

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2016.02.12

金沙江上游雪隆囊古滑坡堰塞湖溃坝 堆积物粒度分维特征分析

陈 松, 陈 剑, 刘 超

(中国地质大学(北京)工程技术学院, 北京 100083)

摘要: 本文依据分形理论,以金沙江上游雪隆囊古滑坡堰塞湖溃坝堆积物为研究对象,对其粒度分维特征进行研究。研究表明:溃坝堆积物具有很好的统计自相似性,随着采样区空间位置的不同,其粒度分维值的大小也有明显的变化,即上游段粒度分维平均值为 2.52,中游段粒度分维平均值为 2.28,下游段粒度分维平均值为 2.06。且粒度分维值的大小与分选性的好坏密切相关,分选系数大则分维值大,反之,分维值则小。粒度分维与粒度分布以及粒度的粗细也有一定的内在关系,粒度分维值 D 既能够反映研究区溃坝堆积物粒度的分布也能够反映其溃坝堆积物颗粒的粗细。

关键词: 金沙江;雪隆囊;古滑坡;粒度分维;分选系数

中图分类号: TU441⁺.31

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2016)02-0078-08

Analysis of grain size fractal feature of outburst deposits induced by the Xuelongnang Paleolandslide-Dammed lake in the upper Jinsha River

CHEN Song, CHEN Jian, LIU Chao

(School of Engineering and Technology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: The paper based on Fractal theory, taking the Jinsha River tour the ancient landslide dam Xuelongnang capsule deposits as the research object, research on the fractal dimension of its grain size. Research results show that: dam break deposit has good statistical self similarity, with the sampling area of the space location, the size of the fractal demension value is also significantly changed, that is, the average fractal demension of the upstream segment is 2.52, the average fractal demension of the midstream segment is 2.28, the average fractal demension of the downstream segment is 2.06. The value of the fractal dimension is closely related to the size of the separation, the separation coefficient is large, and the fractal dimension is large, on the other hand, the fractal dimension is small. The granularity of the fractal demension and the size distribution of grain size and the thickness of the grain size also have some intrinsic relationship, the grain size fractal dimension value D can reflect the distribution of the dam break and the thickness of the particles in the dam break.

Keywords: Jinsha River; Xuelongnang; ancient landslide; grain size fractal dimension; sorting coefficient

0 引言

分形几何学是非线性科学重要的一个分支,是近几十年来发展起来的研究非线性现象的理论和方法,它的主要概念是分形维数,简称分维^[1]。自

Mandelbrot^[2]创立分形理论以来,分形理论得到了广泛的应用。艾南山,朱治军等^[3]将分形理论应用在地貌学中;申维,赵鹏大等^[4]将分形理论运用到地质学中;易顺民,唐辉明等^[5]对冻土的粒度分布分形结构特征及意义进行了研究;刘松玉,方磊等^[6]对我国黄土,红

收稿日期: 2015-09-18; 修订日期: 2015-10-07

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41230743); 国家自然科学基金面上项目(41571012)

第一作者: 陈 松(1989-),男,硕士研究生,从事工程地质与地质灾害防治研究。E-mail: chennsongg@163.com

土等特殊土粒度分布的分形结构进行了论述;柏春广,王建等^[7]对 1000 个不同类型沉积物样品的粒度分形结构及其分维值作了定量计算的研究与对比;柏春广,穆桂金等^[8]对艾比湖湖相沉积物粒度的分形特征与环境意义做了研究;侯春梅,刘小伟等^[9]对甘肃黄土的粒度分维特征及意义做了研究;陈追田,庄金利等^[10]对花岗岩风化残积物粒度分维特征分析做了研究;王志亮等^[11]以合肥地区膨胀土为例对颗粒粒径的分形分维特征进行了研究;章伟艳,殷汝广等^[12]对深海柱样粒度分维特征及其古海洋学意义做了研究;伏耀龙,张兴昌等^[13]分析了岷江上游干旱河谷土壤粒径分布分形维数特征;综合这些方面的研究工作,分形理论在地质学研究中在日趋成熟化。金沙江流域地处青藏高原东南缘,地跨我国地势一、二阶梯过渡带,地质环境条件脆弱,属地质灾害高易发区,尤其是对金沙江上游这个地区目前开展的研究工作不是很多,白永健^[14]等对金沙江中游巴塘县的地质灾害发育特征及成灾规律做了详细的统计分析。然而,目前国内关于金沙江上游古滑坡堰塞湖溃坝堆积沉积物的粒度分形特征这方面的研究工作基本缺乏。基于此,本文以金沙江上游雪隆囊古滑坡堰塞湖溃坝堆积物为研究对象,通过对其分维进行定量计算,为弄清堰塞坝体的物质组成以及今后揭示堰塞坝体的力学性质,渗透性能等溃坝成因方面的问题提供参考,同时也为坝体溃坝时的水动力环境信息及环境意义的探讨提供依据。

1 区域概况与采样

雪隆囊地区位于西藏芒康县金沙江上游,E29°20′~29°36′,N98°05′~98°55′。金沙江上游雪隆囊至王大龙河段,河床平均海拔高度在 2300 m 以上,雪隆囊一带峡谷宽 100~200 m,沿江谷坡较陡,坡度约为 40°。雪隆囊至王大龙河谷地带属亚热带气候,为干热型河谷,年降水量仅 300 mm 左右,且降雨量主要集中在 6~10 月。雪隆囊峡谷所在地区新构造运动活跃,金沙江断裂带的主断裂雄松—苏哇龙活动断裂在其东部附近穿过(图 1)。沿江河谷裸露岩石的岩性主要为二叠纪的片岩、火山岩及大理岩等。该区岩层节理较发育,物理风化作用强烈,加之受金沙江活动断裂带的影响,河谷沿岸滑坡、崩塌现象十分发育^[15]。

经过野外调查发现,滑坡坝堰塞湖溃坝后将堰塞坝及堰塞湖内沉积物冲向下游,最终导致被冲下的物质堆积在金沙江河道两侧(图 2),根据堆积物所在这段长 3.5 km 的河段位置的不同,将这段河段分为溃坝

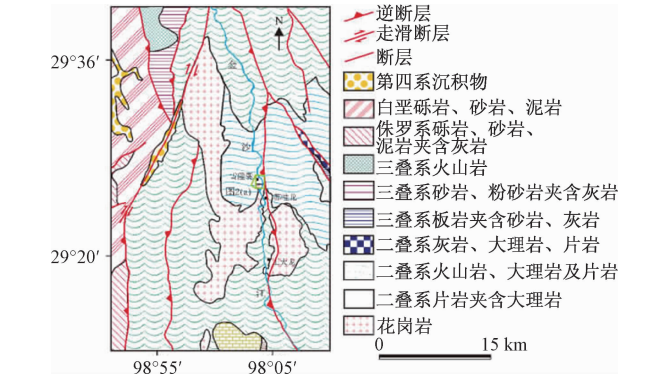


图 1 研究区示意图(据陈剑^[15]修改)
金沙江上游雪隆囊—王大龙河段地质图

Fig.1 Schematic diagram of the study area Geological map of the Xuelongnang-Wangdalong reach of the upper Jinsha river

堆积体的上、中、下三段,并将堆积体进行编号(图 2, I—VI 号)以便分析。其中 I 号堆积物在滑坡坝下游一侧的西岸,海拔约为 2394 m,IV 和 V 号堆积物位于东岸基岩上,海拔约为 2420 m,II、III、VI 号堆积物位于现代河床两侧,海拔约为 2368 m。经陈剑^[15]等对金沙江上游雪隆囊古滑坡堰塞湖溃坝堆积体的研究初步判断,滑坡堰塞体是由砾石,砂和少量粘土组成的混杂堆积物。在文献[15]陈剑等充分证明了图 2 中标号的 6 处堆积物是经溃坝后将滑坡坝体物质及上游河床湖相沉积物质冲向下游,后又快速堆积而成的。同时在文献[15]中对该滑坡堰塞湖的溃决年代做了测试以及对堰塞事件的形成及溃决原因做了研究,经测年古滑坡堰塞湖形成 1.8~2.2ka,经碳十四测试,溃决事件发生的上限时间为 1117A. D,堰塞事件的形成主要由地震诱发,而溃坝的形成主要为湖水溢流漫顶所致。

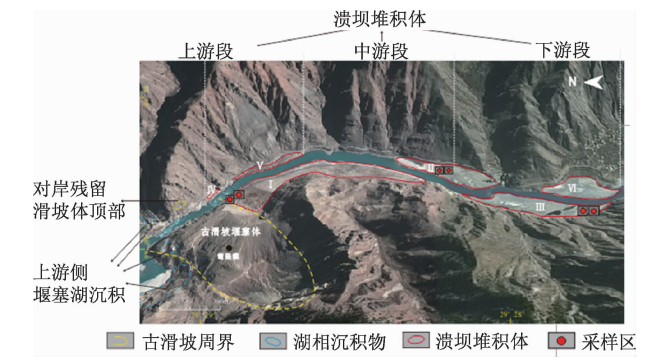


图 2 雪隆囊滑坡堰塞湖溃坝堆积体的分布范围
Fig.2 Distribution of the outburst deposits induced by the Xuelongnang landslide-dammed lake

在采样区采样时每个采样点的取样量为 25 cm

×25 cm×20 cm;共计采集样品21个并进行编号,并将采回的样品在中国地质大学(北京)工程技术学院实验室用一套标准的振筛机(4~0.065 mm)进行了

筛分实验。采样点位置如图2所示,采样的编号、颗粒级配以及堆积物的室内颗粒分析成果见表1、表2、表3。

表1 堆积物上游段颗粒分析成果

Table 1 Particle analysis results of the upper section of the deposit

	粒径/mm	>4	2.5~4	2~2.5	1.45~2	1~1.45	0.71~1	0.5~0.71
SY1-1	质量/g	125.03	14.692	5.503	8.099	7.509	6.232	5.54
	ω/%	63.05	7.41	2.77	4.08	3.79	3.14	2.79
SY1-2	质量/g	109.435	17.414	6.151	9.542	9.781	7.673	7.08
	ω/%	54.83	8.72	3.08	4.78	4.90	3.84	3.55
SY1-3	质量/g	99.242	21.092	7.202	11.39	10.829	8.948	8.044
	ω/%	49.71	10.57	3.61	5.71	5.42	4.48	4.03
SY1-4	质量/g	109.619	16.489	6.825	10.052	9.677	8.274	7.506
	ω/%	54.89	8.26	3.42	5.03	4.85	4.14	3.76
SY1-5	质量/g	90.901	22.519	11.598	14.01	12.977	10.426	8.753
	ω/%	45.49	11.27	5.80	7.01	6.49	5.22	4.38
SY1-6	质量/g	100.047	17.237	6.74	12.289	11.356	9.712	8.765
	ω/%	50.10	8.63	3.37	6.15	5.69	4.86	4.39
SY1-7	质量/g	103.733	14.743	6.678	10.215	10.172	8.284	7.782
	ω/%	51.90	7.38	3.34	5.11	5.09	4.14	3.89
	粒径/mm	0.355~0.5	0.2~0.355	0.15~0.2	0.125~0.15	0.088~0.125	0.065~0.088	<0.065
SY1-1	质量/g	4.378	9.389	4.726	1.413	2.739	1.9	1.167
	ω/%	2.21	4.73	2.38	0.71	1.38	0.96	0.59
SY1-2	质量/g	5.498	13.321	5.876	1.872	2.642	2.257	1.052
	ω/%	2.75	6.67	2.94	0.94	1.32	1.13	0.53
SY1-3	质量/g	6.219	12.12	5.852	1.914	2.789	2.657	1.332
	ω/%	3.12	6.07	2.93	0.96	1.40	1.33	0.67
SY1-4	质量/g	5.719	11.163	6.081	1.123	2.909	2.774	1.486
	ω/%	2.86	5.59	3.05	0.56	1.46	1.39	0.74
SY1-5	质量/g	6.412	11.195	5.763	1.395	1.606	1.55	0.717
	ω/%	3.21	5.60	2.88	0.70	0.80	0.78	0.36
SY1-6	质量/g	6.846	12.936	7.22	1.508	2.554	1.884	0.612
	ω/%	3.43	6.48	3.62	0.76	1.28	0.94	0.31
SY1-7	质量/g	6.094	12.376	6.405	1.374	3.408	3.648	4.956
	ω/%	3.05	6.19	3.20	0.69	1.71	1.83	2.48

表2 堆积物中游段颗粒分析成果

Table 2 Particle analysis results of the middle section of the deposit

	粒径/mm	>4	2.5~4	2~2.5	1.45~2	1~1.45	0.71~1	0.5~0.71
ZY2-1	质量/g	1.773	14.163	7.18	8.132	10.974	13.569	11.456
	ω/%	0.89	7.10	3.60	4.08	5.50	6.80	5.74
ZY2-2	质量/g	0.328	5.965	2.96	5.577	8.369	9.391	8.452
	ω/%	0.16	2.99	1.48	2.79	4.19	4.71	4.23
ZY2-3	质量/g	1.859	15.403	5.081	8.55	14.715	16.129	11.979
	ω/%	0.93	7.72	2.55	4.29	7.38	8.09	6.01
ZY2-4	质量/g	0.798	17.623	7.651	11.805	19.104	19.159	13.182
	ω/%	0.40	8.84	3.84	5.92	9.58	9.61	6.61
ZY2-5	质量/g	0.835	11.908	6.201	10.646	15.831	9.589	7.915
	ω/%	0.42	5.97	3.11	5.34	7.94	4.81	3.97
ZY2-6	质量/g	1.235	15.186	5.872	7.676	10.661	14.202	22.45
	ω/%	0.62	7.62	2.95	3.85	5.35	7.13	11.27
ZY2-7	质量/g	2.833	16.751	5.382	8.239	10.521	11.024	22.114
	ω/%	1.42	8.42	2.70	4.14	5.29	5.54	11.11

续表 2

	粒径/mm	0.355 ~ 0.5	0.2 ~ 0.355	0.15 ~ 0.2	0.125 ~ 0.15	0.088 ~ 0.125	0.065 ~ 0.088	< 0.065
ZY2-1	质量/g	9.056	39.18	30.354	6.924	24.368	10.706	11.631
	ω/%	4.54	19.64	15.22	3.47	12.22	5.37	5.83
ZY2-2	质量/g	7.585	43.877	41.292	10.933	32.095	12.445	10.319
	ω/%	3.80	21.98	20.69	5.48	16.08	6.24	5.17
ZY2-3	质量/g	10.417	46.005	24.553	5.339	19.35	9.228	10.848
	ω/%	5.22	23.07	12.31	2.68	9.70	4.63	5.44
ZY2-4	质量/g	10.042	36.342	19.201	4.586	17.245	11.512	11.081
	ω/%	5.04	18.23	9.63	2.30	8.65	5.78	5.56
ZY2-5	质量/g	14.519	59.856	25.464	4.605	17.034	8.324	6.627
	ω/%	7.28	30.02	12.77	2.31	8.54	4.18	3.32
ZY2-6	质量/g	30.954	59.159	16.859	3.539	7.879	2.24	1.252
	ω/%	15.54	29.70	8.46	1.78	3.96	1.12	0.63
ZY2-7	质量/g	44.919	52.166	13.183	2.874	6.393	1.769	0.88
	ω/%	22.57	26.21	6.62	1.44	3.21	0.89	0.44

表 3 堆积物下游段颗粒分析成果

Table 3 Particle analysis of the downstream section of the deposit

	粒径/mm	> 4	2.5 ~ 4	2 ~ 2.5	1.45 ~ 2	1 ~ 1.45	0.71 ~ 1	0.5 ~ 0.71
XY3-1	质量/g	0	3.957	3.356	4.486	4.818	3.292	4.51
	ω/%	0.00	1.99	1.69	2.26	2.42	1.66	2.27
XY3-2	质量/g	0.339	3.296	2.05	3.014	4.373	4.518	6.42
	ω/%	0.17	1.66	1.04	1.52	2.21	2.28	3.24
XY3-3	质量/g	0.015	0.149	0.143	0.343	0.691	0.742	1.115
	ω/%	0.01	0.07	0.07	0.17	0.35	0.37	0.56
XY3-4	质量/g	0	1.063	0.831	1.058	1.872	2.144	3.248
	ω/%	0.00	0.53	0.42	0.53	0.94	1.08	1.63
XY3-5	质量/g	0.053	0.46	1.05	2.453	3.63	4.038	7.218
	ω/%	0.03	0.23	0.53	1.24	1.83	2.04	3.64
XY3-6	质量/g	0.097	1.284	1.033	2.291	3.164	4.061	7.78
	ω/%	0.05	0.65	0.52	1.15	1.59	2.04	3.91
XY3-7	质量/g	0.081	0.435	0.395	0.513	1.079	1.944	4.045
	ω/%	0.04	0.22	0.20	0.26	0.54	0.97	2.03
	粒径/mm	0.355 ~ 0.5	0.2 ~ 0.355	0.15 ~ 0.2	0.125 ~ 0.15	0.088 ~ 0.125	0.065 ~ 0.088	< 0.065
XY3-1	质量/g	5.546	22.416	26.014	8.816	43.356	31.357	36.884
	ω/%	2.79	11.28	13.08	4.43	21.81	15.77	18.55
XY3-2	质量/g	8.231	49.944	39.08	10.891	37.124	17.348	11.41
	ω/%	4.16	25.22	19.73	5.50	18.75	8.76	5.76
XY3-3	质量/g	2.668	40.957	38.513	14.189	47.861	23.795	28.144
	ω/%	1.34	20.55	19.32	7.12	24.01	11.94	14.12
XY3-4	质量/g	5.31	67.964	47.141	11.418	33.01	13.363	10.834
	ω/%	2.66	34.11	23.66	5.73	16.57	6.71	5.44
XY3-5	质量/g	10.852	64.02	42.608	9.743	32.38	13.184	6.586
	ω/%	5.47	32.29	21.49	4.91	16.33	6.65	3.32
XY3-6	质量/g	10.497	63.073	48.151	10.773	31.554	11.517	3.483
	ω/%	5.28	31.73	24.23	5.42	15.88	5.79	1.75
XY3-7	质量/g	6.748	60.298	48.636	13.013	35.65	15.625	11.228
	ω/%	3.38	30.20	24.36	6.52	17.85	7.82	5.62

2 粒度分维及其特征

2.1 粒度组成

金沙江上游雪隆囊滑坡坝溃坝堆积物三个区段的粒度分布曲线见图3~图5。整个研究区域的溃坝堆积体主要由砾石、砂粒、粉粒和极少量的黏粒组成。沉积物上游段的粒度以 φ 值 $-2 \sim -1$ 为主,砾石的含量高达45%~65%,其它组成成份的含量不足7%;中游段粒度以 $2\varphi \sim 3\varphi$ 及 $3.4\varphi \sim 4\varphi$ 为主,主要由细砂和极细砂组成,含量分别为35%、15%,其它组成成份的含量不足8%;下游段粒度以 2.4φ 及 3.5φ 为主,主要由细砂和极细砂组成,含量比中游段有所增长,分别为37%、22%,其它组成成份的含量不足3%。

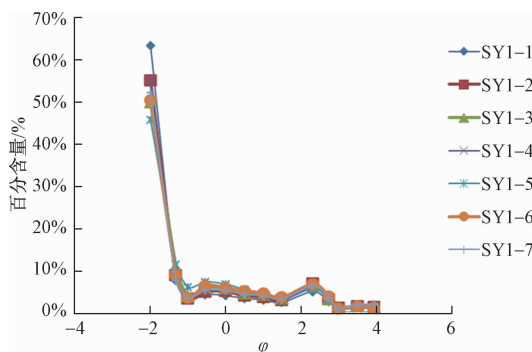


图3 溃坝堆积物上游段粒度频率曲线

Fig.3 Frequency curves of upstream dam deposit granularity

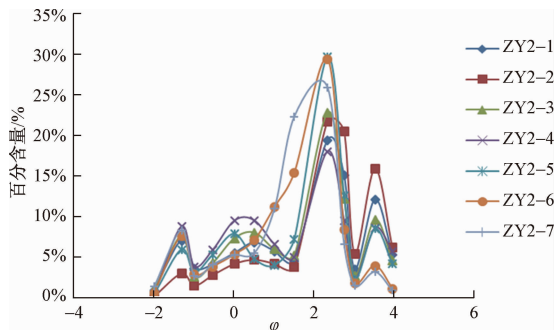


图4 溃坝堆积物中游段粒度频率曲线

Fig.4 Frequency curves of middlestream dam deposit granularity

2.2 粒度分维计算原理

根据分形理论^[1],可以建立如下的关系式:

$$N(r) \propto r^{-D} \quad (1)$$

式中: r ——颗粒体积的立方根;

$N(r)$ ——粒径大于 r 的颗粒数目;

D ——分维数。

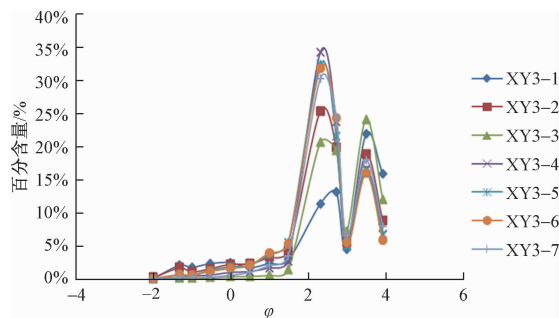


图5 溃坝堆积物下游段粒度频率曲线

Fig.5 Frequency curves of downstream dam deposit granularity

对(1)式求导,可得

$$dN(r) \propto r^{-D-1} dr \quad (2)$$

在一般的粒度分析中,常用质量百分含量累积曲线来反映沉积物的粒度构成。由破碎物颗粒大小与频度的经验关系——Weibull分布,可得

$$m(r)/m \propto r^b \quad (3)$$

式中: $m(r)$ ——直径小于 r 的颗粒累积质量;

m ——总质量;

b ——幂指数。

对(3)式求导则有

$$dm(r) \propto r^{b-1} dr \quad (4)$$

在假定沉积物颗粒密度不变的情况下,颗粒的质量与其直径的立方成正比,即质量的增量与频度的增量有如下关系:

$$dm(r) \propto r^3 dN(r) \quad (5)$$

将(1)~(4)变量代换,可得如下关系式:

$$r^{b-1} dr \propto r^3 \times r^{-D-1} dr \quad (6)$$

即粒度的分维为: $D = 3 - b$

最后将 $m(r)/m$ 与 r 在双对数坐标图上通过最小二乘法拟合计算,即可得直线段的斜率 b 值及对应的相关系数 R ,最终求得粒度的分维值 D 。

2.3 计算结果分析

根据以上的分维理论,结合野外的实际调查以及采回的样品,通过计算画出了不同采样区段的代表性样品粒度分维线性拟合曲线图见图6。而所有样品的粒度分维值及参数见表4。

从表4可以看出,金沙江上游雪隆囊滑坡坝溃坝堆积物从上游到下游段平均分维值 D 由大到小,分选系数平均值也由大到小,从平均相关系数 R 值可以看出,溃坝堆积物的粒径与粒度百分含量在双对数图上有明显的线性关系,表明溃坝堆积体的粒度组成具有很好的分形特征。

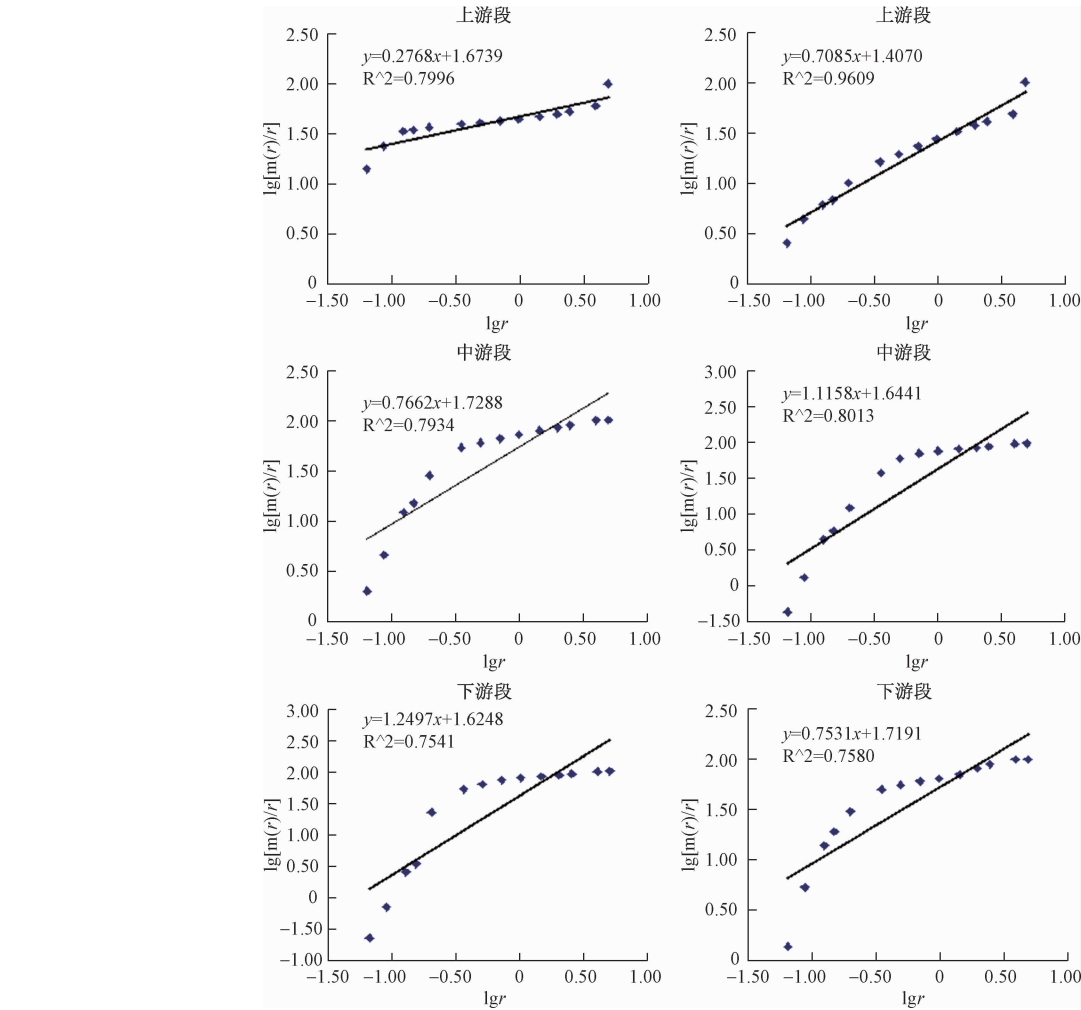


图 6 代表性样品的粒度分维线性拟合曲线图

Fig.6 Curves of typical samples for granularity fractal dimensions

表 4 溃坝堆积体粒度分维值

Table 4 Fractal dimension value of dam break bulk						
采样段	D 值范围	D 平均值	R 值范围	R 平均值	分选系数范围	分选系数均值
上游段	2.33 ~ 2.73	2.52	0.938 ~ 0.98	0.96	1.89 ~ 2.61	2.24
中游段	1.88 ~ 2.47	2.28	0.837 ~ 0.927	0.89	1.41 ~ 1.87	1.63
下游段	1.9 ~ 2.29	2.06	0.776 ~ 0.811	0.80	0.81 ~ 1.38	1.00

3 讨论

3.1 分维值与分选系数关系

通过计算,将样品粒度分维值与粒度分选系数做成散点图(图 7),即可大致看出两者之间的关系。图 7 表明,溃坝堆积体的粒度分维值与分选系数之间存在较好的正相关关系。样品的分选系数越大(分选越差),其分维值越大。相反,样品的分选系数越小(分选越好),其分维值越小。如果以 y 表示分选系数, x 表示分维值,则分维值与分选系数的具体关系为上游段: $y = 1.443x - 0.7345$,相关系数 R 为 0.856,中游段: $y = 0.5691x - 0.3349$,相关系数 R 为 0.707,下游段: $y = 0.7395x - 0.8622$,相关系数 R 为 0.598。据此初步研究结果为沉积物分选越差,其粒度分维值越大;反之越小。溃坝堆积体的粒度分维值与分选系数之间存在线性关系,将分维作为溃坝堆积体粒度参数的引入提供了依据。

3.2 粒度分维与粒度分布、粒度粗细关系

本次研究的金沙江上游雪隆囊滑坡溃坝堆积物是粒径 $\leq 4\text{ mm}$ 范围,具有一定的分形特征,在双对数坐标下,颗粒质量分布曲线为直线,颗粒质量分布可用下式表示^[11]:

$$M = Ad^{3-D}$$

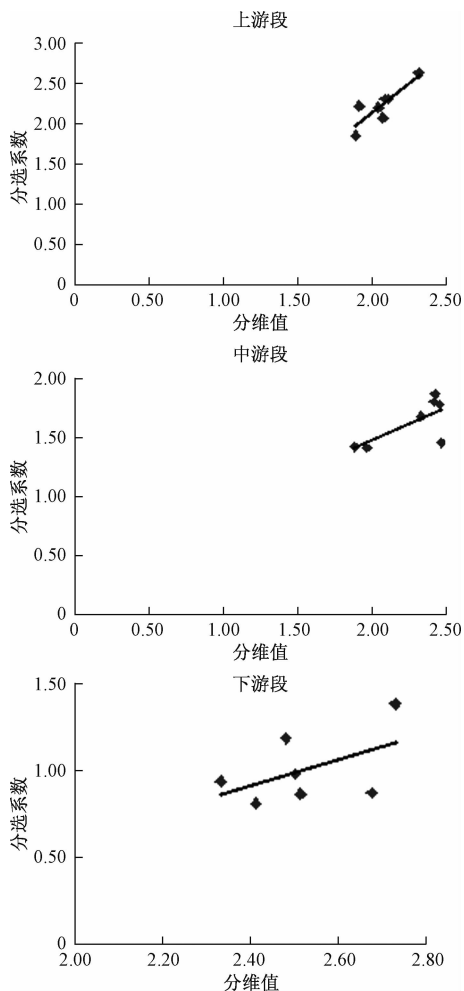


图7 溃坝堆积体粒度分维值与分选系数关系

Fig.7 Dam break bulk fractal dimensions vs. sorting coefficient

式中: M ——小于某粒径颗粒的质量分数;

d ——颗粒粒径/mm;

A ——双对数坐标下,粒径小于1 mm时的质量分数。

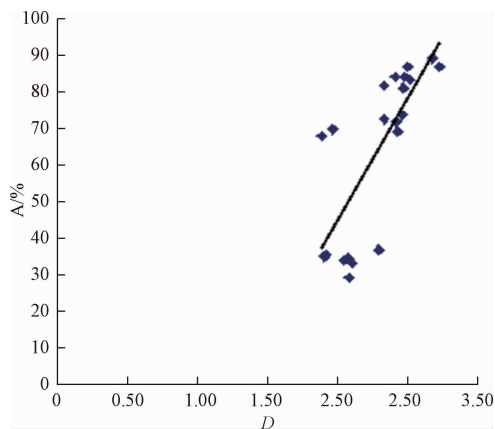
从理论上来说,粒度的分布曲线越陡,粒度成分级配越差,显然在双对数坐标下,直线斜率越大,级配越差;反之,则斜率越小,级配越好。结合粒度分维来看, D 越大级配越好,分选就差。

在双对数坐标下得到每个样品的 A 值, A 值与粒度分维 D 关系见图8。

D 值大概在大于2时,粒度分维 D 与 A 值具有很好的线性正相关性,相关数量关系为: $A = 66.093x - 87.595$,相关系数 $R = 0.858$ 。

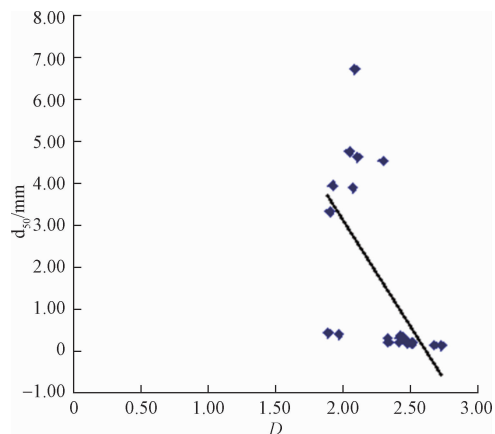
通过以上分析可以得出,对于一定范围内的溃坝堆积体而言,分维 D 能够反映出其粒度的分布,对于本研究区而言,当 $D \geq 2$ 时,可近似得到粒度分布曲线:

$$M = (66.093x - 87.595)d^{3-D}$$

图8 D 与 A 关系Fig.8 D VS A

3.3 粒度分维与粒度粗细关系

以平均粒径 d_{50} 大小代表粒度的粗细,可得粒度分维 D 与平均粒径 d_{50} 的关系见图9。

图9 D 与 d_{50} 关系Fig.9 D VS d_{50}

在 D 大于2时,粒度分维 D 与平均粒径 d_{50} 具有很好的负相关性,相关数量关系为: $d_{50} = -5.100x + 13.323$,相关系数为 $R = 0.607$ 。

通过粒度分维 D 与平均粒径 d_{50} 的关系可以得出,分维 D 能够很好的反映溃坝堆积体的颗粒的粗细。

4 结论

综上所述,可初步得出以下结论:

(1)金沙江上游雪隆古滑坡堰塞湖溃坝堆积体经过溃坝后,在外力的作用改造之下形成的沉积物具有良好的统计自相似性,但自相似程度有所不同,相同的物源经过动力改造后,各部分的分维值有着明显的差异,分选差的部分分维值相对来说较大,分选较好的部分分维值相对较小。为今后探讨坝体溃坝后的沉积

环境意义提供了参考依据。

(2) 统计研究区域的粒度分维值可以看出,从溃坝堆积体的上游段到下游段,分维值 D 由大变小,由此表明溃坝堆积体的分选性在逐渐由差变得较好。

(3) 研究发现粒度分维值与分选系数有着内在的联系,即分选系数越大分维值越大,相反,分选系数越小,分维值越小。粒度分维与粒度的分布、粗细也存在着一定的关系。为今后探讨坝体的力学参数、渗透性能等溃坝成因的问题提供了参考依据。

参考文献:

- [1] 魏诺. 非线性科学基础与应用[M]. 北京:科学出版社,2004:90-91.
WEI Nuo. Nonlinear science foundation and Application [M]. Beijing: Science Press, 2004: 90-91.
- [2] Mandelbort B B. The Fractal Geometry of Nature[Z]. W. H. Freeman, New York, 1982: 4-145.
- [3] 艾南山,朱治军,李后强. 外营力地貌作用随机特性和分形布朗地貌的稳定性[J]. 地理研究, 1998, 17(1): 23-30.
AI Nanshan, ZHU Zhijun, LI Houqiang. On the stochastic nature of exogenic processes and the stability of fractional brownian landscape [J]. Geographical Research. 1998, 17(1): 23-30.
- [4] 申维,赵鹏大. 分形统计模型的理论研究及其在地质学中的应用[J]. 地质科学, 1998, 33(2): 234-243.
SHEN Wei, ZHAO Pengda. The theory study of fractal statistical model and its application in geology [J]. Scientia Geologica Sinica, 1998, 33(2): 234-243.
- [5] 易顺民,唐辉明. 冻土粒度成分的分形结构特征及其意义[J]. 冰川冻土, 1994, 16(4): 314-319.
YI Shunmin, TANG Huiming. Fraetal structure features of granulometric compositon in frozen soil and its signiifcance [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1994, 16(4): 314-319.
- [6] 刘松玉,方磊,陈浩东. 论我国特殊土的粒度分布的分形结构[J]. 岩土工程学报, 1993, 15(1): 23-30.
LIU Songyu, FANG Lei, CHEN Haodong. Fractal structure of granularity distribution of regional soils in China [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1993, 15(1): 23-30.
- [7] 柏春广,王建. 一种新的粒度指标: 沉积物粒度分维值及其环境意义[J]. 沉积学报, 2003, 21(2): 234-239.
BAI Chunguang, WANG Jian. A new grain-size index grain-size fractal dimension of sediment and its environmental significance [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2003, 21(2): 234-239.
- [8] 柏春广,穆桂金,王建. 艾比湖湖相沉积物粒度的分维特征与环境意义[J]. 干旱区地理, 2002, 25(4): 336-340.

- BAI Chunguang, MU Guijin, WANG Jian. Grain-size fractal dimension characteristics of lacustrine sediments of Aiby lake and the environmental significance [J]. Arid Land Geography, 2002, 25(4): 336-340.
- [9] 侯春梅,刘小伟,李明,等. 甘肃黄土的粒度分维特征及意义[J]. 地质科学, 2005, 40(4): 539-546.
HOU Chunmei, LIU Xiaowei, LIMing, et al. Grain-size fractal dimension of the loess in Gansu and Its Significance [J]. Chinese Journal of Geology, 2005, 40(4): 539-546.
- [10] 陈追田,庄金利,周传新. 花岗岩风化残积物粒度分维特征分析[J]. 岩土工程技术, 2005, 19(2): 69-71.
CHEN Zhuitian, ZHUANG Jinli, ZHOU Chuanxin. Analysis for fractal dimension of granularity of weathered residual granite [J]. Geotechnical Engineering Technique, 2005, 19(2): 69-71.
- [11] 王志亮. 合肥地区膨胀土颗粒粒径的分形分维研究[J]. 岩土工程技术, 2003(4): 226-229.
WANG Zhiliang. Fractal dimension of the particle size of expansive soil in Hefei area [J]. Geotechnical Engineering Technique, 2003(4): 226-229.
- [12] 章伟艳,殷汝广,张富元,等. 深海柱样粒度分维特征及其古海洋学意义[J]. 海洋通报, 2005, 24(1): 41-46.
ZHANG Weiyan, YIN Ruguang, Zhang Fuyuan, et al. Grain-size fractal dimensional characteristics of the sediments from cores in the deep-sea and its paleoceanographic significance [J]. Marine Science Bulletin, 2005, 24(1): 41-46.
- [13] 伏耀龙,张兴昌,王金贵. 岷江上游干旱河谷土壤粒径分布分形维数特征[J]. 农业工程学报, 2012, 28(5): 120-124.
FU Yaolong, ZHANG Xingchang, WANG Jingui. Fractal dimension of soil particle-size distribution characteristics in dry valley of upper Minjiang river [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(5): 120-124.
- [14] 白永健,李明辉,王东辉,等. 金沙江中游巴塘县地质灾害发育特征及成灾规律分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2014, 25(2): 103-109.
BAI Yongjian, LI Minghui, WANG Donghui, et al. Characteristics and disastrous rule research of geohazards in batang county, the middle reaches of Jinsha river [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2014, 25(2): 103-109.
- [15] 陈剑,崔之久. 金沙江上游雪隆囊古滑坡堰塞湖溃坝堆积体的发现及其环境与灾害意义[J]. 沉积学报, 2015, 33(2): 275-284.
CHEN Jian, CUI Zhijiu. Discovery of outburst deposits induced by the Xuelongnang paleolandslide-dammed lake in the upper Jinsha river, China and its environmental and hazard significance [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2015, 33(2): 275-284.