泥石流堆积物粒度分形特征及影响因素分析

杨 伟[1,2], 崔 鹏[1], 庄建琦[1,2], 张建强[1,2]
(1. 中国科学院 水利部 成都山地灾害与环境研究所
中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室, 四川 成都 610041; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049)

摘 要: 汶川地震诱发了大量的泥石流,给山区带来了巨大的人员伤亡及财产损失,为了更好地对泥石流特征进行研究并对其危险性进行预测,通过野外取样对泥石流堆积物进行了粒度分析,并对汶川地震灾区泥石流堆积物的分形结构特征以及泥石流物源区岩性、松散物质量及沟道坡降对泥石流堆积物颗粒组成的影响进行了分析。结果表明,其粒度分维值介于 2 ~ 3 之间,平均值为 2.49,标准差为 0.19,分维值的离散度比较低。粉砂岩的分维值最小,其次是砂岩和泥灰岩;石英闪长岩的分维值最大,其次为石灰岩。分维值的变化趋势与松散物质量的变化趋势极为相似,分维值随着松散物质量的增大而增大。泥石流堆积物的分维还受到沟道坡降的影响,在其它影响因素相同的情况下,分维值随着沟道坡降的增大而增大。地震后泥石流堆积物的分形特征体现了泥石流危险度的大小,可为泥石流活动特征及危险性预测提供依据。

关键词: 泥石流堆积物; 分维; 岩性; 松散物质
文献标识码: A **文章编号:** 1000-288X(2012)02-0080-04 **中图分类号:** P642.23

Particle-size´s Fractal Characteristics of Debris-flow Deposits and Associated Influencing Factors

YANG Wei[1,2], CUI Peng[1], ZHUANG Jian-qi[1,2], ZHANG Jian-qiang[1,2]
(1. *Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Conservancy, Key Laboratory of Mountain Hazards and Land Surface Process, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan* 610041, *China*; 2. *Graduated School of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*)

Abstract: Numerous debris flows were triggered by the Wenchuan earthquake, bringing a large number of casualties and property loss to the mountain area. For better understanding and prediction of debris flow, particle size analyses were carried out on field samples of debris flow deposits. Fractal structures of debris flow deposits were also analyzed based on fractal theory in the area. The fractal dimension ranged from 2 to 3, with an average of 2.49 and standard deviation of 0.19, showing a low dispersion degree of fractal dimension. The influences of lithology, total volume of loose materials, and slopes on the particle composition of debris flow deposits were studied. The results show that the deposits of siltstone have the minimum fractal dimension value, followed by those of sandstone and marl. In contrast, the deposits of quartz diorite and limestone have the highest and the second highest fractal dimension value. The fractal dimension values of the deposits increases with the total volume of loose materials, as well as the gully slope. The fractal characteristics of the deposit indicate the risk of debris flow, providing evidences for characterization and prediction of debris flow activities.

Keywords: debris flow deposit; fractal dimension; lithology; loose material

地震后诱发了大量的崩塌、滑坡和泥石流,泥石流特征主要表现为数量增多,规模增大、频度增加、起动临界雨量降低,多为黏性泥石流[1]。地震后沟道性质发生了变化,原来的非泥石流沟变成了泥石流沟,沟道松散物质量非常丰富,泥石流容重也比地震前高,危险区大为增加。纵所周知,泥石流的发生受到地形、地貌、地质构造、岩性等因素的影响,泥石流堆积物也受到物源区岩性的控制,不同的岩性具有不同的成分和结构,抗风化的能力存在较大差异,从而影响泥石流堆积物的颗粒组成。松散物质量的丰富程度也对泥石流堆积物的颗粒组成有一定的影响,泥石流沟内的松散物质量越丰富,形成的泥石流规模越大,活动时冲刷与携带沟道两旁松散物质能力也越强,因而影响着泥石流堆积物的规模与组成。除此之

收稿日期: 2011-05-18 修回日期: 2011-08-01
资助项目: 国家重点基础科学(973)研究发展计划项目"中国西部特大山洪泥石流灾害形成机理与风险分析"(2011CB409902)
作者简介: 杨伟(1986—),男(汉族),江西省永丰县人,硕士研究生,研究方向为地质灾害与工程地质。E-mail: wendyyangwei@163.com。
通信作者: 崔鹏(1957—),男(汉族),陕西省西安市人,研究员,博士生导师,研究方向为自然地理、山地灾害和水土保持。E-mail: pengcui@imde.ac.cn。

外,沟道坡降影响着泥石流物质的输送与运移,进而影响堆积物的颗粒组成。本研究基于分形理论,对岩性、松散物质量及沟道坡降对泥石流堆积物颗粒组成的影响进行了分析。

1　分维值的计算

美国数学家 Mandelbrot 于 1977 年首次提出分形理论,主要用来研究自然界中没有特征长度但又具有自相似性自然现象。据分形理论概念可知,在分形集中,若某一集合关于标度 r 具有自相似性,且在标度 r 度量下的个数为 N,则有:

$$N = \left(\frac{1}{r}\right)^{D} = r^{-D} \tag{1}$$

式中: D——分维值。

对于泥石流堆积物而言,是以统计分布来建立的分形,形成的幂指数就是分维,可以用粒度分析法来计算分维值。可以利用泥石流堆积物的粒度分析结果,做出颗粒累积百分含量同粒径的双对数坐标图,找出图中近似的直线段,对直线段的斜率 b 进行拟合,然后运用公式(2)来计算粒度分维值[2]。

$$D = 3 - b \tag{2}$$

2　泥石流堆积物的分形结构特征

根据泥石流沟堆积物的粒度分析资料,利用上述方法计算了汶川地震灾区 32 条泥石流堆积物的分维值(表 1)。相关系数均在 0.98 以上,具有极显著的相关关系,说明泥石流堆积物的颗粒组成具有比较好的分形特点。

表 1　泥石流堆积物粒度分维值

地 点	不同粒径范围分维值								相关系数 r	堆积物分维值 D
	>60 mm	60 ~ 20 mm	20 ~ 10 mm	10 ~ 5 mm	5 ~ 2 mm	2 ~ 0.5 mm	0.5 ~ 0.25 mm	<0.25 mm		
大龙潭	8.5	15.9	13.1	16.5	21.3	14.6	5.0	5.2	1.000	2.344
青杠沟	6.5	38.4	16.1	9.9	7.7	7.1	4.8	9.5	0.985	2.607
回龙沟	11.8	36.1	9.3	6.8	9.5	11.2	7.2	8.1	0.992	2.652
汶川—油桌坪沟	5.0	24.4	8.9	11.2	16.0	13.2	7.1	14.3	0.998	2.639
渔子溪—海子沟	7.2	30.9	10.2	6.7	8.4	10.2	2.8	23.4	0.999	2.773
龙池水井沟	13.6	19.4	16.3	20.8	14.2	6.4	2.9	6.4	1.000	2.275
双岩窝沟	0	15.3	5.8	8.8	20.4	21.5	7.6	20.7	0.999	2.593
干溪沟	0	50.1	19.2	12.4	9.0	4.7	2.3	2.2	0.998	2.298
梯子岩泥石流	0	33.7	28.4	16.2	9.8	5.3	2.2	4.4	0.997	2.248
清岩沟	0	36.8	21.3	17.9	11.1	5.4	2.5	5.0	0.998	2.297
小牛圈沟	7.2	27.1	7.4	6.9	11.3	10.7	5.7	23.8	0.997	2.767
秀茶路桥涵	0	18.8	41.0	23.6	12.9	1.8	0.4	1.5	0.996	2.554
老屋基泥石流	12.3	30.5	15.8	16.6	14.5	5.8	1.4	3.0	0.997	2.583
张家湾泥石流	0	47.5	19.8	11.0	8.0	4.9	2.1	6.6	0.999	2.380
石亭江堵江泥石流	5.2	39.7	16.2	11.8	11.0	6.6	2.5	7.0	0.999	2.480
花石沟右支沟	0	38.5	22.2	11.3	11.1	8.2	3.7	4.9	0.999	2.491
渔子溪瓦可沟	4.0	31.1	10.6	7.0	12.3	12.8	3.2	19.0	1.000	2.671
茶坪路坡面泥石流	0	33.2	24.0	16.3	13.3	6.7	2.4	4.1	1.000	2.333
渔子溪肖家沟	0	33.4	14.9	9.6	10.1	9.9	3.7	18.5	0.994	2.687
龙池纸场沟	4.4	23.3	11.0	9.4	13.5	15.3	4.2	18.8	1.000	2.754
龙池干沟	4.9	39.7	19.8	10.1	7.6	4.6	2.7	10.6	1.000	2.654
天池煤矿	0	39.6	22.8	15.2	10.8	5.4	2.0	4.3	1.000	2.282
老鹰岩泥石流	0	39.5	27.8	12.7	8.3	5.2	2.3	4.1	0.992	2.513
干溪沟支沟	0	35.7	28.2	19.0	9.8	3.6	1.4	2.3	0.998	2.044
石中滩	0	21.8	18.2	20.7	18.1	8.5	3.3	9.4	0.999	2.353
肖家口沟	0	33.6	22.5	16.2	10.7	6.9	3.6	6.6	0.996	2.417
耿达红家沟	3.1	25.5	17.1	11.6	12.1	9.7	4.9	16.0	1.000	2.634
九环线泥石流	0	26.6	17.6	15.3	17.9	12.3	5.1	5.1	0.998	2.425
上广东坝沟道泥石流(左岸)	6.2	36.0	25.4	15.5	9.4	3.2	1.0	3.4	0.999	2.116
渔子溪银厂沟	13.7	37.0	12.8	7.6	7.7	7.6	4.9	8.8	0.997	2.657
谢家店子	25.6	20.8	9.3	7.7	11.5	10.4	5.0	9.8	1.000	2.606
汶川县大河沟	0	11.7	20.6	21.0	18.6	9.3	3.9	14.9	1.000	2.453

从表1中可以看出，泥石流堆积物的粒度分维值均在2～3之间波动，最大值为2.773，最小值为2.044，平均值为2.490，标准差为0.19，堆积物分维值的离散度较低，这说明泥石流流体物质组成具有一定的相似性。尽管如此，由于受泥石流物源性质、物质丰富程度、搬运的动力条件的影响，泥石流堆积物粒度的分形特征仍然表现出一定的差异性，本研究初步分析了岩性、物质丰富程度和底床比降对粒度分维值的影响。

3 岩性、松散物质量及沟道坡降对地震灾区泥石流形成的影响

3.1 岩 性

泥石流沟物源区岩性是地震后影响泥石流发育的重要因素之一，不同的岩性具有不同的成分、结构和构造，抗风化能力各异，分化产物的颗粒组成不同，从而在泥石流物源区产生不同性质和丰富程度的松散物质。另外，不同的岩性对地震的响应也是不一样的，如汶川地震灾区的彭州龙门山镇，原本是一个风景区，岩性主要为花岗岩，质地比较坚硬，抗风化能力强，一般在这种岩性条件下不易形成泥石流，但由于花岗岩对地震响应比较强烈，地震触发了大量崩塌滑坡，为泥石流形成提供了大量的松散物质，在强降雨激发下频繁发生泥石流。

3.2 松散物质量

汶川地震诱发了大量的崩塌、滑坡，给流域内泥石流的形成提供了大量的松散物质，另外，地震使斜坡的不稳定性大为增大，为泥石流暴发提供了更多松散物质[5]。因此，泥石流沟将在今后较长一段时间内处于活跃期，泥石流暴发规模和频率将显著增加[4]，泥石流沟谷内松散物质丰富已成为震后泥石流沟的一个显著特征。沟道松散物质量与离发震断裂带的距离有关，距发震断裂带越近，地震烈度值越大，岩土体受到地震的破坏程度越大，能够给泥石流发育提供的松散物质越多，在强降雨及有利的地形条件下，极易引发泥石流灾害。与地震以前比较，汶川地震以后松散固体物质易于侵蚀形成或加入到泥石流中，泥石流的携带能力增强，发生频率和规模显著增加，泥石流体颗粒组成较宽，流体性质以黏性为主。

3.3 沟道坡降

沟道坡降为泥石流的起动和运动提供能量条件。庄建琦[5]等设计了25组试验对沟道松散物质起动形成泥石流进行了研究，得出了在不同坡度情况下的泥石流形成模式和机理。在具备一定的松散物质及降雨条件下，不同的沟道坡降，泥石流起动的难易程度不同，沟道坡降越大，松散物质在降雨条件下越容易起动，更有利于泥石流的形成，泥石流的冲刷能力也很强。此外，沟道坡降还与泥石流堆积形态有一定的相关性，任凯珍[6]通过小型水槽实验，得出泥石流堆积长度、宽度、面积均与沟道坡降成正相关性，厚度与沟道坡降也有一定的正相关性。因而，沟道比降对泥石流堆积物中的颗粒组成具有一定的影响。

4 泥石流物源区岩性、松散物质量和沟道坡降对泥石流堆积物粒度分维值的影响

4.1 泥石流物源区岩性对泥石流堆积物粒度分维值的影响

粒度分布是泥石流堆积物颗粒的重要特征，粒度分布特征能够反映泥石流形成区岩性的特性。考察区泥石流沟出露的岩石主要有碎屑岩、砂岩、粉砂岩、砾岩、白云岩、灰岩、泥灰岩、硅质岩等。分析结果表明，粉砂岩的分维值最小，其次是砂岩和泥灰岩；石英闪长岩的分维值最大，其次为石灰岩。泥石流沟物源区岩性分维值的差异是与岩石的坚硬程度有一定的关系，石英闪长岩、石灰岩、斜长角闪岩及硅质岩属于坚硬岩类，砂岩、板岩、碎屑岩等属于半坚硬岩类，而岩石的坚硬程度又与岩石的矿物成分、结构等密切相关。粉砂岩主要由长石、石英、黏土矿物构成，为碎屑和粉砂质结构，结构较疏松，强度和稳定性不高，抗风化能力较差，风化后形成的细颗粒较多，因而分维值较小。而石英闪长岩主要由石英、斜长石，角闪石，黑云母，辉石等矿物构成，为全晶质等粒结构，块状构造，结构致密，强度高，抗风化能力较强，所含石英具有脆性，容易碎裂成块状，因而风化的产物粗颗粒含量很多，颗粒级配宽，分维值较大。

4.2 源区松散物质量对泥石流堆积物粒度分维值的影响

汶川地震后，流域内松散物质主要来源于崩塌和滑坡。根据崩塌和滑坡的多少来粗略地反映流域内松散物质的丰富程度，通过对遥感影像上泥石流流域内崩塌滑坡的解译，得到了崩塌、滑坡的面积。图1为泥石流沟流域内崩塌滑坡的面积与泥石流堆积物分维值的关系图。

从图1中可以看出，地震后泥石流堆积物粒度分维值的变化趋势与泥石流流域内崩塌、滑坡的面积变化趋势相一致，泥石流流域内崩塌滑坡面积增大时，堆积物的粒度分维值也增大。在研究区域内，泥石流流域内崩塌滑坡面积在1 km^2 以内，平均值为0.353 km^2，泥石流堆积物粒度分维值的平均值为2.43；而崩塌滑

坡面积大于 1 km^2 且平均值为 1.522 km^2 时,粒度分维值的平均值为 2.67; 崩塌滑坡面积为 2.037 km^2 时,粒度分维值达到较大值 2.767。因此,地震后松散物质量的大小对泥石流堆积物颗粒组成具有较大的影响,粒度分维值随着松散物质量的增大而增大。

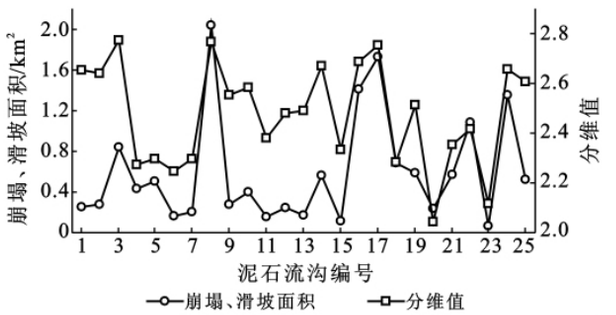


图 1　泥石流堆积物分维值与崩塌、滑坡面积的关系

4.3　沟道坡降对堆积物粒度分维值的影响

从堆积物的粒度组成也能间接获得一些沟道坡降的大小粗略信息。沟道坡降与泥石流堆积物粒度分维值的关系如图 2 所示。

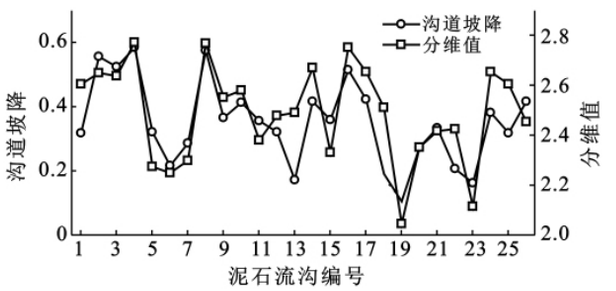


图 2　沟道坡降对泥石流堆积物分维值的影响

从图 2 可见,大部分泥石流沟堆积物分维值的变化趋势与沟道坡降相一致,粒度分维值随着坡降的增大而增大; 只有极个别泥石流沟堆积物的粒度分维变化趋势与沟道坡降相反,这是由于粒度分维值受多因素的影响所致。为了更进一步说明二者之间的变化关系,将相同岩性归为一类,提取松散物质量丰富程度相近的一组泥石流沟来分析沟道坡降对泥石流堆积物粒度分维的影响。回龙沟、石亭江堵江泥石流沟和干溪沟支沟物源区岩性均主要以碎屑岩、碳酸盐岩为主,且崩塌滑坡面积都比较接近,均约为 0.24 km^2,分析结果表明,在其它影响因素相同的情况下,泥石流沟堆积物分维值随着沟道坡降的增大而增大。这是由于沟道坡降越大,泥石流对沟底及两侧的冲刷能力更强,能够冲刷更大的粗颗粒,因而堆积物中粗颗粒成分居多,分维值较大。

5　结 论

(1) 汶川地震灾区泥石流堆积物具有分形结构特征,其粒度分维值介于 2 ~ 3 之间,平均值为 2.49,标准差为 0.19,堆积物分维值的离散度较低。

(2) 泥石流堆积物的粒度组成受到多因素的影响,如地层岩性、松散物质量、沟道坡降。

(3) 岩性对泥石流堆积物粒度分维具有一定的控制作用,泥石流沟物源区不同的岩性下形成的泥石流堆积物具有不同的分维值,其差异与岩石的矿物成分、结构等因素有关,考察区泥石流沟物源区岩性为粉砂岩时泥石流堆积物的分维值最小,其次是砂岩和泥灰岩; 石英闪长岩的分维值最大,其次为石灰岩。

(4) 分维值的变化趋势与松散物质量的变化趋势成正相关关系,分维值随着松散物质量的增大而增大,松散物质量的减小而减小。

(5) 泥石流堆积物分维受到沟道坡降的影响,在其它影响因素相同的情况下,堆积物分维值随着沟道坡降的增大而增大。

(6) 利用分形理论可以从一个侧面研究泥石流堆积物的粒度组成特征。影响泥石流堆积物颗粒组成的因素很多,除了以上分析的岩性、松散物质量和沟道坡降外,泥石流流域内的水源条件、输送方式及搬运距离等特征也影响着堆积物的颗粒组成,今后还需要做进一步的探索。

[参　考　文　献]

[1] 崔鹏,庄建琦,陈兴长,等. 汶川地震区震后泥石流活动特征与防治对策 [J]. 四川大学学报: 工程科学版,2010,42(5):10-19.

[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):24-31.

[3] Cui Peng, Chen Xiaoqing, Zhu Yingyan, et al. The Wenchuan Earthquake (May 12, 2008), Sichuan Province, China, and resulting geohazards [J]. Nat. Hazards, 2011, 56(1):19-36.

[4] 崔鹏,韦方强,何思明,等. "5·12"汶川地震诱发的山地灾害及减灾措施 [J]. 山地学报,2008,26(3):280-282.

[5] 庄建琦,崔鹏,胡凯衡,等. 沟道松散物质起动形成泥石流实验研究 [J]. 四川大学学报: 工程科学版,2010,42(5):230-236.

[6] 任凯珍. 泥石流堆积形态与坡降的相关性分析 [J]. 分析研究,2010,5(2):24-27.