

文章编号: 1009-3850(2008)03-0035-06

泥石流堆积物的粒度分布及其分形结构

倪化勇^{1,2}, 刘希林²

(1. 成都地质矿产研究所, 四川 成都 610082 2. 中国科学院 成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041)

摘要: 泥石流堆积物主要由砾石、砂砾、粉粒和粘粒组成, 组成泥石流堆积物的颗粒级配变幅很大, 从直径大于数十米的巨砾到肉眼难以看见的几微米的胶体微粒均有分布, 大小颗粒粒径之比可达 106~107。泥石流堆积物颗粒具有明显的自相似性和无标度区间。本文以小江流域多处泥石流堆积物为研究对象, 采用图解法全面分析了泥石流堆积物的粒度组成特征, 根据分形理论计算了泥石流堆积物颗粒的分维值, 对泥石流堆积物的分形特征进行探讨, 并与泥石流堆积物粒度特征相联系, 发现分维很好的反映了泥石流堆积物颗粒组成及其粒度分布特征。将泥石流堆积物颗粒分维与泥石流的粘性、形成年代等性质相联系, 以找出它们彼此之间的关系。

关键词: 泥石流; 堆积物; 粒度分布; 粒度分维; 分形特征

中图分类号: P694 X43

文献标识码: A

泥石流堆积物是泥石流快速侵蚀、搬运的产物, 它包含着大量泥石流的形成、运动和堆积过程的信息。泥石流堆积物的粒度能充分反映搬运介质和运动方式的特点, 通过研究泥石流的粒度组成, 可以了解泥石流的形成机理, 具有重要的作用。因此, 泥石流堆积物粒度的研究成为泥石流研究的一个重要内容。

目前, 泥石流堆积物粒度分析资料的处理, 主要有统计法和图解法^[1]。常用的粒度参数有粒度平均值、标准差、偏度、峰态和粒度众数值等, 他们从不同的角度说明了泥石流堆积物的粒度分布; 图解法主要有粒度分布直方图、频率曲线图、累积曲线图和概率累计曲线图等。

分形理论作为研究自然界中没有特征长度, 又有自相似性的图形和现象的重要方法和理论^[2], 在土壤、断层泥、冻土、水石流、冰碛物、河流堆积、湖泊堆积、海底堆积, 以及沙漠沉积中都有广泛的应

用, 尤其在土壤中的应用最为成熟, 并获得了一系列的实际意义和应用价值^[3~14]。自 20 世纪 90 年代开始已经被应用于泥石流堆积物粒度的研究中, 并得到了国内外众多学者的认可和重视^[11~23]。但是前人对泥石流堆积物粒度分维结果研究的多, 而与泥石流堆积物颗粒组成和粒度分布联系较少。笔者利用图解法和分形理论对小江流域多处泥石流堆积物的粒度资料进行分析, 从而总结出泥石流堆积物粒度分维与泥石流颗粒组成和粒度分布之间的内在联系, 并在前人研究的基础上, 进一步对泥石流堆积物粒度分维与泥石流的性质之间的关系进行研究。

1 粒度分布

1.1 资料来源

小江发源于滇东北的鱼味后山, 自南向北注入金沙江, 全长 138.2 km, 流域面积为 3043.45 km²。流域内古构造运动错综复杂, 新构造运动十分强烈, 属

收稿日期: 2007-02-18 改回日期: 2008-06-04

作者简介: 倪化勇 (1979—), 男, 硕士, 主要从事地质灾害预测预报、评价与管理 and 灾害地貌的研究

资助项目: 中国地质调查局“四川省泸定县地质灾害详细调查项目”(1212010640503)

强震区,自然条件和人类活动都比较特殊,促使泥石流形成和发展的因素交织在一起,从而成为我国泥石流的典型发育区。纵观小江两岸,现代泥石流比比皆是,频频暴发,古代泥石流痕迹斑斑,清晰可辨。“座座山头走蛟龙,条条沟口吹喇叭”是对该流域内泥石流活动场景的生动写照。小江流域堪称为“泥石流的天然博物馆”。

本文泥石流堆积物样品来自小江流域不同的泥

石流沟,并在室内进行颗粒百分比的土工测试分析后得到堆积物的粒度资料^[23]。

1.2 资料分析

由于泥石流堆积物颗粒级配范围广,颗粒的分布规律非常复杂,常用的粒度统计参数很难全面的描述泥石流堆积物的颗粒组成和粒度分布规律。粒度平均值只能反映一个样品颗粒的粗细程度,标准差仅仅对堆积物粒度分布的分散程度进行说明,偏

表 1 小江流域泥石流堆积物的粒度分布
Table 1 Grain size distribution in the debris flow deposits along the Xiaojiang River

沟名	类型	颗粒组成/mm							
		<0.005	<0.05	<0.1	<0.5	<2	<10	<40	<100
老干沟	稀性	1.57	1.93	1.47	4.79	4.85	22.36	46.57	16.14
拖沓沟	粘性	2.47	3.01	2.22	6.25	3.16	26.41	45.39	11.94
尖山沟	粘性	5.82	5.59	2.27	3.78	11.64	45.48	25.44	0
深沟	粘性	4.88	6.54	4.61	10.98	4.52	15.12	35.75	15.93
大白泥沟	粘性	7.99	7.51	6.22	12.91	4.28	40.10	21.04	0
小海河沟	粘性	12.22	9.17	15.13	8.29	6.99	22.01	26.16	0

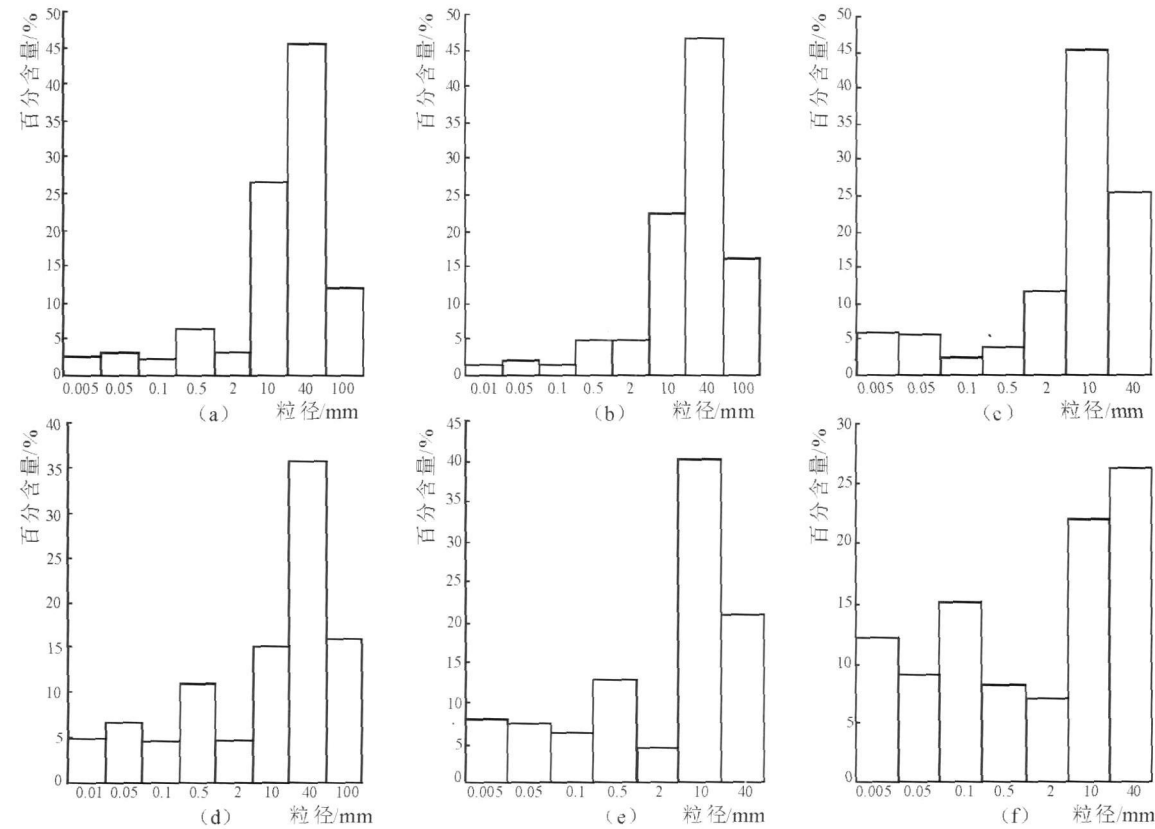


图 1 泥石流堆积物粒度分布直方图

a老干沟稀性泥石流; b拖沓沟粘性泥石流; c尖山沟粘性泥石流; d深沟粘性泥石流; e大白泥沟粘性泥石流; f小海河沟粘性泥石流

Fig 1 Histograms of grain size distribution in the debris flow deposits along the Xiaojiang River

a Lao gangou dilute debris flow deposits; b Tuo dagou viscous debris flow deposits; c Jian shangou viscous debris flow deposits; d Shengou viscous debris flow deposits; e Da bai ni gou viscous debris flow deposits; f Xiao hai he gou viscous debris flow deposits

度、峰态和众数值等粒度参数也只能反映某一个方面。相比之下,图解法能够比较直观的反映出泥石流堆积物的颗粒组成和粒度分布的定性特征。根据泥石流堆积物样品粒度分析资料,分别绘制了不同样品粒度分析资料的粒度分布直方图(图1)和粒度分布曲线图(图2)。

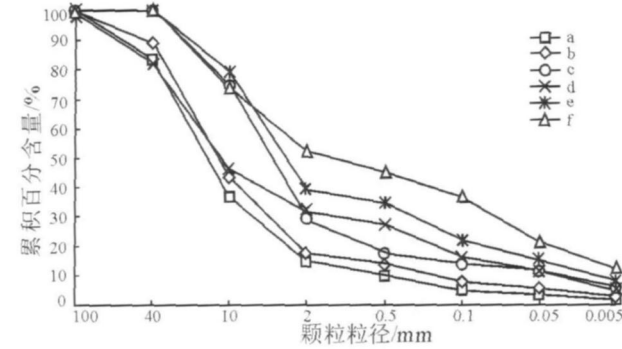


图2 泥石流堆积物粒度分布累积曲线图(图例同图1)
Fig.2 Grain size accumulation curves for debris flow deposits. See Fig.1 for the explanation of symbols

从粒度分布直方图(图1)可以明显的看出,泥石流堆积物粒度分布具有多峰性的特征。不同泥石流的堆积物样品,不同尺寸的颗粒所占的比重不尽相同,大小颗粒之间的比值也不同。相对来讲,老干沟稀性泥石流和拖沓沟粘性泥石流堆积物大小颗粒之间的比值较大,粒度分布非常不均匀;而大白泥沟粘性泥石流和小海河粘性泥石流堆积物比较均匀;尖山沟粘性泥石流和深沟粘性泥石流则居中。泥石流堆积物粒度的这种分布特征在累积曲线图上(图2)则表现为曲线的平缓程度。从老干沟稀性泥石流堆积物到小海河沟粘性泥石流堆积物,粒度分布越来越均匀,其累积曲线表现为越来越平缓。

2 分形特征

2.1 粒度分维的计算方法

泥石流粒度分维值的计算可采用岩石破碎模型^[2],通过粒度分析法求解。设泥石流颗粒粒径为 r ,粒径大于 r 的颗粒百分含量为 $N(r)$,则 $N(r)$ 与 $N(r)$ 满足分维一般的定义式

对式(1)两边求导可得 $N(r) = r^{-D}$ (1)

$dN(r) \sim r^{D-1} dr$ (2)

碎形中碎块大小和频度之间满足经验关系Weibull分布^[2]

$\frac{M(<r)}{M_0} = 1 - \exp\left[-\left(\frac{r}{\delta}\right)^b\right]$ (3)

式中 $M(<r)$ 为所有尺寸小于 r 的碎块的质量

之和; M_0 为整个碎形集合的质量; δ 为碎块的平均尺寸, b 为常数。

当 $r \ll \delta$ 时,将指数函数进行Taylor级数展开,并略去二次项后得

$\frac{M(<r)}{M_0} = \left(\frac{r}{\delta}\right)^b$ (4)

对式(4)两边求导可得

$dM(<r) \sim r^{b-1} dr$ (5)

泥石流颗粒数目的增加和颗粒质量之间存在下列关系

$dM(<r) \sim r^b dN(r)$ (6)

联立式(2),(5)和(6)可得泥石流粒度分维的计算式

$D = 3 - b$ (7)

该关系式为求解颗粒分维常用的算式。如果粒径 r 和粒径小于 r 的累积百分含量 $M(<r)/M_0$ 在双对数坐标系中具有很好的线性关系,则说明泥石流颗粒具有良好的分形特征,用最小二乘法拟合直线段得斜率(等于 $-b$),通过该式即可以求得泥石流颗粒粒度组成的分维值。

2.2 粒度分维值的计算结果

根据泥石流堆积物粒度分维值的计算方法,分别对表1中不同沟谷泥石流颗粒的分维值在双对数坐标系中进行计算(图3)。

从泥石流堆积物粒度分维的计算结果(表2图3)来看,在双对数坐标系内,泥石流堆积物粒度分布线性关系明显,相关系数均在0.95以上,说明泥石流堆积物具有明显的分形特征。粒度分维值介于2.5和3之间,并且从老干沟稀性泥石流堆积物,到小海河沟粘性泥石流堆积物粒度分维呈现出依次增大的规律,这同泥石流堆积物粒度分布直方图和累积曲线图的变化规律具有一致性。说明泥石流颗粒粒度分维在很大程度上反映了泥石流堆积物的组成及其均匀程度。泥石流堆积物颗粒越均匀,粒度分布直方图和累积曲线图越平滑,粒度分维越大;反之,泥石流堆积物颗粒越不均匀,粒度分布直方图和累积曲线图越曲折复杂,粒度分维值越大。

3 泥石流堆积物的分形特征与泥石流性质的关系

泥石流堆积物是泥石流快速侵蚀、搬运的产物,它包含着大量泥石流形成、运动和堆积过程的信息。泥石流堆积物的粒度分布充分反映出泥石流这种特殊的搬运介质和方式的特点,所以泥石流堆积物的

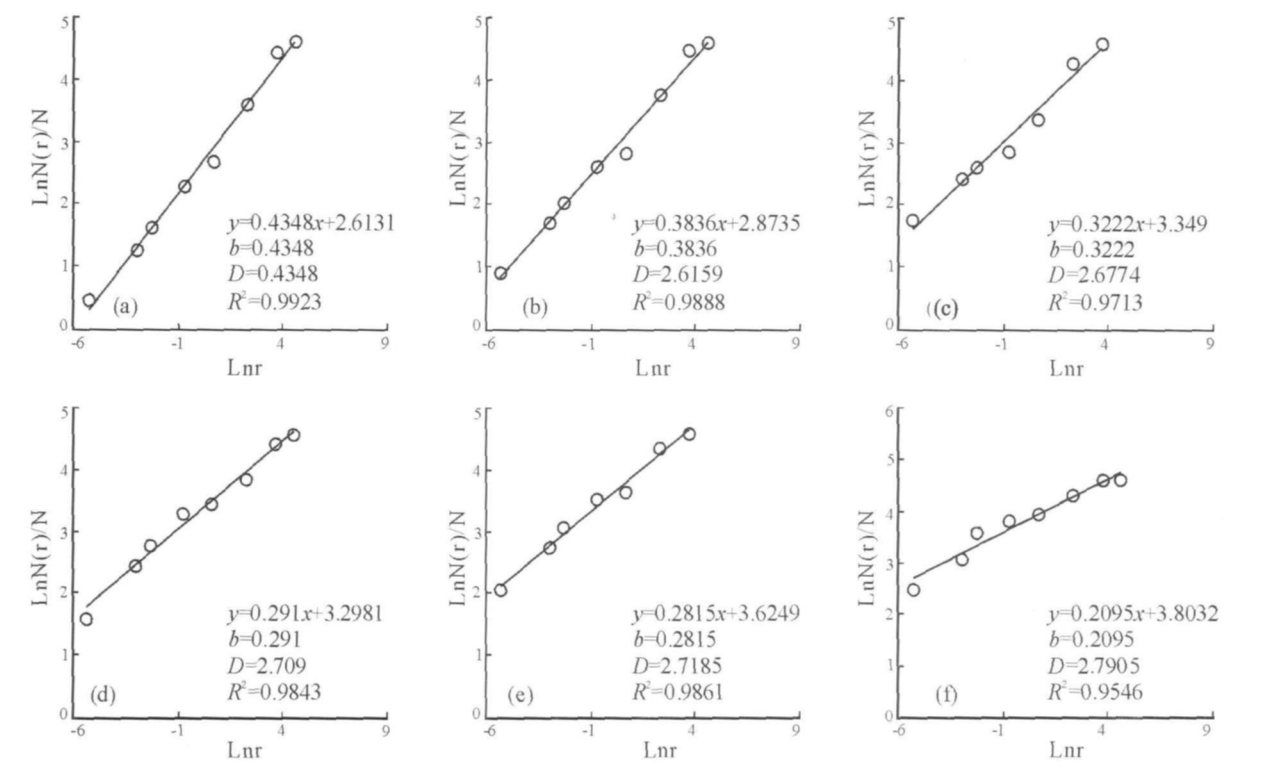


图 3 泥石流颗粒粒度双对数分布与分维 (图例同图 1)

Fig 3 Grain size bivariate distribution and corresponding fractal dimension of the debris flow deposits along the Xaojiang River. See Fig 1 for the explanation of symbols

表 2 泥石流堆积物粒度分布分维表

Table 2 Grain size distribution and fractal dimension of the debris flow deposits along the Xaojiang River

沟名	老干沟	拖查沟	尖山沟	深沟	大白泥沟	小海河沟
D	2.5652	2.6159	2.6774	2.7090	2.7185	2.7905
R	0.9961	0.9944	0.9856	0.9921	0.9930	0.9786

粒度分维与泥石流的粘性等性质有密切的联系。

3.1 分形特征与粘性的关系

按照泥石流的物质成分、颗粒组成, 以及流体容重、粘度等的不同, 泥石流可分为粘性泥石流、稀性泥石流和过渡性泥石流。泥石流堆积物的分形特征能够反映堆积物的物质成分和粒度分布, 因此, 也与泥石流的粘性具有密切关系。

表 3 计算了小江流域同一泥石流沟暴发不同粘性泥石流堆积物的粒度分维。从计算结果来看, 同一泥石流沟暴发不同性质的泥石流堆积物的粒度分维不同, 呈现出粘性泥石流堆积物颗粒分维值大于本泥石流沟相应稀性泥石流堆积物分维值的规律。

另外, 笔者对小江流域 20 多条典型泥石流沟所暴发的不同性质的泥石流堆积物的粒度分布和分形特征进行分析, 发现不同性质泥石流堆积物颗粒的分维值不同, 呈现出从含沙洪水堆积物的分维值, 到

稀性泥石流堆积物的分维值, 再到粘性泥石流堆积物的分维值依次增大的规律, 从平均意义上得出含沙洪水堆积物的平均分维值为 2.5127, 稀性泥石流堆积物的平均分维值为 2.6190, 粘性泥石流堆积物的平均分维值为 2.6976。对于小江流域而言, 初步确定堆积物分维值小于 2.55 时为含沙洪水堆积物, 堆积物分维值介于 2.55 ~ 2.65 之间为稀性泥石流堆积物, 堆积物分维值大于 2.65 时为粘性泥石流堆积物。因此, 可以根据泥石流堆积物粒度分维值的大小来推断泥石流的粘性。

3.2 分形特征与堆积年代的关系

泥石流暴发后在堆积区进行堆积, 但是堆积物的成分和粒径的大小并不是不变的, 而是由于堆积区降水、温度、植被等外界条件的变化, 泥石流的再次堆积, 以及人类活动等影响随着时间的推移不断发生变化。按照泥石流堆积的年代不同, 泥石流可分为古泥石流、老泥石流和近代泥石流, 泥石流堆积物按照堆积时间的不同也相应的分为古泥石流堆积物、老泥石流堆积物和近代泥石流堆积物。

表 4 给出了小江流域蒋家沟不同年代暴发的泥石流的堆积物的粒度分布, 并根据粒度分析法分别计算了不同年代泥石流堆积物的粒度分维, 发现不

同年代的泥石流堆积物粒度分维值不同, 从古泥石流堆积层到老泥石流堆积层再到近代泥石流堆积层呈现依次递减的规律。根据表中的内容, 初步判定古泥石流堆积层、老泥石流堆积层和现代泥石流堆

积层的临界分维值分别为 2.67和2.72。堆积物分维值小于2.67的堆积物为近代泥石流堆积物, 2.67和2.72之间的为老泥石流堆积物, 大于2.72的为古泥石流堆积物。因此, 可以利用泥石流堆积物的临界

表 3 不同粘性泥石流堆积物的粒度分布和粒度分维值
Table 3 Grain size distribution and fractal dimension of debris flow deposits with different viscosities

类型	沟名	颗粒组成 /mm									D	R ²
		>100	<100	<40	<10	<2	<0.5	<0.1	<0.05	<0.005		
稀性	达德沟	7	6.24	32.84	45	0	0	12.46	1.06	2.87	2.6249	0.9206
	黑沙沟	12.95	20.34	32.58	18	4.81	1.61	1.24	6.8	1.74	2.6412	0.9558
	小海河	0	35.77	40.97	14.1	0.79	3.01	1.42	2.48	1.51	2.5959	0.9656
粘性	黑沙沟	15.94	6.76	20.59	26.2	11.70	5.18	3.07	8.24	2.29	2.6481	0.9730
	小海河	0	0	26.16	22	6.99	8.29	15.13	9.17	12.22	2.7760	0.9576
	达德沟	9.3	19.26	30.68	19.7	0	0	15.53	7.08	7.97	2.7450	0.9797

表 4 蒋家沟多照台地古、老、近代泥石流堆积物粒度分布和粒度分维值
Table 4 Grain size distribution and fractal dimension of ancient, old and recent debris flow deposits at the Duo Zhao mesa, Jiangjagou

样品号	泥石流类型	颗粒组成 /mm									D	R ²	
		< 0.1	< 0.25	< 0.5	< 1	< 2	< 5	< 10	< 25	< 45			< 80
1	古泥石流	1100	76.5	66.7	58.2	50.6	47.5	29.8	15.2	1	0	2.7634	0.9759
2		100	76.8	65	55.3	45.2	39.3	26.2	14.6	3	0	2.7710	0.9499
3		100	79.3	69.7	60.9	52.2	47.7	25.3	9.9	1	0	2.7386	0.9637
4		100	82.3	75.2	65.3	56	51.9	33.2	16.5	3.3	0	2.7124	0.9732
5	老泥石流	100	85.4	79	69.1	60.3	57.2	46.4	35.9	12.7	6.4	2.7171	0.9696
6	近代泥石流	100	92.3	89.3	87.3	85.3	84.3	75.2	52.4	43.9	31.6	2.6645	0.8878

分维值来判断古泥石流暴发的大致年代。

4 结 语

(1) 泥石流堆积物粒度分布跨越多个数量级, 具有明显的分形特征。根据小江流域典型泥石流堆积物粒度分布和分形特征的研究, 得出泥石流堆积物粒度分维介于 2.5和 3之间。同泥石流堆积样品粒度分布的直方图和曲线图相对比, 粒度分维很好的反映了泥石流堆积物的颗粒组成和粒度分布规律, 粒度分布越均匀, 粒度分维越大, 粒度分布越不均匀, 粒度分维越小。

(2) 泥石流堆积物的粒度分布与泥石流的粘性密切相关, 不同粘性泥石流的堆积物, 其粒度分维不同, 呈现出从含沙洪水堆积物的分维值, 到稀性泥石流堆积物的分维值, 再到粘性泥石流堆积物的分维值依次增大的规律, 据此可以推断泥石流的粘性。

(3) 泥石流堆积物粒度分布随着时间的变化而不同。不同年代的泥石流堆积物粒度分维不同, 从古泥石流堆积层到老泥石流堆积层再到近代泥石流堆积层呈现依次递减的规律, 据此可以推断泥石流

暴发的大致年代。

参考文献:

[1] 中国科学院成都山地灾害与环境研究所. 泥石流研究与防治 [M]. 成都: 四川科学技术出版社, 1989.

[2] 陈颙, 陈凌. 分形几何学 [M]. 北京: 地震出版社, 1998.

[3] CARPINIERI A, LACDOGNA G, FUGNO N. Scaling of energy dissipation in crushing and fragmentation: a fractal and statistical analysis based on particle size distribution [J]. International Journal of Fracture, 2004, 129(2): 131—139.

[4] MILLÁN H, GONZÁLEZ M, AGUILAR M, et al. On the fractal scaling of soil data: Particle size distributions [J]. Geoderma, 2003, 117: 117—128.

[5] YONG ZHONGSU, HALLIN ZHAO, WEN ZHIZHAO, et al. Fractal features of soil particle size distribution and the implication for indicating desertification [J]. Geoderma, 2004, 122: 43—49.

[6] CHENG ZHUHUA, ZHANG JIABAQ, ZHU ANNING. Introduction of fractal dimension to estimation of soil sensitivity to preferential flow [J]. Pedosphere, 2002, 12(3): 201—206.

[7] 易顺民, 唐辉明. 断层泥粒度成分的分形特征 [J]. 地震地质, 1995, 17(2): 185—191.

[8] 易顺民,唐辉明. 冻土粒度成分的分形结构特征及其意义 [J]. 冰川冻土, 1994 16(4): 314—319

[9] 陈敬安,万国江,黄荣贵. 云南程海沉积物粒度研究 [J]. 环境科学进展, 1999 7(4): 76—82

[10] 戴雪荣,李均吉,愈立中,等. 兰州风尘沉积的粒度分布模式及其古气候意义 [J]. 沉积学报, 2000 18(1): 36—42

[11] 柏春广,王建. 一种新的粒度指标: 沉积物粒度分维值及其环境意义 [J]. 沉积学报, 2003 21(2): 234—235

[12] 田堪良,张惠莉,张伯平,等. 天然沉积砂卵石粒度分布的分形结构研究 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2002 30(5): 85—89

[13] 徐建华,艾南山,金炯,等. 沙漠化的分形特征研究 [J]. 中国沙漠, 2002 22(1): 6—10

[14] 倪化勇,吕学军,杨德伟. 川藏公路培龙沟路段堆积物的分形特征及其地质意义 [J]. 工程地质学报, 2005 13(4): 451—454

[15] 易顺民. 泥石流堆积物的分形结构特征 [J]. 自然灾害学报, 1994 3(2): 91—96

[16] 易顺民,孙云志. 泥石流的分形特征及其意义 [J]. 地理科学, 1997 17(1): 24—30

[17] MAY C L, GRESSWELL R E. Spatial and temporal patterns of debris flow deposition in the Oregon Coast Range, USA [J]. Geomorphology, 2004 57(3—4): 135—149

[18] SOHN Y K. Coarse-grained debris flow deposits in the Miocene fan deltas, SE Korea: a scaling analysis [J]. Sedimentary Geology, 2000 130(1—2): 45—64

[19] 卫宏,勒晓光,等. 泥石流堆积物的结构维数及其地质意义 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2000 11(3): 1—5

[20] 李泳,陈晓清,胡凯衡,等. 泥石流颗粒组成的分形特征 [J]. 地理学报, 2005 60(3): 495—502

[21] 倪化勇,刘希林. 泥石流灾害的分形研究 [J]. 灾害学, 2005 20(4): 18—22

[22] 倪化勇,刘希林. 泥石流粒度分维值的初步研究 [J]. 水土保持研究, 2006 13(1): 89—91

[23] 杜榕桓,康志成,陈循谦,等. 云南小江泥石流综合考察与防治规划研究 [M]. 重庆: 科学技术出版社重庆分社, 1987

Grain size distribution and fractal structures of solid grains in debris flow deposits

NI Hua yong², LU Xi li¹

(1. Chengdu Institute of Geology and Mineral Resources, Chengdu 610082, Sichuan, China; 2. Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: Debris flow can be seen as a two-phase rheological fluid with soil-fluid compositions, and the debris flow deposits consist of mud, silt, sandy gravel, boulder, etc., with grain sizes ranging from several microns to more than tens of meters. Consequently, solid grains in the debris flow deposits display a marked self-similarity in geometrical shape and scale invariance in size according to fractal theory. In this paper, various debris flow deposits located in the Xiaojiang River basin were collected as studied samples, and the features of grain size distribution of these deposits are examined through illustration method. Then fractal dimensions of solid grains in these deposits are calculated respectively with the dimension values between 2.5 and 3, showing obvious fractal features of grain size distribution. Furthermore, the results of grain size dimensions are consistent with the results obtained through the former method. So fractal dimension can be seen as such a parameter, which reflects the grain composition and grain size distribution of the debris flow deposits. Finally, the relationship between fractal dimension and viscosity and accumulation ages of debris flow deposits are discussed as more characteristics of debris flow are determined by grain composition and grain size distribution.

Key words: debris flow; debris flow deposits; grain size distribution; fractal dimension of grain size; fractal feature