

长期不同施肥对垆土大团聚体中有机碳组分特征的影响

谢钧宇^{1,2}, 彭 博², 王仁杰², 张树兰^{2*}, 杨学云^{2*}

(1 山西农业大学资源环境学院, 山西太谷 030801; 2 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100)

摘要:【目的】研究长期施肥对垆土大团聚体中有机碳组分特征的影响, 揭示不同施肥方式下土壤有机碳的固持机制, 为合理施肥提供理论依据。【方法】采集垆土 35 年长期肥料定位试验不同施肥处理 0—10 cm 和 10—20 cm 土样, 分析其大团聚体中各组分有机碳含量的变化。试验处理为: 不施肥 (CK)、单施化肥 (NP)、单施有机肥 (M) 和有机肥配施化肥 (MNP)。【结果】与 CK 相比, 长期 NP 处理对大团聚体中粗颗粒有机碳 (cPOC)、细颗粒有机碳 (fPOC)、大团聚体中微团聚体内颗粒有机碳 (iPOC) 以及矿质结合态有机碳 (MOC) 组分的有机碳 (OC) 含量均无显著影响; 而 M 处理以及 MNP 处理可显著提高两土层 cPOC 和 iPOC 组分的 OC 含量以及 0—10 cm 土层 MOC 组分的 OC 含量, 其中, cPOC 含量增幅分别为 174%~338% 和 215%~245%, iPOC 含量增幅分别为 127%~241% 和 106%~130%, MOC 含量增幅达 28.9%~34.6%。MNP 处理显著提高了 0—10 cm 土层 fPOC 组分的 OC 含量, 增幅达 482.1%。累积碳投入量与大团聚体中各组分的 OC 含量呈显著线性相关, 尤其是 iPOC 含量, 表明长期施肥过程中垆土有机碳在大团聚体中固存的差异主要受物理保护的颗粒有机碳组分的影响。【结论】关中地区垆土长期施肥对大团聚体中各组分 OC 含量没有显著影响, 而长期单施有机肥能进一步增加大团聚体中各组分 OC 含量, 有机肥配施化肥能显著增加团聚体中各组分 OC 含量, 特别是大团聚体中微团聚体内颗粒有机碳组分的含量, 进而增加垆土的有机碳固持。因此, 有机肥配施化肥是提高垆土有机碳含量的有效措施。

关键词: 化肥; 有机肥; 垆土; 大团聚体中微团聚体内颗粒有机碳; 矿质结合态有机碳

Effects of long-term different fertilizations on organic carbon fractions of macroaggregates in Anthrosol

XIE Jun-yu^{1,2}, PENG Bo², WANG Ren-jie², ZHANG Shu-lan^{2*}, YANG Xue-yun^{2*}

(1 College of Resources and Environment, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, China;

2 College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: 【Objectives】To characterize organic carbon fractions within macroaggregates in arable soils and understand mechanisms of soil organic carbon sequestration and optimize the fertilizer management. 【Methods】Soil samples were collected from 0–10 cm and 10–20 cm layers of a 35-year long term fertilizer experiment in an Anthrosol in Yangling, Shaanxi Province, and organic carbon (OC) contents were analyzed within the macroaggregate size fractions (coarse particulate organic carbon referred to as cPOC, fine particulate organic carbon referred to as fPOC, intra-microaggregate particulate organic carbon referred to as iPOC and mineral associated organic carbon referred to as MOC). The fertilization treatments were 1) Control, receiving no fertilizers; 2) NP, receiving chemical nitrogen and phosphorus fertilizers; 3) M, receiving organic manure alone, and 4) MNP, receiving the combined application of chemical NP fertilizers and organic manure at the same rates as treatments NP and MNP. 【Results】The long-term application of chemical fertilizers (NP) had

收稿日期: 2018-07-24 接受日期: 2018-10-29

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41807102); 土壤环境与养分资源山西省重点实验室开放基金项目 (2019003); 山西省优秀博士来晋工作奖励项目 (SKYBKY201805)。

联系方式: 谢钧宇 E-mail: xjy890621@163.com

* 通信作者 张树兰 E-mail: zhangshulan@nwsuaf.com; 杨学云 E-mail: xueyunyang@hotmail.com

no effects on the OC contents of any macroaggregate size fractions. However, application of manure alone or combined with chemical fertilizers greatly enhanced cPOC contents by 174%–338% (0–10 cm) and 215%–245% (10–20 cm), iPOC content by 127%–241% (0–10 cm) and 106%–130% (10–20 cm), and MOC content by 28.9%–34.6% in the 0–10 cm soil layer. Moreover, application of manure plus NP significantly increased fPOC content in the 0–10 cm layer by 482%. In addition, OC contents of all macroaggregate fractions were significantly and positively correlated with cumulative C input, especially for the iPOC content. These results indicated that the differences among fertilization regimes in OC sequestration occurred primarily in the physically protected OC fractions contained in macroaggregates. 【 **Conclusions** 】 Application of NP showed no effect on OC contents within macroaggregates, while application of M treatment could increase OC contents within macroaggregates, and MNP treatment significantly enhanced OC contents within macroaggregates, especially for iPOC content. Amendment of organic manure, alone or in combination with chemical fertilizers, could increase soil organic carbon (SOC) storage. Our data indicated that the combination of organic and chemical fertilizer is the most effective practice for increasing SOC storage in an Anthrosol.

Key words: chemical fertilizer; organic manure; Anthrosol; intra-microaggregate particulate organic carbon (iPOC); mineral associated organic carbon (MOC)

土壤有机碳 (SOC) 对提升作物生产力具有重要作用, 是评价土壤质量的关键指标。增加农田 SOC 固存能够减缓大气中温室气体浓度的升高^[1]。因此, 研究 SOC 的固存机制对于寻求或优化农田管理措施尤为重要。

长期施有机肥或化肥对 SOC 储量的影响受到了广泛关注。研究表明, 长期施有机肥可显著提高 SOC 储量^[2-4], Fan 等^[3]报道了连续 20 年单施有机肥和有机无机肥配施均显著提高潮土 SOC 储量, 增幅分别达 135% 和 88.6%。然而关于长期施用化肥对 SOC 储量影响的研究结果并不一致。研究发现长期施化肥能显著提高 SOC 储量^[2-4]; Hua 等^[4]利用 29 年肥料定位试验研究发现, 氮磷钾 (NPK) 配施较不施肥显著提高石灰性栗钙土 SOC 储量 55.4%; 但也有化肥对 SOC 储量无显著影响的报道^[5-6]。这其中的机理并不清楚。

通常, SOC 是由几种具有不同的内在降解性和分解速率的功能组分组成^[7], 大致可分为活性 SOC 和稳定性 SOC。鉴于 SOC 的空间异质性强, 活性 SOC 组分的周转速率较快, 相对于 SOC 而言, 活性 SOC 被认为是评价农田管理 SOC 变化更敏感的指标^[8]。为了更好地评价不同管理措施对 SOC 固存机制和稳定性的影响, Six 等^[9-10]提出了团聚体物理分组方法及其相对应的碳概念模型, 该方法将大团聚体分为 4 个概念组分, 分别是粗颗粒有机碳 (cPOC)、细颗粒有机碳 (fPOC)、大团聚体中微团聚体内颗粒有机碳 (iPOC) 和矿质结合态有机碳 (MOC), 认为

cPOC 和 fPOC 组分是团聚体之间未受保护的有机碳组分, 活性 SOC 组分可以通过这两个组分来表征; iPOC 组分是受物理保护的有机碳组分, MOC 组分受化学或生物化学保护。该方法主要被用来研究耕作方式的改变^[11]和农田管理措施 (如添加污泥或生物炭) 对各土壤有机碳组分含量的影响^[12-13], 均得到了较一致的结果: iPOC 组分对 SOC 的保护作用最大。国内也有一些学者应用该方法研究土壤有机碳组分的变化对土壤有机碳稳定机制的影响^[14-15], 特别是长期定位试验的研究较多^[16-18], 但结论不尽相同。Tian 等^[16]利用 35 年有机肥和无机肥定位试验研究发现, 施有机肥显著增加潮土有机碳含量, 使 SOC 优先累积在 MOC 以及 iPOC 组分中。但 Xu 等^[17]认为 cPOC 组分是评价长期施肥对棕壤有机碳固存影响的主要组分。而 Yang 等^[18]在南方红壤区研究发现, iPOC 组分是旱地土壤碳固存的主要形式, 而 MOC 组分是水田碳固存的主要形式。研究结果的不一致可能与施肥水平、施肥历史、作物种植体系、土壤性质以及气候因素有关。因此, 有必要对特定类型的土壤有机碳固存机制进行深入研究。

垆土是中国北方关中平原的重要土壤类型, 面积达 $97.6 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ^[19], 占陕西省耕地面积的 34.1%^[20]。该区域人地矛盾日益突出, 因此, 寻求高效和合理的培肥模式, 对于提升土壤肥力、维持农业可持续发展具有重要意义。以往的研究表明, 长期施无机肥可以维持或提高垆土有机碳含量^[21], 而有机无机肥配施能够显著提高垆土有机碳含量^[22], 但是

这些结果并没有从团聚体的角度剖析长期不同施肥塿土有机碳的固存机制。因此, 本研究以塿土 35 年肥料定位试验为依托, 利用物理分组方法, 深入探讨长期不同施肥模式下土壤大团聚体有机碳组分的变化特征, 以期更好地理解塿土有机碳的固存机制, 同时为塿土区建立合理的施肥模式提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于黄土高原南部的陕西省杨凌示范区三级阶地 (N 34°17'51"、E 108°00'48", 海拔 534 m), 年平均气温 13℃, 年降水量 550~600 mm。供试土壤为塿土 (土垫旱耕人为土), 黄土母质。试验开始前 0—20 cm 土层 SOC 含量为 6.52 g/kg、全氮 (N) 为 0.81 g/kg、全磷 (P) 为 0.79 g/kg、有效磷 (Olsen-P) 为 15.0 mg/kg、交换性钾 (K) 245 mg/kg (1.0 mol/L 乙酸铵浸提)、土壤容重为 1.30 g/cm³。

1.2 试验设计

试验开始于 1980 年夏, 冬小麦-夏玉米一年两熟制。小麦以小偃 22 号为主, 玉米以陕单 9 号为主。试验为裂区设计, 有机肥为主区, 氮磷化肥配施为副区, 小区面积为 33.3 m², 试验共设 9 个处理, 包括不施肥、单施低量化肥、单施高量化肥、单施低量有机肥、低量有机肥配施低量化肥、低量有机肥配施高量化肥、单施高量有机肥、高量有机肥配施低量化肥、高量有机肥配施高量化肥, 每个处理重复 3 次。本研究选取其中的 4 个处理: 不施肥 (CK)、单施高量化肥 (NP)、单施高量有机肥 (M)、高量有机肥配施高量化肥 (MNP)。每季作物施一次氮、磷肥, 1980 年至 1992 年每季作物施一次有机肥。由于多年施用土粪导致小区高程增加影响灌溉, 因此对有机肥施用量做了适当调整。1987 年至 1990 年有机肥施用量减半; 1991 年至 1992 年有机肥施用量减为四分之一; 从 1993 年开始, 每年只在玉米季施入四分之一用量的有机肥 (表 1)。2010 年只种了一季玉米, 从 2010 年开始每年只在小麦播种前施有机肥, 且有机肥按含氮量折合成相应的牛粪施入。小麦播种前施入所有的化肥和有机肥; 玉米则在约 8 叶期施肥。氮、磷肥第一年用尿素和普钙, 以后各年均用尿素和磷酸二铵, 每年施入的有机肥 (农家肥) 类型也不同。1980 年至 1993 年, 施入的有机肥是垫土的猪粪, 其中有机碳和全氮含量

表 1 塿土长期定位试验各处理施肥量
Table 1 Rates of manure, N and P in treatments of long-term experiment

年份 Year	肥料类型 Fertilizer types	CK	NP	M	MNP
1980—1986	M [t/(hm ² ·a)]	0	0	150	150
	N [kg/(hm ² ·a)]	0	240	0	240
	P [kg/(hm ² ·a)]	0	52	0	52
1987—1990	M [t/(hm ² ·a)]	0	0	75	75
	N [kg/(hm ² ·a)]	0	240	0	240
	P [kg/(hm ² ·a)]	0	52	0	52
1991—1992	M [t/(hm ² ·a)]	0	0	37.5	37.5
	N [kg/(hm ² ·a)]	0	240	0	240
	P [kg/(hm ² ·a)]	0	52	0	52
1993—2010	M [t/(hm ² ·a)]	0	0	36	36
	N [kg/(hm ² ·a)]	0	240	0	240
	P [kg/(hm ² ·a)]	0	52	0	52

注 (Note): M—有机肥 Manure.

范围分别是 0.99%~4.02% 和 0.12%~0.51%^[23]; 1994 年至 2000 年, 施入的有机肥是猪粪、牛粪、鸡粪以及干羊粪, 其中有机碳含量分别为 13.8%、10.4%、16.5% 和 33.6%, 相应的全氮含量分别为 0.55%、0.38%、1.03% 和 2.01%^[24]; 2001 年开始, 每年施入牛粪, 其中的有机碳和全氮含量变幅分别是 15.4%~44.0% 和 1.06%~2.90%。

冬小麦于每年十月中旬播种, 次年六月上旬收获; 接着播种夏玉米, 九月下旬或十月上旬收获。灌溉根据降雨情况而定, 地下水灌溉, 冬小麦生长期灌溉 0~2 次, 玉米为 3~4 次, 每次灌水量为 90 mm 左右。

1.3 样品采集与分析

于 2015 年 10 月夏玉米收获前一天, 用定制的取样环刀 (高度为 10 cm、直径为 10 cm) 分别采取 0—10 cm 和 10—20 cm 土层的原状土, 每个小区采集 3 个样点, 然后混合成 1 个样品, 小心地放入塑料袋中, 再装入硬纸盒中, 运输过程中尽量避免对土样的扰动, 以免破坏土壤结构。将采集回来的原状土样在室内沿自然结构轻轻掰成 < 1 cm 的小土块, 过 8 mm 筛, 剔除植物残体和石块等杂物, 自然风干, 放于塑封袋中供团聚体分级备用。

另外, 玉米收获后, 在每个小区用土钻 (高度为 20 cm、内径约 2.5 cm) 分别取 0—10 cm 和 10—20 cm 土层样品 6 钻混合, 装入塑料袋后带回实验室,

在阴凉通风处自然风干，人工去除植物残体等杂物，研磨后过 0.15 mm 筛，密封在塑封袋中测定 SOC 含量。

水稳性团聚体的测定采用湿筛法^[25]。土壤大团聚体中各有机碳组分测定采用 Six 等^[9-10]提出的湿筛与密度分组结合法，操作流程如图 1 所示。

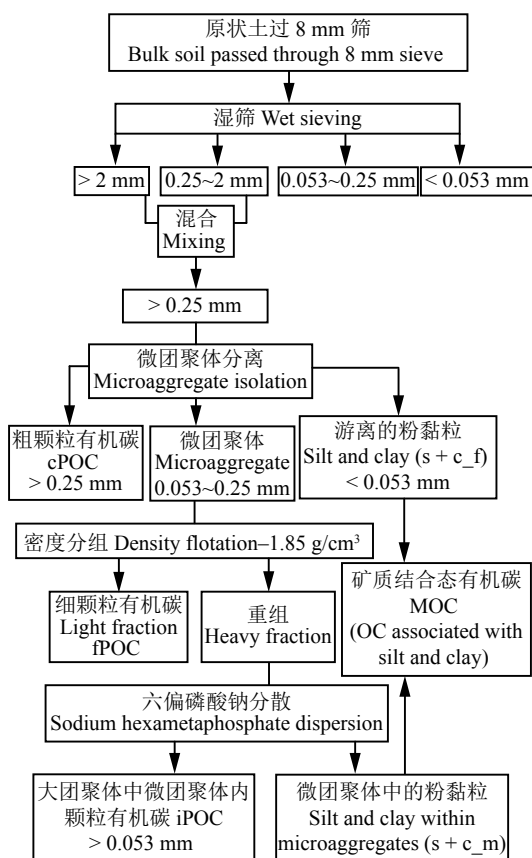


图 1 物理分组流程

Fig. 1 Physical fractionation scheme

[注 (Note): cPOC—未受保护的粗颗粒有机碳 Coarse particulate organic carbon; fPOC—未受保护的细颗粒有机碳 Fine particulate organic carbon; iPOC—受物理保护的大团聚体中微团聚体内颗粒有机碳 Intra-aggregate particulate organic carbon; MOC—受化学或生物化学保护的矿质结合态有机碳，是由 $s + c_m$ 和 $s + c_f$ 两个组分混合构成 Mineral associated organic carbon.]

1.4 测定项目及方法

土壤有机碳含量及 cPOC、iPOC 和 MOC 含量采用重铬酸钾—容量法测定，fPOC 含量用 Vario MACRO cube 元素分析仪 (德国哈瑙) 测定。

1.5 计算方法

土壤有机碳储量:

$$\text{SOC}_{\text{storage}} = \text{SOC} \times \text{BD} \times \text{H} \times 10 \quad (1)$$

式中，SOC 为 0—20 cm 土层土壤有机碳含量 (g/kg);

BD 为土壤容重 (g/cm^3); H 为土层深度 (0.20 m)。

本试验中土壤有机碳投入有两个途径: 其一源于有机肥 ($C_{\text{input-manure}}$), 即人畜粪尿肥; 其二是作物生长期间或收获后通过根系和根茬残留物输入至土壤的有机碳 ($C_{\text{input-crop}}$)。土壤有机碳投入量为二者之和。小麦、玉米碳投入按照小麦植株 0.413 g/g, 玉米 0.4074 g/g 进行计算。以种植小麦为例, 每年以作物残茬形式投入到土壤中的碳含量计算公式为:

$$C_{\text{input}} = (\text{YB} \times \text{R} \times \text{Dr} + \text{YS} \times \text{RS}) \times 0.4130 \quad (2)$$

式中, YB 和 YS 分别是地上部生物量和秸秆产量; R 为光合作用产物进入地下比例, 本试验按照小麦 30% 和玉米 26% 的地上部生物量的作物残茬量进行估算^[26-27]; Dr 为 0—20 cm 根系占地下部的比例, 小麦 (75.3%) 和玉米 (85.1%)^[28]; RS 为留茬占秸秆的比例, 小麦和玉米分别按 10% 和 3% 进行估算。

土壤大团聚体中各组分的有机碳含量为该组分有机碳含量与其质量之乘积。

1.6 数据处理

试验结果采用 Excel 和 DPS7.05 软件进行统计与分析, 不同处理间采用 LSD 法进行差异显著性检验。采用简单线性关系 ($y = ax + b$) 来拟合土壤有机碳储量增量以及土壤大团聚体各组分有机碳含量与累积碳投入量之间的关系。

2 结果与分析

2.1 土壤有机碳固存

与对照 (CK) 相比, 连续 35 年单施化肥 (NP) 对 SOC 储量无显著影响, 而单施有机肥 (M) 和有机无机肥配施 (MNP) 均显著提高 0—20 cm 土层 SOC 储量, 分别是 CK 的 1.45 倍和 1.43 倍 (表 2)。NP、M 以及 MNP 处理累积碳投入量和年均碳投入量均显著高于 CK, 增幅分别达 120%~515% 和 115%~518%。SOC 储量增量与累积碳投入量呈显著正相关 ($R^2 = 0.81$, $P < 0.01$) (表 2)。尽管施肥处理的累积碳投入量高于 CK 处理, 但是相应的 SOC 储量增量相对较低, 即所有施肥处理的固碳效率低于 CK 处理, 这也就造成了投入到土壤中的碳大量损失。

2.2 长期不同施肥大团聚体中各有机碳组分分布

在 0—10 cm 和 10—20 cm 土层土壤中, 各处理均以受化学或生物化学保护的游离态粉黏粒组分 ($s + c_f$) 分布比例最高, 分布比例范围分别介于 39.8%~56.2% 和 38.0%~53.3%; 其次是大团聚体中

表 2 1980—2015 年间表层土壤有机碳储量、累积碳投入量、年均碳投入量和固碳效率
Table 2 SOC storage, cumulative C input, annual C input and C sequestration efficiency of plough layer soils after 35-years' fertilization

处理 Treatment	土壤有机碳储量 SOC storage (t/hm ²)			累积碳投入量 Cumulative input (t/hm ²)	年均碳投入量 Annual input (t/hm ²)	固碳效率 Sequestration (%)
	1980	2015	△SOC			
0—10 cm						
CK		10.61 b				
NP		11.70 b				
M		17.18 a				
MNP		16.79 a				
10—20 cm						
CK		9.09 b				
NP		9.14 ab				
M		11.38 a				
MNP		11.30 ab				
0—20 cm						
CK	16.95	19.70 b	2.75 b	23.59 d	0.67 d	11.66 a
NP	16.95	20.84 b	3.89 b	51.97 c	1.44 c	7.49 b
M	16.95	28.56 a	11.61 a	104.89 b	3.00 b	11.07 a
MNP	16.95	28.10 a	11.15 a	144.98 a	4.14 a	7.69 b

注 (Note): CK 及 NP 处理碳投入量来自作物秸秆和残茬, M 及 MNP 处理碳来自作物和有机肥, $y = 0.081x + 0.791$, y —SOC 储量增量, x —累积碳投入量, $R^2 = 0.81$, $P < 0.01$. 同列数据后不同小写字母表示处理间差异达 5% 显著水平。C input in CK and NP treatments from crop straw and residues, those in M and MNP treatments from both crop and manures, $y = 0.081x + 0.791$, y is SOC storage increment, x is cumulative organic carbon, $R^2 = 0.81$, $P < 0.01$; Values followed by different lowercase letters in a column are significantly different among treatments at 5% level.

的微团聚体组分 (microaggregates occluded in macroaggregates, MOM), 分布比例范围分别为 40.7%~52.0% 和 42.1%~54.0%; 而未受保护的粗颗粒有机碳组分 (cPOC) 分布比例最少, 分别介于 3.2%~8.8% 和 2.9%~8.6%。在 MOM 组分中, 以受化学或生物化学保护的微团聚体中粉黏粒组分 (s + c_m) 分布比例最高, 在 0—10 cm 土层的变幅范围为 34.3%~45.6%, 10—20 cm 土层的变幅范围为 37.0%~48.1%; 其次是受物理保护的大团聚体中微团聚体内颗粒有机碳组分 (iPOC) (6.2%~9.0% 和 4.9%~5.7%), 而未受保护的细颗粒有机碳组分 (fPOC) 分布比例最少, 在 0—10 cm 土层仅占 0.2%~0.7%, 10—20 cm 土层占 0.2% (表 3)。

在 0—10 cm 土层, 同 CK 相比, NP 处理对 cPOC、fPOC 和 iPOC 组分的分布比例无显著影响, 但是 M 和 MNP 处理均显著提高 cPOC 和 iPOC 组分的分布比例, 增幅分别为 145.0%~179.9% 和

37.8%~45.9%。而且 MNP 处理显著提高 fPOC 组分的分布比例, 是 CK 的 3.5 倍。另外, 长期施肥均显著提高微团聚体中粉黏粒组分的分布比例, 增幅达 18.1%~32.9%, 却显著降低游离态粉黏粒组分的分布比例, 降幅达 21.7%~29.2%。

在 10—20 cm 土层, 与 CK 相比, 所有施肥处理均没有显著影响 cPOC、fPOC 和 iPOC 组分的分布比例, 但均显著提高微团聚体中粉黏粒组分的分布比例, 增幅达 21.7%~30.2%, 同时显著降低游离态粉黏粒组分的分布比例, 降幅达 13.5%~28.7%。

2.3 长期不同施肥大团聚体中各组分的有机碳含量

总体来讲, 垆土两土层各处理间大团聚体中各组分有机碳含量以 iPOC 或 MOC 组分最多, 其次是 cPOC 组分, 而 fPOC 组分最少 (图 2)。与 SOC 储量变化趋势相似, 0—10 cm 土层土壤大团聚体中各组分的有机碳含量高于 10—20 cm 土层 (图 2)。

表 3 长期施肥 0—10 cm 和 10—20 cm 土层土壤大团聚体中有机碳组分重量分布 (% , w/w)
Table 3 Weight distribution of soil macroaggregate fractions in soils separated by physical fractionation at 0—10 cm and 10—20 cm layers in each treatment

处理 Treatment	cPOC (> 0.25 mm)	MOM (0.053~0.25 mm)				s + c_f (< 0.053 mm)	MOC (< 0.053 mm)
		fPOC	重组 Heavy fraction				
			iPOC (> 0.053 mm)	s + c_m_ (< 0.053 mm)			
0—10 cm							
CK	3.2 c	0.2 b	6.2 b	34.3 b	56.2 a	90.5 a	
NP	4.1 bc	0.2 b	6.2 b	45.6 a	44.0 b	89.6 a	
M	7.7 ab	0.2 b	8.5 a	40.5 a	43.1 b	83.6 b	
MNP	8.8 a	0.7 a	9.0 a	41.6 a	39.8 b	81.5 b	
10—20 cm							
CK	4.6 ab	0.2 a	4.9 a	37.0 b	53.3 a	90.3 ab	
NP	2.9 b	0.2 a	4.9 a	45.9 a	46.1 b	92.0 a	
M	8.6 a	0.2 a	5.3 a	45.0 a	40.9 bc	85.9 b	
MNP	8.0 a	0.2 a	5.7 a	48.1 a	38.0 c	86.2 b	

注 (Note): cPOC—未受保护的粗颗粒有机碳 Unprotected coarse particulate organic carbon; MOM—大团聚体中的微团聚体 Microaggregates occluded in macroaggregates; fPOC—未受保护的细颗粒有机碳 Unprotected fine particulate organic carbon; iPOC—受物理保护的大团聚体中微团聚体内颗粒有机碳 Physically protected intra-aggregate particulate organic carbon; s + c_m—微团聚体中的粉黏粒有机碳 Chemically or biochemically protected organic carbon in silt and clay within the microaggregate; s + c_f—游离的粉黏粒有机碳 Chemically or biochemically protected organic carbon in free silt and clay; MOC—受化学或生物化学保护的矿质结合态有机碳, 是由 s + c_m 和 s + c_f 混合构成 Chemically or biochemically protected mineral associated organic carbon, it is composed of s + c_m and s + c_f; 同列数据后不同小写字母表示处理间同一大团聚体组分差异达 5% 显著水平 Values followed by different lowercase letters in the same column indicate significant differences among treatments for the same macroaggregate fraction ($P < 0.05$).

与 CK 相比, 施 NP 对两土层大团聚体中各组分的有机碳含量没有显著影响。施有机肥 (M 和 MNP) 显著提高各土层 cPOC 和 iPOC 含量, cPOC 含量提高了 174%~338% (0—10 cm) 和 215%~245% (10—20 cm), iPOC 含量提高了 127%~241% (0—10 cm) 和 106%~130% (10—20 cm)。而且 MNP 处理还显著提高 0—10 cm 土层 fPOC 含量 (482%), M 和 MNP 处理均显著提高 0—10 cm 土层 MOC 含量, 分别提高了 34.6% 和 28.9%, 但是 M 和 MNP 处理均对 10—20 cm 土层 fPOC 和 MOC 含量没有显著影响 (图 2)。

2.4 大团聚体中各组分有机碳含量与累积碳投入量的关系

线性回归显示大团聚体中各组分有机碳含量均与累积碳投入量呈显著正相关 ($P < 0.05$) (图 3), 表明垆土有机碳在各个团聚体组分中均有固存。大团聚体各组分中, 回归方程斜率最高的是 iPOC 组分 (0.023), 其次是 cPOC 组分 (0.012), 而 MOC 组分 (0.007) 和 fPOC 组分的斜率最低 (0.005)。说明在

垆土上, 有机碳固存的最高速率发生在 iPOC 组分中。

3 讨论

3.1 长期不同施肥对土壤有机碳固存的影响

肥料的施用是影响土壤有机碳库的重要因素, 不同的施肥措施对 SOC 的影响不同, 尤其是有机肥的施用是调控 SOC 的重要措施之一^[29]。本研究结果表明, 相对不施肥而言, 施化肥通过提高作物生物量以及残茬归还量, 对 SOC 储量无显著影响, 这与该区域另一个长期定位试验的结果不尽相同^[21], 可能是因为本试验长期以来氮磷施用量较低, 产量仅可维持碳平衡。施有机肥为土壤提供了充足的碳源, 从而直接增加 SOC 储量。进一步配施化肥对 SOC 储量的增幅效果最好。SOC 储量增量与累积碳投入量呈线性相关 (表 2), 这与 Kundu 等^[26]的研究结果相似, 他们也发现在印度沙壤 SOC 含量的变化与总碳投入量之间存在显著的线性关系 ($R^2 = 0.988$, $P < 0.05$), 表明本研究区域的土壤仍有较大的潜力固存有机碳。

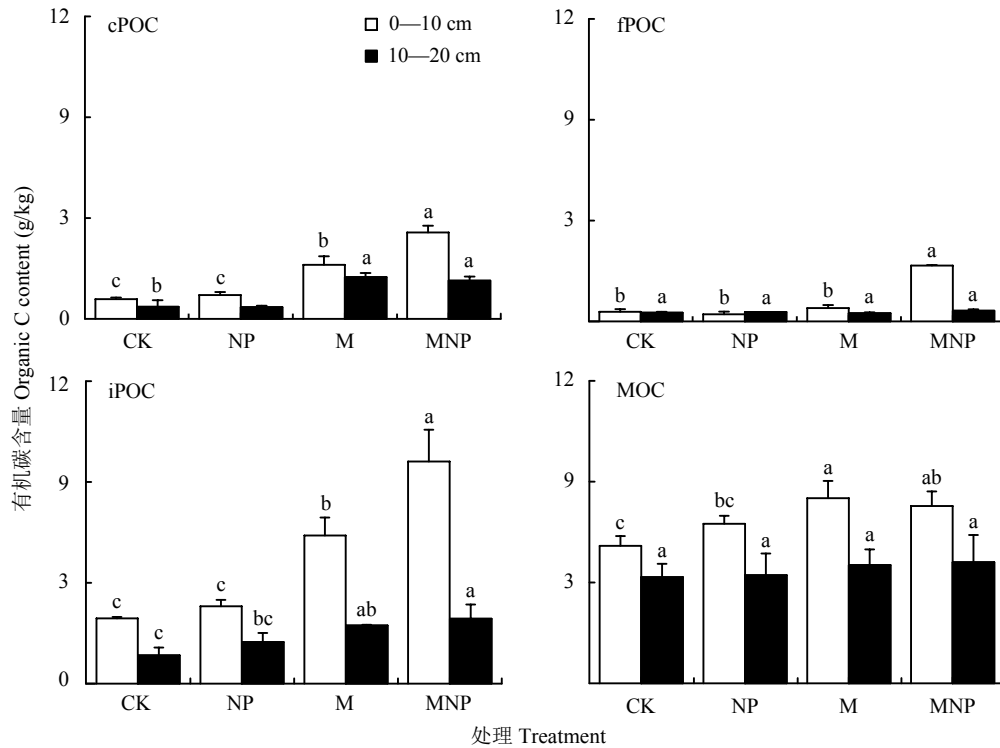


图 2 长期不同施肥 0—10 cm 和 10—20 cm 土层土壤大团聚体中各组分有机碳含量

Fig. 2 Organic C contents in macroaggregates fractions in soils of 0—10 cm and 10—20 cm depths in each treatment

[注 (Note): cPOC—未受保护的粗颗粒有机碳 Unprotected coarse particulate organic carbon; fPOC—未受保护的细颗粒有机碳 Physically protected intra-aggregate particulate organic carbon; iPOC—受物理保护的大团聚体中微团聚体内颗粒有机碳 Physically protected intra-aggregate particulate organic carbon; MOC—受化学或生物化学保护的矿质结合态有机碳, 是由微团聚体中的粉黏粒有机碳 (s + c_m) 和游离的粉黏粒有机碳 (s + c_f) 混合构成 Chemically or biochemically protected mineral associated organic carbon, it is composed of s + c_m (silt and clay within the microaggregate) and s + c_f (free silt and clay); 柱上不同小写字母表示大团聚体中相同组分不同处理间在 5% 水平差异显著 Different lowercase letters above the bars for the same size fraction within macroaggregate mean significant differences among treatments at the 5% probability level.]

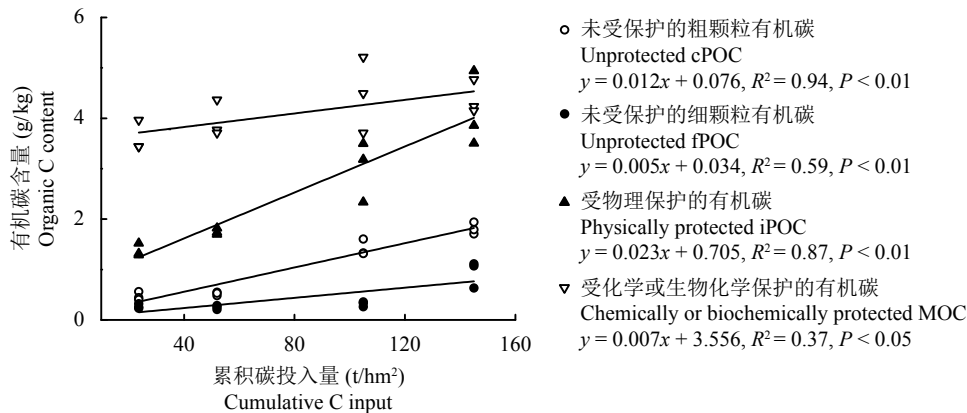


图 3 长期不同施肥处理耕层土壤大团聚体中各组分有机碳含量与累积碳投入量的关系

Fig. 3 Relationship between OC content of fractions isolated from macroaggregates in soils at 0—10 cm and 10—20 cm soil depths and cumulative C input under various long-term fertilization regimes

另外, 本研究发现, 不同处理间土壤固碳效率存在显著差异, 总体表现为 CK 处理的固碳效率最高 (12%), 其次是 M 处理 (11%), 而 MNP 处理 (8%) 和 NP 处理 (7%) 的固碳效率最低。这一方面与各处

理的碳投入量不同有关。不施肥 (CK) 条件下, SOC 的来源主要是作物残茬和根系归还土壤, 土壤养分供应不均衡限制了作物生长, 导致碳投入数量较少。有机肥投入水平下 (M 和 MNP) 固碳效率较低

可能是因为充足的碳源和养分投入为微生物的繁殖和活动提供了良好的环境,导致很强的正激发效应^[30]。另一方面是因为土壤对不同碳源提供的碳固定能力不同^[31]。研究表明来源于根系的有机碳易与土壤中的矿物颗粒相结合,从而受到保护,残留于土壤中^[32]。Mendez-Millan 等^[33]利用同位素技术研究植物根系和地上部的生物标记物发现,与植物地上部比较,来源于根系的有机质分子占土壤残留有机质的绝大多数。Halvorson 等^[34]研究发现,土壤对残茬和根系提供的碳固定率为 159%,而对有机肥提供的碳固定率为 60%。同时也说明根茬是导致 SOC 变化的主要碳源因素。在低养分供应胁迫下,光合产物将优先分配至根组织^[35]。而根际分泌物的激发作用促进土壤原有机碳的降解,因此根际分泌物激发作用造成的 SOC 损失可能会抵消分泌物对土壤的碳输入^[36]。此外,施化肥(NP)能增加微生物生物量、DOC 和 N 有效性^[37],进而加速 SOC 的分解。这也导致了该水平条件下土壤固碳效率最低。

此外,还与估算土壤碳投入的计算方法有关。通过根系和根茬投入土壤的有机碳可以根据它们与地上部生物量的比例来确定,但是该比例不仅与农田管理措施有关,还受气候条件变化的影响,因此具有年际间差异。有报道,该比值与产量呈负相关,即产量越高,根系和根茬占产量的比值就越小^[5]。因此,不同的施肥条件下,采用相同的比例可能会过高或过低地估算土壤碳投入。本研究通过实地测定,小麦和玉米根茬量与地上部生物量比值分别采用 0.30 和 0.26,与 Kuzyakov 等^[38]根据同位素示踪技术估算的小麦值相近,为 0.32,但是高于 Kong 等^[32]在估算碳投入时,小麦和玉米根茬量与地上部生物量的比值,分别为 0.22 和 0.23,而低于 Majumder 等^[39]在估算稻麦轮作体系中,小麦根茬量与地上部生物量的比值,分别是 0.38 和 0.40。可以看出,碳投入的估算存在很多不确定性,因此会影响不同研究之间的有机碳固存效率。

3.2 长期不同施肥对大团聚体中各组分有机碳固存的影响

团聚体中 iPOC 组分通常被认为是利用物理保护机制通过团聚体的闭蓄作用以阻止微生物分解 SOC^[9-10]。本研究表明,与 CK 相比, NP 处理对两土层大团聚体中 iPOC 含量无显著影响,但是施有机肥(M 以及 MNP)可以显著提高 iPOC 含量(图 2)。这与前人研究结果相似,长期施有机肥可以显著提高大团聚体中 iPOC 储量以及原土中 iPOC 含量^[16, 18, 40-41]。因为与

CK 或 NP 处理相比,有机肥本身作为一种碳源,直接向土壤投入更多的碳,而且施有机肥通过提高作物产量^[42],进而导致更多的作物残茬和根系归还到土壤中。另外,也有报道施有机肥能促进大团聚体中微团聚体的形成,并加速了新的、更稳定的 iPOC 累积于新形成的微团聚体中^[43-44]。Huang 等^[43]、Jiang 等^[40]和 Liang 等^[45]研究证实,大团聚体中 iPOC 组分是红壤、潮土和灰漠土的主要固碳形式,可以作为评价长期施肥对 SOC 固存的理想指标。本研究还发现,与其它 3 个组分相比, iPOC 含量与累积碳投入量之间呈极显著正相关(图 3),因此, iPOC 是本研究所在区域的土壤上最主要的固碳形式,换言之,长期施肥主要显著增加了垆土大团聚体中受物理保护的组分有机碳储量。

cPOC 和 fPOC 组分构成了一个未受保护的土壤有机碳库,是微生物可直接利用的碳源,属于高活性有机碳,对农业措施响应敏感^[9-10]。本研究结果显示,与 CK 相比,长期施化肥对两土层这 2 个组分的有机碳含量均无显著影响,但 M 以及 MNP 处理显著增加了 cPOC 含量, MNP 处理显著增加 0—10 cm 土层 fPOC 含量(图 3)。Yu 等^[41]也报道施有机肥显著增加大团聚体中 cPOC 组分有机碳储量,但施 PK 肥对它无显著影响。另外, He 等^[8]和 Tian 等^[16]也研究发现长期施有机肥显著增加棕壤、潮土和红壤 cPOC 组分中有机碳含量。这说明 cPOC 含量主要是通过有机肥中容易代谢的碳的正常供给而增加。

与本研究中施肥对 fPOC 含量的影响结果相似, Liang 等^[45]研究发现连续施有机肥或有机肥化肥配施(M、MN 和 MNPK)均显著提高潮土大团聚体中 fPOC 含量,而施化肥(N 和 NPK)则无显著影响。Tian 等^[16]及 Yang 等^[18]也分别报道了长期有机无机肥配施显著提高潮土和红壤 fPOC 含量。Yang 等^[18]同时证实化肥对红壤 fPOC 含量无显著影响。表明碳投入水平越高越有利于 fPOC 组分中有机碳含量的累积,而施化肥不能为该组分提供足够的有机碳。Six 等^[9]指出 cPOC 和 fPOC 组分主要由作物根系残茬、动植物残体、微生物,甚至是木炭组成。本研究所在区域的土壤上,未受保护的组分中有机碳含量之所以增加是因为长期施有机肥不仅显著提高作物产量^[42],进而增加了作物根系、残茬归还量,而且有机肥施用直接提供了该组分。另外,结合 cPOC 和 fPOC 与累积碳投入量之间的关系发现, cPOC+fPOC 是本研究所在区域土壤的第二个重要的大团聚体有机碳固存库,与周萍等^[46]报道的 cPOC 组分是棕

壤上主要的碳库不同。这种差异可能是因为本研究的 cPOC 组分是从大团聚体中获得的, 而周萍等^[46]则是从原土中得到的。

惰性的矿质结合有机碳 (MOC) 在垆土大团聚体各有机碳组分中含量最高, 但只有有机肥处理显著增加 0—10 cm 土层 MOC 储量, 而施化肥对 0—10 cm 和 10—20 cm 土层 MOC 储量无显著影响 (图 3)。一方面因为有机肥中的多聚糖、脂肪酸及芳香族化合物与土壤矿物颗粒结合形成矿质结合有机碳^[47]; 另一方面, 有机肥作为外源碳, 其归还碳量显著大于土壤本身矿化损失碳量。由于矿质结合有机碳主要由腐殖质组成^[48], 因此化肥施用输入的有机碳分解形成的腐殖质可能还不足以显著增加矿质结合态有机碳。土壤中自由颗粒有机碳主要是新输入的有机碳, 它们分解后进而向物理保护的有机碳转化, 最后成为腐殖化程度较高的矿质结合态有机碳, 相对稳定地固存于土壤中^[49]。另外, 尽管在本研究中 MOC 储量与累积碳投入量呈线性相关, 但其决定系数仅为 37%, 而且当累积碳投入量大于 50 t/hm² 时, MOC 储量大致保持不变 (图 3)。这在一定程度上也说明 MOC 组分已经接近饱和。也有一些研究报告, 长期施化肥对红壤、黑土和潮土中 MOC 组分有机碳含量无显著影响^[8, 50], 但是长期施有机肥显著增加 MOC 组分有机碳含量。前人研究报告粉黏粒组分中碳储量是有限的, 而且惰性碳库对有机碳的保护能力与粉黏粒含量紧密相关^[51]。因此, MOC 组分对施肥措施响应主要依赖于初始 SOC 水平以及粉黏粒含量。这说明在以上两篇研究中, 红壤、黑土和潮土中 MOC 库仍没有达到最大值。

4 结论

1) 长期施化肥对垆土耕层土壤有机碳储量无显著影响, 尽管其累积碳投入量显著增加。而单施有机肥以及进一步配施化肥均显著提高了累积碳投入量及土壤有机碳储量。累积碳投入量与土壤有机碳储量呈正相关, 表明供试垆土仍可固存有机碳。

2) 长期施化肥对大团聚体中各组分的有机碳含量无显著影响。单施有机肥以及进一步配施化肥后均显著提高粗颗粒有机碳组分 (cPOC) 和大团聚体中微团聚体内的颗粒有机碳组分 (iPOC) 的有机碳含量, 且以有机无机肥配施效果更显著。长期有机无机肥配施显著提高 0—10 cm 土层细颗粒有机碳组分 (fPOC) 的有机碳含量。长期单施有机肥以及进一步

配施化肥均显著提高 0—10 cm 土层矿质结合态有机碳组分 (MOC) 的有机碳含量。受物理保护的有机碳组分 (iPOC) 与累积碳投入量之间呈极显著正相关, 表明垆土有机碳首先累积在大团聚体中微团聚体内的颗粒有机碳组分中。

参 考 文 献:

- [1] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security[J]. *Science*, 2004, 304: 1623–1627.
- [2] Bara B S, Singh K, Dheri G S, *et al.* Carbon sequestration and soil carbon pools in a rice-wheat cropping system: Effect of long-term use of inorganic fertilizers and organic manure[J]. *Soil and Tillage Research*, 2013, 128: 30–36.
- [3] Fan J, Ding W, Xiang J, *et al.* Carbon sequestration in an intensively cultivated sandy loam soil in the North China Plain as affected by compost and inorganic fertilizer application[J]. *Geoderma*, 2014, 230–231: 22–28.
- [4] Hua K, Wang D, Guo X, *et al.* Carbon sequestration efficiency of organic amendments in a long-term experiment on a Vertisol in Huang-Huai-Hai Plain, China[J]. *PLoS One*, 2014, 9(9): e108594.
- [5] Yan X, Zhou H, Zhu Q H, *et al.* Carbon sequestration efficiency in paddy soil and upland soil under long-term fertilization in southern China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2013, 130: 42–51.
- [6] Zhang W, Xu M, Wang X, *et al.* Effects of organic amendments on soil carbon sequestration in paddy fields of subtropical China[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2012, 12: 457–470.
- [7] Li C, Cao Z, Chang J, *et al.* Elevational gradient affect functional fractions of soil organic carbon and aggregates stability in a Tibetan alpine meadow[J]. *Catena*, 2017, 156: 139–148.
- [8] He Y T, Zhang W J, Xu M G, *et al.* Long-term combined chemical and manure fertilizations increase soil organic carbon and total nitrogen in aggregate fractions at three typical cropland soils in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 532: 635–644.
- [9] Six J, Elliott E T, Paustian K, *et al.* Aggregation and soil organic matter accumulation in cultivated and native grassland soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1998, 62: 1367–1377.
- [10] Six J, Elliott E T, Paustian K. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: a mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32: 2099–2103.
- [11] Sheehy J, Regina K, Alakukku L, *et al.* Impact of no-till and reduced tillage on aggregation and aggregate-associated carbon in Northern European agroecosystems[J]. *Soil and Tillage Research*, 2015, 150: 107–113.
- [12] Nicolas C, Kennedy J N, Hernandez T, *et al.* Soil aggregation in a semiarid soil amended with composted and non-composted sewage sludge-A field experiment[J]. *Geoderma*, 2014, 219–220: 24–31.
- [13] Wang D, Fonte S J, Parikh S J, *et al.* Biochar additions can enhance soil structure and the physical stabilization of C in aggregates[J]. *Geoderma*, 2017, 303: 110–117.
- [14] Cheng M, Xiang Y, Xue Z, *et al.* Soil aggregation and intra-aggregate carbon fractions in relation to vegetation succession on the Loess

- Plateau, China[J]. *Catena*, 2015, 124: 77–84.
- [15] Dou X, Cheng X, He P, *et al.* Dynamics of physically-separated soil organic carbon pools assessed from $\delta^{13}\text{C}$ changes under 25 years of cropping systems[J]. *Soil and Tillage Research*, 2018, 174: 6–13.
- [16] Tian J, Lou Y, Gao Y, *et al.* Response of soil organic matter fractions and composition of microbial community to long-term organic and mineral fertilization[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2017, 53: 523–532.
- [17] Xu X, Zhang W, Xu M, *et al.* Characteristics of differently stabilised soil organic carbon fractions in relation to long-term fertilisation in Brown Earth of Northeast China[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 572: 1101–1110.
- [18] Yang F, Tian J, Meersmans J, *et al.* Functional soil organic matter fractions in response to long-term fertilization in upland and paddy systems in South China[J]. *Catena*, 2018, 162: 270–277.
- [19] 郭兆元. 陕西土壤[M]. 北京: 科学出版社, 1992.
- Guo Z Y. Shaanxi soil[M]. Beijing: Science Press. 1992.
- [20] 姚涛. 陕西省耕地面积变化及影响因素分析[J]. *广东农业科学*, 2013, (9): 229–232.
- Yao T. Analysis of cultivated land change in Shaanxi province and its influencing factors[J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2013, (9): 229–232.
- [21] Yang X, Ren W, Sun B, *et al.* Effects of contrasting soil management regimes on total and labile soil organic carbon fractions in a loess soil in China[J]. *Geoderma*, 2012, 177–178: 49–56.
- [22] 王仁杰, 强久次仁, 薛彦飞, 等. 长期有机无机肥配施改变了壤土团聚体及其有机和无机碳分布[J]. *中国农业科学*, 2015, 48(23): 4678–4689.
- Wang R J, Qiangjiu C R, Xue Y F, *et al.* Effect of long-term organic-manure combined with chemical fertilizers on aggregate sizes distribution and its organic and inorganic carbon in a tier soil[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(23): 4678–4689.
- [23] 刘杏兰, 高宗, 刘存寿, 等. 有机-无机肥配施的增产效应及对土壤肥力影响的定位研究[J]. *土壤学报*, 1996, 33(2): 138–147.
- Liu X L, Gao Z, Liu C S, *et al.* Effect of combined application of organic manure and fertilizers on crop yield and soil fertility in a located experiment[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1996, 33(2): 138–147.
- [24] 张福锁, 陈新平, 陈清, 等. 中国主要作物施肥指南[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2009.
- Zhang F S, Chen X P, Chen Q, *et al.* Fertilizer guidelines for main agricultural crops in China[M]. Beijing: China Agricultural University Press. 2009.
- [25] Elliott E T. Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1986, 50: 627–633.
- [26] Kundu S, Bhattacharyya R, Prakash V, *et al.* Carbon sequestration and relationship between carbon addition and storage under rainfed soybean-wheat rotation in a sandy loam soil of the Indian Himalayas[J]. *Soil and Tillage Research*, 2007, 92: 87–95.
- [27] Zhang W J, Wang X J, Xu M G, *et al.* Soil organic carbon dynamics under long-term fertilizations in arable land of northern China[J]. *Biogeosciences*, 2010, 7: 409–425.
- [28] Jiang G, Xu M, He X, *et al.* Soil organic carbon sequestration in upland soils of northern China under variable fertilizer management and climate change scenarios[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2014, 28: 319–333.
- [29] 高伟, 杨军, 仁顺荣. 长期不同施肥模式下华北旱作潮土有机碳的平衡特征[J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21(6): 1465–1472.
- Gao W, Yang J, Ren S R. Balance characteristics of soil organic carbon under different long-term fertilization models in the upland fluvo-aquic soil of North China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015, 21(6): 1465–1472.
- [30] Kuzyakov Y. Priming effects: interactions between living and dead organic matter[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, 42: 1363–1371.
- [31] Maillard É, Angers D A. Animal manure application and soil organic carbon stocks: a meta-analysis[J]. *Global Change Biology*, 2014, 20: 666–679.
- [32] Kong A Y Y, Six J, Bryant D C, *et al.* The relationship between carbon input, aggregation, and soil organic carbon stabilization in sustainable cropping systems[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2005, 69: 1078.
- [33] Mendez-Millan M, Dignac M F, Rumpel C, *et al.* Molecular dynamics of shoot vs root biomarkers in an agricultural soil estimated by natural abundance ^{13}C labeling[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, 42: 169–177.
- [34] Halvorson A D, Peterson G A, Reule C A. Tillage system and crop rotation effects on dryland crop yields and soil carbon in the Central Great Plains[J]. *Agronomy Journal*, 2002, 94: 1429–1436.
- [35] Luo Y Q, Weng E S, Yang Y H. Sourcebook in theoretical ecology[M]. California: The University of California Press, 2011.
- [36] Dijkstra F A, Cheng W X. Interactions between soil and tree roots accelerate long-term soil carbon decomposition[J]. *Ecology Letters*, 2007, 10: 1046–1053.
- [37] Qiu Q Y, Wu L F, Ouyang Z, *et al.* Priming effect of maize residue and urea N on soil organic matter changes with time[J]. *Applied Soil Ecology*, 2016, 100: 65–74.
- [38] Kuzyakov Y, Domanski G. Carbon input by plants into the soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2000, 163: 421–431.
- [39] Majumder B, Mmandal B, Bandyopadhyay P K, *et al.* Organic amendments influence soil organic carbon pools and rice-wheat productivity[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2008, 72: 775–785.
- [40] Jiang M, Wang X, Liusui Y, *et al.* Variation of soil aggregation and intra-aggregate carbon by long-term fertilization with aggregate formation in a grey desert soil[J]. *Catena*, 2017, 149: 437–445.
- [41] Yu H, Ding W, Luo J, *et al.* Long-term application of organic manure and mineral fertilizers on aggregation and aggregate-associated carbon in a sandy loam soil[J]. *Soil and Tillage Research*, 2012, 124: 170–177.
- [42] Xie J, Peng B, Wang R, *et al.* Responses of crop productivity and physical protection of organic carbon by macroaggregates to long-term fertilization of an Anthrosol[J]. *European Journal of Soil Science*, 2018, 69: 555–567.
- [43] Huang S, Rui W, Peng X, *et al.* Organic carbon fractions affected by long-term fertilization in a subtropical paddy soil[J]. *Nutrient Cycling*

- in *Agroecosystems*, 2010, 86: 153–160.
- [44] 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[J]. *Soil and Tillage Research*, 2004, 79: 7–31.
- [45] Liang C H, Yin Y, Chen Q. Dynamics of soil organic carbon fractions and aggregates in vegetable cropping systems[J]. *Pedosphere*, 2014, 24: 605–612.
- [46] 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 P, Song G H, Pan G X, *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.
- [47] Tisdall J M, Oades J M. The management of ryegrass to stabilize aggregates of a red-brown earth[J]. *Australian Journal of Soil Research*, 1980, 18: 415–422.
- [48] Schulten H R, Leinweber P. Influence of long-term fertilization with farmyard manure on soil organic matter: characteristics of particle-size fractions[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1991, 12: 81–88.
- [49] Sleutel S, Neve S D, Nemeth T, *et al.* Effect of manure and fertilizer application on the distribution of organic carbon in different soil fractions in long-term field experiments[J]. *European Journal of Agronomy*, 2006, 25: 280–288.
- [50] Tong X, Xu M, Wang X, *et al.* Long-term fertilization effects on organic carbon fractions in a red soil of China[J]. *Catena*, 2014, 113: 251–259.
- [51] 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: 77–87.