

文章编号: 1008 - 2786 - (2014) 1 - 66 - 08

# 泥石流源区崩滑土体粒度特征及其产沙特性

陈舜<sup>1,2</sup>, 王道杰<sup>1\*</sup>, 梅永丽<sup>3</sup>, 陈晓艳<sup>1,2</sup>, 张淑娟<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室/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;  
2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 昆明市东川区林业局, 云南 昆明 654100)

**摘 要:** 泥石流形成与崩滑土体的存在密切相关, 大量崩滑土体堆积在泥石流源区, 为泥石流形成提供了丰富的固体物质。通过对云南东川蒋家沟泥石流源区崩滑土体的粒度特征分析, 探讨了源区崩滑土体粒度特征与泥石流颗粒组成的关系。结果表明, 源区崩滑土体和泥石流机械组成相似, 粒度分布主要为单峰分布, 说明泥石流粒度组成继承了源区崩滑土体的性质。同时对源区崩滑土体进行室内小型水槽冲刷实验, 研究其产沙特性, 分析表明: 一定流量的径流冲刷作用下, 崩滑土体的产沙过程满足关系式  $y = a + bt^{-1} + ct^{-2}$ , 土体的抗冲系数  $k$  与大于 2 mm 的砾石含量和小于 0.005 mm 的黏粒含量相关, 呈现出分别随着二者含量的增加而先增大后减小的变化趋势。

**关键词:** 泥石流源区; 崩滑土体; 粒度分布; 产沙特性

中图分类号: P642.1, S157.1

文献标志码: A

在重力和外力条件下, 沿着坡面向下运动, 在运动过程中经破碎、掺混等复杂过程的破碎岩土体统称为崩滑土体<sup>[1]</sup>。泥石流源区崩塌、滑坡活动强烈, 大量崩塌体和滑坡体堆积在源区各处, 为泥石流的形成提供了丰富的固体物质, 而大量泥石流是由崩滑土体演化形成的<sup>[2]</sup>。破碎的崩滑土体固结后, 在降雨及地表径流冲刷作用下, 继续被侵蚀, 产生大量泥沙, 进入沟道后形成高含沙水流或者泥石流<sup>[3-4]</sup>, 加大了流域的输沙率, 危害着下游沟道和河流的生态安全。

泥石流源区土体多为宽级配砾石土, 包含了从砾石到黏粒的各粒组成分<sup>[5]</sup>, 不同的粒度组成决定了土体的渗透速率, 从而影响地表的径流过程<sup>[6]</sup>。而这些砾石土主要来源于源区大量的崩塌体和滑坡体<sup>[7]</sup>。土体中砾石的存在改变了土体的结构及物理性质, 影响土壤侵蚀产沙及入渗过程<sup>[8]</sup>。

目前对崩滑土体的研究大多集中在对崩滑土体的运动过程理论上, 对其冲刷产沙过程和产沙机理的研究鲜有报道。崩滑土体的颗粒组成揭示了土体的分散度, 是土体结构的一个重要特征, 反映了崩滑土体的形成机制和运动学特征。崩滑土体的粒度分布特征、径流冲刷产沙特性及二者的关系并不明确。因此, 研究泥石流源区崩滑土体的粒度特征和产沙特性, 可加深对泥石流形成的物源条件的认识, 对流域内滑坡泥石流产沙机理和泥沙调控具有重要指导意义。

本文以云南东川蒋家沟流域泥石流源区崩滑土体为研究对象, 在分析其颗粒粒度分布特征的基础上, 通过对原状崩滑土体进行室内小型水槽冲刷实验, 探讨崩滑土体产沙特性, 分析产沙与土体粒度分布的关系, 以及影响产沙的关键因素, 为指导流域泥沙调控提供科学依据。

收稿日期( Received date ): 2013 - 06 - 09; 改回日期( Accepted ): 2013 - 08 - 03。

基金项目( Foundation item ): 国家科技支撑计划课题( 2012BAC06B02 ), 中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室重点科研项目( Y3K2040040 )。 [This research is supported by National Technology R&D Program ( 0BAC06B02 ) and the Key Research Program of Key Laboratory of Mountain Hazards and Earth Surface Processes, Chinese Academy of Sciences( Y3K2040040 ) . ]

作者简介( Biography ): 陈舜( 1986 - ), 男, 四川安岳人, 硕士研究生, 主要从事滑坡泥石流产沙机理研究。 [Chen Shun, male, born in 1986, Anyue of Sichuan province, master, mainly engaged in sediment yield of landslide and debris flow. ]

\* 通信作者( Corresponding author ): 王道杰( 1968 - ), 男, 四川成都人, 研究员, 主要从事水土保持及生态修复研究。 [Wang Daojie, male, born in 1968, Chengdu of Sichuan province, doctor, mainly engaged in water and soil conservation, and ecological restoration. ]

## 1 流域概况

蒋家沟为金沙江流域小江右岸支流,主沟长约 12.1 km,流域面积 47.1 km<sup>2</sup>,自东向西汇入小江,是小江流域内泥石流活动频率最高的一条泥石流沟。流域上游属会泽县大海乡,下游系昆明市东川区绿茂乡,新构造运动活跃,岩层破碎,地震活动强烈,大大小小支沟有 200 多条,主要支沟有大凹子沟、多照沟、门前沟、查箐沟和老蒋家沟。每年雨季,除老蒋家沟外,几乎所有支沟都有泥石流发生。蒋家沟地势东高西低,相对高度 2 227 m,山高坡陡,沟床坡降大,上游和两侧沟岸滑坡、崩塌非常活跃,储有大量松散固体物质。这种自然条件导致蒋家沟泥石流异常发育,大部分泥石流都由崩塌和滑坡形成的崩滑土体演化而形成<sup>[9]</sup>。

## 2 研究方法

### 2.1 样品采集

从蒋家沟泥石流源区(4 条主要支沟上游)各采集 4 个崩滑体土体作为分析样品,共计 16 个(其中

编号 1~4 为大凹子沟样品,5~8 为多照沟样品,9~12 为门前沟样品,13~16 为查箐沟样品)。采样时选择具有代表性的崩滑土体,用规格为 10 cm×4 cm×5 cm 的矩形环刀采集表层原状土,用样品袋装好、密封。同时采集体积含水量、容重和颗粒分析样品(为方便分析,取样时剔除了>20 mm 的卵石)。

### 2.2 粒度分析

对崩滑土体颗粒组成采用筛分法测量,筛分后对<0.25 mm 颗粒采用 MS2000 I 型激光粒度仪分析。颗分数据见表 1,其含量为质量百分比(%)。

### 2.3 抗冲实验

对泥石流源区崩滑土体产沙特性的研究,采用原状土小型水槽冲刷实验进行,其优点是土体不被扰动,结果更有代表性<sup>[10]</sup>。土体抵抗径流对其机械破坏和推动下移的性能可以用土壤抗冲性来表征,而泥沙主要是由降雨形成的地表径流冲刷产生。在一定径流作用下,土体抗冲性大小反映了土体抵抗径流冲刷侵蚀能力,土体抗冲性越大,其抵抗径流侵蚀的能力就越大<sup>[11]</sup>。

实验时将原状崩滑土样放在图 2 所示的冲刷装置中,在一个大气压下,出水管直径为 1 mm,出射水流直接冲刷土体,选用冲走单位质量土体所需的水

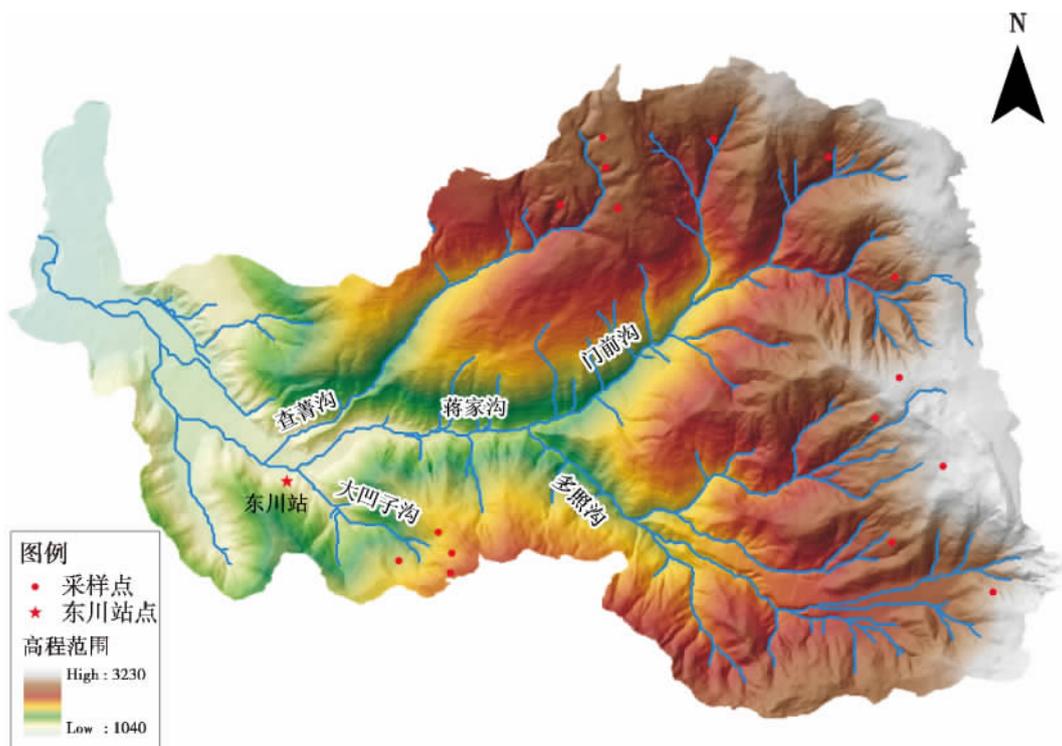


图 1 蒋家沟沟道分布及采样点分布图

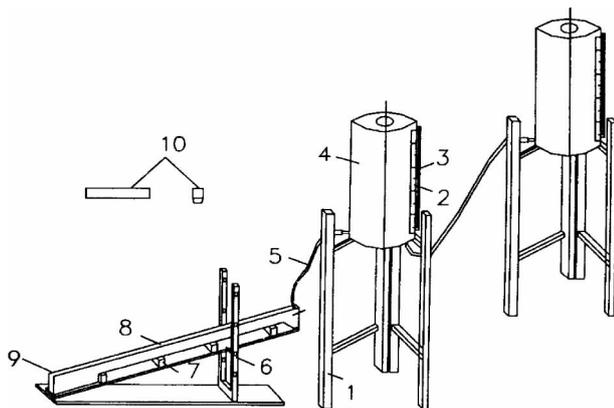
Fig. 1 Offset hitch distribution map and sampling spot of Jiangjia Gully

表1 蒋家沟泥石流源区崩滑土体颗粒组成

Table 1 Grain composition of landslide-collapse soil in the source of Jiangjia Gully

编号	不同粒径源区崩滑土体颗粒质量百分比/%													
	20	10	5	2	1	0.5	0.25	0.1	0.05	0.025	0.01	0.005	0.002	0.001
1	97.71	87.05	58.32	37.90	21.11	13.11	5.89	5.69	5.25	4.53	3.35	2.29	0.96	0.38
2	97.93	57.52	32.94	18.86	9.37	5.07	1.76	1.7	1.57	1.36	0.99	0.65	0.25	0.09
3	78.42	55.76	36.38	21.93	11.32	7.05	3.38	3.19	2.83	2.32	1.56	0.96	0.37	0.15
4	97.01	84.60	66.08	45.78	25.27	12.64	6.16	5.53	4.96	3.64	2.39	1.53	0.59	0.24
5	98.29	68.87	40.87	24.19	12.88	7.37	2.79	2.66	2.47	2.12	1.49	0.95	0.36	0.13
6	98.93	80.92	47.19	29.63	19.23	14.28	7.47	7.33	6.93	6.23	4.8	3.33	1.39	0.53
7	94.18	71.44	40.28	21.89	11.15	6.99	3.43	3.26	2.93	2.52	1.81	1.19	0.48	0.18
8	93.52	78.95	62.29	47.76	26.05	12.88	5.13	4.94	4.31	3.44	2.27	1.39	0.5	0.19
9	99.75	90.52	60.38	37.58	22.29	15.29	8.26	7.79	7.1	5.59	3.64	2.27	0.84	0.32
10	96.31	85.09	59.57	33.34	14.57	7.44	3.48	3.39	3.08	2.57	1.79	1.16	0.46	0.18
11	89.95	68.63	42.59	26.14	15.98	11.29	6.26	5.14	4.06	3.32	2.35	1.55	0.65	0.26
12	97.31	70.42	44.34	28.18	15.31	8.34	2.96	2.88	2.58	2.1	1.49	1.04	0.49	0.23
13	95.34	80.56	52.06	34.37	24.74	20.12	12.28	11.98	10.66	8.57	5.76	3.64	1.4	0.54
14	93.69	83.93	63.69	43.44	24.12	16.10	4.97	4.86	4.45	3.69	2.25	1.64	0.65	0.25
15	100.00	89.35	66.16	44.42	25.47	14.66	5.98	5.61	4.48	3.26	2.26	1.53	0.68	0.28
16	95.79	82.83	56.13	34.87	19.45	10.63	2.97	2.75	2.37	1.9	1.35	0.95	0.47	0.24
17	83.64	66.41	48.92	39.77	30.64	26.24	24.21	22.75	20.90	18.04	13.12	8.27	2.89	1.04

注: 编号17为2010-06-29在蒋家沟采集到的泥石流样品, 容重为 $2.134 \text{ g/cm}^3$ ; 粒径单位: mm。



1—放水桶架; 2—标尺; 3—玻璃管; 4—盛水桶; 5—放水管; 6—静水室; 7—垫木; 8—原状土冲刷水槽; 9—装样室; 10—采土用的方形环刀

注: 实验仪器根据长江科学院张平仓老师提供的抗冲装置的设计图, 在东川加工而成。

图2 实验装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of anti-scouring test equipment

量 $q$ 和时间 $t$ 的积为土体抗冲特性指标, 即

$$k = q \times t / m \quad (1)$$

式中 $k$ 为抗冲系数, 单位为 $\text{Ls/g}$ ;  $q$ 为一次冲刷实验所耗水量, 单位为 $\text{L}$ ;  $t$ 为冲刷时间, 单位为 $\text{s}$ ;  $m$ 为

实验中水流冲刷产生的泥沙质量冲掉土的质量, 单位为 $\text{g}$ 。

冲刷槽尺寸为 $100 \text{ cm} \times 4 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$ , 根据当地的降雨强确定抗冲实验的出水流量为 $0.7 \text{ L/s}$ , 控制冲刷时间为 $3 \text{ min}$ 。实验时首先调整冲刷槽坡度为 $10^\circ$  (为方便数据分析, 冲刷槽坡度均为 $10^\circ$ ), 然后调节出水量, 用量筒和秒表确定好需要的流量; 再将原状土样 ( $10 \text{ cm} \times 4 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$ ) 放入装样室, 打开放水阀后开始计时, 实验过程中按 $5 \text{ s}$ 、 $10 \text{ s}$ 、 $20 \text{ s}$ 、 $40 \text{ s}$ 、 $60 \text{ s}$ 、 $120 \text{ s}$ 、 $180 \text{ s}$ 时间间隔接取水沙混合样。抗冲系数和产沙含量结果见表2。

### 3 结果与分析

#### 3.1 泥石流源区崩滑土体粒度分布特征

对蒋家沟泥石流源区4条支沟的崩滑土样进行颗粒分析, 得到其原始颗分曲线如图3所示 (4条曲线分别为4条支沟的一个样品, 泥石流体为2010-06-29在蒋家沟采集到的样品, 容重为 $2.134 \text{ g/cm}^3$ )。运用插值法求得各样品粒度参数如表3所示。

表 2 泥石流源区崩滑土体抗冲实验结果

Table 2 Scouring result of landslip-collapse soil in the source

编号	抗冲系数 /(L·s/g)	泥沙含量/(g/L)						
		5	10	20	40	60	120	180
1	778.85	49.59	1.46	1.25	0.43	0.59	0.17	0.11
2	240.87	6.68	0.14	0.11	0.07	0	0	0
3	90.47	283.06	4.31	4.15	169.14	0.26	0.23	0.07
4	892.74	36.04	2.32	3.39	0.15	0.70	0.43	0.08
5	173.85	0.50	0.41	0.58	0.27	0.31	0	0
6	150.50	63.96	4.05	3.46	0.90	1.16	0.64	0.13
7	925.62	3.38	0.18	0.25	0.24	0.37	0.16	0.00
8	226.03	45.04	18.13	2.04	0.57	0.45	0.38	0.39
9	183.39	99.60	0.49	1.62	0.03	0.04	0	0
10	515.57	23.02	0.87	0.90	0.73	0.75	0.18	0
11	1 459.87	4.86	0.07	0.08	0.02	0.05	0	0
12	233.74	6.05	1.01	0.76	0.39	0.49	0.12	0.14
13	689.15	35.02	0.48	0.34	0.16	0.23	0.07	0.04
14	312.31	53.72	1.83	0.82	0.42	0.22	0.09	0
15	879.07	7.49	0.54	0.23	0.12	0.01	0	0
16	717.72	10.23	0.78	0.05	0.04	0.22	0	0

在土力学中,对宽级配砾石土颗粒分布的描述,主要是通过绘制粒径级配曲线来描述颗粒大小分布情况,以及一些特殊粒径(如  $D_{10}$ 、 $D_{30}$ 、 $D_{50}$ 、 $D_{60}$ )及其组合(如不均匀系数  $C_u$  和曲率系数  $C_c$ )来反映颗粒分布的整体情况。而在岩土工程中,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<sup>[6]</sup>。从颗粒分曲线可以看出,源区 4 条支沟崩滑土体颗粒分曲线相似,颗粒级配都较宽,包含了从黏粒到砾石的粒组成分。不均匀系数  $C_u$  都大于 5,且曲率系数  $C_c$  都在 1~2 附近,说明源区崩滑土体级配良好。

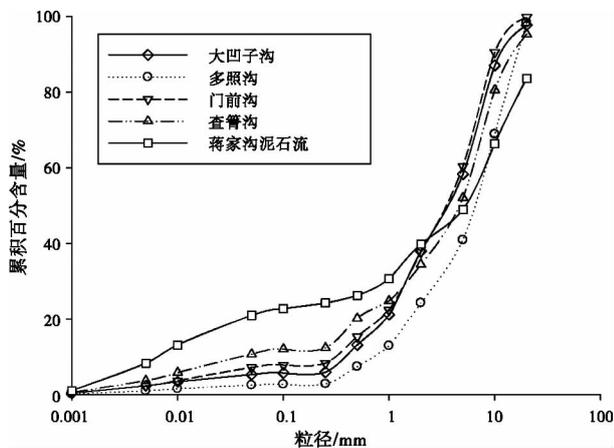


图 3 泥石流源区崩滑土体及泥石流体颗粒分曲线

Fig. 3 Grain composition of landslip-collapse soil in the source compared with debris flow

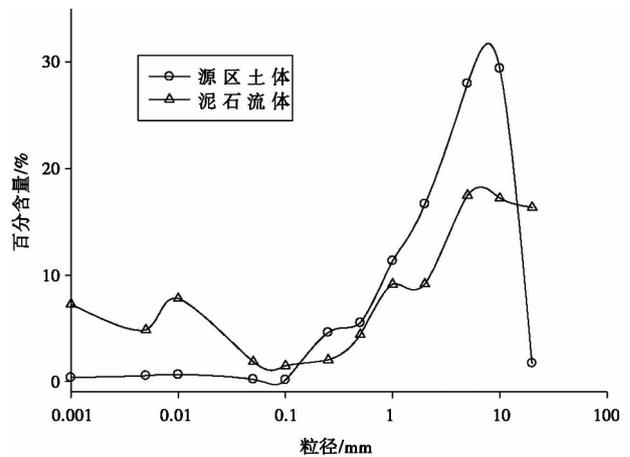


图 4 源区土体与泥石流粒度分布曲线

Fig. 4 Grain size distribution of landslip-collapse soil in the source compared with debris flow

源区土体是泥石流形成的主要物质来源,是决定泥石流性质的重要因素之一<sup>[12]</sup>。图 4 为源区崩滑土体和蒋家沟新近发生的泥石流体粒度分布图。从图中可以看到,二者具有相同的分布,主要呈单峰分布,峰值出现在曲线的后端,表明二者粗颗粒含量都较高,颗粒粒度分布较一致。李泳等<sup>[13]</sup>研究结果表明:泥石流颗粒组成接近源区土体颗粒组成,最可能发生的泥石流是颗粒组成接近流域源地土体的泥石流,与本实验结果十分吻合。本实验表明,源区崩

表3 泥石流源区崩滑土体粒度参数

Table 3 Grain size parameters of landslide-collapse soil in the source

编号	含水量 /%	容重 /(g/cm <sup>3</sup> )	粒度参数					
			D <sub>10</sub>	D <sub>30</sub>	D <sub>50</sub>	D <sub>60</sub>	C <sub>u</sub>	C <sub>c</sub>
1	22.53	1.399	0.392	1.452	3.617	5.273	13.452	1.020
2	32.94	1.147	1.01	4.249	8.454	10.435	10.332	1.713
3	25.25	1.401	0.403	1.145	8.316	3.798	9.424	0.857
4	9.17	1.554	0.408	1.185	2.368	3.825	9.375	0.900
5	37.17	1.145	0.725	2.868	6.505	8.22	11.338	1.380
6	21.12	1.402	0.342	2.067	5.344	6.643	19.424	1.881
7	30.89	1.298	0.844	3.224	6.429	7.881	9.338	1.563
8	29.55	1.157	0.408	1.136	2.218	4.391	10.762	0.720
9	27.82	1.369	0.308	1.438	3.483	4.959	16.101	1.354
10	21.87	1.413	0.684	1.767	3.633	5.076	7.421	0.899
11	17.79	1.423	0.42	2.564	6.237	8.011	19.074	1.954
12	27.42	1.383	0.598	2.218	5.994	7.771	12.995	1.059
13	15.09	1.492	0.039	1.483	4.612	6.164	15.805	0.915
14	25.96	1.183	0.353	1.25	2.661	4.249	12.037	1.042
15	29.03	1.461	0.365	1.176	2.54	3.934	10.778	0.963
16	26.93	1.437	0.478	1.606	3.961	5.561	11.634	0.970

滑土体和泥石流体的粒度分布特征也存在一定的差异:除了砂粒(0.005~2 mm)含量二者非常接近外,砾石(>2~20 mm)含量泥石流流体比源区土体低,泥石流流体黏粒(<0.005 mm)含量相对较高。这说明泥石流源区崩滑土体形成泥石流后出现了细颗粒聚集现象,此现象符合其他学者的研究成果:一定黏粒含量有利于减少泥石流阻力,对泥石流的启动具有重要的影响<sup>[14-15]</sup>。

### 3.2 源区崩滑土体产沙特性

分别对蒋家沟源区4条支沟上游的崩滑土体进行抗冲刷实验,对产沙过程进行曲线拟合。从拟合曲线可以发现,崩滑土体产沙随时间的变化满足方程

$$y = a + bt^{-1} + ct^{-2} \quad (2)$$

式中  $y$  为水沙混合样中的泥沙含量,  $t$  为冲刷时间  $t \in (0, 180)$ , 参数  $a, b, c$  随采样点的不同而取不同的值。从图5中可知,产沙与时间的拟合效果较好,相关性较高。从式(2)可以看出,在控制时间内,产沙量随冲刷时间的增加呈二次幂函数衰减。在砾石土中黏粒部分在遇水时会发生崩解分散,胶结结构断裂或颗粒之间的咬合失效等,损害砾石土的原始结构,在孔隙中形成浑浊的,浓度较高的细颗

粒(胶体量级)悬浮液,这些微粒将在渗流力作用下发生迁移运动<sup>[16]</sup>。初始冲刷时表层的松散土体和填充在粗颗粒空隙中的松散细颗粒,很快被水流带走,所以刚开始时产沙量很大,随着这些松散颗粒的不断减少,以粗颗粒为主形成的土体骨架抵抗水流冲刷侵蚀的作用增强,被冲刷掉的土颗粒减少,泥沙浓度迅速降低,最后只有少量颗粒在水流持续冲击作用下被水流带走,泥沙浓度趋于稳定,水沙混合样含沙量低。

### 3.3 产沙特性与粒度分布的关系

按照颗粒特性可将土体颗粒划分为如表4中的类型。

表4 颗粒粒组分类<sup>[17]</sup>

Table 4 The types of particles

颗粒名称	黏粒	粉砂	砂	砾石	卵石	漂石
粒组/mm	<0.005	0.005~0.50	0.50~2.0	2~20	20~80	>80

颗粒组成状况是影响土体抗蚀性的重要原因。通过源区崩滑土体抗冲系数和颗粒分析结果可发现,源区崩滑土体的抗冲性大小与土体中粗颗粒含量或黏粒含量具有较大的相关性。

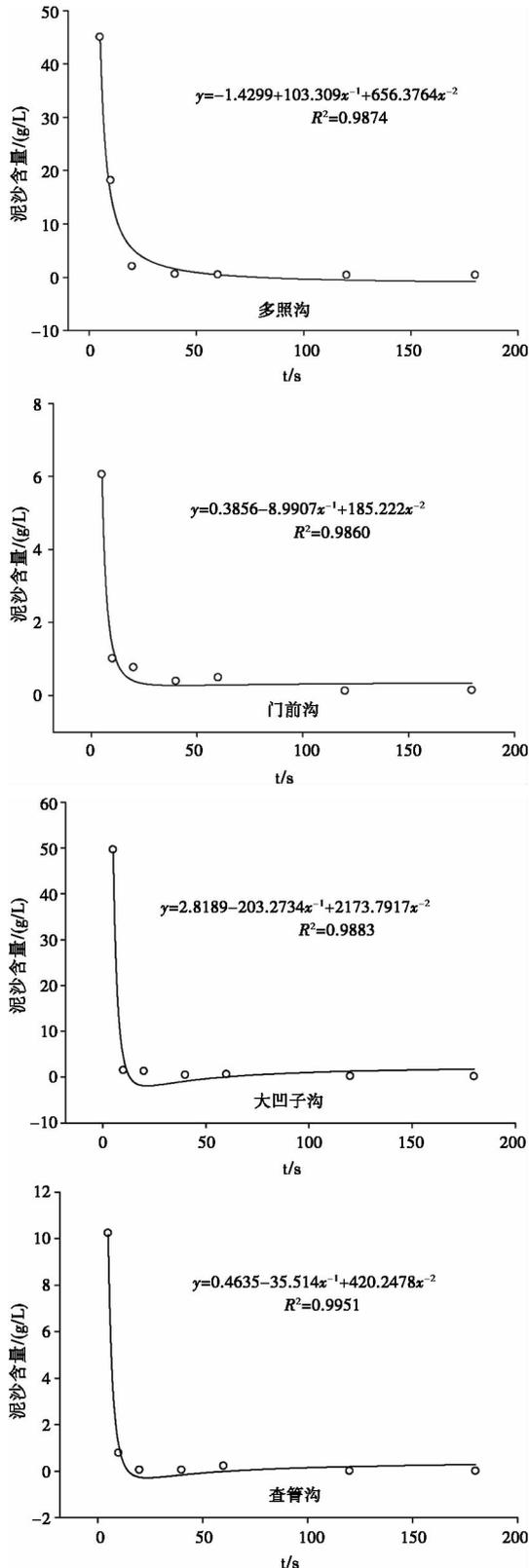


图 5 产沙浓度随冲刷时间的变化拟合曲线

Fig. 5 Fitted nonlinear regression line of sediment concentration

图 6 为源区崩滑土体抗冲系数随土体粗颗粒含量变化的关系图。从图中可以发现,抗冲系数 k

随着粗颗粒含量  $P_2$  ( $P_2$  表示粒径大于 2 mm 砾石质量占总质量的百分比) 的增加呈现先增大后减小的变化规律,在含量为 63% 附近达到最大值。以粗颗粒形成的土体骨架可以抵抗一定径流的冲刷作用,在一般水流作用下很难被搬运,可以增大土体抵抗径流冲刷能力。但粗颗粒含量过大时,土体孔隙就会相应的增大,水流渗透力变大,水流冲刷作用也随之增强,大量细颗粒被冲刷掉,出现土体的抗冲性变小的现象。

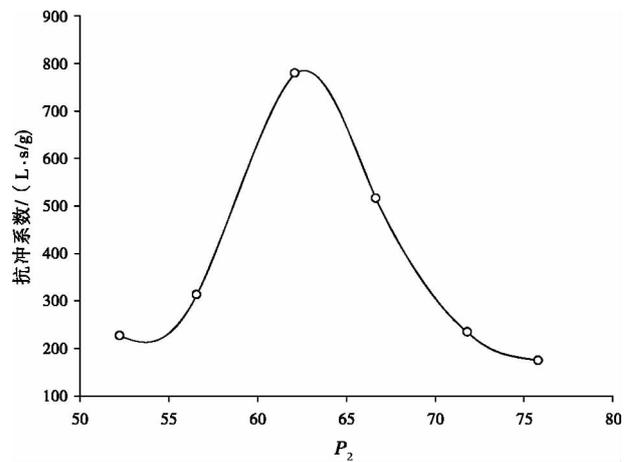


图 6 抗冲系数与粗颗粒的关系

Fig. 6 Relationship between  $P(2)$  and coefficient of anti-scouring

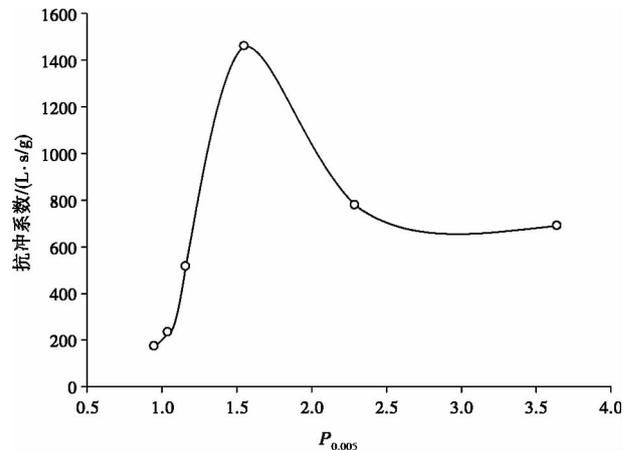


图 7 抗冲系数与黏粒的关系

Fig. 7 Relationship between  $P(0.005)$  and coefficient of anti-scouring

图 7 为源区崩滑土体抗冲系数随土体黏粒含量变化的关系图。图 7 表明,抗冲系数 k 同样是随着黏粒含量  $P_{0.005}$  ( $P_{0.005}$  表示粒径小于 0.005 mm 黏粒质量占总质量的百分比) 先增大后减小的变化趋势,本实验结果表明,在黏粒含量达到 1.5% 附近时

取最大值。黏土颗粒具有一定的粘聚力,颗粒很小,比表面积大,这种粘聚力相互作用力较大,颗粒组成越细的土体,其黏聚力越强,在一定程度上使土体形成团状结构体,抗蚀能力就越高<sup>[18]</sup>。当黏粒含量增加时,在渗流力作用下,这些颗粒会堵塞孔隙,在孔隙中发生一定的聚集,其抗冲系数也随着增大,表明较高黏粒含量对土体抗冲性具有一定的加强作用。当黏粒含量超过 1.5% 后,以粗颗粒形成的土骨架对细颗粒的荫蔽作用减弱,导致较多的细颗粒被冲走,土体的抗冲性开始减小。

## 4 结论与讨论

### 4.1 结论

通过对蒋家沟泥石流源区崩滑土体的粒度分析和小型水槽冲刷实验,在分析其颗粒粒度分布特征的基础上,对其径流产沙特性进行了初步探讨,得到了以下几点结论:

1. 蒋家沟泥石流源区崩滑土体为宽级配砾石土,包含了从黏粒到砾石的粒组成分,不均匀系数  $C_u$  都大于 5,且曲率系数  $C_c$  都在 1~2 附近,颗粒级配良好;崩滑土体和泥石流流体颗粒具有相似的粒度分布特征,主要呈为单峰分布,峰值出现在颗分曲线的后端,说明粗颗粒含量都较高。但二者也存在一定的差异:除了砂粒(0.005~2 mm)含量二者非常接近外,砾石(>2~20 mm)含量泥石流流体比源区土体低,泥石流流体黏粒(<0.005 mm)含量相对较高,表明黏粒对泥石流的形成具有重要促进的作用。

2. 通过对源区崩滑土体产沙过程曲线进行拟合发现,其产沙过程可以用二次幂函数表示

$$y = a + bt^{-1} + ct^{-2} \quad (2)$$

式(2)表明:在一定流量和坡度下,蒋家沟泥石流源区崩滑土体径流冲刷产沙浓度与冲刷时间呈二次幂函数衰减的关系。

3. 蒋家沟泥石流源地崩滑土体的抗冲性与其颗粒组成的关系为:抗冲系数随着  $P_2$ (>2 mm 的颗粒百分含量)的增加先增大后减小,在含量为 63% 之间达到最大;随着  $P_{0.005}$ (<0.005 mm 的颗粒百分含量)的增加也是先增大后减小,在含量为 1.5% 附近达到最大。因此,粗颗粒含量和黏粒含量对源区崩滑土体的侵蚀产沙都具有重要的影响,主要表现在粗颗粒形成的骨架作用和黏粒之间的内聚力作用对径流冲刷的响应机理上。

### 4.2 讨论

1. 本实验只是在小型水槽中进行的,水槽尺寸大小及边界条件(如槽底和槽壁的粗糙度)对土体产沙特性的影响尚未考虑和处理。如果能加大水槽尺寸、消除边界条件的影响,得到的结果也许更能符合客观规律。

2. 实验过程中的冲刷水流为恒定流量,且冲刷时间控制为 3 min,时间较短,与自然降雨过程中的变流量和长历时冲刷相比较简化。在变流量条件和较长时间冲刷下,其变化规律需要进一步研究。

致谢:感谢中国科学院东川泥石流观测研究站提供的泥石流观测数据及中国科学院成都山地灾害与环境研究所曾珍同学在蒋家沟流域图制作中给予的帮助。

### 参考文献 (References)

- [1] Ji Xianjun, Ou Guoqiang, Yang Shun, et al. Research status and prospect on moving process of landslip-collapse soil along slope [J]. Mountain Research, 2012, 30(3): 361-368 [季宪军, 欧国强, 杨顺, 等. 崩滑土体坡面运动过程研究现状与展望 [J]. 山地学报, 2012, 30(3): 361-368]
- [2] Iverson R M, Reid M E, LaHusen R G. Debris flow mobilization from landslides [J]. Annu. Rev. Earth Planet. Sci, 25: 85-138
- [3] Wu Bing, Zhu Yuanjun, Shao Mingan. Effect of rainfall intensity on sediment yield and infiltration on stony soils [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2011, 25(6): 87-91 [吴冰, 朱元骏, 邵明安. 降雨强度对含砾石土壤产沙及入渗的影响 [J]. 水土保持学报, 2011, 25(6): 87-91]
- [4] Mingjian H, W Ren, S Jianhua. Rainfall, landslide and debris flow intergrowth relationship in Jiangjia Ravine [J]. Mountain Research, 2011, 3(4): 603-610
- [5] Huang Qi, Chen Ningsheng, Zhu Yunhua, et al. Particle size fractal characteristics of the gravel soil in original area of debris flow valleys [J]. Mountain Research, 2012, 30(5): 578-584 [黄祺, 陈宁生, 朱云华, 等. 泥石流源区砾石土的粒度分形特征 [J]. 山地学报, 2012, 30(5): 578-584]
- [6] Chen Ningsheng, Zhang Jun. The research of permeability on loose gravelly soil in debris flow original area [J]. Mountain Research, 2001, 19(1): 169-171 [陈宁生, 张军. 泥石流源区弱固结砾石土的渗透规律 [J]. 山地学报, 2001, 19(1): 169-171]
- [7] Paul Myrow, R. N. Hiscott. Shallow-water gravity-flow deposits, Chapel island formation, Southeast Newfoundland, Canada [J]. Sedimentology, 1991, 38: 935-959
- [8] Poesen J, Torri D, Bunte K. Effects of rock fragments on soil erosion by water at different spatial scales: A review [J]. Catena, 1994, 23: 141-166
- [9] Wu Jishan, Kang Zhicheng, Tian Lianquan, et al. Observation study in Jiangjia gully in Yunnan province [M]. Beijing: Science Press, 1990: 1-4 [吴积善, 康志成, 田连权, 等. 云南蒋家沟泥石流观

- 测研究[M]. 等北京: 科学出版社, 1990: 1-4]
- [10] Lei Junshan, Yang Qinke. Experimental research on sheet flow erosion of loessial slope and evaluation on soil anti-scourability [J]. Journal of Sediment Research 2004, 12(6): 22-26 [雷俊山, 杨勤科. 坡面薄层水流侵蚀试验研究及土壤抗冲性评价[J]. 泥沙研究 2004, 12(6): 22-26]
- [11] Zou Xiang, Cui Peng, Chen Jie, et al. Experiment study on anti-scouring of soil in Xiaojiang River Basin [J]. Journal of Soil and Water Conservation 2004, 18(2): 71-73 [邹翔, 崔鹏, 陈杰, 等. 小江流域土壤抗冲性实验研究[J]. 水土保持学报, 2004, 18(02): 71-73]
- [12] C Baroni, G Bruschi, A Criscuolo, et al. Complete grain-size analyses on debris-flow source area in the Carrara marble basins, Apuane Alps, Italy [G] // Dipartimento di Scienze della Terra, University of Pisa and CNR, Istituto di Geoscienze e Georisorse, Pisa, Italy. Rotterdam: Millpress 2003: 809-820
- [13] Li Yong, Chen Xiaoqing, Hu Kaiheng, et al. Fractality of grain composition of debris flows [J]. Acta Geographica Sinica, 2005, 60(3): 495-502 [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]
- [14] Chen Zhongxue, Wang Ren, Hu Mingjian, et al. Study of content of clay particles for debris flow occurrence in Jiangjia Ravine [J]. Rock and Soil Mechanics 2010, 31(07): 2197-2201 [陈中学, 汪稔, 胡明鉴, 等. 黏土颗粒含量对蒋家沟泥石流启动影响分析[J]. 岩土力学 2010, 31(07): 2197-2201]
- [15] Li Yong, Liu Jingjing, Chen Xiaoqing, et al. Grain composition and erosive equilibrium of debris flows [J]. Mountain Research 2007, 4(01): 71-76
- [16] Wang Zhibing, Wang Ren, Hu Mingjian, et al. Characteristics of gravelly soil and their implications for slope instability in Jiangjiagou ravine [J]. Rock and Soil Mechanics 2010, 31(Suppl. 2): 206-211 [王志兵, 汪稔, 胡明鉴, 等. 蒋家沟砾石土的特性及其对斜坡失稳的意义[J]. 岩土力学 2010, 31(Suppl. 2): 206-211]
- [17] Kang Zhicheng, Li Zhuofen, Ma Ainai, et al. Debris flow study in China [M]. Beijing: Science Press, 2004: 16-17 [康志成, 李焯芬, 马蔼乃, 等. 中国泥石流研究[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 16-17]
- [18] Wu Fengzhi, Shi Zhihua, Yue Benjiang, et al. Particle characteristics of sediment in erosion on hillslope [J]. Acta Pedologica Sinica, 2012, 49(6): 1235-1240 [吴凤至, 史志华, 岳本江, 等. 坡面侵蚀过程中泥沙颗粒特性研究[J]. 土壤学报 2012, 49(6): 1235-1240]

## The Research of Grain Composition and Sediment Generation on Landslip-collapse Soil in Debris Flow Original Area

CHEN Shun<sup>1,2</sup>, WANG Daojie<sup>1</sup>, MEI Yongli<sup>3</sup>, CHEN Xiaoyan<sup>1,2</sup>, ZHANG Shujuan<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Mountain Hazards and Earth Surface Processes, Chinese Academy of Sciences / Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Science & Ministry of Water Conservancy, Chengdu 610041, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Dongchuan Forestry Bureau, Kunming 654100, China)

**Abstract:** Large numbers of landslides and collapses happened frequently in the debris flow original area, and supplied sufficient materials for debris flow. Based on landslip-collapse soil samples from debris flow original area in Jiangjia Gully of Yunnan, China, analysis of grain composition was performed to discuss the relationship of grain composition between landslip-collapse soils and debris flows. According to the experimental data, it was found that both of them can be characterized by a wide-ranged distribution of grain size, and characteristics of particle composition have similar distribution form, meanwhile the grain size distribution curves are single peak, by analyzing the gradation curve. Moreover, a series of small flume experiments were carried out, which was used to investigate the sediment yield mechanism of landslip-collapse soil in the source. Research results revealed the relationship between sediment yield and scouring time can be expressed as:  $y = a + bt^{-1} + ct^{-2}$ , which indicated that the sediment yield decrease by the second power function with the increment of scouring time. Anti-scouring coefficient of landslip-collapse soils, which was proposed to describe soil anti-scour ability, increases with increment of coarse-grained (> 2 mm) contents and clay (< 0.005 mm) contents, rising to the maximum at contents equal 63%, 1.5%, respectively, decreasing exceeded 63%, 1.5%, respectively.

**Key words:** debris flow original area; landslip-collapse soil; grain size distribution; characteristics of sediment yield