

# 花岗岩崩岗崩积体颗粒组成及分形特征

蒋芳市, 黄炎和, 林金石, 赵 淦, 葛宏力

(福建农林大学 资源与环境学院, 福州 350002)

**摘 要:**崩岗崩积体土质疏松,抗侵蚀能力弱,其颗粒组成及分形维数有其自身的特性。采用激光粒度分布仪对花岗岩崩岗崩积体及崩壁土样的颗粒进行测定,对其土壤颗粒组成及分形特征进行比较分析。结果如下:崩积体土壤以砾石、砂粒、粉粒含量为主,黏粒含量极低,土壤质地主要为砾石土;崩积体各层次土壤颗粒分形维数均值为 2.61~2.70,分形维数值较低,反映了其细颗粒损失情况;黏粒含量是影响土壤颗粒分形维数的主要因素;崩壁土体的颗粒分形维数大小能够表征土壤的理化特征,而崩积体土壤颗粒分形维数无法真实反映崩积体的理化性质。

**关键词:**崩岗;崩积体;颗粒分布;分形维数

**中图分类号:**S152.3

**文献标识码:**A

**文章编号:**1005-3409(2014)06-0175-06

## Soil Particle Size Distribution and Fractal Dimensions of Colluvial Deposits in Granite Benggang

JIANG Fang-shi, HUANG Yan-he, LIN Jin-shi, ZHAO Gan, GE Hong-li

(College of Resources and Environment, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China)

**Abstract:** Colluvial deposit, as a part of hill, has high contents of loose materials and high erodibility, and the particle composition and the fractal dimensions of colluvial soil have its own characteristics. Soil particle size distribution of colluvial deposits and clasp wall in granite hill were analyzed by using the laser particle size distribution instrument. The results indicated that colluvial deposits were given priority with gravel, sand and silt contents, clay content was extremely low, the gravel soil was the dominated soil texture; the average fractal dimensions of soil particles of colluvial deposits were less than the range between 2.61 to 2.70, which reflected the characteristic of fine particle loss; clay content was the major factor of the fractal dimension; the fractal dimension could reflect the soil physical and chemical properties of collapsing wall, but it couldn't reflect the soil properties of colluvial deposits.

**Key words:** Benggang; colluvial deposits; soil particle size distribution; fractal dimensions

崩岗是我国南方红壤区特有的侵蚀现象<sup>[1]</sup>,一般由集水坡面、崩壁、崩积体、冲刷沟道、冲积扇组成。其中,崩积体是由崩壁、原山体坡面的物质经水力和重力的作用下,在崩壁下方堆积的物质。由于受到扰动,其性质较崩壁的原状土体性质已发生很大的变化,属于扰动土,土质疏松,抗侵蚀能力弱,加上坡度大(一般为 20°~40°),且植物根系及有机质缺乏,非常容易被降雨溅蚀及径流冲刷,形成大量泥沙,直接影响崩岗泥沙的流失量,影响崩岗对下游的危害<sup>[2]</sup>。颗粒组成是土壤理化特性的一项重要指标,反映了土壤的粘砂程度,直接影响土壤的团聚状况、渗透、容重、孔隙等特征<sup>[3-5]</sup>;土壤颗粒具有自相似特征,可用

分形理论定量描述土颗粒的特征<sup>[4-5]</sup>,且土壤颗粒的分形维数大小能反映土壤颗粒分布的均匀程度<sup>[6]</sup>,表征土壤的密实程度、团聚结构、土壤孔隙等结构特征<sup>[4-6]</sup>,能够反映岩土的分化强弱程度及表征土体的抗侵蚀强度<sup>[7]</sup>,能够反映土壤颗粒物质的损失状况<sup>[8]</sup>及土壤的侵蚀强度<sup>[4,9]</sup>。长期以来,崩岗侵蚀研究主要集中在崩壁土层的不稳定性及与岩土特性的关系<sup>[10-11]</sup>,对崩积体的关注较少,以致对崩积体的颗粒分布特征也还未有定量化的描述。鉴于此,本研究以花岗岩崩积体为研究对象,并与崩壁土壤的颗粒特征进行比较,分析崩积体的颗粒组成及分形维数特征,探讨崩积体的分形维数与颗粒组成的关系及其与土

收稿日期:2013-11-26

修回日期:2014-02-09

资助项目:国家自然科学基金资助项目(41001169,40671113);国家科技支撑项目(2014BAD15B03)

作者简介:蒋芳市(1979—),男,福建大田人,博士,讲师,研究方向:土壤侵蚀与治理。E-mail:jfsfufu@163.com

通信作者:黄炎和(1962—),男,广东饶平人,博士,教授,博士生导师,研究方向:土壤侵蚀与侵蚀退化生态恢复途径。E-mail:yanhehuang@163.com

壤理化性质的关系,以期为崩积体土壤性质的系统深入研究提供基础。

# 1 材料与方法

## 1.1 研究区概括

研究区位于福建省安溪县龙门镇(118°03'E,24°57'N),属于亚热带气候区,年平均温度 18℃,年平均降水量 1 800 mm。崩岗区土体发育于晚侏罗世及早白垩世燕山晚期的侵入体之上,均属酸性花岗岩类岩石,结构为中—粗粒似斑状结构,矿物成分以长石为主,其次为石英和云母<sup>[11]</sup>。安溪县崩岗数量为福建省之最,而龙门镇的崩岗数量又居安溪县之首。根据 2005 年调查的数据,安溪县崩岗数量为12 828个,占福建省崩岗总数(26 024 个)的49.28%,崩岗面积为 2.305 hm<sup>2</sup>,占福建省崩岗总面积(6 406 hm<sup>2</sup>)的 35.99%;龙门镇共有崩岗 1 228 个,密度为 7.86 个/km<sup>2</sup>,崩岗侵蚀面积 264.77 hm<sup>2</sup>,数量和面积分别占

安溪县的 9.57%和 11.48%,崩岗侵蚀剧烈。

## 1.2 样品采集

2012 年 6 月,对研究区 3 座花岗岩发育的崩岗(编号分别为 BG1/BG2/BG3)共 6 处崩积体(编号分别为 BJ1/BJ2/BJ3/BJ4/BJ5/BJ6)进行采样;其中,BG1 崩岗包括 BJ1/BJ2 崩积体;BG2 崩岗包括 BJ3/BJ4 崩积体;BG3 崩岗包括 BJ5/BJ6 崩积体。由于崩积体是多次崩塌堆积形成的,其在剖面上具有层次性。

因此,采样时分别对崩积体的坡下(A)、坡中(B)、坡上(C)三个部位,按 1 m 剖面从下至上根据崩积体的堆积层次进行采样,BJ1/BJ2/BJ3/BJ4/BJ5/BJ6 六处崩积体采集的样品分别为 8,11,7,10,7,8 个,共 51 个样品,具体采样情况见表 1。为了与崩壁上未崩塌的土体性质相比较,对每座崩岗崩壁上的红土层、砂土层和碎屑层进行采样,每层各 3 个混合样,每个崩岗 9 样品,3 个崩岗共 27 个样品。

表 1 崩积体采样部位

崩岗	崩积体	采样部位	坡度/ (°)	采样层次	深度/ cm	崩积体	采样部位	坡度/ (°)	采样 层次	深度/ cm			
BG1	BJ1	下(BJ1—A)	22	BJ1—A1	0—40	BJ2	下(BJ2—A)	25	BJ2—A1	0—20			
				BJ1—A2	40—100				BJ2—A2	20—65			
		中(BJ1—B)	29	BJ1—B1	0—45		中(BJ2—B)	32	BJ2—A3	65—100			
				BJ1—B2	45—80				BJ2—B1	0—18			
				BJ1—B3	80—100				BJ2—B2	18—60			
				BPJ1—C1	0—30				BJ2—B3	60—82			
				BJ1—C2	30—50				BJ2—B4	82—100			
				BJ1—C3	50—100				BJ2—C1	0—20			
		上(BJ1—C)	34	BJ1—C2	30—50		上(BJ2—C)	38	BJ2—C2	20—40			
				BJ1—C3	50—100				BJ2—C3	40—70			
									BJ2—C4	70—100			
		BG2	BJ3	下(BJ3—A)	19		BJ3—A1	0—50	BJ4	下(BJ4—A)	21	BJ4—A1	0—25
BJ3—A2	50—100					BJ4—A2	25—60						
中(BJ3—B)	31			BJ3—B1	0—40	中(BJ4—B)	30	BJ4—A3		60—100			
				BJ3—B2	40—75			BJ4—B1		0—25			
				BJ3—B3	75—100			BJ4—B2		25—52			
				BJ3—C1	0—40			BJ4—B3		52—77			
				BJ3—C2	40—100			BJ4—B4		77—100			
				BJ3—C2	40—100			BJ4—C1		0—30			
上(BJ3—C)	40			BJ3—C2	40—100	上(BJ4—C)	37	BJ4—C2		30—75			
								BJ4—C3		65—100			
BG3	BJ5			下(BJ5—A)	22	BJ5—A1	0—48	BJ6		下(BJ6—A)	23	BJ6—A1	0—24
						BJ5—A2	48—100					BJ6—A2	24—58
		中(BJ5—B)	33	BJ5—B1	0—41	中(BJ6—B)	28		BJ6—A3	58—100			
				BJ5—B2	42—70				BJ6—B1	0—35			
				BJ5—B3	70—100				BJ6—B2	35—100			
				BJ5—C1	0—40				BJ6—C1	0—20			
				BJ5—C2	40—100				BJ6—C2	20—60			
				BJ5—C2	40—100				BJ6—C3	60—100			
		上(BJ5—C)	41	BJ5—C2	40—100	上(BJ6—C)	36						

### 1.3 土壤理化性质的测定

土壤有机质采用重铬酸钾消煮法<sup>[12]</sup>;土壤容重和孔隙采用环刀法<sup>[13]</sup>;团聚体含量采用湿筛法<sup>[13]</sup>;入渗速率采用环刀法<sup>[14]</sup>。土壤颗粒采用激光粒度仪分析,设备为丹东百特仪器有限公司生产的 BT-9300 ST 激光粒度分布仪。

### 1.4 指标计算

土壤颗粒分形维数采用杨培岭模型<sup>[15]</sup>计算:

$$D=3-\lg\left[\frac{W_i}{W_0}\right]/\lg\frac{\bar{d}_i}{\bar{d}_{\max}} \quad (1)$$

式中:  $\bar{d}_i$ ——两筛分粒级  $d_i$  与  $d_{i+1}$  间粒径的平均直径(mm), ( $d_i > d_{i+1}$ ,  $i=1, 2, \dots$ );  $\bar{d}_{\max}$ ——最大粒径土粒的平均直径(mm);  $W_i$ ——小于  $d_i$  的累积土粒重量;  $W_0$ ——土壤各粒级重量的总和。

### 1.5 数据处理与分析

试验数据采用 Excel 2003, SPSS 18.0 进行数理统计分析。回归及相关分析等采用 Excel 2003 进行,多重比较(LSD)采用 SPSS 18.0 进行。

## 2 结果与分析

### 2.1 崩积体的颗粒组成与质地

按照美国农业部土壤质地分类制(USDA),把颗粒分为砾石( $>2$  mm),砂粒( $2 \sim 0.05$  mm),粉粒( $0.05 \sim 0.002$  mm)和黏粒( $<0.002$  mm),并根据土壤的颗粒组成划分土壤质地类型,崩积体及崩壁土层的土壤颗粒组成见表 2。从表可知,崩积体的砾石、砂粒、粉粒含量均较高,砾石含量在 14.56%~69.37%之间,其中,BJ5 的砾石含量最高;砂粒含量在 14.58%~39.13%之间,粉粒含量在 8.89%~41.41%之间,黏粒含量极低,在 1.53%~9.86%之间;平均砾石、砂粒、粉粒、黏粒的比例为 1:0.79:0.69:0.13。红土层主要以砂粒和粉粒为主,砾石和黏粒含量相当,砾石、砂粒、粉粒、黏粒的比例为 1:1.62:1.67:1.07;砂土层主要以砾石、砂粒及粉粒居多,黏粒含量较低,四者的比例为 1:0.91:0.73:0.26;碎屑层以砾石和砂粒含量为主,黏粒含量极低,四者的比例为 1:0.81:0.31:0.09。

对崩积体 51 个样品进一步统计发现,除 10 个样品的砾石含量小于 30%外,其它的 41 个样品的砾石重量含量均大于 30%,根据美国制的颗粒分级标准,以上样品均为砾石土;其中,37 个样品的砾石质量含量在 30%~50%之间,属于轻砾石土,4 个样品的砾石质量含量在 50%~70%之间,属于中砾石土。对于崩壁土体,属于砾石土的样品有 16 个,其中,红土层

的样品 1 个,砂土层的样品 6 个,碎屑层的样品 9 个;16 个样品中,仅有 2 个样品为中砾石土,其余 14 个样品均为轻砾石土。

以上说明,由崩壁土体崩塌形成的崩积体,颗粒组成呈粗颗粒化特征,土壤质地主要为砾石土。由于黏粒含量低,颗粒之间的粘结力小,土壤很难再形成与崩壁土壤相似的土壤结构,表现出松散及水稳性差的特征,在降雨及径流的作用下,很容易发生侵蚀。

### 2.2 崩积体土体的分形特征

崩积体及崩壁土层的颗粒分形维数见表 2。对土壤颗粒分形维数进行统计分析发现,崩积体各层次土壤颗粒分形维数均值在 2.61~2.70 之间,极差在 0.10~0.17 之间,变异系数在 0.014~0.23 之间;崩壁各土层的均值在 2.65~2.82 之间,极差在 0.09~0.19 之间,变异系数在 0.008~0.021;说明崩积体及崩壁土层土壤颗粒的分形维数均相对集中,属于弱变异(变异系数 $<0.10$ ),整体变异规律不明显。郭中领<sup>[16]</sup>对北京地区表层土壤的研究也表明,土壤颗粒分形维数变异性较弱,差异不明显。

崩积体及崩壁土体平均分形维数的大小比较可知,  $D_{\text{红土层}}(2.82) > D_{\text{砂土层}}(2.72) > D_{\text{碎屑层}}(2.65) = D_{\text{崩积体}}(2.65)$ 。罗明达等研究表明,土壤颗粒分形维数越低,土壤颗粒配级越不均匀<sup>[6]</sup>。从表 2 分析可知,红土层砾石、砂粒、粉粒、黏粒的平均比例为 1:1.62:1.67:1.07,而砂土层、碎屑层、崩积体的四个粒级的比例分别为 1:0.91:0.73:0.26, 1:0.81:0.31:0.09, 1:0.79:0.69:0.13,说明红土层的颗粒分布远比其它三个土体均匀。吴志峰<sup>[7]</sup>研究表明,分形维数可以表征花岗岩风化壳的风化强弱及抗蚀强度,分型维数越低,岩土的风化程度越弱,土壤的抗冲抗蚀能力下降。本研究红土层的分形维数  $D$  为 2.80~2.89,与红土层风化程度较高及较强的抗侵蚀能力相对应,而砂土层和碎屑层土壤的分形维数分别在 2.78 和 2.68 以下,相对较低,符合砂土、碎屑层风化程度较弱及抗侵蚀能力较低的特征。而陈子玉<sup>[4]</sup>研究发现分形维数可以反映土壤的侵蚀程度,分形维数越低,表明土壤的细颗粒损失,粗颗粒含量富集,土壤侵蚀程度越高。崩积体的颗粒分型维数也较低(2.75 之下),虽然与砂土层和碎屑层土体的分形维数相当,但由于其土质较二者疏松,更易被侵蚀;同时,崩积体细颗粒首先被搬运,促使土体向粗颗粒富集,分形维数在一定程度上反映了其物质的损失。

表 2 崩积体及崩壁土层不同粒径级别的颗粒含量统计特征值

颗粒	土体	样本数	极小值/%	极大值/%	极差/%	均值/%	标准差/%	LSD 比较	变异系数
砾石含量 ( $>2\text{ mm}$ )	BJ1	8	28.91	46.89	17.98	37.19	5.88	bc	0.16
	BJ2	11	28.10	51.31	23.21	40.98	7.74	b	0.19
	BJ3	7	21.76	38.88	17.12	32.35	5.73	c	0.18
	BJ4	10	14.56	44.99	30.43	30.04	9.48	c	0.32
	BJ5	7	36.03	69.37	33.34	51.56	11.32	a	0.22
	BJ6	8	19.15	49.57	30.42	39.34	9.61	b	0.24
	红土层	9	7.40	32.42	25.02	18.69	9.04	d	0.48
	砂土层	9	25.79	43.83	18.04	34.52	6.08	c	0.18
	碎屑层	9	37.95	53.20	15.25	45.18	5.94	b	0.13
砂粒含量 ( $2\sim0.05\text{ mm}$ )	BJ1	8	26.96	36.68	9.72	31.68	3.23	a	0.10
	BJ2	11	23.31	36.48	13.17	29.01	3.99	ab	0.14
	BJ3	7	26.92	39.13	12.21	32.24	4.32	a	0.13
	BJ4	10	31.18	34.49	3.31	32.75	1.08	a	0.03
	BJ5	7	14.58	33.25	18.67	25.59	6.98	b	0.27
	BJ6	8	26.09	35.39	9.30	30.56	3.21	a	0.10
	红土层	9	21.80	36.10	14.30	30.22	4.07	a	0.13
	砂土层	9	25.54	35.69	10.15	31.52	3.44	a	0.11
	碎屑层	9	20.87	45.50	24.63	36.59	7.80	a	0.21
粉粒含量 ( $0.05\sim0.002\text{ mm}$ )	BJ1	8	22.68	32.57	9.89	27.94	3.31	a	0.12
	BJ2	11	20.62	33.18	12.56	26.63	4.37	a	0.16
	BJ3	7	25.04	33.00	7.96	30.35	2.74	a	0.09
	BJ4	10	17.00	41.51	24.51	31.37	7.68	a	0.24
	BJ5	7	8.89	25.04	16.15	16.47	5.23	b	0.32
	BJ6	8	15.55	37.30	21.75	23.77	7.61	a	0.32
	红土层	9	11.52	37.69	26.17	31.12	8.38	a	0.27
	砂土层	9	19.54	35.02	15.48	25.15	4.77	a	0.19
	碎屑层	9	8.38	23.30	14.92	14.11	6.68	b	0.47
黏粒含量 ( $<0.002\text{ mm}$ )	BJ1	8	1.53	5.21	3.68	3.19	1.18	b	0.37
	BJ2	11	2.19	5.79	3.60	3.39	1.25	b	0.37
	BJ3	7	1.85	7.30	5.45	5.07	1.89	b	0.37
	BJ4	10	2.14	9.86	7.72	5.85	2.41	b	0.41
	BJ5	7	3.85	9.31	5.46	6.38	1.91	b	0.30
	BJ6	8	3.44	9.60	6.16	6.33	2.26	b	0.36
	红土层	9	13.65	34.25	20.60	19.97	6.01	a	0.30
	砂土层	9	3.50	14.03	10.53	8.81	3.28	b	0.37
	碎屑层	9	3.24	5.50	2.26	4.14	0.74	b	0.18
分形维数 $D$	BJ1	8	2.57	2.67	0.10	2.61	0.037	b	0.014
	BJ2	11	2.55	2.69	0.14	2.61	0.048	b	0.018
	BJ3	7	2.53	2.70	0.17	2.64	0.062	b	0.023
	BJ4	10	2.59	2.72	0.13	2.67	0.039	b	0.015
	BJ5	7	2.63	2.75	0.12	2.70	0.038	ab	0.014
	BJ6	8	2.64	2.74	0.10	2.69	0.037	b	0.014
	红土层	9	2.80	2.89	0.09	2.82	0.027	a	0.010
	砂土层	9	2.59	2.78	0.19	2.72	0.058	ab	0.021
	碎屑层	9	2.61	2.68	0.07	2.65	0.022	b	0.008

注:同一种颗粒下,同一列中小写字母相同表示差异不显著。

2.3 分形维数与土壤颗粒组成的关系

砾石( $d_{>2}$ )、砂粒( $d_{2-0.05}$ )、粉粒( $d_{0.05-0.002}$ )、黏粒( $d_{<0.002}$ )含量与土壤分形维数( $D$ )的关系见表 3。由表可知,崩壁上土体分形维数与砾石、砂粒呈线性负相关,且分别达到显著水平和极显著水平;与粉粒呈线性极显著正相关;与黏粒含量呈幂函数关系,且达

到极显著水平,这与陈子玉<sup>[4]</sup>及高君亮<sup>[8]</sup>等的研究一致。但崩积体土壤分形维数仅与黏粒含量呈幂函数关系,且相关性达到极显著水平,而与砾石、砂粒、粉粒的相关性不高,与崩壁土体有较大的差异,这是由于崩积体经降雨和径流冲刷后,黏粒含量减少,土壤粗颗粒含量富集,各土体粗颗粒之间的含量差异较小所致。

表 3 土壤颗粒分形维数与土壤粒径含量的关系

土体	方程	决定系数 $R^2$	样本 $n$
崩壁	$D=-0.0049 d_{>2}+2.8932$	0.6219**	27
	$D=-0.0094 d_{2\sim0.05}+3.0541$	0.4244*	27
	$D=0.007 d_{0.05\sim0.002}+2.5703$	0.6518**	27
	$D=2.5003 d_{<0.002}^{0.0409}$	0.9666**	27
崩积体	$D=0.0003 d_{>2}+2.6416$	0.0029	51
	$D=-0.002 d_{2\sim0.05}+2.7115$	0.0280	51
	$D=-0.0018 d_{0.05\sim0.002}+2.6998$	0.0611	51
	$D=2.5068 d_{<0.002}^{0.0375}$	0.7922**	51

注:表中\* \* 表示关系达到极显著水平( $P<0.01$ ); \* 表示关系达到显著水平( $P<0.05$ )。

采用逐步回归法,将分形维数  $D$  与四个粒级颗粒含量进行多元线性回归,发现崩积体及崩壁土壤的砾石( $>2\text{ mm}$ )含量、砂粒( $2\sim0.05\text{ mm}$ )和粉粒( $0.05\sim0.002\text{ mm}$ )含量因子均被剔除,分形维数  $D$  与黏粒( $<0.002\text{ mm}$ )含量的偏相关系数达到极显著水平。分形维数  $D$  与各粒级含量建立的线性方程有效性达到极显著水平:

$$D_{\text{崩积体}}=2.550+0.021d_{<0.002}\tag{2}$$
$$D_{\text{崩壁}}=2.627+0.010d_{<0.002}\tag{3}$$

式中: $D_{\text{崩积体}}$ ——崩积体土壤颗粒分形维数; $D_{\text{崩壁}}$ ——崩壁土层土壤颗粒分形维数; $d_{<0.002}$ ——土壤黏粒含量(%)。

式(2)和式(3)说明不管是崩积体扰动土壤还是崩壁上自然土壤,黏粒含量是影响土壤颗粒分形维数的主要因素,而粉粒含量、砂粒含量、砾石含量的作用较小,这与吴尧等<sup>[5]</sup>对岷江上游 5 种典型植被下土壤的研究一致。红土层的黏粒含量高,平均值达到了 20.60%,土壤质地偏向粉粘质,土壤内部结构的复杂程度提高,因此,红土层的分形维数值最大;砂土层的黏粒含量也比崩积体及碎屑层土体的高,所以分形维数也较高,平均值达到了 2.70;碎屑层细颗粒含量少,

粗颗粒含量高,所以分形维数较低;崩积体为崩壁土层崩塌形成的,是崩壁土层的混合体,但经过降雨的击溅和径流的冲刷,部分细颗粒被侵蚀,造成粗颗粒富集,土壤颗粒之间的接触面积减少,颗粒结构排列形式比崩壁未扰动土体简单,所以分形维数也较低。

2.4 颗粒分形特征与土壤理化性质的关系

土壤颗粒是构成土壤结构的重要基础物质,一定程度上能够表征土壤结构指标。崩壁及崩积体土壤理化指标的平均值见表 4,分形维数与土壤理化性状的相关性见表 5。由表 5 可知,崩壁土壤的颗粒分形维数与有机质含量、总孔隙度、非毛管孔隙、 $>0.25\text{ mm}$  团聚体含量、初渗率及稳渗率成正比,而与容重和毛管孔隙成反比,相关系数均达到了显著水平以上;而崩积体土壤分形维数与上述土壤理化指标的相关性均不明显。以上说明,对于崩壁土壤,分形维数越大,土壤容重越小,土壤的团聚结构增强,孔隙增大,特别是非毛管孔隙的增加,有利于水分的入渗,土壤的抗侵蚀能力增强。因此,崩壁土体结构紧实,不同土层颗粒大小分布及排列差异较大,土壤颗粒的分形维数能够表征土壤的理化特征,这与罗明达<sup>[6]</sup>及吴尧<sup>[5]</sup>等研究一致。而对于崩积体土体,由于天然土体结构的破坏及细颗粒被冲刷,土壤的粗颗粒含量增多,土壤颗粒之间的作用力差异不大,加上土壤有机质含量低(表 4),其对土壤颗粒的粘聚作用很弱,造成土壤内部的自相似特征减弱,各土体的理化性质指标差异不大,颗粒分形维数无法真实反映崩积体的土体结构。但从表 4 可以看出,崩积体之间初渗率和稳渗率差异较大,这主要与崩积体的堆积时间有关。蒋芳市等<sup>[2]</sup>研究发现,崩积体的入渗能力受堆积时间的影响,堆积一段时间后崩积体的孔隙减少,入渗能力降低,因此,BJ1,BJ3,BJ5 的入渗能力较差,与其已堆积一段时间有关,而与其土体的颗粒组成及分形特征关系不大。

表 4 各采样崩积体及崩壁土壤的理化性质

土样	有机质/ ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	容重/ ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	总孔隙/ %	毛管 孔隙/%	非毛管 孔隙/%	$>0.25\text{ mm}$ 团 聚体含量/%	初渗率/ ( $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ )	稳渗率/ ( $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ )
BJ1	1.07b	1.34bc	51.55a	32.71a	18.85a	13.90b	8.91b	3.46b
BJ2	1.38b	1.25c	52.78a	31.50a	21.28a	12.86b	40.82a	19.71a
BJ3	1.87b	1.40bc	47.75ab	29.79a	17.96a	9.35b	13.03b	4.57b
BJ4	1.78b	1.30c	51.96a	31.01a	20.95a	14.05b	48.88a	23.43a
BJ5	1.83b	1.47b	45.39ab	26.83a	18.56a	7.23b	3.30c	0.75b
BJ6	1.65b	1.26b	53.25a	33.66a	19.59a	12.23b	46.20a	23.07a
红土层	4.98a	1.39bc	48.21ab	34.18a	14.03b	41.32a	6.12b	2.34b
砂土层	2.21b	1.34bc	49.86ab	35.15a	14.72b	8.69b	3.25c	0.87c
碎屑层	0.88b	1.56a	42.51b	34.72a	7.79b	12.31b	1.66c	0.61c

注:同一列中小写字母相同表示差异不显著。

表 5 土壤颗粒分形维数与土壤理化指标的相关性

土样	有机质	容重	总孔隙	毛管孔隙	非毛管孔隙	>0.25 mm 团聚体含量	初渗率	稳渗率
崩积体	-0.10	0.22	-0.20	-0.17	-0.15	0.16	-0.14	-0.11
崩壁	0.86**	-0.76**	0.77**	-0.57**	0.67**	0.76**	0.63**	0.65**

注:表中\*表示关系达到极显著水平( $P<0.01$ );\*表示关系达到显著水平( $P<0.05$ )。

3 结论

通过对崩积体的颗粒组成及分形维数特征进行分析,并与崩壁土壤的性质相比较可知:

(1) 崩积体的砾石、砂粒、粉粒含量均较高,红土层主要以砂粒和粉粒为主,砂土层主要以砾石、砂粒及粉粒居多,碎屑层以砾石和砂粒含量为主;

(2) 崩积体及崩壁土体的颗粒分形维数值均相对集中,崩壁土体的颗粒分形维数可以表征花岗岩风化壳的风化强弱及抗蚀强度,而崩积体土壤的颗粒分形维数则一定程度上反映了细颗粒的损失。

(3) 通过多元线性逐步回归分析表明黏粒含量是影响崩积体及崩壁土壤颗粒分形维数的主要因素,均可通过黏粒含量建立土壤颗粒的分形维数方程。但由于崩积体土壤黏粒含量低,颗粒之间的粘结力小,土壤很难再形成与崩壁土壤相似的土壤结构,土质疏松,很容易被雨滴溅蚀及被径流的冲刷。

(4) 分形维数与土壤理化指标相关分析表明,崩壁土体的颗粒分形维数大小能够表征土壤的理化特征,而崩积体土壤颗粒分形维数无法真实反映崩积体的理化性质。

参考文献:

[1] 唐克丽. 中国水土保持[M]. 北京:科学出版社,2004.

[2] 蒋芳市,黄炎和,林金石,等. 崩岗崩积体土壤渗透特性分析[J]. 水土保持学报,2013,27(3):49-54.

[3] 何腾兵. 贵州山区土壤物理性质对土壤侵蚀影响的研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报,1995,1(1):85-95.

[4] 陈子玉,顾祝军. 南方水蚀区不同侵蚀程度土壤粒径分形研究[J]. 水土保持研究,2013,20(4):13-16.

[5] 吴尧,姚健,吴永波,等. 岷江上游典型植被下土壤分形特征及对水分入渗的影响[J]. 水土保持通报,2012,32(2):12-16.

[6] 罗明达,杨吉华,房用,等. 沂源石灰岩山地不同植被类型土壤颗粒分形特征研究[J]. 水土保持研究,2010,17(3):17-21.

[7] 吴志峰. 华南花岗岩风化土体粒度成分的分形特征[J]. 中国水土保持,1997(5):17-19.

[8] 高君亮,李玉宝,虞毅,等. 毛乌素沙地不同土地利用类型土壤分形特征[J]. 水土保持研究,2010,17(6):220-223.

[9] 朱华,程先富,王世航,等. 基于 GIS 的安徽省表层土壤颗粒分形特征研究[J]. 水土保持研究,2009,16(4):146-149.

[10] 林敬兰,黄炎和. 崩岗侵蚀的成因机理研究与问题[J]. 水土保持研究,2010,17(2):41-44.

[11] 林敬兰,黄炎和,蒋芳市,等. 崩岗土体的渗透性能机理研究[J]. 水土保持学报,2013,27(2):53-56.

[12] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业科技出版社,2000.

[13] 中国科学院南京土壤研究所土壤物理研究室. 土壤物理性质测定法[M]. 北京:科学出版社,1978.

[14] 刘目兴,聂艳,于婧. 不同初始含水率下粘质土壤的入渗过程[J]. 生态学报,2012,32(3):871-878.

[15] 杨培岭,罗远培,石元春. 用粒径的重量分布表征的土壤分形特征[J]. 科学通报,1993,38(20):1896-1899.

[16] 郭中领,符素华,王向亮,等. 北京地区表层土壤分形特征研究[J]. 水土保持通报,2010,30(2):154-158.

(上接第 174 页)

[8] 鲍玉海,唐强,高银超. 水库消落带消浪植生型生态护坡技术应用[J]. 中国水土保持,2010(10):37-39.

[9] 汤显强,吴敏,金峰. 三峡库区消落带植被恢复重建模式探讨[J]. 长江科学院院报,2012,29(3):13-17.

[10] Abrahams C. Climate change and lakeshore conservation: a model and review of management techniques [J]. Hydrobiologia, 2008,613(1):33-43.

[11] 熊俊,袁喜,梅朋森,等. 三峡库区消落带环境治理和生态恢复的研究现状与进展[J]. 三峡大学学报:自然科学版,2011,33(2):23-28.

[12] 安树青. 湿地生态工程:湿地资源利用与保护的优化模式[M]. 北京:化学工业出版社环境科学与工程出版中心,2003.

[13] 卢志军,江明喜. 三峡库区消落带植被恢复策略[J]. 重庆师范大学学报:自然科学版,2012,29(3):27-30.

[14] 王晓荣,程瑞梅,肖文发,等. 三峡库区消落带水淹初期地上植被与土壤种子库的关系[J]. 生态学报,2010,30(21):5821-5831.

[15] 卢志军,李连发,黄汉东,等. 三峡水库蓄水对消落带植被的初步影响[J]. 武汉植物学研究,2010,28(3):303-314.