

DOI: 10.11766/trxb201912040540

廖超林, 黎丽娜, 谢丽华, 孙钰翔, 邹炎, 戴齐, 尹力初. 增减施有机肥对红壤性水稻土团聚体稳定性及胶结物的影响[J]. 土壤学报, 2021, 58 (4): 978–988.

LIAO Chaolin, LI Lina, XIE Lihua, SUN Yuxiang, ZOU Yan, DAI Qi, YIN Lichu. Effect of Increased or Decreased Application of Organic Manure on Aggregates Stability and Soil Cement in Red Paddy Soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, 58 (4): 978–988.

增减施有机肥对红壤性水稻土团聚体稳定性及胶结物的影响*

廖超林, 黎丽娜, 谢丽华, 孙钰翔, 邹炎, 戴齐, 尹力初

(湖南农业大学资源环境学院, 长沙 410128)

摘 要: 利用具有 35a 的长期定位试验, 在保证原定位试验继续正常开展的前提下, 将原化肥处理改施有机肥, 原有机肥处理改施化肥或增施有机肥, 分析增减施有机肥后耕层土壤团聚体稳定性总有机碳 (TOC) 及其组分和铁铝氧化物的变化与作用关系, 探究胶结物对红壤性水稻土团聚体稳定性变化的影响。结果表明: 化肥 (CF) 及常量有机肥 (NOM) 处理增施有机肥后, 团聚体平均重量直径 (MWD) 变化不明显, 易氧化有机碳 (EOC) 分别升高 87.44% 和 20.53%; 高量有机肥 (HOM) 及 NOM 处理减施有机肥后, MWD 分别显著降低 8.39% 和 6.80%, 高改化 (H-C) 处理的 TOC、轻组有机碳 (LFOC) 及粗颗粒态有机碳 (cPOC) 含量显著降低, 而常改化 (N-C) 处理的 TOC 及其组分变化不明显。无论增施还是减施有机肥, 铁铝氧化物含量的变化规律不明显。相关及结构方程模型分析表明, 大于 0.25 mm 团聚体含量是影响团聚体稳定性的唯一直接影响因素; 影响 MWD 及大于 0.25 mm 团聚体含量的效应系数由大到小依次为: 易氧化有机碳、轻组有机碳、游离氧化铁、络合态铁。因此, 大于 0.25 mm 大团聚体在红壤性水稻土的团聚体稳定性中发挥主导作用, 有机碳活性组分对大团聚体的形成与破坏具有重要影响。

关键词: 有机肥; 水稻土; 团聚体稳定性; 结构方程模型

中图分类号: S152 **文献标志码:** A

Effect of Increased or Decreased Application of Organic Manure on Aggregates Stability and Soil Cement in Red Paddy Soil

LIAO Chaolin, LI Lina, XIE Lihua, SUN Yuxiang, ZOU Yan, DAI Qi, YIN Lichu

(College of Resources and Environment, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China)

Abstract: 【Objective】 This paper is oriented to explore effects of increased or decreased application of organic manure on stability and cement (e.g. organic carbon and iron-aluminium oxides) of soil aggregates stability in red paddy soil of a long-term field fertilization experiment. 【Method】 In the 35-year-old long term field experiment, on the premise of guaranteeing normal development of the original stationary experiment, the treatments, which used to be applied with chemical fertilizer, changed to be

* 国家自然科学基金项目 (41571211) 和湖南省高校科研重点项目 (15A085) 资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 41571211) and the University Research Key Projects of Hunan Province in China (No. 15A085)

作者简介: 廖超林 (1975—), 男, 副教授, 主要从事土壤团聚体及土壤质量演变研究。E-mail: clliao@163.com

收稿日期: 2019-12-04; 收到修改稿日期: 2020-03-07; 网络首发日期 (www.cnki.net): 2020-04-26

applied with organic manure instead and the treatments, which used to be applied with original manure, changed to be applied with chemical fertilizer or remained to be applied with organic manure, but at a higher rate. Soil samples were collected from the tillage soil layers of the treatments and analyzed for changes in fractionation, stability, contents of total organic carbon (TOC) and its fractions, and content of iron-aluminium oxides of soil aggregates. Based on the analysis of the relationship between aggregates stability and cement, mechanism of their interactions was explored with correlation analysis and path analysis methods. 【Result】 Results show that there was no obvious changes in average weight diameter (MWD) of the soil aggregates after application of organic manure at a higher rate in Treatment CF (application of chemical fertilizer) and Treatment NOM (application of organic manure at a normal rate), but there were in content of oxidizable organic carbon (EOC), which increased by 87.44% and 20.53%, respectively, in the organic carbon fraction, and in content of fine particulate organic carbon (fPOC), which increased by 26.94%, in Treatment N-H (treatments changed from normal to high in organic manure application rate); MWD decreased significantly or by 8.39% and 6.80%, respectively, in Treatment H-C (treatment changed from application of organic manure at a high rate to application of chemical fertilizer) and treatment N-C (treatments changed from application of organic manure at a normal rate to application of chemical fertilizer); TOC, coarse particulate organic carbon (cPOC) and light organic carbon (LFOC) decreased by 23.48%, 30.09% and 25.29%, respectively, in treatment H-C (treatment changed from application of organic manure at a high rate to application of chemical fertilizer), but TOC and its fraction did not vary much in Treatment N-C (treatment changed from application of organic manure application of chemical fertilizer treatment); and no matter whether in treatments with application of organic manure increased or decreased in rate, the content of Fe-Al oxides varied irregularly. Correlation analysis and analysis using the structural equation model (SEM) show that the content of >0.25 mm aggregates increased along with growing organic carbon fraction and with rising free iron oxide (Fe_d) content, but decreased with rising chelated oxide (Fe_s) content, and >0.25 mm aggregates were the only factor directly affecting MWD; changes in organic manure application rate induced the content of light organic carbon (LFOC) and EOC raised or declined in red paddy soils, resulted in the synergistic variation of Fe_d and Fe_s , which eventually led to changes in content of >0.25 mm aggregates. In terms of effect coefficients of the factors affecting MWD and >0.25 mm aggregates, an order of $EOC > LFOC > Fe_d > Fe_s$, was observed and organic carbon and its fractions were the principal affecting factors in the red paddy soil. 【Conclusion】 The fraction of >0.25 mm aggregates in the red paddy soil plays a key role in aggregate stability, and the fraction of active organic carbon is the major factor affecting formation and destruction of large-sized soil aggregates.

Key words: Organic manure; Paddy soil; Aggregate stability; Structural equation model

土壤团聚体的组成和稳定性是土壤结构的主要指标,可表征不同管理措施下土壤质量的变化特征^[1]。团聚体的形成、稳定及破坏过程伴随着土壤有机碳及其组分的转化和铁铝氧化形态的变化^[2]。明确土壤团聚稳定性变化的土壤有机碳和铁铝氧化的影响对理解团聚体周转与其胶结物质及形态转化具有重要现实意义。

诸多研究表明,施用有机肥可促进稻田土壤团聚体的形成和稳定性。如 Li 等^[3]认为施肥尤其是施用有机肥能显著提高土壤团聚体稳定性。向艳文等^[4]指出施用有机肥可增加土壤团聚体稳定性及大于 0.25 mm 的大团聚体比例,降低小于 0.25 mm 的微团聚体比例,而施用化肥的土壤团聚体稳定性及大于 0.25 mm 团聚体比例较低,小于 0.25 mm 微团聚

体比例升高。土壤团聚体的形成和稳定与土壤中有有机碳及铁铝氧化物的胶结作用密切相关。在团聚体胶结作用方面,一般认为在土壤有机质含量较高、氧化铁铝含量较低的土壤中,有机质的作用占主导地位;而在有机质含量不高、氧化铁铝较高的土壤中,团聚体的形成主要靠黏粒的内聚力及铁铝氧化物的胶结作用^[5]。在团聚体形成及稳定性与有机碳关系方面。杨长明等^[6]发现土壤水稳性团聚体的稳定性与土壤有机碳各组分之间呈显著或极显著正相关;毛霞丽等^[7]研究表明,长期施用有机肥强化了团聚体对有机碳的物理保护及促进了化学抗性有机碳组分的积累,促进了大团聚体形成和团聚体稳定性的提高。张玉兰等^[8]指出土壤有机碳脂肪族碳组分越多,芳构化程度越高,越有利于土壤团聚体的

形成。Kovac 等^[9]则指出脂肪族链烃可贡献于大团聚体的持久稳定。在团聚体形成及稳定性与铁铝氧化物关系方面,郭杏妹等^[10]指出铁铝氧化物在红壤团聚体的形成过程中具有重要的作用;周萍等^[11]发现氧化铁铝在有机碳的保护及团聚体稳定中起着重要作用。因此,稻田土壤团聚体形成与破坏受施肥尤其是有机肥施用影响,而有机碳及其组分和铁铝氧化物等的变化是土壤团聚体形成与分布及其稳定性变化的内在本质。

研究表明,有机肥的施用量的改变导致土壤团聚及其稳定性相应变化;如张艺等^[12]研究表明,长期培肥的红壤性水稻土减施有机肥后,大于 2 mm 的团聚体含量降低,团聚体稳定性降低;增施有机肥则变化相反。然而,增减施有机肥后红壤性水稻土团聚体及其稳定性变化的同时,土壤有机碳及其组分、铁铝氧化物的变化特征及其对团聚体及其稳定性影响效应有待明确;同时,就有机碳、黏粒及铁铝氧化物含量均高的红壤性水稻土而言,对团聚体稳定性及大于 0.25 mm 的大团聚体影响较大是有机碳及其组分,还是铁铝氧化物?明确此类问题可为理解稻田土壤有机碳及其组分、铁铝氧化物形态的转化和团聚体稳定性变化的驱动机制提供资料。本研究以具有 35 a 历史的红壤性水稻土为研究材料,选择三个长期施肥处理(高量有机肥、常量有机肥、化肥)和四个施肥措施改变处理(高改化、常改高、常改化、化改常)的耕层土壤,研究长期施肥的红壤性水稻土增/减施有机肥后土壤团聚体及其稳定性变化的有机碳及其组分、铁铝氧化物影响,以期对稻田土壤团聚体周转及其有机碳物理保护和化学稳定理论提供依据。

1 材料与方 法

1.1 试验地概况与试验设计

长期定位试验位于湖南农业大学天鹅湖畔(28°18'N, 113°08'E),年平均气温 17.2℃,年均降水量 1 362 mm,供试土壤母质为第四纪红色黏土发育的耕型红壤,耕作制度为稻-稻-冬闲。1982 年试验开始时,设置了 3 个不同有机肥施用水平(高量有机肥、常量有机肥、全施化肥)处理,每处理设 6~8 个重复。每季水稻施 N 量:150 kg·hm⁻², N

: P₂O₅: K₂O 比例为 1:0.5:1。分别以尿素、氯化钾和过磷酸钙作为化肥处理的 N、P、K 肥施入。高量、常量有机肥处理下分别为有机物料供应总 N 的 2/3、1/3;养分不足部分用化肥补足。2012 年早稻翻耕前,本研究对 3 个不同有机肥施用水平的处理进行了施肥措施变更:从“常量有机肥”处理(简称“常”)和“高量有机肥”处理(简称“高”)中分别随机选取小区 3 个,变更为化肥处理(简称“化”);同时,另从“常量有机肥”处理中随机选取 3 个小区变更为高量有机肥处理;从“化肥”处理中随机选择 3 个小区变更为常量有机肥处理。变更后的定位试验包括原施肥处理 3 个:高量有机肥(HOM)、常量有机肥(NOM)、化肥(CF);增施有机肥处理 2 个:常改高(N-H)、化改常(C-N);减施有机肥处理 2 个:高改化(H-C)、常改化(N-C),共计 7 个处理^[12]。

1.2 样品采集与制备

定位试验在施肥管理措施变更 4 年后,于 2017 年 2 月早稻翻耕前,每个处理中选取 3 个小区,用铁锹取长宽高为 10 cm×10 cm×20 cm 的长方体原状土柱,每小区随机采集多个土样,混合成 1 个复合样品,共计 21 个土样;采集后的混合土样轻放于硬质塑料盒,确保运输途中不受到挤压,以保持原状结构带回实验室。室内风干土样至土壤含水量到达土壤塑限(约为 22%~25%)时,沿着自然缝隙将其掰成 10 mm 左右的土块,并挑出砾石、侵入体及植物残体等;自然风干后用于土壤团聚体分析。

1.3 分析方法

土壤团聚体分离方法在 Six 等^[13]的基础上稍作修改,采用湿筛法进行土壤团聚体分组测定^[14]。称取 100 g 风干土置于土筛中,25℃水中浸泡 5 min,并调整水面至土筛上移最高位时团聚体的高度;开启团聚体筛分仪,在 2 min 内上下摆动 50 次,摆幅为 3 cm。使土样依次过 2 mm、0.25 mm、0.053 mm 筛,分别获得大于 2 mm 和 2~0.25 mm 水稳性大团聚体、0.25~0.053 mm 水稳性微团聚体及小于 0.053 mm 粉-黏团聚体。各粒级团聚体于 60℃烘干,称重,备用。

土壤有机碳(SOC)含量采用高温外热重铬酸钾-外加热法测定;土壤轻组有机碳(LFOC)分离参照 Janzen 等^[15]的方法,烧失法测定碳含量^[16];易氧化有机碳(EOC)采用 333 mmol·L⁻¹ KMnO₄ 氧

化, 可见分光光度计 565 nm 波长处比色^[17]; 粗颗粒 (cPOC) 及细颗粒有机碳 (fPOC) 其组分提取和测定参考周萍等^[18]的方法。

不同形态铁铝氧化物的提取及测定参照鲁如坤^[19]的方法: 即游离态铁/铝氧化物采用柠檬酸钠-连二亚硫酸钠法提取, 无定形铁/铝氧化物采用草酸铵—草酸提取, 络合态铁/铝氧化物采用焦磷酸钠提取。

1.3 数据处理

土壤团聚体稳定性指标采用平均重量直径 (MWD/mm) 进行评价^[20], 其计算公式如下:

$$MWD = \frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x}_i w_i)}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (1)$$

式中, \bar{x}_i 为第 i 级团聚体的平均直径, mm; w_i 为第 i 级团聚体质量所占百分比。

本试验数据均取 3 次重复的平均值, 应用 Excel 2013 和 SPSS 19.0 软件进行统计分析, 采用单因素方差分析 (one-way ANOVA) 比较处理间差异, 用邓肯 (Duncan's) 法检验差异显著性 ($P < 0.05$), 采用皮尔森 (Pearson) 法进行相关性分析。图表

中数据为平均值±标准差。借助 AMOS21.0 的结构方程模型 (SEM) 探讨土壤团聚体稳定性主要驱动因素的影响路径及程度。

2 结 果

2.1 不同施肥处理土壤团聚体分布及稳定性变化

施肥措施改变对长期培肥水稻土团聚体分布影响显著 (表 1)。从增施有机肥来看, N-H 的四个粒级团聚体含量相对原处理 (NOM) 均无明显变化; 而 C-N 的大于 2 mm 粗大团聚体和 2~0.25 mm 细大团聚体含量相对原处理 (CF) 分别显著增加了 6.74% 和 28.86% ($P < 0.05$), 小于 0.053 mm 粉黏粒含量则显著减少了 58.45% ($P < 0.05$)。从减施有机肥来看, H-C 的 2~0.25 mm 细大团聚体含量相对原处理 (HOM) 显著 ($P < 0.05$) 提高了 40.18%; 而 N-C 的大于 2 mm 粗大团聚体含量相对原处理 (NOM) 显著降低了 19.28% ($P < 0.05$), 而其他粒级团聚体含量分别显著 ($P < 0.05$) 提高了 18.90%、45.43% 和 28.64%。

表 1 不同施肥处理下土壤团聚体粒径分布及稳定性

Table 1 Particle size distribution and stability of soil aggregates in the red paddy soil relative to treatment

处理 Treatment	粒径分布 particle size distribution/ g·kg ⁻¹					MWD/mm
	>2 mm	2~0.25 mm	0.25~0.053 mm	<0.053 mm	>0.25 mm	
	HOM	697.63±29.68a	201.50±11.48d	75.54±18.67c	27.58±5.71e	
H-C	603.12±26.38ab	282.47±24.29b	75.83±2.91c	41.63±1.26de	858.76±41.39a	1.53±0.03b
NOM	576.13±5.86bc	264.13±0.66c	67.68±7.86d	96.60±4.54b	842.10±5.76ab	1.47±0.01bc
N-C	465.04±65.38d	314.07±16.14a	98.43±9.28b	124.27±10.23a	750.47±79.26c	1.37±0.01d
N-H	589.16±11.07bc	270.23±3.47bc	71.09±4.43cd	71.61±9.28bc	840.41±32.44ab	1.49±0.12bc
CF	477.81±93.76d	245.52±30.54d	127.24±10.17a	151.33±29.26a	767.11±53.01bc	1.27±0.08e
C-N	510.02±14.01c	316.39±9.68a	108.47±3.51a	62.87±3.91cd	834.35±14.32ab	1.30±0.02de

注: HOM: 高量有机肥; H-C: 高改化; NOM: 常量有机肥; N-C: 常改化; N-H: 常改高; CF: 化肥; C-N: 化改常; MWD: 平均重量直径。同列数据后不同小写字母表示不同处理之间差异显著 ($P < 0.05$), 下表同。Note: HOM: treatment high in organic manure application rate; H-C: treatment changed from application of organic manure at a high rate to application of chemical fertilizer; NOM: treatment normal in organic manure application rate; N-C: treatment changed from application of chemical fertilizer to application of organic manure at a normal rate; N-H: treatment changed from normal to high in organic manure application rate; CF: treatment applied with chemical fertilizer; C-N: treatment changed from application of chemical fertilizer to application of organic manure at a normal rate; and MWD: mean weight diameter. Different letters in the same column mean significant difference at 0.05 level. The same below.

土壤 MWD 是能较为全面地反映土壤团聚体大小分布和土壤团聚状况的综合指标, 一般认为,

MWD 越大, 土壤团聚体的稳定性越强。从增施有机肥看 (表 1), N-H 和 C-N 的 MWD 相对于原处理

均无明显变化；从减施有机肥看，H-C 和 N-C 的团聚体 MWD 相对于原处理分别显著降低了 8.39% 和 6.80% ($P<0.05$)。

2.2 不同施肥处理土壤有机碳及铁铝氧化物含量变化

各处理总有机碳及其组分如表 2。从增施有机肥看，N-H 处理的 EOC 和 fPOC 含量相对原处理分

别显著 ($P<0.05$) 提高了 20.53% 和 26.94%；C-N 处理的 EOC 含量相对原处理显著 ($P<0.05$) 提高了 87.44%，其他有机碳含量变化不明显。从减施有机肥看，H-C 处理的 TOC、LFOC 和 cPOC 含量相对原处理分别显著 ($P<0.05$) 降低了 23.48%、30.09% 和 25.29%，EOC 和 fPOC 含量变化不明显；N-C 处理的土壤 TOC 及其组分含量则均无明显变化。

表 2 不同施肥处理有机碳及其组分含量

Table 2 The content of total organic carbon and its fractions in the red paddy soil relative to treatments/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)

处理 Treatment	TOC	LFOC	EOC	cPOC	fPOC
HOM	28.32±1.98a	3.89±0.33a	9.25±0.55a	4.35±0.64ab	2.06±0.33abc
H-C	21.67±2.02bc	2.71±0.33bc	9.98±0.43a	3.25±0.40cd	2.06±0.09abc
NOM	25.03±0.23ab	3.87±1.13ab	5.94±0.34c	3.80±0.08abc	1.93±0.08bc
N-C	21.03±2.18bc	2.70±0.25bc	5.61±0.33c	3.68±0.52bc	2.18±0.09ab
N-H	27.03±3.60a	3.69±1.60ab	8.12±0.87b	4.58±0.28a	2.45±0.53a
CF	18.27±1.17c	2.21±0.20c	2.15±0.16e	2.58±0.58d	1.64±0.20c
C-N	20.01±0.91bc	2.57±0.35c	4.03±0.18d	2.74±0.43d	1.60±0.20c

注：TOC：总有机碳；LFOC：轻组有机碳；EOC：易氧化有机碳；cPOC：粗颗粒态有机碳；fPOC：细颗粒态有机碳。Note: TOC: total organic carbon; LFOC: light fraction of organic carbon; EOC: easy oxidizable organic carbon; cPOC: coarse particulate organic carbon; fPOC: fine particulate organic carbon.

如表 3 所示，不同形态铁铝氧化含量在 0.72~31.76 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间，以 Fe_d 含量最高，达到 27.92~31.76 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ， Al_d 含量其次，为 24.42~27.28 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，两者均远高于其他铁铝氧化含量， Al_s 含量 (0.72~0.82 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 最低，整体上呈现出： $\text{Fe}_d>\text{Al}_d>\text{Al}_o>\text{Fe}_o>\text{Fe}_s>\text{Al}_s$ 。对于游离氧化铁含量来说，仅 C-N 相对于 CF 显著降低了 5.57% ($P<0.05$)；对于络合态氧化铁含量来说，H-C 相对于 HOM 显著提高了 11.80% ($P<0.05$)。

2.3 胶结物与团聚体及其稳定性的相关关系

通过胶结物与团聚体及 MWD 的相关性分析 (表 4) 表明，增减施有机肥后红壤性水稻土除 fPOC 与大于 0.25 mm 团聚体含量相关关系不明显外，土壤 TOC 及其组分含量均与大于 0.25 mm 团聚体含量呈显著正相关，同时 0.25~0.053 mm 均与土壤 TOC 及各有机碳组分呈显著负相关关系；MWD 则与总有机碳、LFOC 及 EOC 含量呈显著正相关；铁铝氧化物中的 Fe_d 、 Fe_s 分别与各粒级团聚体含量和 MWD 关系显著。

2.4 影响团聚体稳定性的因素及作用

为了明确红壤性水稻土团聚体及其稳定性变化的影响因素，通过构建 SEM 分析土壤团聚体、有机碳及其组分、铁铝氧化物变化对土壤团聚体稳定性指标 MWD 的综合响应 (图 1)。SEM 拟合结果为： $\chi^2=7.035$ ， $df=7$ ， $P=0.648$ ， $\text{RMSEA}=0.016$ ， $\text{GFI}=0.918$ ，说明模型适配良好，能代表自变量和因变量的关系。模型解释了土壤团聚体稳定性 81% 的变异，分别解释了大于 0.25 mm 团聚体及总有机碳含量 67% 和 32% 的变化。同时模型用路径系数来估计自变量对应变影响效应的大小，比较其相对重要性，即大于 0.25 mm 团聚体含量对 MWD 的路径系数为 0.75，是影响 MWD 的唯一直接影响因素；TOC 通过影响大于 0.25 mm 团聚体含量而间接影响 MWD，总效应系数为 0.38，其对大于 0.25 mm 团聚体含量影响的路径系数为 0.50；EOC 分别通过影响大于 0.25 mm 团聚体和 TOC 含量间接影响 MWD，其对 MWD 和大于 0.25 mm 团聚体含量影响的总效应系数分别为 0.44 和 0.59；LFOC 通过影响 TOC (路径系数 0.69) 和大于 0.25 大团聚体含量而间接影响

表 3 不同施肥处理各形态氧化铁铝含量

Table 3 Content of different forms of ferric and aluminum oxide s in the red paddy soil relative to form of the metal and treatment/ (g·kg⁻¹)

处理 Treatment	Fe _d	Fe _o	Fe _s	Al _d	Al _o	Al _s
HOM	28.27±1.03c	4.47±0.12a	1.61±0.13bc	24.68±0.18a	4.92±0.21a	0.82±0.06a
H-C	28.17±0.64c	4.76±0.23a	1.80±0.09a	26.00±0.43a	5.05±0.27a	0.82±0.02a
NOM	27.92±0.25c	4.60±0.10a	1.86±0.04a	24.78±1.42a	5.18±0.39a	0.72±0.04a
N-C	29.20±1.08bc	4.56±0.23a	1.92±0.10a	24.58±0.96a	5.00±0.20a	0.72±0.04a
N-H	28.79±1.1bc	4.76±0.36a	1.76±0.06ab	25.04±1.74a	4.71±0.37a	0.75±0.10a
CF	31.76±1.35a	4.80±0.04a	1.62±0.02bc	24.42±3.63a	5.26±0.48a	0.73±0.11a
C-N	29.99±0.55b	4.46±0.15a	1.54±0.06c	27.28±1.07a	5.12±0.23a	0.78±0.04a

注: Fe_d: 游离氧化铁; Al_d: 游离氧化铝; Fe_o: 无定形铁氧化物; Al_o: 无定形铝氧化物; Fe_s: 络合态铁; Al_s: 络合态铝。 Note: Fe_d: free iron oxide; Al_d: free alumina oxide; Fe_o: uncrystalline iron oxide; Al_o: uncrystalline alumina oxide; Fe_s: chelated iron; Al_s: chelated aluminum.

表 4 胶结物与团聚体及其稳定性的相关系数

Table 4 Correlation coefficient of cement with fractionation and stability of soil aggregates

项目 Item		>0.25 mm	0.25~0.053 mm	<0.053 mm	MWD
有机胶结物 Organic binding material	总有机碳 Total organic carbon	0.679**	-0.811**	-0.483*	0.616*
	轻组有机碳 Light fraction of organic carbon	0.483*	-0.623**	-0.324	0.400*
	易氧化有机碳 Easy oxidizable organic carbon	0.576**	-0.569**	-0.460*	0.463*
	粗颗粒态有机碳 Coarse particulate organic carbon	0.406*	-0.601**	-0.239	0.339
	细颗粒态有机碳 Fine particulate organic carbon	0.162	-0.565*	0.044	0.054
无机胶结物 Inorganic binding material	游离氧化铁 Free iron oxide	-0.512**	0.653**	0.347	-0.444*
	非晶质氧化铁 Uncrystalline iron oxide	0.175	-0.103	-0.170	0.107
	络合态铁 Chelated iron	0.467*	-0.440*	-0.383*	0.354*
	游离氧化铝 Free alumina oxide	-0.242	0.089	0.258	-0.184
	非晶质氧化铝 Uncrystalline alumina oxide	-0.007	0.134	-0.050	0.037
	络合态铝 Chelated aluminum	0.695**	-0.444*	-0.661**	0.669**

注: *表示在 0.05 水平上显著相关; **表示在 0.01 水平上显著相关。 Note: * Indicated significant correlation ($P<0.05$)。 ** Indicated extremely significant correlation ($P<0.01$)。

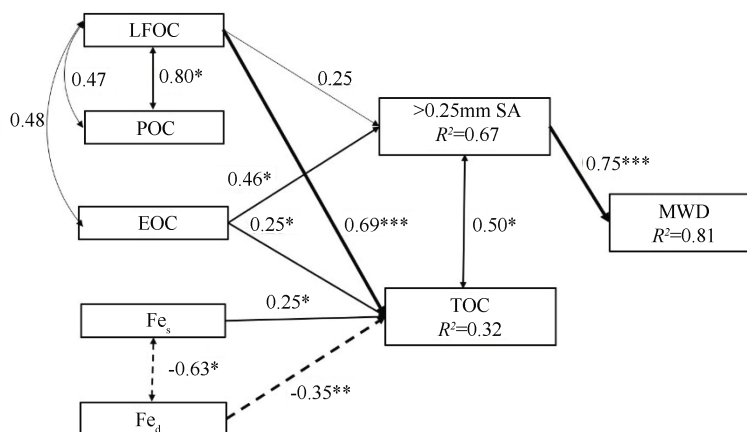
MWD, 其对 MWD 和大于 0.25 mm 团聚体间接效应系数分别为 0.26 和 0.35; 而 Fe_s (0.25) 及 Fe_d (-0.35) 分别通过影响 TOC 含量, 间接影响大于 0.25 mm 团聚体而对 MWD 影响, 其中 Fe_s 对 MWD 和大于 0.25 mm 团聚体间接效应系数分别为 0.09 和 0.13, 而 Fe_d 的分别为 0.13 和 0.18, 且两者相互关系显著 (-0.63)。

3 讨论

3.1 增减施有机肥对土壤团聚体分布及稳定性的影响

土壤团聚体分布及稳定性变化是土壤团聚体形

成和破坏的重要表现。施肥尤其是有机肥可促进水稻土大团聚体的形成, 提高土壤团聚体稳定性^[21]。本研究表明, CF 增施有机肥后, C-N 的大于 2 mm 粗大团聚体和 2~0.25 mm 细大团聚体含量分别显著增加, 团聚体稳定性升高; 而 NOM 增施有机肥后, N-H 的两级大团聚体含量及 MWD 变化不明显 (表 1)。说明长期施用常量有机肥的红壤性水稻土增施有机肥, 对团聚体分布及稳定性无明显影响, 而长期施用化肥增施有机肥后, 促进大团聚体形成, 增强团聚体稳定性。可能与长期施肥的红壤性水稻土碳库饱和有关。研究表明, 一定的环境及管理措施条件下, 土壤有机碳保持量会达到饱和固碳量^[22],



注: SA: 土壤团聚体; 每个箭头的粗细和箭头上的数值分别代表路径系数及其大小, 实线代表正相关, 虚线代表负相关; ***表示 $P < 0.001$, **表示 $P < 0.01$, *表示 $P < 0.05$ 。Note: SA: soil aggregates; thickness of an arrow and the number on the arrow represent path coefficient, high or low; solid or dashed line represents positive or negative correlational relationship, respectively; *, ** and *** represents $P < 0.05$, 0.01 and 0.001, respectively.

图1 团聚体稳定性影响因素的结构方程模型 (SEM) 分析

Fig. 1 Analysis of factors affecting aggregates stability with the structural equation model

同时李忠佩等^[23]指出, 长期培肥 30 a 后, 红壤性水稻土有机碳含量达到最大容量, 施肥输入的碳与输出碳达到平衡。红壤性水稻土大团聚体和团聚体稳定性与有机碳含量呈正相关关系^[24], 本研究 NOM 有机碳含量已达到较高的饱和水平, 增施有机肥后土壤有机碳含量可能并未随有机碳输入量呈线性上升, 因此长期施用常量有机肥的红壤性水稻土大团聚体含量和团聚体稳定提高不明显。CF 增施有机肥后, 可能是在长期施用化肥条件下土壤有机碳已饱和的 CF 处理相对 NOM, 土壤有机碳含量尚具较大提升空间, 增施有机肥后土壤有机碳含量随有机碳输入量增加而升高, 从而土壤大团聚体含量和团聚体稳定性提高 (表 1)。其原因在于, 有机胶结作用是土壤团聚体形成的重要途径^[25], 施用有机肥在增加活性有机碳组分的同时, 会增加纤维素、多糖、腐殖酸等大分子有机组分^[26], 从而促进团聚体形成, 提高了团聚体稳定性。HOM 和 NOM 减施有机肥后, 土壤大团聚体含量和团聚体稳定均显著降低 (表 1), 可能与新输入的有机碳量减少有关。红壤性水稻土大团聚体主要通过有机残体和菌丝胶结形成, 新输入而易矿化分解的有机碳主要存在于大团聚体中而受物理保护, 而小团聚体则以多糖或无机胶体而胶结形成^[27], 减施有机肥后, 新输入的有机碳含量较低, 大团聚体胶结物质减少和原受物理保护作用的有机碳分解矿化, 部分大团聚体破坏而含量减少,

较小粒径团聚体含量相应增加, 团聚体稳定性降低。

3.2 增减施有机肥对土壤有机碳及铁铝氧化物等胶结物的影响

施用有机肥可增加活性有机碳组分, 亦能增加纤维素、多糖、腐殖酸等大分子有机组分, 是提高土壤有机碳含量最有效的方法^[28]。Campbell 等^[29]指出在土壤有机碳丰富的土壤中, 新输入的土壤有机碳因矿化而分解的输出量大于有机碳固定量, 土壤有机碳积累效率降低。本研究土壤有机碳含量已达较高水平 (表 2), 有机碳的输出量可能大于输入量, 固碳效率降低; 因此, NOM 和 CF 增施有机肥后, TOC 和部分有机碳组分含量无明显变化; 其结果与刘长明等^[6]研究结果类似。不同活性有机碳组分对农业管理措施响应的敏感性存在差异。NOM 和 CF 增施有机肥增加了土壤中的新鲜有机质, 进而增加了土壤中的 EOC, 因此显著升高, 这与张瑞等^[30]的研究结果一致。fPOC 含量在 NOM 和 CF 增施有机肥增加后分别显著增加和维持不变, 而 LFOC 和 cPOC 含量变化不明显 (表 2), 可能与有机碳分解转化及其组分对 SOC 反应敏感性差异和团聚体周转等相关。HOM 和 NOM 减施有机肥后, H-C 处理的 EOC 及 fPOC 含量和 N-C 处理的各有机碳组分含量均无明显变化 (表 2)。其原因可能与有机物料的输入量降低及团聚体破坏相关; 由于新输入的有机碳减少, 团聚体稳定性降低, 大于 0.25 mm 大团聚

体破碎而含量减少, 小于 0.25 mm 的微团聚体含量相应增多; 研究表明, 大于 0.25 mm 的大团聚体有机碳主要为易矿化的 POC 和 EOC^[31], H-C 处理的 EOC 及 fPOC 含量变化不明显, 可能为 HOM 减施有机肥后, 大于 0.25 mm 大团聚体破碎, 部分 POC 和 EOC 释放, 抵消了因减施有机肥导致有机碳输入的 fPOC 和 EOC 减少量的结果; 而 LFOC 及 cPOC 含量降低则可能与其在团聚体内的分配比例较低有关, 虽然其因团聚体破坏而部分释放, 但释放量不足以抵消因减施有机肥导致其含量的减少量, 从而含量减少。NOM 减施有机肥后, N-C 除大于 2 mm 团聚体显著减小外, 其他粒级团聚体均显著增加(表 1), 说明较多的大团聚体破坏, 从而释放多量的有机碳组分, 抵消了因减施有机肥导致其含量的减少量, 变化则不明显。其变化机理尚需团聚体及其有机碳周转、碳源微生物及有机碳矿化等数据的补充。

铁铝氧化物表面活性高, 是土壤团聚体重要的无机胶结物^[10]。本研究表明, 从增施有机肥来看, 仅 C-N 的 Fe_d 含量相对于 CF 显著降低; 减施有机肥中, H-C 的 Fe_s 含量相对于 HOM 显著升高; 其他形态氧化铁铝对增减施有机肥的响应均不明显(表 3)。南方富铁土的铁铝氧化物主要由成土过程中母质风化产物再淀积而成, 不同处理间的差异可能为土壤有机碳及其组成、pH 及共存矿物等因素综合作用的结果。因此, 增减施有机肥后铁铝氧化物变化规律不明显; 前人也报道过类似的研究结果, 如王莹等^[32]研究表明施有机肥的红壤性水稻土 Fe_d 含量均与不施肥相似。

3.3 团聚体稳定性与有机碳及铁铝氧化物的作用关系

土壤团聚体平均重量直径(MWD)常作为团聚体稳定性的敏感指标来反映土壤结构对施肥等管理措施的响应^[33]。土壤团聚体的分布和稳定性与土壤有机碳及铁铝氧化物等胶结物质的关系紧密。本研究不同有机碳组分与各粒级团聚体相关性表现不同, 其中大于 0.25 mm 团聚体含量与 LFOC、EOC 及 cPOC 呈显著正相关关系; 0.25~0.053 mm 团聚体含量与前三者呈显著负相关外, 也随着 fPOC 含量增加而显著减少; 而小于 0.053 mm 团聚体含量则仅随着 EOC 含量的增加而显著减少(表 4)。说明大于 0.25 mm 团聚体含量随着有机碳活性组分含量

增加而显著增加, 小于 0.25 mm 团聚体含量则显著减少。施用有机肥显著增加了土壤有机碳及其活性组分^[34], 有机碳活性组分主要为易分解矿化的有机碳, 是新输入有机碳的重要组成部分, 新输入的有机碳主要被大于 0.25 mm 的大团聚体所固定而受物理保护^[22], 从而有机碳活性组分与大于 0.25 mm 大团聚体含量呈正相关关系, 其结果一定程度上也印证了团聚体物理保护理论。本研究表明, MWD 与大于 0.25 mm 团聚体含量呈显著正关系, 同时 MWD 和大于 0.25 mm 团聚体含量与 LFOC 及 EOC 含量均呈显著正相关关系(表 4), 可能因增施施肥导致 LFOC 和 EOC 含量的增加, 促进了大于 0.25 mm 大团聚体的形成, 从而团聚体稳定性增加。从铁铝氧化物来看, Fe_d 含量与大于 0.25 mm 大团聚体含量及 MWD 呈显著负相关关系, 与 0.25~0.053 mm 团聚体呈显著正相关关系, 而 Fe_s 含量均与大于 0.25 mm 大团聚体含量及 MWD 呈相反的相关关系(表 4)。研究表明, 红壤性水稻土铁铝氧化物及土壤有机质共同参与土壤团聚体的团聚过程^[11], 本研究相关分析表明土壤活性有机碳组分分别与土壤 Fe_d 及 Fe_s 呈负、正相关关系(图 2), 可能是由于增施有机肥后土壤活性有机碳的增加导致土壤铁氧化物形态转化, 其中 Fe_d 降低而 Fe_s 升高, 促进了大团聚体形成, 增强了团聚体稳定性。

土壤团聚体稳定性与团聚体组成及其有机碳和铁铝氧化物密切相关。SEM 分析表明, 大于 0.25 mm 团聚体含量是影响 MWD 的唯一直接影响因素, 同时与 MWD 呈显著正相关关系, 说明促进大于 0.25 mm 大团聚体的形成同时也增加了团聚体稳定性, 这与邵慧芸等^[34]研究一致, 因此, 提高红壤性水稻土团聚体稳定性在于增加大于 0.25 mm 大团聚体比例。此外, EOC 通过影响大于 0.25 mm 团聚体含量间接影响 MWD 的同时, 还与 LFOC 通过影响总有机碳变化, 来影响大于 0.25 mm 团聚体而对 MWD 产生影响, 且均呈显著正相关关系, 说明红壤性水稻土增减施有机肥后导致 TOC 组分中的 LFOC 及 EOC 增减, 从而导致大于 0.25 mm 团聚体的形成与破坏; 这也印证了大于 0.25 mm 大团聚体保护的主要为易分解矿化的有机碳的说法^[27]; EOC 对 MWD 和大于 0.25 mm 团聚体含量的总影响效应分别为 0.44 和 0.59, 而 LFOC 分别为 0.26 和 0.35,

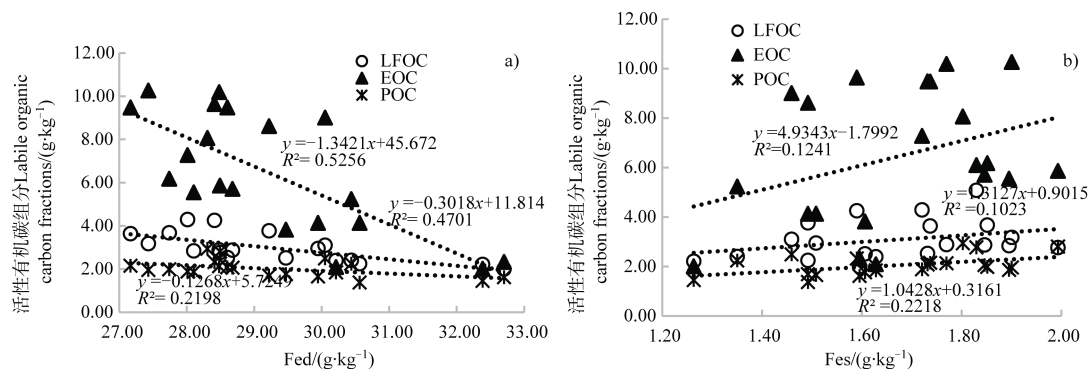


图2 游离氧化铁、络合态铁与活性有机碳组分相关关系
Fig. 2 Correlation of Fe_d and Fe_s with labile organic carbon fractions

说明有机碳组分中的EOC对大于0.25 mm团聚体及其稳定性的影响高于LFOC。土壤中氧化铁主要由成土过程中母质风化产物再淀积而成；同时有研究表明施有机肥显著提高了水稻土的无定形氧化铁含量，且与土壤SOC浓度呈显著正相关^[35]；本研究 Fe_s 与 Fe_d 间相互显著负影响的同时，分别通过正、负影响总有机碳含量而影响大于0.25 mm团聚体含量，来间接影响MWD，且红壤性水稻土 Fe_s 与 Fe_d 与各有机碳活性组分分别呈正、负关系（图2），说明由于增减施有机肥导致土壤有机碳含量的变化，引起土壤 Fe_s 与 Fe_d 协同变化，间接导致大于0.25 mm团聚体含量的增减及MWD的变化； Fe_d 对MWD和大于0.25 mm团聚体含量的总影响效应分别为0.13和0.18，而 Fe_s 分别为0.09和0.13，低于 Fe_d ，说明 Fe_d 对大于0.25 mm团聚体及其稳定性的影响高于 Fe_s 。综上，红壤性水稻土团聚体及其稳定性同时受有机碳及其组分和铁氧化物的影响；且TOC(0.50)、EOC和LFOC对MWD及大于0.25 mm团聚体含量的总影响效应均高于 Fe_s 及 Fe_d ，因此，就土壤有机碳、黏粒及铁铝氧化物含量均高的红壤性水稻土而言，对MWD及大于0.25 mm团聚体含量影响较大的可能为有机碳及其组分。其中的机理尚有待进一步的有机无机复合物、有关基团及Fe/Al离子电荷等数据的分析。

本研究对红壤性水稻土主要胶结物质及团聚体稳定性指标建立SEM，较好地模拟了土壤中胶结物质对团聚体及其稳定性的影响及作用机制，但由于模型中变量和拟合程度有限，可能还存在其他未知变量以及影响路径对团聚体及其稳定性产生影响，有待后续研究进一步论证。

4 结论

长期施高量及常量有机肥的红壤性水稻土减施有机肥后，团聚体稳定性显著降低，土壤有机碳及其组分呈现差异性变化特征；长期施化肥和常量有机肥的红壤性水稻土增施有机肥后，团聚体稳定性变化不明显。大于0.25 mm团聚体含量随有机碳活性组分含量增加而升高，随游离氧化铁（ Fe_d ）及络合态铁（ Fe_s ）含量的增加分别降低和升高，且是影响团聚体稳定性的唯一直接影响因素；增减施有机肥后导致TOC中的LFOC及EOC组分增减的同时，引起土壤 Fe_d 与 Fe_s 协同变化，从而导致大于0.25 mm团聚体的形成与破坏及团聚体稳定性升高和降低。有机碳、黏粒及铁铝氧化物含量均高的红壤性水稻土，EOC对MWD及大于0.25 mm团聚体含量影响高于LFOC，而无机胶结物中的 Fe_d 对其影响高于 Fe_s ；对MWD及大于0.25 mm的团聚体含量影响较大的可能为有机碳及其组分。

参考文献 (References)

- [1] Peng X, Zhu Q, Zhang Z, et al. Combined turnover of carbon and soil aggregates using rare earth oxides and isotopically labelled carbon as tracers[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2017, 109: 81–94.
- [2] Liua S, b, Guoa Z C, Pana Y B, et al. Rare earth oxides for labelling soil aggregate turnover: Impacts of soil properties, labeling method and aggregate structure[J]. Geoderma, 2019, 351: 36–48.
- [3] Li Z P, Liu M, Wu X C, et al. Effects of long-term chemical fertilization and organic amendments on dynamics of soil organic C and total N in paddy soil derived from barren land in subtropical China[J]. Soil and Tillage Research, 2010, 106 (2): 268–274.

- [4] Xiang Y W, Zheng S X, Liao Y L, et al. Effects of long-term fertilization on distribution and storage of organic carbon and nitrogen in water-stable aggregate of red paddy soil[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 42 (7): 2415–2424. [向艳文, 郑圣先, 廖育林, 等. 长期施肥对红壤水稻土水稳性团聚体有机碳、氮分布与储量的影响[J]. *中国农业科学*, 2009, 42(7): 2415–2424.]
- [5] Bossuyt H D, J, Hendrix P F. Protection of carbon by microaggregates within earthwo easts[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, 37: 251–258.
- [6] Yang C M, Ouyang Z, Dong Y H. Organic carbon fractions and aggregate stability in aquatic soil under different fertilization[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, 24 (8): 887–892. [杨长明, 欧阳竹, 董玉红. 不同施肥模式对潮土有机碳组分及团聚体稳定性的影响[J]. *生态学杂志*, 2005, 24 (8): 887–892.]
- [7] Mao X L, Lu K P, He L Z, et al. Effect of long-term fertilizer application on distribution of aggregates and aggregate-associated organic carbon in paddy soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52 (4): 828–838. [毛霞丽, 陆扣萍, 何丽芝, 等. 长期施肥对浙江稻田土壤团聚体及其有机碳分布的影响[J]. *土壤学报*, 2015, 52 (4): 828–838.]
- [8] Zhang Y L, Sun C X, Chen Z H, et al. Analysis of soil humus and components after 26 years' fertilization by infrared spectroscopy method[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, 30 (5): 1210–1213. [张玉兰, 孙彩霞, 陈振华, 等. 红外光谱法测定肥料施用 26 年土壤的腐殖质组分特征[J]. *光谱学与光谱分析*, 2010, 30 (5): 1210–1213.]
- [9] Kovac N, Bajt O, Faganeli J, et al. Study of macroaggregate composition using FT-IR and ¹H-NMR spectroscopy[J]. *Marine Chemistry*, 2002, 78 (4): 205–215.
- [10] Guo X M, Wu H H, Luo M, et al. The morphological change of Fe/Al-oxide minerals in red soils in the process of acidification and its environmental significance[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2007, 26(6): 515–821. [郭杏妹, 吴宏海, 罗媚, 等. 红壤酸化过程中铁铝氧化物矿物形态变化及其环境意义[J]. *岩石矿物学杂志*, 2007, 26 (6): 515–821.]
- [11] Zhou P, Song G H, Pan G X, et al. SOC accumulation in three major types of paddy soil under long-term agro-ecosystem experiments from south China I . physical protection in soil micro-aggregate[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45 (6): 1063–1071. [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 I . 团聚体物理保护作用[J]. *土壤学报*, 2008, 45 (6): 1063–1071.]
- [12] Zhang Y, Dai Q, Yin L C, et al. Effects of Following-up Fertilization Reforming on Distribution and Turnover of Aggregate-associated Organic Carbon in Paddy Soils[J]. *Soils*, 2017, 49 (5): 969–976. [张艺, 戴齐, 尹力初, 等. 后续施肥措施改变对水稻土团聚体有机碳分布及其周转的影响. *土壤*, 2017, 49 (5): 969–976.]
- [13] Six J, Callewaert P, Lenders S, Gryze S D. Measuring and understanding carbon storage in afforested soils by physical fractionation[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2002, 66: 1981–1987.
- [14] Elliott E T. Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1986, 50 (7): 627–633.
- [15] Janzen H H, Campbell C A, Brandt S A, et al. Light fraction organic matter in soils from long-term crop rotation[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, 56: 1799–1806.
- [16] Sheng H, Li J, Zhou P, et al. Effect of land use change on labile organic carbon fractions of soil derived from granite[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2015, 24 (7): 1098–1102. [盛浩, 李洁, 周萍, 等. 土地利用变化对花岗岩红壤表土活性有机碳组分的影响[J]. *生态环境学报*, 2015, 24 (7): 1098–1102.]
- [17] Jones D L, Willett V B. Experimental evaluation of methods to quantify dissolved organic nitrogen (DON) and dissolved organic carbon (DOC) in soil[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38: 991–999.
- [18] Zhou P, Zhang X H, Pan G X. Effect of long-term fertilization on content of total and particulate organic carbon and their depth distribution of a paddy soil: An example of huangnitu from the Tai Lake region, China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2006, 12 (6): 765–771. [周萍, 张旭辉, 潘根兴. 长期不同施肥对太湖地区黄泥土总有机碳及颗粒态有机碳含量及深度分布的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2006, 12 (6): 765–771.]
- [19] Lu R K. *Soil agro-chemistry analysis protocols*[M]. Beijing: China Agriculture Science Press, 1999. [鲁如坤. *土壤农业化学分析方法*[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999.]
- [20] Qiu L P, Zhang X C, Zhang J A. Distribution of nutrients and enzymes in Loess Plateau soil aggregates after long-term fertilization[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26 (2): 364–372. [邱莉萍, 张兴昌, 张晋爱. 黄土高原长期培肥土壤团聚体中养分和酶的分布[J]. *生态学报*, 2006, 26 (2): 364–372.]
- [21] Zhou H, Peng X, Peth S, et al. Effects of vegetation restoration on soil aggregate microstructure quantified with synchrotron—based micro-computed tomography[J]. *Soil & Tillage Research*, 2012, 124: 17–23.
- [22] Zhou P, Pan G X, Li L Q, et al. SOC enhancement in major types of paddy soils in a long-term agro-ecosystem experiment in south China. V . relationship between carbon input and soil carbon sequestration[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 42 (12): 4260–4268. [周萍,

- 潘根兴, 李恋卿, 等. 南方典型水稻土长期试验下有机碳积累机制 V. 碳输入与土壤碳固定[J]. 中国农业科学, 2009, 42 (12): 4260–4268.]
- [23] Li Z P, Zhang T L, Chen B Y, et al. Soil organic matter dynamics in a cultivation chronosequence of paddy fields in subtropical China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40 (3): 344–352. [李忠佩, 张桃林, 陈碧云, 等. 红壤稻田土壤有机质的积累过程特征分析[J]. 土壤学报, 2003, 40 (3): 344–352.]
- [24] Di J Y, Liu X F, Du Z L, et al. Influences of long-term organic and chemical fertilization on soil aggregation and associated organic carbon fraction in a red paddy soil[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2014, 22 (10): 1129–1138. [邸佳颖, 刘小粉, 杜章留, 等. 长期施肥对红壤性水稻土团聚体稳定性及固碳特征的影响[J]. 中国生态农业学报, 2014, 22 (10): 1129–1138.]
- [25] Álvaro-Fuentes J, Arrúe J L, Gracia R, et al. Tillage and cropping intensification effects on soil aggregation: temporal dynamics and controlling factors under semiarid conditions[J]. *Geoderma*, 2008, 145 (3–4): 390–396.
- [26] Li J, Wu X, Gebremikael M T, et al. Response of soil organic carbon fractions, microbial community composition and carbon mineralization to high-input fertilizer practices under an intensive agricultural system[J]. *PloS One*, 2018, 13 (4): e0195144.
- [27] Pan G X, Lu H F, Li L Q, et al. Soil carbon sequestration with bioactivity: A new emerging frontier for sustainable soil management[J]. *Advances in Earth Science*, 2015, 30 (8): 940–952. [潘根兴, 陆海飞, 李恋卿, 等. 土壤碳固定与生物活性: 面向可持续土壤管理的新前沿[J]. 地球科学进展, 2015, 30 (8): 940–952.]
- [28] Long G Q, Jiang Y J, Sun B. Seasonal and inter-annual variation of leaching of dissolved organic carbon and nitrogen under long-term manure application in an acidic clay soil in subtropical China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2015, 146: 270–278.
- [29] Campbell C A, Bowren K E, Schnitzer M, et al. Effect of crop rotations and fertilization on soil organic matter and some biochemical properties of a thick Black Chernozem. *Canadian Journal of Soil Science*, 1991, 71: 377–387.
- [30] Zhang R, Zhang G L, Ji Y Y, et al. Effects of different fertilizer application on soil active organic carbon[J]. *Environmental Science*, 2013, 34 (1): 277–282. [张瑞, 张贵龙, 姬艳艳, 等. 不同施肥措施对土壤活性有机碳的影响[J]. 环境科学, 2013, 34 (1): 277–282.]
- [31] Qiu X L, Zong L G, Liu Y F, et al. Effects of different cultivation patterns on soil aggregates and organic carbon fractions[J]. *Environmental Science*, 2015, 36 (3): 1045–1053. [邱晓蕾, 宗良纲, 刘一凡, 等. 不同种植模式对土壤团聚体及有机碳组分的影响[J]. 环境科学, 2015, 36 (3): 1045–1053.]
- [32] Wang Y, Yao S H, Li H X, et al. Relationship between distribution patterns of iron oxidates and soil organic matter in aggregates of paddy soil in a long-term fertilization[J]. *Soils*, 2013, 45 (4): 666–672. [王莹, 尧水红, 李辉信, 等. 长期施肥稻田土壤团聚体内氧化铁分布特征及其与有机碳的关系[J]. 土壤, 2013, 45 (4): 666–672.]
- [33] Xie H, Li J, Zhang B, et al. Long-term manure amendments reduced soil aggregate stability via redistribution of the glomalin-related soil protein in macroaggregates[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 14687.
- [34] Shao H Y, Li Z Y, Liu D, et al. Effects of manure application rates on the soil carbon fractions and aggregate stability[J]. *Environmental Science*, 2019, 40 (10): 4691–4699. [邵慧芸, 李紫玥, 刘丹, 等. 有机肥施用量对土壤有机碳组分和团聚体稳定性的影响[J]. 环境科学, 2019, 40 (10): 4691–4699.]
- [35] Yan X, Zhou H, Zbu Q H, et al. Carbon sequestration efficiency in paddy soil and upland soil under long-term fertilization in southern China[J]. *Soil & Tillage Research*, 2013, 130: 42–51.

(责任编辑: 陈荣府)