

长期施肥对水稻土不同功能有机质库碳氮分布的影响*

邓文悦^{1, 2} 柳开楼³ 田静^{2†} 黄庆海³ 叶会财³ 娄翼来⁴
李忠芳⁵ 曹明明¹

(1 西北大学城市与环境学院, 西安 710127)

(2 中国科学院地理科学与资源研究所, 生态系统网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101)

(3 国家红壤改良工程技术研究中心/江西省红壤研究所/农业部江西耕地保育科学观测实验站, 南昌 330046)

(4 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081)

(5 贺州学院化学与生物工程学院, 广西贺州 542899)

摘要 土壤有机质(SOM)对于维持农业生产力、提高土壤质量和增加土壤固碳均具有非常重要的意义。以红壤水稻土35年的长期定位试验为依托,借助近期发展的物理-化学联合分组方法,探讨了长期施肥对水稻土不同功能SOM库含量、SOM库碳氮含量变化和分配比例的影响。结果表明,长期施肥尤其是有机无机配施处理显著增加了未保护游离SOM库(cPOM和fPOM)和纯物理保护SOM库(iPOM)在土壤中的含量以及它们的土壤有机碳(SOC)和全氮(TN)含量。未保护游离SOM库的SOC和TN含量占总有机碳和全氮比例在有机无机配施处理下最高,分别达35.9%和33%。与CK相比,有机无机配施使生物化学保护库非水解游离粉粒组(NH-dS_{lit})和非水解游离黏粒组(NH-dC_{lay})含量分别降低了15%和9.5% ($p < 0.05$)。物理-化学保护SOM库、物理-生物化学保护SOM库以及化学保护SOM库含量受长期施肥影响不显著。综上,研究表明土壤不同功能SOM库对长期施肥的响应不同。有机无机配施是提升红壤水稻土SOM数量和质量的最佳培肥措施。

关键词 有机质; 长期肥料试验; 物理保护有机质库; 化学保护有机质库; 生物化学保护有机质库; 土壤固碳

中图分类号 S153.6 文献标识码 A

土壤有机质(SOM)是土壤质量和肥力的重要指标^[1]。研究表明增加农田土壤有机碳(SOC)的固定可能是减缓目前大气二氧化碳浓度增加的一个有效途径^[2]。因此,加强农田SOM动态的研究对维持农业生产力、提高土壤质量、改善环境和实现粮食安全均具有非常重要的意义。

土壤有机质作为具有高度异质性的不均匀混合物,包含多种不同降解性和转化率的化合物^[3]。由管理措施引起的总SOM变化是逐步的,将具有高度异质性的SOM作为一个整体进行分析,难以监

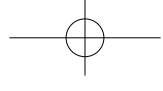
测到由管理措施引起的SOM质量的早期变化^[4]。因此,大多研究借助物理或者化学分组手段开展SOM组分的研究^[5-8],一方面有助于人们及时监测和掌握由管理措施引起的SOM质量早期变化,另一方面有助于人们更好地理解SOM质量变化的内在机理。目前SOM组分的研究主要借助化学或物理等方法将其分为不同组分,例如Six等^[6]提出了土壤团聚体物理分组技术,该方法目前被广泛应用于SOM的质量变化研究中。大量研究证实长期施肥会显著影响SOM总体和组分的变化^[9-11],例如周萍

* 国家自然科学基金项目(31400460, 31420103917)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos.31400460 and 31420103917)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: tianj@igsnr.ac.cn

作者简介: 邓文悦(1991—),女,山东人,硕士研究生,主要研究领域为土壤碳氮生物化学循环。E-mail: dengwy925@163.com

收稿日期: 2016-06-09; 收到修改稿日期: 2016-08-24; 优先数字出版日期(www.cnki.net): 2016-09-21



等^[12]采用低能量超声波分散法研究我国南方三种典型水稻土的长期试验田，分离得到不同粒径的团聚体颗粒组，发现大团聚体粒级随不同耕作和施肥等长期处理的变化最为强烈。王雪芬等^[13]通过Six等^[7]的物理分组方法分离得到不同大小颗粒有机碳库、团聚体有机碳库，其研究表明长期施肥显著提高了SOC和活性有机碳（LOC）的含量。袁颖红等^[14]通过超声波分散方法分离得到不同粒径的团聚体，发现施用粪肥显著提高土壤中游离态和闭蓄态颗粒的SOC含量及其占土壤总有机碳的比例。基于SOC的化学分组方法，张继光等^[15]研究发现长期施肥特别是施有机肥能显著提高土壤活性有机碳含量。Tian等^[16]发现长期施用氮肥，增加了溶解性有机氮含量，但是却降低了溶解性有机碳含量、微生物生物量氮含量和高锰酸钾易氧化性有机碳含量。以上大量研究证实，土壤有机质分组技术是研究土壤有机质质量早期变化的一个有效方法。但是以往研究所采用的分组方法往往是单一的物理或化学分组方法，具有一定的局限性。

近年来Stewart等^[17-18]在已有SOM物理分组方法基础上，考虑了SOM稳定机制，引入了化学分组，将湿筛筛选、重液浮选、玻璃珠分散和酸解技术手段结合，成功分离出未保护游离态活性SOM库、物理保护SOM库、化学保护SOM库和生物化学保护SOM库4类。在土壤有机碳库研究中，未保护游离态活性SOM库和物理保护SOM库各组分由于分解速度快、周转时间短、对施肥响应敏感，可作为土壤碳库变化的早期指示指标；而化学保护SOM库和生物化学保护SOM库各组分由于是惰性组分，对外界反应较迟钝，因而一般可作为预测土壤碳饱和与否的指标^[8]。由此可见，物理—化学联合分组方法综合考虑了SOM多种稳定机制，可为深入研究SOM提供更多的有价值信息，进而对研究和评价土壤各组分对总SOM含量的响应具有重要意义。中国水稻土面积约3 000万 hm^2 ，占全国耕地总面积的1/4，占世界水耕土面积的23%，而水稻土作为一种特殊利用方式下形成的人为耕作土壤，具有较高的土壤生产力和较大的固碳潜力^[19]。但是，鲜有报道利用该方法研究水稻土不同功能性有机质库土壤碳氮对施肥处理的响应。因此，急需进一步探讨长期施肥对水稻土不同功能SOM库土壤碳氮含量变化的影响。长期定位试验具有时间上反复验证、数据可靠和解释能力强的优点，可提高研究结果真实

性，从而可准确揭示土壤SOM各组分的动态变化规律^[20]。因此，本文借助长期定位施肥试验开展了水稻土不同功能SOM含量动态变化机制研究，该研究对于指导合理施肥、提升SOM质量和肥力水平，进而实现国家粮食安全和促进水稻田固碳具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

长期试验地位于江西省进贤县（ $116^{\circ}17'60''\text{E}$ ， $28^{\circ}35'24''\text{N}$ ），属于中亚热带，该区年均气温 18.1°C ，年积温 $6\ 480^{\circ}\text{C}$ ，年降水量 $1\ 537\ \text{mm}$ ，年蒸发量 $1\ 150\ \text{mm}$ ，无霜期约为289 d，年日照时数 $1\ 950\ \text{h}$ 。试验地为红壤性潴育型水稻土，成土母质为第四纪红黏土。试验区采用早稻—晚稻—冬闲种植制度。长期定位试验从1981年开始进行试验处理，试验前的土壤基本性质： $\text{pH}\ 6.9$ ， $\text{SOC}\ 16.3\ \text{g}\ \text{kg}^{-1}$ ，全氮（TN） $1.49\ \text{g}\ \text{kg}^{-1}$ ，全磷 $0.44\ \text{g}\ \text{kg}^{-1}$ ，全钾 $10.39\ \text{g}\ \text{kg}^{-1}$ ；碱解氮 $144\ \text{mg}\ \text{kg}^{-1}$ ，有效磷 $9.5\ \text{mg}\ \text{kg}^{-1}$ ，速效钾 $81.2\ \text{mg}\ \text{kg}^{-1}$ 。

本研究包括4个试验处理：（1）不施肥空白（CK）；（2）单施氮肥（N）；（3）单施氮磷钾（NPK）；（4）氮磷钾和有机肥配合施用（NPKM）。每处理3个重复，随机排列。水稻单季年施用尿素 $90\ \text{kg}\ \text{hm}^{-2}$ （以N计）、钙镁磷肥 $45\ \text{kg}\ \text{hm}^{-2}$ （以 P_2O_5 计）和氯化钾 $75\ \text{kg}\ \text{hm}^{-2}$ （以 K_2O 计）。NPKM处理中有机肥施用量只考虑含N量，早稻季施紫云英（平均含N $4\ \text{g}\ \text{kg}^{-1}$ ）、晚稻季施猪粪（平均含N $6\ \text{g}\ \text{kg}^{-1}$ ），其中有机肥N施用量占全N施用量的50%（早稻季）和60%（晚稻季）。有机肥和磷肥作基肥施用，氮肥和钾肥做追肥，氮肥在水稻返青后和分蘖盛期按1:1比例分两次追施，钾肥第一次全施。

1.2 土壤有机质分组方法

2014年10月份水稻收获后采集了0~20 cm土壤样品。采集土壤样品风干后，拣去作物残根和石砾等，然后过2 mm筛备用。

采用Stewart等^[17-18]方法对土壤SOM进行分组。主要操作步骤可分三步：首先称取20 g过2 mm筛的风干土样过湿筛分离出 $> 250\ \mu\text{m}$ 的未保护粗颗粒有机质（cPOM）、 $53\sim 250\ \mu\text{m}$ 的微团聚体部分（ μagg ）和 $< 53\ \mu\text{m}$ 的粉黏组。接着

将 $< 53 \mu\text{m}$ 的部分用离心法在 900 r min^{-1} 和 $3\ 000 \text{ r min}^{-1}$ 分离出游离粉粒组 (d-Silt) 和游离黏粒组 (d-Clay), 所有组分 60°C 烘干至恒重并称重。

将上一步得到的微团聚体部分 (μ_{agg}) 用碘化钠溶液 (1.85 g cm^{-3}) 进行密度浮选, $4\ 000 \text{ r min}^{-1}$ 离心 20 min , 液体部分过 $0.45 \mu\text{m}$ 滤膜, 于 $0.45 \mu\text{m}$ 滤膜上的轻组组分在 60°C 烘干 48 h , 得到未保护细颗粒有机质 (fPOM)。重组部分经玻璃珠分散后过 $53 \mu\text{m}$ 筛子, 留在筛上的为微团聚体中纯物理保护颗粒有机质 (iPOM)。将 $< 53 \mu\text{m}$ 的部分采用离心法在 900 r min^{-1} 和 $3\ 000 \text{ r min}^{-1}$ 分离出闭蓄粉粒组分 ($\mu\text{-Silt}$) 和闭蓄黏粒组分 ($\mu\text{-Clay}$)。

将得到的游离粉黏粒组与闭蓄粉黏粒组在 6 mol L^{-1} 的 HCl 中于 95°C 回流加热 16 h , 然后过滤, 残留物质经 60°C 烘干至恒重, 可得到非水解部分: 非水解游离粉粒组分 (NH-dSilt)、非水解游离黏粒组分 (NH-dClay)、非水解闭蓄粉粒组分 (NH- μSilt) 和非水解闭蓄黏粒组分 (NH- μClay), 而水解部分为全组分和非水解组分之差, 即水解游离粉粒组分 (H-dSilt)、水解游离黏粒组分 (H-dClay)、水解闭蓄粉粒组分 (H- μSilt) 和水解闭蓄黏粒组分 (H- μClay)。

根据 Stewart 等^[17-18] 方法, 将未保护游离态活性 SOM 库分为游离粗颗粒有机质 (cPOM) 和游离态细颗粒有机质 (fPOM); 物理保护 SOM 库为微团聚体部分 (μ_{agg}); 化学保护 SOM 库为可水解的游离态粉黏粒部分 (H-dSilt、H-dClay); 生物化学保护 SOM 库为非水解游离态粉黏粒部分 (NH-dSilt、NH-dClay)。而物理保护中的微团聚体部分又包含着多种保护机制, 可以细分为纯粹物理保护的细颗粒有机质 (iPOM)、物理-化学保护的水解性微团聚体保护的粉黏粒 (H- μSilt 、H- μClay) 和物理-生化保护的非水解性微团聚体保护的粉黏粒 (NH- μSilt 、NH- μClay)。

采用 vario MACRO cube 型元素分析仪 (Elementar, 德国) 测定各组分 C 和 N 含量。

1.3 数据处理

所有数据在 Excel 2010 和 SAS System V8 软件中进行分析。不同施肥处理之间的差异采用最小显著差异法 (LSD) 进行显著性检验 ($p < 0.05$)。图形在 SigmaPlot 12.5 软件中进行分析绘制。

2 结果

2.1 长期施肥对土壤功能性 SOM 组分含量的影响

长期施肥使土壤游离粗颗粒 cPOM 组分含量提高了 $1\% \sim 59.2\%$, 尤其是 NPKM 处理下 cPOM 含量增加最显著 (表 1)。与 CK 和单施 N 处理相比, NPK 和 NPKM 处理显著提高了游离态细颗粒 fPOM 含量。施肥未影响物理-生物化学保护的闭蓄粉黏粒 (NH- μSilt 、NH- μClay) 组分和物理-化学保护的闭蓄粉黏粒 (H- μSilt 、H- μClay) 组分含量。单施 N 肥处理下的 H- μSilt 组分含量显著低于 NPK 和 NPKM 处理。施肥对化学保护的游离粉黏粒 (H-dSilt、H-dClay) 组分含量影响也不明显; 而生物化学保护的游离粉黏粒 (NH-dSilt、NH-dClay) 组分含量受施肥影响呈显著下降趋势。

2.2 长期施肥对不同功能 SOM 库组分 SOC 和 TN 含量的影响

2.2.1 对不同功能 SOM 库组分 SOC 含量的影响

长期施肥显著影响了功能性 SOM 库组分 SOC 含量 (图 1)。与 CK 处理相比, NPKM 处理下游离粗颗粒 cPOM 中 SOC 提高最显著, 提高了 96.8% ; 单施 N 肥处理提高了 31.8% 。与 CK 和单施化肥 (N、NPK) 处理相比, NPKM 处理显著提高了游离细颗粒 fPOM 中的 SOC 含量。与 CK 相比, NPK 和 NPKM 处理显著增加了纯粹物理保护组分 iPOM 中 SOC 含量; 同时 NPKM 处理下 iPOM 中 SOC 含量是单施 NPK 处理的 1.4 倍。与其他三个处理相比, NPKM 处理下游离闭蓄粉粒组 (NH- μSilt 、H- μSilt) SOC 含量提升了 $21.65\% \sim 50.3\%$ 。与此相反, 与 CK 处理相比, 长期施肥显著降低了生物化学保护组粉粒黏粒组 (NH-dSilt、NH-dClay) SOC 含量, 而其他各施肥处理间无显著差异。

2.2.2 对不同功能 SOM 库组分 TN 含量的影响

长期施肥显著影响了功能性 SOM 库的 TN 含量 (图 2)。与 CK 相比, NPKM、单施 N 和 NPK 处理下游离粗颗粒 cPOM 组分 TN 含量分别提高了 102% 、 35% 和 11% ; 同时施肥处理间 cPOM 组分 TN 含量差异显著。与 CK 相比, 单施化肥 (N、NPK) 未影响游离细颗粒 fPOM 组分 TN 含量; 而 NPKM 处理显著影响该组分 TN 含量, 提高了 77% 。与 CK 相

表1 长期施肥对土壤各有机质库组分含量的影响

Table 1 Effect of long-term fertilization on sizes of various SOM fractions in the soil

土壤有机质库 SOM pool	组分 Fraction	各有机质库组分的含量比例 Proportion of SOM fraction (%)			
		CK	N	NPK	NPKM
未保护游离组 Non-protected	cPOM ¹⁾	17.49 (0.27) c	22.77 (0.28) b	17.65 (0.32) c	27.85 (0.37) a
物理保护组 Physically protected	fPOM ²⁾	0.16 (0.01) c	0.17 (0.01) c	0.22 (0.02) b	0.29 (0.01) a
物理-生物化学保护组 Physico-biochemically protected	iPOM ³⁾	2.79 (0.29) b	3.31 (0.32) b	5.36 (0.49) a	6.24 (0.25) a
物理-化学保护组 Physico-chemically protected	NH- μ Silt ⁴⁾	16.14 (0.62) a	13.31 (0.11) a	16.56 (1.05) a	16.63 (1.93) a
化学保护组 Chemically protected	NH- μ Clay ⁵⁾	1.76 (0.18) a	1.52 (0.19) a	1.61 (0.12) a	1.72 (0.17) a
生物化学保护组 Biochemically protected	H- μ Silt ⁶⁾	3.65 (0.32) ab	2.81 (0.04) b	3.80 (0.22) a	3.86 (0.42) a
	H- μ Clay ⁷⁾	2.05 (0.23) a	1.91 (0.24) a	2.16 (0.17) a	2.36 (0.13) a
	H-dSilt ⁸⁾	7.93 (0.48) a	8.38 (0.45) a	7.72 (0.48) a	6.79 (0.37) a
	H-dClay ⁹⁾	0.42 (0.01) a	0.37 (0.01) a	0.39 (0.03) a	0.37 (0.04) a
	NH-dSilt ¹⁰⁾	38.67 (0.52) a	35.98 (0.72) b	37.24 (1.26) ab	32.93 (0.99) c
	NH-dClay ¹¹⁾	0.42 (0.02) a	0.36 (0.02) b	0.34 (0.02) b	0.38 (0.01) b

注：1) 未保护粗颗粒有机质；2) 未保护细颗粒有机质；3) 微团聚体保护颗粒有机质；4) 非水解闭蓄粉粒组；5) 非水解闭蓄黏粒组；6) 水解闭蓄粉粒组；7) 水解闭蓄黏粒组；8) 水解游离粉粒组；9) 水解游离黏粒组；10) 非水解游离粉粒组；11) 非水解游离黏粒组。CK：不施肥空白；N：单施氮肥；NPK：单施氮磷钾肥；NPKM：氮磷钾和有机肥配施。括号内数值为同一处理三个重复的标准差。同一行数据的不同字母表示差异显著 ($p < 0.05$)。下同
Note: 1) cPOM, coarse unprotected particulate organic matter; 2) fPOM, fine unprotected POM; 3) iPOM, microaggregate-protected POM; 4) NH- μ Silt, nonhydrolyzable microaggregate-derived silt-sized fraction; 5) NH- μ Clay, nonhydrolyzable microaggregate-derived clay-sized fraction; 6) H- μ Silt, hydrolyzable microaggregate-derived siltsized fraction; 7) H- μ Clay, hydrolyzable microaggregate-derived clay-sized fraction; 8) H-dSilt, hydrolyzable easily dispersed silt-sized fraction; 9) H-dClay, hydrolyzable easily dispersed clay-sized fraction; 10) NH-dSilt, nonhydrolyzable easily dispersed silt-sized fraction; 11) NH-dClay, nonhydrolyzable easily dispersed clay-sized fraction. CK: control; N: N fertilizer application; NPK: NPK fertilizer application; NPKM: combined manure and NPK fertilizer application. The values in the brackets are means plus standard error of 3 replicates ($n=3$). Different letters after the data in the same row indicate significant differences between treatments at $p < 0.05$. The same below

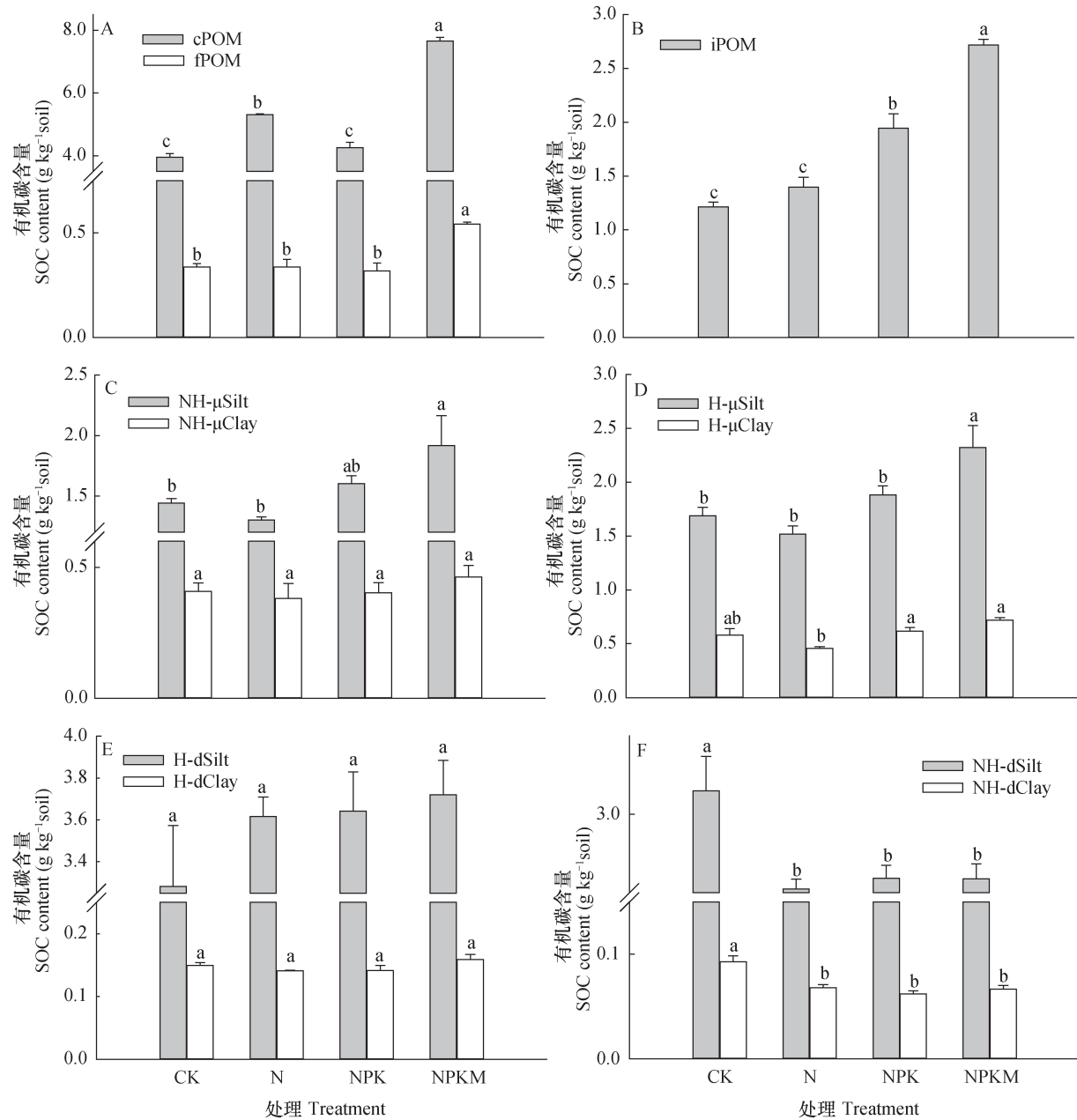
比，施肥使得纯粹受物理保护的细颗粒组iPOM组分TN含量提高了23%~171%；各施肥处理间，以NPKM处理下iPOM组分TN含量最高，相比单施N和NPK处理分别提高了48%和121%。与CK和单施N处理相比，NPKM处理分别提高物理-生物化学保护的粉粒组(NH- μ Silt) TN含量达52%和80% ($p < 0.05$)，而NPKM与单施NPK处理之间差异不显著。物理-化学保护粉粒组(H- μ Silt)含氮量与物理-生物化学保护粉粒组变化趋势一致。化学保护组分粉黏粒(H-dSilt、H-dClay) TN含量受施肥影响无显著差异。长期施肥对生物化学保护组中的粉粒组(NH-dSilt) TN含量无显著影响，而施肥则显著降低了黏粒组(NH-dClay) TN含量。

2.2.3 对不同功能性SOM库组分C/N的影响

长期施肥未影响游离粗颗粒组(cPOM)、物理-生物化学保护粉粒组(NH- μ Silt)、物理-化学保护粉粒黏粒组(H- μ Silt、H- μ Clay)以及化学保护粉粒组(H-dSilt)的C/N(表2)。而长期施肥则使游离细颗粒组(fPOM)、物理保护的细颗粒组(iPOM)以及物理-生物化学保护黏粒组(NH- μ Clay) C/N有下降趋势，尤以NPKM处理的C/N值最低。与CK相比，单施N处理显著降低了化学保护组游离态黏粒组C/N，而施肥处理间差异并不显著。长期施肥降低了生物化学保护组的游离态粉黏粒组C/N，不同施肥处理之间差异不显著。

2.3 长期施肥对不同SOM组分SOC和TN分配比例的影响

本研究中，不同处理下未保护游离组SOC



注: A. 未保护游离组 (游离态粗颗粒, 游离态细颗粒); B. 物理保护组 (微团聚体保护颗粒); C. 物理—生物化学保护组 (非水解闭蓄粉粒, 非水解闭蓄黏粒); D. 物理—化学保护组 (水解闭蓄粉粒, 水解闭蓄黏粒); E. 化学保护组 (水解游离粉粒, 水解游离黏粒); F. 生物化学保护组 (非水解游离粉粒, 非水解游离黏粒)。柱形上方不同小写字母表示土壤同一组分下SOC含量在不同施肥处理间差异显著 ($p < 0.05$)。下同Note: A. non-protected fraction (cPOM, fPOM); B. physically protected fraction (iPOM); C. physico-biochemically protected fraction (NH-μSilt, NH-μClay); D. physico-chemically protected fraction (H-μSilt, H-μClay); E. chemically protected fraction (H-dSilt, H-dClay); F. biochemically protected fraction (NH-dSilt, NH-dClay).

Different lower-case letters indicate significant differences within each fraction among treatments ($p < 0.05$). The same below

图1 长期施肥处理对不同功能性SOM组分中SOC含量的影响

Fig. 1 Effect of long-term fertilization on soil organic carbon (SOC) content in the fractions

含量占土壤总有机碳最高, 达26.3% ~ 35.9%; 其次是化学保护组SOC占土壤总有机碳的17% ~ 22%; 生物化学保护组SOC的分配比例

是11.6% ~ 19.9%; 物理—化学保护组SOC占土壤总有机碳的11.6% ~ 14.3%; 物理—生物化学保护组占9.9% ~ 11.5%; 最小的为纯粹物

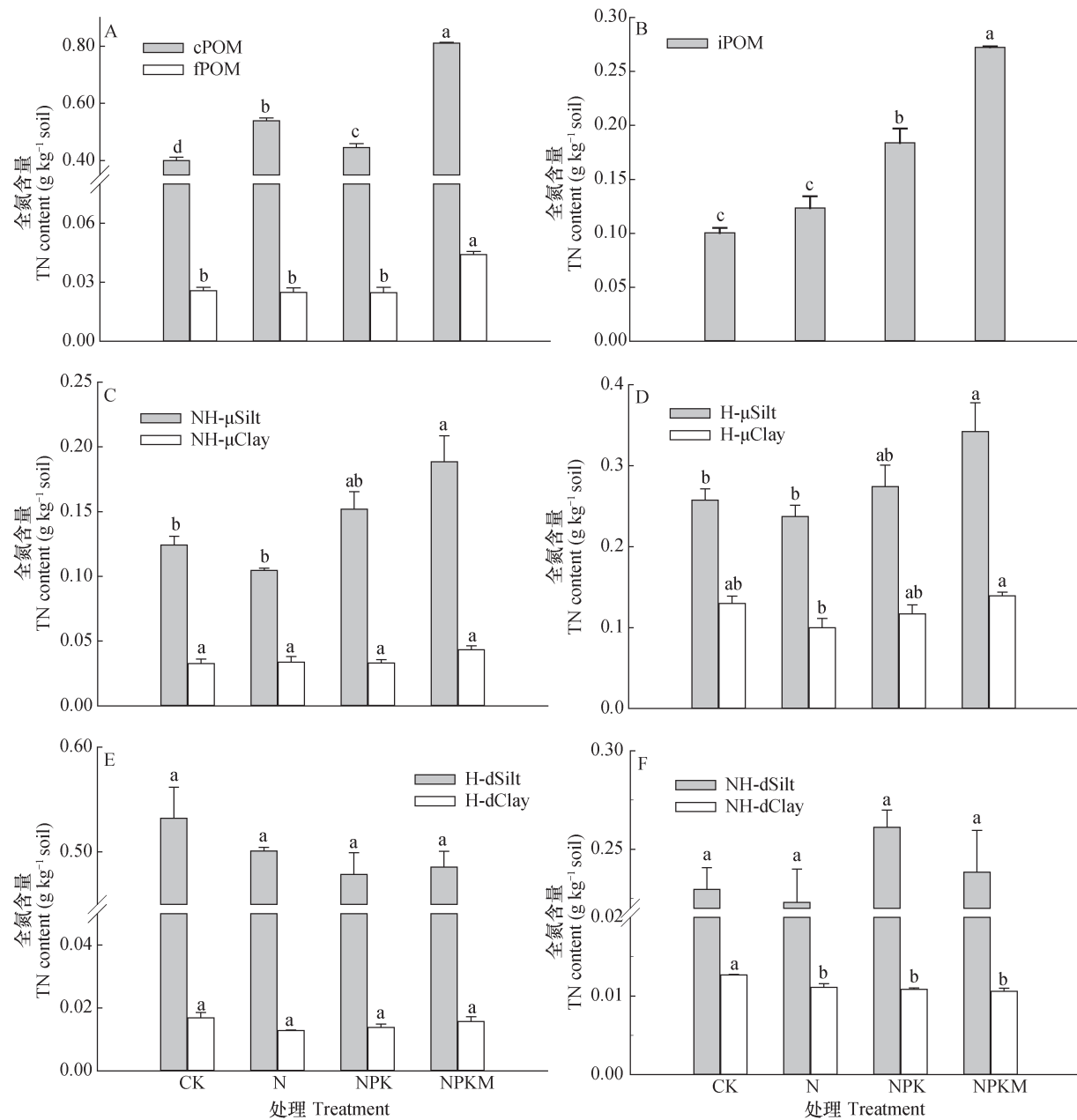


图2 长期施肥处理对不同功能性SOM组分中TN含量的影响

Fig. 2 Effect of long-term fertilization on TN content in the fractions

理保护组，占7.5%~11.9%（图3）。各组分TN含量占土壤总氮含量比例趋势和各组分SOC占土壤总有机碳比例趋势相似：未保护游离组（22.9%~33%）>化学保护组（19.4%~29.5%）>物理—化学保护组（17.6%~20.8%）>生物化学保护组（9.6%~13.6%）>物理—生物化学保护组（7.2%~9.3%）>物理保护组（5.4%~10.5%）。

长期施肥改变了同类组分的SOC含量占土壤总有机碳的比例以及TN含量占土壤总氮的比例（图

3）。与CK和单施化肥（N、NPK）处理相比，NPKM处理显著提高了未保护游离颗粒组SOC占土壤总有机碳的比例和TN含量占土壤全氮的比例。与CK和单施N肥相比，NPK和NPKM处理下纯物理保护组SOC含量占土壤总有机碳比例显著增长（增长了54%~73%）。同时，该组的TN含量在土壤总氮含量中的分配比例在不同处理下均有显著差异。与CK和其他两个施肥处理（NPK、NPKM）相比，单施N肥处理的物理—化学保护组分内SOC占土壤总有机碳的比例以及TN占土壤总氮的比例明显降

表2 长期施肥处理对各组分土壤C/N值的影响

Table 2 Effect of long-term fertilization on C/N ratio in SOM fractions

土壤有机质库 SOM pool	组分 Fraction	各有机质库组分的C/N The C/N ratio of SOM fractions			
		CK	N	NPK	NPKM
未保护游离组 Non-protected	cPOM	9.89 (0.24) a	9.84 (0.16) a	9.56 (0.08) a	9.45 (0.14) a
物理保护组 Physically protected	fPOM	13.09 (0.23) ab	13.49 (0.25) a	12.87 (0.33) ab	12.30 (0.38) b
	iPOM	12.13 (0.50) a	11.39 (0.31) ab	10.58 (0.05) bc	9.98 (0.17) c
物理-生物化学保护组 Physico-biochemically protected	NH- μ Silt	11.71 (0.85) a	12.44 (0.08) a	10.73 (1.02) a	10.13 (0.33) a
物理-化学保护组 Physico-chemically protected	NH- μ Clay	12.61 (0.63) a	11.27 (0.44) ab	12.15 (0.38) ab	10.69 (0.51) b
	H- μ Silt	6.50 (0.17) a	6.40 (0.06) a	6.96 (0.51) a	6.81 (0.20) a
化学保护组 Chemically protected	H- μ Clay	4.46 (0.30) a	4.70 (0.49) a	5.33 (0.26) a	5.18 (0.09) a
	H-dSilt	6.16 (0.39) b	7.23 (0.23) a	7.60 (0.12) a	7.66 (0.19) a
生物化学保护组 Biochemically protected	H-dClay	8.98 (0.71) b	11.01 (0.13) a	10.30 (0.28) ab	10.23 (0.34) ab
	NH-dSilt	13.70 (0.48) a	11.42 (0.66) b	9.92 (0.11) b	10.97 (0.60) b
	NH-dClay	7.31 (0.48) a	6.15 (0.16) ab	5.73 (0.34) b	6.32 (0.45) ab

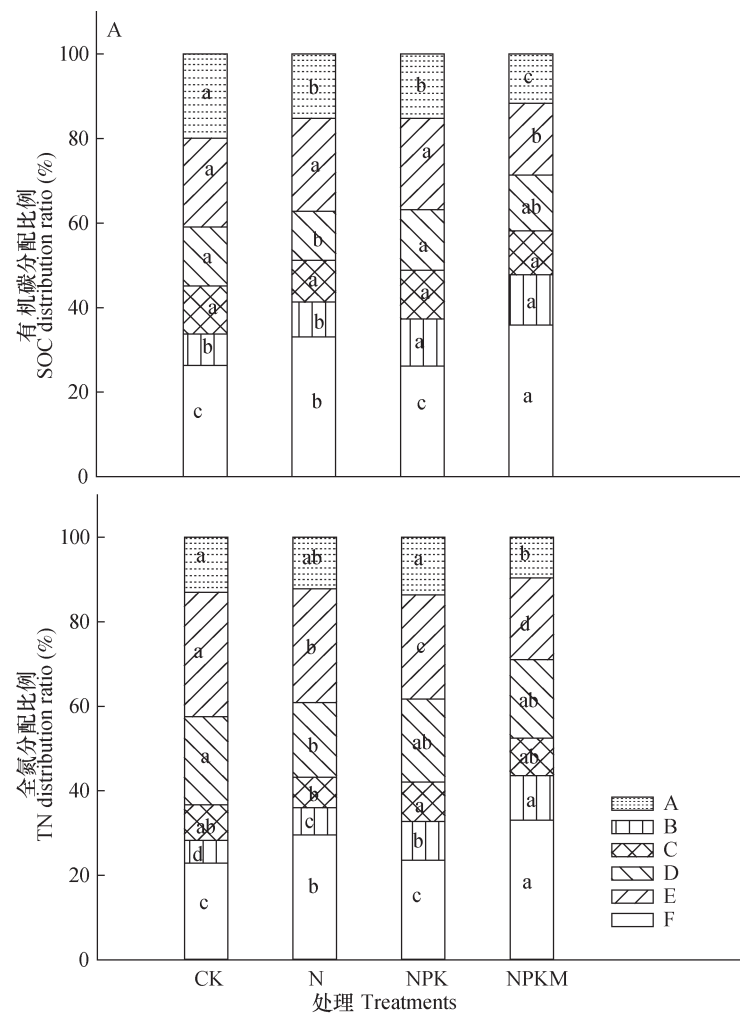
低。NPKM处理显著降低了化学保护组分的SOC占土壤总有机碳的比例，以及TN占土壤总氮的比例。与其他三个处理相比，NPKM处理下的生物化学保护组分内SOC占土壤总有机碳的比例以及TN占土壤总氮的比例最低。

3 讨论

长期施肥处理对土壤各组分SOC含量的变化表现出不同程度的影响。长期施肥尤其是有机无机配施(NPKM)显著提高了未保护游离SOM库在土壤中的含量(表1)以及该库的SOC和TN含量(图1和图2);同时显著增加了该库内SOC和TN含量在土壤总有机碳和全氮中的分配比例(图3)。这与以往研究规律基本一致。Plante等^[21]对草地灰土的研究发现氮肥的施用增加了土壤未保护游离SOM库的SOC和TN含量;Bhattacharyya等^[10]对长期施肥下喜马拉雅山脉印度地区的研究发现,施肥提高了250~2 000 μm 大团聚体颗粒在土壤中的含量以及该粒径下大团聚体内SOC和TN含量,尤其是有机无机配施增加最显著。郭菊花等^[22]和Banger等^[23]的研究也得出类似的结果。本文研究发现,长期有机无机配施显著提高了cPOM和fPOM两类组分的含量,cPOM组分较fPOM组分受施肥影响显

著。土壤中未保护游离SOM库主要是由一些分解不充分的地上凋落物、根屑或微生物残体组成^[8]。长期施肥尤其是有机无机配施会增加作物地上部和地下部生物量,从而增加了新鲜有机物质的输入以及作物根系代谢产物,促进土壤小粒径团聚体向大团聚体胶结,进而可能增加未保护游离SOM在土壤中的含量^[24];同时Six等^[8]认为SOC含量随着团聚体粒径的增大而增加,大量有机物的输入带来的微生物的高活性也诱导产生新的不稳定黏合剂,导致新的大团聚体形成,进而产生更多的胶结剂保护SOC,最终促进SOC的积累和固定。

本研究中,有机无机配施显著增加了纯物理保护库iPOM组分在土壤中的百分含量(表1)以及该组分SOC和TN含量(图1和图2),同时提高了该组分的SOC含量和TN含量在土壤总SOC和TN中的分配比例。Gulde等^[25]的研究发现粪肥的施入提高了物理保护机制的SOC含量,提出土壤外界碳投入与iPOM组分内的SOC含量有显著的线性关系;张丽敏等^[26]报道长期施肥特别是有机无机配施增加了物理保护库iPOM内SOC积累量;Manna等^[27]研究发现有机肥显著提高了53~250 μm 微团聚体的SOC和TN含量。本研究结果和以上相关报道规律一致。但本文通过物理化学联合分组方法将物理保护机制的SOM分离出纯粹物理保护库、物理一



注：A：未保护游离组；B：物理保护组；C：物理—生物化学保护组；D：物理—化学保护组；E：化学保护组；F：生物化学保护组。相同颜色柱内的不同字母表示不同处理间差异显著 ($p < 0.05$) Note: A: non-protected fraction; B: physically protected fraction; C: physico-biochemically protected fraction; D: physico-chemically protected fraction; E: chemically protected fraction; F: biochemically protected fraction. Different letters in the same bar indicate significant differences among treatments at $p < 0.05$

图3 长期施肥处理下各组分SOC占土壤总有机碳的比例及各组分TN含量占土壤TN含量比例

Fig. 3 Effect of long-term fertilization on proportions of SOC in different fractions to total soil SOC and TN in different fractions to total soil TN

生物化学保护库和物理—化学保护库三种机制，而长期施肥处理显著影响纯粹物理保护库，对物理—生物化学保护库和物理—化学保护库影响并不显著。大团聚体中的iPOM来源于粗颗粒的分解和随后的破碎，iPOM含量将随着大团聚体形成时间增加而增加^[28]。有机无机配施不仅能增加有机物的输入，还能增加进入土壤的微生物量，增强土壤微生物活动，进而加快多糖物质的分解，导致大团聚体的破碎，增加了iPOM含量^[8]。可能由于有机肥的施用通过改善土壤团聚结构，促进了土壤SOC的物理保护，从而影响对碳和氮的固定^[26, 29]。

长期施肥显著降低了生物化学保护组的游离粉黏粒组在土壤中的含量（表1）以及SOC和TN含量（图1和图2），其中以有机和无机配施处理降低最明显，而该库中粉粒比黏粒结合了更多的SOC和TN。Plante等^[30]研究发现管理方式未引起生物化学保护组对SOC和TN固持能力的影响，但粉粒固持碳的能力强于黏粒。生物化学保护是有机质自身化学组成的抗降解性，土壤有机碳自身的难降解性可以来自物理、化学及生物学过程，这种保护机制主要在活跃的表层土壤及SOC的分解初期起作用^[31]。引起该组分SOC、TN含量的变化可能原因

是：一方面，土壤粉黏粒通过吸附SOC形成惰性矿物结合物，但其结合SOC的能力是有限的，Stewart等^[17]研究也证实了土壤粉黏粒SOC饱和现象；另一方面，有机肥的施入会增加土壤中微生物量进而影响土壤矿化稳定性，强化土壤有机胶结物的作用，从而使得土壤颗粒间的作用力发生变化，有利于大颗粒组分团聚形式的存在，导致矿质结合态粉黏粒含量的降低^[8]，从而使得该组分SOC和TN含量降低。本研究发现长期施肥显著降低了物理保护的细颗粒iPOM组分以及生物化学保护的粉粒组的C/N值（表2）。这与李江涛等^[32]对施肥红壤不同粒径团聚体C/N值变化结论一致。C/N值一般随着土壤粒径的增加而逐渐减小^[10]。C/N比是有机物腐殖化程度的一个指标，C/N比值越高，表明有机物的腐解程度就越低^[33]。长期有机无机配施处理下随着氮素的投入，土壤中微生物的活动及其代谢活性增强，微生物量增加，土壤中有足够量的氮供微生物消耗，微生物同化同重量的氮需要消耗更多的碳，从而可能反作用于土壤C/N发生变化^[34]。

4 结 论

通过35年的红壤性水稻土长期定位试验，本研究证实长期施肥尤其是有机无机配施处理显著增加了未保护游离SOM库（cPOM和fPOM）和纯物理保护SOM库（iPOM）组分含量以及它们的SOC和TN含量，同时cPOM组分的SOC和TN含量在总SOC和TN含量中的分配比例最高，说明该SOM库极易受人为管理措施的影响，并且可能是该研究区土壤中SOC和TN的主要储存库。长期施肥下物理—化学保护SOM库、物理—生物化学保护SOM库以及化学保护SOM库内SOC含量和TN含量各处理间无显著差异，表明这些SOM库可能比较稳定，或者目前这几类库固持能力已达到最大水平，呈现饱和状态。综上，该研究表明土壤不同功能SOM库对长期施肥的响应不同，有机无机配施是提升红壤水稻土SOM数量和质量的最佳培肥措施，并以未保护游离SOM库和纯物理保护SOM库提升幅度最大。

参 考 文 献

[1] Gregorich E G, Monreal C M, Carter M R, et al. Towards a minimum data set to assess soil organic matter quality in agricultural soils. *Canadian Journal of Soil*

- Science*, 1994, 74 (4) : 367—385
- [2] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, 2004, 304 (5677) : 1623—1627
- [3] Stevenson F J. *Humus chemistry: Genesis, composition, reactions*. New York: John Wiley & Sons, 1994
- [4] Haynes R J. Labile organic matter fractions as central components of the quality of agricultural soils: An overview. *Advances in Agronomy*, 2005, 85: 221—268
- [5] Hassink J, Whitmore A P. A model of the physical protection of organic matter in soils. *Soil Science Society of America Journal*, 1997, 61 (1) : 131—139
- [6] Six J, Elliott E T, Paustian K, et al. Aggregation and soil organic matter accumulation in cultivated and native grassland soils. *Soil Science Society of America Journal*, 1998, 62 (5) : 1367—1377
- [7] 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 (6) : 1981—1987
- [8] Six J, Conant R T, Paul E A, et al. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils. *Plant and Soil*, 2002, 241 (2) : 155—176
- [9] Sleutel S, de Neve S, N é meth T, et al. Effect of manure and fertilizer application on the distribution of organic carbon in different soil fractions in long-term field experiments. *European Journal of Agronomy*, 2006, 25 (3) : 280—288
- [10] Bhattacharyya R, Prakash V, Kundu S, et al. Long-term effects of fertilization on carbon and nitrogen sequestration and aggregate associated carbon and nitrogen in the Indian sub-Himalayas. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2010, 86 (1) : 1—16
- [11] Huang S, Sun Y N, Rui W Y, et al. Long-term effect of no-tillage on soil organic carbon fractions in a continuous maize cropping system of Northeast China. *Pedosphere*, 2010, 20 (3) : 285—292
- [12] 周萍, 宋国菡, 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: 团聚体物理保护作用. *土壤学报*, 2008, 45 (6) : 1063—1071
- Zhou P, Song G H, Pan G X, et al. SOC accumulation in three major types of paddy soil under long-term agroecosystem experiments from south China: Physical protection in soil micro-aggregates (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45 (6) : 1063—1071
- [13] 王雪芬, 胡锋, 彭新华, 等. 长期施肥对红壤不同有

- 机碳库及其周转速率的影响. 土壤学报, 2012, 49 (5): 954—961
- Wang X F, Hu F, Peng X H, et al. Effects of long-term fertilization on soil organic carbon pools and their turnovers in red soil (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2012, 49 (5): 954—961
- [14] 袁颖红, 李辉信, 黄欠如, 等. 长期施肥对水稻土颗粒有机碳和矿物结合态有机碳的影响. 生态学报, 2008, 28 (1): 353—360
- Yuan Y H, Li H X, Huang Q R, et al. Effects of long-term fertilization on particulate organic carbon and mineral organic carbon of the paddy soil (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28 (1): 353—360
- [15] 张继光, 秦江涛, 要文倩, 等. 长期施肥对红壤旱地土壤活性有机碳和酶活性的影响. 土壤, 2010, 42 (3): 364—371
- Zhang J G, Qin J T, Yao W Q, et al. Effects of long-term fertilization on soil active organic carbon and soil enzyme activities in upland red soils (In Chinese). *Soils*, 2010, 42 (3): 364—371
- [16] Tian J, Lu S, Fan M, et al. Integrated management systems and N fertilization: Effect on soil organic matter in rice-rapeseed rotation. *Plant and Soil*, 2013, 372 (1/2): 53—63
- [17] Stewart C E, Plante A F, Paustian K, et al. Soil carbon saturation: Linking concept and measurable carbon pools. *Soil Science Society of America Journal*, 2008, 72 (2): 379—392
- [18] Stewart C E, Paustian K, Conant R T, et al. Soil carbon saturation: Implications for measurable carbon pool dynamics in long-term incubations. *Soil Biology & Biochemistry*, 2009, 41 (2): 357—366
- [19] 许泉, 芮雯奕, 何航, 等. 不同利用方式下中国农田土壤有机碳密度特征及区域差异. 中国农业科学, 2006, 39 (12): 2505—2510
- Xu Q, Rui W Y, He H, et al. Characteristics and regional differences of soil organic carbon density in farmland under different land use patterns in China (In Chinese). *Scientia Agricultura Sinica*, 2006, 39 (12): 2505—2510
- [20] 曾江海. 长期定位试验研究及其生态学意义. 资源生态环境网络研究动态, 1995 (1): 24—30
- Zeng J H. Long-term experiment and its ecological significance (In Chinese). *Network Research Tendency of Resources, Ecology and Environment*, 1995 (1): 24—30
- [21] Plante A F, Stewart C E, Conant R T, et al. Soil management effects on organic carbon in isolated fractions of a Gray Luvisol. *Canadian Journal of Soil Science*, 2006, 86 (1): 141—151
- [22] 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. 土壤, 2007, 39 (5): 787—793
- Guo J H, Chen X Y, Liu M Q, et al. Effects of fertilizer management practice on distribution of aggregates and content of organic carbon and nitrogen in red paddy soil (In Chinese). *Soils*, 2007, 39 (5): 787—793
- [23] Banger K, Toor G S, Biswas A, et al. Soil organic carbon fractions after 16-years of applications of fertilizers and organic manure in a typical Rhodalfs in semi-arid tropics. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2010, 86 (3): 391—399
- [24] Yu H, Ding W, Luo J, et al. Effects of long-term compost and fertilizer application on stability of aggregate-associated organic carbon in an intensively cultivated sandy loam soil. *Biology and Fertility of Soils*, 2012, 48 (3): 325—336
- [25] Gulde S, Chung H, Amelung W, et al. Soil carbon saturation controls labile and stable carbon pool dynamics. *Soil Science Society of America Journal*, 2008, 72 (3): 605—612
- [26] 张丽敏, 徐明岗, 娄翼来, 等. 长期施肥下黄壤性水稻土有机碳组分变化特征. 中国农业科学, 2014, 47 (19): 3817—3825
- Zhang L M, Xu M G, Lou Y L, et al. Changes in yellow paddy soil organic carbon fractions under long-term fertilization (In Chinese). *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47 (19): 3817—3825
- [27] Manna M C, Swarup A, Wanjari R H, et al. Long-term fertilization, manure and liming effects on soil organic matter and crop yields. *Soil and Tillage Research*, 2007, 94 (2): 397—409
- [28] Six J, Elliott E T, Paustian K. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: A mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture. *Soil Biology & Biochemistry*, 2000, 32 (14): 2099—2103
- [29] 刘满强, 胡锋, 陈小云. 土壤有机碳稳定机制研究进展. 生态学报, 2007, 27 (6): 2642—2650
- Liu M Q, Hu F, Chen X Y. A review on mechanisms of soil organic carbon stabilization (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27 (6): 2642—2650
- [30] Plante A F, Conant R T, Paul E A, et al. Acid hydrolysis of easily dispersed and microaggregate-derived silt-and clay-sized fractions to isolate resistant soil organic matter. *European Journal of Soil Science*, 2006, 57 (4): 456—467
- [31] Lützw M, Kögel-Knabner I, Ekschmitt K, et al.

- Stabilization of organic matter in temperate soils: mechanisms and their relevance under different soil conditions-A review. *European Journal of Soil Science*, 2006, 57 (4): 426—445
- [32] 李江涛, 张斌, 彭新华, 等. 施肥对红壤性水稻土颗粒有机物形成及团聚体稳定性的影响. *土壤学报*, 2004, 41 (6): 912—917
- Li J T, Zhang B, Peng X H, et al. Effects of fertilization on particulate organic matter formation and aggregate stability in paddy soil (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41 (6): 912—917
- [33] Baldock J A, Oades J M, Waters A G, et al. Aspects of the chemical structure of soil organic materials as revealed by solid-state ^{13}C NMR spectroscopy. *Biogeochemistry*, 1992, 16 (1): 1—42
- [34] Groffman P M, Egan P, Sullivan W M, et al. Grass species and soil type effects on microbial biomass and activity. *Plant and Soil*, 1996, 183 (1): 61—67

Effects of Long-term Fertilization on Distribution of Carbon and Nitrogen in Different Functional Soil Organic Matter Fractions in Paddy Soil

DENG Wenyue^{1, 2} LIU Kailou³ TIAN Jing^{2†} HUANG Qinghai³ YE Huicai³ LOU Yilai⁴
LI Zhongfang⁵ CAO Mingming¹

(1 College of Urban and Environmental Sciences, Northwest University, Xi'an 710127, China)

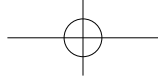
(2 Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

(3 Jiangxi Institute of Red Soil, National Engineering and Technology Research Center for Red Soil Improvement/Scientific Observational and Experimental Station of Arable Land Conservation in Jiangxi, Ministry of Agriculture, Nanchang 330046, China)

(4 Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

(5 College of Chemistry and Bioengineering, Hezhou University, Hezhou, Guangxi 542899, China)

Abstract 【Objective】 Soil organic matter (SOM) plays an important role in maintaining soil productivity, improving soil quality and sequestering C. Changes in SOM due to management practices are usually difficult to quantify on the background that the soil already has a large relatively stable SOM pool. Therefore, it is recommended to use SOM fractions as early indicators of effects of management practices on soil quality. Meanwhile, understanding changes in different fractions of functional SOM as affected by long-term management practice may help develop reasonable management strategies to optimize productivity and sustainability of the agroecosystem. 【Method】 Based on a 35-year long-term fertilization experiment, effects of fertilization on SOM relative to functional fraction were explored with the recently developed physical-chemical fractionation method. In the present study, six functional SOM fractions were isolated, including non-protected free labile SOM, physically protected SOM, physico-biochemically protected SOM, physico-chemically protected SOM, chemically protected SOM and biochemically protected SOM, and changes in these six fractions of SOM, concerning size of the fraction and to total nitrogen (TN) and Soil organic Carbon (SOC) contents and ratio in the fraction, under the long-term fertilization were analyzed. The long-term fertilization experiment was designed to have four treatments, that is, treatment CK (no fertilization), treatment N (chemical N fertilizer only), treatment NPK (N, P, K fertilizers), and treatment NPKM (chemical N, P, K fertilizers plus organic manure). 【Result】 Results show that long-term application, especially treatment NPKM, significantly increased the percentages of non-protected SOM (cPOM and fPOM) and physically protected SOM (iPOM) and the contents of SOC and TN therein. The SOC and TN content in the non-protected fraction of free SOM was the highest in Treatment NPKM, reaching



up to 35.9% and 33%, respectively, indicating that this fraction of SOM is probably the major storage pool for SOC and TN, and easily affected by human management practices. Compared with Treatment CK, Treatment NPKM significantly decreased the content of non-hydrolyzable free silt (NH-dSilt) and non-hydrolyzable free NH-dClay by 15% and 9.5%, respectively, in the bio-chemically protected fraction. However, it did not have much effect on the sizes of physico-chemically protected SOM fraction, physico-biochemically protected SOM fraction and chemically protected SOM fraction. All these indicate that these three fractions of SOM are relatively stable, or that they peak or approach to saturation in maintenance capacity. 【Conclusion】 To sum up, this study demonstrates that different functions of SOM respond to long-term fertilization differently. Combined application of organic and inorganic fertilizers is the optimum fertilization measure to enhance the quantity and quality of SOM in the red paddy soil, and the effect is especially obvious on non-protected and physically protected SOM fractions.

Key words Soil organic matter; Long-term fertilization experiment; Physically protected SOM fraction; Chemically protected SOM fraction; Biochemically protected SOM fraction; Soil carbon sequestration

(责任编辑：陈荣府)