湘东地区典型土壤团聚体稳定性的影响因素

谷忠元，康 黎，罗梦娟，刘玲玲，尹力初
（湖南农业大学 资源环境学院，湖南 长沙 410128）

摘 要：[目的] 揭示湘东地区土壤团聚体的分布规律及其影响稳定性因素，为研究南方土壤团聚体胶结机制提供一定的理论依据。[方法] 在湘东地区选择 3 种常见成土母质（第四纪红土、花岗岩风化物、板岩风化物）上发育的典型自然林地、水田与旱地，采集表层土壤（0—20 cm）与底层土壤（40—60 cm），利用湿筛法测定土壤水稳性团聚体组成。[结果] 土地利用方式、母质类型及土层部位显著影响土壤团聚体的组成及稳定性，且它们的交互作用也非常明显。不同利用方式下土壤团聚体稳定性总体表现为：水田＞林地＞旱地；但利用方式对团聚体稳定性的影响仅局限于表层土壤，同时在花岗岩风化物发育质地较砂的土壤上表现不明显。不同母质间土壤团聚体稳定性呈现出如下规律：第四纪红土＞板岩风化物＞花岗岩风化物，但表层土壤或旱地、林地利用下该规律不甚明显。同时，表层土壤团聚体稳定性一般要显著高于底层土壤，但对于第四纪红土发育质地较为黏重的土壤或水田利用方式下并非如此。[结论] 成土母质、利用方式、土层部位通过对土壤质地、有机质、氧化物等的影响间接影响着湘东地区土壤团聚体的分布。

关键词：团聚体；利用方式；成土母质；土层部位；亚热带；湘东地区
文献标识码：A **文章编号**：1000-288X(2018)05-0058-06 **中图分类号**：S156.6

文献参数：谷忠元，康黎，罗梦娟，等. 湘东地区典型土壤团聚体稳定性的影响因素[J]. 水土保持通报，2018，38(5)：58-63. DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2018.05.010. Gu Zhongyuan, Kang Li, Luo Mengjuan, et al. Factors affecting stability of soil aggregate in Eastern Hu'nan Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(5): 58-63.

Factors Affecting Stability of Soil Aggregate in Eastern Hu'nan Province

GU Zhongyuan, KANG Li, LUO Mengjuan, LIU Lingling, YIN Lichu
(*College of Resources and Environment, Hu'nan Agricultural University, Changsha, Hu'nan* 410128, *China*)

Abstract: [Objective] To reveal the distribution pattern of soil aggregates and its influencing factors in the Eastern Hu'nan Province, in order to provide a theoretical basis for the study of soil aggregates cementation mechanism in Southern China. [Methods] Typical natural forest land, dry land and paddy developed on three common soil-forming parent materials (quaternary red clay, weathered granite and shale) were selected in the Eastern Hu'nan Province. Totally, 54 soil samples from surface layer (0—20 cm) and bottom layer (40—60 cm) were collected. The water stable aggregate content of these soils were analyzed by wet sieving method. [Results] Land use pattern, parent material type and soil location significantly affected the composition and stability of soil aggregates, and their interaction was also very obvious. Generally, the soil aggregate stability in paddy was the highest, while that in dry land was the lowest. But the influence of land use patterns on the stability of soil aggregates was limited to the surface soil, and it was not obvious in the soil developed from weathered granite. The soils developed from quaternary red clay had the highest aggregate stability, while

收稿日期：2018-04-18 **修回日期**：2018-05-24
资助项目：国家自然科学基金项目“长期培肥后水稻土的固碳潜势及其对施肥管理改变的响应”(41371250)
第一作者：谷忠元(1992—)，男(白族)，湖南省张家界市人，硕士研究生，从事土壤改良方面的研究。E-mail：905998270@qq.com。
通讯作者：尹力初(1973—)，男(白族)，湖南省张家界市人，博士，教授，硕士生导师，主要从事土壤肥力和土壤改良研究。E-mail：3082850569@qq.com。

the soils developed from weathered granite had the lowest aggregate stability, but this pattern was not exist for the soils in surface layer or soils in dry land and forest land. The soil aggregate stability of surface layer was usually higher than that of bottom layer, but there has no significant difference between surface or bottom layer in paddy or clay soils developed from quaternary red clay. [Conclusion] The distribution of soil aggregates in the Eastern Hu'nan Province is influenced indirectly by soil parent material, utilization method and soil layer position through the influence of soil texture, organic matter and oxides.

Keywords: aggregate; land use type; parent material; soil layer; subtropical region; the Eastern Hu'nan Province

团聚体是土壤结构的基本单元,影响着土壤众多的物理、化学、生物性质,由此其组成与稳定性成为衡量土壤质量、土壤肥力高低的重要指标而受到广泛关注[1]。团聚体是土壤基粒通过有机、无机胶结物的作用在三维空间的排列组合。许多研究表明土壤团聚体数量或稳定性均与土壤有机质含量密切正相关[2-3];黏粒在团聚体形成过程中有着不可或缺的作用,细质地土壤相对于粗质地土壤更有利于团聚体的形成与稳定[4]。同时研究者也一致认为热带、亚热带土壤中含量丰富的游离氧化物(尤其是氧化铁)有利于团聚体的胶结,但其胶结作用大小与范围与晶型构造有关[5-6]。而以上影响土壤团聚体形成与稳定的重要内部因素往往受到土地利用方式、成土母质类型或土层部位的支配。由此,本研究拟在湘东地区选择第四纪红土、花岗岩风化物、板岩风化物等 3 种成土母质上发育的典型自然林地、水田与旱地,并分别采集表层土壤与底层土壤,探讨成土母质、利用方式及土层部位对团聚体稳定性的影响并分析其内在原因,以期为该区域土壤结构改善及肥力培育提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　土样采集

供试土壤于 2017 年 2 月采自湖南省宁乡县朱良桥镇(28.38°N,112.64°E)、长沙县金井镇(28.52°N,113.37°E)与春华镇(28.35°N,113.31°E),其成土母质分别为湘东地区较为常见的第四纪红土、花岗岩风化物、板岩风化物。在每成土母质上选取典型的自然林地、旱地与水田,其中林地的树种主要为马尾松(*Pinus massoniana*)与杉树(*Metasequoia glyptostroboides*),旱地种植红薯(*Ipomoea batatas*)已达 20 a 以上,水田种植水稻 50 a 以上。每母质及利用方式下选取 3 块有代表性的地块挖取土壤剖面,分别采集表层土壤(0—20 cm)和底层土壤(40—60 cm),共计挖取 27 个剖面并采样 54 个。每土样重约 2 kg。所采取的土样用硬质 PVC 盒带回实验室风干至土壤塑限(含水量约为 22%～25%)时,将土块沿着自然缝隙仔细掰开,使其全部通过 8 mm 筛,拣去植物残根和砾石,在室温下继续风干,完全风干后通过不同孔径土筛以用于相应理化性质分析。

1.2　试验方法

(1) 土壤团聚体的测定。称取过 8 mm 筛风干土样 500 g,手工依次过 2,0.25,0.053 mm 套筛,称重并记录每级团聚体的重量。按照每级团聚体的重量比例准备 100 g 土壤样品,参照 Elliott 方法用于湿筛[7]。具体操作为:土样置于 2 mm 的筛子上,迅速浸在室温下的去离子水中 10 min,然后上下振动 5 min,振动频率为 25 次/min,振幅为 4 cm(利用自行研制的微型单臂团聚体筛分仪进行筛分),把留在筛上的物质用去离子水冲洗到铝盆中,直至水流清亮;通过筛子的土和水重复此操作,依次通过 0.25,0.053 mm 筛。分离出的各级团聚体转移至铝盒,在 40 ℃下烘干,称重,最终得到粗大团聚体(>2 mm)、细大团聚体(2～0.25 mm)、微团聚体(0.25～0.053 mm)和粉黏粒(<0.053 mm)4 个粒径的水稳定性团聚体。由于砂粒不属于团聚体,且本研究不同母质发育土壤的砂粒含量相差较大,由此所有干、湿筛法所测得的各级团聚体都需进行砂粒校正。即分别称取一定量的微团聚体以上各级团聚体,加入适量的 5 g/L偏磷酸钠(没过土壤 1～2 cm 即可)后震荡 18 h,充分分散后过相应规格土筛,用去离子水冲洗直至留在筛子上全部为砂粒,最后烘干称重,并计算各级团聚体中砂粒含量。

最后通过计算得出各粒径所占比例,并根据各粒径所占比例的大小计算得出水稳性团聚体的平均重量直径(MWD)和团聚体结构破坏率(PAD)。计算公式为:

$$MWD=\sum_{1}^{n}x_i\times m_i$$

式中:x_i——第 i 个筛子上团聚体的平均直径;m_i——第 i 个筛子上颗粒质量百分比。

$$ADR=(C_d-C_w)/C_d\times 100$$

式中：C_d——干筛后＞0.25 mm 团聚体百分含量；C_w——湿筛后＞0.25 mm 团聚体百分含量。

（2）土壤颗粒分析与土壤质地的确定。简易比重计法。

（3）土壤游离态氧化铁的测定。DCB 提取法。

（4）土壤非晶型氧化铁的测定。草酸铵提取法。

（5）土壤全量有机质的测定。重铬酸钾外加热法（鲍士旦，1999）。

1.3 数据整理与统计

用 Excel 2003 进行数据整理；用 SPSS 软件进行方差分析及显著性检验与相关性分析。

2 结果与分析

供试土壤的基本理化性质表明（表1），不同成土母质、利用方式、土层部位下土壤黏粒、游离态氧化铁、有机质含量相差较大，黏粒含量最高者约为最低者的3.4倍，游离态氧化铁约为5.8倍，有机质约为11.9倍，差距非常明显。3种母质发育的土壤黏粒含量为：第四纪红土＞板岩风化物＞花岗岩风化物。不同利用方式下，有机质含量为：水田＞林地＞旱地，非晶型态氧化铁含量以水田最高。表层土壤有机质明显高于底层土壤。

表1 供试土壤基本性质

发育母质	利用方式	层次	颗粒组成			土壤质地	游离氧化铁/（g·kg^{-1}）	非晶型氧化铁/（g·kg^{-1}）	全量有机质/（g·kg^{-1}）
			砂粒/%	粉粒/%	黏粒/%				
第四纪红土	旱地	表层	4.5	54.6	41.0	粉砂质黏土	38.3^{de}	3.2^{bc}	16.6^{f}
		底层	2.0	54.0	44.0	粉砂质黏土	40.6^{cd}	3.4^{b}	11.5^{g}
	林地	表层	0.5	48.2	51.3	粉砂质黏土	43.3^{c}	2.1^{de}	28.5^{d}
		底层	0.6	51.3	48.1	粉砂质黏土	43.9^{c}	2.6^{cd}	9.0^{gh}
	水田	表层	2.6	55.6	41.8	粉砂质黏土	37.5^{de}	3.7^{b}	50.1^{a}
		底层	1.5	61.5	37.0	粉砂质黏壤土	40.6^{cd}	1.3^{g}	28.8^{d}
花岗岩风化物	旱地	表层	52.6	26.0	21.4	砂质黏壤土	11.2^{i}	1.8^{efg}	44.7^{b}
		底层	47.9	29.0	23.1	壤 土	31.5^{f}	3.3^{b}	8.9^{gh}
	林地	表层	36.8	29.5	33.7	黏壤土	25.0^{g}	1.3^{g}	45.1^{b}
		底层	35.2	23.3	41.5	黏 土	34.6^{ef}	1.2^{g}	5.2^{h}
	水田	表层	48.2	30.8	21.0	壤 土	17.6^{h}	4.5^{a}	23.2^{e}
		底层	59.8	23.7	16.6	砂质壤土	20.6^{h}	1.8^{efg}	7.6^{gh}
板岩风化物	旱地	表层	18.8	46.2	35.0	粉砂质黏壤土	51.8^{b}	1.6^{efg}	16.8^{f}
		底层	11.3	45.8	42.9	粉砂质黏土	63.2^{a}	1.6^{efg}	8.3^{gh}
	林地	表层	15.5	44.6	39.9	粉砂质黏壤土	51.3^{b}	1.7^{efg}	36.4^{c}
		底层	10.1	44.3	45.6	粉砂质黏土	62.6^{a}	1.5^{fg}	15.8^{f}
	水田	表层	5.6	59.3	35.0	粉砂质黏壤土	40.1^{cd}	3.2^{bc}	29.5^{d}
		底层	3.2	63.0	33.8	粉砂质黏壤土	50.8^{b}	2.0^{def}	10.9^{g}

注：右边3栏中同列不同小写字母表示处理间差异显著。下同。

2.1 各粒级团聚体分布特征

从水稳性团聚体组成中可以看出（表2），供试土壤团聚体组成以大团聚体（＞0.25 mm）为主，所占比例平均高达66.6%，其中粗大团聚体（＞2 mm）为23.6%，细大团聚体（2～0.25 mm）为43.2%。各粒级中粗大团聚体的变异系数最大（97.2%），说明粗大团聚体是最不稳定、较易受成土母质、利用方式、土层部位影响的粒级。而在所试土壤中，第四纪红土母质发育的水田表层土壤团聚体平均重量直径最大，破坏率最小，稳定性最强；花岗岩风化物发育的旱地底层土壤团聚体平均重量直径最小，破坏率最大，稳定性最弱。

团聚体平均重量直径是评价土壤团聚体水稳性的重要指标之一，也可以反映土壤团聚特征。通过对供试土壤平均重量直径与各级水稳性团聚体含量的相关性分析表明（表3），土壤MWD与＞2 mm水稳性团聚体之间极显著正相关，与0.25～0.053 mm和＜0.053 mm水稳性团聚体之间极显著负相关，与2～0.25 mm水稳性团聚体无相关性。总体来说，土壤MWD与大团聚体之间极显著正相关，与微团聚体间极显著负相关。而各级水稳性团聚体含量与平均重量直径相关性中＞2 mm水稳性团聚体相关系数最大，说明其是影响土壤团聚特征和稳定性的主要因子。

表 2　供试土壤水稳性团聚体组成

母质	利用方式	土层部位	水稳性团聚体组成/%				MWD/mm	PAD/%
			>2 mm	2～0.25 mm	0.25～0.053 mm	<0.053 mm		
第四纪红土	旱地	表层	3.5	67.7	22.4	6.4	0.97±0.04	28.0±4.51
		底层	3.2	66.2	22.4	8.2	0.94±0.07	27.1±8.22
	林地	表层	17.9	69.1	10.9	2.2	1.69±0.21	7.9±2.22
		底层	9.8	64.0	20.0	6.2	1.24±0.12	20.6±0.53
	水田	表层	78.4	16.8	3.1	1.7	4.11±0.03	2.2±0.79
		底层	64.5	24.7	7.8	2.9	3.52±0.51	9.2±2.91
花岗岩风化物	旱地	表层	39.9	51.1	4.9	4.1	2.58±0.13	6.9±2.07
		底层	2.7	22.7	47.1	27.5	0.47±0.02	73.6±0.92
	林地	表层	35.5	49.7	9.3	5.6	2.35±0.24	10.2±2.31
		底层	2.6	40.0	43.9	13.5	0.65±0.11	56.7±7.66
	水田	表层	25.9	37.4	24.5	12.2	1.75±0.46	29.5±10.43
		底层	4.2	23.1	55.8	16.9	0.56±0.10	70.3±5.41
板岩风化物	旱地	表层	12.3	37.1	34.7	15.9	1.09±0.08	49.2±0.56
		底层	6.3	23.0	53.6	17.1	0.66±0.21	69.9±7.66
	林地	表层	37.8	48.8	8.1	5.3	2.46±0.14	7.5±2.07
		底层	36.6	40.6	15.0	7.8	2.31±0.15	18.9±1.55
	水田	表层	38.7	47.0	10.8	3.5	2.48±0.16	12.3±0.73
		底层	1.8	48.5	39.3	10.4	0.70±0.05	47.7±2.98
	平均数		23.4	43.2	24.1	9.3	1.70	30.4
	变异系数		97.2	39.1	71.6	77.7	62.90	79.9

注:MWD 为平均重量直径; PAD 为团聚体破坏率。

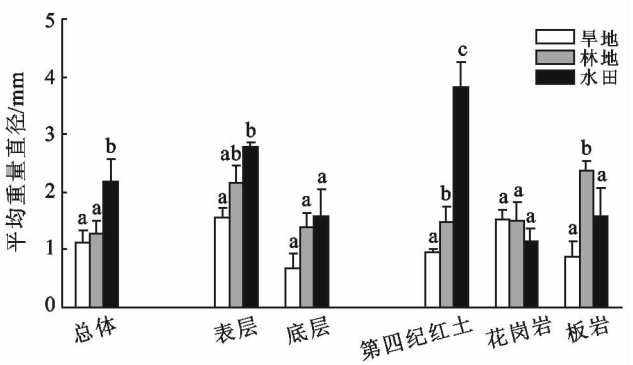
表 3　供试土壤平均重量直径与各级水稳性团聚体含量的相关性

水稳性团聚体粒径	>2 mm	2～0.25 mm	0.25～0.053 mm	<0.053 mm	大团聚体	微团聚体
平均重量直径(MWD)	0.99**	−0.18	−0.84**	−0.72**	0.83**	−0.83**

注:* 差异显著($p<0.05$);* * 差异极显著($p<0.01$)。

2.2　不同利用方式对团聚体稳定性的影响

不同利用方式下土壤团聚体平均重量直径总体为:水田>林地>旱地(图 1),其中水田利用下土壤团聚体稳定性显著高于林地、旱地,但后两者差异并不显著。无论在表层或底层,土壤团聚体稳定性的变化趋势均为:水田>林地>旱地。



注:组内不同小写字母表示利用方式间土壤团聚体稳定性差异显著。下同。

图 1　不同利用方式下土壤团聚体平均重量直径

其中,表层土壤中水田较于旱地差异显著,但两者和林地差异并不显著;而底层土壤中 3 种利用方式间差异不显著。不同利用方式间土壤团聚体稳定性的变化规律受母质的影响。第四纪红土所发育土壤的质地较黏,其团聚体平均重量直径为:水田>林地>旱地,且 3 种利用方式间差异显著;而花岗岩风化物发育的土壤质地较砂,不同利用方式下土壤团聚体稳定性并无显著性差异。

2.3　成土母质对团聚体稳定性的影响

母质影响土壤团聚体的稳定性,且受到利用方式及土层部位的支配(图 2)。总体而言土壤团聚体稳定性为:第四纪红土>板岩风化物>花岗岩风化物,其中第四纪红土和花岗岩风化物间差异显著,前者的平均重量直径较之后者提高了 49.6%。相对于表层土壤,底层土壤团聚体稳定性受母质的影响程度更大。旱地利用下 3 种母质发育土壤的团聚体稳定性没有显著差异;林地利用下板岩风化物发育土壤的团聚体稳定性明显高于花岗岩风化物或第四纪红土所发育土壤。水田利用下土壤团聚体稳定性符合总体变化

规律，即第四纪红土＞板岩风化物＞花岗岩风化物，且不同母质间差异更加明显，其中第四纪红土发育土壤的团聚体平均重量直径相对于花岗岩风化物提高了 229.3%。

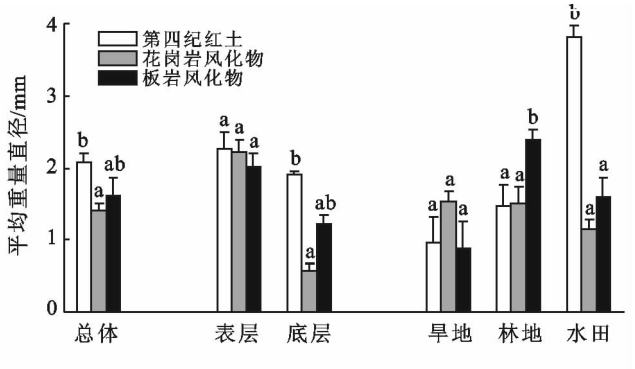
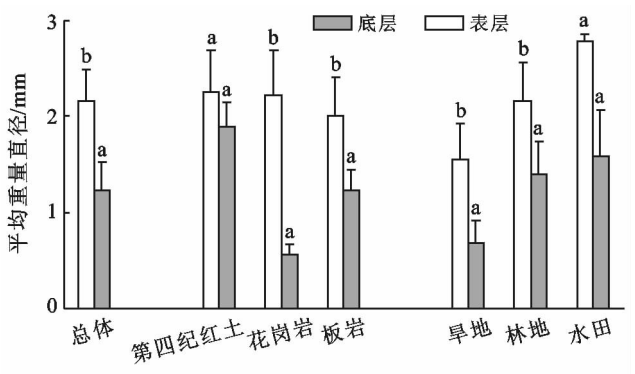


图 2 不同母质下土壤团聚体平均重量直径

2.4 土层部位对团聚体稳定性的影响

土层部位影响土壤团聚体稳定性，且受母质和利用方式的限制(图 3)。总体而言，表层土壤团聚体稳定性显著高于底层土壤。对于质地相对较砂的花岗岩或板岩风化物发育的土壤，土壤层次间团聚体稳定性的差异符合这一规律，其表层土壤的平均重量直径较底层土壤分别提高了 298.3%，64.7%；但对于质地相对较黏的第四纪红土发育的土壤，土层部位间团聚体稳定性差异并不明显。旱地或林地利用下表层土壤团聚体稳定性明显高于底层土壤，而水田利用下不同土壤层次间团聚体稳定性差异并不显著。



注：组内不同小写字母表示土层部位间土壤团聚体稳定性差异显著。

图 3 不同土层部位下土壤团聚体平均重量直径

3 讨 论

土壤质地、有机质与氧化物是决定团聚体稳定性的重要内部因素[8]，而它们直接受到土地利用方式、母质类型及土层部位的影响。由此本研究区域土壤团聚体组成及其稳定性随利用方式、母质类型、土层部位的变化而明显不同(表 2)。同时，与许多研究结果一致[9-11]，本研究发现亚热带土壤的团聚体组分中以大团聚体为主，这可能是由于该地区土壤风化程度高而导致土壤质地较黏、氧化物含量丰富有关(表 1)。此外，有研究者认为土壤团聚体的稳定性随其粒径的增大而降低[7]，因此，本研究各级团聚体中以粗大团聚体(＞2 mm)的变异系数最大，其最易受成土母质、利用方式、土层部位等因素影响。

不同利用方式下土壤水分状况、有机物输入及人为扰动必然存在差异，它们的差异势必影响土壤中有机质、氧化铁的累积与转化，从而影响团聚体的胶结与稳定。水田土壤长期滞水环境限制了微生物的活性而有利于有机质的累积，且频繁的干湿交替也有利于土壤氧化铁的转化[12-13]，尤其是有利于形成胶结能力较强的非晶型态氧化铁(表 1)。它们的共同作用将显著促进大团聚体的形成与稳定。林地条件下有机凋落物相对较多而有利于土壤有机质的累积，而旱地利用下土壤有机物的输入相对较少(表 1)，且长期频繁耕作也将加剧土壤结构的破坏。由此，本研究区域不同利用方式下土壤团聚体稳定性总体为：水田＞林地＞旱地(图 1)。但利用方式对土壤性质的影响可能主要作用于表层土壤，其对底层土壤的影响应相对有限，所以本研究中底层土壤团聚体的稳定性在不同利用方式间并没有显著差异。同时，本研究结果也显示了利用方式对团聚体稳定性的影响受到土壤质地的影响。如第四纪红土发育质地较黏土壤的团聚体平均重量直径在 3 种利用方式间差异显著，而花岗岩风化物发育质地较砂土壤在不同利用方式下并无显著性差异(图 1)。其原因一方面可能为质地较砂土壤中有机质由于分解程度高、累积少而降低了其在不同利用方式下的差异[14]，另一方面可能是氧化铁的胶结作用在粗质地土壤中受到一定的限制[3,15]，从而降低了不同利用方式间因氧化铁形态转化而导致的团聚体稳定性差异。

不同母质发育土壤的质地将存在显著差异，其中第四纪红土发育土壤的质地较黏，花岗岩风化物发育土壤质地较砂，而板岩风化物发育土壤质地居中(表 1)。有研究认为土壤质地愈黏，团聚体稳定性愈强[4]。由此，本研究中土壤团聚体稳定性总体上呈现出：第四纪红土＞板岩风化物＞花岗岩风化物(图 2)。但土壤质地对团聚体稳定性的贡献还应受到有机质、氧化铁及人为扰动等因素的影响。其中，底层土壤中有机质含量相对较低，团聚体稳定性受到土壤质地的影响将会更强，其更易受到成土母质的影响；而表层土壤中有机质的大量累积将削弱土壤质地对团聚体

稳定性的影响,所以不同母质发育的表层土壤团聚体稳定性差异并不显著。同时,旱地土壤上频繁的人为耕作将破坏土壤结构而降低土壤质地对团聚体稳定性的影响;林地土壤中以质地相对居中的板岩风化物稳定性最高,是由于该母质条件下自然植被生长最为茂盛,大量残落物的补充将有利于土壤有机质的充分积累而促进团聚体的胶结。水田利用条件下土壤团聚体的稳定性规律符合总体趋势,即第四纪红土发育质地黏重土壤>花岗岩风化物发育质地较砂土壤,且两者之间的差异更为显著。这可能是由于黏重土壤上更易积累有机质[3],或氧化铁对团聚体胶结的促进作用在细质地土壤上更为突出有关。

通常条件下表层土壤更易接受外源有机物的补充而提高土壤有机质含量(表 1),而许多研究证实土壤有机质与团聚体稳定性显著正相关[16-18]。由此本结果显示表层土壤团聚体稳定性一般要显著高于底层土壤(图 3)。但本研究结果同时也揭示了土壤有机质对团聚体稳定性的贡献可能受到土壤质地或氧化铁类型的影响。如质地黏重的第四纪红土发育表层土壤团聚体稳定性与底层土壤并没有显著差异,其可能是由于质地粘重土壤团聚体胶结过程中氧化铁的重要作用掩盖了有机质的贡献[19]。同时,不同于旱地或林地,水田利用下不同土壤层次间团聚体稳定性差异不显著,可能要归结于该利用方式下频繁的干湿交替有利于氧化铁转化为胶结能力较强的纤铁矿或针铁矿而削弱了有机质的作用,而前两种利用方式下土壤中的氧化铁则主要为胶结能力较差的赤铁矿[20]。

4　结 论

(1) 土地利用方式、母质类型及土层部位将显著影响土壤质地、有机质与氧化物等团聚体内部胶结因素,从而显著影响湘东地区土壤团聚体的组成及稳定性,且它们两者或三者之间的交互作用也非常明显。

(2) 不同土地利用方式下有机物输入、水分状况及人为扰动的差异势必影响土壤有机质、氧化铁的转化与团聚体的胶结。团聚体稳定性总体表现为:水田>林地>旱地。但利用方式对团聚体稳定性的影响仅局限于表层土壤,其对底层土壤的影响相对有限;同时,利用方式对团聚体稳定性的影响在第四纪红土发育质地较黏土壤上表现得较为突出,而在花岗岩风化物发育质地较砂土壤上则没有明显效果。

(3) 不同母质发育土壤质地状况各异。该区域土壤团聚体稳定性总体上呈现出第四纪红土>板岩风化物>花岗岩风化物,即质地愈黏,团聚体稳定性愈强。相对于底层土壤,表层土壤中有机质的大量累积将削弱土壤质地对团聚体稳定性的影响。同时,旱地土壤上频繁的人为耕作对土壤结构的破坏或林地条件下土壤有机质的累积也将降低土壤质地对团聚体稳定性的影响;而水田利用方式将明显强化土壤质地对团聚体稳定性的影响。

(4) 表层土壤更易接受外源有机物的补充以提高有机质含量,从而其团聚体稳定性一般要显著高于底层土壤。但这一规律在第四纪红土发育质地较为黏重的土壤上或水田利用方式下表现得不甚明显。

[参 考 文 献]

[1] 张斌,许玉芝,李娜,等. 土壤团聚结构变化的关键控制过程研究进展[J]. 土壤与作物,2014,3(2):41-49.

[2] 魏朝富,高明,谢德林,等. 有机肥对紫色水稻土水稳性团聚体的影响[J]. 土壤通报,1995,6(3):114-116.

[3] 章明奎,何振立,陈国潮. 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.

[4] Wang Junguang, Yang Wei, Yu Bing, et al. Estimating the influence of related soil properties on macro-and micro-aggregate stability in ultisols of South-central China[J]. Catena, 2016,137(2):545-553.

[5] Peng Xinhua, Yan Xiaoyuan, Zhou Hu, et al. Assessing the contributions of sesquioxides and soil organic matter to aggregation in an Ultisol under long-term fertilization [J]. Soil & Tillage Research, 2014,146(5):89-98.

[6] Wu Xinliang, Cai Chong, Wang Junguang, et al. Spatial variations of aggregate stability in relation to sesquioxides for zonal soils, South-central China[J]. Soil & Tillage Research, 2016,157(4):11-22.

[7] Elliott. E. T. Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1986,50(3), 627-633.

[8] Le Bissonnais Y. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility (I): Theory and methodology. European Journal of Soil Science, 2016,47(4): 425-437.

[9] 刘晓利,何园球,李成亮,等. 不同利用方式和肥力红壤中水稳性团聚体分布及物理性质特征[J]. 土壤学报,2008,45(3):459-465.

[10] 陈山,杨峰,林杉,等. 土地利用方式对红壤团聚体稳定性的影响[J]. 水土保持学报,2012,26(5):211-216.

[11] 陈晓芬,李忠佩,刘明,等. 不同施肥处理对红壤水稻土团聚体有机碳、氮分布和微生物生物量的影响[J]. 中国农业科学,2013,46(5):950-960.

[12] 魏世勇,刘茜,刘凡,等. Fe(Ⅱ)存在条件下氧化铁—高岭石复合物的形成与转化[J]. 土壤学报,2010,47(6): 1134-1143.

(下转第 69 页)

冬小麦幼苗叶绿素荧光参数的影响[J]. 西北植物学报,2004,24(5):812-816.

[12] 刘红梅,新跃,李先喆,等. 基于叶绿素荧光参数的籼型杂交稻杂种优势分析[J]. 植物生理学报,2014,50(6):855-860.

[13] 施征,史胜青,张志翔,等. 干旱与高盐对梭梭叶绿素荧光特性的影响[J]. 北京林业大学学报,2012,34(3):20-25.

[14] Krause G H, Weis E. Chlorophyll fluorescence and photosynthesis: The basics[J]. Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology, 1991, 42(42):313-349.

[15] 赵丽丽,吴佳海,王普昶,等. 高羊茅种质光合及叶绿素荧光参数对高温胁迫的响应[J]. 草地学报,2015,23(4):811-817.

[16] 张力思,王洁,艾呈祥,等. 外源 NO 对干旱胁迫下君迁子幼苗光合作用的影响[J]. 江苏农业学报,2014,30(3):623-628.

[17] 尹婷,郑绍鑫,王艺锦,等. 植物生长调节剂 GGR_6 对无忧花幼苗生长特性的影响[J]. 北方园艺,2015(6):76-79.

[18] 游鸯. 多效唑对藤本月季光合特性及叶片显微结构的影响[D]. 合肥:安徽农业大学,2014.

[19] 李曼清. 三种植物生长物质(GGR,IAA,PP333)对黄花风铃木幼苗生长及生理特性影响[D]. 南宁:广西大学,2015.

[20] 王猛. 复配土环境下 PP_(333)对杨柴光合及生理特性的影响[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2016.

[21] 董倩,王洁,庞曼,等. 生长调节剂对黄连木光合生理指标和荧光参数的影响[J]. 西北植物学报,2012,32(3):484-490.

[22] 李源,何丙辉,毛文韬,等. 多效唑对太阳扇叶片叶绿素含量及其荧光参数的影响[J]. 河南农业科学,2015,44(11):97-103.

[23] 于永畅,张林,王厚新,等. ABA 和 PP_(333)对国兰低温胁迫及恢复中光合作用和叶绿素荧光参数的影响[J]. 农学学报,2014,4(4):30-37.

[24] 赵丽英,邓西平,山仑. 不同水分处理下冬小麦旗叶叶绿素荧光参数的变化研究[J]. 中国生态农业学报,2007,15(1):63-66.

[25] 刘志梅,蒋文伟,杨广远,等. 干旱胁迫对 3 种金银花叶绿素荧光参数的影响[J]. 浙江农林大学学报,2012,29(4):533-539.

(上接第 63 页)

[13] Yan Xiaoyuan, Zhou Hu, Zhu Qinghe, et al. Carbon sequestration ef ciency in paddy soil and upland soil under long-term fertilization in southern China[J]. Soil & Tillage Research,2013,130(6):42-51.

[14] 王艳玲,王燕,李凌宇,等. 成土母质与利用方式双重影响下红壤团聚体的组成特征与稳定性研究[J]. 土壤通报,2013,44(4):776-785.

[15] 石芸,杨宪龙,张庆印,等. 黄土高原不同土壤质地农田土壤碳、氮、磷及团聚体分布特征[J]. 应用生态学报,2017,28(5):1626-1632.

[16] 刘哲,孙增慧,吕贻忠. 长期不同施肥方式对华北地区温室和农田土壤团聚体形成特征的影响[J]. 中国生态农业学报, 2017,25(8):1119-1128.

[17] 王清奎,汪思龙. 土壤团聚体形成与稳定机制及影响因素[J]. 土壤通报,2005,36(3):415-421.

[18] 张艺,戴齐,尹力初,等. 增施或减施有机物料对长期培肥红壤性水稻土团聚体组成的影响[J]. 中国土壤与肥料,2017,5(1):28-32.

[19] Denef K, Six J. Clay mineralogy determines the importance of biological versus abiotic processes for macroaggregate formation and stabilization[J]. European Journal of Soil Science. 2005,56(4):469-479.

[20] 魏世勇,刘凡,冯雄汉,等. 针铁矿—高岭石二元体的微观结构与形成机制[J]. 土壤学报,2011,48(2):320-330.