

云南省东川蒋家沟泥石流对小江悬移质输移的影响

林伟^{1,2,3}, 张金山^{1,2,3}, 谢洪^{1,2}

(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 研究生院, 北京 100049)

摘要: 以 2009 年 8 月 4 日云南省东川蒋家沟暴发的一场泥石流汇入小江的过程为例, 观测分析了泥石流汇入后小江泥沙悬移质输移特征变化。通过与 2009 年雨季测量的小江相关观测数据比较, 发现泥石流汇入前、后, 小江的悬移质含沙量由 4.00 kg/m^3 增大到 25.78 kg/m^3 。采用粒度特征分析的图解法分析了蒋家沟泥石流浆体、小江桥处小江悬移质泥沙和新田坝处小江悬移质泥沙的粒度特征参数, 及泥石流汇入小江后的变化和粒度特征参数之间的关系。发现结果表明, 新田坝处的小江悬移质泥沙大部分来自于泥石流, 造成了粒度平均值变小(最大值由 $7.460 \mu\text{m}$ 减小到 $7.097 \mu\text{m}$), 但分选性有所提高, 属于中等分选性。借助这些关系可以明显区分出挟沙水流和泥石流的浆体。

关键词: 悬移质; 泥沙颗粒级配; 粒度特征参数

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2011)06-0015-06

中图分类号: P642.23

Influence of Jiangjia Gully Debris Flow on Suspended Load Transport of Xiaojiang River in Dongchuan, Yunnan Province

LIN Wei^{1,2,3}, ZHANG Jin-shan^{1,2,3}, XIE Hong^{1,2}

(1. Key Laboratory of Mountain Hazards and Earth Surface Process, Chinese

Academy of Sciences, Chengdu, Sichan 610041, China; 2. Institute of Mountain Hazards and

Environment, Chinese Academy of Sciences & Ministry of Water Resources, Chengdu, Sichan

610041, China; 3. Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Sedimentary transport of Xiaojiang River was analyzed by a case study of debris flow in Jiangjia gully on August 4, 2009. The entrance of debris flow into the river greatly changed the characteristics of suspended sediment transport, in comparison with the observation data during the rainy season. The sediment concentration increased from 4.00 kg/m^3 to 25.78 kg/m^3 after the confluence of debris flow, yet the grain composition remained almost the same. Furthermore, granular analysis was conducted on the slurry of debris flow and the suspended sediment at the Xiaojiang bridge and Xintian dam, the results showed that the suspended sediment at Xintian Dam mostly came from the debris flow, resulting in the smaller average grain-size parameters(the maximum value decreased from $7.460 \mu\text{m}$ to $7.097 \mu\text{m}$), but the sorting of them had been enhanced and fell into the medium-sorting. Simultaneously, we noticed that there was still a clear distinction between the sediment slurry of water and debris flow.

Keywords: suspended sediment; grain composition; grain-size parameters

泥石流所挟带的泥沙是山区河流主要的泥沙来源之一, 并且影响着下游河流的输沙, 甚至能造成河流改道, 影响和威胁下游水利设施和居民的人身财产安全。泥石流汇入河道的过程及泥石流堵江, 许多学者已经通过模拟实验进行了许多研究。此外, 对影响河流输沙的外界影响因素的研究, 许多学者也做了相

关的工作, 如冰川融化对河流悬移质输沙的影响^[1], 暴雨对河流细颗粒输沙影响^[2]以及洪水对河流悬移质输移的影响^[3]。然而, 对于泥石流对河流泥沙输移特征的影响研究却鲜有报道。

中国科学院蒋家沟泥石流观测研究站(以下简称观测站)位于云南省昆明市东川区绿茂乡, 其所观测

收稿日期: 2011-05-06

修回日期: 2011-08-12

资助项目: 国家自然科学基金项目“泥石流流入汇主河后泥沙输移规律研究”(40871024)。

作者简介: 林伟(1987—), 男(汉族), 江西省全南县人, 硕士研究生, 主要研究方向为泥石流等山地灾害防治。E-mail: linwei0209@mails.gucas.ac.cn。

通信作者: 谢洪(1959—), 男(汉族), 四川省成都市人, 研究员, 主要从事泥石流等山地灾害区域规律及防治研究。E-mail: xhong@ms.imde.ac.cn。

的蒋家沟泥石流每年暴发几次到十几次^[4],最高达 28 次/a。每年雨季,蒋家沟泥石流将 $3.00 \sim 4.00 \times 10^6 \text{ m}^3$ 的泥沙、石块输送到山口以下堆积,其中大部分冲入小江。如此量大的物质汇入小江后可直接影响小江的输沙特征。

粒径是泥沙的重要属性,影响着泥沙的输送、搬运和沉积^[1]。研究泥沙的粒径变化可以反映河流的输沙特征。2009 年 8 月 4 日蒋家沟暴发了一场泥石流,并汇入小江,带入了大量的泥沙。本研究利用对这场泥石流过程的观测数据,分析蒋家沟泥石流汇入小江后,对小江悬移质的含沙量、颗粒粒径和颗粒级配特征的影响。

1 研究区概况

蒋家沟流域($103^{\circ}06' - 103^{\circ}13'E, 26^{\circ}13' - 26^{\circ}17'N$)泥石流活动频繁,泥石流最终几乎都流入小江。小江发源于云南省寻甸县鱼尾后山,系金沙江一级支流,全长 138.2 km,由南向北流经寻甸县、昆明市东川区 and 会泽县,流域面积 $3\,040 \text{ km}^2$,最大相对高度 2 860 m,平均河床比降 12.8%^[5]。小江流域中、下游属于干热河谷区,由于地形相对高度大,温度随高度变化较大,尤其是降水量随高度变化大,降水具有明显的随高度递增的垂直分带性和由下游往上游增加的区域分布特点^[6],这一特点有利于地表径流的汇集,加强了对流域坡面的冲刷力^[7];同时,由于受小江流域深大断裂带的影响,区内岩层褶皱强烈,节理发育,强烈的动力变质作用使岩体十分破碎^[8],极易风化崩解成碎屑物,极易促进水土流失、崩塌和滑坡的发生,进而促进了泥石流的暴发。强烈的泥石流等山地灾害活动,使小江流域成为长江流域的一个主要产沙区^[9]。

本研究的区域为小江桥,新厂,泥得坪及新田坝之间小江流域中游段和蒋家沟下游地区(图 1)。小江流经小江桥后,在达朵村附近蒋家沟由东向西汇入小江,后小江流向新田坝,最终在格勒汇入金沙江。小江流域干湿季分明,垂直气候明显。雨季为 5—10 月,其间降雨量占年降雨量的 85%以上。蒋家沟位于小江右岸,其汇入小江处是一个面积约 1 km^2 的泥石流堆积扇(图 1),而在蒋家沟口附近的小江左岸的达朵平台,同样是一个泥石流堆积台地。因此,在此区域泥石流带来的泥沙深刻影响着小江的泥沙输移特征。

2 研究方法

在小江与蒋家沟汇口以上的小江桥及以下的

田坝,分别采集小江悬移质水样。2009 年 7 月 27 日至 9 月 29 日在新田坝每天采一次,小江桥则在 2009 年 7 月 2 日至 9 月 24 日每隔 10 d 采集一次。方法是用清洗干净的 500 ml 塑料水瓶在距水面 5~10 cm 水下采集水样。由于实际操作难度的原因,无法采集小江的推移质,因此主要研究小江的悬移质的输移特征。这也就限制了研究内容不能囊括小江泥沙整体(含推移质)的输移特征。

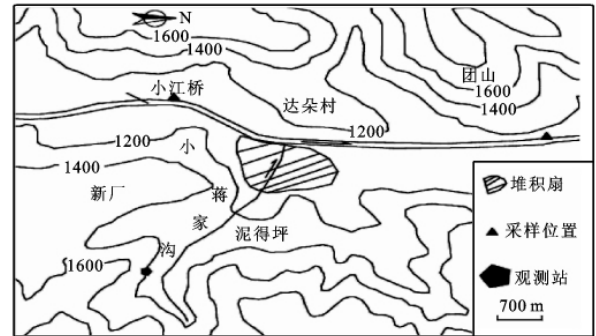


图 1 研究区域示意图(蒋家沟与小江的交汇处)

2009 年 8 月 4 日 06:30,蒋家沟暴发泥石流,并冲入小江,该次泥石流过程的观测情况详见表 1。之后,09:00 开始在新田坝采样点(图 2)每隔 1 h 采集一次水样,小江桥采样点则从 10:30 开始每隔 1 h 采集一次水样。这主要考虑到蒋家沟泥石流从上游流到汇入小江处的时间以及泥石流暴发持续的时间。从小江采集的水样在东川泥石流观测站土工实验室充分沉淀后,把取样瓶中的水排出,然后用水把瓶内的泥沙冲洗到烧杯。等烧杯内泥沙充分沉淀后,再把烧杯上部清水倒出,让剩下的泥沙自然风干,称重。称重完后用蒸馏水浸泡泥沙 24 h,再用 Mastersize 2000 仪器做粒度分析。通过这些实验,可以得到样品的毛重、净重、干泥沙的重量及水样的含沙量和泥沙粒径等数据。泥石流浆体则是在观测站附近泥石流暴发时在汇口处采集的,之后通过筛分,粒径小于 0.25 mm 的颗粒用 Mastersize 2000 进行粒度分析。

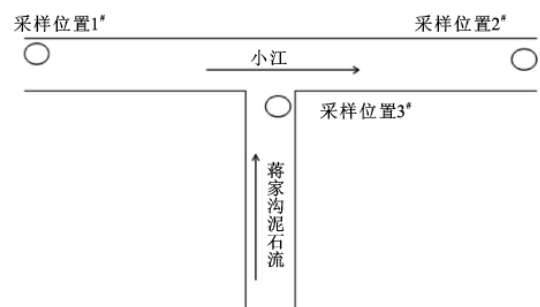


图 2 采样位置平面示意图

表 1 研究区“20090804”泥石流观测资料

流态	龙头时间	龙尾时间	流速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	容重/ ($10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	径流量/ m^3	含沙量/ ($10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	输沙量/ m^3
阵性流	6:30:00	6:30:50	2.2	2.15	176.4	14 109	1.85	26 060
阵性流	6:34:10	6:35:00	2.2	1.90	133.3	10 667	1.45	15 418
阵性流	6:39:34	6:40:16	2.4	2.15	194.8	13 090	1.85	24 177
阵性流	6:41:04	6:42:14	2.0	2.10	126.9	14 208	1.77	25 101
阵性流	6:45:00	6:45:30	3.5	1.90	62.7	3 007	1.45	4 347
阵性流	6:47:26	6:48:51	4.4	1.90	22.0	2 986	1.45	4 317
阵性流	6:49:26	6:49:56	4.6	1.95	32.2	1 544	1.53	2356
阵性流	6:52:07	6:52:18	2.9	1.95	40.5	713	1.53	1 088
阵性流	6:54:30	6:54:52	3.1	2.10	49.1	1 728	1.77	3 052
阵性流	6:57:01	6:57:14	3.0	2.00	72.2	1 501	1.61	2 411
阵性流	6:58:04	6:58:19	3.1	2.00	37.0	887.52	1.61	1 425
阵性流	7:02:10	7:02:30	3.3	2.00	107.0	3 422	1.61	5 497
连续流	7:03:30	7:17:50	1.5	1.70	3.0	4 089	1.12	4 597
阵性流	7:17:51	7:18:10	2.8	1.95	58.2	1 769	1.53	2 700
	7:18:10							阵性流结束

注:观测资料由中国科学院蒋家沟泥石流观测站提供。

3 结果和讨论

小江桥采样地点与新田坝采样地点距离 5.6 km,当时在小江桥处采用浮标法测得小江流速为 2.4~2.6 m/s,考虑到误差存在,水流从小江桥到新田坝大概需要 30 min,因此两地测量时间相差 30 min。蒋家沟处于它们中间位置,按相差 15 min 时间采样。3 个地点采样时间间隔均为 1 h。由于采样的不连续和耗时等问题,整理资料时对数据进行了插值处理。当时在小江桥目测发现小江流量基本没有变化,因此可以认为小江流量基本上是保持稳定的。

3.1 小江含沙量的变化

由于泥石流携带了大量的泥沙汇入小江,必然使蒋家沟沟口下游的小江新田坝水样含沙量增高。根据之前测量新田坝小江水样的数据,在未发生泥石流和未下大雨的情况下,含沙量较低。新田坝小江水样的含沙量基本保持在 4 kg/m^3 左右,最高含沙量是 6.73 kg/m^3 (除去泥石流暴发当天数据),最小含沙量为 0.56 kg/m^3 。同样,从图 3 可以看出,小江桥处小江悬移质含沙量较平稳,也就是说在没有额外泥沙物质补充条件下,小江桥处小江悬移质含沙量在 7—9 月维持在 $4\sim 5 \text{ kg/m}^3$ 。2009 年 8 月 4 日发生泥石流后,新田坝的含沙量迅速增加(图 3)。

从图 3 可以看出,新田坝处小江含沙量相比正常情况下有很大的提高,最大的含沙量由原来的 6.73 kg/m^3 增加到 39.32 kg/m^3 ,最小含沙量为 7.69 kg/m^3 ,平均含沙量为 25.78 kg/m^3 。显然,“20090804”泥石流对小江含沙量影响很大。虽然由于采样的误差导致曲线有一些波动,但仍可以看出总体趋势:随着时

间的推移,新田坝水样的泥沙含量有较大幅度的减少,而小江桥处的小江含沙量曲线则一直较为平缓。这是由于泥石流汇入小江逐渐减少的缘故,而小江桥泥沙的主要来源是小江上游,因此蒋家沟泥石流前后,都基本没有受到影响。到泥石流发生 4.5 h 之后,小江桥和新田坝处小江水样的泥沙含量几乎趋于一致。表明蒋家沟泥石流的汇入对小江悬移质含沙量影响很大,并且随着时间的推移,历时 1 h 左右时新田坝处悬移质的含沙量达到峰值 39.32 kg/m^3 ,而到 3 h 之后影响程度开始逐渐减小,到 4.5 h 后几乎没有任何影响。

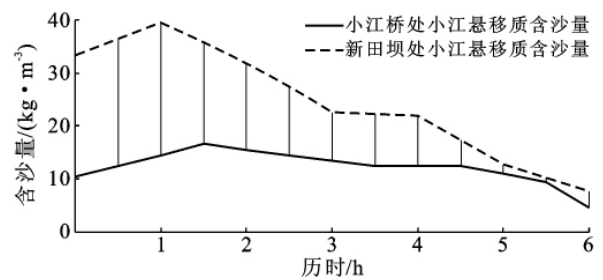


图 3 泥石流暴发后小江含沙量的变化

3.2 泥沙粒径级配分析

蒋家沟泥石流的汇入对小江的悬移质含沙量改变是很明显的。本研究粒度分级采用美国地球物理协会分类标准^[10]。根据对粒径级配分析,发现蒋家沟泥石流的汇入对小江悬移质的粒径影响较小。这主要是由于小江的悬移质的颗粒级配跟蒋家沟泥石流的浆体中颗粒级配几乎一致。但颗粒级配依然有些差异(图 4)。

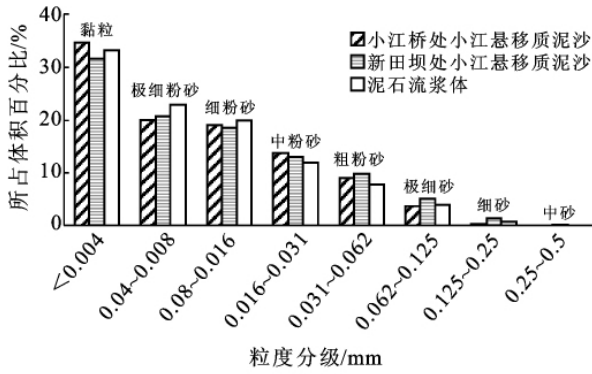


图 4 蒋家沟泥石流浆体、小江桥处和新田坝处水样中泥沙的平均粒径分布

3.3 粒度特征

为了更精确地了解泥石流汇入对小江悬移质粒径及粒径级配的影响,采用图解法对比分析各观测点悬移质泥沙的粒度特征。3 个观测点悬移质泥沙分布的粒度参数,可以很好地反映出各自的粒度特征。按照 Folk 公式^[10]计算出粒度参数,包括平均值(MZ)、标准差(SD),偏差(SK)和峰态(KU)。计算的结果详见表 2。

从图 5 可以看出,新田坝处小江悬移质泥沙的粒度参数和泥石流浆体的粒度参数随时间变化几乎一致。说明新田坝处小江所含的泥沙大部分来自于泥石流汇入小江。同样,由于泥石流的汇入,带来更多的黏粒、极细粉砂和细粉砂,导致小江悬移质粒度的平均值降低。根据 Folk 和 Ward^[11]提出的分选性等级标准,新田坝和小江桥处小江悬移质和泥石流浆体的标准差 SD 在 0.71~2.00 Φ 之间,属于分选中等和

分选性较差的级别。但相对于小江桥处小江悬移质来说,蒋家沟泥石流汇入带来的粉砂使新田坝处小江所含泥沙的偏度一直大于 0($SK > 0$),即此时正偏,粒度集中在粗段。同样,从图 5 中可以看出,小江桥、新田坝处的小江悬移质泥沙的偏态相差并不大,几乎在同一条水平直线上,曲线变化平缓,随着时间的推移变化非常小。

表 2 3 个观测点悬移质的粒度参数

测点样品	时间/h	平均值	标准差	偏差	峰态
泥石流浆体泥沙	1	7.189	1.299	0.028	1.097
	2	7.172	1.303	0.028	1.105
	3	7.137	1.299	0.015	1.041
	4	7.851	1.692	-0.107	0.977
	5	6.834	1.034	0.074	1.003
	6	7.131	1.279	0.023	1.055
	7	6.948	1.150	0.046	1.008
新田坝处小江悬移质泥沙	1	7.113	1.281	0.018	0.984
	2	6.959	1.174	0.031	0.961
	3	7.031	1.225	0.031	0.978
	4	6.774	1.124	0.054	0.933
	5	6.654	0.847	0.148	0.974
	6	6.761	0.893	0.106	0.971
	7	7.057	1.157	0.010	0.967
小江桥处小江悬移质泥沙	1	7.097	1.266	-0.064	0.966
	2	7.141	1.178	0.013	0.986
	3	7.462	1.419	-0.022	1.011
	4	7.049	1.203	-0.021	0.954
	5	7.221	1.262	-0.031	0.965
	6	7.146	1.202	-0.013	0.956
	7	7.146	1.202	-0.013	0.956

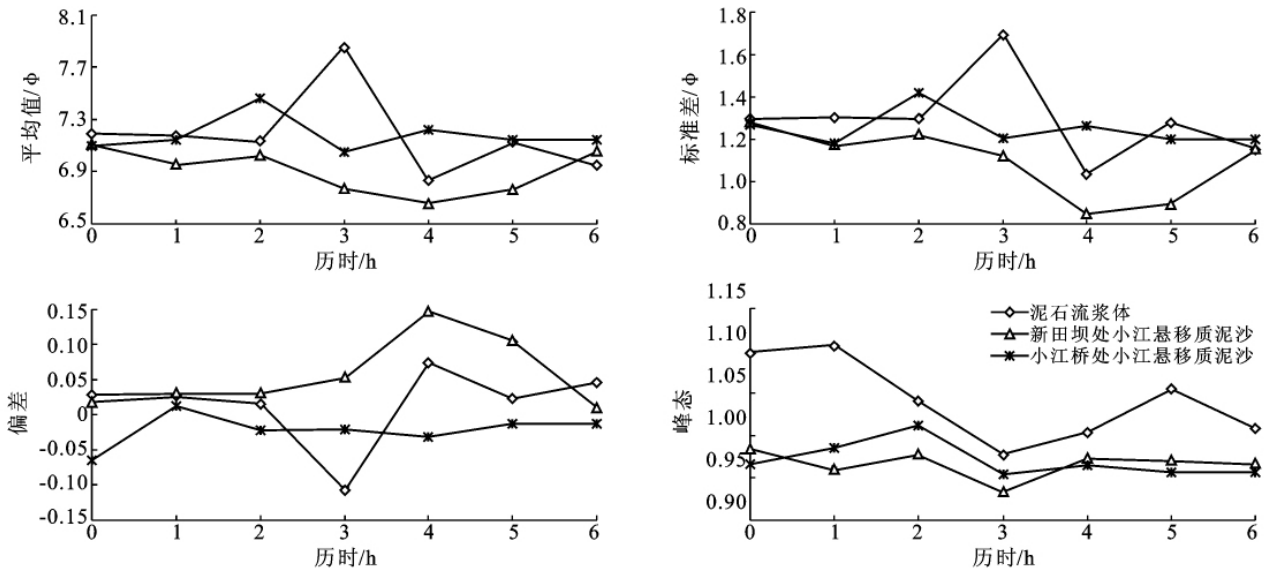


图 5 泥石流浆体、新田坝处和小江桥处小江悬移质的各粒度参数对比

采用表 2 的计算结果绘制了两个粒度参数之间的关系曲线(图 6),利用这些曲线可以确定他们之间的关系及相关程度。从图 6 可以发现,有些粒度参数之间表现出很好的相关性。图中平均值与标准差、平均值与偏差以及偏差与标准差之间具有很好的线性关系。标准差随着平均值的增大而增大,而偏差却随着平均值增大而减小。

从图 6 可以看出,新田坝处悬移质泥沙与泥石流浆体、小江桥处小江悬移质泥沙的点几乎分布在一条直线上,没有发生明显的偏离,说明新田坝处小江悬

移质泥沙没有发生过明显的分选。标准差与平均值的关系式为:

$$SD=0.647MZ-3.378, R^2=0.8950$$

通过绘制平均值与峰态、标准差与峰态以及峰态与偏差的关系图(图 6),挟沙水流与泥石流浆体分布在直线 $KU=1$ 的两侧,峰态 $KU=1$ 是区分挟沙水流与泥石流浆体的临界值。这说明尽管新田坝处小江悬移质泥沙大多数来源于泥石流浆体,但是由于小江水流的作用及输移距离的影响,可以很明显区分出挟沙水流与泥石流浆体。

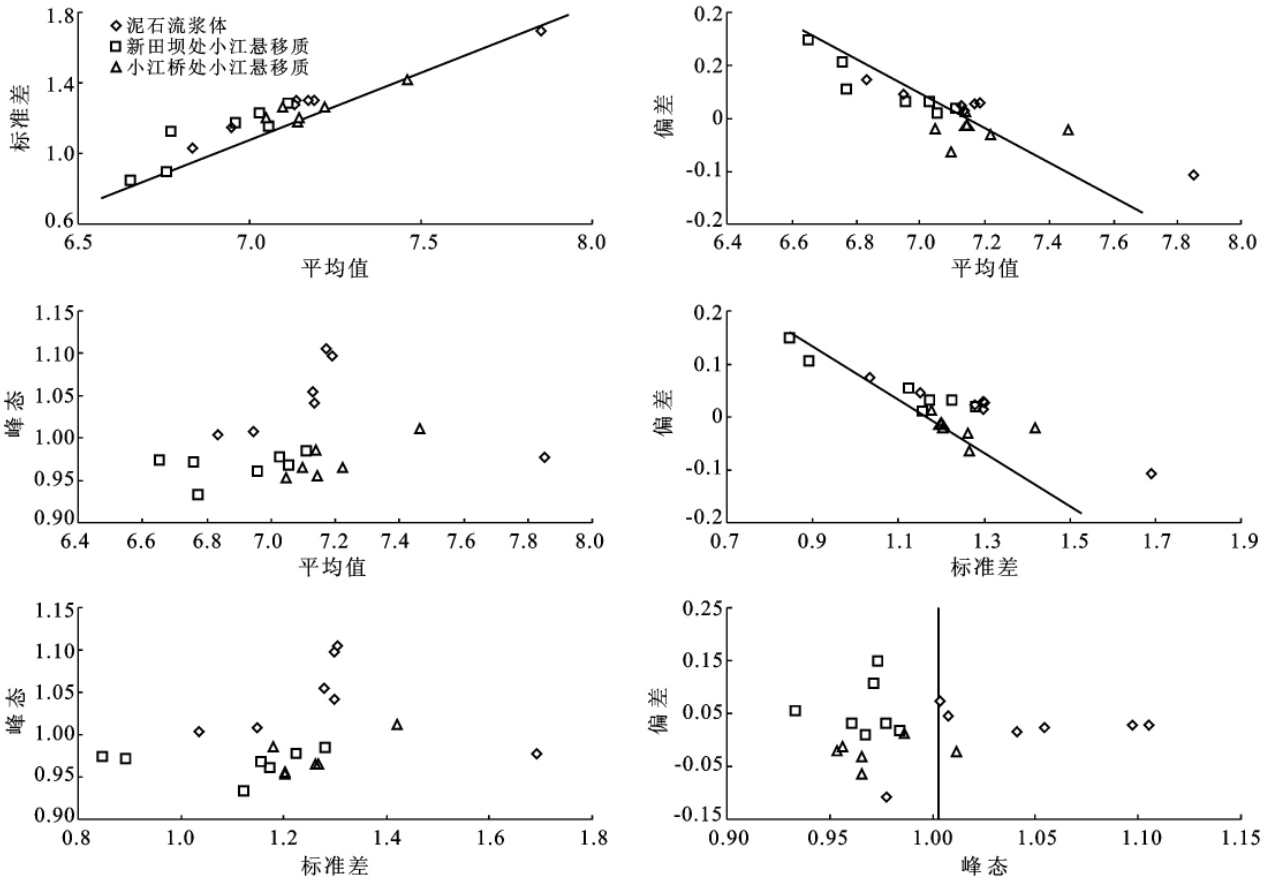


图 6 泥石流浆体、新田坝处和小江桥处小江悬移质的各粒度参数之间关系

4 结论

(1) 蒋家沟泥石流汇入小江,直接造成了小江悬移质泥沙含沙量增大。从 2009 年的观测数据可知,在没有泥石流汇入小江的情况下,新田坝处的小江悬移质的含沙量基本保持在 4 kg/m^3 左右,仅有小幅波动,最大不超过 8 kg/m^3 。但在“20090804”泥石流暴发后,新田坝处的小江悬移质含沙量最大值达到了 39.3 kg/m^3 ,平均值 25.78 kg/m^3 。

显而易见,泥石流的汇入对小江悬移质含沙量影响很大。

(2) 由于本研究仅分析小江悬移质的输沙特征,因此只采集泥石流体中小于 0.25 mm 的浆体用于对比分析。从分析的结果可以看出,泥石流的汇入带来了较多的粗颗粒(粒径 $>0.062 \text{ mm}$)物质,因此新田坝的小江悬移质泥沙相比小江桥处的粗颗粒多,而细颗粒物质较少。

(3) 新田坝处的小江悬移质泥沙绝大部分来自于泥石流,造成了粒度平均值变小,但分选性又所提高,属于中等分选性。由于泥石流的汇入带来粗颗粒(粒径 $>0.062 \text{ mm}$)物质,因此新田坝处的小江悬移质泥沙此时属正偏,偏向粗颗粒端。

(4) 通过分析参数间的相关性以及关系曲线,可知来源于泥石流浆体和小江处悬移质泥沙的新田坝处小江悬移质泥沙几乎没有发生过明显的分选。借助这些曲线可以看出,尽管有泥石流汇入,但依然可以明显区分出挟沙水流和泥石流的浆体。

[参 考 文 献]

- [1] Umesh K, Haritashya, Amit Kumar, et al. Particle size characteristics of suspended sediment transported in meltwater from the Gangotri Glacier, central Himalaya: An indicator of subglacial sediment evacuation[J]. *Geomorphology*, 2010, 122: 140-152.
- [2] Smith B P G, Naden P S, Leeks G J L, et al. The influence of storm events on fine sediment transport, erosion and deposition within a reach of the River Swale, Yorkshire, UK[J]. *The Science of the Total Environment*, 2003, 314/315/316: 451-474.
- [3] Roberto Z, Flaviano C, Luca Z, et al. The effect of floods on the transport of suspended sediments and contaminants: A case study from the estuary of the Dese River (Venice Lagoon, Italy)[J]. *Environment International*, 2005, 31: 948-958.
- [4] Cui P, Wei F Q, Li Y. Sediment transported by debris flow to the lower Jinsha River[J]. *International Journal Research of Sediment*, 1999, 14(4): 67-71.
- [5] 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: 科学技术文献出版社重庆分社, 1987: 1-2.
- [6] 陈景武, 汪凯. 长江上游降雨特征与泥石流, 泥石流观测与研究[M]. 成都: 科学出版社, 1996: 116-119.
- [7] 王裕宜, 洪勇, 李昌志. 暴雨泥石流输沙年际变率的旋回性研究: 以云南东川蒋家沟泥石流为例[J]. *自然灾害学报*, 2000, 9(4): 99-104.
- [8] 李长安, 殷鸿福, 俞立中. 长江流域泥沙特点及对流域环境的潜在影响[J]. *长江流域资源与环境*, 2000, 10(9): 504-509.
- [9] 韩用顺, 崔鹏, 王道杰, 等. 泥石流滩地农业资源化开发与利用: 以蒋家沟为例[J]. *长江流域资源与环境*, 2009, 18(8): 753-758.
- [10] American Geophysical Union. Report on the subcommittee on sediment terminology [J], *Transactions American Geophysical Union*, 1947, 28(6): 936-938.
- [11] Robert L F, William C W. Brazos River bar [Texas]: A study in the significance of grain size parameters[J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1957, 27(1): 3-26.
-
- (上接第 14 页)
- [13] 常兆丰, 赵明, 韩福贵, 等. 民勤沙丘不同稳定性沙丘植被生境条件研究[J]. *干旱区研究*, 2004, 21(4): 384-388.
- [14] 杜建会, 严平, 丁连刚, 等. 民勤绿洲不同演化阶段白刺灌丛沙堆表面土壤理化性质研究[J]. *中国沙漠*, 2009, 29(2): 245-253.
- [15] 贾宝全, 张红旗, 张志强, 等. 甘肃省民勤沙丘土壤结皮理化性质研究[J]. *生态学报*, 2003, 23(7): 1442-1448.
- [16] 岳东霞, 巩杰, 熊友才, 等. 民勤县生态承载力动态趋势与驱动力分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2010(6): 37-44.
- [17] 任明达, 王乃梁. 现代沉积环境概论[M]. 北京: 科学出版社, 1985: 8-26, 160-161.
- [18] Lancaster N. *Geomorphology of Desert Dunes*[M]. London: Routledge, 1995: 526.
- [19] 哈斯, 庄燕美, 王蕾, 等. 毛乌素沙地南缘横向沙丘粒度分布及其对风向变化的响应[J]. *地理科学进展*, 2006, 25(6): 42-51.
- [20] Pye K. Negatively skewed aeolian sands from humid tropical coastal dune field Northern Australia[J]. *Sedimentary Geology*, 1982, 31: 249-266.