

长期施肥对红壤性水稻土团聚体活性有机碳的影响*

李辉信¹ 袁颖红² 黄欠如³ 胡 锋¹ 潘根兴¹ 樊后保²

(1 南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095)

(2 南昌工程学院生态与环境科学研究所, 南昌 330099)

(3 江西红壤研究所, 江西进贤 331717)

摘要 在 23 年的长期田间定位试验区, 研究了长期施肥对红壤性水稻土团聚体活性有机碳含量的影响。结果表明, 在不施肥 (CK)、无机肥 (NPK)、有机肥 (猪粪+紫云英绿肥) (OM) 和无机肥与有机肥配施 (NPKM) 处理中, 土壤团聚体活性有机碳含量均随深度的增加而降低。长期施用肥料, 特别是有机肥与无机肥配施会提高土壤团聚体活性有机碳含量, 从而保持和提高土壤有机碳库质量。不同粒级土壤团聚体中活性有机碳含量和团聚体活性有机碳占团聚体有机碳比率有差异, 潜在可矿化碳含量和潜在可矿化碳占团聚体有机碳比率从高到低的顺序为: 0.125~1 mm、1~3 mm、>3 mm、0.105~0.125 mm 和 <0.105 mm; 而可溶性有机碳含量和可溶性有机碳占团聚体有机碳比率从高到低的顺序为: 0.105~0.125 mm、0.125~1 mm、1~3 mm、>3 mm 和 <0.105 mm。不同施肥处理 A 层土壤团聚体潜在可矿化碳、可溶性有机碳含量都与土壤团聚体有机碳含量都呈极显著相关; P 层除 1~3 mm 团聚体外都呈显著相关。土壤微团聚体 (<0.125 mm) 中有机碳的稳定性高于大团聚体 (>0.125 mm)。

关键词 长期施肥; 红壤性水稻土; 团聚体; 潜在可矿化碳; 可溶性有机碳

中图分类号 S1521.4 **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]。土壤团聚颗粒的形成是土壤物理、化学和生物相互作用的动力学过程^[3]。团聚体是由矿物颗粒和有机物等土壤成分参与下, 在干湿冻融交替等自然物理过程作用下形成不同尺度大小的多孔单元^[4]。不同粒级的团聚体是土壤具有自动调节能力的物质基础。团聚体中有机碳的分布是土壤重要的物理化学性质之一^[5]。关于有机碳在土壤团聚体中的分布及其变化备受关注^[6, 7], Wright 等的研究说明大量的有机碳储存在 250~2000 Lm 的团聚体中^[8], Jastraw 等也利用¹³C 示踪法进一步证实大团聚体比微团聚体含更多的有机碳^[9]。

土壤活性有机碳是指土壤中移动快、稳定性差、易氧化、矿化, 并对植物和土壤微生物活性较高的那部分有机碳, 常可用可溶性有机碳和矿化态碳等来表征。土壤活性有机碳虽然只占土壤有机碳的较小

部分, 但它可以在土壤总有机碳变化之前反映土壤微小的变化, 又直接参与土壤生物化学转化过程, 它们也是土壤微生物活动的能源和土壤养分的驱动力^[10], 因而, 它们是评价土壤有机碳库平衡和土壤化学、生物化学肥力保持的重要指标^[11]。迄今为止, 对土壤活性有机碳已经进行过不少研究^[12~17], 但关于长期不同施肥对红壤性水稻土团聚体活性有机碳影响的报导甚少。本文借助于长期定位试验, 较系统地研究了长期施肥对红壤性水稻土团聚体活性有机碳的影响。旨在探讨长期不同施肥条件下土壤质量的变化规律, 为进一步研究水稻土的碳源和碳汇效应, 减缓土壤中温室气体排放, 增加土壤碳截存, 提高土壤质量提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地与供试土壤

红壤性水稻土长期定位试验设在江西省红壤研

* 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: 025-84395374

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 50 多篇

收稿日期: 2006-09-05; 收到修改稿日期: 2007-03-30

究所(进贤县高桥)(116b20c24dN, 28b15c30dE)内,海拔高度 26 m,亚热带季风气候,年平均气温 1717 e,月平均最高气温 2910 e,月平均最低气温 510 e,年平均降雨量 1 400 mm,其中 50%集中在 3~7月,具有明显的干湿季节变化。无霜期为 262 d。试验从

1981年早稻开始实施,试验前为双季稻绿肥轮作制,水稻年产量 9 000 kg hm⁻²左右。土壤为第四纪红色黏土发育的潜育型水稻土,剖面特征为(Ap)P)W₁)W₂型。试前耕层土壤基本理化性质如表 1。

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 the soil in the surface layer (0~15 cm) of the 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)
红壤水稻土 Red paddy soil	61.9	161.22	01.952	01.052	11.07	1431.7	51.9	711.2

112 试验设计

试验处理分为:(1)CK(不施肥);(2)NPK;(3)OM(有机肥);(4)NPKM(无机肥和有机肥配施)。肥料用量:NPK处理每hm²每季作物施N 90 kg、P₂O₅ 45 kg、K₂O 75 kg;OM处理早稻每hm²施22 500 kg新鲜紫云英、晚稻每hm²施22 500 kg新鲜猪粪;NPKM处理早稻每hm²施N 90 kg、P₂O₅ 45 kg、K₂O 75 kg和22 500 kg新鲜紫云英,晚稻每hm²施N 90 kg、P₂O₅ 45 kg、K₂O 75 kg和22 500 kg新鲜猪粪。紫云英平均含有机碳 23 315 g kg⁻¹,N 311 g kg⁻¹,P 213 g kg⁻¹,K 1 011 g kg⁻¹,猪粪平均含有机碳 6 913 g kg⁻¹,N 516 g kg⁻¹,P 312 g kg⁻¹,K 712 g kg⁻¹。小区随机排列,3次重复,小区面积 46167 m²。

113 土壤样品采集

2003年12月(晚稻收获后)采用五点混合采样法采集土壤原状样品,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)4层进行采样,用硬质盒将土样带回实验室,置于0~4 e冷藏箱待处理。进行土壤团聚体分离前,先要将土壤原状样品在自然条件下风干。

114 试验方法

11411 土壤团聚体的分离方法 土壤团聚体分离方法采用干筛法^[18]。

11412 土壤团聚体潜在可矿化碳(PMC: Potential Mineralization Carbon)的测定 称取风干土壤团聚体 20100 g 均匀铺于呼吸瓶底部,并调节土壤含水量至田间持水量 60%;检查呼吸瓶是否密封;置于 22? 2 e 下黑暗培养 7 d,以恢复土壤生物活性。7 d 后将 5 ml 012 mol L⁻¹ NaOH 溶液倒入呼吸瓶一侧的吸收瓶内作为有机碳分解释放出的 CO₂ 吸收液,而

后将橡皮塞用胶带密封;分别在第 1、7、14、21、28 和 35 天将碱液抽出,随后再加入吸收液继续培养。用标准 HCl 滴定吸收液。通过测定 NaOH 溶液浓度的变化,计算出 CO₂C 的释放量。土壤潜在可矿化碳用 mg kg⁻¹干土表示。

11413 土壤团聚体可溶性有机碳(DOC: Dissolved Organic Carbon)的测定 称取 5100 g 风干土于离心管中,按水土比为 20B1 添加双蒸水,在室温 25? 1 e 和 180 r min⁻¹下震荡 30 min,然后离心 10 min (3 000 g s⁻¹),上部清液在真空泵下通过 0145 Lm 微孔滤膜,收集的滤液测定可溶性有机碳浓度(Shi2 madzu TOC5050)。

115 分析测试与数据统计

有关项目测定均按常规方法^[19]进行。有机碳(SOC):H₂SO₄2K₂CrO₇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:醋酸铵浸提)火焰光度法。

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

2 结果与讨论

211 长期施肥对土壤团聚体活性有机碳的影响

21111 长期施肥对土壤团聚体潜在可矿化碳的影响 图 1 表明,各处理中,A 层同施肥处理同粒级土壤团聚体潜在可矿化碳含量大于 P 层,且差异达极显著(p < 0101)。同发生层(A、P)不同粒级团聚体中潜在可矿化碳含量因粒径而异(图 1),从团聚体粒径 > 3 mm 至 0125~ 1 mm,团聚体粒径愈细,潜

在可矿化碳含量愈高,以 0.125~1 mm 粒径潜在可矿化碳含量最高,但当团聚体 < 0.125 mm 时,团聚体中

潜在可矿化碳含量呈现随着粒径的减小而减小的趋势。

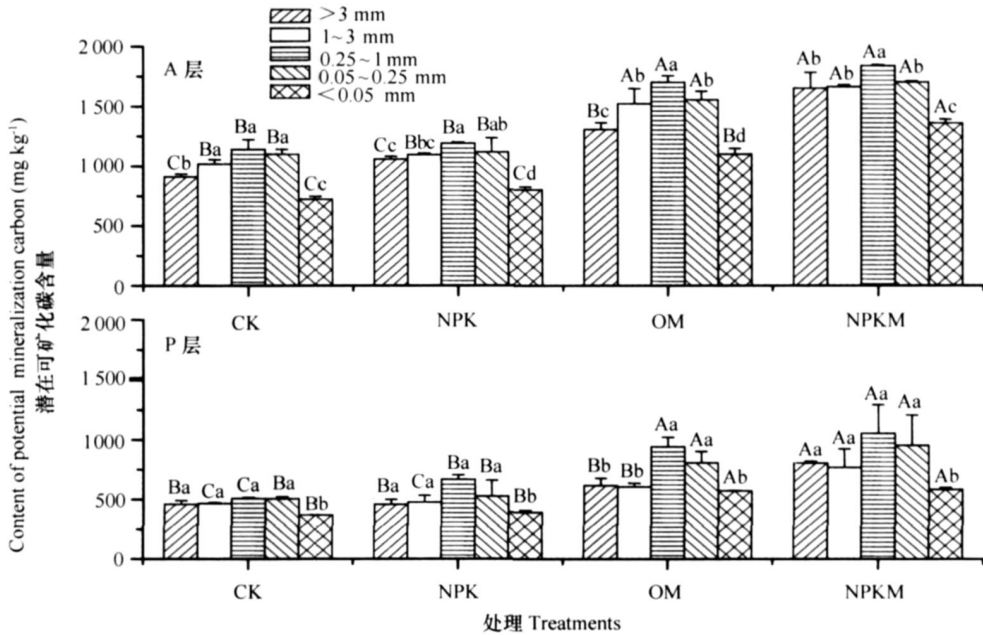


图1 长期施肥对土壤团聚体潜在可矿化碳含量的影响

Fig.1 Effects of long-term fertilization on content of PMC in soil aggregates

注:1)图中如大写字母不同,表示同发生层同粒径团聚体各处理间的差异显著($p < 0.05$,邓肯法) Different capital letters signify significant difference between treatments in PMC content in soil aggregates of the same size in the same horizon according to Duncan's multiple range test ($p < 0.05$); 2)图中如小写字母不同,则表示同处理团聚体间差异显著($p < 0.05$,邓肯法) Different lowercase letters signify significant difference between aggregates of different size fractions in the same treatment according to Duncan's multiple range test ($p < 0.05$)

A、P 两层同粒级团聚体不同施肥处理潜在可矿化碳含量顺序均为: NPKM > OM > NPK > CK, 且 NPKM、OM 处理和 NPK、CK 处理之间差异显著($p < 0.05$),这说明长期施用有机肥能显著提高表层土壤团聚体潜在可矿化碳含量;而 NPK 处理大于 CK 处理,则说明长期施用化学肥料也会提高土壤团聚体潜在可矿化碳,可能是施用化学肥料促进作物根系的生长,大量留田茬提高了微生物的活性,加速了土壤原有的和新鲜的有机物质的分解、矿化^[15]。

土壤可矿化碳可以指示土壤中微生物群落的数量与有机碳的生物活性^[20]。土壤呼吸是指土壤释放 CO₂ 的过程,主要是由微生物氧化有机质和根系呼吸产生,另有极少部分是由土壤动物和化学氧化释放。土壤呼吸又是土壤碳的主要输出途径之一,土壤呼吸产生的 CO₂ 是土壤对 CO₂ 源效应的主要途径,它主要表现为土壤有机碳因矿化发生向大气的 CO₂ 逸失,土壤碳转移的趋势主要表现为源效应的增强^[21]。

21112 长期施肥对土壤团聚体可溶性有机碳的影响 可溶性有机碳吸附和迁移能力受土地利用和

管理的影响明显,是影响可溶性有机碳数量和质量的主要因素^[22],尤其是土壤表层^[23, 24]。图 2 表明,各处理中,A 层的团聚体可溶性有机碳含量大于 P 层。Zsolnay 和 Gorlitz^[24] 也认为施厩肥后土壤表层可溶性有机碳增加明显,但对亚表层和心土层影响不大。Christ 等的研究结果显示,DOC 保存于土壤的矿物质吸附相^[25]。在本研究中,土壤团聚体 DOC 平均约占土壤团聚体有机碳库的 0.12%~1%,犁底层土壤团聚体也有相对较高含量的 DOC 存在,这也可能说明供试土壤中存在 DOC 向剖面底部的迁移与吸附保持,因这些土壤深层可能富含黏土矿物等无机吸附相^[25]。

同发生层不同粒级团聚体中可溶性有机碳含量因粒径而异(图 2),从团聚体粒径 > 3 mm 至 0.105~0.125 mm,团聚体粒径愈细,可溶性有机碳含量愈高,以 0.105~0.125 mm 粒径可溶性有机碳含量最高,而 < 0.105 mm 团聚体中可溶性有机碳含量低于其他粒径土壤团聚体。A、P 两层同一粒级团聚体不同施肥处理可溶性有机碳含量顺序均为: NPKM > OM >

NPK > CK, 且 OM 与 NPKM 处理之间各粒级团聚体无显著差异, 但 OM、NPKM 处理远大于 CK、NPK 处理, 且它们之间有显著差异 ($p < 0.05$), 这说明施加有机肥能显著提高土壤团聚体可溶性有机碳含量, 特别是猪粪由于其自身含较高的可溶性有机物和分解较快的特点, 施猪粪后可溶性有机碳快速上

升^[26], 而有机) 无机配施更能增加土壤可溶性有机碳的含量, 主要是因为加入的有机物质在腐解过程中能够释放大量的水溶性有机碳的缘故^[27, 28]; NPK 处理和 CK 处理之间差异也显著 ($p < 0.05$), 虽然施无机肥对可溶性有机碳有一定影响, 但增加幅度不如施加有机肥明显^[24, 29, 30]。

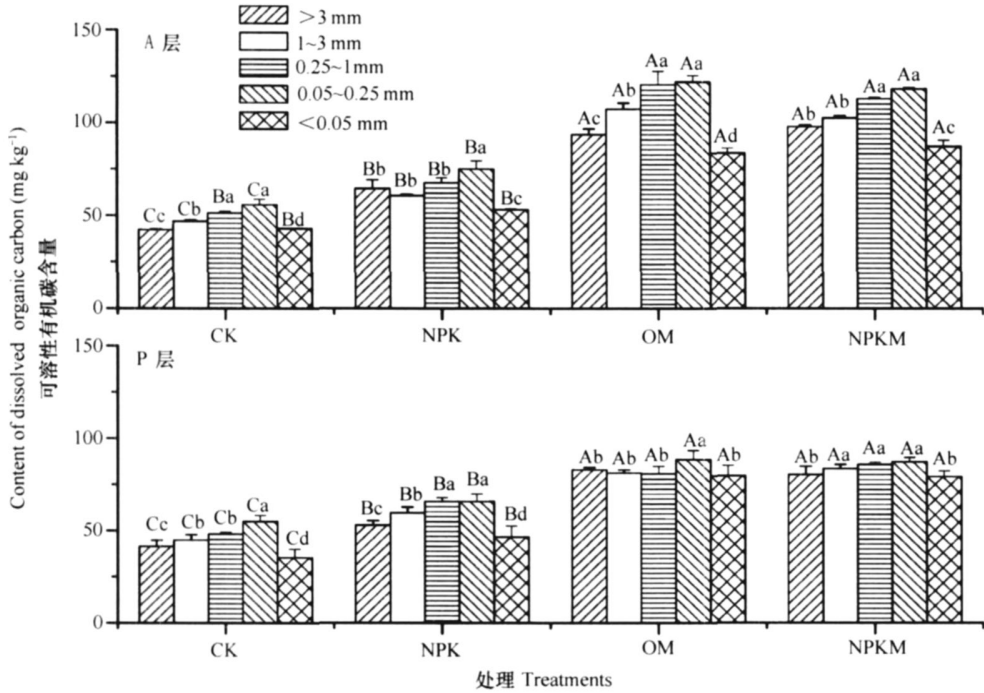


图2 长期施肥对土壤团聚体可溶性有机碳含量的影响

Fig 2 Effects of long-term fertilization on the content of DOC in soil aggregates

212 长期施肥条件下土壤团聚体潜在可矿化碳、可溶性有机碳与土壤团聚体有机碳的相关性分析

土壤团聚体潜在可矿化碳、可溶性有机碳和土壤团聚体有机碳^[18]之间的相关性如表 2 所示。表 2 结果表明, 不同施肥处理 A 层土壤团聚体潜在可矿化碳、可溶性有机碳与土壤团聚体有机碳均呈极显著正相关; P 层除 1~ 3 mm 团聚体外均呈显著正相关, 说明了土壤活性有机碳很大程度上依赖有机碳总贮量, 在一定程度上表征了土壤中活性较高部分的碳含量。相关分析表明, 潜在可矿化碳、可溶性有机碳是反映土壤碳素动态变化灵敏而有效的指标, 该指标为培肥地力、增加土壤活性有机碳含量提供了量化依据^[14]。它们也均是表征土壤碳平衡和土壤生物学肥力的理想指标。因此, 在土壤肥力及环境的可持续管理中团聚体潜在可矿化碳、可溶性有机碳与土壤团聚体有机碳相关性值得重视和采用。

213 长期施肥对土壤团聚体活性有机碳占土壤团聚体有机碳比率的影响

土壤有机碳是土壤有机质的重要组成。土壤活性有机碳库在调节土壤碳素和养分流向方面有重要作用, 对农业生产管理措施反应明显, 与土壤潜在生产力关系密切^[31, 32]。土壤潜在可矿化碳和土壤可溶性有机碳含量是反映土壤有机质的重要指标, 是土壤有效碳库的重要内容, 对评价土壤有机质和土壤肥力状况有着重要意义^[31]。土壤团聚体活性有机碳占团聚体有机碳的比率比团聚体活性有机碳总量更能反映长期施肥对土壤团聚体碳行为的影响结果。根据图 1、图 2 和土壤团聚体有机碳含量^[14]可得到表 3, 表 3 列出了土壤团聚体潜在可矿化碳及可溶性有机碳占土壤团聚体有机碳的比率, 分别用 R_1 、 R_2 表示。

表 3 表明, 同施肥处理 A 层的土壤团聚体活性有机碳占团聚体有机碳的比率 R_1 、 R_2 大于 P 层, 且两层之间差异显著 ($p < 0.05$)。而潜在可矿化碳占

团聚体有机碳的比率(R_1)较可溶性有机碳占团聚体有机碳的比率(R_2)大,且差异显著($p < 0.001$)。

同施肥处理同发生层不同粒级团聚体中土壤团聚体潜在可矿化碳占团聚体有机碳的比率因粒径而异。潜在可矿化碳占团聚体有机碳的比率(R_1)从团聚体粒径 $> 3 \text{ mm}$ 至 $0.125 \sim 1 \text{ mm}$, 团聚体粒径愈细比

率愈高,以 $0.125 \sim 1 \text{ mm}$ 粒径最高,但当团聚体 $< 0.125 \text{ mm}$ 时,比率随着粒径的减小而减小;可溶性有机碳占团聚体有机碳的比率(R_2)从团聚体粒径 $> 3 \text{ mm}$ 至 $0.105 \sim 0.125 \text{ mm}$, 团聚体粒径愈细比率愈高,以 $0.105 \sim 0.125 \text{ mm}$ 粒径最高,但当团聚体 $< 0.105 \text{ mm}$ 时,比率随着粒径的减小而减小。

表 2 长期施肥条件下土壤团聚体潜在可矿化碳、可溶性有机碳和团聚体有机碳之间的相关性

Table 2 Correlations of potential mineralization carbon and dissolved organic carbon with soil organic carbon in soil aggregates in the soil under long-term fertilization

碳形态 Carbon patterns	发生层 Horizons	粒级 Size fraction	潜在可矿化碳 Potential mineralization carbon					可溶性有机碳 Dissolved organic carbon				
			> 3	$1 \sim 3$	$0.125 \sim 1$	$0.105 \sim 0.125$	< 0.105	> 3	$1 \sim 3$	$0.125 \sim 1$	$0.105 \sim 0.125$	< 0.105
团聚体有 机碳 Organic carbon of aggregates	A	> 3	0.905 5*					0.919 5*				
		$1 \sim 3$	0.999 6*					0.937 5*				
		$0.125 \sim 1$	0.988 2*					0.961 6*				
		$0.105 \sim 0.125$	0.983 4*					0.936 2*				
		< 0.105	0.995 6*					0.873 9*				
	P	> 3	0.626 8*					0.954 9*				
		$1 \sim 3$	0.476 8					0.886 9*				
		$0.125 \sim 1$	0.808 5*					0.919 7*				
		$0.105 \sim 0.125$	0.646 1*					0.928 1*				
		< 0.105	0.562 6*					0.680 1*				

* $r_{0.01} = 0.1708$, $r_{0.105} = 0.578$

不同施肥处理 A、P 层同粒径团聚体活性有机碳占团聚体有机碳的比率都表现出: $\text{NPKM} > \text{OM} > \text{NPK} > \text{CK}$, 因此长期施肥,特别是有机肥与无机肥配施能提高各粒径团聚体活性有机碳占团聚体有机碳的比率。

2.1.4 长期施肥对土壤团聚体有机碳稳定性的影响

虽然存在大量的研究,但团聚体对有机碳稳定性的保护机制仍不很清楚。温带地区的研究表明,有机碳受到保护依次降低的顺序为:黏土粉砂粒,微团聚体($< 0.125 \text{ mm}$),大团聚体($> 0.125 \text{ mm}$)^[33]。虽然大团聚体保护的碳的活性要高于微团聚体已受到公认,但大团聚体在周转过程中可能包裹一些来自于微团聚体破坏释放的有机物及来自于植物微生物释放的难降解物质。总之,由于大团聚体的周转、有机物分解过程的连续性受土壤颗粒保护的干扰,及其他来自植物、动物和环境因素的影响,实际上团聚体保护的有机碳性质非常复杂^[34]。

表 3 表明,同处理同发生层土壤团聚体活性碳占团聚体有机碳的比率从大到小的顺序为: $0.125 \sim 1 \text{ mm}$ 、 $1 \sim 3 \text{ mm}$ 、 $> 3 \text{ mm}$ 、 $0.105 \sim 0.125 \text{ mm}$ 、 $< 0.105 \text{ mm}$ (由于潜在可矿化碳含量远大于可溶性有机碳含量,本研究中只考虑潜在可矿化碳的影响),大团聚体($> 0.125 \text{ mm}$)的活性有机碳占团聚体有机碳的比率

大于微团聚体($< 0.125 \text{ mm}$),因此微团聚体中碳的稳定性要较大团聚体高。由于管理措施(施肥和农事操作)的实施,土壤团聚体不断地形成和破坏,因此只有当团聚体的稳定性最大而周转速率最慢时对有机碳的保护才能最强,所以,微团聚体较大团聚体的作用应该更大。Puget 等估计大团聚体内有机碳的寿命只有几年,而微团聚体内的可以达到 1 个世纪^[2]。而 Six 等也认为有机碳在微团聚体中能够稳定较长的时间^[35]。Conant 等的数据也进一步表明微团聚体对碳的保护能力较大团聚体强^[36]。

从表 3 可知,长期施肥,特别是有机肥与无机肥配施能提高各粒径团聚体活性有机碳占团聚体有机碳的比率、团聚体潜在可矿化碳占团聚体有机碳的比率;NPKM 处理较对照(CK 处理)提高了 13%~28%,即提高了土壤团聚体有机碳活性。有研究表明,施肥等干扰措施的影响首先在大团聚体的数量和碳含量中表现出来,而微团聚体在干扰后对碳的保护维持较高水平^[37-39]。土壤团聚体活性有机碳含量的变化受有机肥施入情况的影响,随着有机肥的施入,土壤团聚体活性有机碳明显增多,有机肥与无机肥配合施用增加最显著。说明施肥尤其有机肥与化肥(NPK)配施,更有助于土壤团聚体活性有机碳的增加,从而保持和提高土壤碳库质量。

表3 长期施肥对土壤团聚体活性有机碳占土壤团聚体有机碳比率的影响

Table 3 Effects of different fertilization on percentages of different labile organic carbon to total soil organic carbon in soil aggregates in red paddy soil

处理 Treatments	发生层 Horizons	土壤团聚体活性有机碳占土壤团聚体有机碳比率 ¹⁾ Percentages of different labile organic carbon to total soil organic carbon of aggregates (%)									
		R ₁					R ₂				
		> 3	1~ 3	0.125~ 1	0.05~ 0.125	< 0.05	> 3	1~ 3	0.125~ 1	0.05~ 0.125	< 0.05
CK	A	51.48c	51.53c	51.67c	41.99bc	41.80c	01.46c	01.50b	01.52b	01.53c	01.43c
NPK		51.68bc	51.69bc	51.79bc	51.10b	51.07b	01.48c	01.51b	01.52b	01.54bc	01.46c
OM		51.85b	51.91b	61.05b	51.60a	51.49a	01.53b	01.58a	01.59a	01.61a	01.51b
NPKM		61.25a	61.30a	61.62a	51.72a	51.53a	01.61a	01.62a	01.63a	01.65a	01.57a
CK	P	41.28e	41.72d	51.11d	41.14e	41.10d	01.25e	01.26d	01.27e	01.40d	01.23e
NPK		41.35e	41.86d	51.31d	41.31d	41.14d	01.32d	01.34c	01.36d	01.49c	01.29d
OM		41.98d	51.55c	51.78bc	41.67c	41.72c	01.45c	01.42c	01.47b	01.55b	01.40c
NPKM		51.38c	51.75bc	51.80bc	51.26b	51.13b	01.41c	01.45c	01.49b	01.59b	01.40c

1) R₁= 团聚体潜在可矿化碳 @100/ 团聚体有机碳, R₂= 团聚体可溶性有机碳 @100/ 团聚体有机碳。表中各列小写字母如不相同,表明各处理之间差异显著(p < 0.05, 邓肯法) R₁= Potential mineralization carbon of aggregates @100/ Organic carbon of aggregates, R₂= Dissolved organic carbon of aggregates @100/ Organic carbon of aggregates! Different lowercase letters in each column signify significant difference between treatments according to Duncan's multiple range test (p < 0.05)

3 结 论

1) 土壤团聚体潜在可矿化碳含量和可溶性有机碳含量均随深度的增加而降低。长期施用肥料,特别是施有机肥能提高土壤团聚体潜在可矿化碳和可溶性有机碳含量。

2) 土壤团聚体潜在可矿化碳含量和潜在可矿化碳占团聚体有机碳比率从粒径 > 3 mm 至 0.125~ 1 mm, 团聚体粒径愈细就愈高, 以 0.125~ 1 mm 粒径为最高, 但当团聚体 < 0.125 mm 时, 随着粒径的减小而减小。可溶性有机碳含量和可溶性有机碳占团聚体有机碳比率从粒径 > 3 mm 至 0.105~ 0.125 mm, 团聚体粒径愈细含量愈高, 以 0.105~ 0.125 mm 粒径含量最高, 而 < 0.105 mm 团聚体低于其他粒径土壤团聚体。

3) 不同施肥处理 A 层土壤团聚体潜在可矿化碳、可溶性有机碳与土壤团聚体有机碳均呈极显著正相关; P 层除 1~ 3 mm 团聚体外也均呈显著正相关。

4) 土壤微团聚体中碳的稳定性要较大团聚体高。长期施肥, 特别是有机肥与无机肥配施能提高土壤团聚体有机碳活性。

参 考 文 献

[1] Tisdall J M, Oades J M. Organic matter and water stable aggregates.

Journal of Soil Science, 1982, 33: 141~ 163

- [2] Puget P, Chenu C, Balesdent J. Dynamics of soil organic matter as associated with particle size fractions of water stable aggregates. European Journal of Soil Science, 2000, 51: 595~ 605
- [3] Monreal CM, Schnitzer M, Schulten H R, et al. Soil organic structures in macro and micro aggregates of a cultivated Brown Chernozem. Soil Biology & Biochemistry, 1995, 27: 845~ 853
- [4] Dexter A R. Advances in characterization of soil structure. Soil & Tillage Research, 1988, 11: 199~ 238
- [5] 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
- [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] 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
- [8] Wright A L, Hons F M. Carbon and nitrogen sequestration and soil aggregation under sorghum cropping sequences. Biology and Fertility Soils, 2004, 43: 265~ 272
- [9] Jastrow J D, Boutton T W, Miller R M. Carbon dynamics of aggregate associated organic matter estimated by ¹³C natural abundance. Soil Science Society of America Journal, 1996, 60: 801~ 807
- [10] Wander M M, Traina S J, Sinner B R, et al. The effects of organic and conventional management on biologically active soil organic matter fraction. Soil Science Society of America Journal, 1994, 58:

- 1 130~ 1 139
- [11] Post WM, Kwonk C. Soil carbon sequestration and land use change: Processes and potential. *Global Change Biology*, 2000, 6: 317~ 327
- [12] Parton W J, Schimel D S, Cole C V. Analysis of factors controlling soil organic matter levels in great plains grasslands. *Soil Science Society of America Journal*, 1987, 51: 1 173~ 1 179
- [13] Bradley R L, Fyles J W. A kinetic parameter describing soil available C and its relationship to rate increase in C mineralization. *Soil Biology & Biochemistry*, 1995, 27(2): 167~ 172
- [14] 沈宏, 曹志洪. 不同农田生态系统土壤碳库管理指数的研究. *生态学报*, 2000, 20(4): 663~ 668. Shen H, Cao ZH. Study on soil C pool management index of different farmland ecosystems (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20(4): 663~ 668
- [15] 沈宏, 曹志洪. 长期施肥对不同农田生态系统土壤有效碳库及碳素有效率的影响. *热带亚热带土壤科学*, 1998, 7(1): 1~ 5. Shen H, Cao ZH. Effects of long term fertilization on soil available carbon pool and available ratio of soil carbon under different agroecosystems (In Chinese). *Tropical and Subtropical Soil Science*, 1998, 7(1): 1~ 5
- [16] 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 ZH, Xu ZH. Effects of fertilization on different carbon fractions and carbon pool management index in soils (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2000, 37(2): 166~ 173
- [17] 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
- [18] 李辉信, 袁颖红, 黄欠如, 等. 不同施肥处理对红壤水稻土团聚体有机碳分布的影响. *土壤学报*, 2006, 43(3): 422~ 429. Li H X, Yuan YH, Huang QR, et al. Effects of fertilization on soil organic carbon distribution in various aggregates of red paddy soil (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(3): 422~ 429
- [19] 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 Agricultural chemistry* (In Chinese). Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1999
- [20] Gregorich E G, Janzen H H. Microbial mediated processes: Decomposition. In: Summer M E. ed. *Handbook of Soil Science*. Boca Raton/London/New York/Washington D C, 2000. 107~ 119
- [21] 魏秀国, 沈承德, 李定强, 等. 珠江流域土壤中碳库的存量与通量. *生态环境*, 2004, 13(4): 670~ 673. Wei X G, Shen C D, Li D Q, et al. The inventory and fluxes of carbon in soil of Pearl River basin (In Chinese). *Ecology and Environment*, 2004, 13(4): 670~ 673
- [22] Chantigny M H. Dissolved and water extractable organic matter in soils: A review on the influence of land use and management practices. *Geoderma*, 2003, 113: 357~ 380
- [23] Kalbitz K, Solinger S, Park J H, et al. Controls on the dynamics of dissolved organic matter in soils: A review. *Soil Science*, 2000, 165(4): 277~ 304
- [24] Zsolnay A, Gollitz H. Water extractable organic matter in arable soils: Effects of drought and long term fertilization. *Soil Biology & Biochemistry*, 1994, 26: 1 257~ 1 261
- [25] Christ M J, David M B. Dynamics of extractable organic carbon in spodosol forest floor. *Soil Biology & Biochemistry*, 1997, 28: 1 171~ 1 179
- [26] Gregorich E G, Ellert B H, Drury C F, et al. Fertilization effects on soil organic matter turnover and corn residue C storage. *Soil Science Society of America Journal*, 1996, 60: 472~ 476
- [27] Liang B C, Mackenzie A F, Schnitzer M, et al. Management induced change in labile soil organic matter under continuous corn in eastern Canadian soils. *Biology and Fertility of Soils*, 1998, 26: 88~ 94
- [28] Chantigny M H, Angers D A, Prevost D, et al. Dynamics of soluble organic C and C mineralization in cultivated soils with varying N fertilization. *Soil Biology & Biochemistry*, 1999, 31: 543~ 550
- [29] Rochett P, Gregorich E G. Dynamics of soil microbial biomass C, soluble organic C and CO₂ evolution after three years of manure application. *Canadian Journal of Soil Science*, 1998, 78: 283~ 290
- [30] Yano Y, McDowell W H, Aber J D. Biodegradable dissolved organic carbon in forest soil solutions and effects of chronic nitrogen deposition. *Soil Biology & Biochemistry*, 2000, 32: 1 743~ 1 751
- [31] Hassink J. Relationship between the amount and the activity of the microbial biomass in Dutch grassland soils: Comparison of the substrate incubation method and the substrate induced respiration method. *Soil Biochemistry*, 1993, 25(5): 533~ 538
- [32] 周国模, 姜培坤. 不同植被恢复对侵蚀型红壤活性碳库的影响. *水土保持学报*, 2004, 18(6): 68~ 70. Zhou G M, Jiang P K. Changes in active organic carbon of erosion red soil by vegetation recovery (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2004, 18(6): 68~ 70
- [33] Carter M R. Soil quality for sustainable land management: Organic matter and aggregation interactions that maintain soil function. *Agronomy Journal*, 2002, 94: 38~ 47
- [34] Six J, Bossuyt H, Degryze S, et al. A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil and Tillage Research*, 2004, 79: 7~ 31
- [35] Six J, Callewaert P, Lenders S, et al. Measuring and understanding carbon storage in afforested soils by physical fractionation. *Soil Science Society of America Journal*, 2002, 66: 1 981~ 1 987
- [36] Conant R T, Six J, Paustian K. Land use effects on soil carbon fractions in the southeastern United States. II Changes in soil carbon fractions along a forest to pasture chronosequence. *Biology and Fertility of Soils*, 2004, 40: 194~ 200
- [37] Beare M H, Cabrera M L, Hendrix P F, et al. Aggregate protected and unprotected organic matter pools in conventional and no tillage soils. *Soil Science Society of America Journal*, 1994, 58: 787~ 795
- [38] Elliott E T. Aggregate structure and carbon, nitrogen and phosphorus in native and cultivated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 1986, 50: 627~ 633
- [39] Six J, Paustian K, Elliott E T, et al. Soil structure and organic matter: I. Distribution of aggregate size classes and aggregate associated carbon. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, 64: 681~ 689

EFFECTS OF LONG-TERM FERTILIZATION ON LABILE ORGANIC CARBON IN SOIL AGGREGATES IN RED PADDY SOIL

Li Huixin¹ Yuan Yinghong² Huang Qianru³ Hu Feng¹ Pan Genxing¹ Fan Houbao²

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

(2 Research Institute of Ecology and Environmental Sciences, Nanchang Institute of Technology, Nanchang 330099, China)

(3 Jiangxi Institute of Red Soil, Jinxian, Jiangxi 331717, China)

Abstract A long-term field experiment has been carried out for 23 years in Jinxian County Institute of Red Soil in Jiangxi Province (116°20'24"E, 28°15'30"N). One of the aims of the experiment is to study effects of long-term fertilization on labile organic carbon pool in soil aggregates in red paddy soil. It is designed to have the following treatments, i.e. 1) Zero fertilization (CK), 2) chemical fertilizers alone (NPK), 3) organic fertilizers alone (OM), and 4) combination of chemical and organic fertilizers (NPKM). Results show that content of labile organic carbon in soil aggregates decreased with soil depth. Long-term application of fertilizer, especially in Treatment NPKM, increased content of labile organic carbon in soil aggregates, thus preserving and improving quality of the soil carbon pool. Content of labile organic carbon and percentage of soil labile organic carbon to total soil organic carbon differed between aggregates different in size fraction. In terms of content of potential mineralization carbon (PMC) and percentage of PMC to total soil organic carbon, aggregate size fractions followed a decreasing order of 0.125~1 mm, 1~3 mm, > 3 mm, 0.105~0.125 mm, and < 0.105 mm, whereas in terms of percentage of content of dissolved organic carbon (DOC) to total soil organic carbon, they did a decreasing one of 0.105~0.125 mm, 0.125~1 mm, 1~3 mm, > 3 mm, and < 0.105 mm. Contents of PMC and DOC in aggregates were significantly related to content of SOC ($p < 0.01$) in A horizons of all treatments, and in soil P horizon as well, except for the size fraction of 1~3 mm ($p < 0.05$). Microaggregates (< 0.125 mm) was higher than macroaggregates (> 0.125 mm) in stability.

Key words Long-term fertilization; Red paddy soil; Soil aggregates; Potential mineralization carbon; Dissolved organic carbon