

许向宁, 向国萍, 张丹丹, 等. 四川省都江堰市龙池地区“8·13”特大泥石流堵江调查[J]. 灾害学, 2017, 32(2): 64-71. [XU Xiangning, XIANG guoping, ZHANG Dandan, et al. Investigation the “8·13” damming of debris flow in Longchi town, Dujiangyan city, Sicuan province [J]. Journal of Catastrophology, 2017, 32(2): 64-71. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2017.02.012.]

四川省都江堰市龙池地区“8·13” 特大泥石流堵江调查^{*}

许向宁, 向国萍, 张丹丹, 薛 峰

(四川省地质矿产勘查开发局四〇五地质队, 四川 成都 611830)

摘 要: 汶川地震后, 震区进入地质灾害高发期, 特别是雨季, 其中包括泥石流灾害。2010年8月13日, 都江堰市龙池地区暴发了特大规模的群发性泥石流灾害, 部分泥石流堵塞龙溪河, 冲毁公路, 龙溪河整体抬升。为了研究龙池地区震后泥石流堵江特征, 选取龙溪河流域内堆积扇完整的36条泥石流沟为研究对象, 通过泥石流野外调查和Spss统计, 分析该区泥石流堵江类型, 以及泥石流物源特征、泥石流冲出距离、泥石流堆积扇顶至主河的距离与泥石流堵江的关系。在此基础上, 建立适合该区的泥石流堵江模型, 为震区泥石流灾害防治和灾害治理提供一定参考。

关键词: “8·13”; 泥石流; 堆积特征; 堵江特征; 龙池地区; 四川都江堰

中图分类号: X43; P642.23 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2017)02-0064-08

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2017.02.012

汶川8级地震后, 地震重灾区多处暴发特大泥石流堵江事件, 成为雨季对地震灾区影响和威胁最大的灾害类型。这是由于震后流域内滑坡松散物质剧增, 导致泥石流规模明显增加, 表现为频度增加、起动临界雨量降低, 沟道松散物质量异常丰富, 极大地增加了泥石流堵江的危险性。程尊兰等人根据西藏地区支、主沟的流量比, 支、主沟的流速比, 剪切力与静水压力的关系, 泥石流容重等分析堵江特征^[1]。流体对颗粒的搬运能力也是泥石流堵江的重要因素之一^[2-3]。而支沟泥石流在短时间改变主河水沙组成是导致堵江的根本原因^[4-5], 其中泥石流与主河的交汇角对泥石流堵江的影响也十分明显^[6]。陈春光等人依据异重流理论得出了泥石流进入主河时的运动方程^[7]。张金山等^[8]选取岷江上游堵塞型泥石流沟以及不堵河型泥石流沟等6条泥石流沟, 研究泥石流堵江特征。Lecomte^[9]等人根据冰碛物特征分析泥石流堵江特征。CHENG Zunlan^[10]等人根据泥石流容重、流速、流深等特征, 研究藏东南地区泥石流

堵江试验。

震区泥石流的研究表明^[11-12]: 强烈地震作用导致地震区的地质环境更加脆弱, 导致泥石流等地质灾害更加频繁, 危害范围更大。Xuanmei Fan^[13-14]等人运用遥感数据和数值模拟, 研究汶川震区滑坡堵江及其滑坡溃坝的特征; M. Peng^[15]等人运用工程学分析滑坡堵江特征。

汶川地震后, 泥石流的激发雨量和前期降雨量降低, 而泥石流堆积区也是泥石流泛滥成灾的主要区域。2010年的8月13日, 都江堰市龙池地区暴发了特大规模的群发性泥石流灾害, 堵塞龙溪河河道, 抬高龙溪河河床^[16-17]。为了研究地震对泥石流堵江的影响作用, 根据野外调查, 发现泥石流沟口位置与主河距离以及泥石流堆积区的纵坡变化特征等泥石流堵江特征关系尤为重要, 文中首次引用泥石流扇顶至主河距离, 以及因为人为工程条件导致泥石流堆积区纵坡突增等因素, 分析泥石流堵江特征, 为该区域泥石流灾害的风险评价和管理提供一定的参考。

^{*} 收稿日期: 2016-10-14 修回日期: 2017-01-19

基金项目: 四川省国土资源厅科学研究计划课题(KJ-2016-11); 四川省地质矿产勘查开发局四〇五地质队专项资金

第一作者简介: 许向宁(1971-), 男, 云南永胜人, 博士、教授级高级工程师, 从事地质工程及地质灾害研究工作。

E-mail: 450247363@qq.com

1 区域概况

研究区坐落于成都平原西部, 岷江上游, 研究区内的泥石流沟流域为典型高中山峡谷地貌, 地势西北高、东南低, 地形高差大, 地形坡度大。区内沟谷发育, 沿着龙溪河两岸呈树枝状展布, 主沟平面形态为折线形。该区出露花岗岩、灰岩和辉绿岩等, 且地质构造活动强烈, 特别是汶川地震发震断层(映秀-汶川断裂带)通过该区(图1), 导致该区山体基岩出露、岩体破碎, 形成大量的滑坡、崩塌堆积体, 为龙池2010年“8·13”特大群发性泥石流提供了丰富的物源。

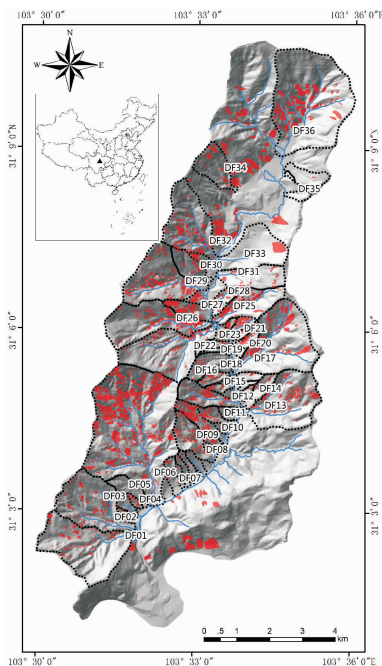


图1 龙池地区泥石流分布图

2010年8月13日, 龙池地区50多条沟暴发了泥石流过程, 其中36条泥石流沟堆积扇完整(见图1), 且对龙池地区泥石流堆积区样品进行室内筛分, 得出泥石流堆积区的黏粒含量较低, 平均有效粒径 $d_{10} = 1.7 \text{ mm}$, 平均不均匀系数 C_u 为 6.47, 平均曲率系数 C_c 为 1.62, 可知地震泥石流颗粒级配良好, 颗粒间以单粒结构接触关系为主。

研究区属于四川盆地中亚热带湿润季风区, 四季分明, 冬无严寒, 夏无酷暑。与同一气候区其他各地相比, 又表现为温度较低, 日照较少, 阴雨天气频繁, 根据研究区多年降雨量统计发现, 研究区降雨量主要集中在6-9月, 其中8月降雨量为一年之最(250.6 mm)(图2)。而研究区内年平均蒸发量 930.9 mm, 占年降雨量的 76%, 其中

蒸发量最大月(7月) 140.2 mm, 最小月(12月) 27.1 mm。

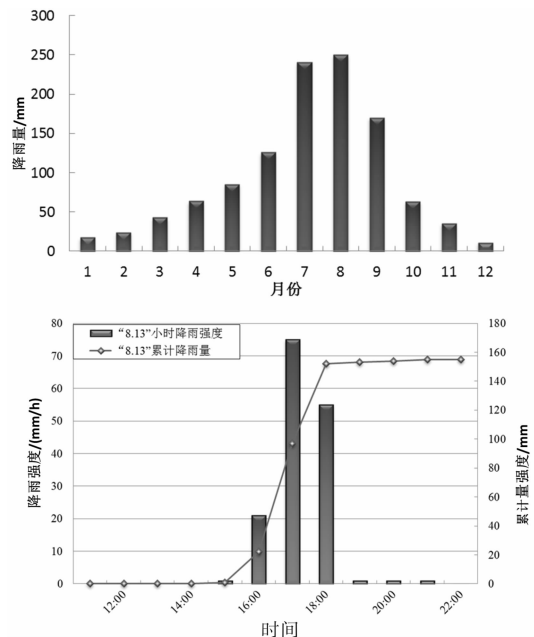


图2 研究区降雨特征

2010年8月4日, 龙池地区开始陆续出现雷阵雨天气, 2010年8月13日14:00时刻降雨强度突然增加, 16:00时刻诱发山洪泥石流, 其中泥石流暴发前2 h 小时内累计降雨量为 30 mm, 泥石流暴发时的小时降雨强度约为 24 mm/h, 17:50 时泥石流结束时, 累计降雨量为 150 mm(见图2)。由上述可知, 研究区泥石流属于暴雨型泥石流。

2 堵江型泥石流特征

泥石流的堵江特征与泥石流的堆积特征、主河特征等直接相关。而堵江型泥石流堆积特征包括泥石流的冲出距离、泥石流堆积宽度、泥石流堆积厚度、泥石流扇顶至泥石流主河距离、主河夹角以及主河宽度等。

2.1 泥石流堵江类型

泥石流的堆积或者起动, 取决于泥石流的剪切力与屈服应力的关系, 且泥石流的停淤过程伴随着泥石流的流深降低, 流速减慢等^[18-19]。前人对泥石流堆积特征基于试验模型、统计分析和数值模拟^[12]。铁永波^[22]等人分析泥石流冲出距离, 提出了泥石流冲出距离模型。地震泥石流由于泥石流流域高差大、物源储量大、流域阻力系数低等, 使得泥石流的冲出流速快、冲出方量大(图3), 根据研究区泥石流堆积特征的观测可知, 泥石流堵江特征主要由泥石流冲出距离, 扇顶至主河的距离、以及泥石流沟与主河的空间关系。

表 1 研究区泥石流特征

沟名	A/km^2	l/km	H/km	$\beta/(\text{^\circ})$	a/km^2	$\sin \alpha_1$	c/m	L/m	$\alpha/(\text{^\circ})$	h/m	b/m^2	L_1/m	D/m	$\sin \theta$	$\gamma/\%$	F	F_s
王家沟	3.5	2.99	0.92	17.16	0.22	0.04	70	100.5	4.7	4.1	7035	569	150	1	1.1	0	-3.12
燕子窝沟	0.1	0.32	0.3	43.42	0.03	0.04	40	25	5	1	1000	287	148	1	1.1	0	-1.77
公家沟	0.49	1.31	0.64	26.14	0.02	0.04	60	53	9.7	5.5	3180	72	198	1	2.6	0	-0.1
八一沟	8.5	4.23	1.65	21.25	2.01	0.02	230	978	8	10.8	224940	778	132	0.99	1.2	1	1.52
煤炭坪沟	0.3	0.89	0.46	27	0.02	0.04	55.5	84	8.3	3.5	4662	230	51.8	0.97	2.8	0	-2.82
簸箕沟	0.17	0.95	0.46	25.55	0.01	0.06	75	120	5.4	6.5	9000	134	38	0.91	2.8	0	-0.37
曹家岭沟	0.18	1.01	0.49	25.81	0.004	0.05	51	63	6.5	3	3213	94	49	0.96	2.8	0	-0.63
栗子坪沟	0.19	0.8	0.44	28.58	0.01	0.07	100	96.2	3.8	7	9620	165	37	1	1.9	0	-1.86
水井槽沟	0.15	0.33	0.36	47.32	0.03	0.05	51.4	60	3.2	3	3084	71	32	0.99	1.9	0	-0.34
黄央沟	0.61	1.64	0.95	30.19	0.26	0.04	180	207	5.7	7.5	37260	172	39.8	0.96	5.3	1	0.88
水打沟	0.33	1.12	0.62	28.79	0.05	0.03	182.9	237	6.6	6.7	43347.3	173	73	0.99	2.8	1	0.88
麻柳槽沟	0.89	1.81	0.91	26.78	0.16	0.07	319	94	5.4	7	29986	89	54	0.97	2.2	1	0.09
水鸠坪沟	2.84	2.83	1.02	19.87	0.39	0.07	210	110	8.5	8	23100	254	59	0.98	2.2	0	-2.44
蒋家沟	0.39	1.1	0.69	32.13	0.04	0.07	51	88	9.1	6.5	4488	188	43	0.98	2.2	0	-2.33
陈家坡沟	0.07	0.36	0.27	36.51	0.01	0.05	20	40	5.6	2.1	800	364	58	0.98	2.6	0	-5.59
廖家沟	0.09	0.53	0.35	33.44	0.003	0.02	48.3	68	9	1.2	3284.4	60	36	0.96	6.9	1	0.22
李泉太沟	0.32	0.86	0.68	38.29	0.06	0.06	49.5	115	8.3	6.5	5692.5	64.8	44.5	0.99	6.9	1	1.13
马蹄窝沟	0.22	0.73	0.46	32.19	0.01	0.05	49.5	55	9.3	2.5	2722.5	51.4	47.5	0.94	2.9	1	0.08
碱平沟	3.61	2.99	1.1	20.18	0.52	0.04	196	276	8	7.4	54096	156	39	0.97	6.9	1	3.08
桂花树沟	0.09	0.67	0.34	27.01	0.003	0.04	68	81	7.4	4	5508	72	18	0.99	6.9	1	0.5
马家乌基沟	0.26	0.88	0.55	31.81	0.02	0.08	110	65	8	5	7150	48.5	60	1	3	1	0.275
核桃树 2 号	0.22	0.9	0.65	35.79	0.06	0.04	120	112	8.7	5	13440	67.4	51	0.92	7.8	1	0.87
纸厂沟	2.93	3.15	1.38	23.62	0.25	0.02	180	269	7	8	48420	211	112	1	2.8	1	0.52
峰洞岩 2 号	0.24	0.88	0.71	39.14	0.08	0.09	87	108	6	8	9396	84	46	1	5.8	1	0.52
峰洞岩 1 号	0.11	0.38	0.36	43.46	0.03	0.08	84	97	9.2	8	8148	74	61	1	5.8	1	0.38
孙家沟	1.39	2.35	1.06	24.29	0.25	0.04	212	178	7.8	6.5	37736	135	72	1	3.1	1	0.6
双养子沟	2.39	3.07	1.28	22.7	0.41	0.03	156	176	6.5	5	27456	126	75	0.94	3	1	0.67
椿树芽沟	0.54	1.48	0.86	30.04	0.21	0.04	182	153	7	6.5	27846	146	66	0.88	4.7	1	0.11
冷浸沟	2.71	2.53	1.12	23.91	0.43	0.03	170	187	7	7.5	31790	150	45	0.94	7.1	1	0.82
大柿坪沟	0.54	1.17	0.94	38.87	0.08	0.03	170	221	8.1	7	37570	179	42	0.94	6.6	1	1
漆树坪沟	1.05	1.84	0.94	27.14	0.07	0.05	177.4	166	6.9	7.5	29448.4	143	34	0.99	6.6	1	0.68
猪槽沟	2.37	2.58	1.38	28.1	0.34	0.03	197	200	9	6	39400	124	55.4	0.79	7	1	1.37
白岩沟	1.76	1.8	0.41	12.87	0.11	0.07	74	87	9.8	5	6438	694	40	0.98	15	0	-15.18
斑鸠岗 1 号	0.17	0.57	0.36	32.7	0.02	0.06	42.3	60	5.9	3.5	2538	375	11	0.91	2.5	0	-28.64
斑鸠岗 2 号	0.03	0.32	0.22	34.69	0.001	0.06	30	50	4.6	3.1	1500	40	12	0.99	2	1	0.83
斑鸠岗沟	0.58	1.19	0.53	23.98	0.01	0.04	42.3	60	5.9	2.4	2538	176	47	0.87	2	0	-2.47
长河坝	5.3	2.69	1.19	23.94	0.72	0.03	206	278	5.2	8	57268	170	69	0.85	2.5	1	1.57

(表中: A 为泥石流流域面积/ km^2 ; a 为流域内滑坡、崩塌覆盖/ km^2 ; b 为泥石流堆积扇面积/ m^2 ; l 为泥石流主沟长/ km ; L 为泥石流堆积扇长/ m ; L_1 为泥石流堆积扇扇顶至主河岸的距离/ m ; H 为泥石流流域高差/ km ; D 泥石流主河宽度/ m ; c 为泥石流堆积扇堆积最大宽度/ m ; $\sin \alpha_1$ 为泥石流堆积扇原堆积区坡度正弦值, $\sin \theta$ 为堆积扇与主河夹角正弦值; β 为泥石流主沟平均坡度/ $^\circ$; γ 为泥石流沟对应主河纵比降/ $\%$, $\alpha/^\circ$, h/m , F , F_s)

泥石流的入河特征, 决定了泥石流在主河的运动特征, 正常情况下, 泥石流汇入主河时, 由于主河的横向纵比降小于泥石流堆积区的纵向纵比降, 即泥石流入河时近似的潜入式。但由于人为原因, 即道路、河堤等工程, 使得泥石流的堆积区纵坡突变, 即因为人为工程使得河堤岸坡的



图3 研究区典型泥石流堵江特征

大纵比降, 泥石流汇入主河时近似跳跃式。因为龙池至龙池国家森林公园交通要道以及人工河堤, 使得泥石流沟堆积区坡度发生突增, 即研究区为人为工程纵坡增加型堆积。

堵江型泥石流的堆积特征受到泥石流堆积区特征、主河形态以及其汇入方式的控制^[23], 泥石流冲出距离与泥石流扇顶至主河的距离等, 决定了泥石流是否重要的特征(图4)。

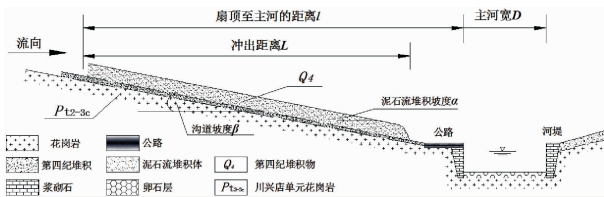


图4 泥石流堵江示意图

2.2 泥石流堵江特征

为了研究该区泥石流堵江特征, 本文对泥石

流流域特征、泥石流物源特征、泥石流堆积特征以及泥石流沟对应的主河特征等进行野外观测, 其中流域特征包括泥石流流域面积、流域高差、沟道坡度、主沟斜长等, 而泥石流的物源特征包含物源动储量、滑坡面积等, 泥石流堆积特征包括冲出距离、堆积坡度、堆积厚度、扇顶至主河的距离, 主河沟道特征包括主河宽度、主河坡度以及主河与泥石流沟的夹角等(表1)。

2.3 泥石流堆积特征

通过研究区堵江型泥石流的冲出距离、堆积宽度和堆积厚度与泥石流流域特征和物源特征的关系, 即冲出距离等与流域面积、流域高差、泥石流沟斜长、沟道平均纵坡、堆积扇堆积厚度、物源动储量、滑坡面积等函数关系的拟合(图5), 而泥石流的冲出距离与泥石流流域特征的关系如式(1)所示。

$$\begin{cases} L = 4.07A^3 - 34.528A^2 + 106.666A + 68.281, \\ R^2 = 0.893 \& P = 4.072 \times 10^{-16}; \\ L = 49.931l^3 - 246.346l^2 + 390.901l - 73.049, \\ R^2 = 0.879 \& P = 3.084 \times 10^{-15}; \\ L = 1042.086H^3 - 23228.071H^2 + 1708.218H - 290.218, \\ R^2 = 0.844 \& P = 2.158 \times 10^{-13}. \end{cases} \quad (1)$$

式中: L 为泥石流冲出距离(m); A 为泥石流流域面积(km^2); H 为泥石流流域高差(km)。由此可知, 研究区泥石流的冲出距离与泥石流流域特征中的流域面积和流域高差相关。

泥石流的冲出距离与泥石流的物源特征和泥石流的流域特征均相关, 且相关性和显著性较好(图6)。而研究区泥石流堆积宽度与泥石流流域特征的关系如式(2)所示。

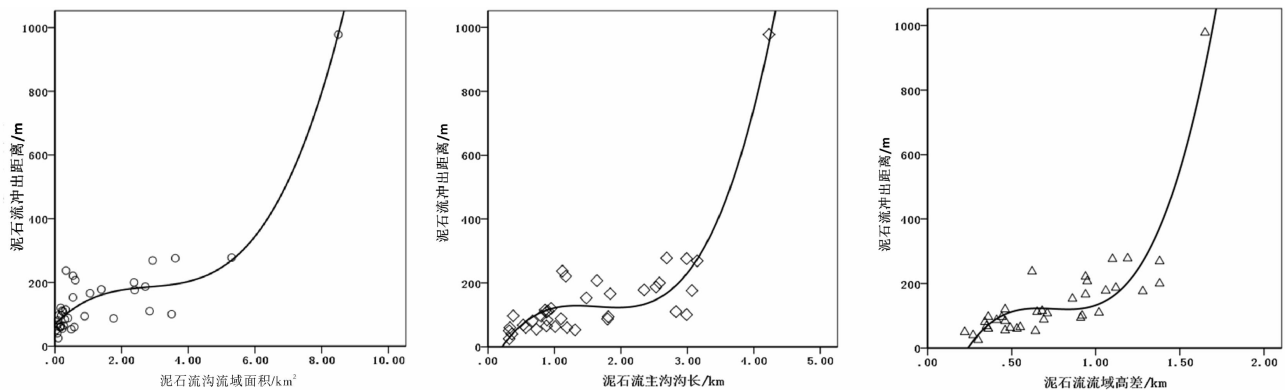


图5 冲出距离与流域特征的关系

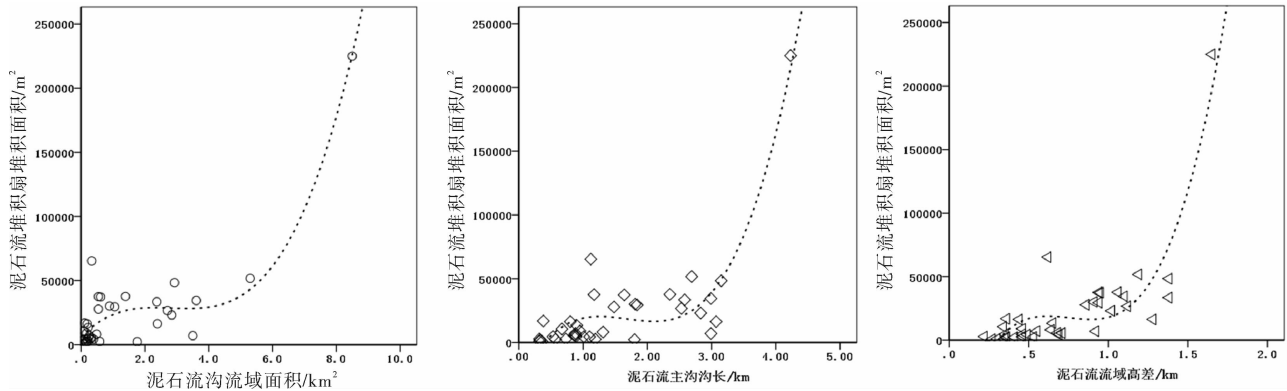


图6 堆积宽度与流域特征的关系

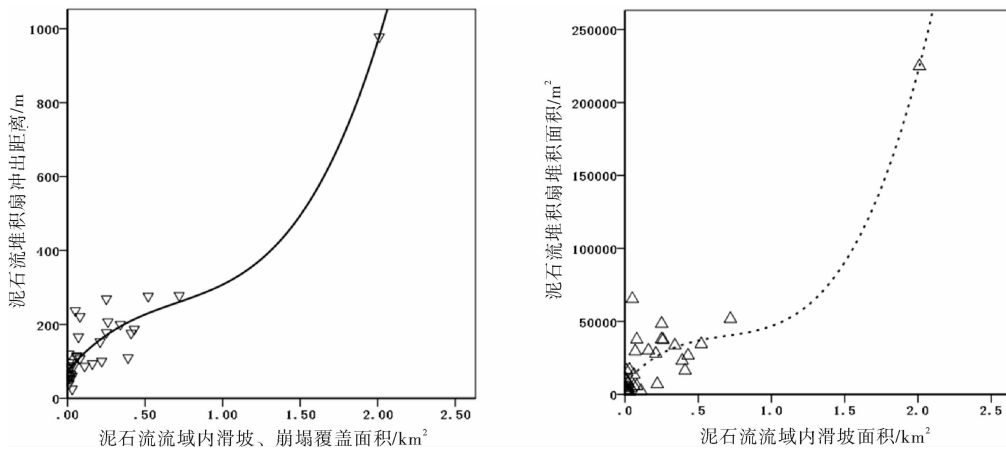


图7 堆积宽度与物源动储量的关系

$$\begin{cases} b = 1108.976A^3 - 9393.33A^2 + 25615.565A + 6121.797, \\ R^2 = 0.871 & P = 9.513 \times 10^{-15}; \\ b = 12895.718l^3 - 64948.878l^2 + 102189.738l - 31023.151, \\ R^2 = 0.833 & P = 6.746 \times 10^{-13}; \\ b = 266891.216H^3 - 603803.462H^2 + 440807.226H - 85897.075, \\ R^2 = 0.795 & P = 1.848 \times 10^{-11}. \end{cases} \quad (2)$$

式中: d 为泥石流的堆积宽度(m); A 为研究区泥石流流域面积(km^2); l 为研究区泥石流流域的沟长(km)。由此可见,泥石流的堆积宽度与泥石流流域的流域面积和沟道长度相关。

与此同时,泥石流的堆积宽度与泥石流堵江也相关,即泥石流堆积宽度越宽,其堵江时的泥石流坝越宽,主河溃决时所需的流量就会越大(图7),而研究区泥石流的堆积宽度与研究区物源特征关系如式(3)所示。

$$\begin{cases} L = 236.835a^3 - 498.424a^2 + 494.851a + 74.336, \\ R^2 = 0.911 & P = 2.0335 \times 10^{-17} \\ b = 70905.364a^3 - 145104.912a^2 + 113477.818a + 7512.419, \\ R^2 = 0.881 & P = 2.443 \times 10^{-15} \end{cases} \quad (3)$$

式中: d 为泥石流的堆积宽度(m); V 为研究区泥石流流域内物源动储量(10^4 m^4); a 为研究区泥石流流域内滑坡、崩塌物源覆盖面积(km^2)。由上述研究可知,泥石流的堆积宽度与泥石流流域的物源动储量和物源覆盖面积相关。

综上所述可知,泥石流的堆积宽度与泥石流的物源特征和泥石流的流域特征均相关,且相关性和显著性较好。

泥石流的堆积厚度间接反映了泥石流在堆积区的动力学特征,即堆积厚度越大,泥石流停淤时的内摩擦力越大,其停淤时的速度也越大(图8)。而研究区泥石流的堆积厚度也与泥石流的物源特征和泥石流的流域特征均相关。

$$\begin{cases} h = 3.342L^3 - 43.783L^2 + 182.689L - 149.102, \\ R^2 = 0.833 & P = 6.606 \times 10^{-13}. \end{cases} \quad (4)$$

式中: h 为堆积厚度(m); L 为泥石流的冲出距离(m); 其他符号同上。

3 研究区泥石流堵江特征

总结前人研究的41条堵江型泥石流^[2,4,24-29],

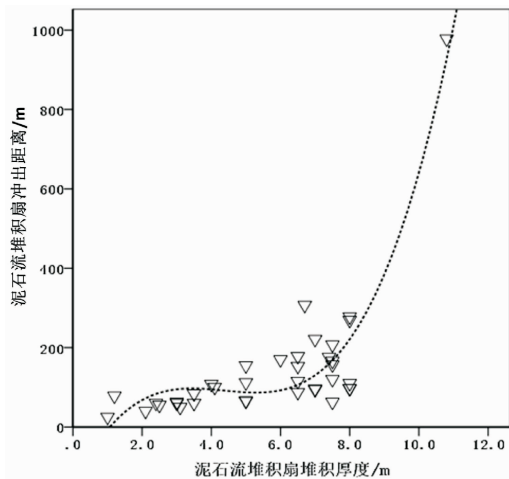


图8 泥石流堆积厚度与冲出距离的关系

其中包括西藏地区堵江型泥石流、岷江流域地的堵江型泥石流、云南地区堵江型泥石流、震前堵江型泥石流、震后堵江型泥石流等, 41 条堵江型泥石流所涉及到的泥石流流域特征、物源特征、主河特征等 18 参数主要包含了流域面积、主沟长度、沟道高差、沟道纵比降、动物源量、泥石流容重、支沟流量, 其中泥石流流域特征参数所占百分比最高(图9)。

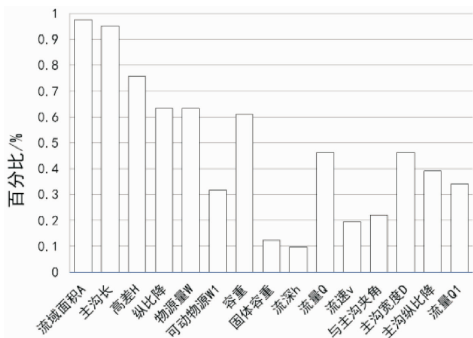


图9 堵江泥石流涉及的参数

泥石流堵江与泥石流流域特征、泥石流物源特征以及泥石流沟对应的主河特征等密切相关, 前人对泥石流堵江特征的研究主要基于泥石流动力学参数以及泥石流沟与主河的几何关系, 即泥石流规模、堆积区主河宽度、泥石流沟纵比降、泥石流流量、主河流量、泥石流颗粒级配、主河纵比降、泥石流粘度、重度、泥石流与主河夹角、泥石流暴发频率等, 其中该研究区 36 条泥石流的现场调查发现, 泥石流暴发导致龙溪河堵塞的泥石流沟有 27 条, 未发生泥石流堵江的泥石流沟有 9 条。

3.1 泥石流堵江影响因素

泥石流的动力学性质与泥石流流域面积、物源动储量、流域高差、沟道坡度、沟长等泥石流

流域特征直接相关。因此, 本文根据泥石流流域特征、主河特征等因素分析泥石流堵江特征。

研究区泥石流堵江特征与泥石流冲出距离 L 、扇顶至主河的距离 L_1 密切相关, 即当冲出距离大于扇顶至主河的距离时, 泥石流可能堵江, 当冲出距离小于等于扇顶至主河的距离时, 泥石流不发生堵江:

$$\begin{cases} L - L_1 \leq 0, F = 0, \text{不堵江;} \\ L - L_1 \geq 0, F = 1, \text{可能堵江。} \end{cases} \quad (5)$$

式中: L_1 为扇顶至主河的距离(m); F 为泥石流堵江特征, 无量纲参数, 当 $F = 0$ 时不发生堵江, 当 $F = 1$ 时发生堵江。

通过统计分析, 泥石流堵江特征与泥石流流域特征、泥石流堆积特征相关, 且泥石流堵江特征 F 与泥石流堵江特征 F_s 、冲击距离与扇顶至主河的距离的差值 ΔL 、泥石流容重 γ 、堆积扇宽度, 即:

$$\begin{cases} F = 0.002b + 0.002\Delta L + 0.07\gamma + 0.12, \\ R^2 = 0.66 \text{ \& } P = 1.8 \times 10^{-10}; \\ F = 4.892 \times 10^{-4} F_s^3 + 0.023 F_s^2 + 0.276 F_s + 0.618, \\ R^2 = 0.6 \text{ \& } P = 4.892 \times 10^{-4}. \end{cases} \quad (6)$$

3.2 泥石流堵江程度特征

周必凡等^[30]从泥石流冲出量、沟床条件、主河流量等方面提出了泥石流能否堵塞主河的判别依据。陈德明等^[31]通过水槽实验的方法, 根据泥石流的容重, 主河水流的重度, 泥石流的流量, 主河水流流量, 泥石流流速, 主河水流流速, 汇流角等建立了泥石流堵江判别式。朱平等^[32]通过培龙沟泥石流的输沙堵河成因模拟实验, 从输沙的角度探讨泥石流堵河可能性, 分析影响泥石流堵河的主要因素, 其中包括地形地貌、泥石流暴发规模、泥石流容重、泥石流沟与主河的交汇关系、泥石流沟与主河的水动力条件等。徐永年^[33]提出影响泥石流堵河的主要因素有泥石流的入汇角、容重和泥石流规模, 并引入泥石流对主河的影响度的概念和表达式。

而本文通过野外泥石流堵江特征调查, 根据泥石流冲出距离 L 、扇顶至主河的距离 L_1 以及主河宽度 D 的关系(图10), 分析泥石流堵河情况, 即:

$$F_s = (D - L + L_1)/D \begin{cases} \leq 0, \text{全堵;} \\ 0 \geq, \text{且} \leq 1, \text{局部堵;} \\ \geq 1, \text{不堵。} \end{cases} \quad (7)$$

$$F_s = 0.013\Delta L^2 - 6.610 \times 10^{-6}\Delta L + 1.057, \quad R^2 = 0.89. \quad (8)$$

式中: $\Delta L = L - L_1/m$, F_s 为泥石流堵江特征, 无量纲数。

表 2 堵江泥石流流域特征

沟名	流域面积 A/km^2	主沟长 L/km	高差 H/m	纵比降 ‰	物源量 $W/\text{万 m}^3$	可动物源 $V/\text{万 m}^3$	流量 $Q/(\text{m}^3/\text{s})$	与主沟 夹角/ $^\circ$	主沟宽度 D/m	主沟纵比 降/ ‰
红椿沟	5.35	3.6	1288.4	358			745.76	90	80	110
烧房沟	0.61	1.58	1014	464.97	222	77.3	268	90	90	110
银杏坪	7.16	4.32	1935	388	242.55	61.9	262.895	70	70	21.3
高家沟	3.79	3.26	1807	523	271.87	61.55	335.62	90	316	5
彻底关	16.49	6.2	2381.5	302	742.679	194.525	678.4	80	70	70

表 3 堵江泥石流堆积区特征

沟名	主河宽 度/ m	主河坡 度/ $^\circ$	扇口至主河 距离/ m	扇纵比 降/ ‰	主河高 差/ m	堆积长 度/ m	堆积宽 度/ m	堆积厚 度/ m	堵江 百分比
红椿沟	92	55	274	20.6	3	390	340	25	0.77
烧房沟	91.7	55	79	62	42	170	250	15	0.9
银杏坪沟	28.8	55	97	55	6	125	100	12	0.9
高家沟	70	55	56	63	2	126	270	20	1
彻底关沟	44	55	85	44	7	100	348	15	0.34

表 4 泥石流堵江评价结果

沟名	实际冲出距离/ m	预测冲出距离/ m	误差	堵江特征	预测堵江特征	误差
红椿沟	390	412.08	0.056	1	1.5	0.5
烧房沟	170	123.44	0.274	1	0.75	0.25
银杏坪沟	125	100.25	0.198	1	1.12	0.12
高家沟	126	143.24	0.136	1	1.23	0.23
彻底关沟	100	125.68	0.256	1	0.44	0.56

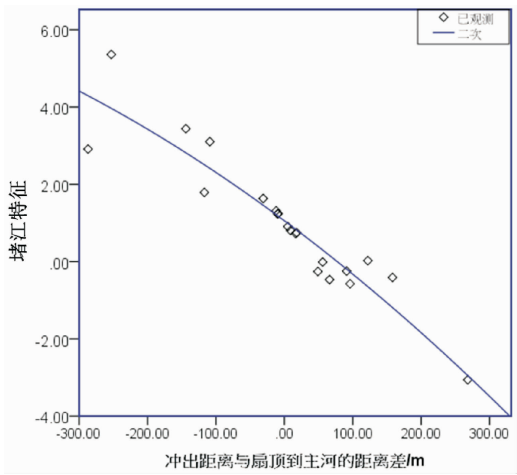


图 10 堵江特征与堆积特征的关系

4 模型验证

本文采用了汶川县境内的烧房沟等堵江型泥石流的沟为例，研究龙池地区堵江模型的实用性情况，该区泥石流也是位于汶川地震作用中心，本次泥石流的发育背景和泥石流暴发机理相同，即强降雨作用下的暴雨型泥石流，泥石流物源主要为汶川地震中形成的滑坡、崩塌堆积体等(表 2)。

而泥石流沟与主河的几何特征关系如表 3

所示。

根据以上观测可知，根据公式可知，红椿沟、烧房沟、银杏坪沟、高家沟、彻底关沟等泥石流堵江特征评价结果(表 4)。

由上述可知，强震区的堵江型泥石流沟的流域特征、物源特征以及主河特征等因素与泥石流的堵江特征相关，由龙池研究区的泥石流统计得出的冲出距离、堆积宽度、堵江特征等在汶川震区存也在一定的实用性。

5 结论

四川省都江堰市龙池镇 2010 年 8 月 13 日暴发了特大群发性泥石流，泥石流冲出固体物质总共达 1 000 万 m^3 ，导致龙池地区沿龙溪河两岸居民房屋严重受损，导致龙溪河河床抬升，震区灾后重建区遭到严重破坏，因此，本文结合研究区泥石流堵江情况，分析震区泥石流堵江特征。

(1)2010 年 8 月 13 日的强降雨条件，导致该区群发性泥石流，其中泥石流暴发时的降雨强度 24 mm/h ，泥石流暴发前的前期降雨量为 58 mm ，由于地震作用，导致研究区泥石流暴发的激发雨量和前期降雨量降低了。

(2)根据研究区泥石流冲出特征，以及泥石流在堆积区的堆积特征等，将该区泥石流堵江分为由于施工道路、河堤等工程纵坡增加型堵江，而泥石流扇顶至河岸的距离、泥石流冲出距离等是

泥石流堵江的重要特征。

(3) 选取研究区内堆积完整的 36 条堵江泥石流沟, 9 条未发生堵江的泥石流为研究对象, 由泥石流堵江特征参数的统计可知, 泥石流堵江与研究区泥石流流域、泥石流物源特征等相关, 且泥石流堵江系数等与泥石流冲出特征、泥石流沟口与主河的空间关系相关。

参考文献:

- [1] 程尊兰, 党超, 刘晶晶, 等. 藏东南部泥石流堵河试验研究[J]. 地学前缘, 2007, 14(6): 182-187.
- [2] 韦方强, 胡凯衡, 崔鹏. 蒋家沟泥石流堵江成因与特征[J]. 水土保持学报, 2002, 16(6): 71-75.
- [3] 吴华林, 张小峰, 段文忠. 泥沙群体沉速计算及其应用[J]. 长江科学院院报, 1998, 15(3): 24-27.
- [4] 郭志学, 曹叔允, 刘兴年. 泥石流堵江影响因素试验研究[J]. 水利学报, 2004, 35(11): 39-45.
- [5] 党超, 程尊兰, 刘晶晶. 泥石流堵塞主河条件[J]. 山地学报, 2009, 27(5): 557-563.
- [6] 陈德明, 王兆印, 何耘. 泥石流入汇对河流影响的实验研究[J]. 泥沙研究, 2002, 38(3): 22-28.
- [7] 陈春光, 姚令侃, 杨庆华. 入汇主河的泥石流龙头运动机理研究[J]. 水利学报, 2004, 35(1): 11-16.
- [8] 张金山, 沈兴菊, 谢洪. 泥石流堵河影响因素研究——以岷江上游为例[J]. 灾害学, 2007, 22(2): 82-86.
- [9] Lecomte, I Thollet, H Breien, et al. Using geophysics on a terminal moraine damming a glacial lake; the Flatbre debris flow case, Western Norway[M]. Geophysical Research, 2007.
- [10] CHENG Zunlan, Dang Chao, LIU Jingjing, et al. Experiments of Debris Flow Damming in Southeast Tibet[J]. Earth Science Frontiers, 2007, 14(6): 181-187.
- [11] 唐川, 李为乐, 丁军. 汶川震区映秀镇“8·14”特大泥石流灾害调查[J]. 地球科学, 2011, 36(1): 172-180.
- [12] 唐川, 周钜乾, 朱静. 泥石流堆积扇危险度分区评价的数值模拟研究[J]. 灾害学, 1994, 9(4): 7-13.
- [13] Fan Xuanmei, Cees J van Westen, Xu Qiang, et al. Analysis of landslide dams induced by the 2008 Wenchuan earthquake [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2012, 57: 25-37.
- [14] Xuanmei Fan, Cees J. van Westen, Oliver Korup, et al. Transient water and sediment storage of the decaying landslide dams induced by the 2008 Wenchuan earthquake, China[J]. Geomorphology, 2012, 171: 58-68.
- [15] Peng M, Zhang L M, Chang D S, et al. Engineering risk mitigation measures for the landslide dams induced by the 2008 Wenchuan earthquake [J]. Engineering Geology, 2014, (180): 68-84.
- [16] 屈永平, 唐川, 杨永红, 等. 龙池地区“8·13”特大群发性泥石流堆积扇几何形态量化分析[J]. 水电能源科学, 2014(3): 171-174.
- [17] 屈永平, 唐川, 刘洋, 等. 四川省都江堰市龙池地区“8·13”泥石流堆积扇调查和分析[J]. 水利学报, 2015, 46(2): 197-207.
- [18] 余斌, 洪勇, 何淑芬. 降雨泥石流预报的研究[J]. 水土保持学报, 2002, 16(6): 96-99.
- [19] 刘希林, 唐川. 泥石流危险性分析[M]. 北京: 科学出版社, 1995.
- [20] 唐川、刘洪江. 泥石流堆积扇危险度分区定量评价研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1997, 3(3): 63-69.
- [21] 铁永波, 唐川, 倪化勇. 暴雨泥石流冲出距离预测[J]. 山地学报, 2011, 29(2): 250-253.
- [22] 张金山, 谢洪. 岷江上游泥石流堵河可能性的经验公式判别[J]. 长江流域资源与环境, 2008, 17(4): 651-655.
- [23] 屈永平, 唐川, 卜祥航, 等. 石棉县熊家沟“7·04”泥石流堵江调查与分析[J]. 水利学报, 2016, 47(1): 44-53.
- [24] 陈宁生, 陈瑞. 培龙沟泥石流及其堵江可能性探讨[J]. 山地学报, 2002, 20(6): 738-742.
- [25] 丁军. 强震区泥石流活动规模与最大堆积长度预测研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2011.
- [26] 黄翔超, 常鸣, 赵学宏. 水磨沟泥石流基本特征及堵江可能性分析[J]. 南水北调与水利科技, 2011, 9(6): 127-135.
- [27] 周志东, 黄强, 邓婷. 四川红椿沟泥石流成因初步分析[J]. 水利水电技术, 2011, 42(9): 56-57.
- [28] 周伟, 陈宁生, 邓明枫. 四川省都江堰市八一沟泥石流动力学特征及危险性评估[J]. 水土保持通报, 2011, 31(5): 238-243.
- [29] 黄翔超. 汶川震区典型泥石流堵江可能性分析[D]. 成都: 成都理工大学, 2012.
- [30] 周必凡, 李德基, 罗德富, 等. 泥石流防治指南[M]. 北京: 科学出版社, 1991: 70-74.
- [31] 陈德明, 王兆印, 何耘. 泥石流入汇对河流影响的实验研究[J]. 泥沙研究, 2002(3): 22-28.
- [32] 朱平一, 程尊兰, 游勇. 川藏公路培龙沟泥石流输沙堵河成因探讨[J]. 自然灾害学报, 2002, 9(1): 80-83.
- [33] 徐永年, 匡尚富, 黄永健, 等. 泥石流入汇的危险性判别指标[J]. 自然灾害学报, 2002, 11(3): 33-38.

Investigation on the “8·13” Damming of Debris Flow in Longchi Town, Dujiangyan City, Sicuan Province

XU Xiangning, XIANG Guoping, ZHANG Dandan and XUE Feng
(Sichuan Geology and Mineral Exploration and Development Bureau of the 405
Geological Team, Chengdu 611830, China)

Abstract: After Wenchuan earthquake, the geological hazards in the earthquake area entered into the period of high-incidence, including the disaster of debris flow, especially in the rainy season. On August 13, 2010, large-scale clusters debris flow was broke out in the Longchi town of Dujiangyan city, roads was washed out and riverbed of Longxi was raised. In order to study the damming characteristics of the debris flow in the earthquake area, therefore, 36 gullies which the accumulation fans of debris flow completely chose as the object to study, through the field investigation and Spss statistics in the study area. Purpose to study the damming types, and analyze the blocking-river relationship, by studying characteristics of the drainage characteristics, materials characteristics, rushed out distance, distance from the top of fan to the main river. On this basis, the statistic model of damming of debris flow was established, providing certain reference prevention and control for debris flow disaster in the study area.

Key words: “8·13” debris flow; accumulation characteristics; damming characteristics; Longchi town; Dujiangyan City of Sichuan