

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2018.01.17

基于关联维数的地质灾害空间分布特征分析

姜恩三¹, 任光明¹, 王文坡¹, 杨磊²

(1. 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059;

2. 四川省地质调查院, 四川 成都 610081)

摘要: 通过分形理论中关联维数及其动态变化来揭示黑水河流域地质灾害的时空分布特征, 并探讨了影响区内地质灾害空间分布的相关因素。研究表明: 区内不同规模地质灾害点系统空间分布具有分形特征, 崩塌灾害点的分布最为集中, 滑坡次之, 泥石流则最为分散; 近十年来区内每年所发生灾害的空间分布集中程度变化剧烈, 呈现强集中、弱分散的特点; 近五年来每年所发生的灾害呈逐渐分散趋势, 但灾害的累积却有逐渐集中的趋势; 影响区内地质灾害空间分布异同的主要因素为地形坡度、地层岩性、河流、降雨、人类工程活动、高程、断裂。

关键词: 关联维数; 地质灾害; 空间分布

中图分类号: P694

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2018)01-0113-06

Analysis on spatial distribution of geological hazards based on correlated fractal dimension

JIANG Ensan¹, REN Guangming¹, WANG Wenpo¹, YANG Lei²

(1. State Key Laboratory of Geohazards Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China; 2. Sichuan Geological Survey, Chengdu, Sichuan 610081, China)

Abstract: This paper uses fractal method to analyze the distribution characteristic of geological hazards of Heishui River, and analyses the related factors. It has been shown that the spatial structure of geological hazards had fractal characteristics in the studied area. The spatial distribution of collapses were most dense, landslides were the second, the spatial distribution of debris-flows were a very fragmented system. In recent decades, strong concentration and weak dispersion becoming major features of the distribution characteristic of geological hazards. The distribution characteristic of geological hazards took on a diffuse trend, but the distribution characteristic of the accumulation of geological hazards t are centralized trend in the past five years. The occurrence of the geologic hazard are closely related to the landform, rainfall and river, stratum lithology, human engineering activities, elevation and fault.

Keywords: correlation fractal dimension; geological hazards; spatial distribution

0 引言

区域地质灾害在诸如地形地貌、地层岩性、降雨及人类工程活动等多种因素的影响下呈现出一定的空间

分布结构, 由于影响因素分布的不规则性和复杂性, 导致灾害分布具有空间异质性。如何揭示这种异质性, 相关学者从分形方面做了大量深入而细致的研究。Y Yokoi 等^[1]通过数值分析发现分形维数与地质因素有

收稿日期: 2017-05-19; 修订日期: 2017-07-10

基金项目: 国家电网公司科技项目 (SGSCJY00JHJS2016000)

第一作者: 姜恩三 (1993-), 男, 安徽阜阳人, 地质工程专业, 硕士研究生, 主要研究方向为岩土体稳定及工程环境效应。E-mail: 932043585@qq.com

关;C Goltz^[2]揭示了区域滑坡的多重分形结构;谢嘉琼、易顺民^[3]研究了西藏樟木地区滑坡活动空间分布的多重分形特征,指出不同时段滑坡活动空间分布的多重分形指数谱能很好地描述滑坡活动的不确定性和随机性特征;C Li 等^[4]采用分形统计方法分析已知的滑坡数据,获得滑坡空间分布的分形丛集关系,并在此基础上借助于 GIS 的空间分析功能为评价滑坡易发程度提供一种有效的方法;陈卫兵^[5]对茅坪滑坡位移监测时间序列进行了相空间重构,给出了计算滑坡位移时间序列的关联维数和 Lyapunov 指数等混沌特征量的算法,建立了适合滑坡位移预测的相空间预测模型,为滑坡预测模型的建立与预测提供了新的思路与方法;邱海军等^[6]采用变维分形方法探讨了陕西省宁强县滑坡在空间分布上的变维分形特征;邱海军、崔鹏等^[7]采用关联维数、核密度和 GIS 空间分析方法,定量地分析不同径级上区域黄土滑坡空间分布结构及其形成原因。大量的研究^[8-11]多是针对单一灾种的空间分布特征,而忽略了不同灾种之间的关联性、内在机理及时空变化特征。文章以攀西北部黑水河流域地质灾害的详细调查资料为依据,通过分形理论中关联维数及其动态变化来分析地质灾害的时空分布特征,并分析其分布异同的原因。

1 研究区概述

研究区位于四川省西南部、凉山彝族自治州东部的普格一带,介于北纬 27°13′~27°50′、东经 102°20′~102°46′,辖 34 个乡镇,有彝、汉、回等 21 个民族,总人口 19.8 万人,总面积 1 918 km²。其地貌可概括为三山夹两谷,螺髻山与乌梁子山东西对峙,中梁山纵亘其中,最高海拔 4 164 m,最低海拔 1 032 m。区内旱、雨季分明,年温差小,日温差大,年均气温 16.8℃,多年平均降水量 1 176.4 mm,5~10 月为雨季,降水量占年平均降水量的 89.2%。区内地层从震旦系到第四系除缺失石炭系和泥盆系上统外,其余各系均有出露,岩性主要有砾岩、砂岩、泥岩、玄武岩等,构造上主要发育有则木河断裂和黑水河断裂,则木河断裂南与安宁河断裂相交,呈北北西-南南东走向,黑水河断裂呈近南北走向。区内河网、水系纵横交错,则木河和西洛虎踞龙盘,交错、缠扭后形成黑水河,支流发育,大小冲沟不计其数。

2015 年黑水河流域地质灾害的详细调查成果显示,区内共发育有 170 处地质灾害隐患点,其中滑坡(包括不稳定斜坡)111 个,崩塌 10 个,泥石流 49 条。

依据《滑坡崩塌泥石流灾害调查规范(1:50 000)》(DZ/T 0261—2014)中划分灾害规模的要求对灾害进行划分,灾害分布点图见图 1,各灾种不同规模的数量统计见表 1。

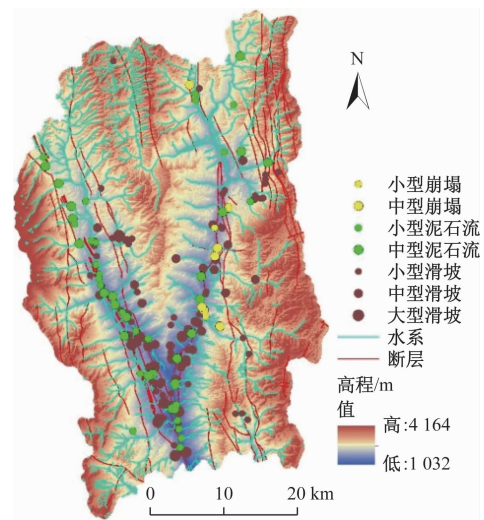


图 1 灾害分布点图

Fig. 1 Spatial distribution of geological hazards

表 1 地质灾害规模数量表

Table 1 Scale of geological hazards count

灾害规模	泥石流	滑坡	崩塌
	条数/条	个数/个	个数/个
大型	0	11	0
中型	22	37	6
小型	27	63	4

2 研究方法

关联维数可以分析区域地质灾害个体关联性随距离尺度变化的规律,揭示区域地质灾害结构的关联程度^[11]。定义空间关联函数为:

$$C(r) = \frac{1}{N^2} \sum_{i,j=1}^N H(r - d_{ij}) = \frac{1}{N^2} N(r) \quad (1)$$

式中: d_{ij} ——灾害点 i 与 j 之间欧氏距离;

$N(r)$ ——距离标度 r 下灾害点的个数;

N ——研究区域所研究特定灾害点总数;

r ——指定距离标度;

$H(r - d_{ij})$ ——Heaviside 阶跃函数,定义为:

$$H(r - d_{ij}) = \begin{cases} 1 & (d_{ij} \leq r) \\ 0 & (d_{ij} > r) \end{cases} \quad (2)$$

如果区域灾害点系统的空间分布结构是分形的,则应具有标度不变性,即:

$$C(r) \propto r^\alpha \quad (3)$$

式中 $\alpha = D$,即是空间关联维数;当得到区域灾害的距

离标度 r 、空间关联函数 $C(r)$ 时,其空间关联维数 D 由下式求得:

$$\ln C(r) = A + D \ln r \tag{4}$$

在实际的关联维数计算中,使用 ArcGIS10.1 软件工具箱里 Analysis Tools/Proximity/Point Distancer 功能对灾害点之间的欧氏距离进行测量,将得到的 *.DBF 文件用 EXCEL 打开,使用 COUNTIF 函数统计出不同的 r 所对应的 $C(r)$ 值,然后将得到的 $(r, C(r))$ 点对绘制在双对数坐标图上,对其进行直线拟合,直线的斜率就是关联维数 D 的值。

就表征空间分布而言,关联维数反映了地质灾害点系统要素空间分布的均衡性。一般情况下,其数值变化于 0~2,当 $D \rightarrow 0$ 时,表明该区域地质灾害点之间的空间联系紧密,分布高度集中于一地;当 $D \rightarrow 2$ 时,表明该区域地质灾害点的空间分布很均匀。

3 结果与分析

3.1 灾害点空间关联性

根据第 2 章的研究方法,以 3 km 为变换步长,设定距离标度 r 分别 3,6,9,12,15,18,21,24,……, R (R 为大于或等于所研究的灾害点之间最长欧式距离的第一个值),分别计算出不同规模灾种点系统的关联维数。限于篇幅,仅给出部分拟合直线(图 2)。各关联维数见表 2。

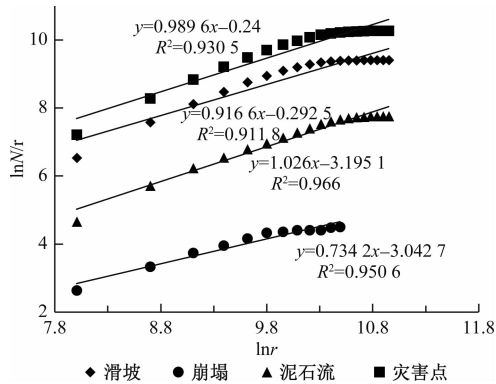


图 2 地质灾害点系统空间关联维数双对数坐标图
Fig. 2 ln-in plot for spatial correlation dimension of geological hazards

从图 2 可以看出,滑坡、泥石流及灾害点在 33 km 尺度上存在明显的拐点,表明其在大于 33 km 尺度以后存在部分点远离大部分点的情况,即部分点较为分散,但从整体的直线拟合上来看,相关系数比较高,拟合度较好,因此,部分点的分散并不影响整体的空间分形结构,也就是说其区域空间分布结构是分形的。这

里,有学者^[11]认为地质灾害点系统在拐点前后的 2 个尺度区间内具有不同的空间相关程度,即,地质灾害点的空间分布具有多分形特征(或者说该区域地质灾害点系统的空间分布结构自组织优化还没有完全形成,或者开始发生某些退化),这种说法不无道理,但是却明显地割裂了灾害点系统空间分布结构的整体性,同时割裂出来的后一个无标度区间宽度较窄、尺度较大,因此,研究的意义也就丧失了。将其整体拟合,不仅把握了该区域地质灾害点系统空间分布结构的整体性,而且有助于对不同灾种点系统之间关联性和对比性的研究。表 2 即是地质灾害点系统空间关联维数双对数坐标整体拟合的结果,可以看出,不同规模滑坡、崩塌、泥石流的拟合直线相关系数均较大,相关性较强,即在 R 的尺度下均具有分形特征。

对于不同规模、不同类型地质灾害其关联维数不同。对滑坡灾害点,小型滑坡关联维数最大,对空间作用力小,空间相互作用也弱,分布分散,大型滑坡关联维数最小,其对空间联系紧密,分布集中,即相比较中型与小型滑坡来说,发生大型滑坡多集中于某一区域。从整个滑坡点来看,中型滑坡关联维数与所有滑坡的关联维数最为接近,即滑坡点的整个空间分布受中型滑坡的控制。对于崩塌灾害点而言,中型崩塌空间联系紧密,分布集中,且所有崩塌的空间分布受其控制。对泥石流而言,中型泥石流的空间分布比小型泥石流要分散。

表 2 关联维数统计表
Table 2 Spatial correlation dimension of geological hazards of different scales

灾害类型	规模	关联维数 D	相关系数 R^2
滑坡	所有滑坡点	0.916 6	0.911 8
	大型滑坡点	0.821 9	0.926 3
	中型滑坡点	0.968 9	0.899 8
	小型滑坡点	0.974 9	0.947 7
崩塌	所有崩塌点	0.734 2	0.950 6
	中型崩塌点	0.726 5	0.901 5
	小型崩塌点	0.835 4	0.866 7
泥石流	所有泥石流点	1.026 0	0.966 0
	中型泥石流点	1.140 0	0.956 6
	小型泥石流点	1.030 0	0.989 6
所有灾害点		0.989 6	0.930 5

不同灾种之间,崩塌灾害点空间联系最为紧密,分布最为集中,滑坡次之,泥石流最为分散。

3.2 关联维数随时间的变化规律

根据灾害点发生的时间,统计出近十年来区内当年及到某年时灾害点空间分布的关联分维值,其变化特征见图 3。

由图 3 可知,近十年来每一年所发生灾害的空间分布变化较为剧烈,呈现强分散、弱集中的特点。2006 年发生的灾害其空间分布关联维数达到 1.515 9,空间分布最为分散,2007 年时关联维数降低至 0.905 6,空间分布最为集中;2006 年以后,每年所发生的灾害点空间分布关联维数在 2008 年达到峰值 1.471 4,其后三年又逐渐减小到 0.941 7,2011 年后开始缓慢增加,即 2011 年后每年所发生灾害的空间分布呈逐渐分散趋势。相比每年发生灾害点的关联维数变化,所发生灾害至每一年时(灾害的累积)其空间分布关联维数变化则较为平稳。2006~2011 年,虽然灾害点在逐年累积,但其空间分布关联维数始终保持在 1.20 左右,由此可见,虽然每年所发生的灾害的空间分布差异巨大,但对区内所有灾害的空间分布特征影响不大。2011 年后,所发生灾害至每一年时(灾害的累积)其空间分布关联维数开始缓慢下降,而此时每一年所发生的灾害其空间分布关联维数却在缓慢上升,即近五年来,每年所发生的灾害空间分布呈逐渐分散趋势,但灾害的累积却向相反方向发展。

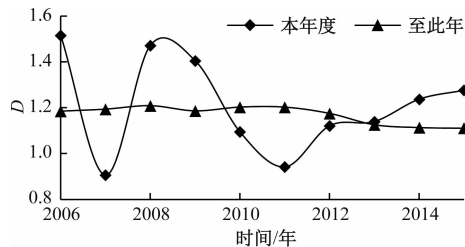


图 3 近十年来灾害点系统空间关联维数变化图
Fig. 3 Spatial correlation dimension of geological hazards changes over recent decades

3.3 地质灾害空间分布异同的原因分析

地质灾害空间分布的异同是内因(地形地貌、地层岩性、地质构造等)、外因(气象、水文、人类工程活动等)共同作用的结果,不同的影响因素对其影响的程度一般是不同的,关联维数一定程度上能够反映某种或某些因素对灾害点分布的控制性作用。一般来说,关联维数越小,受单一因素影响越大。

(1) 地形地貌

地形地貌是控制地质灾害产生的重要原因之一,同一种地质灾害往往具有相似的地形地貌条件。研究区内发生的 111 个滑坡(包括 6 个不稳定斜坡)灾害隐患点发育在地形坡度 $20^{\circ} \sim 40^{\circ}$ 的占总数的 73%,而发生在地形坡度 $40^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 的崩塌占到崩塌总数的 80%(图 4)。

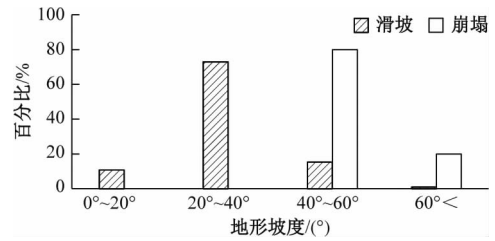


图 4 滑坡、崩塌在不同坡度区间内分布百分比
Fig. 4 Percentage distribution of landslides and collapses at different slopes

40% 的崩塌发育在高程 1 300 ~ 1 500 m,而这一高程区间内发育滑坡占总滑坡数的 34.23%(图 5)。这一高程范围与该区域宽谷进入峡谷的高程范围大体相当,是河谷岸坡地形坡度较陡,岩体卸荷强烈的部位。由此可见,区内滑坡、崩塌的空间分布明显受到地形坡度、高程的影响。

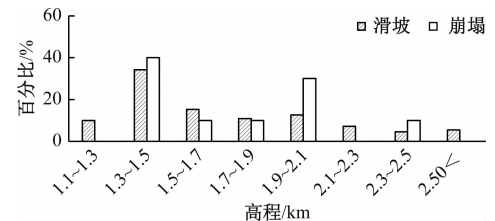


图 5 滑坡、崩塌在不同高程区间内分布百分比
Fig. 5 Percentage distribution of landslides and collapses at different elevation

(2) 地层岩性

地层岩性是形成滑坡、崩塌等地质灾害的内在因素。研究区内四类地层中均发育有滑坡,仅 II 类、IV 类地层中发育有崩塌。其中 70% 的崩塌发育于 IV 类坚硬玄武岩组地层中,68.47% 的滑坡发育于 III 类软硬相间或半坚硬砂岩、砾岩、粉砂岩、页岩岩组地层中(表 3)。由此可见,崩塌、滑坡的空间分布受地层影响也较为明显。

表 3 滑坡、崩塌与岩性的关系

Table 3 Relation between landslide, collapse and lithology

类别	崩塌		滑坡	
	个数/个	百分比/%	个数/个	百分比/%
I	0	0.00	12	10.81
II	3	30.00	76	68.47
III	0	0.00	6	5.41
IV	7	70.00	17	15.32

注: I 类为松散岩类,主要为砂卵石、碎石、松散岩组; II 类为碎屑岩类,主要为软硬相间或半坚硬砂岩、砾岩、粉砂岩、页岩岩组; III 类为碳酸盐岩类坚硬层状灰岩、白云岩、白云质灰岩岩组; IV 类为岩浆岩类,主要为坚硬玄武岩岩组。

(3) 断裂

地质灾害的发育常常受到断裂带的影响。根据灾害到断裂的距离,在 ArcGIS 中分别创建 0 ~ 100 m、100 ~ 200 m、200 ~ 300 m、……、900 ~ 1 000 m、1 000 m < 缓冲区,从滑坡、崩塌在距离断裂不同距离区间内的百分比(图 6)可以看出,各距离区间内均有滑坡的分布,其比例变化并不是非常显著,距离断裂带 500 m 以内分布滑坡占总数 55.8%。而对于崩塌而言,距离断裂带 500 m 以内分布虽占总数的 80%,但因其总数较少,影响因素众多,并不能反应断裂受崩塌的影响程度有多大。

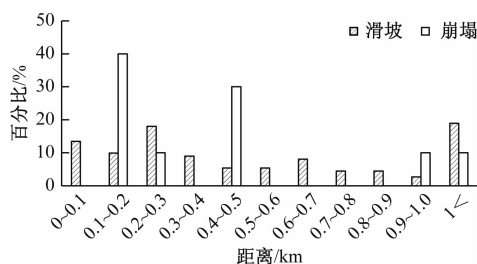


图 6 滑坡、崩塌距断裂不同距离区间内分布百分比

Fig. 6 Percentage distribution of landslides and collapse at different distances to the fault

(4) 河流

河流的侵蚀是滑坡、崩塌等形成的重要因素之一。以灾害到河流的距离来探究河流对灾害分布的影响,在 ArcGIS 中,以 100 m 为间距创建河流的多环缓冲区,统计不同距离范围内滑坡、崩塌灾害点的数量百分比(图 7)。在距离河流 600 m 以内,滑坡占总数比例高达 94%,由此看见,滑坡的发育有沿河流水系成线状分布的特点,崩塌受其影响则没有滑坡显著。

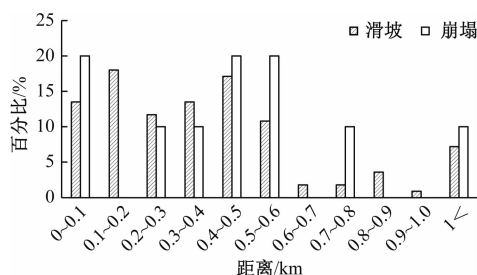


图 7 滑坡、崩塌距河流不同距离区间内分布百分比

Fig. 7 Percentage distribution of landslides and collapse at different distances to the river

(5) 降雨及人类工程活动

集中强降雨或长时间的连阴雨是诱发地质灾害的重要因素。区内降雨年际变化较大,年内分配不均,

5 ~ 10 月为雨季,降水量占年平均降水量的 89.2%,降水主要分布在则木河流域和西洛河流域。不平衡的降雨致使灾害的分布呈线性或集中性的特点。如 2003 年 6 月 20 日则木河流域普降暴雨,滑坡、崩塌频发为五道箐乡采阿咀沟泥石流的暴发提供丰富的物源^[12]。

区内人类工程活动主要表现在村镇建设、道路工程等方面。不合理的人类工程活动造成了严重的地质灾害。如因道路工程开挖坡脚形成的花山乡建设村三组滑坡、螺髻山镇马厂坪村 S212 滑坡及螺髻山镇小槽河北侧 S212 路边滑坡等,区内人类工程活动强烈的区域灾害分布密集。

4 结论

(1) 研究区内不同规模的地质灾害点系统空间分布具有分形特征。中型崩塌点空间分布关联维数最小,空间联系最为紧密,分布较为集中。中型泥石流点空间分布关联维数最大,空间相互作用较弱,分布分散。大型滑坡、中型崩塌及小型泥石流在其各自灾种内空间分布关联维数最小,分布较为集中;不同灾种之间,崩塌灾害点的分布最为集中,滑坡次之,泥石流灾害点的分布最为分散。

(2) 近十年来研究区内每一年所发生灾害的空间分布变化剧烈,呈现强集中、弱分散的特点;近五年来每年所发生的灾害呈逐渐分散趋势,但灾害的累积却有逐渐集中的趋势。

(3) 关联维数一定程度上能够反映某种或某些因素对灾害点分布的控制性作用,一般来说,关联维数越小,受单一因素影响越大。大多数的滑坡发生在地形坡度 20° ~ 40°,大多数的崩塌发生在地形坡度 40° ~ 60°;40.0% 的崩塌、34.2% 滑坡发育在高程 1 300 ~ 1 500 m;崩塌多发育与坚硬玄武岩组地层中,滑坡多发育于软硬相间或半坚硬砂岩、砾岩、粉砂岩、页岩岩组地层中;距离断裂带 500 m 以内分布滑坡占总数 55.8%,崩塌则占 80.0%;滑坡的发育有沿河流水系成线状分布的特点;不平衡的降雨也致使灾害的分布呈线性或集中性的特点。

区域地质灾害空间关联维数 D 利用数学方法将尺度变化的内涵通过关联维数反映出来,能够揭示区域地质灾害空间关联的尺度变化程度,当它与时间的变化结合起来时,不仅能反映地质灾害空间分布的静态特征,还能反应时空变化的动态特征,从而对区域地质灾害的预测起到一定的宏观把握作用。

参考文献:

- [1] YOKOI Y, CARRJR, WATTERS R J. Fractal character of landslides [J]. Environmental and Engineering Geoscience, 1995, 1(1): 75 - 81.
- [2] GOLTZ C. Multifractal and entropic properties of landslides in Japan [J]. Geologische Rundschau, 1996, 85(1): 71 - 84.
- [3] 谢嘉琼, 易顺民. 滑坡活动空间分布的多重分形特征及其预测意义 [J]. 四川大学学报 (工程科学版), 2000, 32(6): 4 - 6.
XIE Jiaqiong, YI Shunmin. Study on the multifractal of the spatial distribution of landslides activities and its significances [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2000, 32 (6) : 4 - 6.
- [4] LI C, MA T, SUN L, et al. Application and verification of fractal approach to landslide susceptibility mapping [C] // Terrigenous Mass Movements. [S. l.]: Springer Berlin Heidelberg, 2012: 91 - 107.
- [5] 陈卫兵, 李端有. 基于非线性动力学的滑坡位移预测 [J]. 长江科学院院报, 2006, 23(2): 28 - 30.
CHEN Weibing, LI Duanyou. Prediction of displacement in landslide based on nonlinear dynamics [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2006, 23(2): 28 - 30.
- [6] 邱海军, 曹明明, 刘闻, 等. 区域滑坡空间分布的变维分形特征研究 [J]. 现代地质, 2014, 28(2): 443 - 448.
QIU Haijun, CAO Mingming, LIU Wen, et al. Research on variable dimension fractal characteristics of spatial distribution of landslides [J]. Geoscience, 2014, 28(2): 443 - 448.
- [7] 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 correlated fractal dimension [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(3): 546 - 555.
- [8] 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 Shunming, TANG Huiming. The fractal dimensions of landslides and significance for their predication [J]. Journal of Engineering Geology, 1994, 2(2): 48 - 53.
- [9] 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 - 354.
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 - 354.
- [10] 王志旺. 基于 GIS 技术的区域滑坡分形特征分析与危险性评价 [D]. 武汉: 中国地质大学, 2010.
WANG Zhiwang. Gis based methods for fractal analysis and hazard estimation of regional landslides [D]. Wuhan: China University of Geoscience, 2010.
- [11] ROUAI M, JAAIDI E B. Scaling properties of landslides in the Rif Mountains of Morocco [J]. Engineering Geology, 2003, 68(3): 353 - 359.
- [12] 刘希林, 王全才, 张丹, 等. 四川凉山州普格县“6·20”泥石流灾害 [J]. 灾害学, 2003, 17(4): 47 - 51.
LIU Xilin, WANG Quancai, ZHANG Dan, et al. Debris flow disasters occurred on June 20, 2003 in Puge County of Sichuan [J]. Journal of Catastrophology, 2003, 17(4): 47 - 51.