

2003 年中国西南山区典型灾害性 暴雨泥石流运动堆积特征

陈宁生¹, 张 飞²

(1. 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. 四川大学环境与建筑学院, 四川 成都 610065)

摘要: 2003 年发生在中国西南山区的大规模泥石流为典型的灾害性暴雨泥石流, 造成了巨大的经济损失和人员伤亡。作者实地考察其中 7 条造成较大损失的典型泥石流沟, 分析得出, 这一地区泥石流的流速一般都比较快, 流量变化也比较大, 流量大小与流域面积相关, 总体上流量随流域面积的增大有增加的趋势, 但流量与面积并非正相关关系。同时, 在这些流域的堆积物的组成中, 粗大颗粒极多, 最大的颗粒普遍比较大, 另外漂石含量很高。粘性泥石流中砾石含量相对于中国西南山区其它粘性泥石流较低, 砂砾含量相对较高, 大部分泥石流堆积物的有效粒径 (d_{10})。

关 键 词: 泥石流; 运动; 堆积; 灾害

中图分类号: R 642.23 文献标识码: A 文章编号: 1000-0690(2006)06-0701-05

泥石流灾害分布广泛, 遍及世界各地, 造成人员、财物巨大损失^[1,3]。中国尤其是西南山区泥石流灾害十分严重, 典型的 2003 年大规模的泥石流灾害即集中在西南山区的泥石流堆积扇区。在短短 3 个月的时间内西南山区共发生泥石流灾害 11 起 (图 1), 这些泥石流均由暴雨引发, 其灾害有其自身的特征, 在成因类型上它们与火山和冰川等泥石流灾害具有较大的差别; 在区域上与国内外的其它地区不同。

为了减灾防灾, 开展针对这一特殊泥石流群体的运动堆积特征的研究是必要的。作者通过调查选择了西南山区 7 条典型的灾害性泥石流沟, 即丹巴的水卡子沟 (死亡失踪 51 人)、岳扎乡鹅狼沟 (死亡失踪 13 人)、习水的龙蛇子沟 (死亡失踪 24 人)、石棉的观音桥沟 (死亡 2 人)、热水塘沟 (死亡和失踪 7 人)、普格县采阿咀沟 (死亡失踪 10 人)、汶川县茶园沟 (死亡失踪 11 人)。通过调查这 7 条泥石流沟, 理清它们的流速、流量、容重、颗粒组成的系列特征, 为今后的泥石流风险评价^[4,5]及减灾防灾服务。

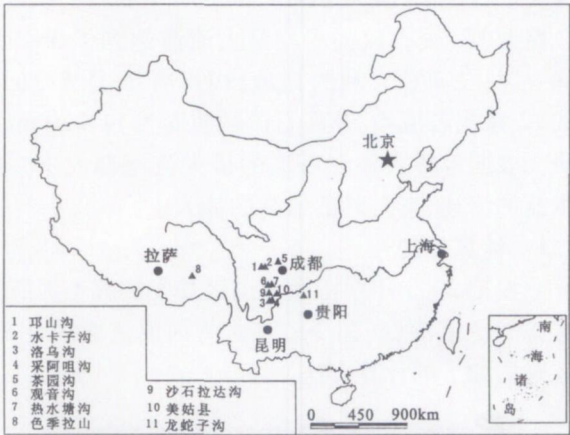


图 1 2003 年中国西南山区典型
泥石流灾害点分布图

Fig 1 Distribution map of typical debris flows in
mountainous area of southwestern China in 2003

1 泥石流流速特征

流速是泥石流重要的特征参数, 对可观测的泥石流可直接获取流速数据, 如美国 USGS 和中国科学院科研人员通过观测获取 ST. Helens 火山^[6,7]

收稿日期: 2005-06-06 修订日期: 2005-10-22

基金项目: 国家自然科学基金“粘粒含量对泥石流源区砾石土强度变化的影响” (40471012) 资助。

作者简介: 陈宁生, (1965-), 男, 福建南安市人, 研究员, 博士, 主要从事山地灾害与工程研究。E-mail: chennsl@indec.cn

和滇北蒋家沟泥石流流速数据^[8]。但大部分泥石流的暴发过程是无法观测的,其流速只有通过一些模型来计算。奥地利的 Hubl 和 Steinwendner 通过 FLO-2D 计算机模型模拟计算泥石流的流速^[9],意大利的 Crosta^[10]和加拿大的 Evans^[11]等通过对泥痕的分析计算泥石流的流速。由于泥石流在流经弯道时,会产生凹岸泥深高于凸岸泥深的现象,以此为基础,有些学者提出了弯道超高理论: Hunter et al^[3]和 Chen^[12]提出了弯道超高的计算模式;周必凡依据泥石流运动力学离心力和流体横向剪切力及土的动摩擦力的关系提出 $\Delta H = B \lg(\theta)$ 的计算方法,其中 θ 为泥石流液面的倾角,是与流速有关的一个变量^[13]。

通过以上方法获取了世界各地泥石流的流速。从现有的调查研究结果显示,泥石流的流速普遍较大。在中国云南蒋家沟,泥石流的流速达到 12~15 m/s 在 Peru 的 Huascarán 山,1970 年 5 月 31 日的一次泥石流流动 14.5 km,峰值流速达到了 81 m/s^[14];在加拿大 British Columbia 省的 99 号高速公路两侧,泥石流的平均最大流速达到了 3~9.4 m/s^[15];在南意大利的高地,1998 年 5 月 5~6 日的 12 条泥石流沟,其泥石流的速度为 14~20 m/s。研究表明世界各地泥石流的流速都大于一般水流的流速,有时其数值高的惊人。

1.1 计算方法

根据 2003 年中国西南山区暴发的典型泥石流灾害的沟道特点(图 2),对这些沟道流速的计算,宜采用如下的计算方法。



图 2 琼山沟的一个弯道

Fig 2 One bend channel of Qingshangou gully

1) 弯道超高法。弯道超高法广泛应用于泥石流的流速计算中^[16],其表达方式^[17]为:

$$V = \left(\frac{g \Delta h R}{\alpha B} \right)^{1/2}$$

其中, V 为 最大流速 (m/s); Δh 为弯道超高 (m); g 为重力加速度 (m/s²); R 为凹岸的半径 (m); B 为沟床的宽度 (m); α 为修正系数。

2) 满宁公式。

$$U_c = H^{2/3} I_c^{1/2} / n_c$$

其中, H 为泥深, I_c 为泥石流水力坡度, n_c 为泥石流沟床糙率系数。沟床的糙率系数可以参照相应的经验数据获得(表 1)。

1.2 流速计算数值

通过以上的两种方法,计算出这些典型的泥石流的流速数值(表 2)。

从以上数据可以得出,这些泥石流沟道的流速均在 7 m/s 以上,属于流速较大的泥石流,随着流速的增大,泥石流的冲击力也不断增强,因此这种泥石流的潜在破坏力也比较大,造成的灾害也相应较大。

2 泥石流流量特征

计算了泥石流流速,在获得了断面面积后便可以计算泥石流流量。泥石流流量和众多因素有关,一般远远超过洪水的流量,有时支沟的泥石流流量可以超过主河的流量好几倍,并且堵塞主河。在加拿大 British Columbia 省 99 号高速公路的 M-Creek, Charles Creek and Wahleach A, Fraser Valley 流域,泥石流的流量分别达到 211、341、566 m³/s,其流域的面积^[3]分别为 3.8、1.8、2.1 km²。在南意大利的 Campania 研究区的 12 个泥石流沟,其大部分面积小于 5 km²,最大流量则变化于 600~3400 m³/s^[20]。在委内瑞拉的中部 Cerro Grand 和 Uria 流域,流域面积^[15]分别为 26.6 和 11.6 km²,1999 年 12 月 15~16 日的泥石流的流量分别达到 1230 和 1670 m³/s^[21]。在中国云南蒋家沟,流域面积 46.8 km²,观测最大流量 2800 m³/s。从以上世界各地的研究可知,小的泥石流流域,其流量有时依然很大。如西藏的古乡沟 1953 年 9 月的一次泥石流流量便达 28600 m³/s^[21]。可见泥石流流量有时大得惊人。针对 2003 年研究的 7 条泥石流沟,通过以上流速计算,测量断面面积,可计算出不同沟道泥石流流量。

以上数据可知,支沟泥石流流量变化很大,其流量值有时比主河要大得多,且泥石流流量与流域

表 1 中国粘性泥石流糙率系数的确定

Table 1 Resistance coefficient estimation for viscous debris flow in China

序号	泥石流流体特征	沟床状况	糙率值	
			n_c	$1/n_c$
1	流体呈整体运动;石块粒径大小悬殊,一般是 30~ 50 cm, 2~ 5 m 粒径的石块约占 20%;龙头由大石块组成,在弯道或河床展宽处易停积,后续流可超越而过,龙头流速小于龙身流速,堆积呈龙岗状	沟床极粗糙,沟内偶巨石和挟带的树木堆积,多弯道和大跌水,沟内不能通行,人迹罕见,沟床流通段纵坡在 10% ~ 15%,阻力特征属高阻型	0.10~ 0.50	2~ 10
2	流体呈整体运动,石块较大,一般石块粒径 20~ 30 cm,含少量粒径 2~ 3 m 的大石块;流体搅拌较为均匀;龙头紊动强烈,有黑色烟雾及火花;龙头和龙身流速基本一致;停积后有龙岗状堆积	沟床比较粗糙,凹凸不平,石块较多,有弯道、跌水;沟床流通段纵坡 7.0% ~ 10.0%,阻力特征属高阻型	0.05~ 0.20	5~ 20
3	流体搅拌十分均匀;石块粒径一般石块在 10 cm 左右,挟有个别 2~ 3 m 的大石块;龙头和龙身物质组成在差别不大;在运动过程中龙头紊动十分强烈,浪花飞溅;停积后石块不分离,向四周扩散呈叶片状	沟床较稳定,河床质较均匀,粒径 10 cm 左右;受洪水冲刷沟底不平而且粗糙,流水沟两侧较平顺,但干而粗糙;流通段沟底纵坡 5.5% ~ 7.0%,阻力特征属中阻或高阻型	0.04~ 0.10	10~ 25
4	同 3	泥石流铺床后原河床粘附一层泥浆体,使干而粗糙河床变得光滑平顺,利于泥石流流体运行,阻力特征属低阻型	0.01~ 0.05	20~ 100

表 2 典型泥石流沟道的流速分析

Table 2 Estimation for the velocity of typical debris flows

沟道名称	峰值流速 (m/s)	计算方 法模式	内径 (m)	外径 (m)	超高 (m)	水力半径 (m)	水力坡度	平均泥深 (m)	糙率
龙蛇子沟	7.3	(1)	119	152	1.35	5.5	0.260		
水卡子沟	9.03	(2)					0.105	8.0	0.067
集中沟	10.8	(2)					0.344	2.43	0.1
热水塘沟	7.8	(2)					0.757	0.1	0.024
采阿碛沟 ^[18]	10.0	(2)					0.270	3.0	0.108
茶园沟 ^[19]	10.8	(2)					0.114	3.7	0.075

表 3 典型泥石流沟的峰值流量

Table 3 Peak discharge of typical debris flows

沟道名称	流域面积 (km ²)	断面面积 (m ²)	峰值流量 (m ³ /s)	冲出总量 (10 ⁴ m ³)
龙蛇子沟	0.92	18.6	136	
水卡子沟	84.9	535.4	4835	
集中沟	2.66	42.4	458	
热水塘沟	1.62	6.4	50	
采阿碛沟	5.2	60.0	600	70 ^[21]
茶园沟	19.4	92.5	999	5
鹅狼沟	15.03		353	

面积是相关的,总体上流量随流域面积的增大有增加的趋势,但流量与面积并非正相关关系。泥石流流量在水卡子沟表现的特别的大,依据研究这一流量与运动过程中局部地段的堵塞有关^[22]。由于泥石流流量过程的不稳定因素,即物质的加入和堆积,所以泥石流的流量在不同的断面数值差别极大,其最大的流量可以出现在流通区的不同断面。

以上计算的数值是一个断面的峰值流量,但这一流量在运动过程中与洪水类似,会出现波坦化。

3 泥石流的粗大颗粒与高容重特征

2003年这些研究的泥石流流域堆积物组成中,大部分表现为粗大颗粒极多,最大的颗粒普遍较大(表 4),漂石含量高。通过考察其中 7 条最具代表性的泥石流沟,发现泥石流堆积区最大漂石轻则数十吨,重达千余吨,其中水卡子沟泥石流搬运的最大为 13.14×8.86×8.4 m³,重达 2 000 t 多;巨大颗粒和有些木料经常堵塞流通区沟床,使流量在泥石流汇流过程中呈波动趋势,有时十分大。

通过对其中四条沟的实地考察、取样分析获取堆积物颗粒级配、堆积物中大颗粒形态等特征。根据四川、云南、西藏等泥石流多发地区以往泥石流堆积物颗粒分析统计:砾石含量超过 50% 的泥石流沟占 85% 以上,砾石含量超过 60% 的泥石流沟

占 75% 以上, 而 2003 年暴发的典型粘性泥石流中砾石含量相对较低, 沙砾含量相对较高 (图 3), 其中水卡子沟泥石流砾石含量仅为 34%, 而沙砾达 48. 1%, 集中沟砾石含量为 52. 8%, 其沙砾含量也超过 30%。其中大部分泥石流堆积物的有效粒径 (d_{10}) 小, 除热水塘沟泥石流有效粒径为 0. 5 mm 外, 其余三条沟泥石流的有效粒径不足 0. 05 mm, 其中集中沟泥石流的有效粒径仅为 0. 016 mm, 其平均粒径 (d_{50}) 和控制粒径 (d_{60}) 大 (表 4)。

泥石流容重由于没有观测, 很难确定, 因此人

们建立了一些模型企图模拟计算泥石流的容重。采用较多的是通过泥石流堆积物的干容重和小于 0. 063 mm 的颗粒含量特征进行容重的计算^[23]。这是在泥石流流体堆积后不考虑体积变化的情况下进行的计算。本次调查的泥石流容重的估算, 由于泥石流刚刚暴发, 目击者清楚地记得泥石流的基本情况, 通过水与泥沙的重新配比, 由多人目击者确认浓度, 称取单位体积的重量确定容重 (表 4)。结果表明, 泥石流的容重变化于 1. 6~ 2. 3 g/cm³ 之间。

表 4 2003 年典型泥石流主要堆积特征

Table 4 Primary accumulating characteristics of typical debris flows in 2003

沟道名称	堆积区面积 (m ²)	容重 (g/cm ³)	砾石含量	粘粒含量	最大颗粒 (mm)	d_{60} (mm)
			($d > 2$ mm) %	($d < 0. 005$ mm) %		
龙蛇子沟	17670	1. 60	60. 9	3. 1	5. 97×4. 6×2. 46	20. 000
水卡子沟	71340	2. 0	34	4. 5	13. 14×8. 86×8. 4	1. 100
集中沟	2300	2. 07	52. 8	3. 08	1. 5×1. 9×1. 9	10. 000
热水塘沟	250	1. 65	85. 69	0. 8	2×2×2	25. 000
采阿咀沟	7200	2. 1~ 2. 3				
茶园沟	500. 000	1. 8~ 2. 0			3. 0×2×1. 5	

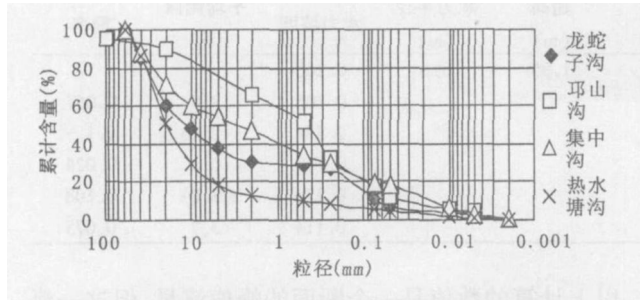


图 3 龙蛇子沟、水卡子沟、集中沟和热水塘沟颗粒级配
Fig. 3 Grain size distribution of Longshezi gully,
Shuikazi gully, Jizhong gully and Sheshuitang gully

4 结 论

2003 年中国西南山区暴发的泥石流为典型的灾害性暴雨泥石流, 泥石流流速一般都比较大, 造成的冲击力也相应较大; 泥石流流量变化很大, 有时比主河要大得多, 泥石流流量与流域面积相关, 总体上流量随流域面积的增大有增加的趋势, 但流量与面积并非正相关关系; 在这些流域的堆积物的组成中, 粗大颗粒极多, 最大的颗粒普遍较大, 漂石含量很高; 粘性泥石流中砾石含量相对较低, 沙砾相对较高, 大部分泥石流堆积物的有效粒径 (d_{10}) 小。

致谢: 本文颗粒分析数据由中国科学院成都山地灾害与环境研究所土力学专业实验室提供, 在此

致谢。

参考文献:

[1] Perez F L. Matrix granulometry of catastrophic debris flows (December 1999) in central coastal Venezuela [J]. Catena, 1999, 45: 163- 183.

[2] 韦方强, 谢洪, Lopez J L, 等. 委内瑞拉 1999 年特大泥石流灾害 [J]. 山地学报, 2000, 18(6): 580~ 582.

[3] Hungr O, G C Morgan, Kellehals. Quantitative analysis of debris torrent hazards for design of remedial measures [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1984, 21: 663- 677.

[4] 康川, 朱大奎. 基于 GB 技术的泥石流风险评价研究 [J]. 地理科学, 2002, 22(3): 300~ 304.

[5] 闰满存, 王光谦, 刘家宏. GB 支持的澜沧江下游区泥石流暴发危险性评价 [J]. 地理科学, 2001, 21(4): 334~ 338.

[6] Scott K V. Origins, behavior and sedimentology of lahars and lahar-runout flows in the Toutle-Cowlitz river system [M]. Washington: U. S. geological survey professional paper, Denver, 1998: 51- 52.

[7] Scott K M. Origins, Behavior and Sedimentology of Lahars and Lahar-Runout Flows in the Toutle-Cowlitz River System [M]. Washington: U. S. Geological Survey Professional Paper, 1998: 1- 10.

[8] 吴积善. 云南蒋家沟泥石流观测与研究 [M]. 科学出版社, 1990: 62~ 70.

[9] Hübl J, Steinwendtner H. Two-dimensional simulation of two viscous debris flows in Austria [J]. Phys. Chem. Earth, 2001,

26(9): 639– 644

[10] Crosta G B Failure and flow development of a complex slide: the 1993 Sesa landslide [J]. Engineering Geology, 2000, 59: 173– 199

[11] Evans S G, Hungr O, Clague J J Dynamics of the 1984 rock avalanche and associated distal debris flow on Mount Cayley, British Columbia, Canada: implications for landslide hazard assessment on dissected volcanoes [J]. Engineering Geology, 2001, 61: 29– 51

[12] Chen C. Comprehensive review of debris flow modelling concepts in Japan [J]. Debris flow /avalanches: Processes, recognition and mitigation. Reviews in Engineering Geology, Geol Soc Am., 2001, VII: 13– 30.

[13] 周必凡, 李德基, 罗德富. 泥石流防治指南 [M]. 北京: 科学出版社, 1991: 84~ 85.

[14] Browning J M. Catastrophic Rock Slide Mount Huascaran, North-central Peru May 31, 1970 [J]. The American Association of Petroleum Geologists Bull., 1973, 57(7): 1335– 1341.

[15] Suwa H, Yamakoshi T. Estimation of debris flow motion by field surveys [A]. In: Wiecek G F, Naeser N D. Debris-flow hazards mitigation: mechanics, prediction, and assessment [C]. Proceedings of the second international conference on debris-flow hazards mitigation. Taipei Taiwan. Rotterdam: Balkema, 2000: 245– 254.

[16] 刘希林, 王全才, 张 丹, 等. 四川凉山州普格县“ 6. 20” 泥石流灾害 [J]. 自然灾害学, 2003, 4: 46~ 50.

[17] 刘希林, 吕学军, 苏鹏程. 四川汶川茶园沟泥石流灾害特征及危险度评价 [J]. 自然灾害学报, 2004, 13(1): 66~ 71.

[18] Zandetta G, Sulpizio R, Pareschi M T, et al. Characteristics of May 5– 6 1998 volcanoclastic debris flows in the Samo area (Campania southern Italy): relationships to structural damage and hazard zonation [J]. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 2004, 133: 377– 393.

[19] Lopez J L, Perez D, Garcia R. Hydrological and geomorphologic evaluation of the 1999 debris-flow event Venezuela [A]. In: Rickermann D, Chen C L. Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction and Assessment [C]. Proceedings 3rd International DFHM Conference. Davos, Switzerland. Rotterdam: Millpress, 2003: 989– 1000.

[20] 朱平一, 罗德富, 寇玉贞. 西藏古乡沟泥石流发展趋势 [J]. 山地学报, 1997, 15(4): 296~ 299.

[21] 刘希林, 王全才, 张 丹, 等. 四川凉山州普格县“ 6. 20” 泥石流灾害 [J]. 灾害学, 2003, 4(12): 48.

[22] 陈宁生, 高延超. 丹巴县邛山沟特大灾害性泥石流汇流过程分析 [J]. 自然灾害学报, 2004, 13(3): 104~ 108.

[23] Rickermann D. Empirical relationships for debris flows [J]. Natural Hazards, 1999, 19: 47– 77.

Movement and Deposit Characteristics of Typical Catastrophic Debris Flows by Rainstorm in the Mountainous Area of Southwestern China in 2003

CHENG Ning-Sheng¹, ZHANG Fei²

(1. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610041;
2. Institute of Environment and Architecture, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065)

Abstract The debris flows occurring in the mountainous area of southwestern China in 2003 are of typically destructive, which are triggered by rainstorm. They swallowed many persons and damaged amount of property. To analyze the debris flow’s movement and deposit characteristics in the area, the authors chose seven typical debris flows to study, which caused much severe hazards. And then we computed their velocity and discharge by some models and concludes the characteristics of large grain and high concentration by statistic and analysis. The value of the debris flow velocity in the mountainous area of southwestern China is very high and the variation of peak discharge is marked. The peak discharge of these debris flows is correlative to the area of valley and in general it increases with the area of valley, however, the relationship between the discharge and area is not positive correlation. In the composition of these debris, some grains are unbelievably large. But the content of the gravels is comparatively low comparing to other viscous debris flows in the southwestern China.

Key word: debris flow; movement; accumulation; natural hazard