

长期施肥下水稻土有机碳固持形态与特征

徐香菇^{1,2}, 蔡岸冬², 徐明岗², 汪景宽^{1*}, 张文菊^{2*}

(1.沈阳农业大学土地与环境学院, 沈阳 110161; 2.中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081)

摘要: 基于为期 30 年的红壤性水稻土长期定位试验, 选用不施肥(CK)、化肥氮磷钾配施(NPK)、NPK 配施低量有机肥(NPKM7/3)、NPK 配施中量有机肥(NPKM5/5)、NPK 配施高量有机肥(NPKM3/7)五个处理, 通过物理-化学联合分组方法, 分析土壤有机碳在不同施肥处理下的非保护、物理、化学、生化、物理-化学及物理-生化保护组分的碳含量特征及其与土壤总有机碳之间的关系, 并探讨稻田土壤有机碳的固持机制。结果表明, 除了非保护的轻组和微团聚体内闭蓄态的粘粉粒组分外, 其他组分的质量比例在各施肥处理间均有显著性差异。有机无机配施(NPKM7/3、NPKM5/5、NPKM3/7)下, 总有机碳含量($19.1\sim 25.0\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)、非保护的粗颗粒有机碳(cPOM)含量($8.41\sim 12.7\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)及物理保护的微团聚体有机碳($6.41\sim 6.62\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)含量均显著高于 CK 处理($P<0.05$)。对化学、生化、物理-化学及物理-生化保护态的有机碳含量无显著性影响, 表明非保护的 cPOM 及物理保护的微团聚体(μagg)对施肥的响应最敏感。相关分析表明, cPOM、物理保护的 μagg 及其闭蓄的细颗粒有机碳(iPOM)与土壤总有机碳含量之间呈显著正相关关系($P<0.05$), 相关方程的斜率表明有机碳变化引起了组分变化, 其中: 土壤总有机碳变化引起的 cPOM 变化率最高(50%); 土壤总有机碳积累引起物理保护的 μagg 及其闭蓄的 iPOM 碳组分变化率为 12%; 生化保护的非酸解粘粒和物理-化学保护的酸解的粉粒虽与土壤总有机碳显著相关, 其变化率仅为 2%~3%; 其他各保护机制下的组分与土壤总有机碳含量均无显著相关关系。这表明在现行种植和管理制度下, 供试红壤性水稻土有机碳主要以 cPOM 及 μagg 有机碳的形式积累, 土壤化学、生化、物理-化学及物理-生化保护碳组分可能已经达到平衡。

关键词: 有机碳; 组分; 稳定机制; 水稻土; 土壤碳固定

中图分类号: S153.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2015)04-0753-08 **doi:** 10.11654/jaes.2015.04.021

Characteristics of Organic Carbon Stabilization in Paddy Soil Under Long-term Different Fertilization

XU Xiang-ru^{1,2}, CAI An-dong², XU Ming-gang², WANG Jing-kuan^{1*}, ZHANG Wen-ju^{2*}

(1.College of Land and Environment, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110161, China; 2.Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: Understanding the mechanisms of soil organic carbon (SOC) stabilization would help improve soil carbon sequestration in paddy soil. In this paper, we obtained paddy soils from a 30 year experimental field under five different fertilization, including no fertilizer (control), mineral nitrogen (N)-phosphorus (P)-potassium (K) fertilizers (NPK), 70% mineral N + 30% organic N plus PK (NPKM7/3), 50% mineral N + 50% organic N plus PK (NPKM5/5), and 30% mineral N + 70% organic N plus PK (NPKM3/7). Organic N was provided from green manure and pig manure. The soils were subjected to separating unprotected, and physically, chemically, bio-chemically, physical-chemically, and physical-biochemically protected SOC fractions by a physical-chemical combined fractionation method. Except the unprotected light fraction and the occluded silt and clay-sized fraction, the mass proportion of all other SOC fractions was significantly different between the treatments. Compared with non-fertilization (CK) treatment, chemical fertilizers mixed with organic manure (NPKM7/3, NPKM5/5 and NPKM3/7) significantly increased the content of total SOC ($19.1\sim 25.0\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$), unprotected coarse particulate organic carbon (cPOM) ($8.41\sim 12.7\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$), and physically protected aggregate (μagg) organic carbon ($6.41\sim 6.62\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) in red paddy soil ($P<0.05$). There were no significant differences for the chemically, biochemically, physical-chemically and physical-biochemically protected fractions between the five treatments. These results indicated that the unprotected cPOM and the physically protected μagg fractions were the most sensitive

收稿日期: 2014-11-26

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41371247); 中央级公益性科研院所专项资金资助项目(IARRP-2014-28)

作者简介: 徐香菇(1990—), 女, 硕士研究生, 研究方向土壤肥力。E-mail: xuxiangru0000@sina.com

* 通信作者: 张文菊 E-mail: zhangwenju01@caas.cn; 汪景宽 E-mail: j-kwang@163.com

ones in long-term fertilization. There was a linear positive correlation between total SOC and μagg , physically protected μagg , and occluded POM inside the μagg (iPOM) fraction ($P < 0.05$), and their response efficiency to total SOC accumulation (the slope of the regression) was 0.5, 0.12, and 0.12 respectively. However, the response efficiency of non-hydrolysis clay and physico-chemically protected silt fraction to total SOC accumulation was only 0.02 to 0.03, even though they had significant responses. There was no significant relationship of the rest fractions with total SOC. Under the present cropping and management practices, cPOM and micro-aggregates were the main stabilization mechanisms for soil carbon sequestration. Soil physically, chemically, biological-chemically and physical-biochemically protected SOC fractions might have reached the maximum capacity in this paddy soil.

Keywords: soil organic carbon; fractionation; stabilization mechanism; paddy soil; carbon sequestration

作为土壤肥力与质量的核心,土壤有机碳一直是评价人为管理措施对土壤肥力与质量影响的重要指示性指标^[1],在全球变化的背景下越来越多的受到人们的关注^[2-5]。水稻土是一类经过长期特殊人为管理而形成的土壤类型,占全国耕地总面积的 1/4^[6],不仅对我国的粮食生产和粮食安全具有重要作用,而且被认为是我国重要的土壤碳汇^[7]。因此,了解和掌握稻田土壤有机碳的固持形态对于深刻理解农田土壤的固碳机制具有重要意义。

由于土壤中不同组分有机碳具有不同的功能和性质,对土壤有机碳的稳定和积累起到的作用不尽相同^[8],土壤有机碳的分组技术是研究土壤质量的重要手段^[9]。Six 等^[10]基于土壤颗粒和有机质性质提出了土壤有机碳物理-比重分组技术,此方法被广泛应用于土壤有机碳的质量变化研究中^[11-12]。周萍等^[13]利用超声波分散法研究发现,水稻土团聚体颗粒中,土壤有机碳含量在 2000~200 μm 的粗团聚体和 <2 μm 粒组中最高,粗团聚体随不同耕作和施肥等长期处理的变化最为强烈,团聚体更新中物理保护的有机碳在细团聚体形成中进一步与氧化铁铝的键合是水稻土中有机碳积累并稳定的重要机制。但长期试验的分析表明,水稻土有机碳含量随着系统碳投入的增加表现出非线性的响应模式^[2]。Gulde 等^[14]利用物理分组方法表明长期施肥下土壤化学和物理保护中的有机碳容量是有限的。Stewart 等^[12]将团聚体中不同位置的有机碳组分分离出来,并补充了生物化学稳定碳组分的分离,其研究结果表明,具有低碳稳定潜力的土壤组分表现出了碳饱和的行为,粗颗粒有机碳与细颗粒有机碳组分与总有机碳含量为线性相关,酸解、非酸解粘粉粒组分有饱和现象的出现。该方法对于研究和评价土壤各组分有机碳对总有机碳含量的响应具有重要意义,但在水稻土中的应用目前还鲜有报道,需要进一步探讨水稻土不同保护机制下的碳组分与总有机碳之间的相关性。

本研究以江西南昌红壤水稻土 30 年的长期定位试验为基础,采用物理-化学联合分组方法,研究不同施肥模式下土壤不同碳组分的特征及其与土壤总有机碳之间的关系,探讨稻田土壤不同有机碳组分的固持形态与特征,以期对稻田土壤培肥和可持续的土壤有机碳管理措施的选择提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

本研究中土壤样品采自红壤性水稻土长期定位试验场,位于江西省南昌市江西省农业科学院试验农场内(116°20'24"E, 28°15'30"N)。该区域地处中亚热带,年平均气温 17.5 °C, ≥ 10 °C 积温 5400 °C,年平均降雨量 1600 mm,年蒸发量 1800 mm,无霜期约为 280 d。该定位试验场建于 1983 年,1984 年开始种植早稻,采用稻-稻-冬闲的种植方式。试验前土壤的基本性质为:有机碳含量 14.85 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全氮、全磷分别为 1.36、0.49 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, pH 6.5。小区面积 33.3 m^2 ,每个处理三次重复,随机区组排列。

本研究选取该长期试验的 5 个不同的典型施肥处理:不施肥(CK);化肥氮磷钾配施(NPK);NPK 配施低量有机肥(NPKM7/3);NPK 配施中量有机肥(NPKM5/5);NPK 配施高量有机肥(NPKM3/7)。上列后三项处理中总氮量(有机+无机)与 NPK 处理的施氮量相同,且无机氮与有机氮的比例分别为 7:3、5:5、3:7,具体施用量见表 1。早稻施纯 N 150 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 P_2O_5 60 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 K_2O 150 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,晚稻施纯 N 180 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 P_2O_5 60 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 K_2O 150 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。化肥种类分别为尿素、过磷酸钙、氯化钾。早稻有机肥用紫云英,其鲜草养分含量为 N 3.03 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 P_2O_5 0.8 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 K_2O 2.3 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$;晚稻用鲜猪粪,其养分含量为 N 4.5 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 P_2O_5 1.9 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 K_2O 6.0 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。磷肥和有机肥全作基肥;氮肥 50%作基肥,25%作分蘖肥,25%作幼穗分化肥;钾肥全作追肥,50%作分蘖肥,50%作幼穗分化肥。

2013 年 10 月水稻收割后,采集表层 0~20 cm 原状土样。每个小区内随机 5 点采集新鲜土样,完全混匀后装入布袋中。然后过 2 mm 筛,于室温保存。

1.2 分析方法

采用改进的 Stewart 等^[12]的物理化学联合分组方法:称取 20.000 g 风干土样置于 250 μm 孔径的筛子上,在恒定水流下,上下振动此装置 20 min,将所有释放出来的微团聚体冲刷到底部孔径为 53 μm 的筛子上。留在 250 μm 筛子上的是粗颗粒有机碳(cPOM),留在 53 μm 筛子上的是微团聚体(μagg),通过 53 μm 筛的部分为游离态的粘粉粒(<53 μm 、d-silt、d-clay)。

微团聚体用密度浮选法进行分离:将 35 mL 1.8 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 的碘化钠(NaI)溶液加入 50 mL 的离心管中,将上步得到的微团聚体(53~250 μm)转移至离心管中,经过 20 min 的平衡后,4000 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 离心 20 min,离心结束后,洗净的分散悬浮液为轻组(LF)。离心管底部重组部分加蒸馏水冲洗后加入 5 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的六偏磷酸钠分离,振荡 18 h,然后过 53 μm 筛。留在筛上的即为物理保护的细颗粒有机碳(iPOM),通过 53 μm 筛的部分也用离心法分离粘粉粒(μ -silt、 μ -clay)。

粘粉粒用离心法进行分离:将前两步所得粘粉粒

分别加入 25 mL 6 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 HCl 中,于 95 $^{\circ}\text{C}$ 水浴加热 16 h,悬浊液用 0.45 μm 滤膜过滤,并用去离子水冲洗,残留物质即为非酸解组分(NH-dsilt、NH-dclay、NH- μ silt、NH- μ clay)。酸解组分(H-dsilt、H-dclay、H- μ silt、H- μ clay)通过全组分和非酸解组分之差得到。将所有组分 60 $^{\circ}\text{C}$ 烘干至恒重,用千分之一精度天平称重。烘干后各组分磨细过 0.25 mm 筛,采用重铬酸钾法测定有机碳含量(精确到百分位)。室内分析时每个土壤样品按 3 次平行进行分析,以保证结果的重现性。

非保护的有机碳为粗的颗粒性有机碳和游离态的轻组,物理保护的为细自由颗粒有机碳和微团聚体部分,化学保护的为酸解的游离态粘粉粒部分,生化保护的为非酸解游离态粘粉粒部分,其中物理保护组分包含着多种保护机制,又可以细分为物理-化学保护组分[酸解微团聚体保护的粘粉粒(H- μ silt、H- μ clay)]和物理-生化保护库[非酸解微团聚体保护的粘粉粒(NH- μ silt、NH- μ clay)]。

1.3 数据分析

应用 Excel 2007 对试验数据进行处理,用 SPSS 19.0 对试验结果进行相关统计分析,不同处理间的差

表 1 红壤性水稻土不同处理肥料施用量

Table 1 Application rates of mineral fertilizers and organic amendments of relevant treatments of the long-term experiments in this rice-rice system

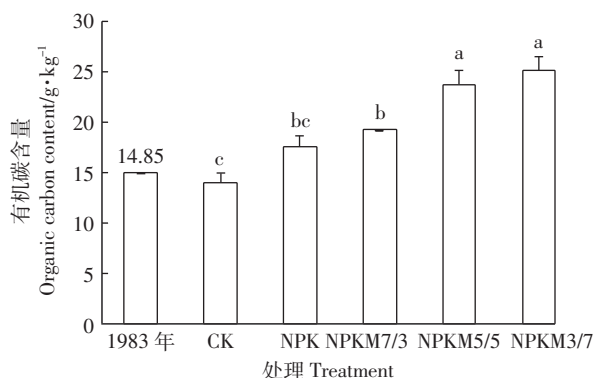
处理 Treatment	作物 Crop	无机氮 Mineral N/kg·hm ⁻²	无机磷 Mineral P/kg·hm ⁻²	无机钾 Mineral K/kg·hm ⁻²	紫云英 Green manure					猪粪 Pig manure				
					施用量 Application rate/ t·hm ⁻²	C/ g·kg ⁻¹	N/ g·kg ⁻¹	P/ g·kg ⁻¹	K/ g·kg ⁻¹	施用量 Application rate/ t·hm ⁻²	C/ g·kg ⁻¹	N/ g·kg ⁻¹	P/ g·kg ⁻¹	K/ g·kg ⁻¹
CK	早稻 Early rice	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	晚稻 Late rice	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NPK	早稻 Early rice	150	30	124	0	0	150	26.2	124.5	0	0	0	0	0
	晚稻 Late rice	180	30	124	0	0	0	0	0	0	0	180	26.2	124.5
NPKM7/3	早稻 Early rice	75	16	62	1.63	303	105	26.2	124.5	0	0	0	0	0
	晚稻 Late rice	90	10	62	0	0	0	0	0	1.91	236	126	26.2	124.5
NPKM5/5	早稻 Early rice	51	19	41	2.72	303	75	26.2	124.5	0	0	0	0	0
	晚稻 Late rice	69	3	41	0	0	0	0	0	3.18	236	90	26.2	124.5
NPKM3/7	早稻 Early rice	84	22	83	3.80	303	45	26.2	124.5	0	0	0	0	0
	晚稻 Late rice	126	17	83	0	0	0	0	0	4.45	236	54	26.2	124.5

异显著性水平采用 LSD 法进行检验。

2 结果与分析

2.1 红壤水稻土总有机碳含量特征

与 CK 处理相比,施肥 30 年后化肥配施有机肥处理显著增加了总有机碳含量,而单施化肥处理与 CK 差异不显著(图1)。NPKM7/3、NPKM3/7 和 NPKM5/5 处理下有机碳含量分别为19.1、25.0、23.6 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 分别比不施肥提高了38.1%、80.7%、70.5%。与单施化肥相比, NPKM3/7 和 NPKM5/5 显著增加了土壤有机碳含量,增幅分别为 43.0%和 34.9%,而 NPKM7/3 的增加不显著。与起始年份土壤有机碳(14.9 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)相比,施肥均能增加土壤总有机碳的含量,NPKM7/3、NPKM5/5、NPKM3/7、NPK 处理分别增加了 28.8%、58.9%、68.6%、17.9%,而不施肥处理降低了 7.22%。NPKM3/7 和 NPKM5/5 处理土



图中不同字母表示各处理间差异显著 ($P<0.05$)

Different letters above the bars indicate a significant difference between different treatments at 5% level

图1 施肥 30 年后红壤性水稻土总有机碳含量

Figure 1 Content of total organic carbon in red paddy soil after 30 years of fertilization

壤有机碳含量无显著差异,但其含量显著高于其他处理 ($P<0.05$)。

2.2 红壤性水稻土各组分的质量分布

红壤性水稻土各组分质量比例如表 2 所示。粗颗粒、游离态粉粒和微团聚体保护的粉粒所占比例较高,平均质量比例分别为 44.2%、18.8%、15.3%,轻组所占比例最低(0.04%~0.09%)。粗颗粒和游离的粘粒组分的质量比例在 NPK3/7 处理下最高,微团聚组分的质量比例在 NPK5/5 处理下最高,游离态粉粒组分的质量比例在 NPK 处理下最高。在化肥配施有机肥处理下,轻组和游离态粘粒组分的质量比例随总有机碳含量的增加而提高,而游离态粉粒、微团聚体保护的粘粒和细自由颗粒组分的质量比例随总有机碳含量的增加而下降。与 CK 相比,NPKM3/7 显著增加了粗颗粒(10.5%)和游离态粘粒(1.85%)组分的质量比例,而其余各组分的质量比例在各施肥处理之间无显著差异。

2.3 土壤各组分有机碳含量特征

由表 3 看出,30 年施肥处理后土壤各组分有机碳含量存在差异。对于非保护态,施用有机肥可显著提高土壤有机碳的含量。NPKM7/3、NPKM5/5、NPKM3/7 显著增加了粗颗粒有机碳的含量(8.41、9.26、12.74 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$),分别为 CK 的 1.54、1.70、2.34 倍。与不施肥相比,NPK 使粗颗粒有机碳含量增加了 7.20%,但处理间没有显著性差异。微团聚体外的轻组,各施肥处理有机碳含量没有显著差异。

物理保护态中微团聚体内的颗粒有机碳含量随着总有机碳含量的增加而增加,NPKM7/3 处理的有机碳含量最高,达 2.44 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,是 CK 的 2.62 倍。随着总有机碳含量的继续增加,细颗粒有机碳含量降低。各化肥与有机肥配施处理间无显著性差异。总的微团

表 2 长期不同施肥处理对土壤不同组分重量分数分布的影响(%)

Table 2 Distribution of different fractions in soil influenced by long-term different fertilizations (%)

处理 Treatment	粗颗粒> 250 μm (cPOM)	微团聚体 53~250 μm(μagg)						回收率 Recovery/%	游离态 粉粒 d-silt	游离态 粘粒 d-clay	回收率 Recovery/%
		微团聚体总量 Total micro- aggregate	各组分 Fractions								
			轻组 (LF)	细自由颗粒 (iPOM)	微团聚体内 粉粒(μ-silt)	微团聚体内 粘粒(μ-clay)					
CK	43.16±1.37b	32.72±3.78ab	0.04±0.02a	9.14±1.02ab	15.28±1.80a	5.25±0.80a	90.98	19.81±3.17ab	1.38±0.05b	97.05	
NPK	40.02±2.48b	32.78±5.19ab	0.04±0.03a	10.23±1.85ab	17.34±2.43a	4.21±1.27a	97.10	21.18±3.63a	1.89±0.84b	95.90	
NPKM7/3	43.32±1.94b	31.57±3.17ab	0.05±0.01a	12.99±2.15a	14.24±3.43a	4.27±0.76a	100.00	19.47±0.95ab	1.95±0.46b	96.25	
NPKM5/5	40.78±2.52b	34.05±3.92a	0.06±0.04a	11.95±4.36ab	17.20±1.05a	3.50±1.08a	96.04	19.51±6.30ab	2.41±0.48ab	96.75	
NPKM3/7	53.60±3.35a	22.25±0.19b	0.09±0.02a	6.71±0.27b	12.19±0.39a	3.42±0.21a	100.67	14.19±0.40b	3.23±1.08a	93.30	

注:表中同列数字后不同字母表示处理间在 5% 水平差异显著。

Note: Values in same column followed by a different letter are significant difference at 5% level among the treatments.

聚体组分在各施肥处理间无显著性差异,比对照处理有机碳含量有显著增加。

对于化学保护态,酸解游离态的粉粒有机碳含量范围为 $0.78\sim 1.67\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 占总有机碳含量的 $5.33\%\sim 7.96\%$; 酸解游离态粘粒有机碳含量范围为 $0.12\sim 0.22\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 占总有机碳含量的 $0.52\%\sim 1.34\%$ 。生化保护态各施肥处理间有机碳含量无显著性差异。非酸解游离态粉粒有机碳含量范围为 $1.56\sim 2.26\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 占总有机碳含量的 $6.23\%\sim 12.3\%$; 非酸解游离态粘粒有机碳含量范围为 $0.30\sim 0.79\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 占总有机碳含量的 $2.12\%\sim 3.16\%$ 。

物理-生化保护态和物理-化学保护态各施肥处理间,有机碳含量基本维持平衡,两个组分有机碳的变化趋势也有相似之处。酸解微团聚体内的粉粒施中量有机肥和高量有机肥的有机碳含量最高,平均为 $1.41\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 是不施肥处理的 2.01 倍。酸解微团聚体内的粘粒以 NPKM5/5 处理有机碳含量最高 ($0.23\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$), 是不施肥处理的 1.77 倍。非酸解微团聚体内的粉粒(NH- μ silt)各施肥处理间均无显著性差异。NH- μ silt 有机碳含量范围为 $1.50\sim 2.59\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 占总有机碳含量的 $8.39\%\sim 11.76\%$; 但非酸解微团聚体内的粘粒所有处理间均无显著性差异, 有机碳含量范围为 $0.94\sim 1.07\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 占总有机碳含量的 $4.12\%\sim 7.70\%$ 。

2.4 各组分有机碳与总有机碳含量的关系

相关分析表明,红壤性水稻土非保护态中粗颗粒有机碳含量与总有机碳的含量呈极显著正相关关系

($P<0.001$)。相关方程的斜率表示有机碳变化引起的组分变化,从图 2a 可以看出,总有机碳变化引起的粗颗粒有机碳变化最高,达到 50%,表明每增加一个单位($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)的土壤总有机碳,粗颗粒有机碳增加 50%。物理保护态中的细颗粒、微团聚体,生化保护态的 NH-dclay,物理-化学保护态的 H- μ clay 有机碳含量与总有机碳含量显著线性相关($P<0.05$)。细颗粒、微团聚体组分的方程斜率与 R^2 均相当,两条直线平行,变化率均为 12%,但土壤总有机碳变化引起 NH-dclay 及 H- μ clay 的增加仅为 2%~3%(图 2b、图 2d、图 2e)。其余组分与总有机碳的含量无显著相关关系。

3 讨论

施肥是影响土壤有机碳水平的重要因素之一,农田土壤碳平衡实际上是碳输入与碳输出的平衡。本研究通过 30 年的长期定位试验,证实了长期施用有机肥可以显著提高土壤有机碳水平。一方面在于它可以增加作物产量,Zhang 等^[2]研究表明,施肥可以显著提高红壤性水稻土的碳生物量,侯红乾等^[15]指出,有机无机肥配施,早晚稻平均产量比不施肥增产 $65.4\%\sim 71.5\%$,比施化肥增产 $3.9\%\sim 7.8\%$,因而相应增加了残茬还田量;另一方面因有机肥本身含有大量有机碳,直接提高了系统的碳输入量,因而土壤有机碳幅度较大^[16-18]。

本研究的结果表明,土壤各组分碳由于稳定形态

表 3 长期不同施肥处理各组分有机碳含量($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 土)

Table 3 Content of different organic carbon fraction in paddy soil under long-term fertilization($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ soil)

有机碳库 SOC pool	组分 Fraction	处理 Treatments				
		CK	NPK	NPKM7/3	NPKM5/5	NPKM3/7
非保护态 Unprotected	cPOM	$5.45\pm 0.41\text{c}$	$5.85\pm 0.76\text{c}$	$8.41\pm 1.16\text{b}$	$9.26\pm 0.37\text{b}$	$12.74\pm 0.87\text{a}$
	LF	$0.15\pm 0.07\text{a}$	$0.15\pm 0.47\text{a}$	$0.14\pm 0.02\text{a}$	$0.16\pm 0.04\text{a}$	$0.21\pm 0.02\text{a}$
物理保护态 Physically-protected	iPOM	$0.93\pm 0.10\text{c}$	$1.37\pm 0.21\text{bc}$	$2.44\pm 0.39\text{a}$	$1.93\pm 0.99\text{ab}$	$1.72\pm 0.08\text{abc}$
	μ agg	$4.37\pm 0.20\text{b}$	$5.90\pm 0.08\text{a}$	$6.62\pm 0.23\text{a}$	$6.41\pm 0.24\text{a}$	$6.46\pm 0.32\text{a}$
化学保护态 Chemically-protected	H-dsilt	$0.78\pm 0.11\text{b}$	$1.03\pm 0.19\text{b}$	$1.67\pm 0.30\text{a}$	$1.24\pm 0.33\text{b}$	$1.58\pm 0.55\text{ab}$
	H-dclay	$0.13\pm 0.01\text{a}$	$0.17\pm 0.02\text{a}$	$0.22\pm 0.08\text{a}$	$0.12\pm 0.06\text{a}$	$0.15\pm 0.19\text{a}$
生化保护态 Biochemically-protected	NH-dsilt	$1.71\pm 0.33\text{a}$	$1.96\pm 0.34\text{a}$	$1.98\pm 0.20\text{a}$	$2.26\pm 0.40\text{a}$	$1.56\pm 0.04\text{a}$
	NH-dclay	$0.30\pm 0.04\text{a}$	$0.43\pm 0.07\text{a}$	$0.45\pm 0.07\text{a}$	$0.61\pm 0.05\text{a}$	$0.79\pm 0.27\text{a}$
物理-化学保护态 Physical-chemically-protected	H- μ silt	$0.70\pm 0.12\text{b}$	$0.88\pm 0.10\text{b}$	$0.84\pm 0.18\text{b}$	$1.46\pm 0.11\text{a}$	$1.36\pm 0.18\text{a}$
	H- μ clay	$0.13\pm 0.01\text{b}$	$0.03\pm 0.01\text{c}$	$0.23\pm 0.03\text{a}$	$0.12\pm 0.40\text{b}$	$0.08\pm 0.02\text{bc}$
物理-生化保护态 Physical-biochemically-protected	NH- μ silt	$1.50\pm 0.08\text{b}$	$2.06\pm 0.15\text{ab}$	$2.12\pm 0.46\text{ab}$	$2.59\pm 0.35\text{a}$	$2.10\pm 0.15\text{ab}$
	NH- μ clay	$1.07\pm 0.10\text{a}$	$0.95\pm 0.22\text{a}$	$0.99\pm 0.10\text{a}$	$0.97\pm 0.00\text{a}$	$1.03\pm 0.12\text{a}$

注:表中同行数字后不同字母表示不同施肥处理间在 5% 水平下差异显著。

Note: Values in same column followed by a different letter are significant difference at 5% level among the treatments.

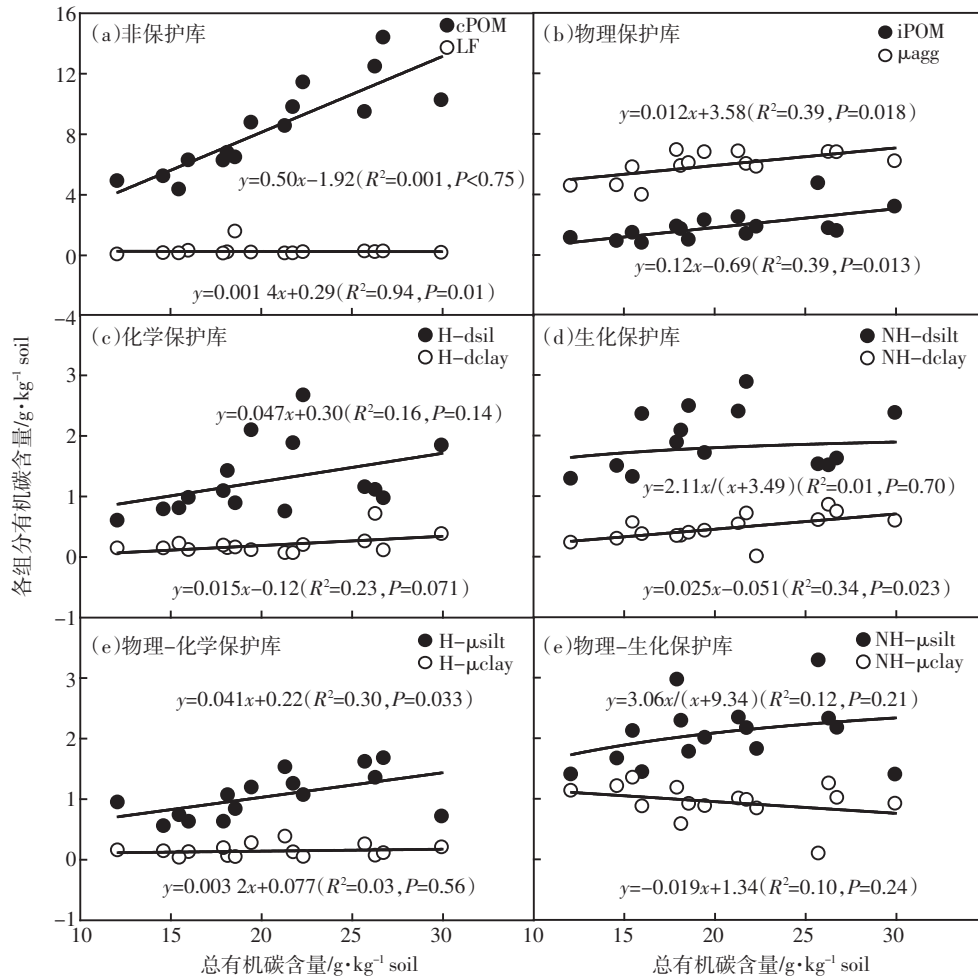


图2 长期不同施肥处理总有机碳含量与各组分碳库有机碳含量的相关关系

Figure 2 Correlationship between total soil organic carbon and different organic carbon fractions under long-term different fertilization

和保护机制的不同,对长期不同施肥模式的响应存在明显差异:有机肥的配施可以显著增加非保护态粗颗粒有机碳的含量,是红壤性水稻土有机碳固持的主要形态,而轻组有机碳含量较低且各处理间无显著性差异。周萍等^[13]也指出,良好的耕作和施肥下水稻土新增有机碳主要向粗团聚体颗粒组富集,这些粗团聚体颗粒组是土壤新增有机碳的主要载体,可能与红壤性水稻土中丰富的氧化物与有机碳的稳定结合有关。这种氧化物与有机碳的结合是红壤性水稻土固碳速率较高的重要机制^[9]。轻组是处于半分解状态的植物残体,主要是由水田的淹水环境导致的有机质分解速率受限而造成的^[11]。本研究结果中各处理间轻组碳含量无显著差异,可能主要由于各处理间轻组量较低,处理间变异较大。

本研究中,施肥显著提高物理保护的微团聚体中有机碳含量,但各施肥处理间无显著差异。微团聚体

闭蓄的细颗粒组分占整个微团聚体组分的16%~38%,且与总有机碳含量呈现显著的线性关系,而其微团聚体保护的矿质结合态粘粉粒碳占微团聚体碳组分的46%~77%。Stewart等^[22]研究也指出,整个微团聚体组分60%~75%来自矿质结合组分,12%~30%来自细颗粒有机碳,微团聚体作为一个整体,由于受粘粉粒的物理保护作用,其内部有机碳与外界微生物隔离,具有一定的稳定性,使各施肥处理间有机碳含量没有显著差异,与本研究结果一致。Chung等^[23]研究指出,细颗粒组分更加符合线性模型,不受总有机碳饱和的影响。李昌新等^[24]研究表明,大团聚体的更新周期约为42年,而微团聚体的更新周期长达209年,相比大团聚体,微团聚体的稳定性更高,对有机碳具有更强的保护作用^[25]。此外在长期的施肥条件下,土壤有机碳积累过程中,微团聚体逐渐形成,将半分解态的颗粒有机质包被在团聚体中,受到物理保护作

用,因而微团聚体组分更加符合饱和模型^[9]。

本试验研究发现,土壤粘粉粒的酸解碳组分不受施肥的影响,与总有机碳水平无显著相关性,表明这部分化学保护的碳组分可能接近或达到了其最大容量。化学保护组分的碳饱和现象已经得到很多研究证实^[10-12]。土壤粘粉粒通过吸附有机碳形成惰性矿物结合有机碳,其结合有机碳的能力是有限的,随着土壤有机碳浓度增加,吸附率降低^[26]。李昌新等^[24]对红壤的分组实验得出,粘粉粒碳不同施肥处理下在总碳中的比例差异不显著。Stewart 等^[12]的研究也证实了这一点。

生化保护组分受总有机碳饱和行为的影响,有饱和和趋势。本研究发现,非酸解的粘粉粒各处理之间均没有显著性差异。生化保护机制是通过复杂的生化反应或者有机质本身固有的自然属性实现的^[14],与化学保护组分相同,生化保护库中的粉粒比粘粒结合了更多的有机碳。有学者认为粉粒和粘粒不同的酸解性是由于它们不同的碳水化合物含量造成的^[27],粘粒比粉粒有着更多的碳水化合物^[28-29]。还有一种可能就是具体的分组过程中,粉粒组分含有部分的粘粒大小的微团聚体,这些微团聚体中包裹了部分有机质,从而提高了粉粒中结合的有机碳量^[29]。

物理-化学保护组分和物理-生化保护组分中,总体呈现饱和的趋势。在本研究中,自由态粘粉粒随有机碳含量的增加并没有显著增加,对外界管理措施无响应,而微团聚体保护的粘粉粒在各施肥处理间有显著性差异。这表明自由态的粘粉粒由于直接与外界环境接触,更容易达到平衡,而微团聚体对其内部的粘粉粒碳具有明显的物理保护作用,证明了游离态的粘粉粒与微团聚体保护的粘粉粒的物理保护机制的差异,也有可能是时间的拖后效应,这与 Stewart 等^[30]的室内培养研究结论一致。Gulde 等^[14]研究表明,粉粒和粘粒组分作为一个整体是被观察到存在饱和现象的。Zheng 等^[31]研究表明,红壤性水稻土中,由于铁铝氧化物含量相对较高,增强了物理化学联合保护机制,使其相对难以被分解。Liu 等^[32]研究指出,植被覆盖和土壤有机碳分解率的变化会影响地下水水位的位置和稳定性,从而影响水稻土的有机碳含量。外界条件的变化可能破坏稳定碳组分的保护机制,导致分解速率变化,各组分有机碳含量继续增加。

由上述分析可知,红壤性水稻土有机碳的固定主要是通过粗颗粒有机碳及微团聚体有机碳两种形式积累,更有利于养分的释放与转化。有机肥过多的施

用不会再增加稳定的化学和生物化学保护的有机碳组分,反而会以活性较高的非保护态的粗颗粒大量积累,一旦稻田的管理方式(如水分管理)发生变化,这一类活性较高的组分具有很高的潜在环境风险。因此,需要通过合理的人为措施来达到土壤有机碳的有效固定和累积,从而起到增汇和减排的作用。

4 结论

施肥显著提高了红壤性水稻土有机碳的水平,尤其是化肥与有机肥配施显著提高了土壤总有机碳及部分非保护态和物理保护态碳组分的含量,表明非保护态和物理保护态碳组分对施肥响应较为敏感。稻田土壤有机碳主要是通过非保护态的粗颗粒有机碳组分及物理保护态的微团聚体两种形式积累,总有机碳变化引起的组分变化率分别为 50%和 12%。施肥 30 年后各处理土壤生物化学保护态的碳组分在各处理之间无显著性差异,表明目前的施肥和管理制度下生物化学保护态有机碳组分可能已达到了其最大容量。

参考文献:

- [1] 解宪丽,孙 波,周慧珍,等. 不同植被下中国土壤有机碳的储量与影响因子[J]. 土壤学报, 2004, 41(5):687-699.
XIE Xian-li, SUN Bo, ZHOU Hui-zhen, et al. Soil carbon stocks and their influencing factors under native vegetations in China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(5):687-699.
- [2] Zhang W J, Xu M G, Wang X J, et al. Effects of organic amendments on soil carbon sequestration in paddy fields of subtropical China[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2012, 12(4):457-470.
- [3] Zhang H M, Xu M G, Shi X J, et al. Rice yield, potassium uptake and apparent balance under long-term fertilization in rice-based cropping systems in Southern China[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2010, 88(3):341-349.
- [4] Parham J A, Deng S P, Da H N, et al. Long-term cattle manure application in soil. II. Effect on soil microbial populations and community structure[J]. *Biological and Fertility of Soils*, 2003, 38(4):209-215.
- [5] 佟小刚,徐明岗,张文菊,等. 长期施肥对红壤和潮土颗粒有机碳含量与分布的影响[J]. 中国农业科学, 2008, 41(11):3664-3671.
TONG Xiao-gang, XU Ming-gang, ZHANG Wen-ju, et al. Influence of long-term fertilization on content and distribution of organic carbon in particle-size fractions of red soil and fluvo-aquic soil in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(11):3664-671.
- [6] 张国荣,李菊梅,徐明岗,等. 长期不同施肥对水稻产量及土壤肥力的影响[J]. 中国农业科学, 2009, 42(2):543-551.
ZHANG Guo-rong, LI Ju-mei, XU Ming-gang, et al. Effects of chemical fertilizer and organic manure on rice yield and soil fertility[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 42(2):543-551.
- [7] 潘根兴,李彦卿,郑聚锋,等. 土壤碳循环研究及中国稻田土壤固碳研究的进展与问题[J]. 土壤学报, 2008, 45(5):910-914.

- PAN Gen-xing, LI Lian-qing, ZHENG Ju-feng, et al. Perspectives on cycling and sequestration of organic carbon in paddy soils of China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(5):910-914.
- [8] Six J, Paustian K, Elliott E T, et al. Soil structure and organic matter I. Distribution of aggregate-size classes and aggregate-associated carbon[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, 64(2):681-689.
- [9] 武云天, 李凤民. 土壤有机质概念和分组技术研究进展[J]. 应用生态学报, 2004, 15(4):717-722.
- WU Yun-tian, LI Feng-min, Concepts and relative analytical techniques of soil organic matter[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(4):717-722.
- [10] Six J, Conant R T, Paul E A, et al. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils[J]. *Plant and Soil*, 2002, 241(2):155-176.
- [11] Christensen B T. Physical fractionation of soil and structural and functional complexity in organic matter turnover[J]. *European Journal of Soil Science*, 2001, 52(3):345-353.
- [12] Stewart C E, Plante A F, Paustian K, et al. Soil carbon saturation: Linking concept and measurable carbon pools[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2008, 72(2):379-392.
- [13] 周萍, 宋国茜, 潘根兴, 等. 南方三种典型水稻土长期试验下有机碳积累机制研究: I. 团聚体物理保护作用[J]. 土壤学报, 2008, 45(6):1063-1071.
- ZHOU Ping, SONG Guo-han, PAN Gen-xing, et al. SOC accumulation in three major types of paddy soils under long-term agro-ecosystem experiments from South China: I. Physical protection in soil micro-aggregates[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(6):1063-1071.
- [14] Gulde S, Chung H, Amelung W, et al. Soil carbon saturation controls labile and stable carbon pool dynamics[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2008, 72(3):605-612.
- [15] 侯红乾, 刘秀梅, 刘光荣, 等. 有机无机肥配比比例对红壤稻田水稻产量和土壤肥力的影响[J]. 中国农业科学, 2011, 44(3):516-523.
- HOU Hong-qian, LIU Xiu-mei, LIU Guang-rong, et al. Effect of long-term located organic-inorganic fertilizer application on rice yield and soil fertility in red soil area of China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(3):516-523.
- [16] Gregorich E G, Ellert B H, Drury C F. Fertilization effects on soil organic matter turnover and corn residue C storage[J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1996, 60(2):472-476.
- [17] Whalen J K, Chang C. Macroaggregate characteristics in cultivated soils after 25 annual manure applications[J]. *Soil Sci Soc Am J*, 2002, 66(5):1637-1647.
- [18] Plante A F, Chenu C, Balabane M, et al. Peroxide oxidation of clay-associated organic matter in a cultivation chronosequence[J]. *European Journal of Soil Science*, 2004, 55(3):471-478.
- [19] 潘根兴, 李恋卿, 郑聚锋, 等. 土壤碳循环研究及中国稻田土壤固碳研究的进展与问题[J]. 土壤学报, 2008, 45(5):901-914.
- PAN Gen-xing, LI Lian-qing, ZHENG Ju-feng, et al. Perspectives on cycling and sequestration of organic carbon in paddy soils of China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(5):901-914.
- [20] Solberg E D, Nyborg M, Izairalde R C, et al. Carbon storage in soils under continuous cereal grain cropping: N fertilizer and straw[J]. *Management of Carbon Sequestration in Soil*, 1998:235-254.
- [21] 邵欢欢. 农田管理措施和土地利用方式对土壤分组碳库及其饱和行为的影响[D]. 北京: 中国农业大学, 2012.
- GAO Huan-huan. Effects of cropland management and land-use change on soil fraction carbon pool and their saturation behaviors[D]. Beijing: China Agricultural University, 2012.
- [22] Stewart C E, Paustian K, Conant R T, et al. Soil carbon saturation: Implications for measurable carbon pool dynamics in long-term incubations[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41(2):357-366.
- [23] Chung H, Ngo K J, Plante A, et al. Evidence for carbon saturation in a highly structured and organic-matter-rich soil[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2010, 74(1):130-138.
- [24] 李昌新, 黄山, 彭现宪, 等. 南方红壤稻田与旱地土壤有机碳及其组成的特征差异[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(3):606-611.
- LI Chang-xin, HUANG Shan, PENG Xian-xian, et al. Differences in soil organic carbon fractions between paddy field and upland field in red soil region of South China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(3):606-611.
- [25] Six J, Feller C, Denef K, et al. Soil organic matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils-effects of no-tillage[J]. *Agronomie*, 2002, 22(7-8):755-775.
- [26] Hassink J. The capacity of soils to preserve organic C and N by their association with clay and silt particles[J]. *Plant and Soil*, 1997, 191(1):77-87.
- [27] Plante A F, Conant R T, Stewart C E, et al. Impact of soil texture on the distribution of soil organic matter in physical and chemical fractions[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2006, 70(1):287-296.
- [28] Amelung W, Flach K W, Zech W. Lignin in particle-size fractions of native grassland soils as influenced by climate[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1999, 63(5):1222-1228.
- [29] Kiem R, Kogel-Knabner I. Contribution of lignin and polysaccharides to the refractory carbon pool in C-depleted arable soils[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2003, 35(1):101-118.
- [30] Stewart C E, Paustian K, Conant R T, et al. Soil carbon saturation: Concept, evidence and evaluation[J]. *Biogeochemistry*, 2007, 86(1):19-31.
- [31] Zheng J, Li L, Pan G, et al. Potential aerobic C mineralization of a red earth paddy soil and its temperature dependence under long-term fertilizer treatments[J]. *Soil Use and Management*, 2012, 28(2):185-193.
- [32] Liu D Y, Ding W X, Jia Z J, et al. Relation between methanogenic archaea and methane production potential in selected natural wetland ecosystems across China[J]. *Biogeosciences*, 2011, 8(2):329-338.