

ISSN 0564-3929

Acta Pedologica Sinica 土壤学报

Turang Xuebao



中国土壤学会
科学出版社

主办
出版

2015

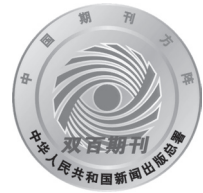
第 52 卷 第 4 期

Vol.52 No.4



土壤学报

(Turang Xuebao)



第 52 卷 第 4 期 2015 年 7 月

目 次

综述与评论

亚硝酸盐型甲烷厌氧氧化微生物生态学研究进展····· 沈李东 (713)

土壤科学与现代农业

近30年江西省耕地土壤全氮含量时空变化特征····· 赵小敏 邵 华 石庆华等 (723)

北京市土壤重金属潜在风险预警管理研究····· 蒋红群 王彬武 刘晓娜等 (731)

秸秆深还对土壤团聚体中胡敏酸结构特征的影响····· 朱 姝 窦 森 陈丽珍 (747)

生物炭添加对酸化土壤中小白菜氮素利用的影响····· 俞映惊 薛利红 杨林章等 (759)

水肥对高产无性系油茶果实产量的影响····· 张文元 郭晓敏 涂淑萍等 (768)

研究论文

基于VRML的土壤电导率三维空间变异性虚拟现实建模研究····· 李洪义 顾呈剑 但承龙等 (776)

不同样点数量对土壤有机质空间变异表达的影响····· 海 南 赵永存 田 康等 (783)

基于稳定同位素的土壤水分运动特征····· 靳宇蓉 鲁克新 李 鹏等 (792)

中国玉米区域氮磷钾肥推荐用量及肥料配方研究····· 吴良泉 武 良 崔振岭等 (802)

不同施肥方式下滩涂围垦农田土壤有机碳及团聚体有机碳的分布····· 候晓静 杨劲松 王相平等 (818)

长期施肥对浙江稻田土壤团聚体及其有机碳分布的影响····· 毛霞丽 陆扣萍 何丽芝等 (828)

不同时期施用生物炭对稻田N₂O和CH₄排放的影响····· 李 露 周自强 潘晓健等 (839)

秸秆生物炭对潮土作物产量和土壤性状的影响····· 刘 园 M. Jamal Khan 靳海洋等 (849)

单一电解质体系下恒电荷土壤胶体扩散双电层中滑动层厚度的计算····· 丁武泉 朱启红 王 磊等 (859)

化工厂遗留地铬污染土壤化学淋洗修复研究····· 李世业 成杰民 (869)

离子型稀土矿尾砂地植被恢复障碍因子研究····· 刘文深 刘 畅 王志威等 (879)

辽东与山东半岛土壤中有机氯农药残留特征研究····· 朱英月 刘全永 李 贺等 (888)

长期冬种绿肥改变红壤稻田土壤微生物生物量特性····· 高嵩涓 曹卫东 白金顺等 (902)

豆科间作对番茄产量、土壤养分及酶活性的影响····· 代会会 胡雪峰 曹明阳等 (911)

研究简报

蚕豆根系分泌物中氨基酸含量与枯萎病的关系····· 董 艳 董 坤 汤 利等 (919)

小麦与蚕豆间作对根际真菌代谢功能多样性的影响····· 胡国彬 董 坤 董 艳等 (926)

不同年限毛竹林土壤固氮菌群落结构和丰度的演变····· 何冬华 沈秋兰 徐秋芳等 (934)

长期不同施肥模式下砂姜黑土的固碳效应分析····· 李 玮 孔令聪 张存岭等 (943)

果园生草对¹⁵N利用及土壤累积的影响····· 彭 玲 文 昭 安 欣等 (950)

封面图片: 离子型稀土矿废弃地全景 (由汤叶涛、刘文深提供)

DOI: 10.11766/trxb201407110351

长期施肥对浙江稻田土壤团聚体及其有机碳分布的影响*

毛霞丽^{1, 2} 陆扣萍^{1, 2} 何丽芝^{1, 2} 宋照亮^{1, 2} 徐祖祥³ 杨文叶³
徐进⁴ 王海龙^{1, 2†}

(1 浙江农林大学/浙江省土壤污染生物修复重点实验室, 浙江临安 311300)

(2 浙江农林大学环境与资源学院, 浙江临安 311300)

(3 浙江省杭州市植保土肥总站, 杭州 310020)

(4 浙江省种植业管理局, 杭州 310020)

摘要 以浙江省稻田长期定位试验站为依托, 研究长期不同施肥措施对土壤团聚体及其有机碳分布的影响。研究表明, 与不施肥对照 (CK) 相比, 栏肥与化肥配施 (NPKOM)、单施栏肥 (OM)、秸秆与化肥配施 (NPKRS) 和单施秸秆 (RS) 处理均显著提高了 >2 mm 和 2 ~ 0.25 mm 水稳定性大团聚体的含量和团聚体平均重量直径 ($p < 0.05$), 强化了团聚体对土壤有机碳的物理保护作用。此外, 长期有机无机配施 (NPKOM 和 NPKRS) 处理显著提高了各个粒级团聚体中有机碳含量, 并且显著增加水稳定性大团聚体有机碳的贡献率, 而长期单施化肥和单施秸秆处理并未有效增加土壤总有机碳含量。不同施肥处理下, 2 ~ 0.25 mm 粒级团聚体有机碳占土壤总有机碳的 34.2% ~ 48.6%, 是土壤有机碳的主要载体。利用傅立叶变换红外光谱 (FT-IR) 技术对 2 ~ 0.25 mm 和 < 0.053 mm 团聚体进行结构表征, 发现长期单施有机肥或者有机无机配施下芳香族 C 较 CK 提高 29.9% ~ 45.2%, 较 NPK 处理提高 22.3% ~ 36.6%, 提高了土壤有机碳的芳构化。在有机碳积累方面, 施用有机肥, 尤其是栏肥与化肥配施, 同时强化了团聚体对有机碳的物理保护以及促进了化学抗性有机碳组分的积累, 是加强稻田土壤有机碳库积累的合理施肥模式。

关键词 长期施肥措施; 水稻土; 团聚体; 物理保护; 结构表征

中图分类号 S152.4 **文献标识码** A

稻田土壤由于其长期淹水状态形成的还原环境不利于有机质的分解, 其较大的有机碳积累能力已被广泛关注^[1-2]。大量研究表明人为合理的调控措施 (如免耕、秸秆还田、长期施用栏肥等) 可以影响稻田土壤的固碳能力^[3-5]。朱利群等^[6]通过对南方 38 个稻田不同施肥下耕层土壤有机碳相对变化的统计发现, 施用有机肥或者有机无机配施处理下耕层土壤有机碳的年相对积累速率显著高于单施化

肥处理。此外, Solomon^[7]和罗璐^[8]等的研究表明, 不同施肥措施下由于作物生物量输入的差异以及不同肥料的分解速率和残留量不同, 不仅影响数量上的土壤有机碳库, 还导致土壤有机碳官能团组成和数量发生改变。

土壤团聚体是有机质转化和累积的关键场所, 其形成与稳定被认为是土壤碳库稳定的重要机制^[9-10]。我国已有的团聚体对土壤碳库稳定作用

* 浙江农林大学科研发展基金 (人才引进) 项目 (2010FR097) 与浙江省科技厅公益性技术应用研究项目 (2013C32025) 共同资助

† 通讯作者, E-mail: nzhaolongwang@gmail.com

作者简介: 毛霞丽 (1988—), 女, 浙江人, 硕士研究生, 主要从事农田土壤有机碳稳定特征研究。E-mail: maoxiali1215@126.com

收稿日期: 2014-07-11; 收到修改稿日期: 2014-11-06

的研究主要针对于团聚体的物理保护及团聚体有机碳数量的贡献，然而由于团聚体的形成和稳定不仅依赖于有机胶结物质的数量，而且也依赖于有机胶结物质的质量^[11]，从团聚体水平上来研究施肥措施下土壤有机碳分子结构特征的变化可以更好地阐明土壤有机碳的稳定机制^[12-13]。周萍等^[14-15]对长期不同施肥处理下江西省红壤性水稻土和太湖地区黄泥土水稳性团聚体中颗粒有机质（POM）进行结构表征，发现不同施肥措施均可改变黄泥土各个粒级水稳性团聚体中POM的芳香度，而施肥几乎没有改变不同粒径水稳性团聚体中POM的芳香度分布，可见稻田土壤各粒级团聚体中POM的稳定性对施肥措施的响应因土壤类型而异。目前，浙江省水稻种植区不同施肥下有机碳积累和稳定机制的报道较少，尤其缺少结合团聚体的物理保护及其有机碳组分的稳定性展开的相关研究。

本文以浙江水网平原区的稻田长期定位试验站

为依托，对土壤水稳性团聚体及其有机碳的分布特征进行解析；同时，采用傅立叶变换红外光谱技术对团聚体有机碳的组成进行表征，深入研究不同施肥措施下稻田土壤有机碳的物理和化学稳定机制，以期为增加土壤团聚体稳定性和促进化学抗性有机碳库积累提供理论和科学依据。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

长期定位试验始于1996年，设在浙江省杭州市西湖区双浦镇杭富村（N 30°5′，E 120°3′）。该试验区海拔高度10 m，年均气温15 ~ 18 °C，年降水量1 435 mm，属亚热带季风性气候。土壤为河流冲积物发育的潴育型水稻土，为泥质田土壤，土壤质地属粉砂质黏壤土。试验前耕层（0 ~ 20 cm）土壤基本理化性质见表1。

表1 1996年稻田表层土壤（0 ~ 20 cm）基本理化性质

Table 1 Initial soil properties in the 0 ~ 20 cm depth of the paddy soil in 1996

土壤 Soil	pH	有机碳 Organic carbon (g kg ⁻¹)	全氮 Total N (g kg ⁻¹)	全磷 Total P (g kg ⁻¹)	全钾 Total K (g kg ⁻¹)	水解氮 Hydrolyzable N (mg kg ⁻¹)	有效磷 Available P (mg kg ⁻¹)	速效钾 Available K (mg kg ⁻¹)	土壤容重 Soil bulk density (g cm ⁻³)
水稻土 Paddy soil	5.69	16.82	1.70	0.53	22.6	161.3	5.0	42.7	1.24

1.2 试验设计

试验共设6个处理：（1）对照，长期不施肥（CK）；（2）秸秆与化肥配施（NPKRS）；（3）栏肥与化肥配施（NPKOM）；（4）单施化肥（NPK）；（5）单施秸秆（RS）；（6）单施栏肥（OM）。试验采取随机区组排列，每个处理3次重复，每个小区面积30 m²。各处理施肥用量：NPK处理为每季施N 135 kg hm⁻²、P₂O₅ 45 kg hm⁻²、K₂O 75 kg hm⁻²；RS处理为每季施风干秸秆1 500 kg hm⁻²；OM处理为每季施腐熟栏肥（含水量80%）7 500 kg hm⁻²；NPKRS处理为每季施N 135 kg hm⁻²、P₂O₅ 45 kg hm⁻²、K₂O 75 kg hm⁻²和风干秸秆1 500 kg hm⁻²；NPKOM处理为每季施N 135 kg hm⁻²、P₂O₅ 45 kg hm⁻²、K₂O 75 kg hm⁻²和施腐熟栏肥7 500 kg hm⁻²。栏肥的平均养分含量分别为全

氮18.1 g kg⁻¹、全磷10.9 g kg⁻¹、全钾28.9 g kg⁻¹，秸秆的平均养分含量分别为全氮7.3 g kg⁻¹、全磷3.3 g kg⁻¹、全钾19.7 g kg⁻¹。试验种植方式为麦—稻两熟制。小麦于每年11月中下旬播种，5月底收获；水稻于每年6月底移栽，11月中旬收获。

1.3 样品采集与分析

于2013年5月小麦收割后采集表层0 ~ 20 cm原状土样。每个采样点随机采集多个土壤，混合成1个复合样品，原土用样品盒带回实验室自然风干，当土壤含水量达到塑限时，过8 mm筛后将土样平摊在通风透气处自然风干，用于团聚体分离。

依据Six等^[16]的土壤团聚体湿筛法进行团聚体分离。称取50 g风干土，在25 °C水中浸泡5 min，将土样依次通过2 mm、0.25 mm、0.053 mm筛，分别得到> 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、< 0.053 mm粉-黏团聚体。各粒级团聚体于50℃烘干，称重。土样全土及各粒级团聚体中总有机碳含量测定采用重铬酸钾外加热法测定^[17]。

团聚体样品与光谱纯KBr 1 : 100混合、研磨、压片，利用傅立叶变换红外光谱仪对2 ~ 0.25 mm和< 0.053 mm团聚体进行红外光谱结构表征 (Nicolet is10, 美国)。光谱扫描范围为400 ~ 4 000 cm⁻¹，扫描次数为32次。

1.4 数据处理

FT-IR吸收图谱采用Origin 8.0软件选基线并半

该级团聚体中有机碳含量×该级团聚体含量 (%)

$$\text{团聚体中有机碳贡献率 (\%)} = \frac{\text{该级团聚体中有机碳含量} \times \text{该级团聚体含量 (\%)}}{\text{土壤有机碳含量}} \times 100\% \quad (2)$$

数据处理与分析采用软件为Excel 2003和SPSS17.0软件，用最小显著差数法 (LSD) 进行显著性检验。

2 结果

2.1 长期施肥处理下土壤水稳性团聚体分布及稳定性评价

如图1所示，17年长期施肥措施对土壤水稳性团聚体分布有显著的影响 ($p < 0.05$)。总体上，除CK和NPK处理以0.25 ~ 0.053 mm和< 0.053 mm

定量对吸收峰面积进行统计分析^[18]，以得到官能团的相对百分含量 (%)。

团聚体的稳定性用团聚体平均重量直径 (MWD) 进行描述，根据式 (1) 进行计算^[10]：

$$MWD = \sum_{i=1}^{n+1} \frac{r_{i-1} + r_i}{2} \times m_i \quad (1)$$

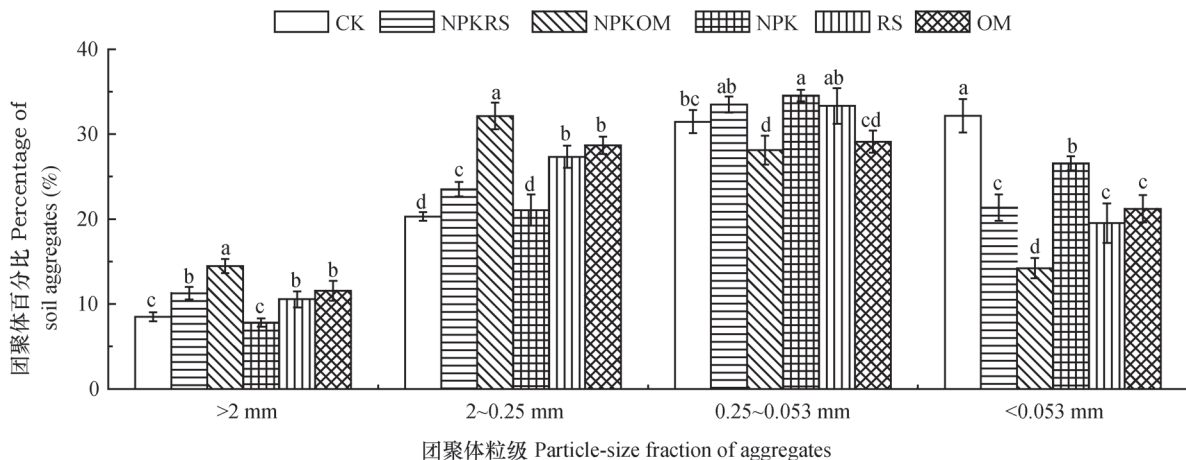
式中， r_i 为第*i*个筛子孔径 (mm)， $r_0 = r_1$ ， $r_n = r_{n+1}$ ， m_i 为第*i*个筛子的团聚体质量百分比。

供试土壤各级团聚体碳对土壤有机碳的贡献率根据式 (2) 进行计算^[9]：

土壤有机碳含量

粒级团聚体所占比重最大，分别占63.6%和61.1%，其余施肥处理的土壤团聚体以2 ~ 0.25 mm和0.25 ~ 0.053 mm粒级团聚体所占比重较大，约占57.0% ~ 60.7%。与CK处理相比，NPKOM、OM、NPKRS、RS四个施肥处理> 2 mm和2 ~ 0.25 mm水稳性大团聚体的百分比均显著增加，其中NPKOM的促进作用最显著，> 2 mm和2 ~ 0.25 mm两个粒级团聚体的增幅分别为70.3%和58.3%，而NPK处理仅显著提高了0.25 ~ 0.053 mm粒级团聚体所占的百分比。

从图2中可知，与CK相比，NPKOM、OM、

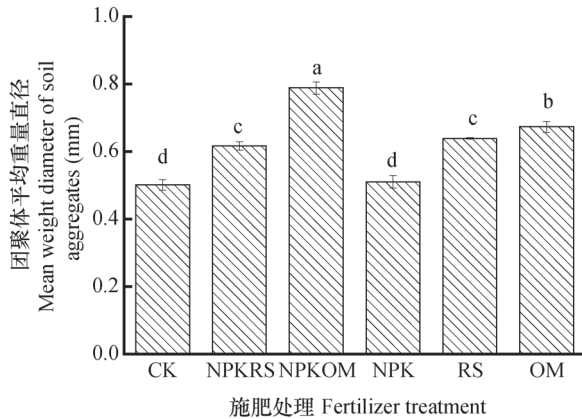


注：CK，不施肥；NPKRS，化肥与秸秆配施；NPKOM，化肥与栏肥配施；NPK，单施化肥；RS，单施秸秆；OM，单施有机肥。图中误差线代表标准偏差，下同。同一粒级团聚体中不同小写字母表示不同处理间分析差异显著 ($p < 0.05$) Note: CK, no fertilizer application; NPKRS, NPK fertilizer plus rice straw; NPKOM, NPK fertilizer plus organic manure; NPK, NPK fertilizer only; RS, rice straw only; OM, organic manure only. The error bars represent standard deviation. The same below. Different letters in the same aggregate mean significant difference among fertilizer practices at $p < 0.05$

图1 不同施肥处理下土壤水稳性团聚体的分布

Fig. 1 Distribution of water-stable aggregates in soils as affected by fertilization practices

NPKRS、RS处理均显著增加土壤团聚体平均重量直径，且施用栏肥的处理（NPKOM、OM）平均重量直径显著高于施用秸秆的处理（NPKRS、RS），尤其是NPKOM处理下团聚体平均重量直径值最大，较CK显著增加57.4%。而NPK处理与CK之间无显著性差异。



注：不同小写字母表示不同处理间分析差异显著（ $p < 0.05$ ）

Note: Different letters mean significant difference among fertilizer practices at $p < 0.05$

图2 不同施肥处理下土壤团聚体平均重量直径

Fig. 2 Mean weight diameter (MWD) of soil aggregates as affected by fertilization practices

2.2 不同粒级团聚体中有机碳含量及其对土壤有机碳的贡献率

由表2可知，不同粒级团聚体中有机碳含量因粒径而异。所有处理不同粒级团聚体中有机碳的含量呈现相同的变化趋势： $[2 \sim 0.25 \text{ mm}] > [> 2 \text{ mm}] > [0.25 \sim 0.053 \text{ mm}] > [< 0.053 \text{ mm}]$ ，且粒级间差异均达到显著水平（ $p < 0.05$ ）。

由表2还可以看出，与CK相比，NPKOM、OM和NPKRS均显著增加了全土和各粒级团聚体中有机碳的含量，且NPKOM处理下团聚体有机碳含量增幅最大，全土、 $> 2 \text{ mm}$ 、 $2 \sim 0.25 \text{ mm}$ 、 $0.25 \sim 0.053 \text{ mm}$ 、 $< 0.053 \text{ mm}$ 各粒级团聚体有机碳含量增幅分别达到25.0%、30.4%、32.3%、36.5%、18.2%。长期单施秸秆处理（RS），除了 $> 2 \text{ mm}$ 团聚体中有机碳含量与CK有显著性差异，全土及其他粒级团聚体有机碳与CK均无显著性差异。NPK显著增加各粒级团聚体有机碳含量，但全土有机碳含量较CK并未有显著增加。

表3是土壤有机碳在不同粒级的团聚体中分布状况。可以看出，所有施肥处理 $2 \sim 0.25 \text{ mm}$ 团聚体有机碳对总有机碳的贡献率最大，其次为 $0.25 \sim 0.053 \text{ mm}$ 团聚体，而 $> 2 \text{ mm}$ 和 $< 0.053 \text{ mm}$ 两个粒

表2 不同施肥处理下全土和各粒级团聚体有机碳的含量

Table 2 Soil organic carbon content of bulk soil and different fractions of aggregates as affected by fertilization practices (g kg^{-1})

处理 Treatment	全土 Bulk soil	大团聚体Macro-aggregate		微团聚体Micro-aggregate	
		$> 2 \text{ mm}$	$2 \sim 0.25 \text{ mm}$	$0.25 \sim 0.053 \text{ mm}$	$< 0.053 \text{ mm}$
CK	19.52c	20.90Be	26.44Ac	15.84Cd	11.12Dd
NPKRS	21.88b	27.37Bbc	34.22Aa	19.99Cb	12.93Dab
NPKOM	24.40a	27.25Bc	34.97Aa	21.62Ca	13.14Da
NPK	20.41c	28.52Bab	30.49Ab	17.58Cc	11.98Dc
RS	19.78c	22.82Bd	27.89Ac	16.79Ccd	11.50Dcd
OM	23.61a	28.44Bd	31.05Ab	19.96Cb	12.17Dbc

注：同一列中不同小写字母表示不同处理间分析差异显著（ $p < 0.05$ ），而同一行中不同大写字母表示同一处理不同粒径团聚体间分析差异显著（ $p < 0.05$ ）。下同 Note: Different lowercase letters in the same column mean significant difference among fertilizer practices at $p < 0.05$, different capital letters in the same line mean significant difference among aggregates at $p < 0.05$. The same below

级团聚体有机碳的贡献率较小，且所有处理下 $2 \sim 0.25 \text{ mm}$ 和 $0.25 \sim 0.053 \text{ mm}$ 两个粒级团聚体对总有机碳的贡献率与 $> 2 \text{ mm}$ 和 $< 0.053 \text{ mm}$ 两个粒级团聚体之间差异显著。NPKOM、OM、NPKRS、RS处理下，水稳性大团聚体有机碳的贡献率均较CK处理显著增加，其中以NPKOM处理增加幅度最大， $> 2 \text{ mm}$ 和 $2 \sim$

0.25 mm 两个粒级团聚体较CK处理分别显著增加51.0%和42.1%。对于 $0.25 \sim 0.053 \text{ mm}$ 团聚体，除了NPKOM和OM处理显著降低该粒级团聚体有机碳对总有机碳的贡献率，其余施肥处理与CK之间均无显著性差异。与CK相比，所有施肥处理均显著降低了 $< 0.053 \text{ mm}$ 团聚体对土壤有机碳的贡献率。

表3 不同施肥处理下各粒级团聚体中有机碳对土壤有机碳的贡献率

处理 Treatment	大团聚体Macro-aggregate			微团聚体Micro-aggregate		
	> 2 mm	2 ~ 0.25 mm	总和Sum	0.25 ~ 0.053 mm	< 0.053 mm	总和Sum
CK	11.28Ce	34.22Ad	45.50d	31.72Aab	22.78Ba	52.50a
NPKRS	15.00Cbc	39.09Abc	54.09c	32.52Bab	13.39Cc	45.91b
NPKOM	17.03Ca	48.62Aa	65.65a	26.27Bc	8.08Dd	34.35d
NPK	12.45Cde	35.85Acd	48.30d	33.94Aa	17.76Bb	51.70a
RS	13.45Ccd	42.71Ab	56.16bc	31.25Bb	12.59Cc	43.84bc
OM	16.19Cab	43.14Ab	59.33b	28.15Bc	12.52Dc	40.67c

2.3 有机碳组成的红外表征

图3为团聚体有机碳定性分析谱图。各吸收峰的红外光谱归属参照罗璐^[8]、李婷^[18]、Mao^[19]、Solomon^[20]等的图谱解析: 3 424 cm^{-1} 为酚类化合物O-H或N-H伸缩振动; 1 655~1 590 cm^{-1} 主要归属于芳香骨架C (C=C), 也可能是醌、酮类化合物羰基 (C=O) 伸缩振动; 1 389 cm^{-1} 特征峰归属于脂肪族C甲基 (CH_3) 和亚甲基 (CH_2) 的变形振动; 1 165 cm^{-1} 特征峰归属于醇类化合物C-O的伸缩振动; 1 077 cm^{-1} 归属于多糖的C-O伸缩振动;

695 cm^{-1} 为烯烃类化合物=C-H的变形振动, 归属于不饱和脂肪烃。

由图3可以看出, 不同施肥措施下不同粒径团聚体土壤红外光谱特征峰相似, 图谱形状基本一致, 但强度存在不同程度的差异, 主要变化表现在脂肪族碳吸收峰强度: 长期单施化肥以及对照处理在1 389 cm^{-1} 处吸收峰强度低于其余施肥处理, 且2~0.25 mm团聚体中脂肪族碳的强度低于< 0.053 mm粉-黏团聚体中脂肪族碳强度。定性分析两个粒级团聚体有机碳其他官能团吸收变化不明显。

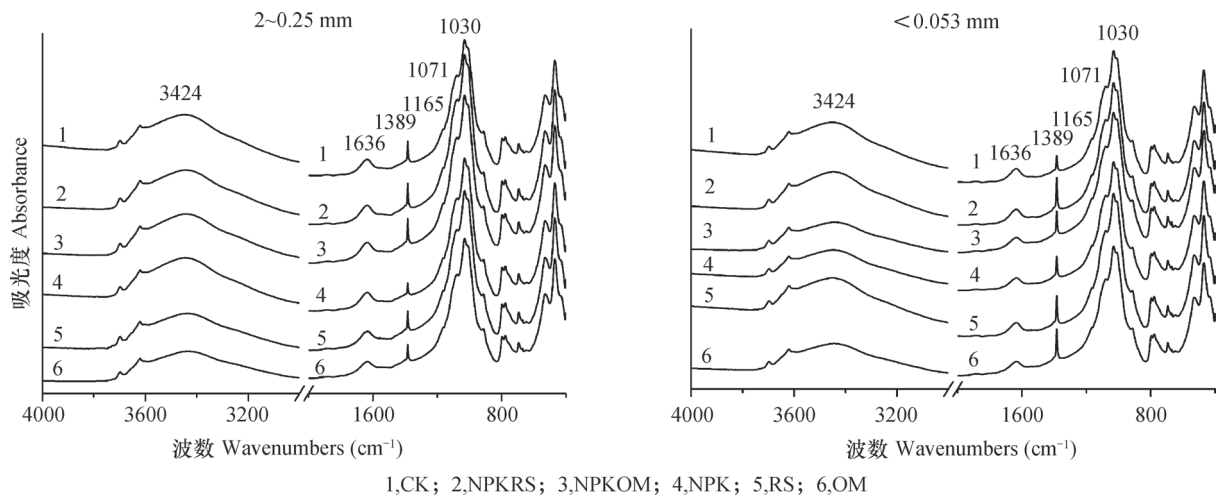


图3 不同施肥处理下团聚体土壤有机碳红外光谱图

Fig. 3 Spectra of aggregated soil organic carbon as affected by fertilization practices

由表4可以看出, 2 ~ 0.25 mm和< 0.053 mm团聚体中各类有机碳官能团所占百分比在不同施肥措施下呈现相似的变化趋势。不同施肥措施下芳香碳所占百分比存在差异, 其中以NPKRS、NPKOM、RS、OM处理较高。2 ~ 0.25 mm团聚体中, NPKOM、NPKRS、OM、RS处理较CK处理增

加了29.9% ~ 45.2%, 较NPK处理增加了22.3% ~ 36.6%; 而长期单施化肥处理较CK处理增加幅度不大, 仅增加6.3%。烷烃类碳以及烯烃类化合物相对百分含量均较低, 仅占0.42% ~ 1.32%, 且< 0.053 mm团聚体中化合物百分比高于2 ~ 0.25 mm团聚体。烷烃类化合物呈现与芳香族碳化合物相似

的变化趋势, 其中以NPKOM、NPKRS、OM、RS处理较高, 且施用有机栏肥下其积累效果优于施用秸秆的处理。对于烯烃类化合物, NPK处理下该类化合物所占百分比低于CK和其余施肥处理。

对于醇类和酚类化合物而言, 在2 ~ 0.25 mm和< 0.053 mm团聚体中, NPKOM、OM处理对于促进醇类化合物的积累的效果较好, 较CK处理分别

增加7.7% ~ 17.0%、12.0% ~ 38.3%。而长期单施化肥处理下醇类化合物的百分比最低, 较CK降低1.9% ~ 4.0%。两个粒级团聚体中酚类化合物呈现与醇类化合物相反的变化趋势, CK和NPK处理下酚类化合物所占百分比高于其他施肥处理。多糖类化合物并未因施肥措施不同而呈现出相关规律性变化。

表4 FT-IR光谱特征半定量分析团聚体土壤有机碳不同官能团相对百分含量

Table 4 Relative proportions of the different organic C functional groups in aggregates resolved by FT-IR spectroscopy (%)

团聚体粒级 Aggregate size	处理 Treatment	多糖 Polysaccharide	酚类 Phenol	醇类 Alcoholic	烯烃类 Alkenes	烷烃类 Alkanes	芳香族碳 Aromatic
2~0.25 mm	CK	9.09	70.83	9.26	0.46	0.47	9.89
	NPKRS	8.57	67.63	9.42	0.43	0.53	13.43
	NPKOM	8.85	65.65	9.97	0.47	0.71	14.36
	NPK	8.51	71.27	8.89	0.42	0.41	10.51
	RS	9.06	66.85	9.30	0.49	0.56	13.75
	OM	9.90	65.70	10.37	0.47	0.71	12.85
<0.053 mm	CK	9.91	74.02	9.16	0.54	0.56	5.80
	NPKRS	9.10	66.85	10.24	0.61	1.16	12.05
	NPKOM	9.03	59.51	10.72	0.76	1.32	18.66
	NPK	9.03	74.42	8.79	0.51	0.80	6.45
	RS	9.11	67.76	9.65	0.56	1.00	11.92
	OM	9.28	65.66	12.67	0.63	1.01	10.76

3 讨论

3.1 长期施肥对团聚体及其有机碳分布的影响

本实验结果表明, 施用栏肥和秸秆的处理均可显著促进稻田土壤水稳定性大团聚体的形成以及提高其平均重量直径, 且以栏肥与化肥配施处理的促进效果最为显著, 而长期单施化肥并未能显著促进水稳性大团聚体的形成。这与刘恩科等^[10]对北京昌平区长期不同施肥措施下褐潮土团聚体分布的研究结果一致。此外, 已有的研究也表明栏肥或秸秆的长期施用可以促进大团聚体内部形成微粒有机质, 增加团聚体的稳定性^[21], 从而强化了团聚体对有机碳的物理保护作用^[13]。有机肥施用的这种优势说明要改善土壤结构以及保持土壤团聚体的稳定性, 必须不断地补充外源有机物质^[10, 22]。刘振东等^[23]在研究施肥对华北褐土有机碳影响时也得到相似的结论, 同时还发现土壤大团聚体的百分含量以

及团聚体的稳定性随有机肥施肥量的增加而提高。

由于不同有机物料在土壤中的分解速率和残留量存在差异, 且不同肥料下作物产量的影响不同而使得碳输入水平不同, 导致不同施肥措施对不同粒级团聚体中有机碳的储量有不同的影响^[24-25]。本研究中, 单施化肥处理虽显著增加所有粒级团聚体中有机碳含量, 但该施肥措施下土壤总有机碳含量较对照土壤并没有明显积累, 而NPKOM、NPKRS、OM处理均显著增加了全土和各粒级团聚体有机碳的含量以及水稳性大团聚体有机碳对土壤总有机碳的贡献率。可见施用有机肥或其与化肥配施对于有机碳的积累效果优于单施化肥措施。朱利群等^[6]通过对南方稻田不同施肥下耕层有机碳相对变化的统计表明, 在土壤累积有机碳作用方面, 有机无机配施和单施有机肥的措施均较单施无机肥更优越, 这与本文的研究结果基本一致。冀建华等^[2]在对潘阳湖地区稻田土壤的固碳潜力评估时也得到

了相同的结论。然而在本研究中长期单施秸秆并未促进各粒级团聚体和全土中有机碳的明显积累,这与田慎重等^[26]对秸秆还田下土壤碳积累的研究结果并不一致,其原因可能是在本研究中,秸秆还田量较低,且该施肥措施下作物产量偏低^[27]而影响碳输入。通过对单施栏肥和单施秸秆处理下固碳效率进行估算,结果表明单施栏肥处理下其原料有机碳转化为土壤有机碳的比例约为单施秸秆处理的2倍。因此,较低的碳输入水平与较低的固碳效率可能是本研究中单施秸秆处理下土壤有机碳含量低的原因^[28]。李成芳等^[29]的研究表明,随着秸秆还田量的增加,土壤有机碳的积累能力加强,但同时也增加了温室气体的排放。因此,在今后的研究中须考虑最优化秸秆还田量的问题。

3.2 施肥对团聚体有机碳化学组分的影响

土壤有机碳与黏粉颗粒之间的化学稳定程度^[30]以及团聚体对有机碳的物理保护^[31]是土壤有机碳稳定的机制,因此本研究选择对2~0.25 mm和<0.053 mm团聚体进行结构表征。研究结果表明,经过长期不同施肥,稻田土壤2~0.25 mm和<0.053 mm团聚体有机碳具有相似的结构组成特征,但各类有机碳官能团的相对百分含量因不同施肥措施存在差异。施用有机肥(栏肥、秸秆)的处理下烷烃、烯烃类以及芳香C化合物均高于长期单施化肥和对照处理的相对百分含量,说明长期施用有机肥可以增加土壤有机碳的脂族性和芳构化。这可能是由于栏肥、秸秆的投入,其较高的化学稳定性组分贡献于土壤化学抗性化合物的积累,而长期单施化肥对土有机碳积累的贡献仅依靠作物根茬还田,对水稻土化学抗性组分的积累无积极贡献。周萍^[15]等的报道也指出施肥下各水稳性团聚体中POM的稳定性可能主要来源于外在输入有机质的分解贡献。前期有关长期施肥条件下稻田土壤生态系统的研究^[8]表明,施用栏肥或者秸秆不仅可以增加土壤总有机碳含量,还可以显著提高土壤有机质抗微生物分解的能力,稻田土壤有机碳的化学稳定性明显增强。本研究中长期单施秸秆处理虽然未促进土壤总有机碳的积累,但促进了土壤团聚体中化学抗性化合物的相对积累,并且显著增加团聚体的稳定性,同样贡献于土壤团聚体有机碳的稳定。

在本研究中,与长期单施化肥和对照处理相比,长期施用有机肥或与化肥配施处理下土壤酚类

化合物有所降低,一方面可能是因为栏肥、秸秆的输入直接导致芳香化合物的大幅度增加而相应降低了酚类化合物的百分比。此外,根据谷阳等^[32]的报道,长期施用化肥虽增加了农田耕层土壤植物来源木质素的输入,但同时加速了其周转,所以并未导致化学抗性化合物木质素的积累,而长期施用有机肥处理可同时增加植物来源和有机肥来源的木质素输入,并且由于有机肥中的活性碳源被微生物优先利用而使稳定的木质素在土壤中选择性积累,从而有效提高了土壤中芳香化合物的比例。郭素春等^[13]的研究认为长期施用化肥后土壤中芳香碳化合物比例的降低可能是由于施用化肥条件下土壤酶以及微生物活性的增强加速了团聚体中芳香碳物质的氧化分解。周萍和潘根兴^[14]的研究则指出有机肥与无机肥配施处理中,由于有机肥输入中大量的碳水化合物等可利用碳源被微生物部分分解为难降解的芳香碳而使芳香碳化合物相对积累。可见,施用有机肥条件下土壤有机碳库的再分配有利于芳香化合物的相对积累,这也可能降低酚类化合物的百分比。

张玉兰等^[33]的研究指出土壤有机碳脂肪族碳组分越多,芳构化程度越高,其与无机微粒的结合能力就越强,有利于土壤团聚体的形成。Kovac等^[34]在利用FT-IR(傅立叶变换红外光谱技术)和¹H-NMR(氢谱核磁共振技术)对大团聚体进行结构表征时指出脂肪族链烃可贡献于大团聚体的持久稳定。此外,谢锦升等^[35]认为与多价金属阳离子联系的芳香腐殖物质和受黏粒强烈吸附的聚合物是团聚体稳定的长久性的有机粘结介质。本研究中施用有机肥条件下2~0.25 mm和<0.053 mm团聚体中化学抗性化合物的积累,从化学组成角度进一步验证和解释了长期施用有机肥或者有机无机配施较单施化肥可以更有效促进水稳性大团聚体的形成,并且长期维持其稳定性。在土壤有机碳积累方面,施用有机肥,尤其是栏肥与化肥配施,不仅显著促进土壤有机碳数量上的积累,同时强化了团聚体对有机碳的物理保护和增加化学抗性组分有机碳的百分比,是促进稻田土壤有机碳的稳定与积累较为有效的施肥措施。本研究仅对团聚体有机碳进行初步结构表征,还需进一步结合核磁共振技术对官能团组成进行验证并且分析其更为精确的分子结构特征。

4 结 论

在不同的施肥措施中, 长期施用有机肥(栏肥、秸秆)或者与化肥配施处理可以显著提高稻田土壤中 $> 2 \text{ mm}$ 和 $2 \sim 0.25 \text{ mm}$ 水稳定性大团聚体的含量及团聚体平均重量直径, 显著促进大团聚体形成和提高土壤团聚体的稳定性。此外, 长期有机无机配施处理显著提高了全土和各粒级团聚体中有机碳的含量并且增加大团聚体中有机碳的贡献率, 有利于促进土壤总有机碳的积累。长期不同施肥虽未改变 $2 \sim 0.25 \text{ mm}$ 和 $< 0.053 \text{ mm}$ 团聚体中有机碳的结构组成, 但改变了各类有机碳官能团的相对百分含量。施用有机肥或者有机无机配施处理, 尤其是栏肥与化肥配施, 不仅显著促进土壤总有机碳的积累, 还可以提高化学抗性化合物所占百分比, 进而提高了土壤团聚体以及团聚体有机碳的稳定性, 是促进稻田土壤有机碳的稳定与积累较为有效的施肥措施。

参 考 文 献

- [1] 徐胜祥, 史学正, 赵永存, 等. 不同耕作措施下江苏省稻田土壤固碳潜力的模拟研究. 土壤, 2012, 44 (2) : 253—259. Xu S X, Shi X Z, Zhao Y C, et al. Simulation of carbon sequestration potential from paddy fields in Jiangsu Province under different tillage practices (In Chinese). Soils, 2012, 44 (2) : 253—259
- [2] 刘守龙, 童成立, 张文菊, 等. 湖南省稻田表层土壤固碳潜力模拟研究. 自然资源学报, 2006, 21 (1) : 118—125. Liu S L, Tong C L, Zhang W J, et al. Simulation of carbon sequestration potential of paddy soils in Hunan Province, China (In Chinese). Journal of Natural Resources, 2006, 21 (1) : 118—125
- [3] 冀建华, 刘秀梅, 侯红乾, 等. 鄱阳湖生态区长期施肥对稻田土壤碳汇效应与固碳潜力的影响. 长江流域资源与环境, 2012, 21 (2) : 187—194. Ji J H, Liu X M, Hou H Q, et al. Effects of long-term fertilization on storages and capacities of SOC in the paddy topsoil in Poyang Lake ecological area (In Chinese). Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2012, 21 (2) : 187—194
- [4] 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. Soil and Tillage Research, 2013, 130: 42—51
- [5] 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. 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 (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2008, 45 (6) : 1063—1071
- [6] 朱利群, 杨敏芳, 徐敏轮, 等. 不同施肥措施对我国南方稻田表土有机碳含量及固碳持续时间的影响. 应用生态学报, 2012, 23 (1) : 87—95. Zhu L Q, Yang M F, Xu M L, et al. Effects of different fertilization modes on paddy field topsoil organic carbon content and carbon sequestration duration in South China (In Chinese). Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23 (1) : 87—95
- [7] Solomon D, Lehmann J, Kinyangi J, et al. Carbon K-edge NEXAFS and FTIR-ATR spectroscopic investigation of organic carbon speciation in soils. Soil Science Society of America Journal, 2005, 69 (1) : 107—119
- [8] 罗璐, 周萍, 童成立, 等. 长期施肥措施下稻田土壤有机质稳定性研究. 环境科学, 2013, 34 (2) : 692—697. Luo L, Zhou P, Tong C L, et al. Study on mechanism of SOM stabilization of paddy soils under long-term fertilizations (In Chinese). Environmental Science, 2013, 34 (2) : 692—697
- [9] 高会议, 郭胜利, 刘文兆, 等. 不同施肥处理对黑垆土各粒级团聚体中有机碳含量分布的影响. 土壤学报, 2010, 47 (5) : 931—938. Gao H Y, Guo S L, Liu W Z, et al. Effect of fertilization on organic carbon distribution in various fractions of aggregates in caliche soils (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2010, 47 (5) : 931—938
- [10] 刘恩科, 赵秉强, 梅旭荣, 等. 不同施肥处理对土壤水稳定性团聚体及有机碳分布的影响. 生态学报, 2010, 30 (4) : 1035—1041. Liu E K, Zhao B Q, Mei X R, et al. Distribution of water-stable aggregates and organic carbon of arable soils affected by different fertilizer application (In Chinese). Acta Ecologica Sinica, 2010, 30 (4) : 1035—1041
- [11] 王清奎, 汪思龙. 土壤团聚体形成与稳定机制及影响因素. 土壤通报, 2005, 36 (3) : 415—421. Wang Q K, Wang S L. Forming and stable mechanism of soil aggregate and influencing factors (In Chinese). Chinese Journal of Soil Science, 2005, 36 (3) : 415—421
- [12] 任雅阁, 成杭新, 徐殿斗, 等. 典型农耕地棕壤水稳性团聚体及其有机碳特征. 水土保持学报, 2013, 27 (2) : 234—237. Ren Y G, Cheng H X, Xu D

- D, et al. Characterization of water stable aggregates and organic carbon in typical brown arable soil (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, 27 (2): 234—237
- [13] 郭素春, 郁红艳, 朱雪竹, 等. 长期施肥对潮土团聚体有机碳分子结构的影响. *土壤学报*, 2013, 50 (5): 922—930. Guo S C, Yu H Y, Zhu X Z, et al. Effect of long-term fertilization on molecular structure of organic carbon in soil aggregates in fluvo-aquic soil (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50 (5): 922—930
- [14] 周萍, 潘根兴. 三种南方典型水稻土长期试验下有机碳积累机制研究 III. 两种水稻土颗粒有机质结构特征的变化. *土壤学报*, 2009, 46 (3): 398—405. Zhou P, Pan G X. SOC accumulation in three major types of paddy soils under long-term agro-ecosystem experiments from south China III. Structural variation of particulate organic matter of two paddy soils (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2009, 46 (3): 398—405
- [15] 周萍, 潘根兴, Piccolo A, 等. 南方典型水稻土长期试验下有机碳积累机制研究 IV. 颗粒有机质热裂解-气相-质谱法分子结构初步表征. *土壤学报*, 2011, 48 (1): 112—124. Zhou P, Pan G X, Piccolo A, et al. SOC accumulation in three major types of paddy soils under long-term agro-ecosystem experiments from south China IV. Molecular characterization of particulate organic carbon by TMAH thermochemolysis-GC/MS (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2011, 48 (1): 112—124
- [16] 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
- [17] 鲍士旦. 土壤农化分析. 北京: 中国农业出版社, 2007: 30—34. Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis (In Chinese). Beijing: China Agriculture Press, 2007: 30—34
- [18] 李婷, 赵世伟, 马帅, 等. 应用同步辐射光谱技术研究退耕草地土壤有机碳官能团变化. *光谱学与光谱分析*, 2011, 31 (12): 3245—3250. Li T, Zhao S W, Ma S, et al. Study of soil organic carbon structural change of fallowing grasslands by synchrotron radiation spectrum technology (In Chinese). *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2011, 31 (12): 3245—3250
- [19] Mao J D, Olk D C, Fang X W, et al. Influence of animal manure application on the chemical structures of soil organic matter as investigated by advanced solid-state NMR and FT-IR spectroscopy. *Geoderma*, 2008, 146 (1): 353—362
- [20] Solomon D, Lehmann J, Kinyangi J, et al. Long-term impacts of anthropogenic perturbations on dynamics and speciation of organic carbon in tropical forest and subtropical grassland ecosystems. *Global Change Biology*, 2007, 13 (2): 511—530
- [21] 王勇, 姬强, 刘帅, 等. 耕作措施对土壤水稳性团聚体及有机碳分布的影响. *农业环境科学学报*, 2012, 31 (7): 1365—1373. Wang Y, Ji Q, Liu S, et al. Effects of tillage practices on water-stable aggregation and aggregate-associated organic C in soils (In Chinese). *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31 (7): 1365—1373
- [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] 刘振东, 李贵春, 周颖, 等. 无机肥配施粪肥对华北褐土团聚体分布及有机碳含量的影响. *农业环境科学学报*, 2013, 32 (11): 2239—2245. Liu Z D, Li G C, Zhou Y, et al. The effect of fertilizer management practices on distribution of aggregates and SOC (In Chinese). *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32 (11): 2239—2245
- [24] 李辉信, 袁颖红, 黄欠如, 等. 不同施肥处理对红壤水稻土团聚体有机碳分布的影响. *土壤学报*, 2006, 43 (3): 422—429. Li H X, Yuan Y H, Huang Q R, et al. Effects of fertilization on soil organic carbon distribution in various aggregates of red paddy soil (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43 (3): 422—429
- [25] 徐阳春, 沈其荣. 长期施用不同有机肥对土壤各粒级复合体中C、N、P含量与分配的影响. *中国农业科学*, 2000, 33 (5): 1—7. Xu Y C, Shen Q R. Influence of long-term application of manure on the contents and distribution of organic C, total N and P in soil particle-sizes (In Chinese). *Scientia Agricultura Sinica*, 2000, 33 (5): 1—7
- [26] 田慎重, 宁堂原, 王瑜, 等. 不同耕作方式和秸秆还田对麦田土壤有机碳含量的影响. *应用生态学报*, 2010, 21 (2): 373—378. Tian S Z, Ning T Y, Wang Y, et al. Effects of different tillage methods and straw-returning on soil organic carbon content in winter wheat field (In Chinese). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21 (2): 373—378
- [27] 徐祖祥. 西湖平原区连续13年定位施肥对麦、稻产量及土壤肥力的影响. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17

- (1): 16—21. Xu Z X. Influences of consecutive 13-year long-term fertilization on yields of rice and wheat and soil fertility in Xihu Plain (In Chinese). *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2011, 17 (1): 16—21
- [28] 谭炳昌, 樊剑波, 何园球. 长期施用化肥对我国南方水田表土有机碳含量的影响. *土壤学报*, 2014, 51 (1): 96—103. Tan B C, Fan J B, He Y Q. Effect of long-term application of chemical fertilizers on soil organic carbon content in top layer of paddy fields in south China (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51 (1): 96—103
- [29] 李成芳, 寇志奎, 张枝盛, 等. 秸秆还田对免耕稻田温室气体排放及土壤有机碳固定的影响. *农业环境科学学报*, 2011, 30 (11): 2362—2367. Li C F, Kou Z K, Zhang Z S, et al. Effects of rape residue mulch on greenhouse gas emissions and carbon sequestration from no-tillage rice fields (In Chinese). *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30 (11): 2362—2367
- [30] Deneff K, Zotarelli L, Boddey R M, et al. Microaggregate-associated carbon as a diagnostic fraction for management-induced changes in soil organic carbon in two Oxisols. *Soil Biology & Biochemistry*, 2007, 39 (5): 1165—1172
- [31] Pulleman M M, Marinissen J C Y. Physical protection of mineralizable C in aggregates from long-term pasture and arable soil. *Geoderma*, 2004, 120 (3): 273—282
- [32] 谷阳, 刘宁, 何红波, 等. 不同施肥管理对农田土壤木质素积累的影响. *土壤通报*, 2013, 44 (6): 1470—1476. Gu Y, Liu N, He H B, et al. The effect of fertilization managements on lignin accumulation in an arable soil (In Chinese). *Chinese Journal of Soil Science*, 2013, 44 (6): 1470—1476
- [33] 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. *光谱学与光谱分析*, 2010, 30 (5): 1210—1213. 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 (In Chinese). *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, 30 (5): 1210—1213
- [34] Kovac N, Bajt O, Faganeli J, et al. Study of macroaggregate composition using FT-IR and ¹H-NMR spectroscopy. *Marine Chemistry*, 2002, 78 (4): 205—215
- [35] 谢锦升, 杨玉盛, 陈光水, 等. 植被恢复对退化红壤团聚体稳定性及碳分布的影响. *生态学报*, 2008, 28 (2): 702—709. Xie J S, Yang Y S, Chen G S, et al. Effects of vegetation restoration on water stability and organic carbon distribution in aggregates of degraded red soil in subtropics of China (In Chinese). *Acta Ecological Sinica*, 2008, 28 (2): 702—709

EFFECT OF LONG-TERM FERTILIZER APPLICATION ON DISTRIBUTION OF AGGREGATES AND AGGREGATE-ASSOCIATED ORGANIC CARBON IN PADDY SOIL

Mao Xiali^{1, 2} Lu Kouping^{1, 2} He Lizhi^{1, 2} Song Zhaoliang^{1, 2} Xu Zuxiang³ Yang Wenyue³
Xu Jin⁴ Wang Hailong^{1, 2†}

(1 Key Laboratory of Soil Contamination Bioremediation of Zhejiang Province, Zhejiang A & F University, Lin'an, Zhejiang 311300, China)

(2 School of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang A & F University, Lin'an, Zhejiang 311300, China)

(3 The General Station of Plant Protection, Soils and Fertilizers, Hangzhou Municipal Bureau of Agriculture, Hangzhou 310020, China)

(4 Zhejiang Provincial Crop Farming Administration Bureau, Hangzhou 310020, China)

Abstract Soil samples collected from a 17-year old long-term fertilization field experiment in Zhejiang Province, China, were analyzed to evaluate effects of the use of chemical fertilizers and amendment of organic manure on distribution of aggregates and aggregate-associated organic carbon in paddy soil. The experiment was designed to have six treatments, including CK (control, no fertilizer applied), NPKRS (NPK fertilizers and rice straw), NPKOM (NPK fertilizers and organic manure), NPK (NPK fertilizers), RS (rice straw alone), and OM (organic manure alone). The wet-sieving method was used for evaluation of physical stability of soil aggregates and their particle-size composition. Fourier transform

infrared spectroscopy (FTIR) was employed to characterize inherent chemical composition of soil organic carbon (SOC) at the molecular level in the 2 ~ 0.25 mm and < 0.053 mm aggregates. In comparison with CK, Treatments NPKOM, OM, NPKRS and RS significantly ($p < 0.05$) increased the proportion of > 2 mm and 2 ~ 0.25 mm water stable aggregates, and mean weight diameter of soil aggregates, thus enhancing the effect of macroaggregates physically protecting SOC. The SOC content of the bulk soil and all aggregate fractions, as well as the contribution of macroaggregate-associated (i.e., > 2 mm and 2 ~ 0.25 mm) SOC to total soil organic C in Treatments NPKOM and NPKRS were significantly higher than that, respectively, in CK. However, no significant difference was observed in accumulation of SOC between CK and Treatments NPK or RS. The 2 ~ 0.25 mm fraction of aggregates contained SOC, accounting for 34.16% ~ 48.6% of the total SOC in the soils in all the treatments, suggesting that 2 ~ 0.25 mm aggregates were the main carriers of SOC in the paddy soil. The FTIR spectra of the 2 ~ 0.25 mm and < 0.053 mm aggregates show that the ratios of aromatic-C to total SOC in Treatments NPKOM, OM, NPKRS and RS were 29.9% ~ 45.2% higher than that in CK, and 22.3% ~ 36.6% higher than that in Treatment NPK. The highest ratio was observed in Treatment NPKOM. The FTIR spectra also indicate that in Treatments NPKOM, OM, NPKRS and RS aliphatic-C groups increased slowly but steadily. The increases in aromatic-C and aliphatic-C were attributed mainly to the inputs of recalcitrant compounds derived from organic amendments, and/or to the reduction of H-bonded O-H hydroxyl groups of phenols induced by biochemical processes in soils treated with organic amendments. The findings of the research indicate that both enhanced physical protection of SOC by macroaggregates and increased proportion of chemically recalcitrant organic compounds contribute to carbon accumulation in the paddy soil treated with organic amendments, with the most prominent effect being observed in Treatment NPKOM. Long-term combined application of organic manure and chemical fertilizers appears to be a sustainable environment-friendly strategy to achieve both high agricultural production and soil carbon accumulation.

Key words Long-term fertilizer application; Paddy soil; Aggregates; Physical protection; Structural characterization

(责任编辑: 卢 萍)

CONTENTS

Reviews and Comments

A review of study on microbial ecology of nitrite-dependent anaerobic methane oxidation Shen Lidong (721)

Soil Science and Modern Agriculture

- Spatio-temporal variation of total N content in farmland soil of Jiangxi Province in the past 30 years Zhao Xiaomin, Shao Hua, Shi Qinghua, et al. (730)
- Early warning of heavy metals potential risk governance in Beijing Jiang Hongqun, Wang Binwu, Liu Xiaona, et al. (745)
- Effect of deep application of straw on composition of humic acid in soil aggregates Zhu Shu, Dou Sen, Chen Lizhen (758)
- Effect of biochar application on pakchoi (*Brassica chinensis* L.) utilizing nitrogen in acid soil Yu Yingliang, Xue Lihong, Yang Linzhang, et al. (766)
- Effects of water and fertilizer on fruit yield of high-yielding clonal *Camellia oleifera* Abel Zhang Wenyuan, Guo Xiaomin, Tu Shuping, et al. (774)

Research Articles

- VRML-based virtual reality modeling of three dimensional variation of soil electrical conductivity Li Hongyi, Gu Chengjian, Dan Chenglong, et al. (781)
- Effect of number of sampling sites on characterization of spatial variability of soil organic matter Hai Nan, Zhao Yongcun, Tian Kang, et al. (790)
- Research on soil water movement based on stable isotopes Jin Yurong, Lu Kexin, Li Peng, et al. (800)
- Basic NPK fertilizer recommendation and fertilizer formula for maize production regions in China Wu Liangquan, Wu Liang, Cui Zhenling, et al. (816)
- Effects of fertilization on soil organic carbon and distribution of SOC in aggregates in tidal flat polders Hou Xiaojing, Yang Jingsong, Wang Xiangping, et al. (827)
- Effect of long-term fertilizer application on distribution of aggregates and aggregate-associated organic carbon in paddy soil Mao Xiali, Lu Kouping, He Lizhi, et al. (837)
- Effects of biochar on N₂O and CH₄ emissions from paddy field under rice-wheat rotation during rice and wheat growing seasons relative to timing of amendment Li Lu, Zhou Ziqiang, Pan Xiaojian, et al. (847)
- Effects of successive application of crop-straw biochar on crop yield and soil properties in cambosols Liu Yuan, M. Jamal Khan, Jin Haiyang, et al. (857)
- Calculation of thickness of shear plane in diffuse double layer of constant charge soil colloid in single electrolyte system Ding Wuqun, Zhu Qihong, Wang Lei, et al. (867)
- Effect of chemical leaching remedying chromium contaminated soil in deserted chemical plant site Li Shiye, Cheng Jiemin (877)
- Limiting factors for restoration of dumping sites of ionic rare earth mine tailings Liu Wenshen, Liu Chang, Wang Zhiwei, et al. (887)
- Residues of organochlorine pesticides in soils of Liaodong and Shandong Peninsulas Zhu Yingyue, Liu Quanyong, Li He, et al. (900)
- Long-term application of winter green manures changed the soil microbial biomass properties in red paddy soil Gao Songjuan, Cao Weidong, Bai Jinshun, et al. (909)
- Effects of intercropping with leguminous crops on tomato yield, soil nutrients and enzyme activity Dai Huihui, Hu Xuefeng, Cao Mingyang, et al. (917)

Research Notes

- Relationship of free amino acids in root exudates with wilt disease (*Fusarium oxysporum*) of faba bean Dong yan, Dong Kun, Tang Li, et al. (924)
- Effects of intercropping of wheat and faba bean on diversity of metabolic function of rhizosphere fungal community Hu Guobin, Dong Kun, Dong Yan, et al. (933)
- Evolvement of structure and abundance of soil nitrogen-fixing bacterial community in *Phyllostachys edulis* plantations with age of time He Donghua, Shen Qiulan, Xu Qiufang, et al. (941)
- Effect of long-term fertilization on carbon sequestration in lime concretion black soil relative to fertilization pattern Li Wei, Kong Lingcong, Zhang Cunling, et al. (949)
- Effects of interplanting grass on utilization, loss and accumulation of ¹⁵N in apple orchard Peng Ling, Wen Zhao, An Xin, et al. (955)

Cover Picture: Full view of ionic rare earth mine desert (by Tang Yetao, Liu Wenshen)

《土壤学报》编辑委员会

主 编: 史学正

执行编委: (按姓氏笔画为序)

丁维新	巨晓棠	王敬国	王朝辉	史 舟	宇万太	朱永官
李永涛	李芳柏	李保国	李 航	吴金水	沈其荣	张玉龙
张甘霖	张福锁	陈德明	邵明安	杨劲松	杨明义	杨林章
林先贵	依艳丽	周东美	周健民	金继运	逢焕成	胡 锋
施卫明	骆永明	赵小敏	贾仲君	徐国华	徐明岗	徐建明
崔中利	常志州	黄巧云	章明奎	蒋 新	彭新华	雷 梅
窦 森	廖宗文	蔡祖聪	蔡崇法	潘根兴	魏朝富	

编辑部主任: 陈德明

责任编辑: 汪枳生 卢 萍 檀满枝

土 壤 学 报

Turang Xuebao

(双月刊, 1948年创刊)

第 52 卷 第 4 期 2015 年 7 月

ACTA PEDOLOGICA SINICA

(Bimonthly, Started in 1948)

Vol. 52 No. 4 July, 2015

编 辑 《土壤学报》编辑委员会
地址: 南京市北京东路 71 号 邮政编码: 210008
电话: 025 - 86881237
E-mail: actapedo@issas.ac.cn

Edited by Editorial Board of Acta Pedologica Sinica
Add: 71 East Beijing Road, Nanjing 210008, China
Tel: 025 - 86881237
E-mail: actapedo@issas.ac.cn

主 编 史 学 正
主 管 中 国 科 学 院
主 办 中 国 土 壤 学 会
承 办 中国科学院南京土壤研究所

Editor-in-Chief Shi Xuezheng
Superintended by Chinese Academy of Sciences
Sponsored by Soil Science Society of China
Undertaken by Institute of Soil Science,
Chinese Academy of Sciences

出 版 科 学 出 版 社
地址: 北京东黄城根北街 16 号 邮政编码: 100717

Published by Science Press
Add: 16 Donghuangchenggen North Street,
Beijing 100717, China

印刷装订 北京中科印刷有限公司
总发行 科 学 出 版 社
地址: 北京东黄城根北街 16 号 邮政编码: 100717
电话: 010 - 64017032
E-mail: journal@mail.sciencep.com

Printed by Beijing Zhongke Printing Limited Company
Distributed by Science Press
Add: 16 Donghuangchenggen North Street,
Beijing 100717, China
Tel: 010 - 64017032
E-mail: journal@mail.sciencep.com

国外发行 中国国际图书贸易总公司
地址: 北京 399 信箱 邮政编码: 100044

Foreign China International Book Trading Corporation
Add: P. O. Box 399, Beijing 100044, China

国内统一刊号: CN 32-1119/P

国内邮发代号: 2-560

国外发行代号: BM45

定价: 60.00 元

国 内 外 公 开 发 行



ISSN 0564-3929

