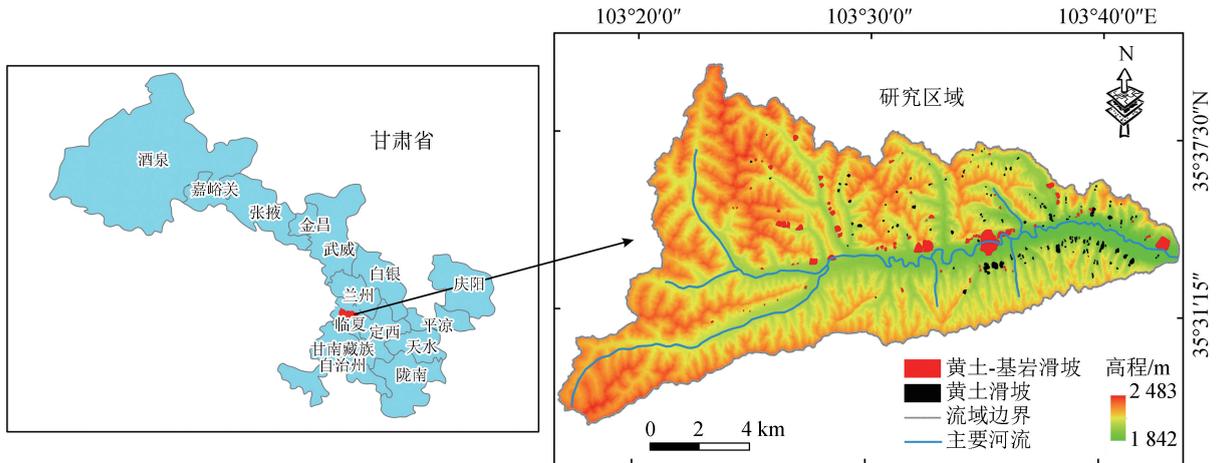


图1 研究区位置及滑坡分布图

Fig.1 Location of study area and distribution of landslides

2 研究方法

在分形理论中,分形维数是最核心的概念和内容,如何描述研究对象的分形维数,这取决于研究对象的特征以及研究的目的。分形维数有不同的定义方式,包括 Hausdorff 维数、盒计维数、信息维数、关联维数及容量维数等^[18]。

2.1 关联维数

关联函数是计算分形维数的一种方法,得到的关联维数可以分析区域滑坡个体关联性随距离尺度变化的规律,揭示区域滑坡地质灾害格局的关联程度^[4,19]。如果区域滑坡点系统的空间分布格局是分形的,则应具有尺度不变性,即:

$$C(r) \propto r^{-D_{\text{corr}}} \quad (1)$$

式中: $C(r)$ 为空间关联函数; r 为指定距离尺度; D_{corr} 为分形维数(关联维数)。

一般而言,关联维数反映了滑坡等地质灾害点空间分布的均衡性^[4],其数值介于 $0 \sim 2$ 。当 $D_{\text{corr}} \rightarrow 0$ 时,表明滑坡点之间的空间联系趋于紧密;当 $D_{\text{corr}} \rightarrow 2$ 时,表明滑坡点的空间分布趋于均匀。

2.2 盒计维数

盒计法常用于计算平面集合的分形维数^[18]。该方法是使用各种尺寸的正方形网格,放置在一个区域内的平面图形上,计算出有图形进入的格子数

$N(d)$ 。随着网格尺度 d 按一定倍率缩小,网格数量 $N(d)$ 将以下幂律公式增加:

$$N(d) \propto d^{-D_b} \quad (2)$$

式中: $N(d)$ 为与 d 有关的数量; d 为网格尺度; D_b 为盒计维数。这种分维值(D_b)反映了随着网格尺寸的减小复杂性的变化速度,值越大,其分形图像的复杂性越高。盒计维数表明图形填充空间的多少。

3 结果与分析

3.1 滑坡分类及分布

结合遥感解译,经实地详细调查,巴谢河流域共发育有249处滑坡,滑坡面积在 $3 \times 10^3 \sim 9 \times 10^5 \text{ m}^2$ 间(图1)。在黄土滑坡分类体系^[2]中,按物质组成分类是目前普遍采用的一种分类方法,有助于对黄土滑坡内在机制的研究。因此,依据吴玮江等^[2]提出的广义黄土滑坡分类,将研究区滑坡分为黄土滑坡(层内)和黄土-泥岩滑坡(切层)两类。区内滑坡数量以黄土滑坡居多,面积以黄土-泥岩滑坡分布广。其中,黄土滑坡164处,占滑坡总数的65.86%,面积为 $3.21 \times 10^6 \text{ m}^2$,占滑坡总面积的34.14%;黄土-泥岩滑坡85处,占滑坡总数的34.68%,面积为 $6.05 \times 10^6 \text{ m}^2$,占滑坡总面积的65.32%。

3.2 不同类型的滑坡空间关联性

根据关联维数计算方法和公式,采用 Arcgis10.3

软件对每两个滑坡点之间距离进行计算。不同类型的滑坡点对距离分布如图 2 所示。黄土滑坡点对之间的平均距离为 6.98 km,黄土-泥岩滑坡为 9.55 km,意味着黄土-泥岩滑坡点分布较分散。根据点对距离分布情况,确定以 2 km 作为变换步长,分别设定 2,4,6,⋯,26,28 为距离标度。图 3 中对计算的两类滑坡空间关联函数 $C(r)$ 与距离尺度 r ,在双对数坐标下,进行直线拟合。结果显示,两类滑坡均被拟合成 2 条直线,得到 2 个关联维数,表明滑坡点

对间距离分布在一定尺度范围内是具有分段分形特征。黄土滑坡及黄土-泥岩滑坡分别在 8 km、12 km 尺度上存在明显的拐点,反映滑坡个体在拐点前后的尺度域内具有不同空间相关程度。拐点出现的尺度即为空间分布格局变化的尺度,称之为阈值尺度。拐点值大小说明个体间聚块规模大小,黄土-泥岩滑坡个体间距离都较远,只有在较大尺度上观察才出现聚集,因此阈值较大。

由图 3 及表 1 可见,在小于各自阈值尺度上,黄

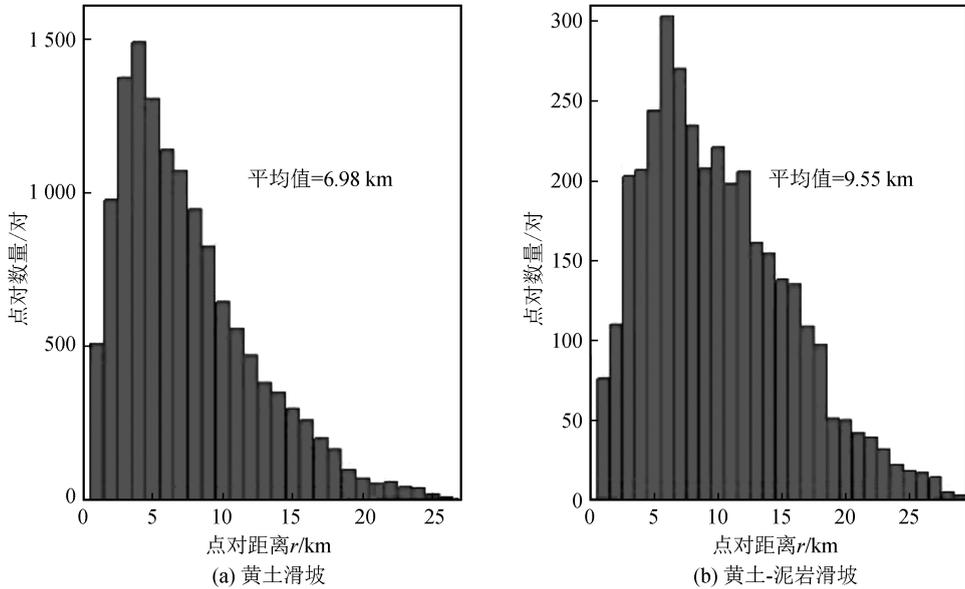


图 2 滑坡点对距离分布

Fig.2 Distance distribution of each pair of landslides

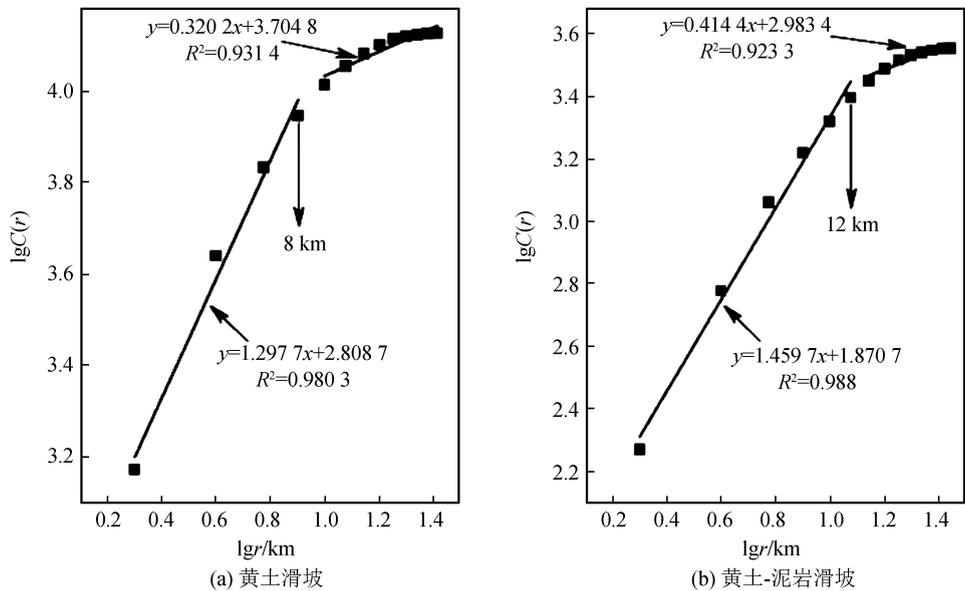


图 3 确定滑坡个体间距离关联维数

Fig.3 Determination of the correlation dimension for landslide distance

土滑坡与黄土-泥岩滑坡的关联维数分别为 1.297 7、1.459 7,表明黄土滑坡个体空间的关联程度和聚集程度较黄土-泥岩滑坡大;在大于各自阈值尺度上,黄土

滑坡与黄土-泥岩滑坡的关联维数分别为 0.320 2、0.414 4,黄土滑坡仍表现出较大的空间关联程度和聚集程度。

表 1 滑坡空间分布的关联维数

Table 1 The correlation dimension of landslide distribution					
滑坡	个体数	回归方程	R^2	关联维数	尺度阈值/km
黄土滑坡	164	$y=1.2977x+2.8087$	0.9803	1.2977	<8
		$y=0.3202x+3.7048$	0.9314	0.3202	>8
黄土-泥岩滑坡	85	$y=1.4597x+1.8707$	0.988	1.4597	<12
		$y=0.4144x+2.9834$	0.9233	0.4144	>12

3.3 滑坡面积的空间展布规律

应用 Arcgis10.3 软件创建网格,分别以 $100\text{ m} \times 100\text{ m}$, $200\text{ m} \times 200\text{ m}$, ..., $800\text{ m} \times 800\text{ m}$ 的网格覆盖研究区,并统计不同尺度网格覆盖下有滑坡面要素的网格数目。将网格大小 d 作为横坐标,把含有滑坡面要素的网格数量 $N(d)$ 作为纵坐标,纵横坐标分别取对数,得到以对数表示的巴谢河流

域两类滑坡面积展布特征散点图,用直线对 $\lg d$ 及 $\lg N(d)$ 进行拟合(图 4)。由图可知,拟合直线的相关性很好($R^2 > 0.99$),黄土滑坡及黄土-泥岩滑坡面积展布在无标度 $0.1 \sim 0.8\text{ km}$ 上均具有分形特征,其盒计维数分别为 0.957 0 和 1.163 1,反映了黄土-泥岩滑坡面积展布范围较广,形态较复杂的特征。

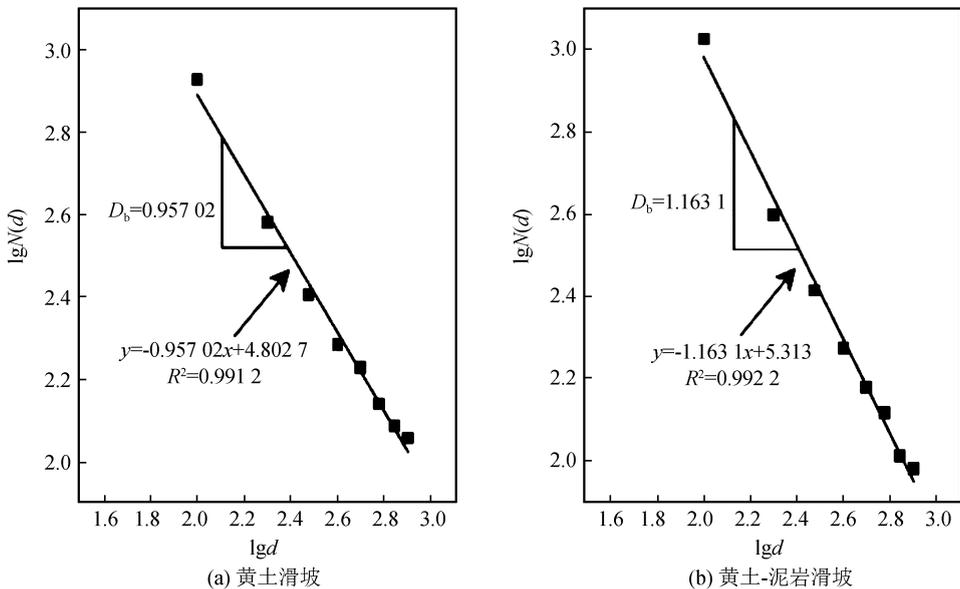


图 4 滑坡面积空间展布盒计维数确定

Fig.4 Determination of the box-counting dimension for spatial distribution of landslides area

3.4 影响不同类型滑坡空间分布格局因素分析

滑坡是在内外因素共同作用下产生的,但在缺少本底因子(如地层岩性、构造、地形地貌及水文地质条件等)内部条件,外界因素是难以触发滑坡的^[20]。因此,滑坡的发育更多是受控于本底因子。鉴于此,结合研究区地质概况,选取地层岩性、起伏度、坡度及沟壑密度等因子来分析不同类型区域滑坡空间分布格局。

(1) 与地层岩性的关系

地层岩性作为滑坡发育的物质基础,是滑坡形

成、演化的重要因素。通过不同类型的滑坡与 1:5 万地质图叠加分析(图 5、图 6)可以看出,黄土滑坡主要分布在第四系马兰黄土(Q_3)内,占黄土滑坡总数 98.78%,其面积占 99.34%。黄土-泥岩滑坡分布在 Q_3 及 N_2^1 、 N_2^3 等地层中,其数量分布百分比相差不大,面积在 Q_3 地层中占到最大为 52.28%,可能是由于上覆黄土下伏泥岩的结构为黄土-泥岩滑坡提供了更多的物质来源,导致该类滑坡面积展布较大。可见,地层岩性直接决定了滑坡类型及规模,对面积展布有重要影响。

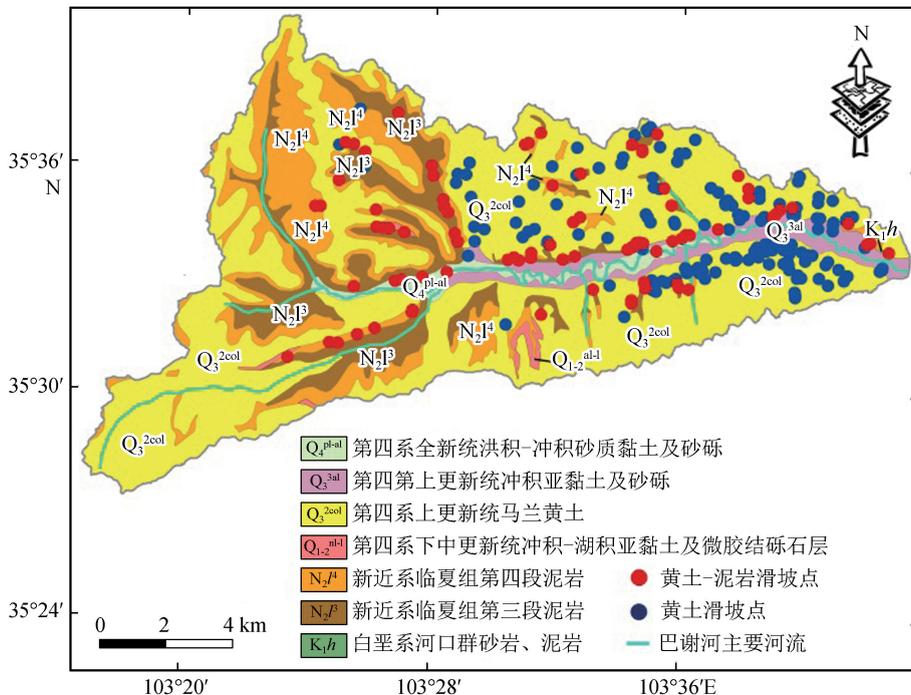


图 5 地层岩性与不同类型滑坡分布

Fig.5 Stratigraphic lithology and the distribution of different types of landslides

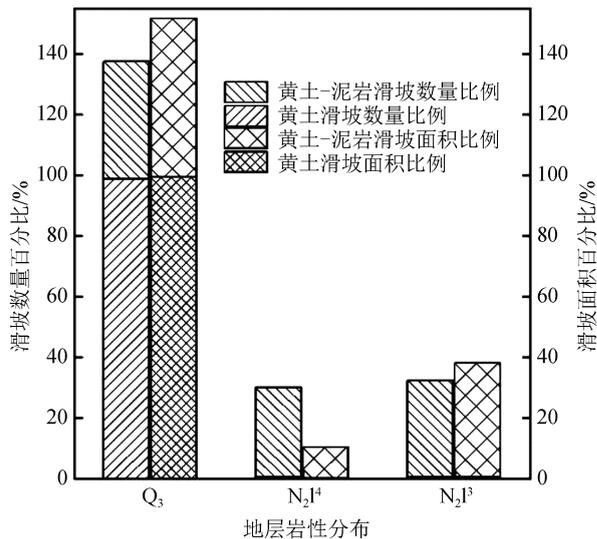


图 6 不同地层岩性滑坡分布百分比

Fig.6 Percentage of landslide distribution in different strata

(2) 与坡度的关系

坡度的大小直接影响着地表物质流动与能量转换的规模与强度,是制约空间格局的重要因子,不同的坡度对诱发滑坡的贡献率有差异^[3,21]。本文将研究区坡度划分为<15°、[15,20)、...、>40°等7个区间,分析统计结果见图7。可见,两类滑坡的数量及面积在不同坡度区间所占比例有明显差异。黄土滑坡数量及面积集中在<15°、[15,

20)、[20,25)三个区间;黄土-泥岩滑坡数量及面积集中在[15,20)、[20,25)及[25,30)区间,黄土-泥岩滑坡发生在较大的坡度值上。随着坡度>30°,黄土-泥岩滑坡的数量逐渐减少,面积比例急剧减小;黄土滑坡数量及面积比例变化不大。由以上分析知,黄土滑坡在空间分布上具有较大的聚集程度,也就是说空间关联程度更高,而黄土-泥岩滑坡的面积分布更广。

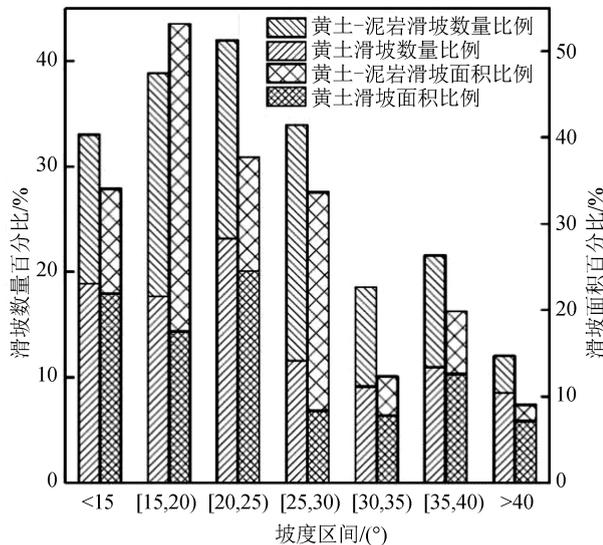


图 7 坡度区间内滑坡数量和面积分布百分比

Fig.7 Percentage of number and area of landslides in different slope ranges

(3) 与沟壑密度的关系

沟壑密度是指单位面积内沟壑的总长度,单位是 km/km^2 ,用于表征深切河谷的分布密度及水系发育程度,通常沟壑密度越大,侵蚀能来就越强,为滑坡创造的空间条件越多^[22]。利用 Arcgis10.3 软件,结合数字高程模型,生成沟壑密度图。根据研究区沟壑密度分布情况,按 $1 \text{ km}/\text{km}^2$ 的间隔分级统计。从图 8 可以看出,黄土滑坡集中分布在 $[1,2)$ 及 $[2,3)$ 区间上,占黄土滑坡总数的 92.68%;而黄土-泥岩滑坡分布在 <1 及 $[1,2)$ 区间上,占黄土-泥岩滑坡总数的 88.24%。黄土滑坡呈现出更强的聚集程度。由于黄土较泥岩更易切割,因此黄土滑坡分布在较大的沟壑密度上。两类滑坡的面积及数量百分比均呈先增大后减小的趋势,黄土滑坡变化幅度较大。

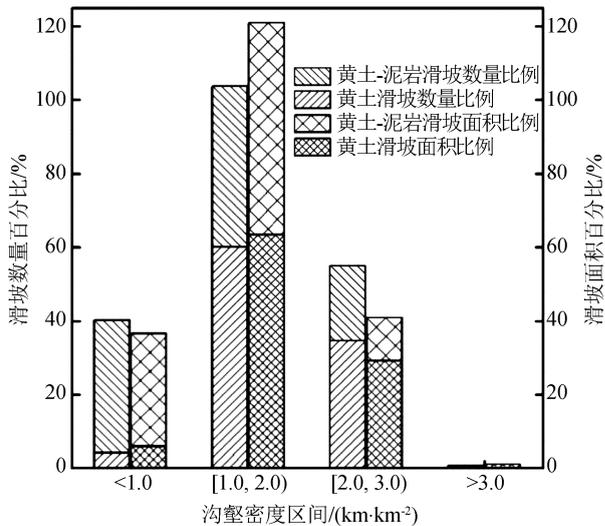


图 8 不同沟壑密度区间内数量和面积分布百分比

Fig.8 Percentage of number and area of landslides in different gully density ranges

(4) 与起伏度的关系

起伏度是指某分析区域内最大高程与最小高程的差,反映区域地形起伏变化的因子。起伏度的提取关键在于选择合适的统计单元,以 30 m 分辨率的数字高程模型为数据源,结合 Arcgis10.3 软件分析功能,依次计算分析窗口 3×3 、 5×5 、 \dots 、 33×33 的平均起伏度及各栅格单元面积,并制作散点图,采用对数拟合,得到曲线的拐点所对应的分析窗口即作为最佳分析窗口^[23]。通过计算, 17×17 作为最佳分析窗口,面积为 0.26 km^2 。根据该窗口提取起伏度,按 $<100 \text{ m}$ 、 $[100,150)$ 、 \dots 、 $>250 \text{ m}$ 的区间对两类滑坡进行统计。由图 9 可知,黄土滑坡与黄土-泥

岩滑坡数量并不随起伏度的增加而增加,而是集中分布在 $[100,150)$ 、 $[100,200)$ 及 $[200,250)$ 等区间上,占各类滑坡数量的百分比分别为 96.17% 和 96.34%,在起伏度 $<100 \text{ m}$ 区间上,黄土-泥岩滑坡没有分布,黄土滑坡也少量分布,说明滑坡的发生存在一个启动起伏度值,黄土-泥岩滑坡需要较大的启动值。对比滑坡集中分布的三个起伏度区间,两类滑坡的数量和面积比例近一致,其变化趋势也一样,表明虽然起伏度对滑坡发育有重要影响,但对两类滑坡数量和面积分布均未表现明显偏向性。

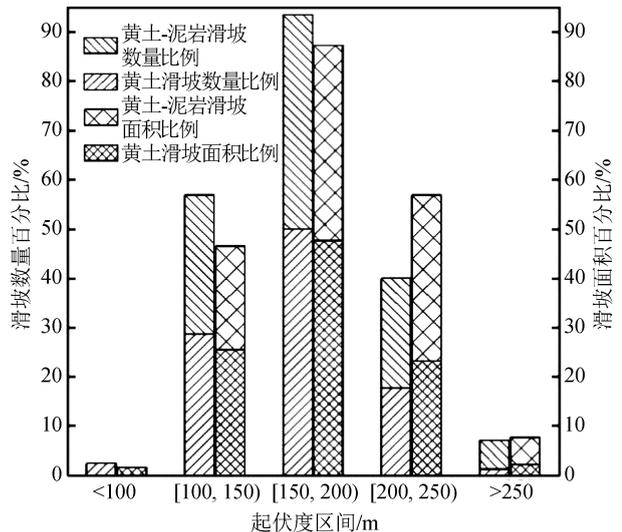


图 9 不同起伏度区间内数量和面积分布百分比

Fig.9 Percentage of number and area of landslides in different relief ranges

4 结论

本文利用分形关联维数反映滑坡空间聚集程度和个体空间关联程度,以及根据盒计维数来反映滑坡面空间展布特征的复杂程度,共同揭示区域上不同类型滑坡空间分布格局差异,同时就其影响因素进行了分析。

(1) 研究区滑坡按物质组成可分为黄土滑坡与黄土-泥岩滑坡,其中黄土滑坡 164 处,占滑坡总数的 65.86%,面积为 $3.21\times 10^6 \text{ m}^2$,占滑坡总面积的 34.14%;黄土-泥岩滑坡 85 处,占滑坡总数的 34.68%,面积为 $6.05\times 10^6 \text{ m}^2$,占滑坡总面积的 65.32%。

(2) 不同类型的区域滑坡系统空间分布具有分形特征。黄土滑坡与黄土-泥岩滑坡分别在 8 km 、 12 km 尺度上存在拐点,称为阈值尺度,反映区域滑坡个体空间具有多尺度分形,滑坡个体在阈值前后

具有不同的关联程度。在小于各自阈值尺度上,黄土滑坡与黄土-泥岩滑坡的关联维数分别为 1.297 7、1.459 7,在大于各自阈值尺度上,关联维数分别为 0.320 2、0.414 4,表明黄土滑坡个体空间的关联程度和聚集程度较黄土-泥岩滑坡大。两类滑坡的面积展布盒计维数黄土-泥岩滑坡(1.163 1)大于黄土滑坡(0.957 0),反映了黄土-泥岩滑坡面积展布范围较广,形态较复杂的特征。

(3) 影响因素分析表明,地层岩性及坡度对区域滑坡分布格局的影响较大,其次为沟壑密度,地层岩性及其组合直接决定了滑坡类型及滑坡面积展布的复杂程度,黄土滑坡为层内滑动,规模小、形态简单,而黄土-泥岩滑坡切层为主,其规模大,形态复杂。黄土滑坡在 $20^{\circ}\sim 25^{\circ}$ 区间上分布最多,而黄土-泥岩滑坡是在 $25^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 上,黄土-泥岩滑坡较黄土滑坡具有更广的分布面积。黄土滑坡集中在沟壑密度为 $1\sim 3\text{ km/km}^2$ 范围内,黄土-泥岩滑坡集中在 $0\sim 2\text{ km/km}^2$ 区间上。起伏度对两类滑坡数量和面积分布均未表现明显的偏向性。

不同类型区域滑坡个体及面积展布在空间分布上存在差异,并在各影响因子区间上表现为不同的选择聚集性。因此,在区域滑坡评价及预测中应充分考虑这些规律。

参考文献(References)

- [1] 刘红玫,石玉成.黄土地区不同类型滑坡的特征及影响因素[J].西北地震学报,2006,28(4):360-363.
LIU Meihong, SHI Yucheng. Characteristics and Influential Factors of Different Types of Landslide in Loess Area[J]. Northwestern Seismological Journal, 2006, 28(4): 360-363.
- [2] 吴玮江,王念秦.甘肃滑坡灾害[M].兰州:兰州大学出版社,2006.
WU Wei | jiang, WANG Nianqin. Landslide Hazards in Gansu Province[M]. Lanzhou: Lanzhou University Press, 2006.
- [3] 汪旭涛,谢昭宇,胡凯锋.中高山地区滑坡发育地形地貌因子敏感性研究[J].地震工程学报,2013,35(3):597-603.
WANG Xutao, XIE Zhaoyu, HU Kaifeng. Research on the Sensitivity of Landform Factors of Landslide Development in Middle and High Mountain Area[J]. China Journal of Earthquake Engineering, 2013, 35(3): 597-603.
- [4] 邱海军,崔鹏,王彦民,等.基于关联维数的黄土滑坡空间分布结构及其成因分析[J].岩石力学与工程学报,2015,34(3):546-555.
QIU Haijun, CUI Peng, WANG Yanmin, et al. Spatial Distribution Structure of Loess Landslides and Cause Analysis based on Correlation Dimension[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(3): 546-555.
- [5] 姜恩三,任光明,王文坡,等.基于关联维数的地质灾害空间分布特征分析[J].中国地质灾害与防治学报,2018(1):113-118.
JIANG Ensan, REN Guangming, WANG Wenpo, et al. Analysis on Spatial Distribution of Geological Hazards Based on correlated fractal dimension[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2018(1): 113-118.
- [6] 薛天放,杨庆,栾茂田.基于 GIS 技术的滑坡空间分布的分形特征研究[J].岩土力学,2007,28(2):347-350.
XUE Tianfang, YANG Qing, LUAN Maotian. Research on Fractal Characters of Spatial Distribution of Landslide Based on GIS[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(2): 347-350.
- [7] 汪华斌,李江风,吴树仁.滑坡灾害系统非线性研究进展[J].地球科学进展,2000,15(3):271-276.
WANG Huabin, LI Jiangfeng, WU Shuren. Progress in Nonlinearity Study on Landslide Hazard System[J]. Advance in Earth Sciences, 2000, 15(3): 271-276.
- [8] 许强,黄润秋.地质灾害发生频率的幂律规则[J].成都理工大学学报(自然科学版),1997,(增刊1):93-98.
XU Qiang, HUANG Runqiu. Power Law between Volume and Frequency of Geological Disasters[J]. Journal of Chengdu University of Technology: Sci & Technol Ed, 1997, (Suppl): 93-98.
- [9] GUZZETTI F, MALAMUD B D, TURCOTTE D L, et al. Power-Law Correlation of Landslide Areas in Central Italy[J]. Engineering Geology, 2002, 195: 169-183.
- [10] 易顺民,唐辉明.滑坡分维特征及其预测意义[J].工程地质学报,1994,2(2):48-53.
YI Shunmin, TANG Huiming. The Fractal Dimension of Landslide and Significance for the Prediction[J]. Journal of Engineering Geology, 1994, 2(2): 48-53.
- [11] 易顺民,蔡善武.西藏樟木滑坡活动空间分布的分维特征及其地质意义[J].山地学报,1999,17(1):63-66.
YI Shunmin, CAI Shanwu. The Fractal Dimension Characteristics of Landslide Activities in the Zhangmu Area of Tibet and its Geological Significance[J]. Journal of Mountain Research, 1999, 17(1): 63-66.
- [12] WU S R, WANG H B, HAN J L, et al. The Application of Fractal Dimensions of Landslide Boundary Trace for Evaluation of Slope Instability[M]//WU S R, WANG H B, HAN J L, et al. eds. Environmental Science and Engineering. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009, 21: 465-474.
- [13] LI C, MA T, SUN L, et al. Application and Verification of a Fractal Approach to Landslide Susceptibility Mapping[J]. Natural Hazards, 2012, 61(1): 169-185.
- [14] SEZER, EBRU. A Computer Program for Fractal Dimension (FRACEK) with Application on Type of Mass Movement Characterization[J]. Computers & Geosciences, 2010, 36(3): 391-396.
- [15] YANG Z Y, POURGHASEMI H R, LEE Y H. Fractal Analysis of Rainfall-induced Landslide and Debris Flow Spread Distribution in the Chenyulan Creek Basin, Taiwan[J]. Journal of Earth Science, 2016, 27(1): 151-159.

- [16] 曹炳兰.巴谢河流域滑坡分布规律及石质黄土层在大型滑坡形成中的作用[A]//全国第三次工程地质大会论文选集., 1988.
CAO Binglan. Law of Landslide Distribution and Role of Rocky Loess Layer in the Formation of Large-scale Landslides in the Baxie River Basin[A]//Proceedings of the Third National Engineering Geological Conference, 1988.
- [17] 杨志昆,梁收运,陈卓,等.基于因子相关性-聚类分析的巴谢河流域滑坡危险性评价[J].水土保持研究, 2018, 25(03): 305-309.
YANG Zhikun, LIANG Shouyun, CHEN Zhuo, et al. Assessment of Hazard of Landslide in the Baxie River Basin Based on Factor Correlation-cluster Analysis[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 25(03): 305-309.
- [18] 彭瑞东,杨彦从,鞠杨,等.基于灰度 CT 图像的岩石孔隙分形维数计算[J].科学通报, 2011, 56(26): 2256-2266.
PENG Ruidong, YANG Yancong, YAN Yang, et al. Computation of Fractal Dimension of Rock Pores Based on Gray CT Images[J]. Chinese Science Bulletin, 2011, 56(26): 2256-2266.
- [19] ROUAI M, JAAIDI E B. Scaling Properties of Landslides in the Rif Mountains of Morocco[J]. Engineering Geology, 2003, 68(3): 353-359.
- [20] 乔建平,吴彩燕.滑坡本底因子贡献率与权重转换研究[J].中国地质灾害与防治学报, 2008, 19(3): 13-16.
QIAO Jianping, WU Caiyan. Study on the Conversion between the Contribution Rate and Weight of the Controlling Factors for Landslide[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2008, 19(3): 13-16.
- [21] 王章琼,晏鄂川,王鲁男,等.地形坡度对鄂渝地区水库型堆积层滑坡贡献率研究[J].工程地质学报, 2014, 22(6): 1204-1210.
WANG Zhangqiong, YAN Echuan, WANG Lunan, et al. Contribution Rate of Slopes Gradient to Debris Landslides in Reservoir Region Hubei and Chongqing Region[J]. Journal of Engineering Geology, 2014, 22(6): 1204-1210.
- [22] 汤国安,刘学军,闫国年.数字高程模型及地学分析的原理与方法[M].北京:科学出版社, 2005.
TANG Guoan, LIU Xuejun, RUAN Guonian. Principles and Methods of Digital Elevation Model and Geoscience Analysis [M]. Beijing: Science Press, 2005.
- [23] CHEN Z, LIANG S Y, KE Y T, et al. Landslide Susceptibility Assessment Using Evidential Belief Function, Certainty Factor and Frequency Fatio Model at Baxie River Basin, NW China[J]. Geocarto International, 2017: 1-30.