

不同施肥处理对红壤水稻土团聚体 有机碳分布的影响*

李辉信^{1†} 袁颖红¹ 黄欠如^{1,2} 胡 锋¹ 潘根兴¹

(1 南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095)

(2 江西省红壤研究所, 江西进贤 331717)

摘 要 通过 23 年的长期田间定位试验观测,研究了施肥对红壤水稻土不同发生层团聚体组成、有机碳含量及有机碳库分布的影响。试验设不施肥(CK)、无机肥(NPK)、有机肥(猪粪+紫云英)(OM)和无机肥与有机肥配施(NPKM)等 4 个处理。结果表明, >3 mm 团聚体含量随土层深度呈增加趋势,而其他粒径的团聚体含量则呈下降趋势。施肥处理有利于 1~3 mm 和 0.25~1 mm 团聚体含量增加。各处理中,各层同粒径团聚体有机碳含量从高到低的顺序为:A>P>W₁、W₂。不同粒径团聚体中有机碳含量有明显差异,除<0.05 mm 团聚体外,粒径愈细,有机碳含量愈高。1~3 mm 和 0.25~1 mm 团聚体含量与全土有机碳含量呈显著正相关。不同施肥处理有机碳储量表现出 NPKM>OM>NPK>CK 的趋势。同施肥处理同发生层不同粒径团聚体有机碳储量从高到低的顺序为:>3 mm、1~3 mm、0.25~1 mm、0.05~0.25 mm 和<0.05 mm,且差异显著。施肥处理增加的新碳主要向 1~3 mm、0.25~1 mm 团聚体富集。

关键词 施肥;红壤水稻土;土壤团聚体;土壤有机碳

中图分类号 S152.4 **文献标识码** A

土壤团聚体是土壤结构最基本的单元,是土壤的重要组成部分,对土壤的许多物理化学性质有重大影响^[1,2]。Puget 等^[3]发现小团聚体中的有机碳较大团聚体中的有机碳老化,而有机碳的含量,尤其是新形成的有机碳更易受利用方式的影响^[4~6]。土壤团聚体有机碳分配是土壤中的重要地球化学性质之一^[7]。由于土壤团聚体是土壤的重要物质基础,关于有机碳在团聚体的分布及其变化备受关注^[8,9]。土壤中有有机碳与土壤粒子的结合可能受土壤中有有机-无机-生物的相互作用特点所制约。土壤有机碳固定中团聚体保护机制可能说明有机碳的固定效应^[10]。潘根兴等^[11,12]对太湖地区水稻土、红壤旱地和江淮丘陵旱地土壤的研究发现有机碳积累量与 2 000~250 μm 团聚体有机碳含量密切相关。因此,需要从团聚体水平的有机碳转化与结合机制上研究农业土壤对有机碳的固定机制。

湿筛法和干筛法是分离土壤团聚体的两种常用方法,湿筛法和干、湿结合筛法在目前土壤团聚体研究中应用最广泛。湿筛法由于采用水浸泡、超声波

分散、沉降虹吸和离心等过程,易使得可溶性碳和微生物量碳在团聚体中的分布发生变化^[13,14]。干筛法(冷冻干燥)的优点是:(1)减少对微生物群落的破坏;(2)减少对团聚体可溶性 C、N 的影响;(3)在旱作或缺雨水的条件下,干筛法分离团聚体更接近田间实际。因此团聚体分离方法的选择可能影响团聚体的分布,微生物群落和碳、氮的分布^[15]。

迄今为止,对土壤团聚体有机碳分布的研究主要集中于森林土壤^[16]、旱地土壤^[17]和有机物料处理后的土壤^[11,18],对水稻土用干筛法研究团聚体组成和团聚体有机碳分布资料不多。关于不同施肥处理对红壤水稻土不同发生层团聚体组成及团聚体有机碳分布影响的报道甚少。作者已报道了湿筛法分离红壤水稻土微团聚体组成及有机碳在微团聚体中的分布^[19]。本文采用干筛法研究不同施肥处理对红壤水稻土不同发生层团聚体组成及团聚体有机碳分布的影响,试图阐明不同施肥处理对于土壤团聚体有机碳分布、存储的影响程度和可能的机制,为农业土壤对全球碳循环的影响提供理论依据。

* 国家自然科学基金重点项目(批准号:40231016)资助

† 通讯作者, E-mail: huixinli@njau.edu.cn, 电话: 025-84395815

作者简介:李辉信(1964~),男,江西吉安人,教授,主要从事土壤生态领域的研究,发表论文 40 多篇

收稿日期:2005-01-25;收到修改稿日期:2005-07-28

1 材料与方法

1.1 试验处理与供试土壤

试验设在江西省红壤研究所(116°20'24" N, 28°15'30" E)内,为典型低丘红壤地区(海拔高度 25~30 m,坡度 5 度),试验从 1981 年开始实施,已进行 23 年。试验处理分为:(1)CK(不施肥);(2)NPK(无机肥);(3)OM(有机肥);(4)NPKM(无机肥和有机肥配施)。肥料用量:NPK 处理每季作物施 N 90 kg hm⁻²、P₂O₅ 45 kg hm⁻²、K₂O 75 kg hm⁻²;OM 处理早稻施紫云英(鲜)22 500 kg hm⁻²、晚稻施猪粪

(湿)22 500 kg hm⁻²;NPKM 处理早稻施 N 90 kg hm⁻²、P₂O₅ 45 kg hm⁻²、K₂O 75 kg hm⁻²和紫云英(鲜)22 500 kg hm⁻²,晚稻施 N 90 kg hm⁻²、P₂O₅ 45 kg hm⁻²、K₂O 75 kg hm⁻²和猪粪(湿)22 500 kg hm⁻²。小区面积 46.67 m²,3 次重复,随机排列。土壤为第四纪红色粘土发育的潜育型水稻土。于 2003 年晚稻收获后采取土样,根据土壤发生层,分耕作层(A:0~15 cm)、犁底层(P:16~23 cm)、潜育层(W₁:24~45 cm)和潜育层(W₂:46~100 cm)四层进行采样。土壤基本性状(1981 年布置试验前所采土样的基本性状)如表 1 所示。

表 1 供试红壤水稻土表层(0~15 cm)土壤基本性状

Table 1 Basic properties of surface red paddy soil studied

土壤样品 Soil sample	pH	有机碳 Organic C (g kg ⁻¹)	全氮 Total N (g kg ⁻¹)	全磷 Total P (g kg ⁻¹)	全钾 Total K (g kg ⁻¹)	水解氮 Hydrolyzable N (mg kg ⁻¹)	速效磷 Available P (mg kg ⁻¹)	速效钾 Available K (mg kg ⁻¹)
红壤性水稻土 Red paddy soil	6.9	16.22	0.952	0.052	1.07	143.7	5.9	71.2

1.2 分析测试

1.2.1 土壤团聚体分离方法 土壤团聚体分离方法是依据 Mendes 等^[20]、Sainju 等^[15]和彭新华等^[21]的方法,并略作修改:田间采回的原状土样(用硬质铝盒装好、保证不受挤压),每个土样 1 kg,在室温下风干,当土壤含水量到土壤塑限(含水量 22%~25%左右)时,用手轻轻地把大土块沿着自然脆弱带(Failure zone)扳成不同大小的土壤团聚体,然后在室温条件下继续风干。把盛有土样的筛子置于摇床(型号 HY—5A)上,270 r min⁻¹的转速下震荡 2 min 进行干筛(根据预备试验结果,确定 2 min 足够分离土壤各粒径团聚体),分离出 >3 mm、1~3 mm、0.25~1 mm、0.05~0.25 mm 和 <0.05 mm 土壤团聚体,然后仔细剔除各粒径团聚体中的根系,备用。

1.2.2 分析方法 有关测定均按常规方法进行^[22]。土壤容重测定:环刀法;有机碳(SOC):H₂SO₄-K₂Cr₂O₇外加热法;全氮:半微量凯氏定氮法;全磷:氢氧化钠碱熔—钼锑抗比色法;全钾:氢氧化钠碱熔—火焰光度法;水解氮:碱解扩散法;速效磷:碳酸氢钠浸提—钼锑抗比色法;速效钾:醋酸氨浸提—火焰光度法。

1.3 统计分析

所有测定结果用 Excel、SPSS 和 LSD 统计分析软件进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 不同施肥处理对土壤团聚体分布的影响

表 2 表明,各处理中不同粒径团聚体含量因不同发生层而异,>3 mm 团聚体含量,从 A 层、P 层、W₁到 W₂呈增加趋势,而其他级别的团聚体含量则从 A 层、P 层、W₁到 W₂呈下降趋势,这说明农事操作(包括施肥和耕作等)有利于表层 <3 mm 团聚体的形成,这与 Sainju 等研究的团聚体分布结论相近^[15]。同一发生层中,各粒径团聚体含量在不同施肥处理中都表现出相同的规律,即各粒径团聚体含量从高到低的顺序均为:>3 mm、1~3 mm、0.25~1 mm、0.05~0.25 mm、<0.05 mm,且都达到显著差异($p < 0.05$)。

不同施肥处理对同一发生层土壤团聚体含量分布有一定的影响。表 2 结果显示,1~3 mm 团聚体的含量在 A、P、W₁三层中,都是从 CK、NPK、OM 到 NPKM 处理有增加的趋势,A 和 P 层是 OM、NPKM 处理与 CK 处理之间有显著差异,W₁层是 OM、NPKM 处理与 CK、NPK 处理之间差异显著。0.25~1 mm 团聚体的含量在 A、P、W₁三层中,也是从 CK、NPK、OM 到 NPKM 处理有增加的趋势,A 层 NPKM 处理与 CK 处理之间差异显著,P 层 NPKM 处理与 CK、NPK、

OM 处理之间差异显著, W₁ 层 NPK、OM、NPKM 处理与 CK 处理之间差异显著。而 >3 mm 及 0.05 ~ 0.25 mm 和 <0.05 mm 团聚体的含量在各处理之间无明显差异。因此施用有机肥,特别是有机肥和无机肥配施有利于增加 1 ~ 3 mm 和 0.25 ~ 1 mm 团聚体含

量。不同粒径的团聚体在营养元素的保持、供应及转化能力等方面发挥着不同的作用^[23], 2 ~ 0.25 mm 团聚体是土壤肥力的重要物质条件,可以以该粒径团聚体及其有机碳的相对增加来评价植被恢复或土壤改良措施的土壤生态效应^[12, 24]。

表 2 不同施肥处理中不同发生层各粒径团聚体百分含量

Table 2 Distribution of soil aggregates in different soil horizons of the paddy soils under different fertilization patterns

处理 Treatments	土壤层 Soil horizon	团聚体百分含量 Content of aggregates (%)				
		> 3 mm	1 ~ 3 mm	0.25 ~ 1 mm	0.05 ~ 0.25 mm	< 0.05 mm
CK	A	48.88 ± 2.44a ^{1)A} ²⁾	26.12 ± 1.22bB	17.64 ± 0.48cB	6.26 ± 0.42dA	1.49 ± 0.66eA
	P	57.35 ± 1.31aA	25.18 ± 0.60bC	11.35 ± 1.24cB	4.78 ± 0.30dA	1.43 ± 0.19eA
	W ₁	59.89 ± 3.00aA	23.59 ± 1.21bB	12.66 ± 1.05cB	3.21 ± 0.68dA	0.78 ± 0.09eA
	W ₂	68.43 ± 1.59aA	18.87 ± 0.30bC	9.67 ± 0.56cC	2.56 ± 0.80dB	0.55 ± 0.03eA
NPK	A	48.18 ± 2.78aA	27.15 ± 1.47bAB	18.10 ± 1.11cAB	5.47 ± 0.24dA	1.46 ± 0.03eA
	P	56.36 ± 1.66aA	26.21 ± 0.19bBC	11.86 ± 0.28cB	4.40 ± 0.21dA	1.43 ± 0.15eA
	W ₁	55.69 ± 3.97aA	24.35 ± 3.20bB	15.12 ± 1.61cA	4.47 ± 1.16dA	0.66 ± 0.04eA
	W ₂	63.65 ± 0.87aB	21.27 ± 0.06bB	11.31 ± 1.24cA	2.97 ± 0.13dA	0.85 ± 0.18eA
OM	A	45.43 ± 3.81aA	28.74 ± 0.40bA	19.38 ± 1.69cAB	5.29 ± 0.03dA	1.48 ± 0.07eA
	P	54.89 ± 3.62aA	27.76 ± 2.62bB	12.28 ± 1.24cB	3.76 ± 0.06dB	1.45 ± 0.29eA
	W ₁	52.44 ± 1.05aA	27.16 ± 0.72bA	15.64 ± 0.47cA	4.12 ± 1.22dA	0.84 ± 0.16eA
	W ₂	62.91 ± 2.23aAB	20.73 ± 2.28bB	13.95 ± 0.64cB	2.00 ± 0.58dB	0.43 ± 0.12eA
NPKM	A	44.69 ± 2.82aA	29.08 ± 0.26bA	19.90 ± 1.08cA	5.15 ± 1.42dA	1.41 ± 0.36eA
	P	50.66 ± 3.21aA	30.25 ± 0.19bA	14.53 ± 1.53cA	3.71 ± 0.28dB	1.10 ± 0.31eB
	W ₁	48.63 ± 1.49aA	30.87 ± 2.24bA	16.55 ± 0.63cA	3.31 ± 0.58dA	0.80 ± 0.27dA
	W ₂	50.52 ± 2.65aB	30.83 ± 1.65bA	14.91 ± 1.53cB	3.23 ± 0.08dA	0.65 ± 0.07dA

1) 表中同一行中,小写字母若不同,表明在同处理同发生层各粒级团聚体含量差异显著 ($p < 0.05$, 邓肯法) The different lowercase letters following the values in the same row show significant difference according to Duncan's multiple range test ($p < 0.05$); 2) 表中同一列中,同一发生层不同施肥处理间大写字母若不同,表明差异显著 ($p < 0.05$, 邓肯法) The different capital letters in following the values in the each column of the same soil horizon in different fertilizer treatments show significant difference according to Duncan's multiple range test ($p < 0.05$)

2.2 不同施肥处理对土壤团聚体有机碳含量的影响

图 1 表明,各处理中,A 层的团聚体有机碳含量最高,P 层的次高。各层团聚体有机碳从高到低的顺序为:A > P > W₁、W₂,随着土层的加深,团聚体有机碳含量呈明显下降的趋势^[12]。方差分析表明,除 CK、NPK 和 OM 处理各层的 <0.05 mm 团聚体外,同处理中,A 层与 P、W₁、W₂ 之间各团聚体有机碳含量达极显著差异 ($p < 0.01$); P 层与 W₁、W₂ 之间各团聚体有机碳含量也存在显著差异 ($p < 0.05$); 而 W₁ 和 W₂ 之间团聚体有机碳含量无明显差异。

不同粒径土壤团聚体中的有机碳含量是土壤有机质平衡与矿化速率的微观表征^[11]。本试验结果表明,同发生层不同粒级团聚体中有机碳含量因粒径而异(图 1),从团聚体粒径 >3 mm 至 0.05 ~ 0.25 mm,团聚体粒径愈细,有机碳含量愈高,以 0.05 ~ 0.25 mm 粒径有机碳含量最高,而 <0.05 mm 团聚体中有机碳含量低于其他粒径土壤团聚体。Jastrow 等^[25]利用 ¹³C 示踪法进一步证实微团聚体中有机碳

比大团聚体中的有机碳形成时间早,大团聚体比微团聚体含更多的有机碳。Mayssoon 等^[26]研究结果则是以 0.25 ~ 2 mm 团聚体有机碳含量最高。

由于不同肥料在土壤中的分解速率和残留量上的差异以及对作物生长影响形成的有机残茬的不同,导致不同施肥处理、同一粒级团聚体中有机碳含量因施肥种类而异^[27]。有机肥作为土壤有机质来源进入土壤势必会造成土壤碳素含量增加^[28]。长期施有机肥可使各粒级团聚体中有机碳含量增加,A 层中,CK 与 NPK 处理之间、OM 与 NPKM 处理之间各粒级团聚体有机碳含量无显著差异,但 OM、NPKM 处理与 CK、NPK 处理间有显著差异 ($p < 0.05$)。OM 处理与 CK 处理相比, >3 mm 至 <0.05 mm 各粒级团聚体有机碳含量增幅为 21.89% ~ 39.84%,NPKM 处理增幅达 34.32% ~ 43.79%。P 层中,OM、NPKM 处理各粒径团聚体有机碳含量与 CK 处理之间有显著差异 ($p < 0.05$),NPKM 处理与 CK 处理相比,各粒级团聚体有机碳含量增幅达

37.12% ~ 57.73%。但 NPK、OM、NPKM 处理之间各粒径团聚体有机碳含量无显著差异 ($p < 0.05$)。W₁ 和 W₂ 层不同施肥处理各粒径团聚体有机碳含量间无显著差异。

从全土有机碳来看,OM 和 NPKM 处理中,A 层有机碳含量显著高于 CK 和 NPK 处理;各处理中,P 层和 W₁、W₂ 层有机碳含量无明显差异。这表明施肥对土壤有机碳含量的影响主要表现在表层。

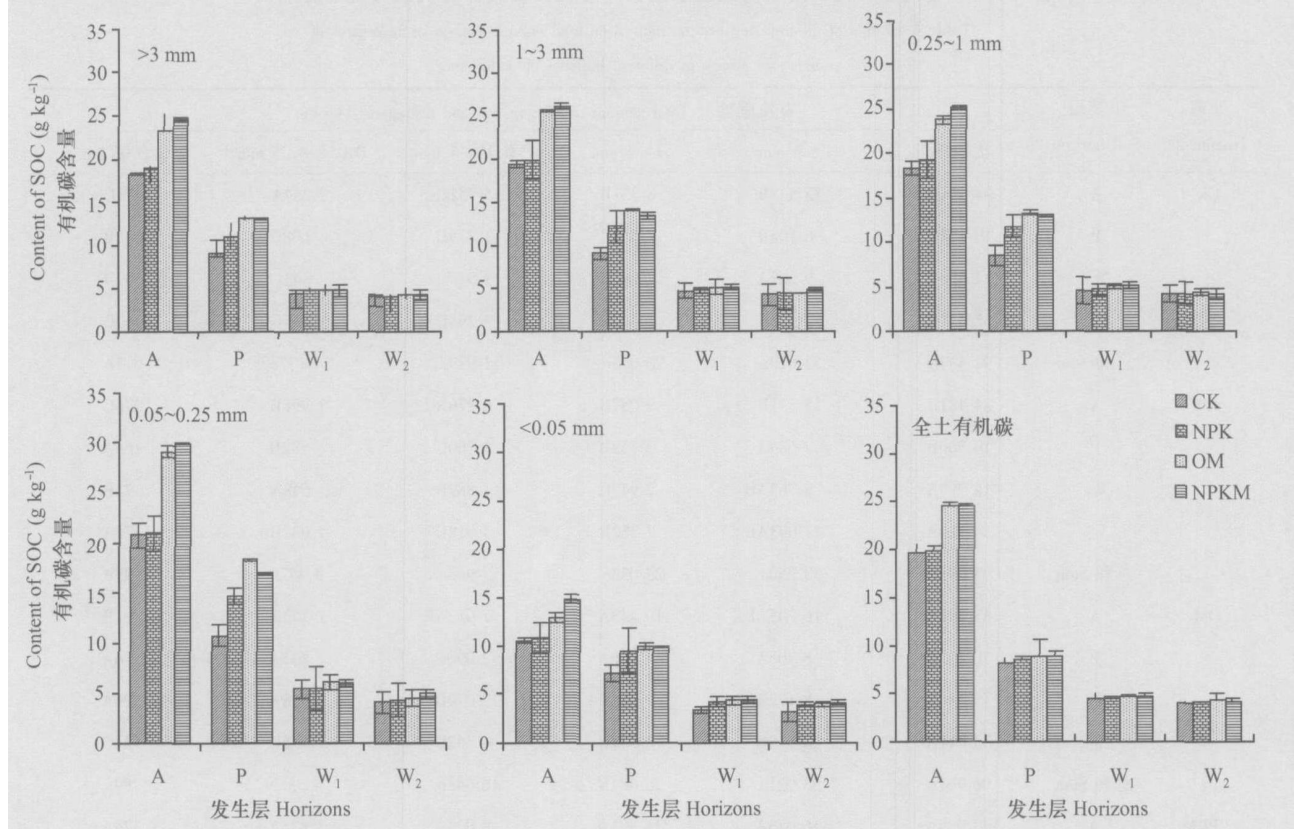


图 1 不同施肥处理对土壤团聚体有机碳含量的影响 (g kg^{-1})

Fig. 1 Effect of different fertilization patterns on SOC content of aggregates in different horizons of paddy soil

2.3 土壤团聚体分布与土壤有机碳关系

土壤有机碳能促进土壤团聚体的形成。资料表明,土壤有机质、黏粒及碳酸钙是影响土壤水稳性团

表 3 不同施肥处理 A、P 层土壤团聚体含量与土壤有机碳含量关系 ($n = 24$)

Table 3 Relation between the content of soil aggregate and SOC in genetic horizon of A and P of different fertilization treatments

各级团聚体 Soil aggregates	回归方程 ¹⁾ Regress equation	复相关系数 ²⁾ R^2
> 3 mm	$Y = -1.01X + 67.40$	0.900 3 **
1 ~ 3 mm	$Y = 3.83X - 88.29$	0.830 4 *
0.25 ~ 1 mm	$Y = 1.54X - 6.84$	0.925 8 *
0.05 ~ 0.25 mm	$Y = 2.34X + 8.42$	0.124 1
< 0.05 mm	$Y = 2.36X + 7.40$	0.017 5

1) Y 表示团聚体百分含量; X 表示土壤有机碳含量 Y is the content of aggregate; X is the content of SOC; 2) ** 和 * 分别表示团聚体含量和土壤有机碳含量呈极显著相关 ($p < 0.01$) 和显著相关 ($p < 0.05$) ** and * mean there is significant relevance between content of aggregate and SOC at $p < 0.01$ and $p < 0.05$ respectively

聚体含量的主导因子^[29~31],其中土壤有机质与团聚体之间存在着密切的相关关系,它是土壤团聚体的主要胶结剂^[32]。如上所述,不同施肥处理 W₁、W₂ 层不同粒径团聚体有机碳含量变化也不明显,因此将变化明显的 A、P 层各粒径团聚体的百分含量与全土有机碳做相关分析,回归方程和复相关系数如表 3 所示,可以看出,1 ~ 3 mm 和 0.25 ~ 1 mm 团聚体含量与土壤有机碳含量显著正相关 ($p < 0.05$),而 > 3 mm 团聚体含量与土壤有机碳含量显著负相关;因此,随着施用不同肥料,特别是有机-无机肥配施,能有效地提高 1 ~ 3 mm 和 0.25 ~ 1 mm 团聚体含量,促进 1 ~ 3 mm 和 0.25 ~ 1 mm 团聚体的形成。

2.4 不同施肥处理对土壤及团聚体有机碳储量的影响

2.4.1 不同施肥处理对土壤有机碳储量的影响

根据表 2、图 1 和土壤容重计算出四层 (A、P、W₁ 和 W₂) 土壤和各粒径团聚体的有机碳储量。从表 4 中可以看出,不同施肥处理土壤有机碳储量表现出

NPKM > OM > NPK > CK 的趋势, OM、NPKM 处理和 CK、NPK 处理有机碳储量(1 m 深)之间差异显著 ($p < 0.05$), OM、NPKM 处理与 CK 处理相比, 有机碳储

量显著增加, 其中 OM 处理有机碳含量每 hm^2 增加 5 424 kg, 增幅为 5.93%, NPKM 处理有机碳含量每 hm^2 增加 8 193 kg, 增幅为 8.95%。

表 4 不同施肥处理对不同发生层土壤和各粒径团聚体有机碳储量的影响

Table 4 Effect of different fertilization pattern on total organic carbon in aggregates of various size groups in different horizons of paddy soil

处理 Treatments	土壤层 Soil horizon	有机碳储量 Total amount of SOC in soil and aggregates (kg hm^{-2})					
		土壤 Soil	> 3 mm	1 ~ 3 mm	0.25 ~ 1 mm	0.05 ~ 0.25 mm	< 0.05 mm
CK	A	34 324B ¹⁾	15 537B	8 357B	5 951C	2 264A	275C
	P	10 154B	6 108B	2 552C	1 219D	608C	122B
	W ₁	14 638A	9 262A	2 686C	1 510C	441C	69B
	W ₂	32 421A	22 722A	6 440B	3 298D	865C	149C
	总和 Sum	91 537b ²⁾	53 629a	20 035d	11 979d	4 177c	614b
NPK	A	34 481B	15 811B	9 087B	6 276BC	1 995B	276C
	P	10 300B	7 584A	3 752B	1 760C	782B	166A
	W ₁	14 990A	8 763AB	2 947C	1 889B	648A	73B
	W ₂	33 320A	21 093AB	7 252B	4 018C	1 032B	274A
	总和 Sum	93 091b	53 250a	23 038c	13 943c	4 457b	699b
OM	A	37 492A	16 205AB	10 448A	7 612AB	2 353A	293B
	P	10 822A	8 706A	4 466A	2 090B	831A	176A
	W ₁	15 436A	8 172BC	3 592B	2 079B	656A	96A
	W ₂	33 211A	20 838B	6 947B	4 762B	695D	134C
	总和 Sum	96 961a	53 921a	25 481b	16 543b	4 536b	789a
NPKM	A	37 984A	16 946A	11 301A	8 023A	2 378A	324A
	P	11 095B	8 108A	4 806A	2 398A	769B	133B
	W ₁	15 934A	7 877C	4 112A	2 236A	544B	95A
	W ₂	34 718A	17 714C	10 414A	5 958A	1 318A	225B
	总和 Sum	99 730a	50 645a	30 633a	18 615a	5 008a	777a

1) 表中同列大写字母若不同, 表明不同施肥处理间同发生层土壤或同粒径团聚体有机碳储量差异显著 ($p < 0.05$, 邓肯法) The different uppercase letters following the data in the same column of the same soil horizon under different fertilization pattern show significant difference according to Duncan's multiple range test ($p < 0.05$); 2) 表中同列小写字母若不同, 表明全层(1 m)土壤或同粒径团聚体有机碳储量差异显著 ($p < 0.05$, 邓肯法) The different lowercase letters following the data in the same column show significant difference according to Duncan's multiple range test ($p < 0.05$)

从同发生层不同施肥处理土壤来看(表 4), A 层 OM、NPKM 处理和 CK、NPK 处理有机碳储量之间差异显著 ($p < 0.05$)。与 CK 处理相比, NPK、OM、NPKM 处理 A 层有机碳储量增幅分别为 0.45%、9.23%、10.66%; P 层的增幅分别为 1.40%、6.58%、9.27%; W₁ 层的增幅分别为 2.40%、5.45%、8.85%; W₂ 层的增幅分别为 2.77%、2.44%、7.08%。从同施肥处理不同发生层土壤来看, NPK 处理有机碳储量的增幅表现出 A < P < W₁ < W₂ 的趋势, 而 OM、NPKM 处理有相反的趋势, 表明了 NPK(单施化肥)处理随着年限的增长, 上层土壤有机碳慢慢增加, 增大到一

定的范围内, 开始逐渐趋于稳定, 且上层的增长速度要低于下层^[33]; 而随着有机肥的加入, OM、NPKM 处理上层的增长速度仍然高于下层。

2.4.2 不同施肥处理对土壤各粒径团聚体有机碳储量的影响 表 4 的数据显示, 同施肥处理同发生层不同粒径团聚体有机碳储量从高到低的顺序为: > 3 mm、1 ~ 3 mm、0.25 ~ 1 mm、0.05 ~ 0.25 mm 和 < 0.05 mm, 且差异显著。

不同施肥处理 A 层除 0.05 ~ 0.25 mm 团聚体外, 其他粒径团聚体有机碳储量表现出 NPKM > OM > NPK > CK 的趋势, 且 OM、NPKM 处理与 CK 处

理之间差异显著;P层 >3 mm、1~3 mm、0.25~1 mm 团聚体有机碳处理(NPKM、OM)各团聚体有机碳储量普遍高于CK、NPK处理;且OM、NPKM处理与CK处理之间差异显著;W₁层1~3 mm、0.25~1 mm、<0.05 mm也表现出NPKM>OM>NPK>CK的趋势,且OM、NPKM处理与CK处理之间差异显著。

用同处理4个发生层总和来计算各团聚体有机碳储量来看(表4),1~3 mm、0.25~1 mm、0.05~0.25 mm 团聚体有机碳储量表现出NPKM>OM>NPK>CK的趋势,且1~3 mm、0.25~1 mm 团聚体有机碳储量在各处理之间差异显著($p < 0.05$)。与CK处理相比,NPK、OM、NPKM处理1~3 mm 团聚体有机碳储量增幅分别为14.99%、27.18%、52.90%;0.25~1 mm 团聚体增幅分别为16.40%、38.10%、55.40%;0.05~0.25 mm 团聚体增幅分别为6.70%、8.59%、19.89%。由于0.05~0.25 mm 团聚体有机碳储量比较小,因此新碳主要向1~3 mm、0.25~1 mm 团聚体富集。据研究,退化红壤植被恢复改良和白浆土恢复中新固定的有机碳主要分布于2~0.25 mm 团聚体中^[11],而据潘根兴等报道的太湖地区黄泥土、乌泥土、白土三种土壤中耕层有机碳主要存在于2~0.25 mm和0.25~0.02 mm 粒组^[34]。

3 小 结

红壤水稻土中团聚体以>3 mm 团聚体为主,其次分别为1~3 mm和0.25~1 mm(用干筛法测定)。>3 mm 团聚体含量随土层加深,含量增加;而1~3 mm和0.25~1 mm 团聚体含量随土层加深,含量减少。长期施用有机肥或有机无机肥配施可显著增加1~3 mm和0.25~1 mm 团聚体含量,1~3 mm和0.25~1 mm 团聚体含量与全土有机碳含量呈显著正相关。同层不同粒径团聚体中有机碳含量因粒径而异,除<0.05 mm 粒径团聚体外,粒径愈细,有机碳含量愈高,<0.05 mm 土壤团聚体中有机碳含量低于其他粒径土壤团聚体。长期施用有机肥或有机无机肥配施可显著增加土壤表层和全层土壤碳库,新碳主要向1~3 mm、0.25~1 mm 团聚体富集。

参 考 文 献

[1] 卢金伟,李占斌. 土壤团聚体研究进展. 水土保持研究, 2002, 9(1): 81~85. Lu J W, Li Z B. Advance in soil aggregate study (In Chinese). Research of Soil and Water Conservation, 2002, 9(1): 81~85

[2] Tisdall J M, Oades J M. Organic matter and water-stable aggregates. Journal of Soil Science, 1982, 33:141~163

[3] Puget P, Chenu C, Balesdent J. Dynamics of soil organic matter associated with particle-size fractions of water-stable aggregates. European Journal of Soil Science, 2000, 51:595~605

[4] Six J, Elliot E T, Paustian K, et al. Aggregation and soil organic matter accumulation in cultivation and native grassland soils. Soil Sci. Soc. Am. J., 1998, 62: 1367~1377

[5] Chan K Y. Soil particulate organic carbon under different land use and management. Soil Use and Management, 2001, 17:217~221

[6] Xu Q F, Xu J M. Changes in soil carbon pools induced by substitution of plantation for native forest. Pedosphere, 2003, 13(3):271~278

[7] 潘根兴. 中国干旱性地区土壤发生性碳酸盐及其在陆地系统碳转移上的意义. 南京农业大学学报, 1999, 22(1): 51~57. Pan G X. Pedogenic carbonates in arid soils of China and the significance in terrestrial carbon transfer (In Chinese). Journal of Nanjing Agricultural University, 1999, 22(1): 51~57

[8] 李恋卿,潘根兴,张旭辉. 太湖地区几种水稻土的有机碳储存及其分布特性. 科技通报, 2000, 11(6): 421~426. Li L Q, Pan G X, Zhang X H. Organic carbon storage in selected paddy soils in Taihu Lake region and their occurrence (In Chinese). Bulletin of Science and Technology, 2000, 11(6): 421~426

[9] 李忠佩,林心雄,车玉萍. 中国东部主要农田土壤有机碳库的平衡与趋势分析. 土壤学报, 2002, 39(3):351~360. Li Z P, Lin X X, Che Y P. Analysis for the balance of organic carbon pools and their tendency in typical arable soils of eastern China (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2002, 39(3):351~360

[10] 潘根兴,李恋卿,张旭辉. 中国土壤有机碳库量与农业土壤碳固定动态的若干问题. 地球科学进展, 2003, 18(4):609~618. Pan G X, Li L Q, Zhang X H. Soil organic carbon storage of China and the sequestration dynamics in agricultural lands (In Chinese). Advance in Earth Science, 2003, 18(4):609~618

[11] 张旭辉,李恋卿,潘根兴. 不同轮作制度对淮北白浆土团聚体及其有机碳的积累与分布的影响. 生态学杂志, 2001, 20(2): 16~19. Zhang X H, Li L Q, Pan G X. Effect of different crop rotation systems on the aggregates and their SOC accumulation in Paludals in North Huai region (In Chinese). Chinese Journal of Ecology, 2001, 20(2): 16~19

[12] 李恋卿,潘根兴,张旭辉. 退化红壤植被恢复中表层土壤团聚体及其有机碳的变化. 土壤通报, 2000, 31(5): 193~195. Li L Q, Pan G X, Zhang X H. Change of soil particle size fractions and SOC contents after vegetation recovery in a degraded soil (In Chinese). Chinese Journal of Soil Science, 2000, 31(5): 193~195

[13] Puget P, Chenu C, Balesdent J. Carbon and young carbon in soil aggregates of silty cultivated soil. Trans. Internl. Soil Sci. Congr. Acapulca, Mexico. 1994, 19:288~290

[14] 卢升高,竹蕾,郑晓萍. 应用Le Bissonnais法测定富铁土中团聚体的稳定性及其意义. 水土保持学报, 2004, 18(1):7~11. Lu S G, Zhu L, Zheng X P. Le Bissonnais method of measuring aggregate stability in ferrisols and its implications (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation, 2004, 18(1):7~11

[15] Sainju U M, Terrill T H, Gelaye S, et al. Soil aggregation and car-

- bon and nitrogen pools under rhizoma peanut and perennial weeds. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2003, 67:146 ~ 155
- [16] 徐秋芳, 徐建明, 姜培坤. 集约经营毛竹林土壤活性有机碳库研究. *水土保持学报*, 2003, 17(4):15 ~ 21. Xu Q F, Xu J M, Jiang P K. Study on organic carbon pool of soil under intensive management bamboo forest (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2003, 17(4):15 ~ 21
- [17] 赵兰坡, 杨学明, 路立平, 等. 长期连作玉米的黑钙土、风沙土中有机-无机复合体组成及有机碳分布的特征. *土壤通报*, 1996, 27(3):120 ~ 123. Zhao L P, Yang X M, Lu L P, *et al.* Composition of organo-mineral complexes and the SOC distribution (In Chinese). *Chinese Journal of Soil Science*, 1996, 27(3):120 ~ 123
- [18] Gregorich E G, Ellert B H, Drury C F, *et al.* Fertilization effects on soil organic matter turnover and corn residue C storage. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1996, 60:472 ~ 476
- [19] 袁颖红, 李辉信, 黄欠如, 等. 不同施肥处理对红壤性水稻土及微团聚体有机碳汇的影响. *生态学报*, 2004, 24(12):2 961 ~ 2 966. Yuan Y H, Li H X, Huang Q R, *et al.* Effects of different fertilization on soil organic carbon distribution and storage in various micro-aggregates of red paddy soil (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(12):2 961 ~ 2 966
- [20] Mendes I C, Bandick A K, Dick R P, *et al.* Microbial biomass and activities in soil aggregates affected by winter cover crops. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1999, 63:873 ~ 881
- [21] 彭新华, 张斌, 赵其国. 红壤侵蚀裸地植被恢复及土壤有机碳对团聚体稳定性的影响. *生态学报*, 2003, 23(10):2 177 ~ 2 183. Peng X H, Zhang B, Zhao Q G. Effect of soil organic carbon on aggregate stability after vegetative restoration on severely eroded red soil (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(10):2 177 ~ 2 183
- [22] 鲁如坤主编. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 1999. Lu R K. ed. *Analytical Methods of Soil and Agro-chemistry* (In Chinese). Beijing: Chinese Agricultural Science and Technology Press, 1999
- [23] 陈恩凤, 关连珠, 汪景宽, 等. 土壤特征微团聚体的组成比例与肥力评价. *土壤学报*, 2001, 38(1):49 ~ 53. Chen E F, Guan L Z, Wang J K, *et al.* Compositional proportion of soil and characteristic micro-aggregates and soil fertility evaluation (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2001, 38(1):49 ~ 53
- [24] Vania S F, Salcedo I H. Declines of organic nutrient pools in tropical semi-arid soils under subsistence farming. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2004, 68:215 ~ 224
- [25] Jastrow J D, Boutton T W, Miller R M. Carbon dynamic of aggregate-associated organic matter estimated by carbon-13 natural abundance. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1996, 60:801 ~ 807
- [26] Maysoon M M, Charles W R. Tillage and manure effects on soil and aggregate-associated carbon and nitrogen. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2004, 68:809 ~ 816
- [27] 沈其荣, 徐阳春. 长期施用不同有机肥对土壤各粒级复合体中C、N、P含量与分配的影响. *中国农业科学*, 2000, 33(5):65 ~ 71. Shen Q R, Xu Y C. Influence of long-term application of manure on the content and distribution of organic C, total N and P in soil particle-sizes (In Chinese). *Scientia Agricultura Sinica*, 2000, 33(5):65 ~ 71
- [28] 沈宏, 曹志洪, 徐志红. 施肥对土壤不同碳形态及碳库管理指数的影响. *土壤学报*, 2000, 37(2):166 ~ 173. Shen H, Cao Z H, Xu Z H. Effects of fertilization on different carbon fractions and carbon pool management index in soils (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2000, 37(2):166 ~ 173
- [29] Ni J Z, Xu J M, Xie Z M, *et al.* Changes of labile organic fractions in soils under different rotation systems. *Pedosphere*, 2004, 14(1):103 ~ 109
- [30] 杨彭年. 石灰性土壤有机质矿质复合体及其团聚性的研究. *土壤学报*, 1984, 21(2):144 ~ 152. Yang P N. Study of organic-mineral complexes in calcareous soils and aggregation (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 1984, 21(2):144 ~ 152
- [31] 姚贤良, 于德芬. 关于集约农作制下土壤结构问题. *土壤学报*, 1985, 22(3):241 ~ 250. Yao X L, Yu D F. Problem of soil structure on intensivism tillage system (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 1985, 22(3):241 ~ 250
- [32] 刘京, 常庆瑞, 李岗, 等. 连续不同施肥对土壤团聚性影响的研究. *水土保持通报*, 2000, 8(4):24 ~ 26. Liu J, Chang Q R, Li G, *et al.* Effect of different fertilization on soil characteristics of aggregate (In Chinese). *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2000, 8(4):24 ~ 26
- [33] 贾松伟, 贺秀斌, 陈云明. 黄土丘陵区退耕撂荒对土壤有机碳的积累及其活性的影响. *水土保持学报*, 2004, 18(3):78 ~ 84. Jia S W, He X B, Chen Y M. Effect of land abandonment on soil organic carbon sequestration in loess hilly areas (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2004, 18(3):78 ~ 84
- [34] 李恋卿, 潘根兴, 张旭辉. 太湖地区几种水稻土的有机碳储存及其分布特性. *科技通报*, 2000, 11(6):421 ~ 426. Li L Q, Pan G X, Zhang X H. Organic carbon storage in selected paddy soils in Taihu Lake region and their occurrence (In Chinese). *Bulletin of Science and Technology*, 2000, 11(6):421 ~ 426

EFFECTS OF FERTILIZATION ON SOIL ORGANIC CARBON DISTRIBUTION IN VARIOUS AGGREGATES OF RED PADDY SOIL

Li Huixin^{1†} Yuan Yinghong¹ Huang Qianru^{1,2} Hu Feng¹ Pan Genxing¹

(1 *College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China*)

(2 *Institute of Red Earth of Jiangxi Province, Jinxian, Jiangxi 331717, China*)

Abstract A long-term field experiment was carried out in Jinxian County, Jiangxi Province, China. One of the aims of the experiment was to study soil organic carbon (SOC) distribution in different size groups of aggregates in four horizons (A, P, W₁, W₂) of red paddy soil impacted by different fertilization patterns. The experiment was designed to have four treatments: (1) Zero fertilization (CK), (2) chemical fertilizers alone (NPK), (3) organic manure alone (OM) and (4) combination of chemical fertilizers and organic manure (NPKM). Results show that the percentage of soil aggregates in the size group of > 3 mm increased in all horizons, which were in the following order: A > P > W₁ > W₂, but the percentages of the other groups decreased, following the same order. The treatments of NPK, OM and NPKM were in favor of increasing the percentage of aggregates in the size groups of 1 ~ 3 mm and 0.25 ~ 1 mm. Results also show that the content of SOC in aggregates of the same horizon in all the fertilization treatments decreased in all horizons, showing a sequence of A > P > W₁, W₂. The contents of SOC in different size groups were significantly different and showed an increasing sequence of > 3 mm > 1 ~ 3 mm > 0.25 ~ 1 mm > 0.05 ~ 0.25 mm except for the size group of < 0.05 mm being the lowest in content. The total content of SOC showed a positively linear relationship with the content of aggregates of the size groups of 1 ~ 3 mm and 0.25 ~ 1 mm. The storage of total SOC varied between the treatments, showing an increasing sequence of CK > NPK > OM > NPKM. The storages of total SOC in different-sized aggregates of the same horizon in the same treatment were also significantly different, showing a decreasing sequence of > 3 mm < 1 ~ 3 mm < 0.25 ~ 1 mm < 0.05 ~ 0.25 mm < 0.05 mm. The newly enriched organic carbon mostly appeared in the size groups of 1 ~ 3 mm and 0.25 ~ 1 mm.

Key words Fertilization; Red paddy soil; Soil aggregates; Soil organic carbon