

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20210120001

# 白龙江流域武都区段新发泥石流堆积物基本特征及颗粒级配分维研究\*

崔开林, 范玮佳, 向灵芝, 沈娜, 梁梦辉, 李小龙, 罗亮

(重庆交通大学山区公路水运交通地质减灾重庆市高校重点实验室, 重庆 400074)

**摘要:** 白龙江流域是我国泥石流的高发地区,在强降雨的激发下沟谷内堆积的大量固体松散物质易形成泥石流。松散固体物质的颗粒级配影响着它的力学性能,进而对泥石流的启动产生较大影响。强降雨后,松散堆积体内大范围剪切破坏而转化为泥石流。以白龙江流域近期新发泥石流的16条泥石流沟为研究对象,取其具有代表性的堆积样品,通过室内土工实验,测试其基本物理力学参数。并通过筛分及激光粒度仪对样品的颗粒进行分析,采用统计图解法、粒度分维法和经验公式法对泥石流堆积物的特征、性质、粒度分形结构和颗粒级配关系进行分析。结果表明:1.区内泥石流堆积体粒度分布具有良好的分形特征,粒度分维值 $D$ 为2.5~2.6,且粒度分维值 $D$ 随黏粒含量 $P_c$ 的增加而增大,二者满足关系式 $D=0.115 \ln(P_c)+2.5098$ 。2.通过经验公式、粒度分维计算、现场称重等方式确定了白龙江流域武都区段大部分泥石流为黏性泥石流。3.堆积物中的黏粒含量较多,但大都缺失中间粒径,级配不良,且堆积物的抗剪强度普遍不高。各泥石流堆积物的物理力学性质有着较大的差异,但其内摩擦角却大都在 $27^\circ\sim 30^\circ$ 变化。说明该区域泥石流堆积物的内摩擦角具有良好的相似性。通过研究新发泥石流堆积体的物理力学特性,依据分形理论,剖析粒度分维值与粒度组成、粘粒含量、黏粒级配等相关性,为泥石流防灾减灾提供基础数据支撑。

**关键词:** 泥石流; 颗粒级配; 粒度; 分维

中图分类号: P642.23 文献标识码: A 文章编号: 1672-2132(2022)04-0674-09

## Study on the Basic Characteristics and Particle Gradation Fractal Dimension of New Debris Flow Deposits in Wudu Section of Bailong River Basin

CUI Kailin, FAN Weijia, XIANG Lingzhi, SHEN Na, LIANG Menghui, LI Xiaolong, LUO Liang  
(Key Laboratory of Chongqing University for Geological Disaster Mitigation of Mountain Highway Water Transportation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074)

**Abstract:** The Bailong River Basin is an area with a high incidence of debris flows in China. A large amount of solid loose materials accumulated in the valleys are prone to form debris flows under the excitation of heavy rainfall. The particle gradation of loose solid matter affects its mechanical properties which in turn have a greater impact on the initiation of debris flow. After great rainfall, large-scale shear failure in the loose accumulation body transforms into debris flow. Taking the 16 new debris flow ditches in the Bailong

\* 收稿日期:2021-01-20;修回日期:2021-03-12

基金项目:第二次青藏高原综合科学考察研究任务九“地质环境与灾害”专题二“重大泥石流灾害及风险”项目(2019QZKK0902)资助

作者简介:崔开林(1998—),男,硕士研究生。主要从事地质灾害防治方面研究。E-mail:1730035056@qq.com

通讯作者:向灵芝(1980—),女,副教授。主要从事地质灾害防治方面研究。E-mail:xlz1223xlz@sina.com

River Basin as the research objects, representative accumulation samples were collected, and the basic physical and mechanical parameters of the deposits were obtained through indoor geotechnical experiments. The particle gradation of the samples were analyzed by sieving and laser particle size analyzer, and the characteristics, properties, particle size fractal structure and particle gradation relationship of the debris flow deposits were analyzed by statistical graphic method, particle size fractal method and empirical formula method. The results show that: 1. The geological environment of each channel is different, and the lithology is also different, but the particle size distribution of debris flow deposits in the area has good fractal characteristics. 2. The particle size fractal dimension  $D$  is between 2.5 and 2.6 and increases with the increase of the clay content  $P_c$ , and the two variables satisfy the relationship  $D=0.115 \ln(P_c) + 2.5098$ . 3. Through empirical formulas, particle size fractal calculations, on-site survey weighing, etc., most of the debris flows in the Wudu section of the Bailong River Basin are proven to be viscous debris flows. 4. There are many clay particles in the accumulation, but the intermediate particle sizes are usually short. The accumulation generally has poor gradation and low shear strength. The physical and mechanical properties of various debris flow deposits are quite different, but their internal friction angle mostly varies between  $27^\circ$  and  $30^\circ$ , showing that the internal friction angle of debris flow deposits in this area has good similarity. In this paper, the physical and mechanical properties of new debris flow accumulations in the studied area were investigated, and the correlation between particle size fractal dimension value and particle size composition, clay content, particle gradation, and soon was accomplished based on fractal theory. This research can provide basic data support for debris flow disaster prevention and mitigation in the studied area.

**Keywords:** debris flow; particle gradation; particle size; fractal dimension

## 引 言

泥石流的堆积区地势一般较为开阔平坦,是泥石流淤积、漫流的场所,也是成灾的主要区域<sup>[1]</sup>。白龙江流域是中国山地泥石流灾害的重灾区和多发区,如2010年8月8日甘肃省舟曲县三眼峪和罗家峪遭受特大山洪泥石流灾害,造成1765人遇难和失踪,其规模及造成的人员财产损失为全国之最<sup>[2]</sup>。2020年8月15日至8月17日,白龙江流域武都区段遭遇百年一遇的连续强降雨,该区域在8月17日12点30分左右发生了群发性泥石流灾害,造成了极大的危害。泥石流沟道内及堆积区堆积的大量固体松散物质在强降雨的激发下极易形成泥石流,而固体松散物质自身的基本物理力学性质及颗粒级配情况对泥石流的启动具有重要的影响。松散固体物质的颗粒级配决定着它的结构和连接特征,直接影响到维持其三维结构的启动静切力和结构内部的水分渗流与存在状态,决定着其抵抗力的量值及其变化<sup>[3]</sup>。土体的颗粒级配特征对泥石流的启动及力学性质有着直接影响。泥石流的固体组成物质很难在传统的线性分析基础之上进行量化描述,

但分维值可以有效地反应土体内部各粒组的含量<sup>[4]</sup>。粒度组成不仅反映了泥石流堆积物的分散度,而且大量的泥石流形成、运动和堆积信息包含其中<sup>[5]</sup>。本文对2020年8月17日白龙江流域武都区段群发性泥石流灾害进行实地调查取样,通过室内土工实验,分析其基本物理力学性质。并采用统计图解法和粒度分维法对堆积物的粒度分布和分形结构特征进行系统性的分析,研究粒度分维与颗粒级配之间的关系,为泥石流的研究与防治提供基本的数据支撑。希望通过研究新发泥石流堆积体的物理力学特性,依据分形理论,结合颗分结果计算泥石流堆积物的分维值,剖析粒度分维值与粒度组成、粘粒含量、颗粒级配等的相关性,为泥石流防灾减灾提供基础数据支撑。

## 1 研究区域概况

### 1.1 地形地貌

白龙江系长江二级支流,嘉陵江一级支流,全长共535 km,流域面积 $3.28 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,海拔4072 m,发源于甘肃省碌曲县与四川省若尔盖县交界的郎木寺,流经四川、甘肃两省,经碌曲、若尔盖、迭部、

舟曲、宕昌、武都、文县、青川及广元9个县,最终在四川广元市汇入嘉陵江<sup>[6]</sup>。白龙江流域武都区段(武都区橘柑镇~宕昌县两河口乡)位于甘肃省东南部。区内最低海拔742 m,最高海拔3 737 m,最大高差将近3 000 m。在白龙江两岸,海拔分别在700~1 200 m左右,两岸都为2 000~3 000 m的高山。

### 1.2 地层岩性

武都区出露的地层主要有志留系、古近系以及第四系,基岩岩性主要以千枚岩、泥岩为主,盆地和沟谷中以松散堆积物为主。新近系分布于汉林、马街、柏林、安化、鱼龙一带。岩性为红色泥岩、砂质泥岩和同色砂砾岩、砾岩不等厚互层,具水平层理泥钙质充填式胶结,致密较硬与下伏地层呈不整合接触。志留系下统主要出露于流域中游地区,以板岩、千枚岩为主;志留系中统主要出露于下楞干以及刘家山附近,以变质灰岩、片麻岩为主;古近系出露于马街镇附近,泥与泥质砂岩呈互层状分布;第四系地层分布于盆地和沟谷中,主要为松散堆积物,物质成分差异较大,松散易动,为泥石流的主要物质来源<sup>[7]</sup>。

### 1.3 气候特征

白龙江在甘肃省境内长381.5 km,占总流程的66.23%。流域范围包括甘肃省南部的文县、舟曲、迭部、宕昌、武都及康县6个县区,流域面积达

17 846.3 km<sup>2</sup>。武都—文县属亚热带气候区,宕昌、舟曲、康县属暖温带气候区,迭部属高寒气候区。降水量具有年内分配不均、时空分布区域差异性较大的特征。武都区多年平均降雨量487.2 mm,年内降雨多集中在5~9月,约占全年降雨量的75%~85%<sup>[8]</sup>。24小时最大降水量为90.5 mm,1 h最大降水量40 mm,10 min最大降水量16.2 mm<sup>[9]</sup>。降雨的集中使得泥石流的暴发在时间上也具有一定的集中性。

## 2 样品采集及实验方法

### 2.1 样品采集

本次分析为2020年8月17日群发性泥石流灾害发生后第一时间,选取保存完好未经人类活动影响的16条泥石流沟的堆积区作为研究对象。在泥石流堆积扇的不同位置选取具有代表性的试样,采用野外调查和室内实验相结合的方法对试样进行研究<sup>[10]</sup>。泥石流取样点分布情况如图1所示。

### 2.2 实验方法

流域内所取得的土样大都是粗细颗粒混杂的宽级配砾石土,故通过筛分和激光粒度仪相结合的方式来进行颗粒分析。筛分时按土工规程依次让土样过60、40、20、10、5、2、1、0.5、0.25、0.075 mm圆孔筛。对0.075 mm以下的土样采用激

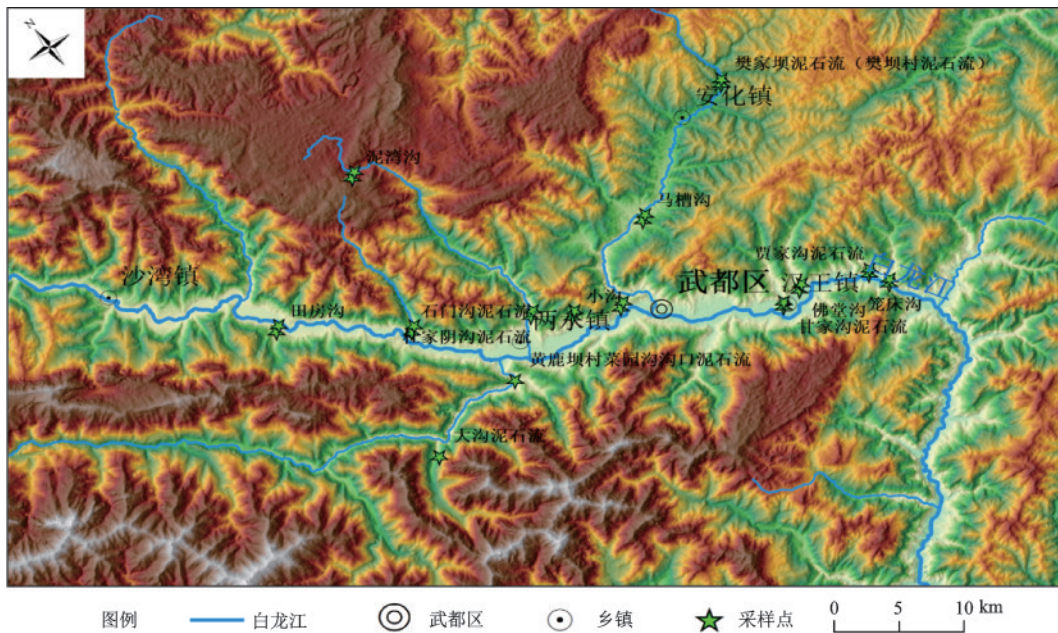


图1 采样点分布

Fig.1 Distribution map of sampling points

光粒度仪进行颗粒分析,以得到其完整的级配。经直接剪切试验、烘干法、比重瓶法等土工实验方法测得各土样的黏聚力、含水率比重、密度等基本物

理力学性质的参数,见表1。其中剪切试验的剪切方式为快剪,剪切速率为0.8 mm/min,施加的垂直压力分别为100、200、300、400 kPa。

表1 各土样基本物理力学性质参数  
Table 1 Basic physical and mechanical properties of each soil sample

名称	黏粒含量/%	比重/(g·cm <sup>-3</sup> )	含水率/%	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	C <sub>u</sub>	C <sub>c</sub>	土类
菜园沟	1.0	2.585	5.83	20.25	28.0	2.14	26.40	3.10	级配不良砾
大沟	2.3	2.669	16.78	13.87	30.2	2.08	95.83	0.44	含细粒土砾
杜家阴沟	1.4	2.585	6.16	12.84	27.6	2.15	53.47	3.81	含细粒土砾
樊家坝	1.2	2.614	11.42	7.75	29.2	2.25	48.33	2.56	含细粒土砾
佛堂沟	0.6	2.523	14.26	13.04	30.2	1.84	29.78	0.13	含细粒土砂
甘家沟	1.5	2.652	7.98	19.62	28.4	2.12	25.52	3.52	级配不良砾
小沟	1.2	2.648	13.93	25.75	24.3	2.13	67.70	0.15	含细粒土砾
灰崖子	1.8	2.639	20.83	11.44	30.8	1.96	35.57	0.28	含细粒土砂
贾家沟	3.9	2.745	5.89	28.91	29.5	2.08	28.38	3.26	含细粒土砾
笼床沟	1.5	2.541	5.77	25.36	28.6	2.28	107.07	10.75	含细粒土砾
马槽沟	2.1	2.601	3.11	38.87	27.6	2.22	38.18	2.69	含细粒土砾
泥湾沟	1.3	2.611	6.16	23.70	28.3	1.99	26.90	0.52	含细粒土砾
水峪沟	1.0	2.589	14.63	26.68	26.9	2.41	126.89	5.20	含细粒土砾
文家沟	2.5	2.655	12.92	10.90	31.7	1.73	11.00	3.27	细粒土质砂
田房沟	1.2	2.680	13.89	32.56	23.2	2.17	50.25	0.45	级配不良砾
石门沟	0.7	2.702	12.07	16.33	26.1	2.15	49.47	4.15	级配不良砾

### 3 泥石流堆积物基本力学特性

#### 3.1 泥石流容重

泥石流的容重可采用实测法和现场调查法来确定<sup>[11]</sup>。对石门沟等4条新发泥石流沟进行现场取样称重(图2),计算其容重(表2)。泥石流流体的性质通常可以用其容重来表示。黏性泥石流的容重为1.95~2.30 g/cm<sup>3</sup>;过渡性泥石流的容重为1.70~1.95 g/cm<sup>3</sup>;稀性泥石流的容重为1.40~1.70 g/cm<sup>3</sup>。由表2可知,现场称重的4条沟的泥石流堆积体容重均属于黏性泥石流。现场称重可以快速得出泥石流的容重。但是,灾区泥石流暴发时,基本上没有目击者,无法通过目击者现场配制泥石流样来确定容重。因此,部分专家提出了基于颗粒级配的容重计算经验公式。本文选取了三个普适性较好的公式(表3)进行计算,结果见表4。

由表4可见,公式(1)的泥石流容重为1.82~2.25 g/cm<sup>3</sup>,平均值2.01 g/cm<sup>3</sup>;公式(2)的泥石流容重为1.70~2.41 g/cm<sup>3</sup>,平均值为2.07 g/cm<sup>3</sup>;公



图2 石门沟现场称重

Fig.2 On-site weighing in Shimengou

式(3)的泥石流容重为2.02~2.48 g/cm<sup>3</sup>,平均值为2.10 g/cm<sup>3</sup>。公式(1)计算结果最小,公式(2)和

表2 现场称重测试容重

**Table 2 On-site weighing test volume density**

泥石流沟	质量/kg	体积/m <sup>3</sup>	密度/(g·cm <sup>-3</sup> )
石门沟	24	0.01	2.22
樊家沟	23	0.01	2.13
杜家阴沟	24	0.01	2.22
水峪沟	20.5	0.01	1.89

表3 泥石流容重经验公式

**Table 3 Empirical formula for the bulk density of debris flow**

序号	常用公式	提出者	备注
1	$\gamma_D = P_{05}^{0.35} P_2 \gamma_V + \gamma_0$	余斌 <sup>[12]</sup>	$P_{05} < 0.05$ mm的细粒百分含量(小数表示) $P_2 > 2$ mm的细粒百分含量(小数表示) $\gamma_V$ 为黏性泥石流的最小容重,取2.0 g/cm <sup>3</sup> $\gamma_0$ 为泥石流的最小容重,取1.5 g/cm <sup>3</sup>
2	$\gamma_c = 1.887 d_{50}^{0.0779}$	李培基等 <sup>[13]</sup>	$d_{50}$ 为中值粒径
3	$\gamma_c = (\gamma_H * f + 1) / (f + 1)$	国家防汛抗旱总指挥部办公室,中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所 <sup>[14]</sup>	$\gamma_H$ 为泥石流中固体物质容重,取2.7 t/m <sup>3</sup> ; $f$ 为泥石流中固体物质体积与水体的体积比

表4 经验公式法计算泥石流容重结果

**Table 4 Empirical formula method to calculate the bulk density of debris flow**

单位: g/cm<sup>3</sup>

编号	沟名	公式(1)	公式(2)	公式(3)
1	菜园沟	2.16	2.14	2.39
2	大沟	1.99	2.08	2.10
3	杜家阴沟	2.06	2.15	2.37
4	樊家坝	1.85	2.25	2.22
5	佛堂沟	1.96	1.84	2.16
6	甘家沟	1.93	2.12	2.32
7	小沟	1.90	1.97	2.07
8	灰崖子	1.91	1.96	2.02
9	贾家沟	2.00	2.08	2.38
10	笼床沟	2.15	2.28	2.38
11	马槽沟	1.95	2.22	2.48
12	卯家山	2.25	1.99	2.40
13	泥湾沟	1.96	1.99	—
14	水峪沟	2.25	2.41	2.15
15	文家沟	1.82	1.73	2.37
16	田房沟	1.98	2.17	2.16
17	石门沟	2.16	2.15	2.21

3.2 泥石流堆积物抗剪强度

泥石流堆积物的的基本力学性质参数见表1。由表1可知,各样本的比重在2.523~2.745变化,平均比重为2.627,变化幅度不大。抗剪强度在7.75~38.87 kPa变化,变化范围较大。除田房沟、小沟外

公式(3)的计算结果平均值基本一致。研究区的泥石流堆积物中细粒含量较多,公式(1)较为充分的考虑了细粒百分含量,故公式(1)的计算结果与实际情况更为符合。因此研究区泥石流流体的性质主要以黏性为主,这与野外现场称重计算结果一致。

其余沟泥石流堆积物的内摩擦角相差不大,绝大多数都在27°~30°。不同泥石流堆积物的抗剪强度、黏粒含量、含水率等物理力学指标可能相差较大,但其内摩擦角具有良好的相似性。

3.3 泥石流对积物的颗粒级配特征

按照土工实验规范,对16条泥石流沟的堆积物土样进行了颗粒分析实验,得到其颗粒级配曲线(图3)。每条沟列举一个试样的粒度组成,实验结果见表5。通过十六条典型泥石流沟堆积区土样的颗粒实验分析,得到了其在各个粒径范围内的累计百分含量,并经计算得出了不均匀系数( $C_u$ )和曲率系数( $C_c$ )。白龙江流域十六条典型泥石流沟的 $C_u$ 在11.00~126.89变化, $C_c$ 在0.13~10.75变化。不均

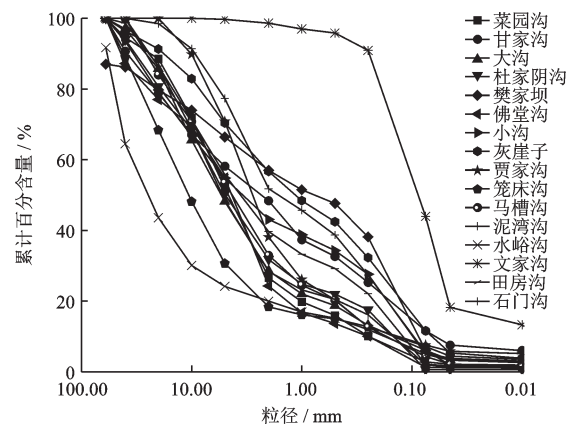


图3 泥石流堆积物累计百分含量

Fig.3 Cumulative percentage of debris flow deposits

表5 不同泥石流沟堆积区土样的各粒组质量百分含量

Table 5 The mass percentage of each grain group of soil samples in different debris flow gully accumulation areas

单位: %

编号	沟名	60~40/ mm	40~20/ mm	20~10/ mm	10~5/ mm	5~2/ mm	2~1/ mm	1~0.5/ mm	0.5~ 0.25/ mm	0.25~ 0.075/ mm	0.075~ 0.005/ mm	<0.005/ mm
1	菜园沟	5.40	6.10	16.70	19.70	25.50	6.77	3.86	5.83	8.80	0.26	1.07
2	大沟	9.30	11.90	11.70	8.90	9.80	11.02	4.70	7.35	13.69	8.06	3.57
3	杜家阴沟	3.00	11.30	20.20	17.30	19.60	6.53	3.35	5.51	7.14	4.24	1.84
4	樊家坝	6.00	13.30	12.30	18.10	18.50	6.96	2.82	4.43	16.90	0.01	0.67
5	佛堂沟	0.80	6.50	5.70	7.60	9.40	5.51	3.85	9.44	32.10	5.09	1.00
6	甘家沟	12.80	10.20	7.60	14.50	30.60	7.62	3.03	3.58	7.26	1.16	1.66
7	小沟	6.50	14.40	12.40	11.90	11.70	4.34	4.45	6.67	22.64	3.37	1.64
8	灰崖子	3.60	5.10	8.40	12.50	13.70	8.25	5.99	10.11	20.69	8.95	2.72
9	贾家沟	—	—	10.20	19.00	32.70	11.98	5.74	7.66	5.13	3.30	4.29
10	笼床沟	11.00	20.60	20.20	17.50	12.30	2.24	1.12	2.27	5.58	5.05	2.14
11	马槽沟	—	16.00	13.20	17.30	20.50	8.46	4.25	7.59	8.38	3.20	1.13
12	泥湾沟	—	1.50	7.10	14.10	25.50	6.07	7.03	11.31	21.92	3.63	1.83
13	水峪沟	7.50	30.30	15.20	10.40	7.00	3.89	1.87	3.44	8.30	2.56	1.54
14	文家沟	—	—	—	15.3	13.8	1.64	1.14	4.89	46.96	10.21	6.06
15	田房沟	1.40	12.10	15.20	15.50	16.10	6.42	4.01	7.09	19.99	0.92	1.26
16	石门沟	—	13.70	17.70	20.00	20.20	5.16	2.76	4.35	14.03	1.28	0.82

匀系数的变化幅度要远远大于曲率系数的变化幅度。 $C_u \geq 5$ 时表明该土样的粒径分布范围较广,但当 $C_u$ 过大时表明可能存在中间粒径的缺失,如大沟、笼床沟、泥湾沟等。

### 3.4 粒度组成与颗粒级配

#### 3.4.1 粒度分维法

粒度分析法是计算泥石流堆积物粒度分维的常用方法,其通过统计学的方式来对无特定尺度的土体颗粒粒度进行分维计算的方法<sup>[15]</sup>。设泥石流堆积物颗粒的粒径为 $r$ , $N(r)$ 为粒径大于 $r$ 的颗粒数目,则 $r$ 与 $N(r)$ 满足分维最一般的定义式:

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

式中, $D$ 为泥石流堆积的粒度分维。

对(1)式两端求导可得:

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

泥石流堆积物的颗粒大小和频度之间满足经验关系 Weibull 分布:

$$M(<r)/M_0 = 1 - \exp[1 - (r/r_0)^a] \quad (3)$$

式中, $M(<r)$ 为所有粒径小于 $r$ 的颗粒质量之和; $M_0$ 为整个土样的质量; $r_0$ 为试样中颗粒的平均尺寸; $a$ 为常数。

当 $r \ll r_0$ 时,将(3)中的指数函数进行 Taylor 级数展开,略去二次项后,两边求得:

$$dM(<r) = r^{a-1} dr \quad (4)$$

泥石流堆积物中颗粒数目的增加和颗粒质量之间存在下列关系:

$$dM = r^3 dN(r) \quad (5)$$

联立式(2)、(4)、(5)得泥石流粒度分维得计算式:

$$D = 3 - b \quad (6)$$

式中, $b$ 等于粒径 $r$ 和颗粒累计百分含量 $M(<r)/M_0$ 在双对数坐标系中用最小二乘法拟合直线所求得的斜率。

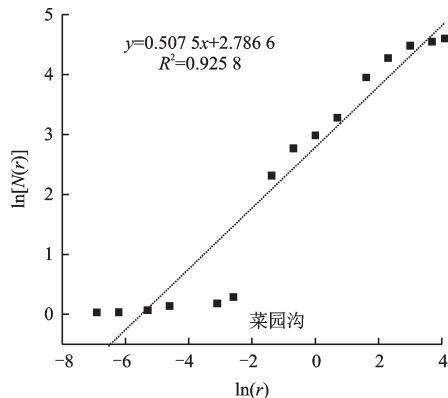
#### 3.4.2 粒度分维值总体特征

20世纪70年代,Mandelbrot 创立了分形理论,以不规则的且具有自相似性的系统为研究对象<sup>[16]</sup>。分形理论是用分数维度的视角和数学方法描述来研究客观事物的方法。根据分形理论,通过上述计算方法,对16条泥石流沟土样的颗分数据进行了分析计算,求得了其粒度分维值和相关系数,见表6。从表6可以看出,所有式样的相关系数均超过0.9,大部分都大于0.94,说明泥石流堆积区颗粒具有良好的分形特征<sup>[17]</sup>。分维值为2.465~2.646,变化不是很大,其典型粒度分布曲线如图4所示。从所分

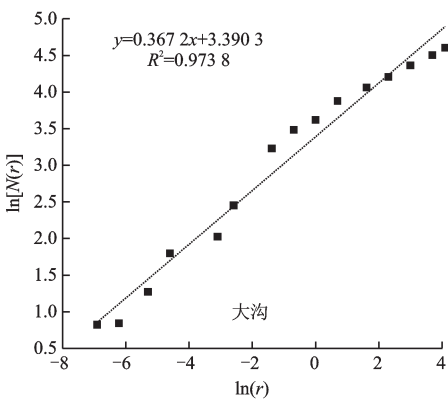
表6 泥石流堆积区分形特征相关指标

Table 6 Debris flow accumulation fractal feature and related Indexes

编号	沟名	分维值 $D$	相关系数 $R^2$	黏粒含量 $P_c/\%$
1	菜园沟	2.492 5	0.925 8	1.0
2	大沟	2.632 8	0.973 8	2.3
3	杜家阴沟	2.565 1	0.986 3	1.4
4	樊家坝	2.586 4	0.974 3	1.2
5	佛堂沟	2.467 6	0.977 7	0.6
6	甘家沟	2.554 7	0.954 0	1.5
7	小沟	2.542 1	0.944 4	1.2
8	灰崖子	2.582 6	0.943 7	1.8
9	贾家沟	2.646 4	0.956 1	3.9
10	笼床沟	2.608 2	0.989 4	1.5
11	马槽沟	2.608 4	0.979 3	2.1
12	泥湾沟	2.535 5	0.942 6	1.3
13	水峪沟	2.535 8	0.974 1	1.0
14	文家沟	2.621 6	0.920 4	2.5
15	田房沟	2.508 7	0.916 4	1.2
16	石门沟	2.465 2	0.949 5	0.7



(a) 菜园沟颗粒粒度双对数分布



(b) 大沟颗粒粒度双对数分布

图4 泥石流堆积区颗粒粒度双对数分布

Fig.4 The double logarithmic distribution of particle size in the debris flow accumulation area

析的泥石流沟的试样不难看出,虽然各条泥石流沟的分布不同,所在地的地质环境条件也不完全相同,但在统计学上仍满足一定的相似性规律。

### 3.4.3 粘粒含量与粒度分维值之间的关系

分维值的大小反映了砾石土的颗粒组成,粗颗粒含量越多,粒度分维值越小;反之,细颗粒含量越多,分维值就越大。从表6可以看出,粒度分维值随黏粒含量增加而逐渐增大。将泥石流的平均黏粒含量( $P_c$ )与粒度分维值 $D$ 在同一坐标系下进行拟合,得到二者之间的关系式。二者之间的关系如图5所示,其相关系数 $R^2=0.9029$ 。该关系式很好的反映了黏粒含量与粒度分维值之间的定量关系: $D=0.1151\ln(P_c)+2.5098$ 。

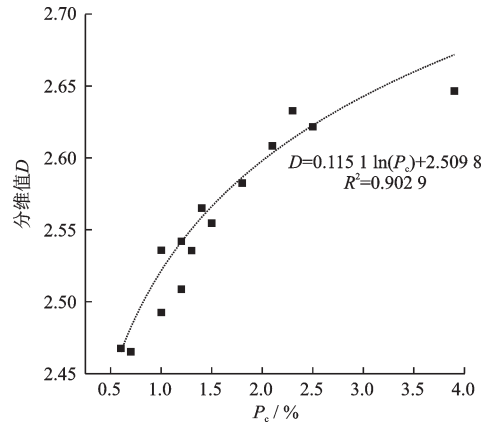


图5 粒度分维值与黏粒含量的关系

Fig.5 The relationship between particle size fractal dimension and clay content

### 3.4.4 分维值与颗粒级配之间的关系

虽然泥石流流体和相应堆积物的粒度组成差别较大,且受多种因素的综合影响,但不同类型的泥石流其堆积物物质组成不同,其分维值也不同,初步分析表明,近代泥石流堆积物分维可作为泥石流分类的定量表示指标之一<sup>[18]</sup>。泥石流的颗粒级配反映了堆积物的固体颗粒组成。固体颗粒作为土体的骨架,在土体的受力方面起主要的支撑作用。固体颗粒的级配良好,其表现出的结构性能也更加优秀。其中,泥石流固体颗粒的级配由两个指标所决定:不均匀系数( $C_u$ )和曲率系数( $C_c$ ),不均匀系数反应土粒组成的不均匀程度,曲率系数反应了粒径分布曲线的整体形状及土体颗粒的连续性。从图6可以看出,泥石流堆积物不均匀系数大都大于5,而曲率系数大都大于3,由此可见泥石流堆积物土颗粒级配较差,且分维值与不均匀系数和曲率系数大致呈正相关。

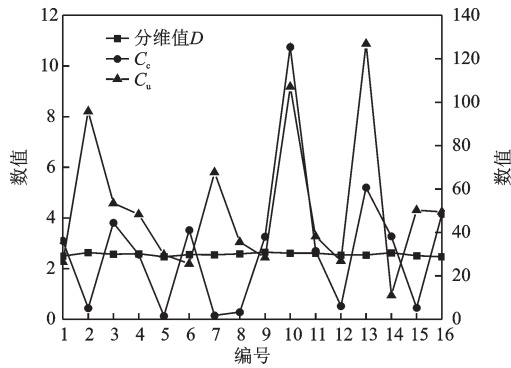


图6 泥石流堆积分维值与级配关系

Fig.6 Relationship between fractal dimension value and gradation of debris flow accumulation

## 4 结论及讨论

### 4.1 结论

(1)各泥石流堆积体粒度分布具有良好的统计自相似性,及具有良好的分形特征。粒度分维值( $D$ )在2.47~2.65变化,且粒度分维值( $D$ )随黏粒含量( $P_c$ )的增大而逐渐增大,且满足关系式 $D=0.115 \ln(P_c)+2.5098$ 。

(2)泥石流堆积区土颗粒大小级配较差,且分维值大都集中在2.5~2.6,当泥石流堆积物分维值 $D>2.6$ 时,为稀性泥石流,当分维值 $D\leq 2.6$ 时为黏性泥石流。故在所研究的泥石流沟中大多数为黏性泥石流,与现场称重和经验公式计算所得出的结论相一致。

(3)堆积物中的黏粒含量较多,但大都缺失中间粒径,级配不良,且堆积物的抗剪强度普遍不高。各泥石流堆积物的物理力学性质有着较大的差异,但其内摩擦角却大都在 $27^\circ\sim 30^\circ$ 之间变化。说明该区域泥石流堆积物的内摩擦角具有良好的相似性。

### 4.2 讨论

(1)文家沟、菜园沟等几条沟的泥石流堆积在某些物理力学性质指标上具有较大的差别,推测受到了异常值的影响。应进一步增加土体样品的数量,控制取样点的位置,提高实验数据的精度。

(2)分形理论为研究土颗粒的组成与泥石流启动之间的关系提供了理论依据,分形特征可以很好的反应土体粒度的复杂组成。可基于大量的样品实验参数,建立分维值与土体其它物理力学性质指标的定量关系。

## 参考文献:

- [1] 胡卸文,刁仁辉,梁敬轩,等.基于CFX的江口沟泥石流危险区范围预测模拟[J].岩土力学,2016,37(6):1689-1696.  
Hu X W, Diao R H, Liang J X, et al. Prediction of Ji-angkou gully debris flow hazard using CFX software [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(6): 1689-1696. (in Chinese)
- [2] 胡凯衡,葛永刚,崔鹏,等.对甘肃舟曲特大泥石流灾害的初步认识[J].山地学报,2010,28(5):628-634.  
Hu K H, Ge Y G, Cui P, et al. Preliminary analysis of extra-large-scale debris flow disaster in Zhouqu Country of Gansu Province [J]. Mountain Research, 2010, 28(5): 628-634. (in Chinese)
- [3] 康志成,马嵩乃.中国泥石流研究[M].北京:科学出版社,2004.  
Kang Z C, Ma A N. Debris flow research in China [M]. Beijing: Science Press, 2004. (in Chinese)
- [4] 贺拿,曾梅,陈宁生,等.砾石土分形特征及其与泥石流启动关系试验[J].山地学报,2016,34(1):63-70.  
He N, Zeng M, Chen N S, et al. Experiment on fractal feature of gravel soil and relationship between fractal dimension and debris flow initiation [J]. Mountain Research, 2016, 34(1): 63-70. (in Chinese)
- [5] 卜祥航,唐川,屈永平,等.四川省石棉县“7·4”特大泥石流堆积物粒度分布及结构分维[J].防灾减灾工程学报,2017,37(6):1016-1022.  
Bu X H, Tang C, Qu Y P, et al. Grain-size distribution and structural fractal dimension of "7·4" Giant debris-flow deposition in Shimian County, Sichuan Province [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2017, 37(6): 1016-1022. (in Chinese)
- [6] 黄江成,杨顺,潘华利,等.白龙江流域泥石流特征分析[J].水土保持通报,2014,34(1):311-315.  
Huang J C, Yang S, Pan H L, et al. Debris flow characteristics in Bailong River Basin [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2014, 34(1): 311-315. (in Chinese)
- [7] 杨春阳.武都区典型泥石流活动机理与启动判据研究[D].北京:中国地质大学(北京),2020.  
Yang C Y. Study on the activity mechanism and initiation criterion of typical gully debris flow in Wudu district [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2020. (in Chinese)
- [8] 刘德玉,贾贵义,李松,等.地形因素对白龙江流域甘肃段泥石流灾害的影响及权重分析[J].水文地质工程

- 地质, 2019, 46(3): 33-39.
- Liu D Y, Jia G Y, Li S, et al. Impacts of topographical factors on debris flow and wight anysis at the Gansu segment of the Bailong River Basin [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2019, 46 (3) : 33-39. (in Chinese)
- [9] 李晓婷, 刘文龙. 模糊综合评判法在甘肃陇南武都区石门乡泥石流危险性评价中的应用[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2020, 31(4): 71-76.
- Li X T, Liu W L. Application of fuzzy comprehensive evaluation method to debris flow risk evaluation in Shimen Township in Wudu District of Longnan City, Gansu Province [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2020, 31(4): 71-76. (in Chinese)
- [10] 王运兴, 周自强, 白晓华, 等. 泥石流堆积区粒度分布特征[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(20): 8073-8078.
- Wang Y X, Zhou Z Q, Bai X H, et al. Characteristics of grain-size distribution in accumulation area of debris flow [J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(20): 8073-8078. (in Chinese)
- [11] 唐邦兴. 中国泥石流[M]. 北京: 商务印书馆, 2000.
- Tang B X. Mudslides in China [M]. Beijing: The Commercial Press, 2000. (in Chinese)
- [12] 余斌. 根据泥石流沉积物计算泥石流容重的方法研究[J]. 沉积学报, 2008, 26(5): 789-796.
- Yu B. Research on the calculating density by the deposit of debris flows [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2008, 26(5): 789-796. (in Chinese)
- [13] 李培基, 梁大兰. 泥石流容重及其计算[J]. 泥沙研究, 1982(3): 75-83.
- Li P J, Liang D L. Density and its calculation of debris flow [J]. Journal of Sediment Research, 1982(3): 75-83. (in Chinese)
- [14] 国家防汛抗旱总指挥部办公室, 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所. 山洪泥石流滑坡灾害及防治设计[M]. 北京: 科学出版社, 1994: 169-183.
- National Flood Control and Drought Relief Headquarters Office, Chengdu Institute of Mountain Disasters and Environment, Ministry of Water Resources, Chinese Academy of Sciences. Mountain torrents, mudslides and landslide disasters and prevention design [M]. Beijing: Science Press, 1994: 169-183. (in Chinese)
- [15] 王运兴, 周自强. 泥石流堆积区粒度分布及分形结构特征[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(7): 2598-2603.
- Wang Y X, Zhou Z Q. The characteristics of grain-size distribution and fractal features in debris flow accumulation area [J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(7): 2598-2603. (in Chinese)
- [16] 董佳祺, 王清, 张旭东, 等. 泥石流堆积物粒度分布特征影响因素分析及分形维数预测[J]. 工程地质学报, 2015, 23(3): 462-468.
- Dong J Q, Wang Q, Zhang X D, et al. Influencing factors analyzing of grain size distribution characteristics of debris flow deposition and fractal dimension prediction [J]. Journal of Engineering Geology, 2015, 23(3): 462-468. (in Chinese)
- [17] 杨伟, 崔鹏, 庄建琦, 等. 泥石流堆积物粒度分形特征及影响因素分析[J]. 水土保持通报, 2012, 32(2): 80-83.
- Yang W, Cui P, Zhuang J Q, et al. Particle-size's fractal characteristics of debris-flow deposits and associated influencing factors [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2012, 32(2): 80-83. (in Chinese)
- [18] 易顺民. 泥石流堆积物的分形结构特征[J]. 自然灾害学报, 1994, 3(2): 91-96.
- Yi S M. The fractal structure features of accumulation in debris flow [J]. Journal of Natural Disasters, 1994, 3(2): 91-96. (in Chinese)

(本文责编: 周小潭)