

引用格式:岳梦,刘希林. 崩岗泥砂流流体和流动特性及其输沙研究——以广东德庆县径深崩岗为例[J]. 山地学报,2022,40(6):859-874.
YUE Meng, LIU Xilin. Hydrodynamic properties of Benggang-related mud-sand flow and sediment yield: A case study of Jingshen mud-sand flow at Deqing county of Guangdong, China [J]. Mountain Research, 2022, 40(6):859-874.

崩岗泥砂流流体和流动特性及其输沙研究 ——以广东德庆县径深崩岗为例

岳梦,刘希林*

(中山大学 地理科学与规划学院,广州 510006)

摘 要:崩岗泥砂流是崩岗流域的主要侵蚀和搬运营力,由其输送至崩岗流域外的泥沙对华南地区的生产、生活及生态造成严重影响。然而,泥砂流的发生具有突发性,对其进行现场观测和采样较困难,对泥砂流的物理性质、运动过程以及输沙情况尚不清晰。本研究通过对广东德庆县径深崩岗泥砂流进行野外观测与采样分析,得出其流体特性、流动特性和输沙特征。结果表明:(1)泥砂流平均容重为 1.10 t/m^3 ,平均中值粒径为 0.113 mm ,粒度分布曲线多为双峰型;(2)泥砂流平均含沙量为 155.15 kg/m^3 ,属于高含沙水流;泥砂流平均输沙率为 5.15 kg/s ,累计最大输沙量达 $26\,998 \text{ kg}$;(3)泥砂流以急紊流为主,水动力学参数弗汝德数、雷诺数、水流剪切力、水流功率和单位水流功率与泥砂流输沙量和输沙率呈正相关关系,糙率系数与泥砂流输沙量和输沙率呈负相关关系,阻力系数与泥砂流输沙率呈负相关关系;(4)泥砂流输沙量和输沙率随着降雨量和降雨强度的增大而增大。本文可以为解决华南崩岗侵蚀导致的生态环境问题提供科学依据。

关键词:崩岗泥砂流;野外观测;水动力学参数;高含沙水流;输沙特征;广东

中图分类号: P934; S157.1

文献标志码: A

崩岗侵蚀是华南严重的土壤侵蚀类型,已成为该地区的“生态溃疡”^[1]。2004—2005 年调查统计显示,广东省崩岗数量约 10.8 万个,面积约 827.5 km^2 ,分别占南方 7 省(区)总数和总面积的 45.1% 和 67.8%^[2]。崩岗侵蚀产生的泥沙淤积危害土地资源、水库、道路、村落和生命财产安全^[3]。因此,研究泥砂流及其输沙特征,对崩岗侵蚀治理工作具有重要意义。

泥砂流流体类型是泥砂流研究的重点。早期,广东花岗岩崩岗地区的高含沙水流被称为“华南高含沙水流”^[4],后有专项研究证实这种高含沙水流

还可能转化为崩岗型泥石流,并通过与泥石流容重和粒度的对比分析,建议将其归为广义泥石流大类中的一个亚类,命名为“泥砂流”^[5-6]。近几年来,广东花岗岩地区崩岗沟谷演化被分为“雏形-成长-成熟-老化”4 个阶段,泥砂流在“成长”阶段产生,可以是低含沙水流,也可以是高含沙水流^[7]。此外,泥砂流也被认为类似于小型稀性泥石流,是崩积土体在降雨作用下产生的沟道流^[8]。可见,泥砂流流体性质的研究还需要更多实证案例。

水动力学参数是研究流体运动特性的主要指标,已被运用到崩岗集水坡面^[9]、崩壁^[10]和崩积

收稿日期(Received date): 2022-07-26;改回日期(Accepted date): 2022-12-13

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金(41971006)。[National Natural Science Foundation of China (41971006)]

作者简介(Biography): 岳梦(1996-),女,云南昭通人,硕士研究生,主要研究方向:地貌过程与灾害防治。[YUE Meng (1996-), female, born in Zhaotong, Yunnan province, M. Sc. candidate, research on geomorphic processes and disaster prevention] E-mail: yuem@mail2.sysu.edu.cn

* 通讯作者(Corresponding author): 刘希林(1963-),男,湖南邵阳人,博士,教授,主要研究方向:灾害地貌过程及评估。[LIU Xilin(1963-), male, born in Shaoyang, Hunan province, Ph. D., professor, research on geomorphic hazard processes and evaluation] E-mail: liuxilin@mail.sysu.edu.cn

体^[11-12]侵蚀研究中,包括雷诺数、弗汝德数、阻力系数、糙率系数、水流剪切力、水流功率和单位水流功率等。然而,崩岗泥砂流的水动力学特征尚不是很明确,还需进一步探究。20 世纪 80 年代开始,崩岗流域径流产沙输沙研究受到关注。崩积体坡面产流产沙的研究多采用人工模拟降雨试验和室内放水冲刷试验,探究崩积体坡面径流的径流量、产沙量和输沙能力及其影响因素等^[13-15]。泥砂流产沙输沙方面,多使用传统观测技术和现代高精度设备来开展研究。早期研究通过布设淤积桩、溢洪道和三级分流池等监测崩岗及其内部径流输沙情况^[16-18]。随着崩岗研究领域信息化技术的运用^[19],可利用三维激光扫描仪和无人机获取侵蚀沟的地形信息^[20-21]。已有研究表明,大暴雨下崩岗平均产沙量高达 15 421 kg^[18],使崩岗侵蚀成为崩岗流域泥沙的主要来源^[17],其中,崩积体再次侵蚀的产沙量可占崩岗流域总输沙量的 86%^[16],崩岗沟道侵蚀量占崩岗流域侵蚀量的 53.6%^[20],甚至可达 75.58%^[21]。因此,崩积体和泥砂流产沙输沙是目前研究的重点,但尚未聚焦于泥砂流发生发展过程中的输沙变化规律。

泥砂流是崩岗流域泥沙输移的重要载体和主要方式^[5],其发生的突发性使泥砂流研究的野外工作成为崩岗侵蚀研究的难点所在。本文旨在通过现场观测自然降雨条件下崩岗泥砂流的形成和运动过程,采集泥砂流流体样品,测定泥砂流流体宽度(简称流宽)、流深和流速及计算其流量,分析泥砂流样

品的物理性质,阐释泥砂流的流体特性、流动特性和输沙特征,为进一步认知泥砂流在崩岗侵蚀输沙中的作用提供科学参考。

1 径深崩岗及其自然地理概况

径深崩岗(23°15'8"N,111°49'6"E)位于广东德庆县官圩镇五福村(图 1)。德庆是广东崩岗侵蚀最严重的地区之一,县内花岗岩出露面积 1502.1 km²,厚度 30~60 m,境内崩岗均发育在花岗岩全风化带和强风化带上^[22-23]。官圩镇主要出露侏罗系黑云母花岗岩(图 2);地形多为山地丘陵,平均海拔 350 m;土壤以红壤和赤红壤为主;气候属亚热带季风气候,多年平均气温 23℃,年平均降雨量 1760 mm;境内河道属西江水系^[24-25]。

径深崩岗主沟长约 140 m,平均沟床纵比降为 6.5%,土体容重 1.06~1.43 t/m³,土体为含砾粗砂土(《土的工程分类标准》(GB/T50145-2007)),粗粒含量 73.35%~95.08%,细粒含量 4.92%~26.65%,平均中值粒径 0.416 mm,主要矿物为高岭石、石英和白云母^[26]。径深崩岗发育形态较为完整。据德庆气象站(站号 59269)降水资料,雨季(4—9 月)降水量占全年降水量的 76.9%,以中雨居多,占 60.5%,大雨和暴雨及以上分别占 10.1%和 4.3%。2021 年降水量 1146.6 mm,降水日数 132 d,其中雨季小雨 58 d、中雨 16 d、大雨 5 d、暴雨 4 d,降雨量分别占 18.9%、30.7%、19.7%、30.7%,

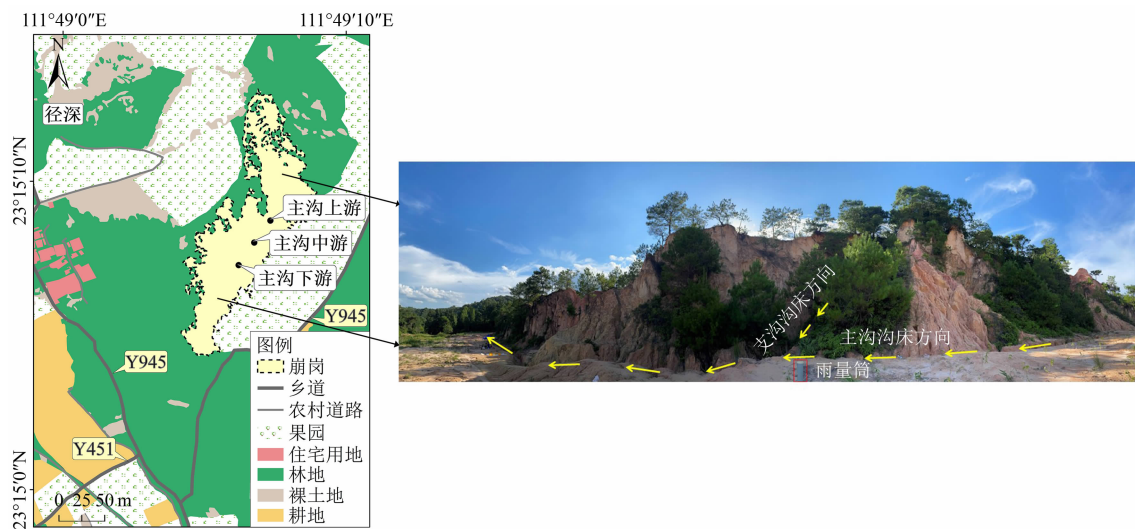


图 1 广东德庆县径深崩岗位置图

Fig. 1 Location of Benggang-related mud-sand flows happened at Jingshen village, Deqing county, Guangdong province, China

雨季常有泥砂流发生,是研究泥砂流较好的场所。

2 观测采样和实验方法

设计的4条观测(采样)断面分别位于主沟上游、上游支沟、主沟中游、主沟下游,断面编号分别为

I、II、III、IV。主沟断面之间距约30~32 m,断面I附近放置雨量筒(型号16022,吴江和顺教学仪器厂)(图3)。由于观测沟道长度仅140 m,且雨量筒位于上游最高处,故认为其观测雨量值可以近似代表各断面的雨量值。

用秒表记录降雨时间、泥砂流启动和(观测)结

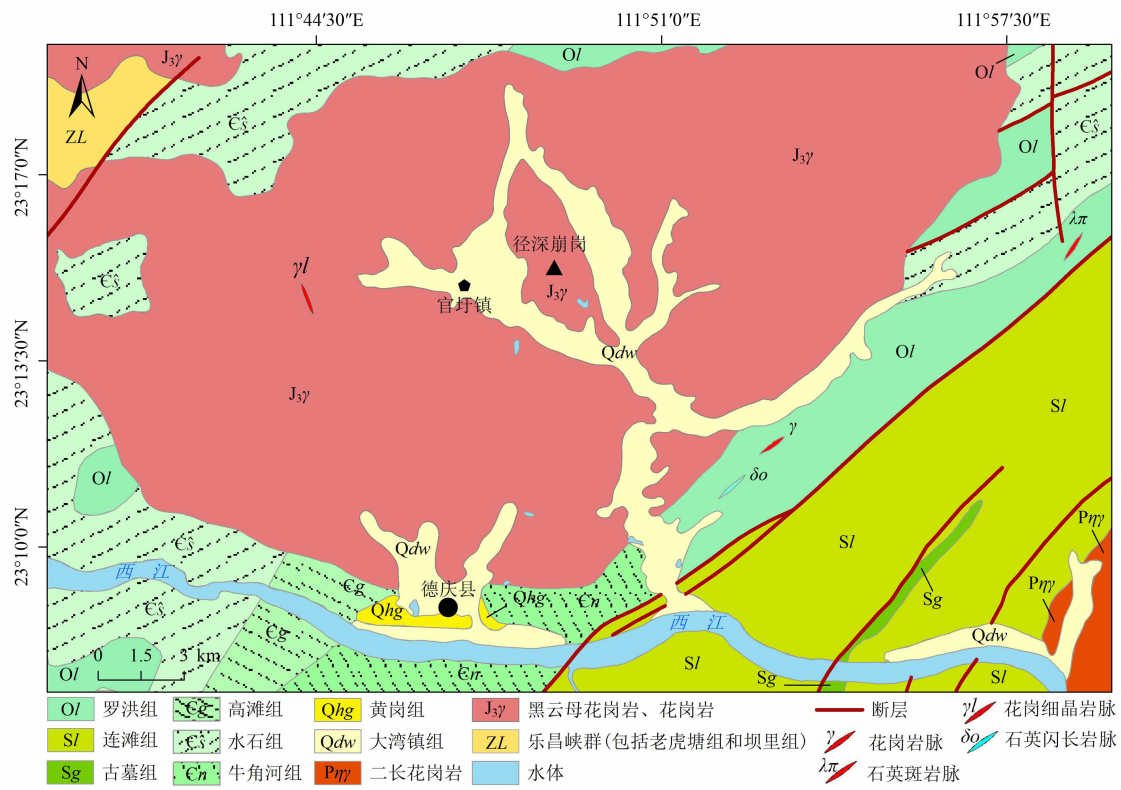


图2 广东德庆县官圩镇及其附近地区地质图

Fig. 2 Geologic map of Guanxu town, Deqing county, Guangdong province, China and its adjacent regions



图3 径深崩岗泥砂流观测(采样)断面及野外现场:(a)观测(采样)断面示意图;(b)观测和采样工作照

Fig. 3 sampling sections and field observation sites located at the Jingshen mud-sand flow:

(a) schematic diagram of observation (sampling) sites; (b) photo of field work

束时间。用刻度钢尺测量 4 个断面的泥砂流流宽和流深。用乒乓球结合秒表测定流速。流深取左、中、右 3 个部位的平均值。记录乒乓球在断面上下各 2 m 共计约 4 m 的区间内的漂流时间,计算得到该断面的平均表面流速。在各断面提前准备观测和采样工具,发生降雨时立即记录降雨开始时间,待泥砂流形成并贯通整个主沟后,由雨量观测记录员发出手势指令,4 个断面的观测人员同步测量数据并对泥砂流采样。采样器为一端开口的长宽深分别为 21.7 cm、9.4 cm、23.8 cm (体积约 4.9 L) 的方形塑料桶,在沟道中间贴近底部采集泥砂流流体样品约 2 L,带回室内称重,计算泥砂流容重。样品静置过夜后,除去上清液,装入塑料密封袋,带回实验室进行测试。两场泥砂流共观测和采样 6 次,获得泥砂流流体样品 24 个。

实验室测试泥砂流流体样品的含沙量、比重和颗粒级配。含沙量用烘干法测定。泥沙比重用比重瓶法测定。泥沙颗粒级配的质量百分比用筛析法(粒径 >0.075 mm)和吸管法(粒径 ≤ 0.075 mm)测定。泥沙质量用电子天平计量。

3 观测实验分析结果

3.1 泥砂流形成过程及观测结果

2021 年 8 月 10 日 14:18 流域内出现降雨,降雨量 15.7 mm,历时 42.8 min,平均降雨强度 0.37 mm/min。14:33 泥砂流启动,支沟亦有小股

径流汇入主沟。14:36 泥砂流贯通主沟,进行第一次测量和采样。由表 1 可知,断面 I→III→IV,泥砂流平均表面流速增大、流宽扩宽、平均流深有所减小。此时主沟上游产流增多,泥砂流沿途汇集坡面流水,主沟流量自上游向下游逐渐增大,泥砂流处于初期阶段。14:50 进行第二次测量和采样,此时降雨开始减弱。主沟断面泥砂流流宽和平均流深变小,平均表面流速和流量虽仍自上游向下游增大,但也已明显减小,泥砂流进入末期阶段。15:00 降雨进一步减弱,泥砂流终止。

2021 年 8 月 13 日 18:12 流域内出现降雨,降雨量 70.1 mm,观测时长 52.8 min (观测结束时降雨仍未结束),观测期间平均降雨强度 1.33 mm/min。18:23 泥砂流启动,沿途有坡面径流汇入主沟(图 4a),降雨开始至泥砂流启动期间,平均降雨强度为 0.23 mm/min。本场观测共进行 4 次测量和采样,时间分别为 18:25、18:29、18:35、18:43。从泥砂流启动至第四次测量和采样期间,每 2 次测量和采样之间为一个阶段,可分为 4 个阶段,各阶段的平均降雨强度分别为 1.21、1.28、1.40、1.53 mm/min,分别对应泥砂流的初期阶段(图 4b)、发展阶段(图 4c)、充分发展阶段和鼎盛发展阶段(图 4d)。4 次测量的主沟流量均自上游至下游逐渐增大(表 1)。19:05 天色已晚,因无夜间观测设备,出于安全考虑,泥砂流观测工作停止。第四次测量和采样至停止泥砂流观测期间,平均降雨强度高达 1.78 mm/min,泥砂流仍在进一步发展之中。



图 4 2021 年 8 月 13 日径深崩岗泥砂流观测现场:

(a) 坡面片流汇入主沟;(b) 第一次观测和采样;(c) 第二次观测和采样;(d) 第四次观测和采样

Fig. 4 In situ surveying and sampling during the event of the Jingshen mud-sand flow on August 13, 2021:

(a) surface flow into the main channel; (b) sampling and monitoring at first time;

(c) sampling and monitoring at second time; (d) sampling and monitoring at fourth time

表 1 主沟观测(采样)断面观测数据
Tab. 1 Observation data collected at sections of main channel

观测日期	观测次序	断面编号	流速/(cm·s ⁻¹)	流宽/cm	平均流深/cm	流量/(m ³ ·s ⁻¹)
2021-08-10	1	I	44	35	3.8	5.85×10 ⁻³
		III	44	84	2.4	8.87×10 ⁻³
		IV	47	90	2.2	9.31×10 ⁻³
	2	I	24	31	2.0	1.49×10 ⁻³
		III	26	77	1.2	2.40×10 ⁻³
		IV	26	71	1.5	2.77×10 ⁻³
2021-08-13	1	I	73	60	3.6	1.58×10 ⁻²
		III	87	95	2.6	2.15×10 ⁻²
		IV	80	92	4.0	2.94×10 ⁻²
	2	I	109	68	6.7	4.97×10 ⁻²
		III	145	97	4.8	6.75×10 ⁻²
		IV	125	92	7.3	8.40×10 ⁻²
	3	I	135	72	6.6	6.42×10 ⁻²
		III	158	99	5.7	8.92×10 ⁻²
		IV	132	98	7.4	9.57×10 ⁻²
	4	I	143	72	7.2	7.41×10 ⁻²
		III	172	101	5.8	1.01×10 ⁻¹
		IV	145	109	7.6	1.20×10 ⁻¹

3.2 泥砂流流体特性

泥砂流流体容重、含沙量和粒度见表 2。径深崩岗泥砂流容重为 1.02~1.22 t/m³, 平均为 1.10 t/m³, 最大值为 1.22 t/m³ 和 1.20 t/m³。2021 年 8 月 10 日的泥砂流流体样品颗粒较细, 粉粒和粘粒含量为 28.00%~91.89%, 平均含量为 75.45%, 平均中值粒径为 0.062 mm。2021 年 8 月 13 日的泥砂流流体样品粒度明显变粗, 砂粒含量为 22.02%~74.41%, 平均含量为 49.05%, 平均中值粒径为 0.139 mm。这与两次触发泥砂流的降雨量和降雨强度导致的泥砂流挟沙能力直接有关。第一次降雨量和降雨强度小, 泥砂流挟沙能力弱, 主要搬运细粒物质; 第二次降雨量和降雨强度大, 泥砂流挟沙能力增强, 由细颗粒和清水组成的浆体成为泥砂流的骨架, 使粗颗粒悬浮重量减小、含量明显增加^[4]。

2021 年 8 月 10 日第一次采样时泥砂流尚处在发展初期, 其余 5 次采样的泥砂流粒度分布曲线大多表现为双峰型(图 5), 这是因为泥砂流具有高含沙水流或类似于稀性泥石流的特性而非一般的沟谷

洪水, 其粒度组成是水力和重力共同作用的结果^[5]。两场泥砂流的粒径峰值分别位于粉粒段(0.075~0.005 mm)和粗砂段(2~0.5 mm), 粉粒段的粒径峰值高于粗砂段的粒径峰值。这与广东五华县莲塘崩岗泥砂流的粉粒集中于 0.01 mm 和粗砂集中于 1 mm 是一致的^[5]。泥砂流发育过程中, 相比主沟 3 个断面, 断面 II 泥砂流的粉粒段峰值总是明显高于粗砂段, 这是因为支沟流量小, 优先搬运细颗粒泥沙。

3.3 泥砂流流动特性

3.3.1 水动力学参数

泥砂流流动特性可以用若干水动力学参数来表征。其中, 泥砂流流态可用弗汝德数 Fr 和雷诺数 Re 判定。当 $Fr < 1$ 、 $Fr > 1$ 和 $Fr = 1$ 时, 明渠水流分别为缓流、急流和临界流; $Re < 575$ 为层流, $575 < Re < 5000$ 为过渡流、 $Re > 5000$ 为紊流^[27], 经验表达式^[28]如下:

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gh}} \tag{1}$$

表 2 径深崩岗泥砂流及其粒度特性
Tab.2 Particle size characteristics of the Jingshen mud-sand flow

采样日期	断面 编号	采样 次序	流体容重/ (t·m ⁻³)	泥沙 比重	不同粒径泥沙颗粒的质量百分比/%						中值 粒径/ mm
					砾粒 >2 mm	粗砂 2 ~ 0.5 mm	中砂 0.5 ~ 0.25 mm	细砂 0.25 ~ 0.075 mm	粉粒 0.075 ~ 0.005 mm	粘粒 ≤0.005 mm	
2021-08-10	I	1	1.03	2.67	0	0.16	3.03	19.39	49.55	27.87	0.029
		2	1.04	2.63	0	0.10	1.01	9.08	57.45	32.36	0.022
	II	1	1.03	2.64	0	0.04	0.32	8.09	58.56	32.99	0.021
		2	1.02	2.64	0	0.22	0.25	8.30	58.71	32.52	0.021
	III	1	1.07	2.66	0	0.14	1.57	23.97	47.21	27.11	0.031
		2	1.11	2.65	3.12	36.51	16.20	16.17	14.51	13.49	0.301
	IV	1	1.05	2.65	0	0.40	0.18	7.53	59.00	32.89	0.021
		2	1.12	2.62	0.22	23.56	5.00	11.84	39.77	19.61	0.047
2021-08-13	I	1	1.07	2.64	2.37	20.97	11.15	16.31	27.36	21.84	0.079
		2	1.09	2.65	3.03	25.39	7.49	17.92	29.33	16.84	0.097
		3	1.15	2.67	2.51	30.54	18.35	17.70	16.21	14.69	0.264
		4	1.18	2.65	2.98	45.04	12.29	13.26	14.95	11.48	0.444
	II	1	1.04	2.62	0	1.15	2.57	20.95	51.10	24.23	0.032
		2	1.05	2.65	0.04	6.46	9.21	25.92	38.56	19.81	0.051
		3	1.10	2.64	0.51	22.16	12.83	19.87	25.35	19.28	0.109
		4	1.10	2.65	0.18	7.66	5.80	24.60	38.81	22.95	0.044
	III	1	1.11	2.65	4.58	16.79	9.45	18.58	34.72	15.88	0.072
		2	1.11	2.64	4.77	26.01	5.11	17.48	28.68	17.95	0.095
		3	1.08	2.66	0.01	0.29	1.14	20.59	55.58	22.39	0.031
		4	1.10	2.64	0.01	0.70	3.09	24.50	61.21	10.49	0.040
	IV	1	1.09	2.62	0.89	20.14	10.32	13.79	31.94	22.92	0.055
		2	1.22	2.67	2.79	42.33	14.74	17.34	19.47	3.33	0.374
		3	1.20	2.63	2.03	38.58	16.85	14.59	14.11	13.84	0.316
		4	1.17	2.65	0.66	19.90	14.69	22.23	25.56	16.96	0.120

$$Re = \frac{VR}{v} \tag{2}$$

式中, V 为平均流速 (m/s); g 为重力加速度, 取 9.8 m/s^2 ; h 为平均水深 (m); R 为水力半径 (m); v 为清水的运动粘滞系数 (m^2/s), 主要与水温有关, 水温由其测算的气候方法得到^[29]。计算含沙水流的雷诺数时, 式 (2) 中的 v 要用浑水运动粘滞系数 v_m 代替, 计算公式^[30] 为:

$$v_m = \frac{v}{1 - \frac{S_v}{2\sqrt{d_{50}}}} \tag{3}$$

式中, S_v 为体积含沙量百分数 (%), $S_v = S/\rho_s$, S 为含沙量 (kg/m^3), ρ_s 为泥沙密度 (kg/m^3); d_{50} 是泥沙的中值粒径 (mm)。

阻力系数 f 和糙率系数 n 用来描述沟道对水流的阻力, 计算公式^[28,31] 为:

$$f = \frac{8gRJ}{V^2} \tag{4}$$

$$n = \frac{R^{2/3}J^{1/2}}{V} \tag{5}$$

式中, J 为水流能坡, 近似为坡度的正切值, 此处为主沟的平均沟床纵比降。

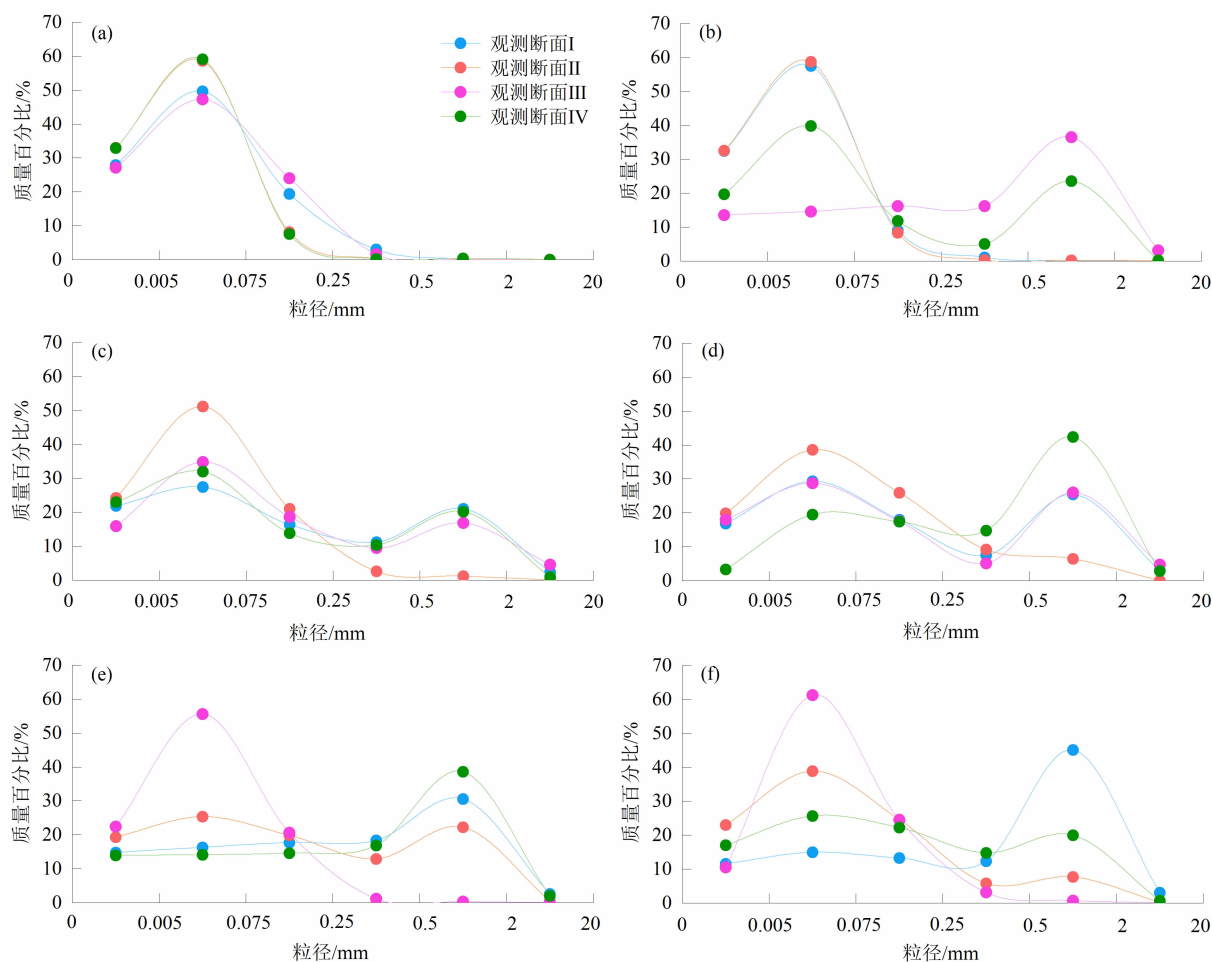


图5 径深崩岗泥砂流粒度分布曲线:(a) 2021年8月10日第一次采样;(b) 2021年8月10日第二次采样;(c) 2021年8月13日第一次采样;(d) 2021年8月13日第二次采样;(e) 2021年8月13日第三次采样;(f) 2021年8月13日第四次采样

Fig. 5 Grain size distribution curve of the Jingshen mud-sand flow: (a) sampling at first time on August 10, 2021;

(b) sampling at second time on August 10, 2021; (c) sampling at first time on August 13, 2021; (d) sampling at second time on

August 13, 2021; (e) sampling at third time on August 13, 2021; (f) sampling at fourth time on August 13, 2021

径流侵蚀力通常用水流剪切力、水流功率和单位水流功率来表达,计算公式^[32-34]如下:

$$\tau = \gamma R J \quad (6)$$

$$\omega = \tau V \quad (7)$$

$$P = V J \quad (8)$$

式中, τ 为水流剪切力(Pa); γ 为流体容重(kg/m^3); ω 为水流功率($\text{N}/(\text{m} \cdot \text{s})$); P 为单位水流功率(m/s)。

3.3.2 流动特性

由表3可知,2021年8月10日泥砂流除断面IV第一次观测外,其余断面的 $Fr < 1$,均为缓流,表明该场泥砂流流速较小;2021年8月13日泥砂流除断面II第二次观测外,其余断面的 $Fr > 1$,均为急流。因此,泥砂流可以是缓流,但以急流为主。两场泥砂流各断面的观测结果大多显示 $Re > 5000$,表明

泥砂流以紊流为主要流动特征。主沟3个断面两场泥砂流的 f 的平均值分别为0.91和0.18, n 的平均值分别为0.054和0.028,因而第一场泥砂流流速远小于第二场。主沟3个断面第二场泥砂流的 τ 、 ω 和 P 均大于第一场,因而侵蚀力也远大于第一场。两场泥砂流流动特性存在差异的主要原因是触发第二场泥砂流的降雨量和降雨强度大,泥砂流流速、流深和水力半径大,水流急、紊动强度大且所受阻力小,所以同一断面的径流侵蚀力也相应较大。

3.4 泥砂流输沙特征

3.4.1 输沙量和输沙率

泥砂流输沙特征可用输沙量和输沙率表征。输沙量表达为某一测量时刻泥砂流的径流量与其平均

表 3 径深崩岗泥砂流水动力学参数
Tab. 3 Hydrodynamic parameters of the Jingshen mud-sand flow

观测日期	断面 编号	观测 次序	弗汝德数 Fr	雷诺数 Re	阻力系数 f	糙率系数 n	水流剪切力 τ/Pa	水流功率 $\omega/[\text{N} \cdot (\text{m} \cdot \text{s})^{-1}]$	单位水流功率 $P/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
2021-08-10	I	1	0.72	16 852	0.82	0.057	2.09	0.92	0.03
		2	0.54	5069	1.57	0.072	1.20	0.29	0.02
	II	1	0.87	11 503	—	—	—	—	—
		2	0.52	3133	—	—	—	—	—
	III	1	0.91	11 414	0.60	0.046	1.58	0.69	0.03
		2	0.76	3695	0.88	0.050	0.84	0.22	0.02
	IV	1	1.01	11 539	0.48	0.041	1.43	0.67	0.03
		2	0.68	4050	1.08	0.058	1.04	0.27	0.02
2021-08-13	I	1	1.23	28 990	0.31	0.035	2.23	1.62	0.05
		2	1.35	73 708	0.24	0.034	3.98	4.34	0.07
		3	1.68	91 164	0.16	0.028	4.18	5.65	0.09
		4	1.70	104 668	0.15	0.027	4.61	6.59	0.09
	II	1	1.07	12 924	—	—	—	—	—
		2	0.90	34 900	—	—	—	—	—
		3	1.06	41 467	—	—	—	—	—
		4	1.09	41 568	—	—	—	—	—
	III	1	1.72	25 112	0.17	0.025	1.77	1.54	0.06
		2	2.11	75 106	0.11	0.022	3.15	4.57	0.09
		3	2.11	92 779	0.10	0.022	3.59	5.67	0.10
		4	2.28	100 441	0.09	0.021	3.73	6.41	0.11
	IV	1	1.28	34 447	0.29	0.035	2.61	2.09	0.05
		2	1.48	93 455	0.21	0.032	5.00	6.24	0.08
		3	1.55	100 499	0.19	0.031	5.02	6.62	0.09
		4	1.68	109 931	0.16	0.029	5.06	7.33	0.09

含沙量的乘积^[28]。径流量是流量过程线和径流历时的函数。泥砂流径流量可近似表达为某一测量时刻测流断面泥砂流平均流量与其历时的乘积。第一次测量时泥砂流平均流量用第一次测定的泥砂流流量近似代替,后续测量时泥砂流平均流量则用前一次或几次测定的泥砂流流量的平均值近似代替。平均含沙量的计算与平均流量相同。输沙率反映泥砂流侵蚀和搬运能力,定义为某一测量时刻单位时间内通过某一测流断面的泥沙重量,表达为泥砂流平均流量与其平均含沙量的乘积^[35]。

3.4.2 输沙特征

由表 4 可见,两场泥砂流的径流量自主沟上游

向下游逐渐增大,因为泥砂流沿途接纳了坡面水流和支沟汇流。泥砂流含沙量总体表现为主沟比支沟大、下游比上游大、后续测量的比前次测量的大。输沙量变化与径流量和含沙量变化基本一致,总体呈现出自主沟上游向下游增大的趋势。某次观测的某个断面的输沙量出现异常变化,与该断面上游附近出现沟壁坍塌导致其含沙量变化有关(图 6)。输沙率时空变化规律较为明显,总体表现与含沙量变化一致,说明泥砂流自上游向下游以及在发育过程中侵蚀和搬运能力逐渐增强。输沙特征存在的差异主要是由随着降雨量和降雨强度的增大,泥砂流流速、流量和含沙量自上游向下游及其在发育过程中逐渐

表 4 径深崩岗泥砂流输沙特征

Tab. 4 Sediment-yield characteristics of the Jingshen mud-sand flow

观测日期	断面 编号	观测 次序	流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	平均流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	历时/s	径流量/ m^3	含沙量/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	平均含沙量/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	输沙量/ kg	输沙率/ ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$)
2021-08-10	I	1	5.85×10^{-3}	5.85×10^{-3}	195	1.14	48.96	48.96	55.81	0.29
		2	1.49×10^{-3}	3.67×10^{-3}	1010	3.71	62.72	55.84	207.17	0.20
	II	1	2.86×10^{-3}	2.86×10^{-3}	195	0.56	48.35	48.35	27.08	0.14
		2	4.80×10^{-4}	1.67×10^{-3}	1010	1.69	33.23	40.79	68.94	0.07
	III	1	8.87×10^{-3}	8.87×10^{-3}	195	1.73	111.12	111.12	192.24	0.99
		2	2.40×10^{-3}	5.64×10^{-3}	1010	5.70	169.02	140.07	798.40	0.79
	IV	1	9.31×10^{-3}	9.31×10^{-3}	195	1.82	74.84	74.84	136.21	0.70
		2	2.77×10^{-3}	6.04×10^{-3}	1010	6.10	187.56	131.20	800.32	0.79
2021-08-13	I	1	1.58×10^{-2}	1.58×10^{-2}	168	2.65	105.42	105.42	279.36	1.67
		2	4.97×10^{-2}	3.28×10^{-2}	400	13.12	151.23	128.33	1683.69	4.21
		3	6.42×10^{-2}	4.32×10^{-2}	774	33.44	245.98	167.54	5602.54	7.24
		4	7.41×10^{-2}	5.10×10^{-2}	1203	61.35	292.49	198.78	12 195.15	10.14
	II	1	4.22×10^{-3}	4.22×10^{-3}	168	0.71	61.58	61.58	43.72	0.26
		2	1.58×10^{-2}	1.00×10^{-2}	400	4.00	75.25	68.42	273.68	0.68
		3	2.16×10^{-2}	1.39×10^{-2}	774	10.76	164.63	100.49	1081.27	1.40
		4	2.38×10^{-2}	1.64×10^{-2}	1203	19.73	161.24	115.68	2282.37	1.90
	III	1	2.15×10^{-2}	2.15×10^{-2}	168	3.61	170.38	170.38	615.07	3.66
		2	6.75×10^{-2}	4.45×10^{-2}	400	17.80	176.35	173.37	3085.99	7.71
		3	8.92×10^{-2}	5.94×10^{-2}	774	45.98	127.49	158.07	7268.06	9.39
		4	1.01×10^{-1}	6.98×10^{-2}	1203	83.97	165.05	159.82	13 420.09	11.16
	IV	1	2.94×10^{-2}	2.94×10^{-2}	168	4.94	147.86	147.86	730.43	4.35
		2	8.40×10^{-2}	5.67×10^{-2}	400	22.68	351.82	249.84	5666.37	14.17
		3	9.57×10^{-2}	6.97×10^{-2}	774	53.95	323.93	274.54	14 811.43	19.14
		4	1.20×10^{-1}	8.23×10^{-2}	1203	99.01	267.09	272.68	26 998.05	22.44

增大所致。

4 讨论

4.1 泥砂流与高含沙水流

含沙量及粒度特征是描述泥砂流流体性质的主要指标。高含沙水流与低含沙水流的区别主要是其流体性质已属于宾汉流体而非牛顿流体。高含沙水流被定义为含沙量 200 ~ 300 kg/m³ 及以上的挟沙水流^[36-37],也有研究将含沙量 200 kg/m³ 作为高含沙水流与非高含沙水流的界限^[38]。然而,对于一次降雨产生的挟沙水流,平均含沙量 > 150 kg/m³ 即

可认为是高含沙水流^[39]。在黄河支流以细沙为主的渭河流域中,当挟沙水流含沙量 > 50 kg/m³ 时便可转化为宾汉流体,因此高含沙水流的判定还应考虑影响水流流变特性的因素,而粒径 < 0.01 mm 的黏性细颗粒含量被认为是其中一个重要因素^[40]。当粒径 < 0.01 mm 的黏性细颗粒含量增大到一定数值时,水流就会从牛顿流体转化为非牛顿流体,即转化为高含沙水流^[36]。高含沙水流粒径 < 0.01 mm 的黏性细颗粒含沙量一般在 40 ~ 60 kg/m³^[41]。综上,建议当一次降雨产生的挟沙水流的平均含沙量 > 150 kg/m³ 和/或粒径 < 0.01 mm 的黏性细颗粒含沙量 > 40 kg/m³ 时,可认为是高含沙水流。例

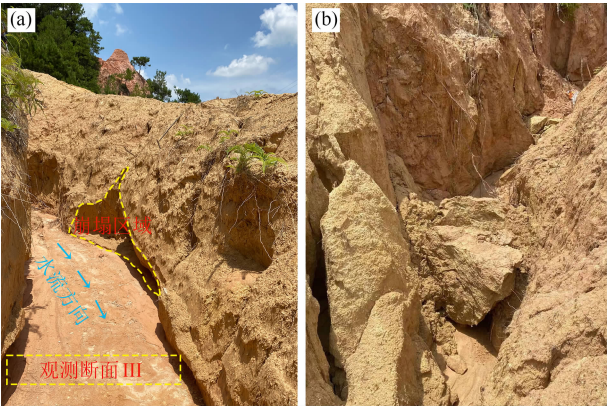


图 6 径深崩岗泥砂流侧向侵蚀导致主沟中游发生沟壁坍塌:(a)沟壁坍塌加大泥沙供给导致观测断面 III 的含沙量骤增;(b)观测断面 III 上游附近的沟岸崩塌导致沟床堵塞使得观测断面 III 的含沙量减小

Fig.6 A section of gully wall in the middle reaches of the main channel caving in due to lateral erosion of the Jingshen mud-sand flow: (a) sudden increase in sediment supply as a result of gully wall collapsing, leading to an increase observed in silt concentration at section III; (b) channel jam due to gully wall collapsing near the upstream of section III, leading to a drop in silt concentration at section III

如,在研究高含沙水流中细颗粒含量对粗颗粒输移的影响时,黏性细颗粒含量的起始值被设置为 35 kg/m^3 ,且当含沙量达到 $150\sim 200\text{ kg/m}^3$ 时,水流即可进入高含沙水流状态^[42]。

广东德庆县深涌流域崩岗沟道中由降雨产生的挟沙水流的含沙量多为 $400\sim 600\text{ kg/m}^3$,属于高含沙水流^[4]。广东五华县莲塘岗崩岗主支沟 8 个泥砂流样品的含沙量为 $257.03\sim 960.55\text{ kg/m}^3$,平均 465.52 kg/m^3 ,显然已达到高含沙水流标准,且其最大容重 1.60 t/m^3 已接近于稀性泥石流的范畴^[5]。广东德庆县径深崩岗主支沟 24 个泥砂流样品的含沙量为 $33.23\sim 351.82\text{ kg/m}^3$ (表 4),平均 155.15 kg/m^3 ,虽然比莲塘岗崩岗泥砂流小,但已达到平均含沙量 $>150\text{ kg/m}^3$ 的标准^[39]。此外,24 个泥砂流样品中有 11 个样品的粒径 $<0.01\text{ mm}$ 的黏性细颗粒含沙量 $>40\text{ kg/m}^3$ (表 5)。由此,可以将径深崩岗泥砂流定性为高含沙水流,这也印证了许炯心^[4]、张大林和刘希林^[5]的研究结论。

4.2 泥砂流流动特性及侵蚀力

沟道水流流态与降雨强度有关^[43]。径深崩岗泥砂流流态以急紊流为主,缓紊流仅出现在第一场降雨的上游支沟中,这是因为随着降雨强度增大,水流紊动性增强而进入高含沙水流流态(紊流型两相流)^[44]。径深崩岗泥砂流径流侵蚀力还与沟道地形有关,主沟沟床自上游至下游先变陡后减缓,尤以断面 III 及其附近沟床较陡,因此断面 III 较断面 I 和 IV 流深浅、流速大,其水流剪切力和水流功率较小、

表 5 径深崩岗泥砂流 $<0.01\text{ mm}$ 黏性细颗粒含沙量

Tab.5 Content of viscous fine particles with size $<0.01\text{ mm}$ in diameter in the Jingshen mud-sand flow

采样日期	断面编号	采样次序	质量百分比/%	含沙量/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	采样日期	断面编号	采样次序	质量百分比/%	含沙量/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
2021-08-10	I	1	40.32	19.74	2021-08-13	II	1	27.68	17.04
		2	50.20	31.49			2	34.47	25.94
	II	1	45.86	22.17			3	21.10	34.73
		2	47.33	15.73			4	29.41	47.43
	III	1	36.60	40.67		III	1	23.57	40.16
		2	15.88	26.85			2	21.64	38.17
	IV	1	44.60	33.38			3	37.81	48.21
		2	31.15	58.42			4	31.02	51.20
2021-08-13	I	1	25.38	26.76	IV		1	29.40	43.47
		2	22.84	34.54			2	16.82	59.18
		3	17.48	42.99			3	18.86	61.10
		4	13.09	38.29			4	21.51	57.44

单位水流功率较大;上游支沟汇水面积较小,所以断面Ⅱ的径流侵蚀力小于主沟各断面。

冲沟径流的水动力学特征与产沙效应之间具有相关关系^[28]。本研究中(表6),泥砂流的弗汝德数、雷诺数、水流剪切力、水流功率和单位水流功率均与泥砂流输沙量和输沙率呈极显著正相关,阻力系数与泥砂流输沙量不相关,糙率系数与泥砂流输沙量呈显著负相关,但阻力系数和糙率系数与泥砂流输沙率呈极显著负相关。泥砂流输沙能力与其流态的关系表现为,当泥沙颗粒重力作用减弱时,紊动扩散作用处于优势地位,使泥砂流挟沙力增大、以悬浮状态挟带粗颗粒的能力加强^[36]。当糙率系数和阻力系数减小时,说明水流功耗减少、动能增大、泥砂流输沙能力提高。当泥砂流径流侵蚀力

越大,输沙能力就越强。与此同时,泥砂流的“揭底”作用,使泥沙在沟床中掀起,然后被泥砂流搬运带走,加速了沟道的下切侵蚀^[45]。

4.3 降雨对泥砂流输沙量和输沙率的影响

广东德庆县深涌崩岗流域内,平均降雨强度 $>0.5\text{ mm/min}$ 即可形成高含沙水流;广东梅县平均降雨强度 $>1.1\text{ mm/min}$ 时,崩岗沟谷水流的含沙量已达到高含沙水流的标准^[4]。本研究中,径深崩岗第二场泥砂流的平均降雨强度为 1.33 mm/min ,且记录了4个时段的降雨量和降雨强度,能够用于展示降雨对泥砂流输沙量和输沙率的影响。

由图7可知,降雨量无论是对输沙量还是输沙率都有显著影响且互为正变关系,即泥砂流输沙量

表6 径深崩岗泥砂流水动力学参数与输沙量和输沙率的相关系数

Tab. 6 Correlation coefficient of hydrodynamic parameters and sediment yield and sediment yield rate of the Jingshen mud-sand flow

输沙参数	相关系数						
	Fr	Re	f	n	τ	ω	P
输沙量	0.59 **	0.80 **	-0.46	-0.47 *	0.75 **	0.81 **	0.68 **
输沙率	0.69 **	0.88 **	-0.60 **	-0.60 **	0.88 **	0.90 **	0.78 **

注: ** 显著性水平为 $p < 0.01$; * 显著性水平为 $p < 0.05$ 。

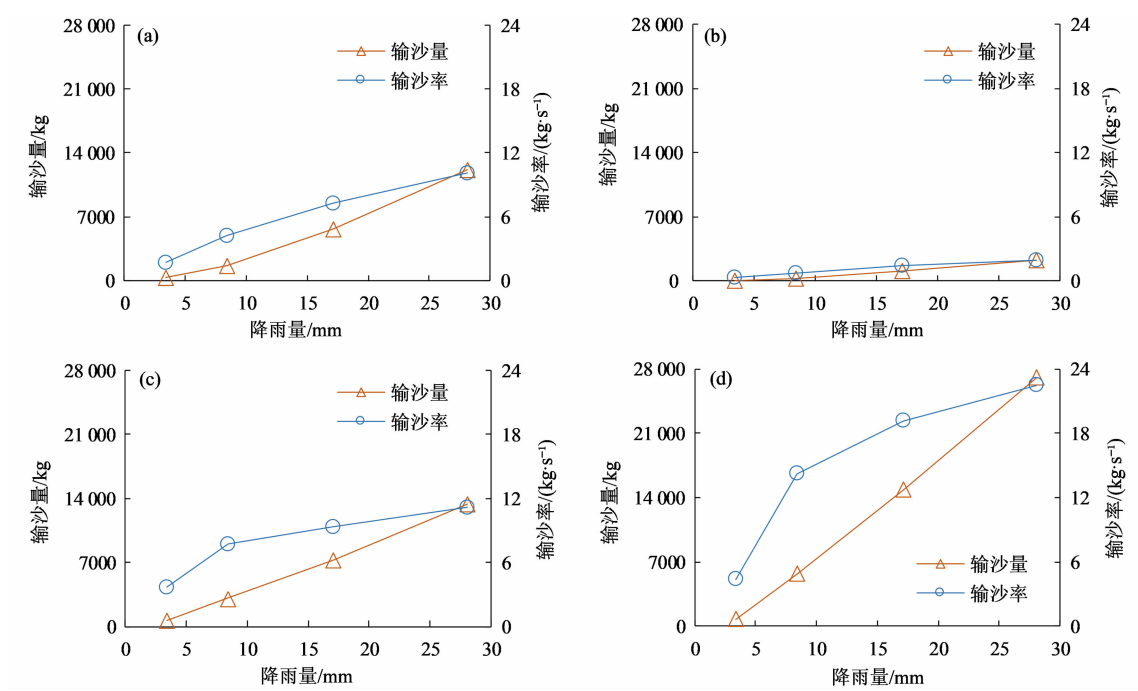


图7 降雨量对泥砂流输沙量和输沙率的影响(2021年8月13日泥砂流):
(a) 观测断面Ⅰ;(b) 观测断面Ⅱ;(c) 观测断面Ⅲ;(d) 观测断面Ⅳ

Fig. 7 Influence of precipitation on sediment yield and sediment yield rate (the mud-sand flow event on August 13, 2021): (a) section I; (b) section II; (c) section III; (d) section IV

和输沙率随着降雨量的增大而增大,且主支沟均表现出相同的变化趋势。降雨强度对泥砂流输沙量和输沙率的影响亦表现出与降雨量相同的特征(图 8)。2021 年 8 月 13 日泥砂流,第四次观测时降雨量和降雨强度分别是第一次观测的 8.3 倍和 1.2 倍,其累计输沙量和输沙率分别为第一次观测的 37 倍和 5.2 倍。可见,降雨量和降雨强度是直接影响泥砂流输沙量和输沙率的重要因素。

5 结论

崩岗泥砂流是坡面径流汇合及崩塌物质补给形成的沟道流,目前仍处于探索阶段。从不同断面泥砂流各参数的变化中总结其基本特征能够为制定崩岗防治策略提供依据。本研究通过野外观测、采样和室内分析,得出广东德庆县径深崩岗泥砂流的流体和流动特性及输沙特征。主要研究结论为:

(1) 粤西径深崩岗泥砂流流体容重的范围为 $1.02 \sim 1.22 \text{ t/m}^3$ 、平均 1.10 t/m^3 , 中值粒径 $0.021 \sim 0.444 \text{ mm}$ 、平均 0.113 mm , 其容重最小值、最大值、平均值和中值粒径平均值均小于粤东北莲塘岗崩岗泥砂流。径深崩岗泥砂流粒度分布曲线多

为双峰型,在粒径 0.01 mm 和 1 mm 附近出现两个峰值,与莲塘岗崩岗泥砂流泥沙粒度分布曲线一致。

(2) 径深崩岗泥砂流以急紊流为主。代表泥砂流流态的弗汝德数和雷诺数与泥砂流输沙量和输沙率呈正相关关系。代表泥砂流侵蚀力的水流剪切力、水流功率和单位水流功率与泥砂流输沙量和输沙率亦呈正相关关系。代表泥砂流功耗的糙率系数与泥砂流输沙量和输沙率呈负相关关系,阻力系数与泥砂流输沙率呈负相关关系。

(3) 径深崩岗泥砂流流体含沙量的范围为 $33.23 \sim 351.82 \text{ kg/m}^3$, 平均含沙量 155.15 kg/m^3 , 比莲塘岗崩岗泥砂流平均含沙量小,但仍达到了 $>150 \text{ kg/m}^3$ 的高含沙水流标准,且 24 个泥砂流样品中有 11 个样品的粒径 $<0.01 \text{ mm}$ 的黏性细颗粒含沙量 $>40 \text{ kg/m}^3$ 。因此,可认为径深崩岗泥砂流流体性质属于高含沙水流。下游断面观测到的两场泥砂流累计输沙量为 800 kg 和 $26\,998 \text{ kg}$ 。主支沟各断面不同观测时刻记录的输沙率变化于 $0.07 \sim 22.44 \text{ kg/s}$, 平均 5.15 kg/s 。泥砂流输沙量和输沙率明显受降雨量和降雨强度影响且与之互为正变关系。

致谢: 尚志海、邓铭坤、张文飞和李奕信全程参

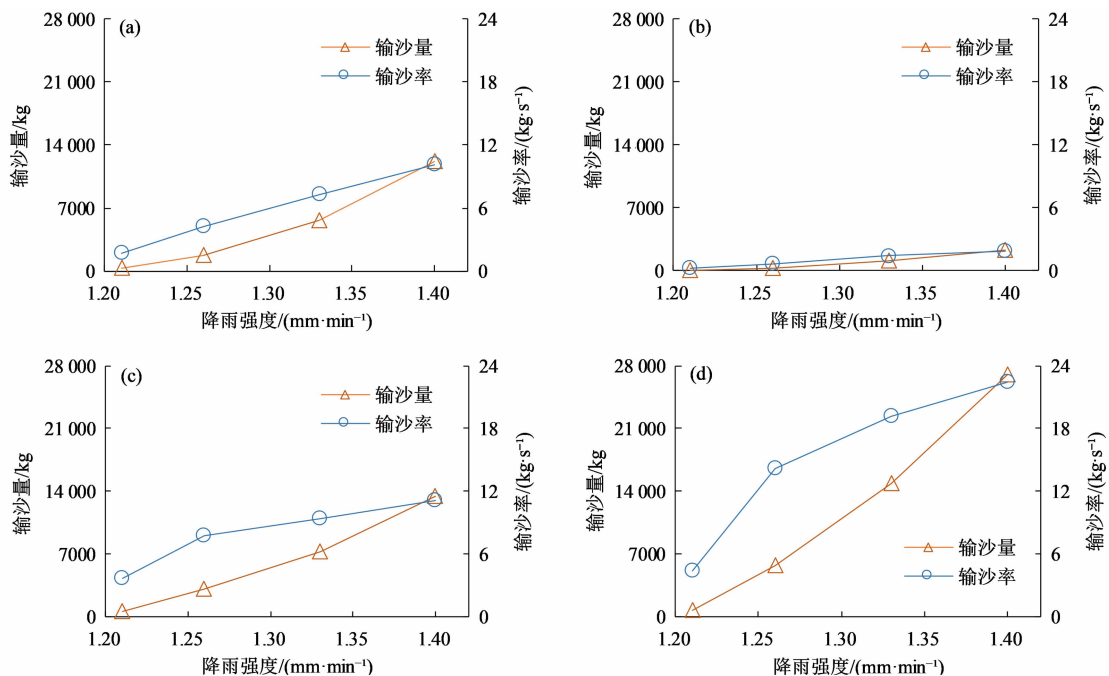


图 8 降雨强度对泥砂流输沙量和输沙率的影响(2021 年 8 月 13 日泥砂流):

(a) 观测断面 I; (b) 观测断面 II; (c) 观测断面 III; (d) 观测断面 IV

Fig. 8 Influence of rainfall intensity on sediment yield and sediment yield rate(the mud-sand flow event on August 13, 2021): (a) section I; (b) section II; (c) section III; (d) section IV

与了本研究的野外观测和采样工作。丁健对本研究的部分室内测试给予了指导。特此深表感谢!

参考文献(References)

- [1] 廖义善,唐常源,袁再健,等. 南方红壤区崩岗侵蚀及其防治研究进展[J]. 土壤学报, 2018, **55**(6): 1297 - 1312. [LIAO Yishan, TANG Changyuan, YUAN Zaijian, et al. Research progress on Benggang erosion and its prevention measure in red soil region of southern China [J]. Acta Pedologica Sinica, 2018, **55**(6): 1297 - 1312] DOI: 10.11766/trxb201807030219
- [2] 冯明汉,廖纯艳,李双喜,等. 我国南方崩岗侵蚀现状调查[J]. 人民长江, 2009, **40**(8): 66 - 68 + 75. [FENG Minghan, LIAO Chunyan, LI Shuangxi, et al. Investigation on status of hill collapsing and soil erosion in southern China [J]. Yangtze River, 2009, **40**(8): 66 - 68 + 75] DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2009.08.025
- [3] 梁音,宁堆虎,潘贤章,等. 南方红壤区崩岗侵蚀的特点与治理[J]. 中国水土保持, 2009(1): 31 - 34. [LIANG Yin, NING Duihu, PAN Xianzhang, et al. Characteristics and control of Benggang erosion in red soil region of southern China [J]. Soil and Water Conservation in China, 2009(1): 31 - 34] DOI: 10.14123/j.cnki.swcc.2009.01.009
- [4] 许炯心. 华南花岗岩地区的高含沙水流及其地貌学意义[J]. 泥沙研究, 1992(2): 12 - 19. [XU Jiongxin. Hyperconcentrated flow in the southern China granite region and the implications in geomorphology [J]. Journal of Sediment Research, 1992(2): 12 - 19] DOI: 10.16239/j.cnki.0468-155x.1992.02.002
- [5] 张大林,刘希林. 崩岗泥砂流粒度特性及流体类型分析——以广东五华县莲塘崩岗为例[J]. 地球科学进展, 2014, **29**(7): 810 - 818. [ZHANG Dalin, LIU Xilin. Analysis of the grain size properties and flow body classes of the mud sand flow: An example of Liantanggang collapsing hill and gully in Wuhua county of Guangdong [J]. Advances in Earth Science, 2014, **29**(7): 810 - 818] DOI: 10.11867/j.issn.1001-8166.2014.07.0810
- [6] LIU Xilin, ZHANG Dalin. Grain-size properties and morphologic patterns of channelized flows in a *benggang* catchment of southern China [J]. Zeitschrift für Geomorphologie. 2018, **61**(4): 303 - 314. DOI: 10.1127/zfg/2018/0495
- [7] 周顺文. 花岗岩地区冲沟泥沙流灾害治理研究[J]. 北方交通, 2017(6): 94 - 96 + 100. [ZHOU Shunwen. Research on disaster control for mud-sand flow of gully in granite region [J]. Northern Communications, 2017(6): 94 - 96 + 100] DOI: 10.15996/j.cnki.bfjt.2017.06.025
- [8] 兰金陵. 路遇崩岗泥沙流特征与新型拦沙坝结构研究[J]. 公路与汽运, 2018(4): 78 - 80 + 84. [LAN Jinling. Study on the characteristics of Benggang-related mud-sand flow encountered on the road and the structure of a new type of dam [J]. Highways and Automotive Applications, 2018(4): 78 - 80 + 84] DOI: 10.3969/j.issn.1671-2668.2018.04.023
- [9] 辜婧瑶,李梦雨,魏玉杰,等. 降雨条件下闽西花岗岩红壤坡面细沟发生临界水动力学特性[J]. 中国水土保持科学, 2020, **18**(4): 62 - 72. [GU Jingyao, LI Mengyu, WEI Yujie, et al. Hydraulic characteristics at the threshold moment of rill erosion occurring on the slope of granite red soil in western Fujian under simulated rainfall [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2020, **18**(4): 62 - 72] DOI: 10.16843/j.sswc.2020.04.008
- [10] 王秋霞,丁树文,邓羽松,等. 花岗岩崩岗区不同土层的侵蚀水动力学特征[J]. 土壤学报, 2017, **54**(3): 570 - 580. [WANG Qiuxia, DING Shuwen, DENG Yusong, et al. Hydrodynamic characteristics of erosion in different soil layers in granite collapse region [J]. Acta Pedologica Sinica, 2017, **54**(3): 570 - 580] DOI: 10.11766/trxb201607140306
- [11] 朱高立,黄炎和,林金石,等. 不同覆盖度和雨强条件下崩积体坡面侵蚀的动力学特征[J]. 水土保持学报, 2016, **30**(2): 1 - 7. [ZHU Gaoli, HUANG Yanhe, LIN Jinshi, et al. The characteristics of hydrodynamics in the slope erosion of colluvial deposits under different straw coverage and rainfall intensity [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, **30**(2): 1 - 7] DOI: 10.13870/j.cnki.stbcb.2016.02.001
- [12] 蒋芳市,张海东,陈培松,等. 土石混合崩积体坡面细沟跌坑发育试验研究[J]. 水土保持学报, 2019, **33**(6): 27 - 33. [JIANG Fangshi, ZHANG Haidong, CHEN Peisong, et al. Experimental study on the drop pit development of rill erosion on soil-rock mixed colluvial deposit slopes [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, **33**(6): 27 - 33] DOI: 10.13870/j.cnki.stbcb.2019.06.004
- [13] 朱高立,肖泽干,刘晓静,等. 模拟降雨条件下崩积体坡面产流产沙特征及其响应关系[J]. 水土保持通报, 2016, **36**(6): 1 - 7. [ZHU Gaoli, XIAO Zegan, LIU Xiaojing, et al. Processes and responses of runoff and sediment yield on colluvial deposits under simulated rainfall [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2016, **36**(6): 1 - 7] DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2016.06.001
- [14] JIANG Fangshi, HUANG Yanhe, WANG Mingkuang, et al. Effects of rainfall intensity and slope gradient on steep colluvial deposit erosion in southeast China [J]. Soil Science Society of America Journal, 2014, **78**(5): 1741 - 1752. DOI: 10.2136/sssaj2014.04.0132
- [15] 高鹏宇,詹振芝,蒋芳市,等. 坡度和流量对崩积体坡面细沟水流输沙能力的影响[J]. 水土保持学报, 2018, **32**(3): 68 - 73. [GAO Pengyu, ZHAN Zhenzhi, JIANG Fangshi, et al. Effects of slope and flow on sediment transport capacity of the colluvial deposit for rill flow in benggang [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, **32**(3): 68 - 73] DOI: 10.13870/j.cnki.stbcb.2018.03.011
- [16] 吴克刚,陆兆熊,郭鼎. 华南花岗岩风化壳崩岗侵蚀——德庆县深涌小流域为例[J]. 热带地貌, 1992, **13**(1): 129 - 145. [WU Kegang, LU Zhaoxiong, GUO Ding. Benggang erosion of granite weathering crust in south China: A case study of Shenchong

- small watershed in Deqing county [J]. *Tropical Geomorphology*, 1992, **13**(1):129–145]
- [17] DICENZO P D, LUK S H. Gully erosion and sediment transport in a small subtropical catchment, south China [J]. *Catena*, 1997, **29**(2):161–176. DOI: 10.1016/S0341–8162(96)00053–7
- [18] 阮伏水. 福建省崩岗侵蚀与治理模式探讨[J]. *山地学报*, 2003, **21**(6):675–680. [RUAN Fushui. Study on slump gully erosion and its control in Fujian province [J]. *Mountain Research*, 2003, **21**(6):675–680] DOI: 10.16089/j.cnki.1008–2786.2003.06.006
- [19] 刘星,王石英,袁再健,等. 信息化技术在崩岗研究中的应用进展[J]. *中国水土保持*, 2021(6):55–58. [LIU Xing, WANG Shiyang, YUAN Zaijian, et al. Application progress of information technology in the study of Benggang [J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2021(6):55–58] DOI: 10.14123/j.cnki.swcc.2021.0145
- [20] 刘希林,张大林,唐川. 基于三维激光扫描的崩岗沟道侵蚀与坡向发育及其侵蚀量计算[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2016, **24**(5):914–923. [LIU Xilin, ZHANG Dalin, TANG Chuan. Erosion volume calculation of Benggang gully and their slope development based on 3D laser scanning [J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2016, **24**(5):914–923] DOI: 10.16058/j.issn.1005–0930.2016.05.005
- [21] 季翔,黄炎和,林金石,等. 崩岗侵蚀沟的时空侵蚀特征及预测[J]. *山地学报*, 2019, **37**(1):86–97. [JI Xiang, HUANG Yanhe, LIN Jinshi, et al. Spatio-temporal erosion features and prediction for the erosion gullies on collapsing hills [J]. *Mountain Research*, 2019, **37**(1):86–97] DOI: 10.16089/j.cnki.1008–2786.000402
- [22] 殷祚云,陈建新,王明怀,等. 花岗岩风化壳崩岗侵蚀整治方案及效益[J]. *水土保持通报*, 1999, **19**(4):12–17. [YIN Zuoyun, CHEN Jianxin, WANG Minghuai, et al. Program and benefits on controlling weathereds in disintegration granite area in Deqing county of Guangdong province [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 1999, **19**(4):12–17] DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.1999.04.003
- [23] 张运英. 广东省花岗岩区侵蚀土壤类型及其防治对策[J]. *山地学报*, 2009, **27**(1):49–53. [ZHANG Yuning. Eroding soil types and their management countermeasures of granite regions in Guangdong province, China [J]. *Mountain Research*, 2009, **27**(1):49–53] DOI: 10.16089/j.cnki.1008–2786.2009.01.003
- [24] 中华人民共和国民政部. 中华人民共和国政区大典·广东省卷[M]. 北京: 中国社会科学出版社, 2019:1313–1315. [Ministry of Civil Affairs of the People's Republic of China. Political district dictionary of the People's Republic of China·Guangdong volume [M]. Beijing: China Social Press, 2019:1313–1315]
- [25] 德庆县农业区划办公室,德庆县农业局土壤普查组. 广东省德庆县第二次土壤普查报告书[R]. 德庆: 德庆县农业区划办公室, 1983:317–319. [Agricultural Zoning Office of Deqing County, Soil Census Team of Agriculture Bureau of Deqing County. Report on the second soil census in Deqing county, Guangdong province, China [R]. Deqing: Agricultural Zoning Office of Deqing County, 1983:317–319]
- [26] 卓瑞娜,刘希林,岳梦. 崩岗土体物理化学性质及其内部分异——以广东省德庆县3个典型崩岗为例[J]. *水土保持通报*, 2022, **42**(2):38–45+52. [ZHUO Ruina, LIU Xilin, YUE Meng. Physical and chemical properties of Benggang soils and their interior differentiation—three cases of typical Benggangs at Deqing county, Guangdong province [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2022, **42**(2):38–45+52] DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2022.02.006
- [27] 陈椿庭. 关于明渠水流的六区流态[J]. *人民长江*, 1995, **26**(3):43–46. [CHEN Chunting. The six-zone flow pattern of open channel flow [J]. *Yangtze River*, 1995, **26**(3):43–46] DOI: 10.16232/j.cnki.1001–4179.1995.03.012
- [28] 熊东红,杨丹,翟娟,等. 元谋干热河谷冲沟沟头径流水动力学特性及产沙效应初探[J]. *水土保持学报*, 2012, **26**(6):52–56+62. [XIONG Donghong, YANG Dan, ZHAI Juan, et al. Preliminary study on hydrodynamic characteristics of overland flow and sediment yields of gully heads in Yuanmou hot-dry valley [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, **26**(6):52–56+62] DOI: 10.13870/j.cnki.stbctb.2012.06.029
- [29] 刘乃壮,郑美秀. 淡水水温测算的气候方法[J]. *水产养殖*, 1991(1):22–25. [LIU Naizhuang, ZHENG Meixiu. Climatic methods for freshwater temperature measurement [J]. *Journal of Aquaculture*, 1991(1):22–25]
- [30] 沙玉清. 泥沙运动学引论[M]. 北京: 中国工业出版社, 1965:71–79. [SHA Yuqing. Introduction to sediment kinematics [M]. Beijing: China Industry Press, 1965:71–79]
- [31] 曹博召,王健,赵娅君,等. 黄土高原关中地区植草沟径流水力学特性[J]. *应用生态学报*, 2022, **33**(11):2979–2986. [CAO Bozhao, WANG Jian, ZHAO Yajun, et al. Hydrodynamic characteristics of grass swale runoff in Guanzhong area of Loess Plateau, northwest China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, **33**(11):2979–2986] DOI: 10.13287/j.1001–9332.202211.023
- [32] FOSTER G R, HUGGINS L F, MEYER L D. A laboratory study of rill hydraulics: II. Shear stress relationships [J]. *Transactions of the ASAE*, 1984, **27**(3):797–804. DOI: 10.13031/2013.32874
- [33] BAGNOLD R A. An approach to the sediment transport problem from general physics [J]. *U. S. Geological Survey Professional Paper*, 1966, 422–I:1–37.
- [34] 杨志达. 泥沙输送理论与实践[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2000:47–62. [YANG Zhida. Sediment transport theory and practice [M]. Beijing: China Water and Power Press, 2000:47–62]

- [35] 张礼富. 大湟江口(二)站泥沙测验探讨[J]. 科技信息(学术研究), 2008(36): 339 – 340. [ZHANG Lifu. Discussion on sediment measurement at Dahuangjiangkou (second) station [J]. Scientific and Technological Information (Academic Research), 2008(36): 339 – 340]
- [36] 张瑞瑾. 河流泥沙动力学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1998: 191 – 210. [ZHANG Ruijin. River sediment dynamics [M]. Beijing: China Water and Power Press, 1998: 191 – 210]
- [37] 王光谦. 河流泥沙研究进展[J]. 泥沙研究, 2007(2): 64 – 81. [WANG Guangqian. Advances in river sediment research [J]. Journal of Sediment Research, 2007(2): 64 – 81] DOI: 10.16239/j.cnki.0468 – 155x.2007.02.010
- [38] 许炯心. 黄土高原丘陵沟壑区坡面—沟道系统中的高含沙水流(II)——泥沙储存—释放及降雨、径流特性的影响[J]. 自然灾害学报, 2004, 13(2): 25 – 31. [XU Jiongxin. Hyperconcentrated flows in slope-channel systems of gullied hilly area in the Loess Plateau (II): Influences of sediment storage-release rainfall and runoff [J]. Journal of Natural Disasters, 2004, 13(2): 25 – 31] DOI: 10.13577/j.jnd.2004.0204
- [39] 许炯心. 黄土高原丘陵沟壑区坡面—沟道系统中的高含沙水流(I)——地貌因素与重力侵蚀的影响[J]. 自然灾害学报, 2004, 13(1): 55 – 60. [XU Jiongxin. Sediment-heavily containing flows in slope-channel systems of gullied hilly area in the Loess Plateau (I): Influences of landforms and gravitational erosion [J]. Journal of Natural Disasters, 2004, 13(1): 55 – 60] DOI: 10.13577/j.jnd.2004.0109
- [40] 王明甫. 高含沙水流及泥石流[M]. 北京: 水利电力出版社, 1995: 1 – 4. [WANG Mingfu. Hyper-concentrated flow and debris flow [M]. Beijing: Water Resources and Electric Power Press, 1995: 1 – 4]
- [41] 费祥俊, 吴保生. 黄河下游高含沙水流基本特性与输沙能力[J]. 水利水电技术, 2015, 46(6): 59 – 66. [FEI Xiangjun, WU Baosheng. Basic characteristics and sediment transport capacity of hyper concentrated flow of lower Yellow River [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2015, 46(6): 59 – 66] DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2015.06.011
- [42] 万兆惠, 宋天成. 细颗粒含量对粗颗粒含沙量分布及挟沙能力的影响[J]. 水利学报, 1987(8): 20 – 31. [WAN Zhaohui, SONG Tiancheng. The effect of fine particles on the vertical concentration distribution and transport rate of coarse particles [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1987(8): 20 – 31] DOI: 10.13243/j.cnki.slx.1987.08.003
- [43] WANG Lingling, ZUO Zhongguo, LOU Xuan, et al. Flow pattern and hydraulic parameter characteristics of the different topographic position in the small catchment [J]. International Journal of Economy, Energy and Environment, 2019, 4(4): 80 – 87. DOI: 10.11648/j.ijeee.20190404.13
- [44] 钱宁. 高含沙水流运动[M]. 北京: 清华大学出版社, 1989: 119 – 131. [QIAN Ning. Hyper-concentrated flow movement [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1989: 119 – 131]
- [45] 刘希林, 张大林. 基于三维激光扫描的崩岗侵蚀的时空分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(4): 204 – 211. [LIU Xilin, ZHANG Dalin. Temporal-spatial analyses of collapsed gully erosion based on three-dimensional laser scanning [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(4): 204 – 211] DOI: 10.3969/j.issn.1002 – 6819.2015.04.029

Hydrodynamic Properties of Benggang-Related Mud-Sand Flow and Sediment Yield: A Case Study of Jingshen Mud-Sand Flow at Deqing County of Guangdong, China

YUE Meng, LIU Xilin *

(School of Geography and Planning, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510006, China)

Abstract: Benggang (collapsing granite hills) is a typical soil erosion phenomenon widely occurring in the granitic weathering zones of South China, characterized by its capacity of extreme landform renovation. Mud-sand flows feed by Benggang sediments are main erosion and transportation force in creating Benggang landscape or Benggang valley in the areas. Production, living and eco-environment in a community in the proximity of a Benggang valley often seriously suffer from striking or occupying of sediments transported by mud-sand flow out of the valley. A proper understanding of the behavior of Benggang-related mud-sand flow is helpful to better solve the ecological and

environmental problems caused by Benggang erosion. Unfortunately, by now it has not yet been knowledgeable for Benggang. For example, an occurrence of mud-sand flow took place with minutes, quite difficult to observe and sample it on site; the physical properties of mud-sand flow, movement process and sediment migration are still not very clear. In this study, a typical Benggang-related mud-sand flow happened at Jingshen village, Deqing County, Guangdong Province, China was investigated as case study for interpretation of its hydrodynamic mechanism. Field observation and sample tests were conducted to measure the rheological properties, flow characteristics and sediment-yield characteristics of mud-sand flows. The following results are obtained: (1) The average volume weight of the Jingshen mud-sand flows was 1.10 t/m^3 , mostly exhibiting a bimodal particle size distribution curve, with an average median particle size 0.113 mm . (2) The mud-sand flows were assorted as hyper-concentrated flow with an average silt concentration of 155.15 kg/m^3 . Its average sediment yield rate was 5.15 kg/s , with the cumulative sediment yield up to $26\,998 \text{ kg}$. (3) The mud-sand flows were categorized as turbulent current. The hydrodynamic parameters including Froude number, Reynolds number, flow shear stress, stream power and unit stream power were positively correlated with the sediment yield and sediment yield rate; the roughness coefficient was negatively correlated with the sediment yield and sediment yield rate, and the resistance coefficient was negatively correlated with the sediment yield rate. (4) The sediment yield and sediment yield rate increased with the increase of precipitation and rainfall intensity. This paper will provide a scientific basis for better solving the ecological and environmental problems caused by Benggang erosion and related geohazards in South China.

Key words: Benggang-related mud-sand flow; field observation; hydrodynamic parameters; hyper-concentrated flow; sediment-yield characteristics; Guangdong