

# 泥石流粒度分维值的初步研究

倪化勇<sup>1,2</sup>, 刘希林<sup>1</sup>

(1. 中国科学院成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘要:** 运用分形理论, 提出泥石流粒度分维的概念及其计算方法。根究泥石流粒度分析结果, 分别求解泥石流形成区原始土体粒度分维、流体粒度分维和堆积物粒度分维, 并分析它们与泥石流流体颗粒机械组成和流体性质方面的相互关系。泥石流粒度分维值为泥石流形成、运动和堆积特征以及流体性质提供了可供参考的指示意义。

**关键词:** 泥石流; 分形特征; 粒度分维

中图分类号: P642.23

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2006)01-0089-03

## A Preliminary Study on Debris Flow Grain-size Fractal Dimension

NI Hua-yong<sup>1,2</sup>, LIU Xi-lin<sup>1</sup>

(1. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China;

2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract** According to fractal theory, the definition and calculating method of grain-size fractal dimension for debris flow were presented, and grain-size fractal dimensions of the original grains in the source area, grains in debris flow fluid and grains in accumulation area were respectively analyzed in detail. On the basis of fractal feature of the grains and the relationship between grain-size fractal dimension and grain composition, characteristics of debris flow, it is presents that the grain-size fractal dimension of debris flow can reflect the volume of the viscous grains, indicate the viscosity characteristics of debris flow, and the resistance property. The critical grain-size fractal dimension values might provide some useful indications for debris flow researches.

**Key words:** debris flow; fractal feature; grain-size fractal dimension

### 1 前言

泥石流粒度是指泥石流所含固体颗粒的大小, 是泥石流固体颗粒重要的几何特征。粒度及颗粒组成不仅可以反映泥石流形成区岩石土体的性质, 而且可以反映泥石流的流变特性和搬运能力。因此, 粒度分析是泥石流研究和防治工作中不可缺少的实验手段。目前, 常用的粒度参数有: 粒度平均值、粒度标准差、粒度偏度、粒度峰态和粒度众数值等。

分形理论研究的对象是自然界中没有特征长度但又有自相似性的图形和现象。从组成上看, 泥石流颗粒主要由砾石、砂砾、粉粒和黏粒组成, 组成泥石流颗粒的级配变幅很大, 从直径大于 20m 的巨砾到肉眼不可见的几微米的胶体微粒均有分布, 粒径级配范围跨越多个数量级, 大小颗粒粒径之比可达  $10^6 \sim 10^7$  之巨<sup>[1]</sup>, 颗粒没有特征尺度; 从形态上看, 小颗粒可视为大颗粒的缩影, 颗粒具有自相似性。

### 2 泥石流粒度分维

#### 2.1 分维值的计算方法

泥石流粒度分维值的计算可采用岩石破碎模型<sup>[2]</sup>, 通过粒度分析法求解。设泥石流颗粒粒径为  $r$ , 粒径大于  $r$  的颗粒百分比含量为  $N(r)$ , 则  $r$  与  $N(r)$  满足分维的一般的定义式

$$N(r) = r^{-D} \quad (1)$$

对式(1)两边求导可得

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

碎形中碎块大小和频度之间满足经验关系 Weibull 分布<sup>[2]</sup>

$$\frac{M(<r)}{M_0} = 1 - \exp[-(\frac{r}{r_0})^\lambda] \quad (3)$$

式中:  $M(<r)$ ——所有尺寸小于  $r$  的碎块的质量之和;  $M_0$ ——整个碎形集合的质量;  $r_0$ ——碎块的平均尺寸,  $\lambda$ ——常数。

当  $r \ll r_0$  时, 将指数函数进行 Taylor 级数展开, 并略去二次项后得

$$\frac{M(<r)}{M_0} = (\frac{r}{r_0})^\lambda \quad (4)$$

对式(4)两边求导可得

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

泥石流颗粒数目的增加和颗粒质量之间存在下列关系

$$dM \sim r^\lambda dN(r) \quad (6)$$

联立式(2)、(5)和(6)可得泥石流粒度分维的计算式

$$D = 3 - \lambda \quad (7)$$

式中:  $D$ ——泥石流颗粒粒度分维值。常数  $\lambda$  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。

2.2 泥石流形成区原始土体粒度分维值

云南小江流域蒋家沟和大盈江流域浑水沟泥石流是云南两条典型的暴雨泥石流沟, 泥石流类型齐全, 暴发频率较高, 且具有比较齐备的观测资料。两沟发生泥石流时的流体性质与其相应的形成区原始土体的机械组成以及分维值整理成表 1<sup>[3]</sup>。原始土体粒径  $r$  和土体颗粒累积百分含量  $N (r)$  的双对数相关系数在 0.9 以上(表 1), 表明泥石流形成区原始土体颗粒在无标度区间内  $[0.005, 2]$  具有明显的分形特征, 两处泥石流形成区原始土体颗粒粒度分维值介于 2.6 与 3 之间。

表 1 不同性质泥石流的源区颗粒组成及其粒度分维

| 沟名  | 性质   | 颗粒百分含量/mm |        |       |       | R      | D      |
|-----|------|-----------|--------|-------|-------|--------|--------|
|     |      | < 0.005   | < 0.05 | < 2   | > 2   |        |        |
| 蒋家沟 | 黏性   | 9.25      | 10.23  | 13.85 | 66.67 | 0.9872 | 2.7924 |
|     | 亚黏性  | 12        | 18     | 16    | 54    | 0.9710 | 2.7858 |
|     | 稀性   | 38.05     | 34.05  | 27.38 | 0.52  | 0.9741 | 2.8464 |
|     | 含沙水流 | 52        | 44.5   | 3.5   | 0     | 0.9060 | 2.9001 |
| 浑水沟 | 黏性   | 4.5       | 5.9    | 37.6  | 52.1  | 0.9997 | 2.6031 |
|     | 亚黏性  | 6         | 7.7    | 51.2  | 35.1  | 0.9995 | 2.6003 |
|     | 稀性   | 12.9      | 19.4   | 61.7  | 6     | 0.9980 | 2.6724 |
|     | 含沙水流 | 16.1      | 28.4   | 54    | 1.7   | 0.9897 | 2.7059 |

由表 1 可以看出, 形成区原始土体粒度分维值 D 的大小可间接地反映泥石流性质。总的来说, 小于 0.005 mm 的黏粒含量越高, 粒度分维值 D 也越大。但最终形成的泥石流的性质却有着与此相反的关系, 即黏性和亚黏性泥石流形成区原始土体粒度分维值反而比稀性泥石流和含沙水流的小, 这一有悖“常理”的认识, 只能用泥石流流体的性质不完全取决于源地土的性质来解释。初步计算结果表明, 蒋家沟泥石流形成区原始土体粒度分维值在 2.75~ 2.9 之间, 浑水沟在 2.60~ 2.70 之间, 由此可将蒋家沟暴发泥石流对形成区原始土体分维值的临界要求为  $D < 2.85$ , 浑水沟暴发泥石流对形成区原始土体分维值的临界要求为  $D < 2.65$ 。在同一泥石流沟谷, 如能对泥石流形成区原始土体的机械组成及其颗粒粒径的变化进行监测和分析, 应该可以粗略判断该沟的泥

流类型。但实际上, 泥石流形成区土体粒度成分的变化是非常缓慢的, 也是很小的, 因为形成区的岩土母质是不变的, 颗粒机械组成的变化主要取决于风化作用和风化程度的改变, 而风化作用和过程又主要是由大的气候环境和生物环境来决定的。因此, 用形成区原始土体分维值 D 来判断泥石流的类型, 还需要做进一步的研究。

2.3 泥石流堆积物粒度分维值

泥石流堆积物的粒度特征可间接反映泥石流的搬运特点。云南小江流域 3 条典型泥石流沟的泥石流类型和堆积物粒度特征以及分维值见表 2<sup>[4]</sup>。蒋家沟多照台地不同年代泥石流堆积物粒度特征以及分维值见表 3<sup>[5]</sup>。

从表 2 可以看出, 泥石流堆积物粒度分维值 D 与泥石流性质有一定相关性, 表现为黏性泥石流堆积物粒度分维值大于稀性泥石流堆积物粒度分维值, 也即小于 0.005 mm 的黏粒含量越高, 粒度分维值 D 也越大。这一结论易于理解, 因为泥石流堆积物是泥石流形成后再堆积的结果, 当然是堆积物中黏粒含量越高, 泥石流流体中黏粒含量也越高, 从而属于黏性泥石流的可能性也越大。从表 3 可以看出, 不同年代的泥石流堆积物粒度分维值也不同, 呈现出从古泥石流到老泥石流再到近代泥石流的堆积物粒度分维值出现依次递减的趋势, 这一趋势与堆积物中保存黏粒含量的多少也是相关的, 堆积物年代越新, 保存的黏粒含量越多, 也从另一个侧面证实了黏性泥石流粒度分维值大于稀性泥石流堆积物粒度分维值的结论。由此, 用泥石流堆积物粒度分维值可粗略判断古泥石流暴发的大致年代, 据表 3 的初步结果, 蒋家沟古泥石流和老泥石流堆积物的平均粒度分维值 D 为 2.74, 近代泥石流堆积物的粒度分维值 D 约为 2.67。由此推断, 泥石流堆积物粒度分维值小于 2.67 时为近代泥石流堆积物, 大于 2.74 时为古老泥石流堆积物。易顺民等的研究结果基本上与此相近<sup>[6,7]</sup>。但这一推论要有实际意义, 还必须在时间上对近代泥石流, 古、老泥石流有明确界定。遗憾的是, 何为古、老泥石流和近代泥石流的具体时间确定, 还没有公认的看法, 最多也只是一般意义上的新老先后而已。同时, 在一个地区得出的泥石流堆积物粒度分维临界值是否适用于另一地区, 也还需要做深入的研究。

表 2 小江流域不同性质泥石流堆积物粒度分维值

| 沟名  | 类型 | 颗粒百分含量/mm |       |       |      |       |       |        |         | R     | D      |         |
|-----|----|-----------|-------|-------|------|-------|-------|--------|---------|-------|--------|---------|
|     |    | > 100     | > 40  | > 10  | > 2  | > 0.5 | > 0.1 | > 0.05 | > 0.005 |       |        | < 0.005 |
| 达德沟 | 黏性 | 9.3       | 19.26 | 30.68 | 19.7 |       |       | 15.53  | 7.08    | 7.97  | 0.9949 | 2.7450  |
| 黑沙沟 | 黏性 | 15.94     | 6.76  | 20.59 | 26.2 | 11.7  | 5.18  | 3.07   | 8.24    | 2.29  | 0.9932 | 2.6481  |
| 小海河 | 黏性 |           |       | 26.16 | 22   | 6.99  | 8.29  | 15.13  | 9.17    | 12.22 | 0.9892 | 2.7760  |
| 达德沟 | 稀性 | 7         | 6.24  | 32.84 | 45   |       |       | 12.46  | 1.06    | 2.87  | 0.9795 | 2.6249  |
| 黑沙沟 | 稀性 | 12.95     | 20.34 | 32.58 | 18   | 4.81  | 1.61  | 1.24   | 6.8     | 1.74  | 0.9888 | 2.6412  |
| 小海河 | 稀性 |           | 35.77 | 40.97 | 14.1 | 0.79  | 3.01  | 1.42   | 2.48    | 1.51  | 0.9913 | 2.5959  |

表 3 蒋家沟多照台地古、老、近代泥石流堆积物粒度分维值

| 样品号 | 颗粒百分含量/mm |        |       |      |      |      |      |      |      |      | 泥石流类型 | R      | D      |
|-----|-----------|--------|-------|------|------|------|------|------|------|------|-------|--------|--------|
|     | > 0.1     | > 0.25 | > 0.5 | > 1  | > 2  | > 5  | > 10 | > 25 | > 45 | > 80 |       |        |        |
| 1   | 100       | 76.5   | 66.7  | 58.2 | 50.6 | 47.5 | 29.8 | 15.2 | 1    | 0    | 古泥石流  | 0.9939 | 2.7634 |
| 2   | 100       | 76.8   | 65    | 55.3 | 45.2 | 39.3 | 26.2 | 14.6 | 3    | 0    | 古泥石流  | 0.9872 | 2.7710 |
| 3   | 100       | 79.3   | 69.7  | 60.9 | 52.2 | 47.7 | 25.3 | 9.9  | 1    | 0    | 古泥石流  | 0.9908 | 2.7386 |
| 4   | 100       | 82.3   | 75.2  | 65.3 | 56   | 51.9 | 33.2 | 16.5 | 3.3  | 0    | 古泥石流  | 0.9932 | 2.7124 |
| 5   | 100       | 85.4   | 79    | 69.1 | 60.3 | 57.2 | 46.4 | 35.9 | 12.7 | 6.4  | 老泥石流  | 0.9923 | 2.7171 |
| 6   | 100       | 92.3   | 89.3  | 87.3 | 85.3 | 84.3 | 75.2 | 52.4 | 43.9 | 31.6 | 近代泥石流 | 0.9707 | 2.6645 |

## 2.4 泥石流流体粒度分维值

泥石流可以看作是由泥浆和大小石块组成的两相流体, 泥石流流体挟带的这些固体物质的组成特性既反映了泥石流源区原始土体的性质, 又反映了泥沙的运动方式和动力条件。表 4 列出了云南蒋家沟、甘肃火烧沟和云南浑水沟泥石流流体颗粒的组成、黏性和阻力特征以及分维值<sup>[5]</sup>。

从表 4 可以看出, 泥石流流体粒度分维值  $D$  与泥石流流体性质有明显关系, 即小于  $0.005\text{ mm}$  的黏粒含量越高, 粒度分维值  $D$  也越大。从蒋家沟到火烧沟到浑水沟, 泥石流黏性依次减小, 流体粒度分维值也呈现依次减小的趋势。此外, 泥石流流体粒度分维值还反映了泥石流流体阻力特征, 随着泥石流阻力逐渐增大, 泥石流流体粒度分维值逐渐减小。高黏性、小阻力、高分维值的现象可解释为, 小阻型泥石流流体一般被搅拌得比较均匀, 颗粒比较均一, 并且被黏稠的泥浆体所充填, 在运动粗颗粒之间为光滑摩擦, 而颗粒均匀者粒度分维值较大。大阻型泥石流浆体较稀, 运动中颗粒之间为粗糙摩擦, 被搬运的颗粒粗大且粒径相差较大, 颗粒不均匀者粒度分维值较小。因此, 泥石流流体中黏粒含量的多少再次证明了与其粒度分维值的大小有着直接的正相关。

### 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, 陈凌. 分形几何学[M]. 北京: 地震出版社, 1998
- [3] 费祥俊, 舒安平. 泥石流运动机理与灾害防治[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003
- [4] 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
- [5] 吴积善, 康志成, 田连权, 等. 云南蒋家沟泥石流观测研究[M]. 北京: 科学出版社, 1990
- [6] 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
- [7] 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

(上接第 41 页)

水量技术, 确立山丘区小流域可集水量、集水技术和塘坝蓄水技术; 通过对作物灌溉的模拟试验, 探讨湖南山丘区目前主要推广作物品种的灌溉机理, 研究湖南山丘区作物灌溉技术, 建立灌溉与作物生育期、生理状态、产量和品质关系模型; 通过不同作物品种的小区灌溉模拟试验, 优选作物品种, 研究适合山丘区作物节水的机理, 建立成套作物灌溉技术。山丘区生态灌溉体系把生态环境、灌溉技术与作物需水有机的结合, 是一套独立的、完整的体系, 为形成《生态灌溉学》奠定理论基础。

## 5 方案的实施

建立山丘区生态灌溉体系分四步实施: 第一步在调查研究和收集资料的基础上进行集雨区域的划分(根据土壤类型、坡度大小和降雨量); 第二步按整个生态灌溉体系的不同

### 参考文献

- [1] 谢小立, 熊泽海. 长江中游丘岗农业水资源态势与管理方略[J]. 农业生态环境, 1999, 15(3): 14-16
- [2] 汪志农. 灌溉排水工程学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000
- [3] 陈维杰. 集雨节灌技术[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2003
- [4] 顾斌杰, 张敦强, 潘云生. 雨水集蓄利用技术[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001
- [5] 崔宗培. 中国水利百科全书[M]. 北京: 水利电力出版社, 1991
- [6] 水利部农村水利司. 雨水集蓄工程技术[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999
- [7] 沈振荣, 汪林, 于福亮. 节水新概念[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2000
- [8] 郭相平, 康绍忠. 节水灌溉的新思路[J]. 西北水资源与水工程, 1998, (4): 22-25

表 4 泥石流流体颗粒组成、泥石流黏性、阻力特征及粒度分维值

| 泥石流沟 | 黏性特征 | 阻力特征 | 颗粒百分含量/mm |        |      |     | R      | D      |
|------|------|------|-----------|--------|------|-----|--------|--------|
|      |      |      | < 0.005   | < 0.05 | < 2  | > 2 |        |        |
| 蒋家沟  | 高黏性  | 小阻型  | 15        | 12     | 13   | 60  | 0.9847 | 2.8416 |
| 火烧沟  | 中黏性  | 中阻型  | 6         | 20     | 16   | 58  | 0.9561 | 2.6934 |
| 浑水沟  | 低黏性  | 大阻型  | 4.5       | 6      | 37.5 | 52  | 0.9997 | 2.6033 |

## 3 结 语

初步研究表明, 泥石流形成区原始土体、流体和堆积物颗粒都具有分形特征, 其粒度分维值介于 2.5~3 之间。泥石流形成区原始土体、流体和堆积物粒度分维值均与颗粒粒度成分中的黏粒含量直接相关, 即小于  $0.005\text{ mm}$  的黏粒含量越高, 粒度分维值  $D$  也越大。同时, 原始土体粒度分维值可间接反映暴发黏性泥石流或是稀性泥石流的可能性大小; 泥石流堆积物粒度分维值反映了泥石流的性质和形成年代的新老先后顺序; 泥石流流体粒度分维值反映了泥石流的黏性和阻力特征。

系统进行试验(主要是三大系统: 集雨系统、灌溉系统、作物品种选优和灌溉制度系统); 第三步优化方案(按不同的坡度、不同的土壤、不同的降雨量进行方案的优化); 第四步推广应用。整个实施方案如图 1。

## 6 应用前景

湖南省是一个农业大省, 山地丘陵地区耕地面积占总耕地面积的  $4/5$ 。雨量充沛, 山地丘陵地区的降雨大于平原, 为集雨提供了极为有利的条件。由于雨水集蓄工程一般规模小、分布较散, 不会造成不利的环境影响, 而且有利于生态的保护和修复。实施生态灌溉, 调控雨水, 变被动抗旱为主动抗旱, 同时又能减轻降雨引起的洪涝灾害, 对确保山丘区旱涝保收有着重要的作用。这是湖南省水资源可持续利用的一个有效途径, 开发利用前景十分广阔。