Scientific Journal of Earth Science
December 2015, Volume 5, Issue 4, PP.79-85

Variable Dimension Fractal Characteristics of Environmental Factors of Landslide in Gansu Section of Bailongjiang River Basin

Ge Yan †***, Xinkai Tang, Shouyun Liang***

Department of Geological Engineering, School of Civil Engineering and Mechanics, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China

†Email: yang13@lzu.edu.cn

Abstract

Fractal dimension values derived from variable dimension between landslide distribution and environmental factors can reveal sensibility of landslide development to the factors. Taking the battered area of Wenchuan Earthquake, Gansu section of Bailongjang river basin as the research area, with variable dimension fractal theory, the fractal characteristics of the environmental factors of landslide are analyzed. The results show that: the spatial distribution of landslides is in the second order cumulative and fractal distribution with elevation, fault, rainfall, river, road, slope gradient, lithology and land use type, and the fractal dimension values are relatively large, about 1.60, 1.50, 1.38, 1.35, 1.35, 1.30, 1.22 and 1.14 respectively; the spatial distribution of landslides is in the first order cumulative and fractal distribution with slope aspect, and the fractal dimension values are minimum, approximately 0.72. Therefore, the main factors of landslide development are elevation, fault, et al, while slope aspect has the least influence.

Keywords: Bailongjiang River Basin; Landslide Disaster; Environment Factors; Variable Dimension Fractal

白龙江流域甘肃段滑坡灾害的环境因子变维分形特征

颜阁†，唐新凯，梁收运

兰州大学 土木工程与力学学院，甘肃 兰州 730000

摘 要：滑坡分布与环境因子变换分形得到的分维值反映了滑坡发育对因子的变化敏感性。以汶川地震重灾区域之一的白龙江流域甘肃段作为研究区，借助变维分形理论，分析了孕育滑坡灾害的环境因子的分形特征。结果表明：滑坡的空间分布与高程、断裂、日降雨量、河流、道路、坡度、地层岩性和土地利用类型均呈二阶累计和分形分布，且其分维值均比较大，分别为 1.60、1.50、1.38、1.35、1.35、1.30、1.22 和 1.14；与坡向呈一阶累计和分形分布，且分维值最小，为 0.72。影响研究区滑坡发育的主要环境因子是高程和断裂等，坡向的影响最小。

关键词：白龙江流域；滑坡灾害；环境因子；变维分形

引言

由于特殊的地理位置和气候条件，甘肃省白龙江流域是国内滑坡泥石流最多的地区之一，区内地质灾害主要有滑坡、崩塌、泥石流、地面塌陷等，具有分布范围广，密度大，活动频繁，规模大，危害严重等特点，尤以白龙江中游的舟曲、宕昌、武都和文县最为突出[1]。2008 年汶川地震又极大地降低了山体稳定性，诱发了大量的崩塌、滑坡及不稳定斜坡，为泥石流灾害的发育提供了丰富的松散物质来源。舟曲县城区的泥石流灾害，虽经多次治理，但 2010 年 8 月 8 日三眼峪、罗家峪两沟同时暴发特大山洪泥石流灾害，

泥石流冲毁沿河房屋，阻断白龙江形成堰塞湖，致使大部分城区被淹没，造成 1501 人死亡、264 人失踪，引起了全社会的广泛关注。

滑坡在形成和活动过程中存在着复杂的非线性的相互作用。以往对滑坡等地质灾害的研究大多数应用确定论和概率论的方法，这些传统的理论和方法在研究滑坡动态演化的非线性特征上受到一定的限制[2]。分形理论的发展逐渐成为研究自然界复杂现象的一种新的方法和手段，相关性研究普遍以常维分形为理论依据，如：滑坡边界轨迹的几何分形结构[3-4]、滑坡规模—频率的分形特征[5-9]和滑坡分维预测研究[10-11]。为拓宽分形方法的适用范围，薛天放等[12]引入变换分形手段[13-14]，研究滑坡与环境因子的关系，发现滑坡空间分布与坡度、岩性、土地利用类型均呈二阶累计和分形分布，并认为分维值越大反映了滑坡发育对因子的变化越敏感。王志恒等[15]研究了四川省低山丘陵区滑坡空间分布与高程、坡度、地形起伏度、断裂构造、岩土类型、道路、河流、植被覆盖的变维分形特征，认为累计变换次数越大表明因子与滑坡的分段变维分形特征越复杂，同时也认为分维值越大反映了因子对滑坡发育的影响程度越大。邱海军等[16]以陕西宁强县滑坡为例，采用变维分形方法，探讨滑坡的空间分布与高程、起伏度、坡度、距河流距离、距断裂带距离和地层岩性的变维分形特征，认为用变维分形理论来研究滑坡的空间分布特征对于 GIS 空间叠加分析时权重的确定有着重要意义。可见，变维分形理论为滑坡孕灾环境因子的敏感性评价提供了新途径，变换分形后得到的累计变换次数和分维值的差异也需要进行深入的研究，以便更好地认识滑坡空间的分布规律。

本文以白龙江流域甘肃段为例，探讨与滑坡灾害相关的包括日降雨量和坡向等 9 个环境因子的变维分形特征，以期更好地揭示滑坡的形成条件和演化规律，为防灾减灾工作提供科学依据。

1 区域地质概况

白龙江流域甘肃段位于甘肃省南部、青藏高原东北边缘，处于青藏高原向黄土高原过渡的斜坡急剧变形带，属于西秦岭侵蚀—剥蚀构造山地，地势西高东低。区内构造形迹复杂，总的特征是构造线呈北西西向，断裂多属压性。新构造运动十分活跃，受喜马拉雅运动的影响，地壳强烈隆升，第四纪以来地壳抬升幅度至少在 1500~3800m。出露的地层岩性有：前第四系变质砂岩、板岩、灰岩、白云岩、千枚岩、砂砾岩等，第四系卵石、碎石、块石、砂、粉土、黄土状亚砂土等，以及二长花岗岩、花岗岩、闪长岩等。

研究区地质构造复杂，断裂、节理发育，岩性复杂多变且岩石风化强烈、岩体破碎，大量的松散堆积层广泛分布，在大气降水、地震以及人类频繁活动的影响下，滑坡灾害广泛分布（图 1）、发育频繁且危害严重。随着经济的发展，人类活动广度和深度的不断扩大与加深，加之流域内地质灾害自身发生的时间、空间、规模和强度等方面的不确定性，研究区地质灾害的发展趋势不容乐观。

2 研究方法

2.1 原理

自然界严格满足常维分形形式的现象是不存在的，大量的复杂现象需要变维分形来描述[7]。也就是说在(N，r)双对数坐标中，所有数据点不可能与一条直线完全相符，只能是部分数据点或者是极少部分数据点与一条直线符合良好，这也是分形方法无法在更多领域中应用的重要原因。因此，为了解决常维分形无法处理双对数曲线为非直线的问题，付昱华[13]引入了变维分形的概念，即分维数 D 是特征线度 r 的函数。

$$D = F(r) \tag{1}$$

付昱华[14]随后提出，任何函数 $N = f(R)$都可变换为常维分形 $N = Cr^{-D}$ 的形式。通过将数据序列经过一系列 1 阶、2 阶或者更多阶数累计和处理，建立各阶累计和的分段分维模型，最后选择效果最好的作为其常维分形参数。其具体步骤为：

第一步，将原始数据点(N_i, r_i)(i=1，2，…，n)在双对数坐标下进行绘制。采用如下公式获取双对数坐标下相邻两点连接线段的斜率的相反数，即分段分维的分维数 $D_{i,i+1}$。这些分维数通常变化较大且无规律性。

$$D_{i,i+1}=\ln\left(N_i/N_{i+1}\right)\Big/\ln\left(r_{i+1}/r_i\right) \tag{2}$$

第二步，构造各阶累计和。将 N_i 排列成以下序列，即有：

$$\{N_i\}=\{N_1,N_2,N_3,\cdots\} \tag{3}$$

在以上基本序列的基础上，按照如下规则构造各阶累计和：

$$\{S1_i\}=\{N_1,N_1+N_2,N_1+N_2+N_3,\cdots\} \tag{4}$$

$$\{S2_i\}=\{S1_1,S1_1+S1_2,S1_1+S1_2+S1_3,\cdots\} \tag{5}$$

$$\{Sm_i\}=\{Sm\text{-}1_1,Sm\text{-}1_1+Sm\text{-}1_2,Sm\text{-}1_1+Sm\text{-}1_2+Sm\text{-}1_3,\cdots\} \tag{6}$$

式中：$S1_i$，$S2_i$，…，Sm_i 是指 1，2，…，m 阶累计和序列。依此方法可以构造 m 阶累计和序列。

第三步，建立各阶累计和的分段变维分形模型。以一阶累计和为例，利用公式计算数据点($S1_i$，r_i)和($S1_{i+1}$，r_{i+1})在双对数坐标中的斜率($D1_{i,i+1}$)，即一阶累计和的分段变维分形的分维数。根据 n 个数据对，可以得到 n-1 条线段的分段变维的分维数，称之为分维数序列。用 $Dm_{i,i+1}$ 表示 m 阶累计和的分段变维分形的分维数序列，m=1，2，…；i=1，2，…，n-1。

第四步，选择效果最好的变换，并确定其相应的常维分形维数。

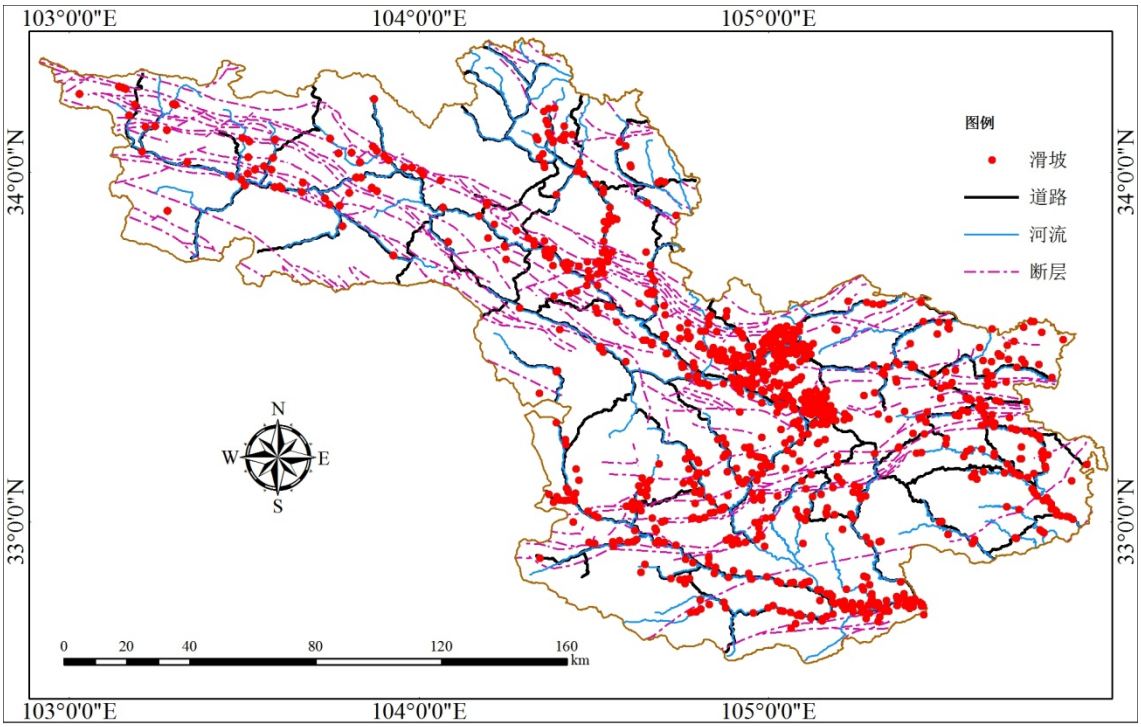


图1 研究区滑坡分布图

2.2 环境因子统计

2.2.1 环境因子分段或分类

选取的环境因子有 9 个，包括坡度、坡向、高程、日降雨量、地层岩性、土地利用类型和距断层、河流、道路的距离。为应用变换分形方法，需对环境因子各状态进行编号，首先应对环境因子进行分段或分类（表 1）。

地形条件的分段：先根据数字高程模型（分辨率为 30m 的 DEM），提取研究区的坡度、坡向图。以 300m 为间隔，将 600～3000m 范围内高程分成 8 个区段，将 3000m 以上额外作为一个区段；以 10°为间隔，将坡度分为 8 个区段；以 45°为间隔，将坡向分为 8 个区段。日降雨量分段方法与地形条件相似，以 20mm 为间隔，将 50～190mm 范围内日降雨量分为 7 个区段。

地层岩性与土地利用类型的分类：区内地层从元古界到新生界均有发育，主要岩石类型大致分为 9 类，包括千枚岩、板岩、薄层灰岩岩组，中厚层灰岩、板岩岩组，粉砂岩、泥岩、薄层砂砾岩岩组，变质砂岩、变质砾岩、板岩岩组，中厚层砂岩、板岩夹灰岩岩组，厚层砾岩、砂砾岩岩组，砂卵砾石岩岩组，变质安山岩、变质凝灰岩、变质玄武岩岩组，岩浆岩岩组，分别用字母 A_1~I_1 表示；参照国家农委的土地利用分类标准，并根据研究区滑坡发育特征，划分出 8 类，包括旱地、草地、林地、农村居民点用地、水田、戈壁、河渠、城镇用地，分别用字母 A_2~H_2 表示。

断层（来源于 1:50 万地质图）、河流和道路的缓冲分段：以 500m 为间距建立 10 个等距缓冲区和一个超过 5000m 的缓冲区，将断裂带、河流和道路均分成了 11 个不同的区段。

表 1 研究区滑坡面积与环境因子分段、分类和编号汇总表

环境因子编号(r_i)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
坡度分段(°)	20~30	30~40	10~20	40~50	50~60	0~10	60~70	70~80			
面积/10^6m^2	121.83	72.54	41.75	13.53	4.37	1.30	1.09	0.15			
坡向分段(°)	180~225	135~180	225~270	270~315	90~135	45~90	0~45	315~360			
面积/10^6m^2	59.06	39.29	32.84	32.39	32.30	24.11	23.03	10.26			
高程分段(m)	1800~2100	1500~1800	1200~1500	900~1200	600~900	2400~2700	2100~2400	2700~3000	3000~		
面积/10^6m^2	52.93	52.64	51.64	33.01	32.26	15.64	11.62	5.69	1.12		
地层岩性分类	A_1	B_1	C_1	D_1	E_1	F_1	G_1	H_1	I_1		
面积/10^6m^2	140.30	44.47	24.59	16.76	15.10	11.59	2.55	0.75	0.45		
距断层距离分段(km)	0.5~1	0~0.5	5~	1~1.5	1.5~2	2~2.5	2.5~3	4.5~5	3~3.5	3.5~4	4~4.5
面积/10^6m^2	58.25	47.42	37.78	28.26	23.72	18.57	12.39	10.69	7.56	7.18	4.73
日降雨量分段(mm)	70~90	50~70	150~170	90~110	130~150	110~130	170~190				
面积/10^6m^2	88.55	60.82	35.08	22.43	20.54	15.66	13.48				
距河流距离分段(km)	0~0.5	0.5~1	1.5~2	1~1.5	2.5~3	2~2.5	5~	3.5~4	4~4.5	3~3.5	4.5~5
面积/10^6m^2	87.88	44.65	28.22	26.30	18.75	14.88	11.78	9.88	6.61	5.11	2.49
距道路距离分段(km)	0~0.5	0.5~1	1~1.5	1.5~2	2~2.5	5~	3.5~4	2.5~3	3~3.5	3~3.5	4.5~5
面积/10^6m^2	87.49	42.95	28.25	21.82	18.08	15.66	13.21	11.36	10.81	4.24	2.70
土地利用分类	A_2	B_2	C_2	D_2	E_2	F_2	G_2	H_2			
面积/10^6m^2	149.33	88.42	10.16	7.12	0.72	0.36	0.34	0.10			

注：环境因子编号是根据滑坡面积的排序给定的；字母A_1～I_1和A_2～H_2的指代对象在文中已给出；坡向对应的滑坡面积总和比其他环境因子小，是因为部分滑坡对应的坡度为零，坡向不在0～360°范围内。

2.2.2 环境因子编号和统计

利用 Arcgis 空间叠加求交(overlay)命令，对滑坡发育分布图与环境因子图进行叠加求交运算，得到环境影响因子的各状态的滑坡分布面积得到环境影响因子的各分段或分类的滑坡分布面积（表 1）。一般认为，在累积和变换分形处理过程中，同一种环境影响因子的各状态对滑坡的影响具有相似性，并且自然界总趋向于最为稳定的状态，即分形维数最小的状态。因此，参考已有的研究方法[12]，把各环境影响因子下的滑坡面积按从大到小的顺序排列，之后给环境因子编号(r_i)取值：1、2、3 等。再依照变换分形方法对滑坡面积(N_i)与编号(r_i)进行统计，直至累计变换结果满足双对数坐标中线性拟合方差大于 0.99。

3 结果与分析

以滑坡面积与坡度的变换分形为例，滑坡面积(Ni)和坡度编号(ri)的双对数关系曲线表现出明显的非线性关系（图 2A），说明滑坡分布与坡度之间呈变维分形关系，需要进一步变换处理，以建立滑坡面积与坡度

之间的分段变维分形关系。因此，对滑坡面积数据(N_i)进行一阶累计变换，变换后的结果($S1_i$)与编号(r_i)仍表现为非线性关系。再进行二阶累计变换，可以看到数据点($S2_i$，r_i)基本呈线性关系，且相关系数大于 0.99（图 2A），说明滑坡分布与坡度之间呈二阶累计和分形关系(分维值 D_2=1.30)。表 2 列出了详细计算结果，其中分段分维数($D_{i,i+1}$)与一阶分段分维数($D1_{i,i+1}$)的值随编号(r_i)的变化均较大，也反映了滑坡面积与坡度之间非线性关系。依照同样的步骤，对滑坡面积与剩余 8 个环境因子进行变换分形处理（图 2B～I），并将累计变换次数和分维值汇总至表 3。

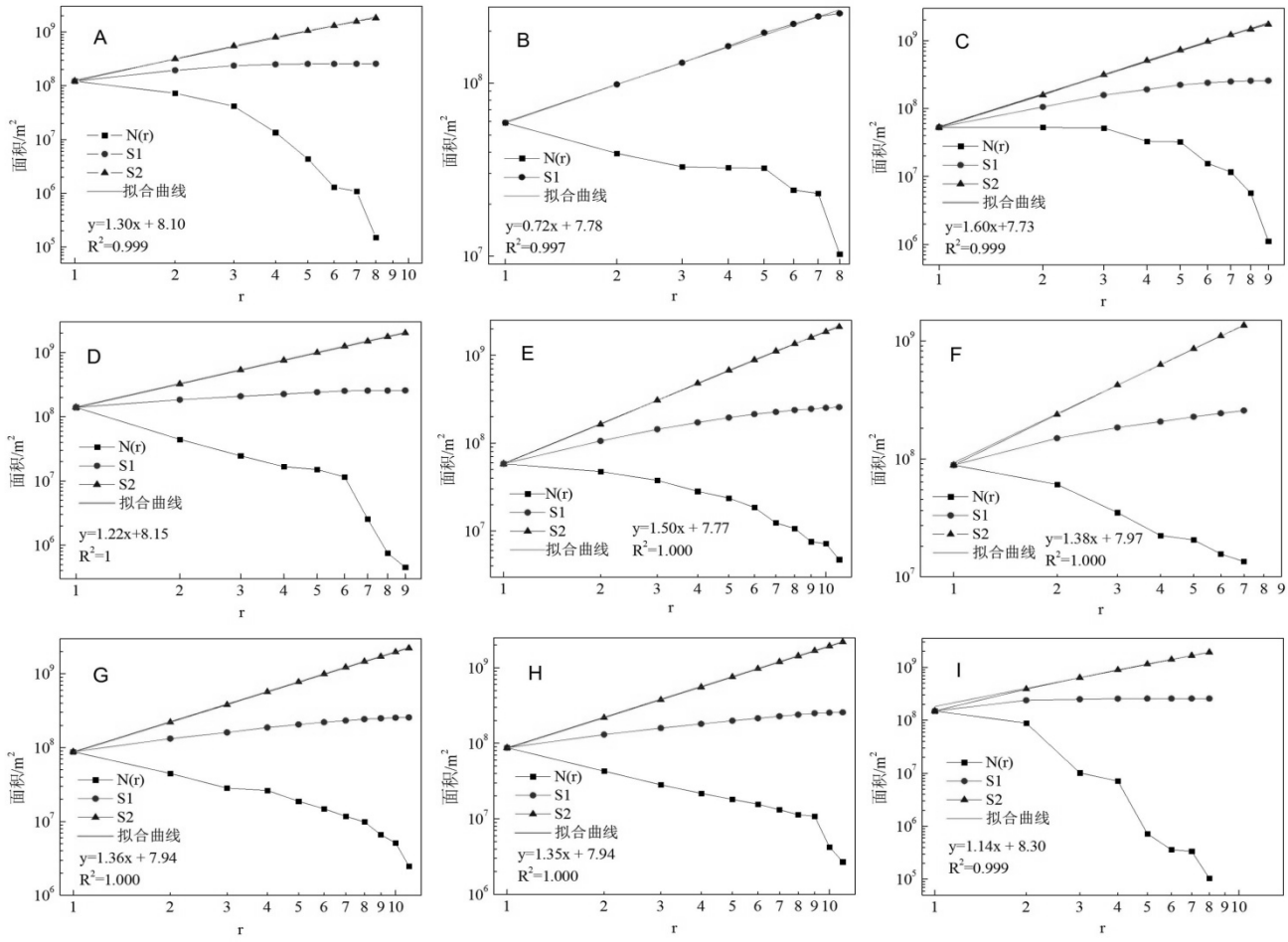


图 2 滑坡分布面积与环境因子的累计和分段分维序列图

注：A～I中的r分别代表坡度、坡向、高程、地层岩性、断裂带、日降雨量、河流、道路和土地利用类型的编号，与表1对应；$N(r)$表示滑坡面积与环境因子编号的关系曲线、$S1$和$S2$分别表示滑坡面积进行一阶和二阶累计变换后与环境因子编号的关系曲线。

从表 3 可以看出：研究区滑坡的空间分布与坡度、高程、地层岩性、断裂、日降雨量、河流、道路和土地利用类型均呈二阶累计和分形分布，且其分维值均比较大；滑坡的空间分布与坡向呈低阶累计和分形分布，且分维值均较小。一般认为滑坡分布与影响因子变换分形得到的分维值大小反映了滑坡发育对因子的变化敏感性，该值越大，越敏感。因此，研究区环境因子对滑坡发育的影响程度，从大到小依次为高程、断裂带、日降雨量、河流、道路、坡度、地层岩性、土地利用类型、坡向。

哥伦比亚 Chinchina 地区的滑坡发育对岩性敏感程度大于坡度和土地利用类型[12]；四川省低山丘陵区滑坡发育对植被覆盖、岩土类型和坡度的变化敏感性大于断裂构造和河流[15]；陕西省宁强县滑坡对于不同影响因子的敏感度由高到低分别是坡度、距断裂带距离、起伏度、地层岩性、距河流距离、高程[16]。与已有研究相比，本研究得出的白龙江流域甘肃段滑坡对不同影响因子的变化敏感度次序与已有研究存在差异。这种差异反映了不同地区地质环境条件对滑坡发育影响的特殊性。

表 2 滑坡分布面积与坡度的分段变维计算结果

坡度(°)	环境因子编号(r_i)	滑坡面积(N_i)	分段分维数($D_{i,i+1}$)	一阶累计($S1_i$)	一阶分段分维数($D1_{i,i+1}$)	二阶累计($S2_i$)
20~30	1	121833842	0.7481399	121833842	0.673892	121833842
30~40	2	72536297	1.3625173	194370139	0.479856	316203981
10~20	3	41747262	3.9173744	236117401	0.193643	552321382
40~50	4	13526835	5.0590104	249644236	0.077847	801965618
50~60	5	4374490	6.6554153	254018726	0.027998	1055984344
0~10	6	1300000	1.1651876	255318726	0.027541	1311303070
60~70	7	1086270	14.845995	256404996	0.004369	1567708066
70~80	8	149620		256554616		1824262682

表 3 滑坡与环境因子的变维分形特征汇总表

序号	环境因子	累计变换次数(m)	分维值(D)
A	坡度	2	1.30333
B	坡向	1	0.71798
C	高程	2	1.60190
D	地层岩性	2	1.21899
E	断裂带	2	1.50491
F	日降雨量	2	1.38048
G	河流	2	1.35648
H	道路	2	1.35041
I	土地利用类型	2	1.13578

4 结语

滑坡分布与环境因子变换分形得到的分维值大小反映了滑坡发育对因子的变化敏感性。白龙江流域甘肃段环境因子对滑坡灾害发育的影响程度，从大到小依次为高程、断裂带、日降雨量、河流、道路、坡度、地层岩性、土地利用类型、坡向。研究结果可为深入分析该区域滑坡成因及制定防治对策提供参考依据。

致谢

本文得到中国地调局地质调查工作项目“甘肃省白龙江流域主要城镇环境工程地质勘查”(1212011089083)的支持。

REFERENCES

[1] XK Tang, SY Liang. Correlation between geo-hazards and economic development for the Gansu section of the Bailongjiang catchment area [J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2012, (4): 66-71

[2] ZH Wang, SS Ma. Fractal dimension pattern of landslide and its significance for forecating [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(S): 1699-1701

[3] SR Wu, JL Han, JS Shi, et al. A study of the relationship between stability and fractal dimension of the major landslide trace pattern near Badong in the reservoir region of the Yangtze Gorge Project[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2006, 26(5): 455-460

[4] SR Wu, L Shi, CX Tan, et al. Fractal analysis of Huanglashi and Huangtupo landslides in Three Gorges, Changjiang River, China [J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 2000, 25(1): 61-65

[5] BD Malamud, DL Turcotte, F Guzzetti, et al. Landslide inventories and their statistical properties[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2004, 29(6): 687-711

[6] F Brardinoni, M Church. Representing the landslide magnitude–frequency relation: Capilano River basin, British Columbia[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2004, 29(1): 115-124

[7] Q Xu, RQ Huang. Power law between volume and frequency of geological hazards[J]. Journal of Chengdu University of Technology, 1997, 24(S): 91-96

[8] YX Hu, XR Liu, Y Jiang, et al. Three-parameter inverse-gamma probability distribution model of incomplete landslide

inventory[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2011, 42(10): 3176-3181

[9] YX Hu, XR Liu, JH Luo, et al. Analyses and example application of spatial data for landslide inventory[J]. Journal of Lanzhou University(Natural Sciences), 2011, 47(3): 9-17

[10] LS Tang, CY Zhou. Fractal dimension and prognosis of landslide[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 1996, 35(3): 87-91

[11] ZW Wang, SS Ma. Fractal dimension pattern of landslide and its significance for forecasting[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(S): 1699-1701

[12] TF Xue, Q Yang, MT Luan. Research on fractal characters of spatial distribution of landslide based on GIS[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(2): 347-354

[13] YH Fu. Fractal analyses for parameters of wind, wave and current[J]. Ganggong Jishu, 1996, (3): 6-9

[14] YH Fu. Transform-formed fractals and analyses and forecast of marine environment data[J]. Marine Science Bulletin, 2000, 19(1): 79-88

[15] ZH Wang, ZW Hu, CQ Liu, et al. Susceptibility analysis of disaster-pregnant environment factors of landslide in the hilly area in Sichuan based on variable dimension fractal theory[J]. Earth and Environment, 2013, 41(6): 680-687

[16] HJ Qiu, MM Cao, W Liu, et al. Research on variable dimension fractal characteristics of spatial distribution of landslides[J]. Geoscience, 2014, 28(2): 443-448

【作者简介】



[1] 颜阁（1990-），男，汉，硕士生。研究方向：环境地质与地质灾害。2013 年本科毕业于兰州大学地质工程专业，并获学士学位。

Email: yang13@lzu.edu.cn

[2] 唐新凯（1989-），男，汉，硕士。现工作于上海市岩土地质研究院有限公司。2014 年毕业于兰州大学地质工程专业，并获工学硕士学位。Email: tangxk2011@lzu.edu.cn

[3] 梁收运（1965-），男，汉，博士，教授，研究方向：环境地质与地质灾害。Email: liangsy@lzu.edu.cn