

桂西北喀斯特地区典型土壤在不同筛分强度下团聚体的稳定性

胡乐宁^{1,2,3}, 苏以荣^{1,2}, 何寻阳^{1,2}

(1. 中国科学院亚热带农业生态研究所 亚热带农业生态过程重点实验室, 湖南长沙 410125;
2. 中国科学院环江喀斯特农业生态试验站, 广西环江 547100; 3. 广西师范大学环境与资源学院, 广西桂林 541004)

摘要: 采用 AS 200 筛分仪分析了不同有机碳含量下 3 种喀斯特典型土壤(红壤、棕色石灰土、黑色石灰土)的团聚体颗粒在不同筛分强度(1.5, 2 和 2.5 mm 振幅)的分级特征。结果显示, 3 种土壤平均重量直径(MWD)从大到小为: 黑色石灰土 > 棕色石灰土 > 红壤 ($p < 0.05$)。随筛分强度由小到大, 棕色石灰土和黑色石灰土的团聚体颗粒分级变化较小, 红壤团聚体颗粒分级由大颗粒(>8, 8~5, 5~2 mm)团聚体为主逐渐变为中间粒径颗粒(5~2, 2~1 mm)。红壤团聚体结构最易被筛分过程破坏, 其次是棕色石灰土, 最后是黑色石灰土。研究表明石灰土团聚体机械稳定性强于红壤, 且筛分强度直接影响团聚体分级结果。从团聚体聚合角度来看, 喀斯特石灰土土壤稳定性较强。

关键词: 喀斯特; 筛分强度; 机械筛分; 平均重量直径

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2014)03-0236-06

中图分类号: S153.6

DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2014.03.047

Soil Aggregates Stability at Different Sieving Strength for Typical Soils in Karst Region of Northwest Guangxi Province

HU Le-ning^{1,2,3}, SU Yi-rong^{1,2}, HE Xun-yang^{1,2}

(1. Key Laboratory of Agro-ecological Processes in Subtropical Region, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha, Hunan 410125, China;

2. Huanjiang Observation and Research Station for Karst Eco-systems, Huanjiang, Guangxi 547100, China;

3. Department of Resource and Environmental Science, Guangxi Normal University, Guilin, Guangxi 541004, China)

Abstract: Soil aggregates of two karst soils (terra fusca and rendzina) and one zonal soil (red soil) with different soil organic carbon (SOC) contents were analyzed at 1.5, 2 and 2.5 mm sieving strength using AS200. Results show that the three soils, in order of decreasing mean soil weight diameter (MWD), were rendzina, terra fusca and red soil ($p < 0.05$). With the change of sieving strength, particle size fractions of soil aggregates for terra fusca and rendzina were the same, while for red soil, the fraction changed from the dominance by large aggregates (>8, 8~5 and 5~2 mm) to middle sizes (5~2 and 2~1 mm). Red soil was the most easily destroyed soil, terra fusca was the second, and rendzina was the third, according to the mechanical classification. This implies that the mechanical stability of karst soil aggregates was better than that of red soil, and soil aggregate classification for the karst soils was directly affected by sieving strength. From the point of view of soil aggregates, the stability of the karst soils was stronger.

Keywords: karst; different sieving strength; mechanical sieving; mean weight diameter

土壤团聚体大小和含量是土壤重要的物理性质, 是土壤质量高低、抗侵蚀能力强弱的主要指标^[1-3]。土壤结构性是土壤的重要物理性质, 它直接影响着土壤的肥力和农作物的生长^[4]。影响土壤团聚体稳定

性的因素包括内因和外因两个方面^[5], 内因主要包括电解质、黏土矿物、碳酸盐、有机质、铁铝氧化物等; 外因主要包括气候、生物、农业管理等。一般从土壤团聚体稳定性多采用干筛或湿筛方法从土壤基本理化

收稿日期: 2012-12-11

修回日期: 2013-07-03

资助项目: 中国科学院战略性先导科技专项“喀斯特峰丛洼地替代型草食畜牧业模式增值增汇试验示范”(XDA05070403); 国家科技支撑计划项目(2012BAD05B03-6); 国家基金面上项目(41171246); 广西自然科学基金项目(2013GXNSFBA019080)

作者简介: 胡乐宁(1980—), 女(汉族), 河北省保定市人, 博士研究生, 研究方向为土壤生态学。E-mail: hulening@126.com。

通信作者: 苏以荣(1964—), 男(汉族), 湖北省荆州市人, 硕士, 研究员, 主要从事土壤生态学研究。E-mail: yrsu@isa.ac.cn。

性质等角度开展研究^[6-9]。而以往试验研究中土壤干筛振动强度多为1.5 mm振幅,通过改变常规振幅来探讨土壤团聚体稳定性的筛分试验还没有相关研究。广西壮族自治区环江地区是石漠化十分严重的地区,水土流失与土地退化已成为制约这一区域农业发展的主要因素。本文拟通过研究环江地区9个不同有机碳含量的3种土壤(棕色石灰土、黑色石灰土、红壤)样品在干筛改变振幅条件下的干筛分级特征,分析振动筛分对土壤团聚体结构的影响,并进一步探讨3种在改变外力破坏强度下的土壤团聚体结构稳定性,了解土壤团聚体对不同外力破坏的响应。这将为喀斯特地区土壤资源的合理利用及结构的调控管理提供可靠依据。

1 材料与方法

1.1 研究概况

研究区位于云贵高原南部边缘斜坡地带的典型喀斯特峰丛洼地——广西壮族自治区环江毛南族自治县,地理坐标为107°51′—108°43′E,24°44′—25°33′N,岩溶峰丛洼地的最高峰为1 028.0 m,属亚热带季风气候区。年平均气温15.7℃,1月平均气温10.1℃,7月平均气温28℃,历年最低气温-5.2℃,无霜期290 d,年平均日照时数1 451 h,年平均降雨量为1 389.1 mm,4—9月降雨量占全年降雨量的70%,平均蒸发量为1 571.1 mm,相对湿度平均为70%。供试土壤自然概况和基本理化性质见表1—2。

表1 供试土壤自然概况

土壤类型	母质	来源	植被类型	海拔/m	地理位置
棕色石灰土	白云岩和石灰岩	环江木论	灌丛林地	442	25°09′876″N 108°03′047″E
黑色石灰土	白云岩和石灰岩	环江明伦	灌丛林地	727	25°16′253″N 108°22′522″E
红壤	第四纪红土	环江肯福	灌丛林地	220	24°51′914″N 108°15′991″E

表2 土壤基本理化性质

土壤类型	pH值	CEC/ (mmol·kg ⁻¹)	有机碳/ (g·kg ⁻¹)	矿质全量/(g·kg ⁻¹)			MBC/ (mg·kg ⁻¹)
				Ca	Fe	Mn	
棕色石灰土	6.25	184.74	26.08	7.10	44.10	1.50	64.86
黑色石灰土	7.09	341.18	57.92	17.60	58.60	2.10	151.97
红壤	4.06	105.30	14.54	0.20	24.10	0.10	30.89

注:CEC表示阳离子交换指数;MBC表示微生物生物量碳。

1.2 试验方法

试验使用AS 200筛分仪,分别对棕色石灰土、黑色石灰土、红壤3种土壤类型进行1.5,2和2.5 mm不同振幅(偏离震动中心的距离)的干筛筛分(相同频率下),每种土壤选取3个不同有机碳含量梯度。每个土壤样品取4个重复,分析方法选用干筛法。选取的9个土壤样品的有机碳含量如表3所示。

表3 样品有机碳含量

土壤编号	土壤类型	SOC含量/(g·kg ⁻¹)
1	棕色石灰土	34.47
2		55.66
3		91.96
4		90.64
5	黑色石灰土	114.19
6		146.86
7	红壤	13.02
8		19.14
9		26.23

(1) 木论、明伦、肯福各地分别取3个代表样(为3个有机碳梯度),共9个样品分别进行>8,8~5,5~2,2~1,1~0.5,0.5~0.25和<0.25 mm干筛。

治县,地理坐标为107°51′—108°43′E,24°44′—25°33′N,岩溶峰丛洼地的最高峰为1 028.0 m,属亚热带季风气候区。年平均气温15.7℃,1月平均气温10.1℃,7月平均气温28℃,历年最低气温-5.2℃,无霜期290 d,年平均日照时数1 451 h,年平均降雨量为1 389.1 mm,4—9月降雨量占全年降雨量的70%,平均蒸发量为1 571.1 mm,相对湿度平均为70%。供试土壤自然概况和基本理化性质见表1—2。

(2) 改变筛分的机械强度,在原干筛筛分强度(1.5 mm振幅)基础上增加2个筛分强度梯度(2和2.5 mm振幅),分别测定不同粒级下颗粒质量。

(3) 干筛分析方法。将风干的土样混匀,取其中一部分(一般不小于1 kg,精确至0.01 g)。用孔径分别为8,5,2,1,0.5和0.25 mm筛子进行筛分(筛子附有底和盖)。筛完后,将各级筛子上的团聚体及粒径<0.25 mm的土粒分别称量(精确至0.01 g),计算干筛的各级团聚体占土样总量的百分含量。

1.3 参数计算

非水稳性大团聚体的质量百分数按(1)式计算:

$$w_i = m_i / m \times 100\% \quad (1)$$

式中: w_i ——某级非水稳性大团聚体的质量百分数(%); m_i ——该级非水稳性大团聚体的风干质量(g); m ——风干土的质量(g)。

平均重量直径^[10](MWD):

$$MWD = \sum_{i=1}^{n+1} \frac{r_{i-1} + r_i}{2} \times m_i \quad (2)$$

式中: m_i ——各级颗粒的重量百分含量; r_i ——第*i*个筛子的孔径大小(mm, $r_0 = r_1, r_n = r_{n+1}$)。

1.4 数据分析

测定数据采用 Excel 2003 和 SPSS 16.0 进行整理和统计分析,多重比较采用 LSD 法。

2 研究结果

2.1 土壤团聚体的机械稳定性

1.5 mm 振幅筛分强度下的土壤团聚体分级结果显示(表 4):石灰土(棕色石灰土、黑色石灰土)的 MWD(平均重量直径)均大于红壤。相似 SOC 含量条件下,棕色石灰土(6.14)>红壤(3.70),棕色石灰土(7.75)>黑色石灰土(6.10),且两种石灰土 MWD 值较相近。在同种土壤类型中,MWD 并没有随有机

碳含量不同而呈现特定的变化规律。

棕色石灰土和黑色石灰土 3 个土壤样品各自的团聚体颗粒含量最多的 3 个粒径范围均为:>8,8~5 和 5~2 mm。各自的团聚体颗粒含量最少的粒径范围是:1,2,6 号:0.5~0.25 mm;3,4,5 号:<0.25 mm。

红壤中 3 个土壤样品 MWD 随 SOC 含量增加逐渐增加。各自的团聚体颗粒含量最多的 3 个粒径范围是:7 号:>8,5~2 和<0.25 mm;8 号:>8,0.5~0.25 和<0.25 mm;9 号:>8,5~2,<0.25 mm。各自的团聚体颗粒含量最少的粒径范围是,7 号:2~1 mm;8 号:8~5 mm;9 号:0.5~0.25 mm。

表 4 1.5 mm 振幅筛分强度下土壤团聚体分级及其平均重量直径

土壤编号	土壤类型	团聚体含量/%							MWD/mm
		>8 mm	8~5 mm	5~2 mm	2~1 mm	1~0.5 mm	0.5~0.25 mm	<0.25 mm	
1	棕色石灰土	33.75	21.85	26.53	9.14	3.94	1.87	2.93	6.14d
2		27.41	22.75	31.32	9.71	4.19	1.99	2.62	5.33a
3		45.90	20.43	20.95	6.05	3.19	1.76	1.72	7.75e
4	黑色石灰土	33.79	21.57	23.09	9.04	5.91	3.52	3.08	6.10d
5		25.23	25.59	27.44	8.86	5.81	3.66	3.41	5.06a
6		18.53	28.91	32.99	8.80	4.93	2.66	3.19	4.28c
7	红壤	31.16	9.68	12.08	5.85	6.98	10.97	23.27	5.14a
8		12.09	3.74	6.48	5.36	9.24	25.69	37.39	2.12b
9		19.40	11.83	21.32	12.59	10.71	8.75	15.41	3.70c

注:字母表示多重比较(PLSD)结果,同一列中字母不同表示达到 $p<0.05$ 显著差异。下同。

2 mm 振幅筛分强度下的土壤团聚体分级结果显示(表 5):石灰土(棕色石灰土、黑色石灰土)的 MWD 均大于红壤。相似 SOC 含量条件下,棕色石灰土(6.64)>红壤(3.52),棕色石灰土(6.05)>黑色石灰土(5.19),且两种石灰土 MWD 较相近。在同种土壤类型中,MWD 并没有根据有机碳含量不同而呈现特定的变化规律。

棕色石灰土和黑色石灰土 3 个土壤样品各自的团聚体颗粒含量最多的 3 个粒径范围均为:>8,8~5

和 5~2 mm。各自的团聚体颗粒含量最少的粒径范围是:1,2,3,6 号:0.5~0.25 mm;4 号:<0.25 mm;5 号:0.5~0.25 和<0.25 mm。红壤中 3 个土壤样品随 SOC 含量逐渐增加,各自的团聚体颗粒含量最多的 3 个粒径范围是:7 号:>8,0.5~0.25 和<0.25 mm;8 号:1~0.5,0.5~0.25 和<0.25 mm;9 号:>8,5~2 和<0.25 mm。各自的团聚体颗粒含量最少的粒径范围是,7 号:2~1 mm;8 号:8~5 mm;9 号:8~5 mm。

表 5 2 mm 振幅筛分强度下土壤团聚体分级及其平均重量直径

土壤编号	土壤类型	团聚体含量/%							MWD/mm
		>8 mm	8~5 mm	5~2 mm	2~1 mm	1~0.5 mm	0.5~0.25 mm	<0.25 mm	
1	棕色石灰土	38.05	19.17	24.54	8.73	3.87	1.93	3.71	6.64d
2		19.53	19.11	35.22	13.82	6.00	2.68	3.63	4.16a
3		32.31	25.02	27.55	7.11	3.59	2.13	2.30	6.05d
4	黑色石灰土	27.54	20.00	24.92	11.01	7.79	4.64	4.10	5.19a
5		26.35	25.56	27.09	8.79	5.44	3.38	3.38	5.22a
6		22.58	28.74	29.23	8.48	4.76	2.85	3.36	4.81a
7	红壤	28.86	7.49	9.76	5.09	7.06	12.32	29.42	4.69a
8		9.98	2.76	5.38	4.54	10.07	29.27	38.00	1.77b
9		19.06	8.96	18.29	12.98	12.03	9.82	18.86	3.52c

2.5 mm 振幅筛分强度下的土壤团聚体分级结果显示(表 6):石灰土(棕色石灰土、黑色石灰土)的 MWD

均大于红壤。相似 SOC 含量条件下,棕色石灰土(6.54)>红壤(3.00),棕色石灰土(7.54)>黑色石灰土

(5.86),且两种石灰土 MWD 较相近。在同种土壤类型中,MWD 并没有根据有机碳含量不同而呈现特定的变化规律。棕色石灰土和黑色石灰土 3 个土壤样品各自的团聚体颗粒含量最多的 3 个粒径范围均为: $>8, 5 \sim 2$ mm。各自的团聚体颗粒含量最少的粒径范围是:1 号,2 号,3 号,4 号,6 号: $0.5 \sim 0.25$ mm;5 号: 0.5

~ 0.25 和 <0.25 mm。红壤中 3 个土壤样品随 SOC 含量逐渐增加,各自的团聚体颗粒含量最多的 3 个粒径范围是,7 号: $>8, 0.5 \sim 0.25$ 和 <0.25 mm;8 号: $1 \sim 0.5, 0.5 \sim 0.25$ 和 <0.25 mm;9 号: $>8, 5 \sim 2$ 和 <0.25 mm。各自的团聚体颗粒含量最少的粒径范围是,7 号: $2 \sim 1$ mm;8 号: $8 \sim 5$ mm;9 号: $8 \sim 5$ mm。

表 6 2.5 mm 振幅筛分强度下土壤团聚体分级及其平均重量直径

土壤编号	土壤类型	团聚体含量/%							MWD/mm
		>8 mm	$8 \sim 5$ mm	$5 \sim 2$ mm	$2 \sim 1$ mm	$1 \sim 0.5$ mm	$0.5 \sim 0.25$ mm	<0.25 mm	
1	棕色石灰土	37.32	19.15	24.74	8.67	4.04	2.08	3.99	6.54d
2		15.52	18.25	36.89	14.44	6.82	3.28	4.79	3.58c
3		44.32	21.13	21.20	5.71	3.25	2.04	2.35	7.54e
4		31.97	21.84	24.06	9.12	5.84	3.57	3.61	5.86d
5	黑色石灰土	23.47	25.81	27.74	8.98	6.07	3.99	3.94	4.82a
6		20.68	30.44	29.89	8.46	4.70	2.65	3.17	4.60a
7	红壤	28.25	8.65	10.56	5.56	7.44	11.58	27.97	4.66a
8		6.00	2.20	5.27	5.09	14.41	29.62	37.40	1.19b
9		15.53	8.71	19.09	11.93	11.40	10.50	22.83	3.00c

2.2 土壤团聚体分级随筛分强度的变化

土壤经过 1.5,2 和,2.5 mm 振幅下的筛分试验,不同粒径范围增加或减少的颗粒百分含量(颗粒百分含量差分别指 $1.5 \sim 2, 2 \sim 2.5, 1.5 \sim 2.5$ mm 筛分粒径的含量差,图 1—3)显示,对不同 SOC 含量的土壤样品来说,增加振动强度后造成大团聚体减少最多的为 7 号样品,其次是 8 号样品,最后是 9 号样品,这说明 SOC 含量越高的红壤团聚体,越难被强烈的外力

破坏;但棕色石灰土中 SOC 含量最高的 3 号土,在外力增加后,颗粒被破坏最多。红壤中筛分粒径大的颗粒破坏较多,棕色石灰土和黑色石灰土中 1,2,4,5 号样品则是筛分粒径小的颗粒被破坏较多。在相似的 SOC 条件下,外力对土壤颗粒的破坏程度为:棕色石灰土 $>$ 红壤 $>$ 黑色石灰土,3 种土壤团聚体抵抗外力的能力表现为黑色石灰土强于红壤强于棕色石灰土。

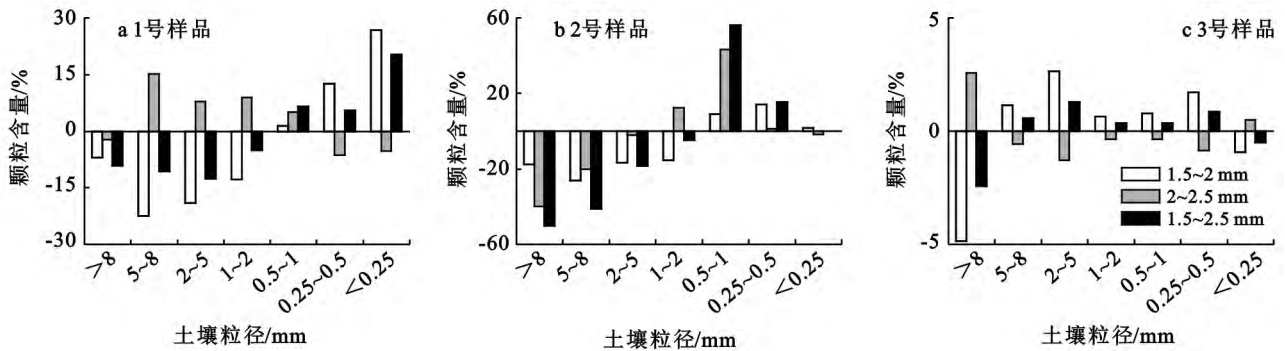


图 1 棕色石灰土中不同振幅筛分强度下产生的各个粒径的土壤颗粒含量差

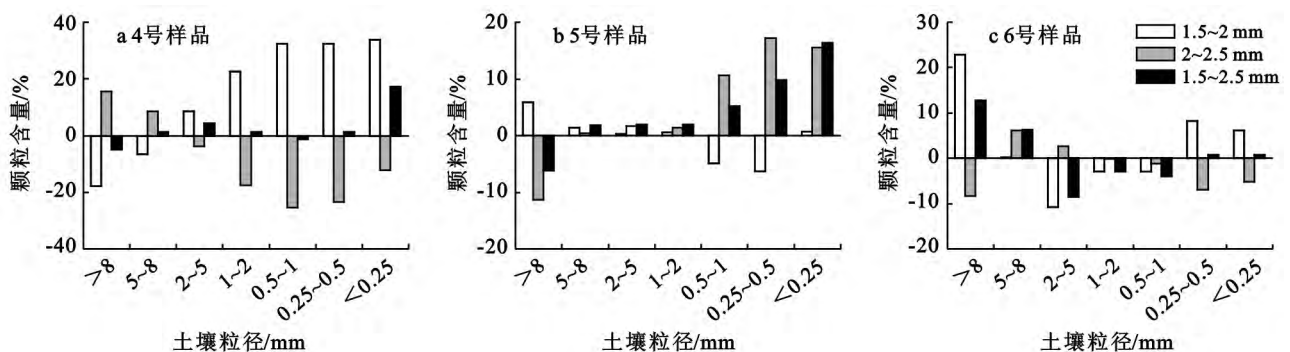


图 2 黑色石灰土中不同振幅筛分强度下产生的各个粒径的土壤颗粒含量差

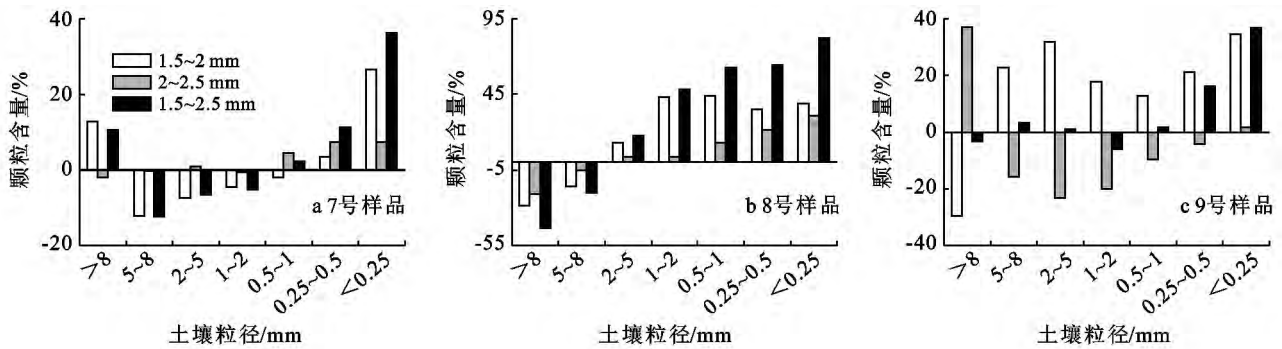


图 3 红壤中不同振幅筛分强度下产生的各个粒径的土壤颗粒含量差

3 讨论

3.1 不同喀斯特土壤团聚体稳定性

在 1.5, 2 和 2.5 mm 振幅筛分强度的不同外力作用下, MWD 值均有: 石灰土 > 红壤的结果, 并且 MWD 值越大, 表示土壤团聚体结构稳定性越强^[11], 可以得出石灰土的团聚体稳定性强于红壤, 且不受筛分强度变化的影响。在相似 SOC 条件下, MWD 值均有: 棕色石灰土 > 红壤, 棕色石灰土 > 黑色石灰土。这说明在排除土壤不同 SOC 含量的影响后, 棕色石灰土较黑色石灰土团聚体稳定, 红壤团聚体稳定性最差。纯石灰岩乔木林下土壤团聚性好, 是由于腐殖质含量较多^[12]。虽然土壤 SOC 含量相同, 团聚体稳定性却不同。在不同振幅筛分强度下, 棕色石灰土和黑色石灰土团聚体最大值均出现在大团聚体粒径中 (>8 mm), 最小值均出现在小团聚体粒径中 (<0.25 mm)。团聚体对土壤的抗蚀能力起重要的作用, 大团聚体土壤的抗蚀能力大于小团聚体土壤^[13]。已有研究表明, 土壤团聚体的形成与有机碳密切相关^[14], 而 MBC 与有机碳呈显著正相关^[15]; 土壤微生物在团聚体的形成过程和稳定机制中有重要作用^[16]。团聚体形成作用机制被认为是土壤碳固定的最重要机制^[17], 所以从团聚体聚合角度来看, 喀斯特石灰土有利于 SOC 的固定。

3.2 不同筛分强度团聚体分级特征

喀斯特地区土壤随外力作用强度的增大, 对土壤颗粒的破坏性显示(图 1—3), 在红壤中, SOC 含量越大土壤结构越稳定, 在棕色石灰土和黑色石灰土中, 不随 SOC 的变化呈现明显的相关性。这些结果说明红壤团聚体由于 SOC 含量的不同, 易受外界物理破坏强度的影响; 而喀斯特石灰土却不易受外界物理破坏强度变化的影响, 这可能与 SOC 存在形式和结构有关^[18]。有机质是团聚土壤颗粒的重要胶结物质。它对团聚体稳定性的影响主要表现在两方面: (1) 有机质通过有机聚合物对矿质土粒的连接和植物根系

与菌丝对土粒的缠绕, 增加了团聚体间的连接强度; (2) 有机质增加了团聚体的疏水性, 减慢了其湿润的速度, 因而降低了土粒中闭塞空气对团聚体的破坏^[19-20]。

喀斯特地区土壤团聚体随外力破坏强度的增大, 棕色石灰土和黑色石灰土颗粒粒径分布变化不大, 显示出良好的稳定性; 红壤经振动强度增大变化后, 颗粒粒径由最初的均匀分布, 变为大颗粒与小颗粒分布较多, 这证实土壤中大团聚体 (>8, 8~5 和 5~2 mm) 较中颗粒团聚体 (2~1 和 1~0.5 mm) 稳定, 中颗粒团聚体结构不稳定, 易受增强的筛分力破坏。土壤的固碳功能伴随着土壤团聚体的形成、稳定及更新周转过程的始终^[21]。

4 结论

对于喀斯特地区土壤团聚体, 随着筛分强度的增大, 棕色石灰土和黑色石灰土颗粒粒径分布变化不大, 主要以大团聚体颗粒 (>8, 8~5 和 5~2 mm) 为主, 显示出良好的稳定性。喀斯特典型土壤(棕色石灰土、黑色石灰土)结构稳定性较地带性红壤较强, 为喀斯特地区水土流失治理提供了可靠依据。喀斯特石灰性土壤结构有利于土壤的肥力保持和农作物的生长。干筛团聚体组成以大粒径为主, 小粒级干筛团聚体含量少, 土壤较大团聚体含量多, 说明团聚性好。

[参 考 文 献]

- [1] 张华, 张甘霖. 土壤质量及其评价方法[J]. 土壤, 2001, 3(6): 326-330.
- [2] 张兴昌, 邵明安. 水蚀作用下土壤氮与有机质流失[J]. 应用生态学报, 2000, 11(2): 231-234.
- [3] 郑昭佩, 刘作新. 土壤质量及其评价[J]. 应用生态学报, 2003, 14(1): 131-134.
- [4] 卢金伟, 李占斌. 土壤团聚体研究进展[J]. 水土保持研究, 2002, 9(1): 81-85.
- [5] 刘冬. 不同侵蚀度红壤团聚体中黏粒矿物分布特征及其对团聚体稳定性的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2007.

- [6] 郭菊花, 陈小云, 刘满强, 等. 不同施肥处理对红壤性水稻土团聚体的分布及有机碳、氮含量的影响[J]. 土壤, 2007, 39(5): 787-793.
- [7] 向艳文, 郑圣先, 廖育林, 等. 长期施肥对红壤水稻土水稳定性团聚体有机碳、氮分布与储量的影响[J]. 中国农业科学, 2009, 42(7): 2415-2424.
- [8] 董长勋, 李恋青, 王芳, 等. 水稻土微团聚体吸附磷后对 Cu^{2+} 吸附与解吸的影响[J]. 南京农业大学学报, 2006, 9(4): 75-79.
- [9] 魏朝富, 高明, 谢德体. 有机肥对紫色水稻土水稳定性团聚体的影响[J]. 土壤通报, 1995, 26(3): 114-116.
- [10] Yoder R. A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion loesses [J]. J. Am. Soc. Agron., 1936, 28(5): 337-351.
- [11] 郑子成, 王永东, 李廷轩, 等. 退耕对土壤团聚体稳定性及有机碳分布的影响[J]. 自然资源学报, 2011, 26(1): 119-127.
- [12] 蒋静, 周运超, 杜光平. 石灰岩发育的乔木林下土壤团聚体形成的影响因素[J]. 中国水土保持, 2011(7): 47-66.
- [13] 李阳兵, 魏朝富, 谢德体, 等. 岩溶山区植被破坏前后土壤团聚体分形特征研究[J]. 土壤通报, 2006, 37(1): 51-56.
- [14] 李阳兵, 谢德体. 不同土地利用方式对岩溶山地土壤团聚体结构的影响[J]. 水土保持学报, 2001, 15(4): 122-125.
- [15] Parffit R L, Yeates G W, Ross D J, et al. Relationships between soil biota, nitrogen and phosphorus availability, and pasture growth under organic and conventional management[J]. Applied Soil Ecology, 2005, 28(1): 1-13.
- [16] 史奕, 陈欣. 土壤团聚体的稳定机制及人类活动的影响[J]. 应用生态学报, 2002, 13(11): 1491-1494.
- [17] Six J, Elliott E T, Paustian K. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: A mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2000, 32(14): 2099-2103.
- [18] 章明奎, 何振立. 利用方式对红壤水稳定性团聚体形成的影响[J]. 土壤学报, 1997, 34(4): 359-366.
- [19] Chenu C, Le Bissonnais Y, Arrouays D. Organic matter influence on clay wettability and soil aggregate stability[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 2000, 64(4): 1479-1486.
- [20] Caron J, Espindola C R, Angers D A. Soil structural stability during rapid wetting: Influence of land use on some aggregate properties[J]. Soil. Sci. Soc. Am. J., 1996, 60(3): 901-908.
- [21] 陈晓梁, 梁爱珍, 张晓平. 土壤团聚体固碳的研究方法[J]. 应用生态学报, 2012, 23(7): 1999-2006.
- [22] 马东豪, 王全九, 来剑斌. 膜下滴灌条件下灌水水质和流量对土壤盐分分布影响的田间试验研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(3): 42-46.
- [23] 刘建军, 王全九, 张明, 等. 膜下滴灌土壤盐分年季变化特征研究[J]. 中国农村水利水电, 2012(11): 48-52.
- [24] 王雅琴, 刘洪光, 朱拥军. 重盐碱地膜下滴灌土壤盐分运移规律研究[J]. 灌溉排水学报, 2010, 29(3): 58-60.
- [25] 杜社妮, 于健, 耿桂俊, 等. 定植孔密封方式对土壤水热盐及番茄苗存活率的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(12): 110-116.
- [26] 白岗栓, 杜社妮, 于健, 等. 激光平地改善土壤水盐分布并提高春小麦产量[J]. 农业工程学报, 2013, 29(8): 125-134.
- [27] 陈炳东, 黄高宝, 陈玉梁, 等. 盐胁迫对油葵根系活力和幼苗生长的影响[J]. 中国油料作物学报, 2008, 30(3): 327-330.
- [28] 李毅, 王全九, 王文焰, 等. 覆膜开孔土壤蒸发的水盐分布特征及运移规律研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(2): 187-193.
- [29] 高金芳, 李毅, 陈世平, 等. 覆膜开孔蒸发条件下土体高度对水盐运移的影响[J]. 农业机械学报, 2010, 41(9): 50-55.

(上接第18页)

- [12] 杨青华, 韩锦峰, 贺德先. 液体地膜覆盖对棉田土壤微生物和酶活性的影响[J]. 生态学报, 2005, 25(6): 1312-1317.
- [13] 闫志利, 吴兵, 党占海, 等. 农田旧膜再利用方式对胡麻生理指标及产量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(2): 197-202.
- [14] 吴兵, 高玉红, 赵利, 等. 旧膜再利用方式对旱地胡麻干物质生产及水分利用效率的影响[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(11): 1457-463.
- [15] 闫雅非, 刘景辉, 史建国, 等. 不同旧膜再利用方式对向日葵产量及水分利用效率的影响[J]. 华北农学报, 2012, 27(6): 219-2233.
- [16] 史建国, 刘景辉, 闫雅非, 等. 旧膜再利用对土壤温度及向日葵生育进程和产量的影响[J]. 作物杂志, 2012(1): 130-134.
- [17] 李毅, 邵明安, 王文焰, 等. 不同灌水定额条件下的覆膜开孔蒸发实验研究[J]. 水科学进展, 2004, 15(3): 357-363.
- [18] 王全九, 王文焰, 吕殿青, 等. 膜下滴灌盐碱地水盐运移性研究[J]. 农业工程学报, 2000, 16(7): 54-57.
- [19] 谭军利, 康跃虎, 焦艳平, 等. 不同种植年限覆膜滴灌盐碱地土壤盐分离子分布特征[J]. 农业工程学报, 2008,