

泥石流堆积物粒度分维的讨论^{*}

吕学军¹, 余 猛²

(1. 滨州学院 地理旅游系, 山东 滨州 256603; 2. 攀枝花市地质环境监测站, 四川 攀枝花 617000)

摘 要:在泥石流堆积物粒度分维原计算方法的基础上, 改变研究对象和应用条件, 进一步完善了计算方法, 并对两种方法下求得的粒度分维进行比较。实例证明, 利用改进后方法得到的粒度分维与泥石流堆积物土体的机械组成更相吻合, 同时也反映了泥石流的搬运能力和破坏能力, 体现了泥石流更多的特征。该研究是对泥石流堆积物土体机械组成和分形特征研究的补充, 对泥石流堆积物特征和分形理论的研究都具有一定意义。

关键词:泥石流; 堆积物; 粒度分维; 分形特征

中图分类号: P642. 23 文献标识码: A 文章编号: 10023409(2007) 0420105204

Discussion on Grain2size Fractal Dimension of Debris Flow Accumulations

L Xu2jun¹, SHE Meng²

(1. Department of Geology and Tourism of Binzhou University, Binzhou, Shandong 256603, China;
2. Geological Environment Monitoring Station of Panzhihua, Panzhihua, Sichuan 617000, China)

Abstract: On the basis of traditional calculating method of debris flow grain2size fractal dimension, a new method was introduced to supplement the original one by changing the research object and preconditions in this article. Different relations were compared between grain2size fractal dimensions of debris flow accumu2lation calculated by different method and grain composition, fractal feature, etc. Examples validated that dif2ferent several scale2variance and fractal dimensions existed when the new method was used. What2ps more, the fractal dimensions calculated by the new method are more consistent with the grain composition of deb2ris flow accumulations, and reflect more debris flow characteristics, such as carrying and breaking capacity. This research is a supplement to the research of grain composition and fractal feature of debris flow accu2mulation and is significant to apply debris2flow fractal theory.

Key words: debris flow; debris flow accumulation; grain2size accumulation; fractal feature

泥石流是一种饱含大量泥沙、石块和巨砾的固液两相流体, 其堆积物土体由石块、沙粒、粉粒和黏粒等组成, 具有一个变幅很大的粒度范围, 跨越几个数量级, 大小颗粒粒径之比可达 $10^6 \sim 10^7$ 之巨。根据分形理论, 泥石流堆积物具有明显的分形特征, 这个特征已受到众多学者的关注并予以证实^[1~ 6]。从以往的研究来看, 泥石流堆积物粒度分维的计算都采用了岩石破碎模型和粒度分析法, 即根据碎块大小和频度之间满足的关系(Weibull 分布)来求解,

后来部分学者对此方法提出疑义^[3]。本文在前人研究的基础上, 进一步改进计算方法, 讨论不同方法下得到的粒度分维同泥石流堆积物之间的关系。

1 泥石流堆积物粒度分维计算方法的讨论

1. 1 粒度分析法

计算泥石流堆积物粒度分维的常用方法是粒度分析法。设泥石流堆积物颗粒的粒径为 r , 粒径大

^{*} 收稿日期: 20070305
基金项目: 滨州院/ 青年人才创新工程0 科学基金(BZXYQNLG200503)
作者简介: 吕学军(1967-), 男, 山东滨州人, 硕士研究生, 现从事泥石流灾害与环境的学习和研究。

于 r 的颗粒数目为 $N(r)$, 如果泥石流堆积物分形特征存在, 则 r 与 $N(r)$ 满足分维最一般的定义式

$$N(r) = r^{-D}$$

(1)

式中: D))) 泥石流堆积的粒度分维。

对式(1)两边求导可得

$$dN(r) = r^{-D-1}dr$$

(2)

据碎形模型, 泥石流堆积物中颗粒的尺寸和频度之间满足经验关系 Weibull 分布^[7]

$$\frac{M(<r)}{M_0} = 1 - \exp[-(\frac{r}{r_0})^b]$$

(3)

式中: $M(r)$))) 所有尺寸小于或者大于 r 的颗粒质量之和; M_0))) 整个颗粒集合的质量; r_0))) 颗粒的平均尺寸; b))) 常数。

当 $r \gg r_0$ 时, 将式(3)中指数函数进行 Taylor 级数展开, 并求得

$$dM(<r) = r^{b-1}dr$$

(4)

另外, 泥石流堆积物中颗粒数目的增加和颗粒质量之间存在关系

$$dM = r^3 dN(r)$$

(5)

联立式(2), (4) 和(5)得泥石流粒度分维的计算式

$$D = 3 - b$$

(6)

式中常数 b 等于粒径 r 和颗粒累积百分含量 $M(r)/M_0$ 在双对数坐标系中拟合直线的斜率。

表 1 泥石流堆积物颗粒的机械组成*

沟名	堆积类型	< 0.005	0.005- 0.05	0.05- 1	0.1- 0.5	0.5- 2	2- 10	10- 40	40- 100	> 100
黑沙沟	黏性	2.29	6.24	3.07	5.17	11.7	26.19	20.59	6.76	17.99
黑沙沟	稀性	1.71	6.8	1.24	1.61	4.80	17.96	32.58	20.34	12.96
许家小河	稀性	4.26	7.57	2.02	2.22	6.24	19.42	27.65	14.66	15.96
桃家小河	洪水	0.67	2.85	1.77	4.36	5.7	26.38	39.89	18.43	0
拖查沟	黏性	2.47	3.01	2.22	6.25	3.16	26.41	45.39	11.94	0
小白泥沟	黏性	6.24	2.60	8.09	8.87	3.18	50.86	18.52	1.68	0
黑水河	黏性	5.13	5.20	1.53	4.90	8.67	19.94	49.91	4.62	0
老干沟	稀性	1.57	1.93	1.47	4.79	4.85	22.36	46.57	16.14	0
深沟	黏性	4.88	6.54	4.61	10.98	4.52	15.12	35.75	15.93	1.67
蒋家沟	黏性	4.10	4.09	0.91	4.56	1.25	31.57	37.57	15.91	0
蒋家沟	稀性	1.39	2.60	10.31	8.22	3.19	40.32	30.13	3.85	0

* 引自参考文献[8]

首先, 根据泥石流粒度分维的一般计算方法, 取 $M(r)$ 为粒径小于 r 的所有堆积物颗粒质量之和, 计算黑沙沟黏性泥石流堆积物的粒度分维, 发现在双对数坐标系内, 具有明显的无标度区间[0.005, 100] 线性关系明显(图 1), 利用最小二乘法拟合的直线方程为:

$$y = 0.352x + 3.04$$

(7)

相关系数 $R = 0.986$, 利用式(7)可得黑沙沟黏性泥石流堆积物粒度分维 $D = 2.6481$

然后, 利用改进后的方法计算泥石流堆积物粒度分维, 发现黑沙沟黏性泥石流在整个粒度区间[0.005, 100] 内, 线性关系不明显, 而是在两个不同的区

1.2 泥石流堆积物粒度分维计算存在的问题

在以往泥石流堆积物粒度分维和分形特征的研究中, 研究对象仅限于粒径小于给定尺寸 r 的所有颗粒之和。然而, 泥石流堆积物是对泥石流发生过程的反映, 堆积物中大颗粒和小颗粒在泥石流发生、运动和堆积过程中所起的作用不同, 并且泥石流堆积物的颗粒组成呈现多峰的特征, 尤其大颗粒占的比重较大。以往计算泥石流堆积物粒度分维的方法, 忽略了泥石流中粒径较大的颗粒, 难以体现泥石流搬运的大颗粒的特征, 因此, 有必要对计算方法加以改进, 进一步将较大的颗粒包含在研究范围内。改进的方法是同时考虑碎形模型中 $M(r)/M_0$ 取小于给定尺寸 r 的累积百分含量和大于 r 的累积百分含量两种情形, 计算两种方法下的泥石流堆积物的粒度分维。

2 实例计算、验证与比较

2.1 泥石流堆积物粒度分维的实例计算与验证

选择云南小江流域不同类型的泥石流堆积物为研究对象, 分析其土体的机械组成(表 1)。以小江流域黑沙沟黏性泥石流堆积物为例, 利用两种不同的方法分别计算粒度分维, 并加以比较。

间内各自呈现出良好的线性关系(图 2)。在区间 [0.005, 0.5] 范围内, 拟合得到的线性方程为:

$$y = -0.035x + 4.402 \tag{8}$$

相关系数 $R = 0.995$ 。取 $b = 0.035$, 利用式 (7) 得该区间内的粒度分维是 2.965。

在区间 [0.5, 100] 范围内, 拟合得到的线性方程为:

$$y = -0.360x + 4.562 \tag{9}$$

该式相关系数 $R = 0.996$ 。取 $b = 0.360$, 利用式 (7) 得该区间内的粒度分维是 2.640。

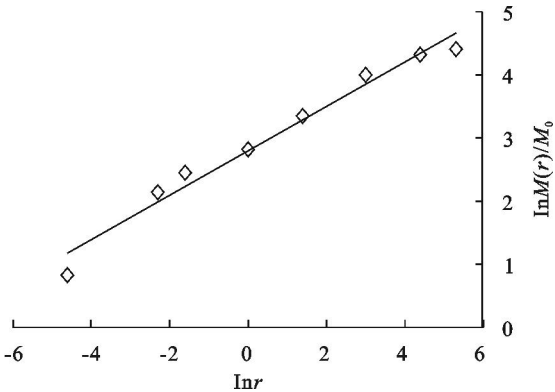


图 1 黑沙沟黏性泥石流堆积物粒度分布曲线与分维(据方法 1)

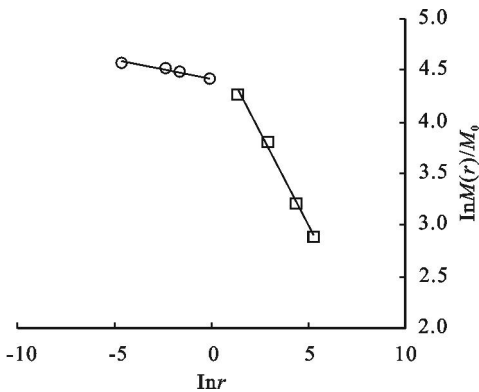


图 2 黑沙沟黏性泥石流堆积物粒度分布曲线与分维(据方法 2)

2.2 泥石流堆积物粒度分维的实例比较

从表面上来看, 利用第一种方法计算泥石流粒度分维比第二种方法线性关系明显, 更为理想, 然而事实并不是完全如此。进一步研究发现, 尽管第一种计算结果简单, 在一定程度上反映了黑沙沟黏性泥石流堆积物的机械组成, 但是相比之下第二种粒度分维的计算方法得出的结果与泥石流堆积物颗粒的不均匀性更相吻合, 体现了更多的泥石流特征, 具有重要的地质意义。首先, 利用改进后的计算方法得到的粒度分维, 体现了泥石流堆积物颗粒机械组成的重要特征。从双对数坐标系中拟合的两条直线

来看, 不同区间内斜率值先小后大的变化, 反映出黑沙沟黏性泥石流堆积物在细颗粒端分布比较均匀, 而在粗颗粒端分布不均, 这在粒度分析结果(表 1)和粒度分布直方图(图 3)中都可以得到验证, 说明不同区间内粒度分维越小, 该区间内粒度分布越不均匀; 其次, 改进后计算方法得到的泥石流堆积物粒度分维, 体现了泥石流搬运的最大颗粒的粒径, 间接反映了泥石流的搬运能力和破坏能力。黑沙沟黏性泥石流堆积物在粒度区间 [0.5, 100] 范围内的线性方程, 是对粗粒径堆积物颗粒的度量。理论上讲, 该拟合直线的方程与粒径轴的交点, 可视为泥石流搬运的颗粒粒径的上限。由于目前颗粒粒度分析时, 受到所取样品、实验仪器和分析方法等客观条件的限制, 取样难以满足要求, 所以最大粒径的获得还需要检验。

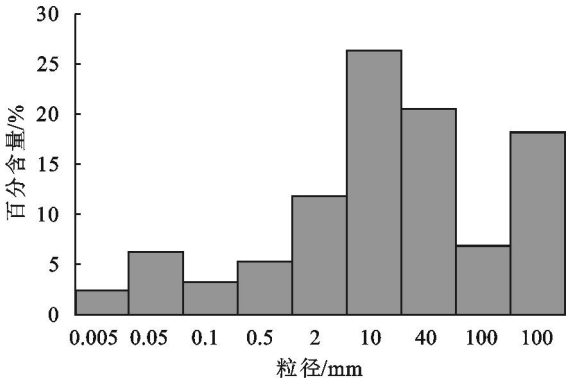


图 3 黑沙沟黏性泥石流堆积物的粒度分布直方图

为了进一步验证计算方法的准确性, 多种不同性质的泥石流堆积物的粒度分维都进行了计算, 并且对两种方法下的结果进行比较(表 2)。结果都呈现出同小江流域黑沙沟黏性泥石流同样的结论, 从而验证了规律的普遍存在性和改进后方法的可行性。两种方法得到的泥石流堆积物粒度分维相互补充, 更加体现泥石流堆积物的分形特征。

3 结 论

(1) 泥石流粒度分维的一般计算方法, 仅仅考虑了碎形模型中, $M(r)/M_0$ 取小于给定尺寸 r 的颗粒累积百分含量。本文进一步考虑了 $M(r)/M_0$ 取大于 r 的累积百分含量, 完善了泥石流粒度分维的计算方法。

(2) 泥石流粒度分维的一般计算方法, 在双对数坐标系内具有明显的无标度区间, 呈现出良好的线性关系; 改进后计算方法在整个区间不呈现线性关系, 而是在不同区间呈现不同的线性关系。相比之下, 改进后方法充分考虑了泥石流堆积物中的较大

颗粒, 计算结果与泥石流堆积物机械组成的多峰、颗粒级配范围广、大颗粒比重大等特点更加吻合, 反映了泥石流的搬运能力和破坏能力。

(3) 该研究不是对泥石流粒度分维原来计算方法的否定, 而是一种补充, 尚需进一步检验和完善。

表 2 两种方法下泥石流堆积物颗粒粒度分维结果

沟明	性质	原来计算方法				本文计算方法			
		方程	无标度区间	D	R	方程	无标度区间	D	R
黑沙沟	黏性	$y=3.052x+3.04$	[0.005,100]	2.648	0.986	$y=-0.035x+4.402$	[0.005,0.5]	2.965	0.995
						$y=-0.360x+4.562$	[0.5,100]	2.640	0.996
黑沙沟	稀性	$y=0.359x+2.80$	[0.005,100]	2.641	0.978	$y=-0.025x+4.452$	[0.005,2]	2.975	0.983
						$y=-0.689x+5.852$	[2,100]	2.311	0.978
许家小河	稀性	$y=0.285x+3.104$	[0.005,100]	2.716	0.988	$y=-0.033x+4.386$	[0.005,2]	2.967	0.986
						$y=-0.555x+5.378$	[2,100]	2.446	0.993
桃家小河	洪水	$y=0.49x+2.533$	[0.005,100]	2.51	0.993	$y=-0.026x+4.477$	[0.005,2]	2.974	0.962
						$y=-0.831x+5.979$	[2,100]	2.169	1.000
拖沓沟	黏性	$y=0.384x+2.874$	[0.005,100]	2.616	0.994	$y=-0.030x+4.437$	[0.005,0.5]	2.97	0.943
						$y=-0.546x+4.289$	[0.5,100]	2.454	0.927
小白泥沟	黏性	$y=0.306x+3.379$	[0.005,100]	2.694	0.982	$y=-0.051x+4.302$	[0.005,0.5]	2.949	0.918
						$y=-1.238x+5.354$	[0.5,100]	1.763	0.974
黑水河	黏性	$y=0.263x+3.05$	[0.005,100]	2.737	0.975	$y=-0.038x+4.370$	[0.005,2]	2.962	0.96
						$y=-1.781x+8.099$	[2,100]	1.220	1.000
蒋家沟	黏性	$y=0.331x+2.989$	[0.005,100]	2.669	0.979	$y=-0.022x+4.45$	[0.005,0.5]	2.978	0.986
						$y=-0.552x+4.961$	[0.5,100]	2.448	0.956
蒋家沟	稀性	$y=0.406x+3.057$	[0.005,100]	2.594	0.972	$y=-0.052x+4.343$	[0.005,2]	2.948	0.948
						$y=-1.571x+7.143$	[2,100]	1.429	1.000
深沟	黏性	$y=0.291x+3.298$	[0.005,100]	2.719	0.992	$y=-0.058x+4.274$	[0.005,2]	2.942	0.979
						$y=-1.448x+7.565$	[2,100]	1.553	0.949
老干沟	稀性	$y=0.453x+2.614$	[0.005,100]	2.565	0.996	$y=-0.024x+4.478$	[0.005,2]	2.976	0.951
						$y=-0.979x+6.393$	[2,100]	2.021	1.000

参考文献:

[1] 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.

[2] 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.

[3] 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.

[4] 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.

[5] 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.

[6] 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.

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

[8] 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.