

文章编号: 1009-3087(2013)01-0001-07

## 泥石流颗粒的标度分布

李泳<sup>1,2</sup>, 谢江<sup>1,2,3</sup>, 周小军<sup>1,2</sup>, 郭晓军<sup>1,2,3</sup>

(1. 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. 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 四川成都 610041; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 大多数泥石流由宽粒径颗粒组成, 粒径介于  $10^{-3} \sim 10^2$  mm。通常以个别特殊粒径(如  $D_{10}$ 、 $D_{30}$ 、 $D_{50}$  等)或其组合(如均匀系数、曲率系数等)来刻画颗粒的性质, 但这些都是经验性参数, 没有明确的物理意义, 也不能确定颗粒分曲线的函数形式。选取蒋家沟典型黏性泥石流流体样本和国内各泥石流多发区泥石流堆积土体样本, 通过粒度分析, 运用 Matlab 和函数逼近方法, 发现泥石流颗粒普遍满足一种标度分布:  $P(D) = CD^{-\mu} \exp(-D/D_c)$ , 因而颗粒性质可以用自然参数  $\mu$  和  $D_c$  来刻画。 $\mu$  刻画了土体在自然状态下的孔隙度,  $D_c$  是一个特征粒径, 代表颗粒组成的范围。根据蒋家沟大量泥石流样本发现,  $\mu < 0.10$ , 而对高容重泥石流,  $\mu < 0.05$ 。泥石流容重随  $D_c$  呈幂函数增长,  $D_c$  从而刻画了泥石流的输移能力。由此确立了分布参数与泥石流性质的关系, 并将其用于汶川震区泥石流的评估。

**关键词:** 泥石流; 颗粒分曲线; 标度分布; 分布参数; 泥石流评估

中图分类号: TV14

文献标志码: A

## A Scaling Distribution for Grain Composition of Debris Flow

LI Yong<sup>1,2</sup>, XIE Jiang<sup>1,2,3</sup>, ZHOU Xiao-jun<sup>1,2</sup>, GUO Xiao-jun<sup>1,2,3</sup>

(1. Key Lab. of Mountain Hazards and Surface Processes, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China; 2. Inst. of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China; 3. Univ. of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Based on soil samples from living debris flows in Jiangjia Gully and deposits of debris flows in various valleys and regions in China, a general form of grain size distribution  $P(D) = CD^{-\mu} \exp(-D/D_c)$ , which fitted the soils of debris flows perfectly and universally was proposed. The values of  $\mu$  and  $D_c$  were used to describe the nature of grain composition, where the power exponent represents some characteristic porosity of the soil in natural condition, and  $D_c$  defines a characteristic scale for the range of grains. According to soil samples of debris flow from various sources,  $\mu$  is less than 0.1, and for high density debris flow,  $\mu$  is less than 0.05. The bulk density of debris flow increases with  $D_c$  in a power law. So the parameter  $D_c$  can depict the power of the transportation of debris flow. Finally, the parameters were used to evaluate the debris flows occurred in the Wenchuan earthquake area, which agrees well with the observations in Jiangjia Gully.

**Key words:** debris flow; grain distribution curve; scaling distribution; distribution parameters; debris flow evaluation

泥石流以宽粒径分布为特征, 其发生、结构和流态的变化, 都取决于颗粒的组织, 在很大程度上具有颗粒流的特征<sup>[1]</sup>。目前的颗粒流理论大多是以均匀粒组为研究对象, 没有考虑颗粒级配。如基于 Bagnold 颗粒流实验的泥石流膨胀流模型, 其颗粒是均匀分布的, 而且不允许孔隙水压力发生变化, 这与实际的泥石流情况有很大差别<sup>[2-4]</sup>。

泥石流是主动的流域物质输移形式, 土体中颗粒的分布决定着泥石流的活动情况。泥石流颗粒组成揭示了泥石流堆积物的分散度, 是泥石流结构的一个重要特征, 也是决定泥石流堆积物工程地质性质的一个重要指标; 同时, 反映了泥石流的形成机制与动力学、运动学特征。因此, 对泥石流堆积物粒度构成的研究一直是泥石流研究的重要内容之一<sup>[5]</sup>。现今对泥石流颗粒分布的描述有许多不同的方法。土力学中人们通过绘制粒径级配曲线来描述颗粒大小的分布情况, 并引入一些特殊粒径(如  $D_{10}$ 、 $D_{30}$ 、 $D_{60}$ )和组合(如不均匀系数  $C_u$  和曲率系数  $C_c$  等)来反映颗粒分布的整体情况, 但这些都带有强烈的经验性, 不具有理论支持。针对颗粒的  $\varphi$  值分级法, 也是基于一些特殊粒径来进行

收稿日期: 2012-11-23

基金项目: 中国科学院重点部署资助项目(KZZD-EW-05-01);  
国家重点基础研究发展规划(2011CB409902); 国家  
科技支撑计划资助项目(2012BAK10B04)

作者简介: 李泳(1967—), 男, 研究员, 研究方向: 自然地理和  
自然灾害。E-mail: ylie@imde.ac.cn

计算的,这些特殊粒径的选取同样是靠经验进行的<sup>[4-6]</sup>。在流变学里的连续性模型中,经常需要考虑黏土颗粒的分布情况,但由于黏土颗粒过于细小而很难对颗粒的级配情况进行描述。能表征粒度特征的参数很多,有平均粒径、标准偏差、偏度和峰度等<sup>[7]</sup>,但这些参数也是通过读取累积曲线上的一些特殊数据点来进行描述和分析的,也并不能真正反映泥石流颗粒的变化趋势和整体性质,同样也不具有一般代表性。因而很多学者在颗粒分布的拟合上做了很多工作,期望找到一种能对泥石流颗粒进行完整性描述的数学模型,如用差分判别法提出 S 型级配曲线的函数关系式<sup>[8]</sup>,用双曲正切函数描述泥沙级配曲线<sup>[9-10]</sup>,虽然有一定的借鉴意义,但无法真正运用到泥石流中。另外,泥石流颗粒也表现出一定的分形特征,但分形往往只在局部粒径范围存在,因而也不能体现泥石流颗粒的整体

性<sup>[11-12]</sup>。

作者提出一种普适性的泥石流颗粒分布曲线,并讨论其分布参数与泥石流性质的关系。

## 1 泥石流颗粒的标度分布

### 1.1 泥石流取样与分析

泥石流样本系利用中国科学院蒋家沟泥石流观测研究站的缆车采样器直接采自蒋家沟泥石流流体,测定密度之后,将样本晾干,然后按照土力学颗粒规范进行粒度分析。考虑到泥石流的宽级配特征,粒径范围从 0.001 到 80 mm,远大于通常的土力学粒径范围(2 mm 以下)。对大于 0.075 mm 的粗颗粒进行筛分,细颗粒则用传统沉淀法测定。对有些土样,还用了 MS2000 1 激光粒度仪。部分颗粒数据见表 1,其中的含量为质量百分比。

表 1 蒋家沟泥石流流体的颗粒组成

Tab. 1 Grain composition of debris flow fluid in Jiangjia Gully

编号	时间	容重/ (g·cm <sup>-3</sup> )	不同粒径(mm)泥石流颗粒质量百分比/%															
			80	40	20	10	7	5	3	2	1	0.5	0.25	0.1	0.05	0.01	0.005	0.001
1	1974-06-29	1.567	—	—	—	3.5	3.88	4.28	5.61	28.47	46.33	52.45	59.12	66.4	70	85	94.3	97.1
2	1974-06-29	1.83	—	2.74	5.72	9.9	11.71	17.45	29.04	48.54	50.16	53.54	58.07	63.94	68	84	97.2	97.2
3	1974-06-29	1.841	—	8.54	10.44	15.87	21.05	27.29	41.05	47.22	54.11	60.8	65.29	68.16	71.2	85	95	97.3
4	1974-06-30	2.168	1.96	6.36	20.37	39.44	46.53	53.29	61.44	65.6	70.38	72.5	74.9	77.33	79	86	95	98.2
5	1974-07-16	1.995	—	1.03	8.79	23.44	31.87	38.92	50.3	57.08	61.6	67.1	70.56	74.16	76.4	84.5	96.5	97.9
6	1974-07-16	2.077	—	5.31	18.67	36.64	44.7	51.06	61.22	66.25	67.86	69.67	74.94	77.31	79.4	94.2	97.4	98.14
7	1974-07-16	2.204	—	11.49	29.33	43.01	50.56	59.52	64.59	69.2	72.38	76.35	78.26	80.58	83	94	97.2	98.4
8	1974-07-16	2.21	—	19.4	32.95	47.92	56.78	60.75	68.47	72.39	75.87	78.59	80.65	83.22	84.8	93.8	97.8	98.6
9	1974-07-16	2.25	8.46	16.99	34.95	51.43	58.87	63.56	71.06	74.38	77.89	80.65	82.4	84.43	86	94.2	98	98.7
10	1974-07-16	2.164	3.26	2.09	11.94	30.8	39.91	46.25	56.24	60.84	64.79	68.83	76.5	75.27	77.2	91	96.8	98
11	1974-07-16	2.251	—	8.7	17.16	37.2	45.91	54.26	63.73	70.05	71.58	74.65	77.02	79.41	81.6	92	97.5	98.4
12	1974-07-16	2.074	1.22	2.18	15.26	34.76	42.86	48.39	57.27	62.44	66.02	70.35	72.97	76.08	78.4	92	97.2	98.2
13	1974-07-16	2.09	—	2.07	10.76	27.73	35.85	43.05	59.41	59.15	62.81	68.08	70.88	75.18	78	91.8	96.8	98.3

### 1.2 泥石流颗粒的指数分布

泥石流颗粒普遍呈现出多峰分布,图 1 为云南蒋家沟几个不同密度的泥石流样本的颗粒分布曲线(数据见表 1),尽管大致可以看到粗颗粒随泥石流密度的增大而增多,但不同粒径的峰值是很随机的,很难用某个简单的数学函数来进行描述。

而其累积曲线则体现了较好的一致性,可以粗略地用指数函数表示(图 2):

$$P(D) = C \exp(-kD) \quad (1)$$

式中,  $k$  为一个表示颗粒性质的系数,  $D$  为颗粒直径,  $P(D)$  为大于粒径  $D$  的颗粒百分比。

引入特征粒径  $D_c = 1/k$ , 并以此特征粒径为单位重新标度, 则所有的累积曲线都归结到同一条指

数分布曲线之上(图 3)。

同时发现,特征粒径  $D_c$  与密度  $\rho$  满足幂函数的对应关系:

$$\rho \sim k^{-n} \quad \text{或} \quad \rho \sim D_c^n \quad (2)$$

这也可以说明  $D_c$  具有与密度  $\rho$  相同的描述泥石流性质的作用,也是一个具有普适性的参数,能够从整体上反映泥石流颗粒的性质。但应当注意密度只有平均的意义,它是 1 个加权平均量,不能反映不同颗粒组分的区别,而  $D_c$  却具有更强大的描述作用。

尽管上述分布对高密度泥石流有很好的拟合程度,但对低密度泥石流颗粒的描述却还不够准确,尤其很难准确刻画细粒土的整体性质,所以这种分布还不具有一般的代表性,需要进行更深入的讨论。

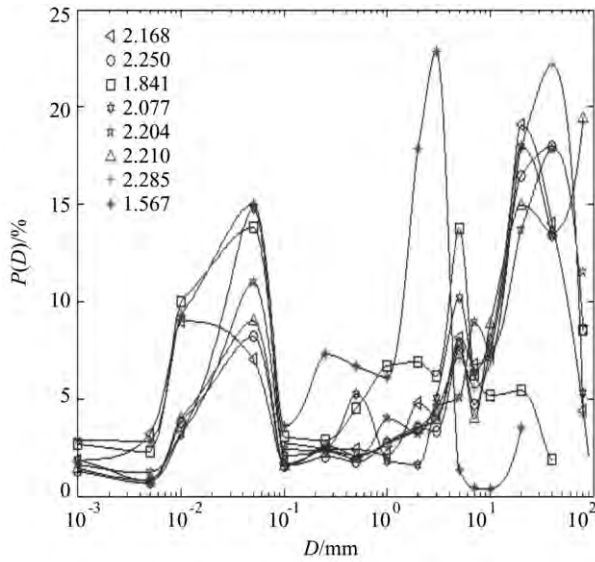


图 1 泥石流颗粒的多峰分布

Fig. 1 Grain size distribution of debris flows

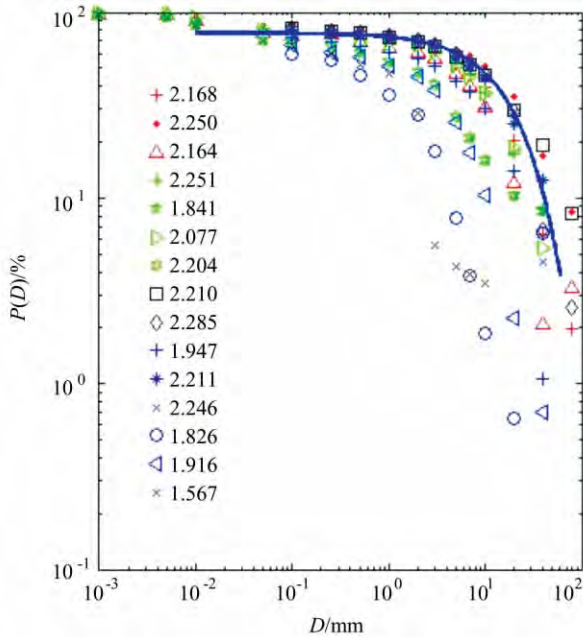


图 2 泥石流颗粒的指数分布

Fig. 2 Exponential distribution of grain size for debris flows

1.3 泥石流颗粒的标度分布

颗粒的分形特征通常表现在细颗粒区间<sup>[11]</sup>, 意味着幂函数可以很好描述细颗粒的分布。因此考虑同时用幂函数和指数函数对颗粒粒径分布(GSD) 进行描述, 假定:

$$P(D) = CD^{-\mu} \exp(-D/D_c) \quad (3)$$

式中, 幂指数  $\mu$  相当于颗粒分形指数, 与土体结构(特别是孔隙度) 有关。通过对云南蒋家沟泥石流样本的分析, 发现这种分布对各种密度的土颗粒都具有很高的符合程度(表 2、图 4)。

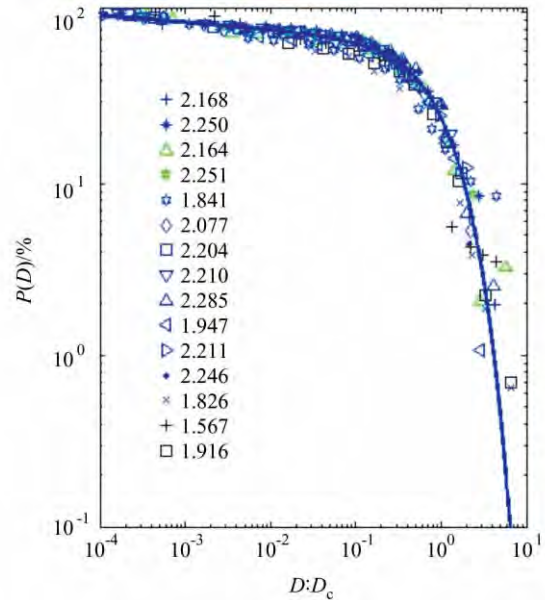


图 3 泥石流颗粒指数分布变形

Fig. 3 Rescaled exponential distribution of grain size of debris flows

表 2 泥石流颗粒分曲线拟合参数  
Tab. 2 GSD parameters of debris flows

编号	密度 $\rho / (g \cdot cm^3)$	系数 $C$	幂指数 $\mu$	特征粒径 $D_c / mm$	$R^2$
1	2.168	72.89	0.041 76	18.87	0.995 4
2	2.250	80.07	0.032 56	28.69	0.996 1
3	2.164	70.65	0.050 14	13.99	0.993 3
4	2.074	70.77	0.050 58	16.06	0.994 2
5	2.251	76.08	0.038 50	16.70	0.990 8
6	1.830	56.29	0.085 02	6.08	0.979 3
7	1.841	59.83	0.075 04	9.06	0.985 7
8	1.995	67.41	0.055 63	11.16	0.994 5
9	2.077	72.39	0.047 64	17.72	0.990 1
10	2.204	75.76	0.040 85	23.36	0.994 5
11	2.210	77.80	0.037 30	28.47	0.994 3
12	2.090	69.39	0.053 77	13.11	0.989 7
13	2.210	74.41	0.050 99	30.42	0.991 7
14	2.267	77.15	0.037 36	29.68	0.989 6
15	2.276	77.47	0.026 67	25.01	0.996 6
16	2.285	78.62	0.013 89	19.70	0.998 1
17	2.292	82.71	0.016 15	29.22	0.999 4
18	1.947	66.29	0.042 91	13.88	0.998 6
19	2.211	76.68	0.023 81	20.34	0.997 6
20	2.204	71.84	0.041 74	22.40	0.977 8
21	2.246	77.60	0.010 12	18.67	0.994 9
22	1.914	61.28	0.060 68	5.88	0.992 7
23	1.988	60.22	0.093 86	13.98	0.993 7
24	1.826	52.35	0.074 46	3.02	0.987 9
25	1.797	49.88	0.063 73	3.73	0.997 4
26	1.916	61.48	0.034 19	6.12	0.998 1
27	2.069	72.16	0.021 83	14.83	0.995 4
28	1.701	43.34	0.127 30	4.91	0.997 9
29	1.701	39.93	0.119 60	2.67	0.997 8
30	1.567	61.62	0.069 14	2.25	0.984 4

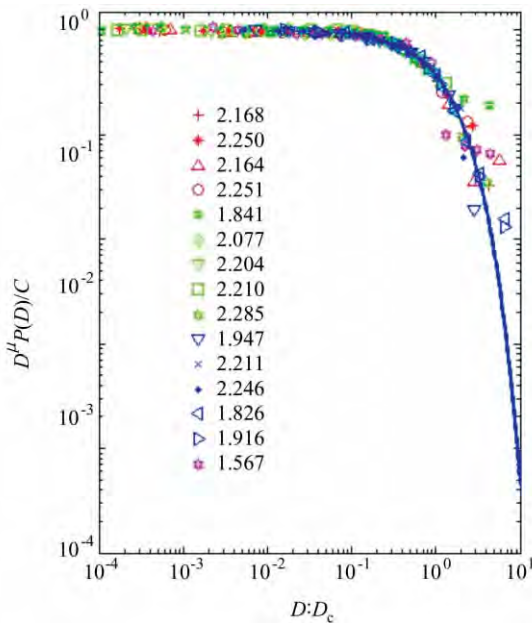


图 4 泥石流颗粒的标度分布

Fig. 4 Rescaled GSD of debris flows

同时,密度  $\rho$  在与  $D_c$  满足如前述所示的幂函数关系外,与幂系数  $\mu$  同样满足幂函数的对应关系(图 5、6),揭示出幂指数  $\mu$  也是一个能反映泥石流颗粒整体性特征的指标,同样具有一定的普适性。而且,样本分析发现,泥石流大都发生于  $\mu < 0.1$  的情况下,而对于高容重泥石流  $\mu < 0.05$ ,所以可将 0.1 作为泥石流发生的阈值。

这样,通过对云南蒋家沟的颗粒数据进行拟合并对它们标度分布的各参数进行对比分析,将各种密度泥石流对应的参数范围进行了划定(表 3),如此就能够通过对颗粒标度分布情况的研究而对已经发生或者将要发生的泥石流的密度情况进行一个初步的判定。

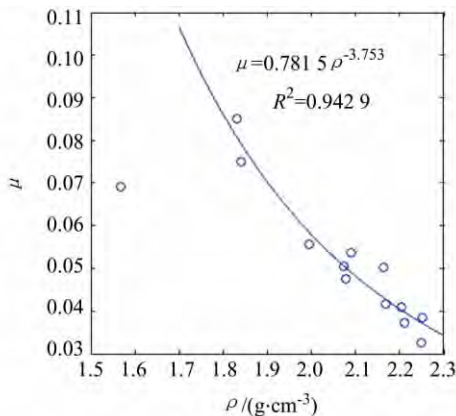


图 5 密度与幂指数关系

Fig. 5 Relationship between density and GSD parameter

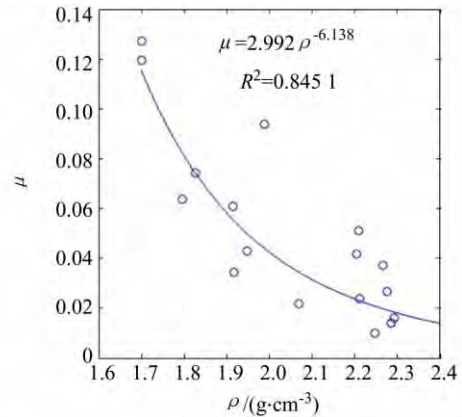


图 6 密度与幂指数关系

Fig. 6 Relationship between density and GSD parameter

表 3 泥石流性质与颗粒参数的关系

Tab. 3 Debris flow properties and GSD

流体	密度 / ( $g \cdot cm^{-3}$ )	$C$	$\mu$	$D_c/mm$
高密度水流	1.2 ~ 1.5	10 ~ 20	0.20 ~ 0.30	< 2
低密度泥石流	1.6 ~ 1.9	30 ~ 60	0.05 ~ 0.10	2 ~ 15
高密度泥石流	> 2.0	60 ~ 80	< 0.05	> 15

#### 1.4 标度分布的普适性

为了检验标度分布的普适性,考察了国内不同地区不同流域的大量泥石流(堆积)的土体(泥沙)样本,发现了同样的分布形式,只是分布参数变化。表 4 为 2010 年舟曲特大泥石流和相关土体的标度分布参数,表 5 为全国其它地区的泥石流颗粒的标度分布参数。这就证明标度分布式(3)不但具有极高的拟合度,也有很好的普适性,能满足不同区域不同背景和不同性质的泥石流颗粒分布。

#### 1.5 颗粒系数与标度分布参数比较

标度分布以 2 个参数 ( $\mu, D_c$ ) 为特征(前面的系数  $C$  可归结为一个等效的粒径) 2 个参数都取决于样本的颗粒曲线,因而具有整体的意义。相对说来,以前描述颗粒的参数,都是经验性和局域性的。现在比较 ( $\mu, D_c$ ) 与常用的不均匀系数  $C_u$  和曲率系数  $C_c$ (表 6)。系数之间没有发现特定的函数关系,虽然曲率系数  $C_c$  与  $\mu$  有较清楚的拟合关系(图 7),但应当注意曲率系数  $C_c$  只是用于描述颗粒级配曲线斜率的连续情况和细颗粒含量多少的情况,并不具备单独描述颗粒性质的能力。同时,从表 6 可见不均匀系数与曲率系数都具有很大的变化范围,说明 2 个系数对泥石流颗粒都不敏感。岩土工程中,通常把

$C_u \geq 5$  同时  $C_c = 1 \sim 3$  的土颗粒定义为级配良好, 这个标准对泥石流颗粒来说太笼统了。几乎所有泥石流都满足这个标准, 但泥石流本身的变化确实多样。例如, 蒋家沟典型黏性泥石流的密度变化范围为  $1.9 \sim 2.2 \text{ g/cm}^3$ , 幂指数  $\mu$  的值约为 0.05, 这是  $C_u$  与  $C_c$  值不能区分的。其中的主要原因是, 泥石流颗粒的粒径范围远大于岩土工程中测试的“土体”粒径范围。这也说明, 借用  $C_u$  与  $C_c$  等岩土工程的参数, 不一定能很好描述泥石流颗粒。

表 4 舟曲泥石流颗粒的标度分布

Tab. 4 GSD for debris flows in Zhouqu

样品类型	系数 $C$	幂指数 $\mu$	特征粒径 $D_c / \text{mm}$	$R^2$
主沟	92.83	0.022 09	26.12	0.999 2
泥石流	90.93	0.028 93	13.72	0.997 7
罗 坡积物	90.32	0.040 23	12.68	0.999 4
家 右支沟坡积物	90.44	0.031 64	13.75	0.997 3
峪 右支沟坡积物	88.68	0.049 45	23.28	0.989 7
泥石流	90.94	0.046 97	9.77	0.995 9
泥石流	90.58	0.009 5	13.27	0.991 6
稀性泥石流堆积物	87.42	0.047 96	26.89	0.998 7
三 稀性泥石流	96.67	0.005 7	27.61	0.982 5
眼 泥石流物源	85.27	0.061 25	36.11	0.982 1
峪 泥石流物源	85.89	0.052 12	26.21	0.999 2
泥石流物源	93.55	0.013 98	23.83	0.993 6
稀性泥石流	84.96	0.040 86	29.75	0.992 9

表 5 各地泥石流颗粒的标度分布

Tab. 5 GSD for debris flows in various regions

流域	系数 $C$	幂函数 $\mu$	特征粒径 $D_c / \text{mm}$	$R^2$
北京柯太沟	86.69	0.023 86	226.30	0.992 1
西藏鲁郎河	77.24	0.045 87	25.64	0.994 1
甘肃火烧沟	62.57	0.114 8	20.14	0.986 8
西藏米堆沟	84.43	0.029 02	25.13	0.998 5
云南黑水沟	95.91	0.007 721	5.79	0.998 7
四川石板滩	71.22	0.050 53	25.38	0.995 9

以上分析表明, 泥石流颗粒的标度分布具有普适性, 能很好地刻画泥石流颗粒组成的整体特征, 其参数反映了泥石流体的基本性质。不同土体的分布差异只是表现为参数  $\mu$  和  $D_c$  的不同, 而这恰好说明不同的泥石流可以通过这 2 个参数来进行刻画和区分。下面用  $\mu$  和  $D_c$  来分析不同区域的泥石流。

表 6 泥石流标度参数与颗分系数比较

Tab. 6 Comparison between GSD parameters and granular coefficients

密度 $\rho$	不均匀系数 $C_u$	曲率系数 $C_c$	幂指数 $\mu$	特征粒径 $D_c / \text{mm}$
1.567	185.24	0.252 4	0.069 1	2.25
1.83	315.50	0.107 5	0.085 0	6.08
1.841	420.35	0.205 7	0.075 0	9.06
2.168	1 255.25	15.346 3	0.041 8	18.88
1.995	624.03	2.275 4	0.055 6	11.16
2.077	409.78	1.255 8	0.047 6	17.72
2.204	497.05	10.208 3	0.040 9	23.36
2.21	568.66	16.564 7	0.037 3	28.47
2.25	555.49	20.870 1	0.032 6	28.69
2.164	540.50	2.372 2	0.050 1	13.99
2.251	510.71	25.220 2	0.038 5	16.70
2.074	507.43	2.281 6	0.050 6	16.06
2.09	384.25	1.213 3	0.053 8	13.11

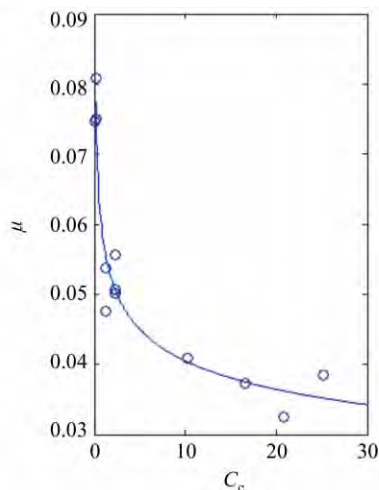


图 7  $C_c$  与  $\mu$  的关系

Fig. 7 Relationship between  $C_c$  and  $\mu$

## 2 应用

根据蒋家沟泥石流的样本和表 3 的概括, 标度分布中, 参数  $\mu$  反映土体的孔隙度, 即土体的松散程度,  $\mu$  值大对应于低密度泥石流,  $\mu$  值小则对应于高密度泥石流。 $D_c$  反映颗粒组成的范围, 值越大, 对应于颗粒变化的范围也越大, 粗颗粒含量越多, 泥石流密度越大, 泥石流的输移能力越强。因此, 在泥石流发生以后, 可以通过对泥石流颗粒的标度分布进行分析, 进而对已经发生的泥石流的密度情况进行评估。

通过对汶川地震区灾后几年的泥石流沟堆积土体样本进行分析(表 7), 发现这些地区样本幂指数  $\mu$  都小



于 0.1 满足蒋家沟的泥石流情形(表 3)。同时,从标度分布参数的关系还可以看出,不同流域的泥石流,其( $\mu, D_c$ )出现聚集现象(图 8),利用标度分布参数与泥石流性质的关系(表 3),可以对这些泥石流性质进行判别,将其划分为高密度泥石流区(A)、中等密度泥石流区(B)和低密度泥石流区(C)。

表 7 汶川震区泥石流颗粒分布和泥石流性质

Tab.7 GSD for debris flows in Wenchuan earthquake area

编号	泥石流沟	位置	C	$\mu$	$D_c /$ mm	泥石流 类型
1	茶坪河源头	安县	79.35	0.05	15.18	B
2	张家湾沟	北川	90.28	0.02	26.41	A
3	芍药沟	绵竹	81.06	0.043	11.83	B
4	七组沟支沟	宁强	93.75	0.011	25.22	A
5	七组沟下游	宁强	86.25	0.029	34.19	A
6	石鸡坪大沟	文县	93.14	0.016	8.16	A
7	银厂沟双 岩窝沟 1#	彭州	73.37	0.07	12.43	C
8	银厂沟双 岩窝沟 2#	彭州	75.48	0.063	8.19	C
9	张家沟	北川	90.63	0.02	34.75	B
10	磨平沟	平武	84.81	0.037	10.62	A
11	文家沟	绵竹	97.19	0.006	19.33	A
12	磨子沟下游	汶川	66.62	0.087	23.56	C
13	磨子沟上游	汶川	86.35	0.03	101.03	A
14	牛圈沟下游	汶川	80.25	0.05	26.44	B
15	牛圈沟上游	汶川	89.71	0.025	24.95	A
16	走马岭沟	绵竹	85.62	0.037	39.08	A

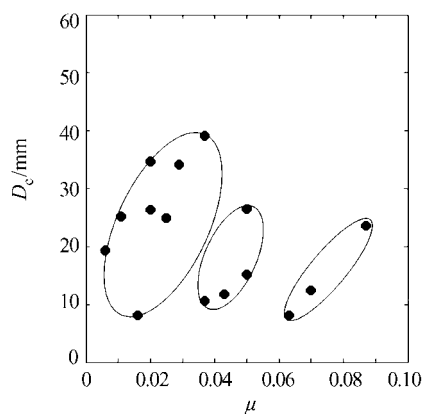


图 8 灾区泥石流颗粒分系数关系

Fig.8 Relationship between the parameters of seismic area

同样的方法,可在对潜在泥石流区的颗粒物质进行调查分析的基础上,通过 $\mu$ 与 $D_c$ 两个参数对可

能发生的泥石流进行预测性评价。同时,由于土颗粒大都满足区域一致的性质,则可通过对各流域颗粒的分析,进而对各流域可能发生的泥石流情况进行评估。

### 3 结论与讨论

#### 泥石流颗粒服从标度分布

$$P(D) = CD^{-\mu} \exp(-D/D_c),$$

这种分布具有一定的普适性,适用于不同地区不同性质的泥石流。幂指数 $\mu$ 与 $D_c$ 都与泥石流密度呈幂函数关系。 $\mu$ 刻画了细颗粒的结构和行为,与土体的孔隙度有关。泥石流的发生一般应满足 $\mu < 0.1$ ,对高容重泥石流, $\mu < 0.05$ ,所以 0.1 可作为泥石流发生的阈值。特征粒径 $D_c$ 反映了颗粒的变化范围,也代表着泥石流的泥沙输移能力。 $D_c$ 值越大,泥石流密度越大。通过对泥石流颗粒标度分布参数的测定,可以对已经发生或将要发生的泥石流进行评估,这已在对 2008 年灾区泥石流的数据分析中得到验证。

尽管上述分布能够很好地对泥石流颗粒进行描述,但是 $\mu$ 和 $D_c$ 与土体动力学特征之间的关系还需进行进一步的研究,同时这 2 个分布参数与土体自身物理性质如孔隙度、含水量、渗透率等的关系也有待于进一步的研究。

#### 参考文献:

- [1] Batrouni G G, Dippel S, Samson L. Stochastic model for the motion of a particle on an inclined rough plane and the onset of viscous friction[J]. Physical Review, 1996, E53(6): 6496-6503.
  - [2] Bagnold R A. Experiments on a gravity-free dispersion of large solid spheres in a Newtonian fluid under shear[J]. Proceedings of the Royal Society: Ser A, 1954, 225(1160): 49-63.
  - [3] Bagnold R A. The flow of cohesionless grains in fluids[J]. Proceedings of the Royal Society: Ser A, 1956, 249(964): 235-297.
  - [4] Huang Rui, Chen Jianping, Li Huizhong, et al. Dynamical properties of debris flow based on  $\psi$ -value of grain gradation[J]. Journal of Jilin University, 2011, 41(1): 182-187.
- [黄芮, 陈剑平, 李会中, 等. 基于 $\psi$ 值粒度成分分析的泥石流动力特性[J]. 吉林大学学报, 2011, 41(1): 182-187.]

- [5] Li Xiubin. Core field in global change: international trend in study of variation of landuse/cover [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 1996, 51(6): 553 – 558. [李秀彬. 全球环境变化研究的核心领域: 土地利用/覆盖变化的国际研究动向 [J]. *地理学报*, 1996, 51(6): 553 – 558. ]
- [6] 谢宇平. 第四纪地质学及地貌学 [M]. 北京: 地质出版社, 1996.
- [7] Li Bai, Gao Jiarong, Hu Fengbing, et al. Granular analysis of debris-flow deposit of Wanghu Gully, Beijing [J]. *Science of Water and Soil Conservation*, 2011, 9(4): 7 – 10. [李柏, 高甲荣, 胡封兵, 等. 北京王虎沟泥石流堆积物粒度参数分析 [J]. *中国水土保持科学*, 2011, 9(4): 7 – 10. ]
- [8] Xie Baoling. Determination of function of experimental curves [J]. *Sedimentary Research*, 1983(2): 64 – 66. [谢葆玲. 实验曲线函数关系式的确定 [J]. *泥沙研究*, 1983(2): 64 – 66. ]
- [9] Xiong Yeping. Sedimentary grain gradation and dividing grain size between bedload and washload [J]. *Sedimentary Research*, 1985(2): 88 – 94. [熊冶平. 泥沙级配曲线函数关系式及床沙质与冲泻质分界粒径的确定 [J]. *泥沙研究*, 1985(2): 88 – 94. ]
- [10] Wang Xiekang, Fang Duo, Cao Shuyou. Fractal dimension of wide-ranged grain composition of sediment and its application [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 1999, 16(5): 9 – 12. [王协康, 方铎, 曹叔尤. 宽级配卵石泥沙颗粒特性的分维值及其应用 [J]. *长江科学院院报*, 1999, 16(5): 9 – 12. ]
- [11] Li Yong, Chen Xiaoqing, Hu Kaiheng, et al. Fractality of grain composition of debris flows [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2005, 15(3): 353 – 359.
- [12] Iverson R M, Reid M E, Iverson N R, et al. Acute sensitivity of landslide rates to initial soil porosity [J]. *Science*, 2000, 290(5491): 513 – 516.

(编辑 陈晓红)