

金沙江向家坝库区泥石流发育状况 及其沟谷形态的非线性特征

李俊才¹, 胡卸文²

(1. 成都理工学院, 四川 成都 610059; 2. 西南交通大学土木工程学院, 四川 成都 610031)

摘要:通过对金沙江向家坝库区长约150 km范围内的55条泥石流沟发育状况统计显示, 自库首至库尾, 泥石流的数目、发育密度及规模均呈逐渐增强趋势。同时泥石流沟的流域面积、主沟长度及纵坡平均坡降均存在明显的分形特征, 它们与沟道数目之间有良好的非线性关系, 并在一定程度上揭示了这些泥石流沟谷形态演变的非均匀性和自相似性。

关键词: 泥石流; 沟谷形态; 演变

中图分类号: P642.23 **文献标识码:** A

金沙江向家坝库区自云南水富县城至溪洛渡坝区, 全长约150 km。库区地处青藏高原和云贵高原向四川盆地的过渡带, 区内金沙江及其各级支流、支沟切割强烈, 地形高差悬殊。伴随褶皱、断裂及地表风化作用, 沿河两岸岩体破碎, 崩滑地质现象发育。加之金沙江沿线降水充沛但分布不均, 雨量集中, 且多暴雨或特大暴雨的特点, 使向家坝库区长约150 km范围内泥石流分布广泛、类型多样, 活动也较为频繁。

众所周知, 泥石流活动是各种因素综合作用的结果, 地形地貌、地层岩性及其相关发育的崩塌、滑坡体松散物质与集中降雨相互作用转化成泥石流的过程中, 实质上反映了泥石流演化的一种动力过程, 而这种转化动力过程中形成的沟谷和流域, 经研究证实, 具备一些非线性特征^[1,2], 如沟道数目与流域面积、沟道数目与沟道纵坡坡降等都存在这种特点。显然分析这些沟谷形态因素的非线性特征, 不仅可揭示流域内泥石流演变的自相似性, 而且能判别各形态因素对泥石流演变的控制程度。

1 库区泥石流分布状况

野外调查显示^[3], 在长约150 km的库区范围内, 分布有直接进入金沙江干流河谷的泥石流沟共55条, 涉及的流域面积达1622.7 km², 见表1^[3]。

统计显示, 库区内不同河段泥石流发育密度和涉及的流域面积有较大差异(表2)。具体表现为: 库区泥石流在空间分布上的发育程度具不均一性, 无论从泥石流的数目、密度还是流域面积, 均表明由库首至库尾有逐渐增强的趋势, 且库区泥石流主要集中在屏山县城以上, 尤其是新市镇至库尾河段最为发育。

2 库区泥石流沟谷形态的非线性及其与泥石流发育的关系

2.1 沟道数与流域面积的关系

统计表明, 库区内流域面积 $< 10 \text{ km}^2$ 的泥石流沟22条, $10 \text{ km}^2 \sim 20 \text{ km}^2$ 的沟20条, $20 \text{ km}^2 \sim 30 \text{ km}^2$ 的沟5条, 三者合计共47条, 占泥石流沟总数的87.5%; 而 $> 50 \text{ km}^2$ 的沟仅5条, 只占总数的11.1%。它说明库区范围内, 流域面积 $< 30 \text{ km}^2$ 的沟是最利于发生泥石流的, 这种情况显然与这些沟谷内既有丰富的松散固体物源, 又能在只出现局部暴雨情况下迅速汇集足够的降水有关。相反, 过大流域面积的沟谷, 即使有很丰富的松散固体物源, 但在只出现局部暴雨的情况下很难使整个流域内迅速汇聚充足的水源, 除非出现大面积暴雨时才有可能产生泥石流。故在库区范围内, 一些流域面积很大的沟谷, 即使产生泥石流, 也多为低频、稀

收稿日期: 2000-03-20; 改回日期: 2000-08-14.

基金项目: 中科院东川泥石流观测站基金资助项目.

作者简介: 李俊才(1963-), 男(汉族), 副教授, 地质工程专业在职博士生; 胡卸文(1963-), 男(汉族), 浙江金华人, 博士, 教授, 主要从事工程地质、环境地质的教学和研究。在国内外发表论文50多篇。

表1 金沙江向家坝库区泥石流沟谷特征一览表^[3]

Table 1 Debris flow gully erosion form in Xiangjiaba Reservoir area, Jingsha River

编号	沟谷名称	岸别	距坝里程 (km)	流域面积 (km ²)	主沟长度 (km)	平均坡降 (%)	编号	沟谷名称	岸别	距坝里程 (km)	流域面积 (km ²)	主沟长度 (km)	平均坡降 (%)
1	滩盘上沟	左	6.70	5.1	4.2	19.0	29	草鞋沟	左	96.95	5.0	4.5	40.8
2	马鞍社沟	右	7.85	1.5	0.8	71.5	30	芭蕉滩沟	左	97.55	0.3	1.0	94.7
3	大金号沟	右	10.70	10.5	6.0	16.0	31	干沟头沟	左	98.65	2.5	2.5	51.8
4	上糖房沟	右	24.45	1.7	2.5	36.2	32	小厂沟	右	100.65	11.6	6.0	25.7
5	福荣河沟	左	33.10	123.6	28.4	39.8	33	前进坡沟	左	102.45	0.8	1.5	86.8
6	新滩溪沟	左	39.95	42.6	10.6	15.8	34	庙杠子沟	右	110.55	18.5	6.5	25.6
7	鸡肝石沟	左	45.20	0.7	1.5	55.7	35	漪子坝沟	左	110.55	7.3	4.5	38.3
	龙桥沟	左	45.50	11.0	7.0	7.0	36	小波罗沟	右	113.00	0.3	0.5	127.8
9	石溪沟	右	45.95	6.0	3.0	35.5	37	大波罗沟	右	113.55	5.0	4.0	36.5
10	团包子沟	右	48.35	2.1	2.5	46.1	38	坡坡老沟	左	113.55	1.6	1.5	63.8
11	新开滩沟	左	49.20	1.9	3.0	40.4	39	马山埂沟	左	114.10	20.9	6.0	29.7
12	石柱埂沟	右	49.50	1.5	2.0	50.2	40	大坪沟	右	115.60	1.5	2.2	50.0
13	大溪老沟	左	50.70	2.5	3.5	34.6	41	梁家坝沟	右	116.80	9.0	6.5	25.2
14	小汶溪沟	右	52.10	46.9	9.4	14.0	42	桧溪沟	右	119.00	199.5	22.6	7.4
15	小洪溪沟	右	55.00	16.0	4.0	28.6	43	小毛滩沟	右	121.10	22.9	8.0	25.7
16	大汶溪沟	右	56.20	301.1	30.0	5.6	44	大毛滩沟	右	123.80	448.5	56.0	3.5
17	观音殿沟	左	59.00	3.8	3.0	25.0	45	黑梁子沟	左	125.00	6.2	4.5	48.7
18	大窝沟	右	61.00	13.6	6.8	12.8	46	陆大溪沟	左	126.00	2.4	2.5	77.0
19	大鹿溪沟	右	65.10	8.6	3.0	28.7	47	陆营沟	左	128.50	7.0	5.0	44.9
20	吊杆岩沟	右	65.90	0.8	2.0	47.0	48	干沟	左	130.70	10.5	6.0	28.7
21	大溪沟	左	74.95	1.8	2.0	56.3	49	柏树沟	右	130.50	19.2	7.5	29.2
22	寸腰滩沟	左	78.15	17.1	7.5	21.4	50	黄龙滩沟	右	132.85	26.1	8.5	26.4
23	岩子坪沟	右	84.20	1.1	1.5	78.4	51	锅罗脚沟	左	133.60	32.3	11.0	19.3
24	腰房子沟	右	86.00	15.2	7.0	22.2	52	四方碑沟	右	139.00	2.1	2.2	59.2
25	清水湾沟	左	6.40	2.7	2.0	50.0	53	佛滩沟	右	140.00	25.5	11.7	19.1
26	冒水孔沟	左	87.30	13.6	4.5	33.2	54	顺河沟	右	141.30	54.0	11.2	19.9
27	黄毛滩沟	右	95.45	1.8	2.2	64.7	55	癞子沟	左	147.50	26.4	9.0	23.5
28	金刚贝沟	左	95.95	1.2	1.6	85.6							

表2 各河段泥石流数目、密度及流域面积统计

Table 2 Debris flow datum or density and their drainage area of different river reach in Xiangjiaba Reservoir area

河段名称	河段长度 (km)	泥石流数目和密度			泥石流流域面积	
		数目 (条)	占总数百分比	密度 (条/km)	流域面积 (km ²)	总面积百分比
坝址—屏山县城	31.0	4	7.3	0.129	18.8	1.2
屏山县城—新市镇	41.5	16	29.1	0.386	582.6	35.9
新市镇—溪洛渡沟口	77.5	35	63.6	0.452	1021.3	62.9

性泥石流,甚至有的沟在近20 a内已很少出现较大规模的泥石流。

进一步对表1所列资料进行分析,可见随着流域面积的增大,相应的泥石流沟条数将逐渐并快速减少,表3列出了按不同流域面积所得的泥石流沟条数,对两者进行双对数相关分析,表明两者具有良好的相关性,这种强相关说明库区流域面积确实存在分形现象,且分维值为0.498。

2.2 沟道数与沟道坡降的关系

沟床坡降对其沟道的运输能力具有较大影响,同时它也是泥石流沟谷形态的重要特征指标之一,

在沟内物源充足时,其大小直接影响着松散物质转化成泥石流的多少;以及一旦水力条件满足时,将控制泥石流暴发的规模及危害程度^[4-9]。从表1可见,库区内泥石流的平均纵坡坡降一般<100%,尤以10%~60%者最为发育,而>100%的平均纵坡坡降仅有1条沟谷。这也确实说明,沟谷的平均纵坡坡降并不是越大越有利于泥石流发生,因为过大的纵坡坡降往往不利于松散固体物质的储集,即使产生泥石流也多半是小型的,这也是库区内一些纵坡坡降很大的坡面型泥石流,大多数规模并不太大的原因。

表 3 库区泥石流沟条数与相应流域面积统计

Table 3 Debris flow datum and their related drainage area in Xiangjiaba Reservoir area

流域面积 S(km ²)	> 0.3	> 0.5	> 1.0	> 5.0	> 10.0	> 20.0	> 30.0	> 50.0	> 100.0	> 300.0
条数 N(条)	55	53	50	34	25	14	8	5	4	2
相关式	$\lg N = 1.667 - 0.498 \lg S$, 相关系数 $r = -0.958$, 分维值 0.498									

统计分析显示,随着沟道平均纵坡坡降的增高,其相应的泥石流沟条数也呈减少趋势(表 4)。两者

也具较好的相关性,这说明库区泥石流沟的纵坡坡降本身存在分形现象,相应的分维为 0.977。

表 4 库区泥石流沟条数与相应的沟道坡降统计

Table 4 Debris flow datum and their related gully ratio of slop in Xiangjiaba Reservoir area

主沟平均坡降(%)	> 3	> 5	> 10	> 20	> 30	> 40	> 50	> 60	> 70	> 80	> 90	> 120
条数 N(条)	55	54	51	43	29	22	16	9	7	4	2	1
相关式	$\lg N = 2.578 - 0.977 \lg I$, $r = -0.853$, 分维值 0.977.											

2.3 沟道数与主沟长度的关系

泥石流主沟长度与流域面积对泥石流暴发的控制效应是较为接近的,流域面积越小、流程越短,显然越不利于松散物质的储存,却有利于碎屑物的启动,一旦水力条件具备,即越利于泥石流的形成;相反,则不利于泥石流的暴发。对主沟长度与沟道数的统计分析表明(表 5),随主沟长度的增大,沟道数

也是渐趋减少的,两者之间也存在良好的相关性,即主沟长度也存在分形特点,相应分维为 1.069。

统计表明,库区内泥石流主沟长度普遍 < 12km, 占总数的 92.7%, 其中尤以主沟长度为 2km ~ 8km 占绝对优势。而主沟长度 > 20km 的沟只有 4 条, 仅占 7.3%, 这种状况正如上述, 短小冲沟因落差大, 很有利于泥石流的启动。

表 5 库区泥石流沟条数与相应的主沟长度统计

Table 5 Debris flow datum and their main gully length in Xiangjiaba Reservoir area

主沟长度 L(km)	> 0.5	> 1.0	> 1.5	> 2.0	> 3.0	> 4.0	> 5.0	> 7.0	> 8.0	> 10.0	> 20.0	> 25.0	> 50.0
条数 N(条)	55	53	52	46	36	31	24	16	12	8	4	3	1
相关式	$\lg N = 2.027 - 1.069 \lg L$, $r = -0.945$, 分维值 1.069												

2.4 泥石流沟谷形态非线性的工程意义

综合上述分析,就金沙江向家坝库区而言,流域面积 < 30 km²、主沟长度 < 12 km 和主沟平均纵坡坡降 < 100% (即平均纵坡坡度 < 45°) 的沟谷,最有利于泥石流的发生,而且往往产生规模较大的泥石流。由于满足上述三个条件的沟谷,主要分布在金沙江急剧下切的新市镇以上河段,故从泥石流的数量、密度、规模等诸方面看,也都是以该河段最为发育,而屏山至新市镇河段次之,屏山以下河段并不很发育。

从泥石流沟道数与其流域面积、沟道坡降和主沟长度的非线性关系上看,以流域面积显示出分维最小(0.498),沟道坡降次之(0.977),主沟长度最大(1.069)。如果把泥石流的形成和发生作为一个系统,显然这是一个开放的自组织系统,泥石流的上述三个形态要素均具有统计意义上的自相似性。流域

面积、沟道坡降和主沟长度实质上描述的是这一系统组成的空间结构(即分形结构),各形态要素分维值的高低,一方面反映了泥石流演变的自相似性;另一方面则表明不同形态要素对泥石流演变控制作用的差异性。分维值越小,表明该因素对泥石流的形成、演变所起控制作用则越为显著。因此从形态要素上看,尽管流域面积、沟道坡降和主沟长度都影响泥石流的发育和形成规模,但以流域面积最为显著,这与实际情况是完全相符的。

显然,用分维作为描述泥石流沟谷各形态要素的参数,不仅表征了在特定地质环境下泥石流沟谷演变的自相似性和自组织系统的本质特征,而且还揭示出,分维值低,其自组织程度高,表明对泥石流沟的演变控制程度高。

因此通过对泥石流沟谷形态各要素的非线性分

析,所揭示的泥石流演化趋势的自相似性,则进一步表明目前的大流域面积、长主沟长度及中等纵坡坡降等大规模泥石流,就是一些小流域面积、短主沟长及小纵坡坡降等小规模泥石流的未来发育趋势和缩影。

4 结 论

1. 受地质环境条件的影响,金沙江向家坝库区泥石流在空间分布上,发育具有不均一性。近坝地段约 30km 河段(即水富县城至屏山县城段)泥石流分布少、活动性强;而屏山县城以上,尤其是新市镇至库尾溪洛渡河段泥石流分布密集、活动性较强。

2. 库区泥石流的发育除与所在区地层岩性、地质构造及新构造活动等地质条件和降水等有关外,很大程度上受地形条件的控制,尤其是泥石流沟谷流域面积、主沟长度及平均纵坡坡降三个地形形态要素。

3. 统计分析显示,库区泥石流沟谷流域面积、主沟长度及平均纵坡坡降在空间分布上具非线性的分形特征,它们与对应的泥石流沟条数具备良好的非

线性相关关系,相对应的分维值分别为 0.498、1.069 和 0.977,表明泥石流演变过程的自相似性。从影响程度上看,流域面积对泥石流沟的形成、演变控制最为显著。

4. 综合分析表明,库区泥石流在流域面积 $< 30 \text{ km}^2$ 、主沟长度 $< 12 \text{ km}$ 和主沟平均纵坡坡降 $< 100 \%$ 时最易形成并暴发。

参考文献:

- [1] 胡卸文,宋跃. 裂隙性粘土粒度成分的分形结构特征[J]. 山地研究(现《山地学报》),1997,16(4):52~57.
- [2] Mandelbrot B. B. The Fractal Geometry of Nature[M]. San Francisco USA, 1982. 107~125.
- [3] 刘汉超,陈明东,胡卸文,等. 金沙江向家坝水电站库区环境地质评价研究[M]. 成都:成都科技大学出版社,1993.85~105.
- [4] 吴积善,等. 云南蒋家沟泥石流观测研究[M]. 北京:科学出版社,1990.16~141.
- [5] 杜榕恒,康志成,吴积善. 东川泥石流形成发展、运动规律与综合治理示范研究[M]. 北京:科学出版社,1996.142~149.
- [6] 郭仲三,田连权,等. 蒋家沟坡地土力类泥石流起动的动力学模型[M]. 北京:科学出版社,1996.57~63.

Debris Flow Distribution and Non-Linear Property of Its Gully Form in Xiangjiaba Reservoir Area, Jinsha River

LI Jun-cai¹ and HU Xie-wen²

(1. Chengdu University of Technology, Chengdu, 610059 China;

2. Dep. of Geotechnique, Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031 China)

Abstract: Comprehensive investigation and systematic research on the debris flow in Xiangjiaba Reservoir area of Jinsha River have been conducted. It has been found that there are 55 debris flows occurred on the 150Km long valley along Jinsha River. The datum or density and scale of debris flow are gradually increased from Xiangjiaba upstream to Xiluodu. Simultaneously, there is obviously fractal property in drainage area, main gully length and slop ration of debris flow. They are fine nonlinear correlation with debris flow datum. This phenomenon may reveal the nonuniformity of debris flow gully development.

Key words: debris flow; gully; development