

DOI: 10.11766/trxb201605060123

# 不同肥力红壤水稻土根际团聚体组成和碳氮分布动态\*

江春玉<sup>1</sup> 刘萍<sup>1,2</sup> 刘明<sup>1</sup> 吴萌<sup>1</sup> 李忠佩<sup>1†</sup>

(1 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008)

(2 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要** 研究水稻种植期间表层土壤团聚体数量及其有机碳、全氮含量的变化, 对揭示人为耕作的影响、认知土壤肥力的演变规律具有重要意义。选择两种不同肥力的红壤性水稻土进行田间根袋试验, 分别于水稻插秧前、分蘖期、孕穗期和成熟期采样, 分析了水稻生长过程中根际和非根际土壤团聚体组成、稳定性以及有机碳、全氮分布的动态变化。结果表明, 低肥力土壤团聚体以 > 0.25 mm 大团聚体为主 (56.2% ~ 64.0%), 0.25 ~ 1 mm 粒级团聚体含量最高; 除 1 ~ 2 mm 粒级外, 水稻生育期内根际土壤各粒级团聚体含量均有显著变化; 取样时期、根际作用与取样时期的交互效应对 0.25 ~ 1 mm 和 0.053 ~ 0.25 mm 粒级含量有显著影响。高肥力土壤中以 < 0.25 mm 微团聚体为主 (59.8% ~ 72.0%), 0.053 ~ 0.25 mm 粒级团聚体比例最高, 取样时期显著影响 > 0.25 mm 大团聚体含量, 根际作用与取样时期的交互效应对 > 2 mm 粒级含量有极显著影响。与非根际相比, 根际土壤大团聚体的破坏率较低, 平均重量直径 (MWD) 较高, 种植水稻有助于提高根际土壤的稳定性。两种肥力土壤团聚体中有机碳和全氮含量均表现为 1 ~ 2 mm 粒级最高, 0.053 ~ 0.25 mm 粒级最低, 大团聚体中显著高于微团聚体。根际土壤中, 水稻成熟期各粒级团聚体有机碳含量与插秧前无显著差异, 而分蘖期和孕穗期有明显波动; 水稻的生长降低了大团聚体中的全氮含量, 对高肥力土壤的影响更为显著。总体而言, 低肥力土壤中, 根际作用主要影响团聚体组成和稳定性, 取样时期影响团聚体碳氮含量; 高肥力土壤中, 团聚体组成和碳氮分布受根际作用和取样时期的共同影响。

**关键词** 红壤水稻土; 团聚体; 生育期; 有机碳; 全氮

**中图分类号** S154.4 **文献标识码** A

土壤团聚体是土壤结构的重要物质基础和肥力的重要载体, 其组成和稳定性直接影响了土壤理化性质, 进而影响农作物生长。以 250  $\mu\text{m}$  为界限, 团聚体被分为大团聚体 (Macroaggregates) 和微团聚体 (Microaggregates)。不同粒级团聚体在养分的保持、供应及转化能力等方面发挥着不同的作用<sup>[1]</sup>。红壤性水稻土发育于红壤, 质地黏重, 酸度较高, 是我国南方稻作区主要土壤类型。但是

相同母质和种植制度下, 水热条件接近, 红壤水稻土团聚体组成和碳氮分布却存在较大差异。鹰潭和桃源生态试验站长期定位试验的红壤水稻土以大团聚体为主, 有机碳氮主要分布在较大粒级团聚体上<sup>[2-3]</sup>; 千烟洲生态试验站红壤水稻土团聚体分布以 < 63  $\mu\text{m}$  的粉砂和黏粒为主<sup>[4]</sup>, 湖南省望城县长期定位试验红壤水稻土团聚体内有机碳含量随团聚体粒径减小而增加<sup>[5]</sup>。水稻土是长期人为水耕熟

\* 国家重点基础研究发展规划 (973) 项目 (2015CB150501) 和国家自然科学基金项目 (41171233) 资助 Supported by the National Basic Research Program of China (973 Program) (No. 2015CB150501) and the National Natural Science Foundation of China (No. 41171233)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: zhpli@issas.ac.cn

作者简介: 江春玉 (1981—), 女, 江苏海门人, 博士, 助理研究员, 主要从事土壤生物与生化方面的研究。E-mail: chyjiang@issas.ac.cn

收稿日期: 2016-05-06; 收到修改稿日期: 2016-07-27; 优先数字出版日期 (www.cnki.net): 2016-08-29

化、淹水种稻而形成的一种特殊土壤类型，土壤利用年限和人为管理措施差异引起的土壤肥力性状变化可能是造成这一现象的原因之一，但具体的形成机制尚不明确。

根际 (rhizosphere) 是作物、土壤和微生物相互作用的中心，是作物和土壤环境之间物质和能量交换最活跃的区域。因为植物的根际沉积效应，根际土壤的许多物理化学条件和生物化学过程不同于普通土体<sup>[6]</sup>，进而影响土壤团聚化作用。有机物质的连续供给和微生物生物量的增加，使得根际土壤及黏土和细粉组分中碳含量更高<sup>[7]</sup>。但是，已有报道主要采集非栽培期的土壤进行土壤团聚体有机碳分布研究，而且主要针对有机肥施用和耕作管理等外部调控措施的影响，很少关注作物生育期内根际土壤中团聚体组成的动态变化和差异。比较水稻生长过程中根际和非根际土壤团聚体组成和有机碳氮分布的变化，将有助于深入认识植物—土壤的互动关系和农田土壤质量变化。

本研究选择南方典型地带性土壤——红壤水稻

土为研究对象，探讨土壤肥力水平和水稻生长过程对根际和非根际土壤团聚体组成和有机碳氮分布的影响，以期为揭示土壤肥力形成和变化的规律提供重要的理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试土壤

供试土壤采自鹰潭农田生态系统国家野外科学观测研究站附近的典型稻田，采样田块地理坐标分别为28°12′01″N、116°56′02″E和28°12′02″N、116°55′50″E。2012年3月在选定的田块上通过多点混合采集0~15 cm 耕层土样，样品经风干，挑去细根和石块等，过10 mm筛备用。供试土壤均为第四纪红色黏土发育的水稻土，属于简育水耕人为土，基本理化性状如表1所示。土样S1的有机碳和养分含量均低于土样S2，水稻种植年限为15年左右，肥力水平较低；土样S2水稻种植年限超过50年，水肥管理较好，为当地中高肥力的红壤水稻土。

表1 供试红壤水稻土的基本理化性状

Table 1 Physical and chemical properties of the studied red paddy soils

土样 Soil samples	pH <sup>1)</sup>	有机碳 Organic carbon (g kg <sup>-1</sup> )	全氮 Total N (g kg <sup>-1</sup> )	全磷 Total P (g kg <sup>-1</sup> )	全钾 Total K (g kg <sup>-1</sup> )	碱解氮 Alkaline N (mg kg <sup>-1</sup> )	有效磷 Available P (mg kg <sup>-1</sup> )	速效钾 Available K (mg kg <sup>-1</sup> )
S1	5.20 ± 0.03b	9.48 ± 0.38b	0.91 ± 0.02b	0.51 ± 0.00b	14.92 ± 0.26a	119.0 ± 2.9b	8.36 ± 0.19b	141.7 ± 1.2b
S2	5.57 ± 0.02a	20.87 ± 0.47a	2.17 ± 0.03a	0.69 ± 0.00a	6.80 ± 0.13b	261.3 ± 1.6a	54.63 ± 0.51a	130.0 ± 2.0a

注：1) 土水比1:2.5；同一列中不同字母代表5%差异显著性 Note: 1) soil water ratio 1:2.5; In each column, the different letters following the data mean significant difference at 0.05 levels

### 1.2 实验设计

田间根袋试验在鹰潭农田生态系统国家野外科学观测研究站内进行。根袋由内外2层300目的尼龙布制成，内袋直径12 cm，用以区分根际土和非根际土；外袋直径20 cm，用以区分供试土壤和田间土壤；袋高22 cm，袋口由尼龙绳收口（图1所示）。将两种不同肥力的土壤分别装入根袋中，内袋装土2.4 kg，外袋装土3.6 kg，装土高度为15 cm，然后将根袋埋入田间，与田间土壤一起淹水处理。选择高度、粗细较一致的水稻秧苗（水稻品种为金早47）插入内袋中，每袋种一穴两株。施肥量参照当地的常规施肥量（每公顷施N 115 kg，P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 68 kg和K<sub>2</sub>O 42 kg），每袋按占地

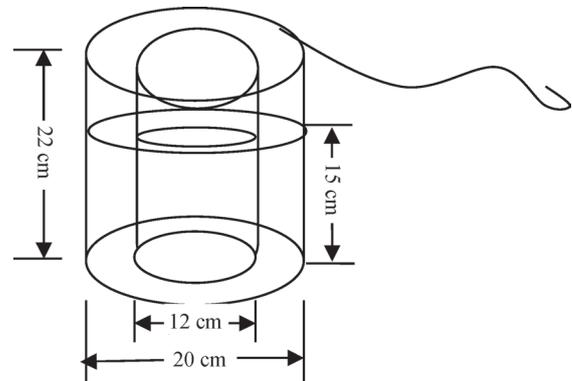


图1 根袋示意图

Fig. 1 Sketch of the root bag used in the experiment

面积 $0.04 \text{ m}^2$ 计, 施底肥尿素 $0.53 \text{ g}$ 、钙镁磷肥 $2.27 \text{ g}$ 、氯化钾 $0.27 \text{ g}$ , 分蘖期追肥尿素 $0.47 \text{ g}$ 。分别于插秧前(P1)、分蘖期(P2)、孕穗期(P3)和成熟期(P4)进行采样, 每次每种土壤采集3个根袋。采集的根袋运回室内后剪开, 内外两层中的土壤分别晾干至不粘手状态, 然后用手将土样沿自然结构面掰成直径约 $1 \text{ cm}$ 的小块, 使土样能通过 $10 \text{ mm}$ 的筛孔。

### 1.3 土壤团聚体分级

土壤团聚体的分级采用干筛与湿筛相结合的方法。干筛参照中国科学院南京土壤研究所土壤物理研究室方法<sup>[8]</sup>, 土样风干后用不锈钢套筛振荡进行干筛, 分别得到 $>5 \text{ mm}$ 、 $2 \sim 5 \text{ mm}$ 、 $1 \sim 2 \text{ mm}$ 、 $0.5 \sim 1 \text{ mm}$ 、 $0.25 \sim 0.5 \text{ mm}$ 和 $<0.25 \text{ mm}$ 的六级机械稳定性土壤团聚体。根据干筛获得的各级团聚体百分比, 配成质量为 $100 \text{ g}$ (精确至 $0.01 \text{ g}$ )的土样用于湿筛分析。湿筛参照Elliott<sup>[9]</sup>的方法: 土样放置于孔径为 $2 \text{ mm}$ 的不锈钢筛上, 室温下蒸馏水浸泡 $10 \text{ min}$ , 然后分别通过 $1 \text{ mm}$ 、 $0.25 \text{ mm}$ 和 $0.053 \text{ mm}$ 的不锈钢筛, 竖直上下振荡 $50$ 次, 收集各级土筛上的土壤, 获得 $>2 \text{ mm}$ 、 $1 \sim 2 \text{ mm}$ 、 $0.25 \sim 1 \text{ mm}$ 和 $0.053 \sim 0.25 \text{ mm}$ 的水稳性土壤团聚体,  $<0.053 \text{ mm}$ 的团聚体通过将溶液沉降、离心获得。将各级筛层中的土粒转移至烧杯中, 自然晾干后测定有机碳和全氮含量, 部分烘干称重计算各粒径团聚体的比例和团聚体破坏率(PAD, % )。

### 1.4 测定方法及计算

土壤有机碳测定用高温外加热重铬酸钾氧化-容量法, 全氮用半微量凯氏法测定<sup>[10]</sup>。

各级团聚体的百分含量=各处理中该级团聚体质量/各处理土壤样品总质量 $\times 100\%$ 。采用 $>0.25 \text{ mm}$ 水稳性团聚体、团聚体平均质量直径(Mean weight diameter, MWD)和团聚体破坏率来衡量团聚体稳定性。

$$\text{MWD}(\text{mm}) = \frac{\sum_{i=1}^n X_i W_i}{\sum_{i=1}^n W_i}, \quad X_i \text{ 为 } i \text{ 级团聚体平均直径, } W_i \text{ 为 } i \text{ 级团聚体重量百分含量。}$$

团聚体破坏率(PAD, %) = ( $>0.25 \text{ mm}$ 机械稳定性团聚体 -  $>0.25 \text{ mm}$ 水稳性团聚体) /  $>0.25 \text{ mm}$ 机械稳定性团聚体 $\times 100$

团聚体对土壤碳氮的贡献率(%) = (该级团聚体中碳氮含量 $\times$ 该级团聚体的百分含量) / 全土

中碳氮含量 $\times 100$ 。

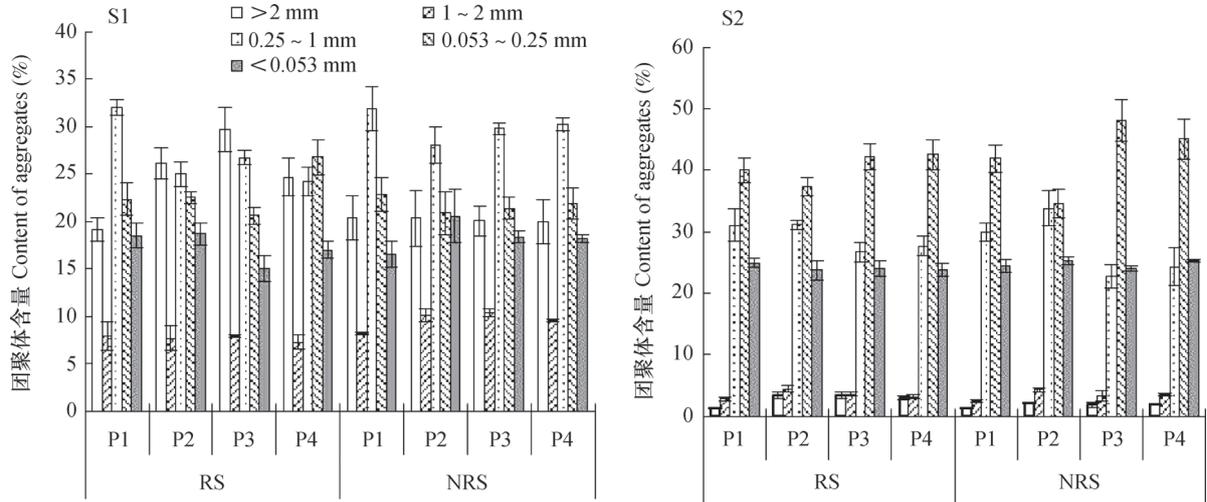
采用 Microsoft Excel 软件对数据进行处理, SPSS 19.0 数据分析系统进行统计分析, 采用单因素方差分析(one-way ANOVA)测验处理间差异显著性( $p < 0.05$ ), 重复测量方差分析(repeated measures ANOVA)检验取样时期对处理的影响。

## 2 结果

### 2.1 水稳性团聚体的分布动态

土壤团聚体的数量和大小分布影响着土壤质量。图2为不同生育期水稻根际和非根际土壤中水稳性团聚体的质量分数。低肥力土壤(S1)中,  $>2 \text{ mm}$ 、 $1 \sim 2 \text{ mm}$ 、 $0.25 \sim 1 \text{ mm}$ 、 $0.053 \sim 0.25 \text{ mm}$ 及 $<0.053 \text{ mm}$ 粒级团聚体含量分别为 $19.2\% \sim 29.7\%$ 、 $7.3\% \sim 10.4\%$ 、 $24.2\% \sim 32.0\%$ 、 $20.7\% \sim 26.8\%$ 和 $15.1\% \sim 20.6\%$ ,  $1 \sim 2 \text{ mm}$ 粒级的团聚体比例较低。内袋根际土中,  $>2 \text{ mm}$ 粒级团聚体在水稻生育期表现为先增后减, 孕穗期比插秧前增加 $53.1\%$ ,  $0.25 \sim 1 \text{ mm}$ 粒级团聚体在分蘖期降低后至成熟期无显著变化; 与插秧前相比, 水稻成熟期 $>2 \text{ mm}$ 、 $0.25 \sim 1 \text{ mm}$ 和 $0.053 \sim 0.25 \text{ mm}$ 粒级团聚体含量均有显著变化。外袋非根际土中, 水稻生育期间各粒级团聚体含量基本保持不变。分蘖期、孕穗期和成熟期, 根际土壤 $>2 \text{ mm}$ 粒级含量显著高于非根际土壤,  $1 \sim 2 \text{ mm}$ 和 $0.25 \sim 1 \text{ mm}$ 含量显著低于非根际土壤。重复测量方差分析结果表明, 取样时期、根际作用与取样时期的交互效应对 $0.25 \sim 1 \text{ mm}$ 和 $0.053 \sim 0.25 \text{ mm}$ 粒级含量有显著影响( $p < 0.05$ ), 对其他粒级影响不显著。

高肥力土壤(S2)中, 由大到小各粒级团聚体含量分别为 $1.3\% \sim 3.5\%$ 、 $2.5\% \sim 4.4\%$ 、 $22.8\% \sim 33.8\%$ 、 $34.6\% \sim 48.1\%$ 和 $23.6\% \sim 25.2\%$ ,  $0.053 \sim 0.25 \text{ mm}$ 粒级的团聚体比例最高,  $>2 \text{ mm}$ 和 $1 \sim 2 \text{ mm}$ 粒级的团聚体含量最低。水稻生长期间, 内外根袋中 $>2 \text{ mm}$ 和 $1 \sim 2 \text{ mm}$ 粒级均表现为先增后减, 种植一季水稻后比种植前显著提高; 分蘖期 $0.053 \sim 0.25 \text{ mm}$ 粒级团聚体向大团聚体转移, 孕穗期其比例显著升高( $p < 0.05$ )。根际土壤中,  $>2 \text{ mm}$ 粒级团聚体含量在分蘖期、孕穗期和成熟期均显著高于非根际土壤;  $0.25 \sim 1 \text{ mm}$ 和 $0.053 \sim 0.25 \text{ mm}$ 粒级团聚体含量在孕穗期显著高于非根际土壤( $p < 0.05$ ), 其他粒级差异不显著。



注：S1代表低肥力红壤水稻土，S2代表高肥力红壤水稻土；P1、P2、P3和P4分别代表插秧前、分蘖期、孕穗期和成熟期四个水稻生育期；RS代表根际土壤，NRS代表非根际土壤。下同Note: S1 stands for red paddy soil with low fertility, S2 for red paddy soil with high fertility; P1, P2, P3 and P4 for before transplanting, tillering stage, booting stage and ripening stage of rice growth, respectively; RS for rhizosphere soil, NRS for non-rhizosphere soil. The same below

图2 水稻种植期间土壤水稳性团聚体组成变化

Fig. 2 Change of water-stable aggregates in composition during the rice cultivation season

重复测量方差分析结果表明，取样时期对 > 2 mm 和 1 ~ 2 mm 粒级含量有极显著影响 ( $p < 0.01$ )，对 0.25 ~ 1 mm 含量有显著影响 ( $p < 0.05$ )；根际作用和取样时期的交互效应对 > 2 mm 粒级含量有极显著影响 ( $p < 0.01$ )。

### 2.2 土壤肥力和水稻种植对土壤团聚体稳定性的影响

通常认为 > 0.25 mm 的大团聚体是土壤团粒结构体，其数量与土壤肥力状况呈正相关。水稻种植期间水稳性大团聚体的含量变化如表2所示，低肥力土壤中大团聚体含量为 56.2% ~ 64.3%，显著高于高肥力土壤 ( $p < 0.05$ )。孕穗期根际土中大团

聚体含量显著高于非根际土，根际作用影响水稻生长中后期土壤大团聚体含量。两种非根际土壤中大团聚体含量变化规律并不相同，低肥力土壤中基本保持不变，高肥力土壤中随季节变化较大。

团聚体破坏率和 MWD 值表征团聚体对水的稳定性。由表3可以看出，低肥力土壤中大团聚体的破坏率为 34.2% ~ 42.1%，显著低于高肥力土壤 ( $p < 0.05$ )。根际土壤中大团聚体的破坏率低于非根际土壤，在孕穗期达极显著水平，根系的生长有利于灌水条件下团聚体的稳定。

由表4可以看出，低肥力土壤中团聚体 MWD 值显著高于高肥力土壤 ( $p < 0.05$ )。插秧前，内外

表2 水稻种植期间水稳性大团聚体含量

Table 2 Content of water-stable macro-aggregate in the paddy soils relative to growth stage of the crop (%)

土样 Soil samples	水稻生育期 Growing stages of rice			
	P1	P2	P3	P4
S1 根际土壤 Rhizosphere soil	59.1 ± 2.4b (a)	58.8 ± 1.3b (a)	64.3 ± 1.6a (a)	56.2 ± 1.5b (a)
非根际土壤 Non-rhizosphere soil	60.5 ± 0.6a (a)	58.5 ± 4.0a (a)	60.3 ± 1.4a (b)	59.9 ± 1.7a (a)
S2 根际土壤 Rhizosphere soil	35.1 ± 2.1b (b)	38.9 ± 0.6a (b)	33.8 ± 1.2b (c)	33.8 ± 1.4b (c)
非根际土壤 Non-rhizosphere soil	33.7 ± 1.2b (b)	40.2 ± 2.3a (b)	28.0 ± 2.5c (d)	29.7 ± 2.0bc (b)

注：括号外不同字母代表同一行取样时期之间有显著性差异 ( $p < 0.05$ )，括号内不同字母代表同一列处理之间有显著性差异 ( $p < 0.05$ )，下同 Note: In each line, the different letters following the data outside the brackets mean significantly difference at 0.05 levels between sampling stages; in each column, the different letters inside the brackets mean significantly difference at 0.05 levels between treatments. The same as below

表3 水稻种植期间大团聚体破坏率变化

Table 3 Percentage of macro-aggregate destruction in the paddy soils relative to rice growth stage (%)

土样 Soil samples	水稻生育期Growing stages of rice			
	P1	P2	P3	P4
S1 根际土壤Rhizosphere soil	40.7 ± 2.3a (b)	39.8 ± 1.4a (b)	34.2 ± 0.9b (d)	42.1 ± 1.3a (c)
非根际土壤Non-rhizosphere soil	38.2 ± 0.3b (b)	37.2 ± 0.3b (b)	38.1 ± 2.0b (c)	41.3 ± 0.3a (c)
S2 根际土壤Rhizosphere soil	62.0 ± 1.6a (a)	49.3 ± 2.8c (a)	53.1 ± 0.3b (b)	58.6 ± 2.2a (b)
非根际土壤Non-rhizosphere soil	62.0 ± 1.3a (a)	51.8 ± 2.0c (a)	60.6 ± 0.4b (a)	63.5 ± 0.3a (a)

表4 水稻种植期间团聚体MWD值变化

Table 4 Aggregate MWD in the paddy soils relative to rice growth stage (mm)

土样 Soil samples	水稻生育期Growing stages of rice			
	P1	P2	P3	P4
S1 根际土壤Rhizosphere soil	1.47 ± 0.06c (a)	1.84 ± 0.07b (a)	2.06 ± 0.10a (a)	1.75 ± 0.12b (a)
非根际土壤Non-rhizosphere soil	1.55 ± 0.10a (a)	1.53 ± 0.13a (b)	1.53 ± 0.06a (b)	1.52 ± 0.10a (b)
S2 根际土壤Rhizosphere soil	0.37 ± 0.01c (b)	0.50 ± 0.03a (c)	0.48 ± 0.02ab (c)	0.45 ± 0.01b (c)
非根际土壤Non-rhizosphere soil	0.36 ± 0.00c (b)	0.44 ± 0.01a (d)	0.37 ± 0.03bc (d)	0.38 ± 0.01b (d)

袋中两种土壤的团聚体MWD值均无显著差异；水稻分蘖期、孕穗期和成熟期，内袋根际土壤团聚体MWD值均显著高于外袋非根际土壤 ( $p < 0.05$ )。种植水稻有助于提高土壤的稳定性。

### 2.3 团聚体中有机碳、全氮含量的变化

由图3可知，不同粒径团聚体中的有机碳含量具有明显的差异，高肥力和低肥力土壤中有机碳含量均表现为1~2 mm粒级最高，0.25~1 mm和>2 mm粒级次之，0.053~0.25 mm粒级最低，大团聚体中有机碳含量显著高于微团聚体，高肥力土壤团聚体有机碳含量显著高于低肥力土壤 ( $p < 0.05$ )。

低肥力水稻根际土中，分蘖期和孕穗期>2 mm粒级团聚体有机碳含量显著高于插秧前和成熟期 ( $p < 0.05$ )，而0.25~1 mm粒级团聚体有机碳含量显著低于插秧前和成熟期 ( $p < 0.05$ )。除0.053~0.25 mm粒级外，其他粒级团聚体中水稻成熟期有机碳含量与插秧前无显著变化。根际土和非根际土中各粒级团聚体有机碳含量均无显著差异。

高肥力水稻根际土中，分蘖期>2 mm粒级团聚体有机碳含量显著低于插秧前和成熟期 ( $p < 0.05$ )，分蘖期和孕穗期0.053~0.25 mm粒级团聚体有机碳含量显著低于成熟期 ( $p < 0.05$ )，水稻生长促进了>2 mm和0.053~0.25 mm粒级中有

机碳的吸收利用和分解转化；<0.053 mm粒级团聚体有机碳含量在分蘖期和孕穗期显著高于插秧前和成熟期 ( $p < 0.05$ )，0.25~1 mm粒级团聚体有机碳含量在分蘖期显著增加，孕穗期最低。总体而言，水稻成熟期各粒级团聚体中有机碳含量与插秧前无显著变化，而分蘖期和孕穗期有明显波动。根际土中，分蘖期>2 mm粒级、孕穗期1~2 mm粒级、成熟期0.053~0.25 mm和<0.053 mm粒级中有机碳含量显著低于非根际土。

重复测量方差分析结果表明，取样时期对0.053~0.25 mm粒级团聚体有机碳含量有显著影响 ( $p < 0.05$ )，根际作用和取样时期的交互效应对低肥力土壤1~2 mm粒级团聚体有机碳含量有显著影响 ( $p < 0.05$ )。

由图4可以看出，供试红壤水稻土团聚体全氮含量在水稻种植期间也发生了很大变化。与有机碳的分布相似，团聚体全氮含量也表现为1~2 mm粒级最高，0.25~1 mm和>2 mm粒级次之，0.053~0.25 mm粒级最低，大团聚体中全氮含量显著高于微团聚体中，高肥力土壤团聚体全氮含量显著高于低肥力土壤 ( $p < 0.05$ )。

低肥力根际土中，成熟期>2 mm粒级团聚体全氮含量显著低于插秧前和分蘖期，孕穗期0.25~1 mm粒级团聚体全氮含量显著低于插秧前和

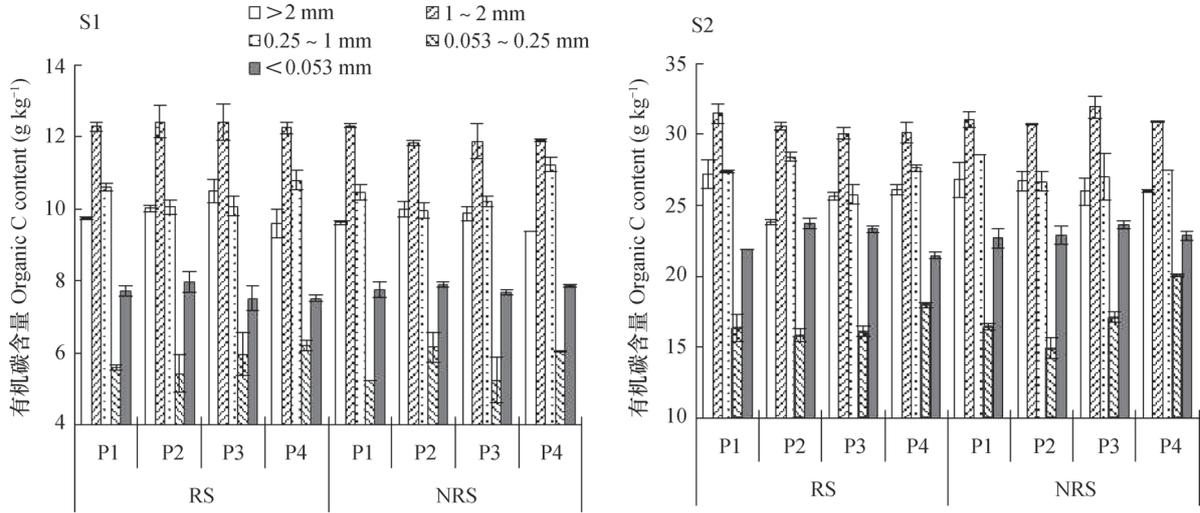


图3 水稻种植期间土壤团聚体中有机碳含量变化

Fig. 3 Variation of organic carbon contents in soil aggregates during the rice cultivation season

成熟期，< 0.053 mm 粒级团聚体全氮含量在分蘖期显著高于其他取样时期 ( $p < 0.05$ )。成熟期 > 2 mm 粒级团聚体全氮含量显著低于非根际土。

高肥力根际土中，> 2 mm、1 ~ 2 mm 和 0.25 ~ 1 mm 粒级大团聚体的全氮含量在插秧前显著高于孕穗期和成熟期 ( $p < 0.05$ )，> 2 mm 粒级团聚体中全氮含量在孕穗期最低，1 ~ 2 mm 粒级团聚体中在分蘖期最低，而 0.25 ~ 1 mm 粒级团聚体中在成熟期最低；0.053 ~ 0.25 mm 粒级全氮含量在分蘖期显著降低，成熟期回升；< 0.053 mm 粒级团聚体全氮含量在分蘖期和孕穗期显著高于插秧前和成熟期 ( $p < 0.05$ )。非根际土壤中各团聚体全氮含量

与插秧前无显著差异。除 1 ~ 2 mm 粒级外，成熟期根际土团聚体全氮含量显著低于非根际土。

总体而言，水稻的生长降低了大团聚体中的全氮含量，对高肥力土壤的影响更为显著。

**2.4 各粒级团聚体对土壤有机碳、全氮含量的贡献**

图 5 A 表明各级团聚体对土壤有机碳含量的贡献率，低肥力土壤中表现为 0.25 ~ 1 mm 最高 (28.0% ~ 38.1%)，> 2 mm 次之 (21.1% ~ 33.7%)，其他粒级差别不明显 (8.9% ~ 19.7%)，大团聚体的有机碳贡献率达到 66.7% ~ 71.8%。高肥力土壤中，0.25 ~ 1 mm (28.5% ~ 39.4%) 和 0.053 ~ 0.25 mm

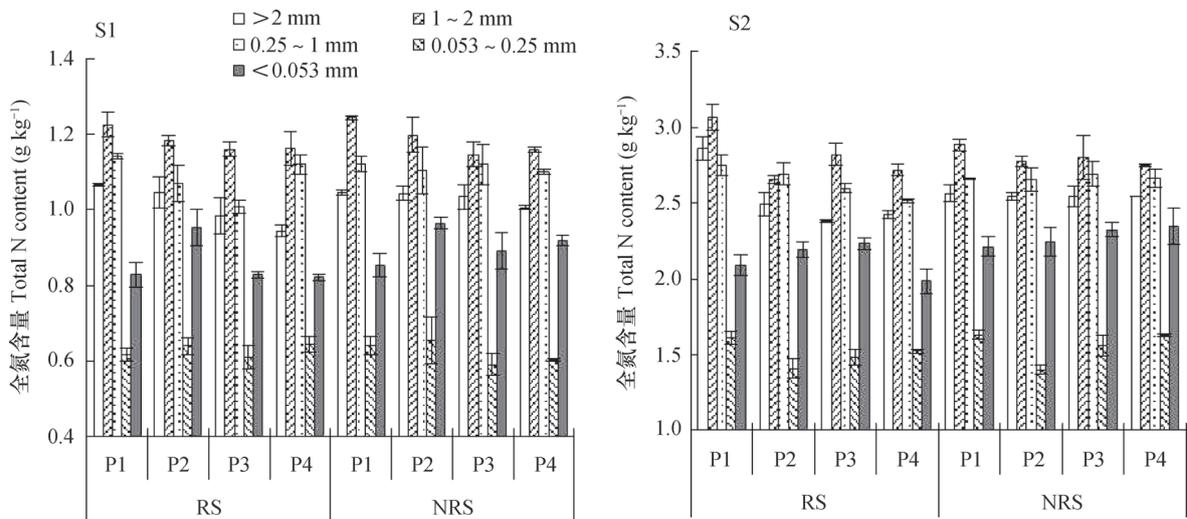


图4 水稻种植期间土壤团聚体中全氮含量变化

Fig. 4 Variation of total nitrogen contents in soil aggregates during the rice cultivation season

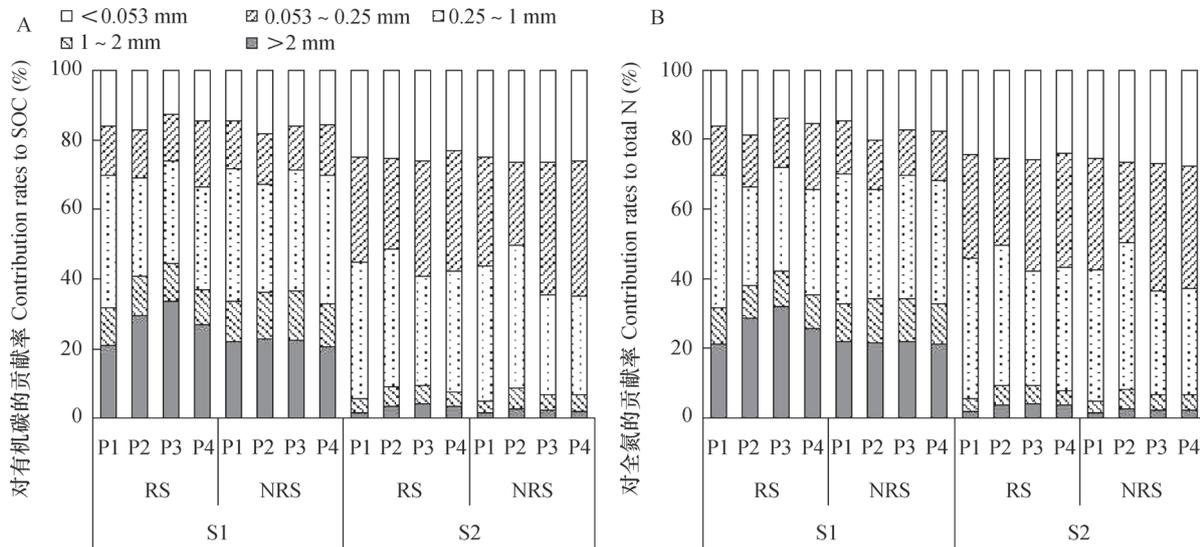


图5 各粒级团聚体对土壤有机碳和全氮的贡献率

Fig. 5 Contribution rate of soil aggregates to organic carbon and total nitrogen in the soil relative to fraction of the aggregates

(23.6 ~ 38.5%) 粒级贡献率较高, 大团聚体的有机碳贡献率为35.2% ~ 49.9%。各粒级团聚体对全氮的贡献率与有机碳规律一致 (图5B), 高肥力和低肥力土壤中大团聚体的全氮贡献率分别为36.6% ~ 50.5%和65.8% ~ 71.9%。

低肥力土壤中, 水稻生育期内根际各粒级团聚体对有机碳和全氮的贡献率有明显的波动, 而非根际土壤中无显著变化, 根际作用影响了有机碳氮在团聚体中的分配。高肥力土壤中, 插秧前和分蘖期0.25 ~ 1 mm粒级对有机碳和全氮的贡献率最大, 而孕穗期和成熟期0.25 ~ 1 mm粒级贡献率显著下降, 0.053 ~ 0.25 mm粒级对有机碳和全氮的贡献率显著增加, 非根际土壤中增加更为明显 ( $p < 0.05$ )。各粒级团聚体对有机碳和全氮的贡献率与土壤团聚体的分布呈极显著正相关, 相关系数 $r$ 分别为0.92和0.86, 团聚体含量是影响其贡献率的主导因子。

### 3 讨论

#### 3.1 不同肥力水平对红壤水稻土团聚体组成和碳氮分布的影响

土壤团聚体是维持土壤质量的重要物质基础, 通常认为有机质是土壤团聚体形成的重要胶结物, 有机碳较高的土壤团聚体更为稳定<sup>[11-12]</sup>。但本研究中高肥力土壤大团聚体含量和稳定性均低于低肥力土壤 (表2 ~ 表4), 分析可能是与红壤水稻土特殊的土壤性质有关。供试土壤母质属于第四纪红

色黏土, 含有较多的胶结力很强的铁铝氧化物。Oades和Waters<sup>[13]</sup>发现, 团聚体等级理论只适用于描述有机质主导团聚体形成与稳定的土壤, 而在氧化物丰富的土壤中, 氧化物替代有机质成为团聚体形成的主要胶结剂。李朝霞等<sup>[14]</sup>对第四纪红黏土发育红壤的研究表明, 当土壤中有机质含量较少且黏粒和氧化铁铝含量较高时, 黏粒的内聚力及铁铝氧化物的胶结作用在维持土壤团聚体的稳定性方面起主导作用。Peng等<sup>[15]</sup>指出倍半氧化物是红壤不同粒级团聚体中主要黏合剂。因此, 在开垦时间较短、有机质含量不高、养分不太丰富的低肥力红壤水稻土中, 铁铝氧化物对大团聚体的形成和稳定起主要作用, 但由此形成的团聚体并不是理想的团粒结构。随着水稻种植年限的延长, 水田土壤熟化程度和肥力水平提高, 土壤中有机胶结物质逐步积累, 铁铝氧化物含量降低, 有机碳成为各粒级团聚体稳定的主要胶结剂<sup>[16]</sup>。Linguist等<sup>[17]</sup>发现土壤开垦后随着黏粒活度的增加和无机胶结物含量的降低, 土壤团聚体的水稳性会逐渐降低, 团聚体有从较大粒径向小粒径转变的趋势。刘晓利和何园球<sup>[18]</sup>也发现荒地土壤开垦后0.053 ~ 0.25 mm的水稳性微团聚体含量升高。因此, 在判断红壤水稻土团粒结构是否良好时, 不仅要关注大团聚体的数量和粒径分配, 还应衡量团聚体的质量和团聚形式。

不同粒径土壤团聚体中有机质的分布是土壤有机质平衡与矿化速率的微观表征。本研究中不同肥力水平的土壤团聚体中有机碳和全氮含量均

表现为1~2 mm粒级最高, 0.25~1 mm和>2 mm粒级次之, 0.053~0.25 mm粒级最低, 这与陈晓芬等<sup>[2]</sup>在鹰潭生态试验站长期定位试验小区中得到的研究结果一致。<0.053 mm 团聚体有机碳含量高于0.053~0.25 mm粒级, 这可能是因为该粒级团聚体黏粒含量较高, 有机碳易吸附到黏土矿物表面形成稳定的复合体<sup>[19]</sup>, 成为土壤有机碳中极稳定的碳库。0.053~0.25 mm粒级可能因为砂粒含量较高, 对有机碳和养分的固持能力较弱。大团聚体中有机碳含量显著高于微团聚体, 这一结果与Six等<sup>[20]</sup>和Mikha等<sup>[21]</sup>研究结果相似, 与团聚体等级发育模型理论<sup>[22]</sup>相吻合, 一方面有机质把微团聚体胶结成大团聚体, 另一方面处于分解状态的植物根系和微生物菌丝可以通过缠绕作用直接形成大团聚体, 并增加其中有机碳的浓度。在低肥力土壤中, 由于大团聚体数量较高, 66.7%~71.8%的有机碳和65.8%~71.9%的全氮分布在大团聚体中。可见在开垦年限较短(<30年)的红壤水稻土中, 大团聚体数量占主导地位, 水稳性大团聚体是有机碳和全氮的主要载体<sup>[2, 5, 23]</sup>。高肥力土壤中, 因大团聚体含量较低, 大团聚体的有机碳和全氮贡献率仅为35.2%~49.9%和36.6%~50.5%, 这与窦森等<sup>[24]</sup>和唐晓红等<sup>[25]</sup>对温带土壤团聚体有机碳分布的认识一致。

### 3.2 水稻生育期对团聚体组成和碳氮分布的影响

水稻种植期间根系的作用、水热条件变化、人为的淹水和干湿交替等, 使土壤结构(团聚体)、有机质和微生物都经历了复杂的变化。研究水稻不同生育期表层土壤团聚体含量及有机碳和全氮的变化, 对揭示人为干扰对土壤结构和有机质的影响具有重要意义。一般从年季的角度看, 土壤团聚体组成相对比较稳定, 但本研究结果显示在一个水稻生长季中团聚体组成有明显的波动(图2)。低肥力土壤中, 除1~2 mm粒级外, 水稻生育期内根际土壤各粒级团聚体含量有显著变化; 取样时期显著影响0.25~1 mm和0.053~0.25 mm粒级含量。高肥力土壤中, 除<0.053 mm粒级外各粒级团聚体含量均有显著变化; 取样时期显著影响>2 mm、1~2 mm和0.25~1 mm粒级含量。陈强等<sup>[26]</sup>也发现不同耕作方式下团聚体分布及稳定性存在季节性差异。水稻成熟期团聚体有机碳含量与插秧前无显著差异, 而分蘖期和孕穗期有明显波动, 说明水稻的种植过程促使土壤中有机碳组分的转化和重新分配。水稻

的生长降低了大团聚体中的全氮含量, 说明大团聚体中的氮更易于水稻吸收, 应考虑适当施用氮肥以维持根际土壤中的氮素平衡。

### 3.3 根际效应对团聚体组成和碳氮分布的影响

根际是植物与微生物活动的重要场所, 水稻生长过程中向根际土壤释放或溢泌大量的根系分泌物, 这些根系分泌物引起了根际土壤物理、化学和生物学性质的变化, 从而直接或间接地影响根际微区土壤的结构<sup>[27]</sup>。本研究结果显示: 低肥力土壤中, 随着水稻生长, 根际土壤>2 mm粒级含量显著高于非根际土壤, 1~2 mm和0.25~1 mm含量显著低于非根际土壤, 说明根系生长促进了1~2 mm和0.25~1 mm团聚体向>2 mm粒级转变。高肥力土壤中, 根际作用主要影响>2 mm粒级团聚体含量。苑亚茹等<sup>[28]</sup>研究发现在大田条件下, 土壤耕作、干湿交替等因子对土壤团聚体的影响掩盖了作物根系及其分泌物的作用。本研究采用双层根袋区分根际与非根际土壤, 可以较好地反映根际效应的变化。

作物—土壤系统中, 作物根系对土壤有机碳的积累和转化具有重要影响。一般认为, 根际的根系分泌物及组织脱落物较多, 在土壤微生物和动物的作用下转化成土壤碳, 从而使根际土壤有机碳含量增加<sup>[29]</sup>。但是在本研究中, 低肥力根际和非根际土壤各粒级团聚体有机碳含量均无显著差异, 高肥力根际土壤成熟期0.053~0.25 mm和<0.053 mm粒级中有机碳含量显著低于非根际土壤。可能是因为根际沉积碳代谢周转快、结构性碳尚未及时形成有机质等, 加上其固定、周转及迁移过程的复杂性和多变性<sup>[30]</sup>, 导致了研究结果的不一致性。氮对植物的生长发育至关重要, 氮素也是植物根系从土壤中吸收最多的元素之一。根系对氮素的吸收导致根际团聚体中全氮含量的降低, 低肥力土壤中>2 mm粒级团聚体全氮含量显著低于非根际土; 高肥力土壤中, 除1~2 mm粒级外, 成熟期根际土团聚体全氮含量显著低于非根际土。与插秧前相比, 低肥力土壤在孕穗期、高肥力土壤在分蘖期全氮含量有较明显的下降, 可考虑针对性地补施氮肥。

## 4 结 论

低肥力红壤水稻土水稳性团聚体组成以大团聚体为主, 高肥力水稻土中以微团聚体为主。低肥力

土壤中团聚体的分布和稳定性主要受水稻根际作用的影响,高肥力土壤受根际作用和取样时期的共同作用,种植水稻有助于提高根际土壤团聚结构的稳定性。水稻成熟期团聚体有机碳含量与插秧前无显著差异,而分蘖期和孕穗期有明显波动。大团聚体中全氮含量随生育期的延长而降低。种植水稻影响了有机碳和全氮在团聚体中的分配。

## 参考文献

- [ 1 ] Paul B K, Vanlauwe B, Ayuke F, et al. Medium-term impact of tillage and residue management on soil aggregate stability, soil carbon and crop productivity. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2013, 164 ( 1 ): 14—22
- [ 2 ] 陈晓芬, 李忠佩, 刘明, 等. 不同施肥处理对红壤水稻土团聚体有机碳、氮分布和微生物生物量的影响. *中国农业科学*, 2013, 46 ( 5 ): 950—960  
Chen X F, Li Z P, Liu M, et al. Effects of different fertilizations on organic carbon and nitrogen contents in water-stable aggregates and microbial biomass content in paddy soil of subtropical China ( In Chinese ). *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46 ( 5 ): 950—960
- [ 3 ] 陈惟财, 王凯荣, 谢小立. 长期不同施肥处理对红壤性水稻土团聚体中碳、氮分布的影响. *土壤通报*, 2009, 40 ( 3 ): 523—528  
Chen W C, Wang K R, Xie X L. Effects on distributions of carbon and nitrogen in a reddish paddy soil under long-term different fertilization treatments ( In Chinese ). *Chinese Journal of Soil Science*, 2009, 40 ( 3 ): 523—528
- [ 4 ] 刘希玉, 王忠强, 张心昱, 等. 施肥对红壤水稻土团聚体分布及其碳氮含量的影响. *生态学报*, 2013, 33 ( 16 ): 4949—4955  
Liu X Y, Wang Z Q, Zhang X Y, et al. Effects of long-term fertilization on aggregate dynamics and organic carbon and total nitrogen contents in a reddish paddy soil ( In Chinese ). *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33 ( 16 ): 4949—4955
- [ 5 ] 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. *中国农业科学*, 2009, 42 ( 7 ): 2415—2424  
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 aggregates of red paddy soil ( In Chinese ). *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 42 ( 7 ): 2415—2424
- [ 6 ] Jones D L, Nguyen C, Finlay R D. Carbon flow in the rhizosphere: Carbon trading at the soil-root interface. *Plant and Soil*, 2009, 321 ( 1 ): 5—33
- [ 7 ] Sokolova T A, Chalova T S, Tolpeshta I I, et al. Specificity of some soil characteristics in the rhizosphere of fir trees in the AEL horizon of podzolic soil. *Moscow University Soil Science Bulletin*, 2015, 70 ( 4 ): 139—146
- [ 8 ] 中国科学院南京土壤研究所土壤物理研究室. 土壤物理性质测定法. 北京: 科学出版社, 1978: 1—88  
Department of Soil Physics, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences. *Methods for determination of soil physical property ( In Chinese )*. Beijing: Science Press, 1978: 1—88
- [ 9 ] Elliott E T. Aggregate structure and carbon, nitrogen and phosphorus in native and cultivated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 1986, 50 ( 3 ): 627—633
- [ 10 ] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2000  
Lu R K. *Analytical methods for soil and agro-chemistry ( In Chinese )*. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000
- [ 11 ] 徐爽, 王益权, 王浩, 等. 不同肥力水平土壤团聚体的稳定性及对氮肥盐溶液的响应. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18 ( 5 ): 1135—1143  
Xu S, Wang Y Q, Wang H, et al. Effects of nitrogen fertilizer solution on stability of soil aggregates under different fertility levels ( In Chinese ). *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2012, 18 ( 5 ): 1135—1143
- [ 12 ] Zhou H, Peng X, Perfect E, et al. Effects of organic and inorganic fertilization on soil aggregation in an Ultisol as characterized by synchrotron based X-ray micro-computed tomography. *Geoderma*, 2013, 195 ( 1 ): 23—30
- [ 13 ] Oades J M, Waters A G. Aggregate hierarchy in soils. *Soil Research*, 1991, 29 ( 6 ): 815—828
- [ 14 ] 李朝霞, 蔡崇法, 史志华, 等. 鄂南第四纪粘土红壤团聚体的稳定性及其稳定机制初探. *水土保持学报*, 2004, 18 ( 4 ): 69—72  
Li Z X, Cai C F, Shi Z H, et al. Aggregate stability and stable mechanism of aggregate derived from quaternary red clay in south of Hubei Province ( In Chinese ). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2004, 18 ( 4 ): 69—72
- [ 15 ] Peng X, Yan X, Zhou H, et al. Assessing the contributions of sesquioxides and soil organic matter to aggregation in an Ultisol under long-term fertilization. *Soil Tillage Research*, 2015, 146: 89—98
- [ 16 ] Zhang Z B, Zhou H, Lin H, et al. Puddling intensity,

- sesquioxides, and soil organic carbon impacts on crack patterns of two paddy soils. *Geoderma*, 2016, 262 (3): 155—164
- [17] Linquist B A, Singleton P W, Yost R S, et al. Aggregate size effects on the sorption and release of phosphorus in an Ultisol. *Soil Science Society of America Journal*, 1997, 61 (1): 160—166
- [18] 刘晓利, 何园球. 不同利用方式和开垦年限下红壤水稳性团聚体及养分变化研究. *土壤*, 2009, 41 (1): 84—89
- Liu X L, He Y Q. Water-stable aggregates and nutrients in red soil under different reclamation years (In Chinese). *Soils*, 2009, 41 (1): 84—89
- [19] 刘满强, 胡锋, 陈小云. 土壤有机碳稳定机制研究进展. *生态学报*, 2007, 27 (6): 2642—2649
- Liu M Q, Hu F, Chen X Y. A review on mechanism of soil organic carbon stabilization (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27 (6): 2642—2649
- [20] Six J, Elliott E T, Paustian K. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: A mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture. *Soil Biology & Biochemistry*, 2000, 32 (14): 2099—2103
- [21] Mikha M M, Rice C W, Milliken G A. Carbon and nitrogen mineralization as affected by drying and wetting cycles. *Soil Biology & Biochemistry*, 2005, 37 (2): 339—347
- [22] Tisdall J M, Oades J M. Organic matter and water-stable aggregates in soils. *Journal of Soil Science*, 1982, 33 (2): 141—163
- [23] 李文军, 杨基峰, 彭保发, 等. 施肥对洞庭湖平原水稻土团聚体特征及其有机碳分布的影响. *中国农业科学*, 2014, 47 (20): 4007—4015
- Li W J, Yang J F, Peng B F, et al. Effects of fertilization on aggregate characteristics and organic carbon distribution in a paddy soil in Dongting Lake Plain of China (In Chinese). *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47 (20): 4007—4015
- [24] 窦森, 李凯, 关松. 土壤团聚体中有机质研究进展. *土壤学报*, 2011, 48 (2): 412—418
- Dou S, Li K, Guan S. A review on organic matter in soil aggregates (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2011, 48 (2): 412—418
- [25] 唐晓红, 邵景安, 黄雪夏, 等. 垄作免耕下紫色水稻土有机碳的分布特征. *土壤学报*, 2007, 44 (2): 235—243
- Tang X H, Shao J A, Huang X X, et al. Distribution of soil organic carbon in purple paddy field under long-term non-tillage ridge culture (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2007, 44 (2): 235—243
- [26] 陈强, Yuriy S K, 陈帅, 等. 不同耕作方式土壤结构季节变化. *土壤通报*, 2015, 46 (1): 184—191
- Chen Q, Yuriy S K, Chen S, et al. Seasonal variations of soil structures under different tillage systems (In Chinese). *Chinese Journal of Soil Science*, 2015, 46 (1): 184—191
- [27] Rillig M C, Wright S F, Eviner V T. The role of arbuscular mycorrhizal fungi and glomalin in soil aggregation: Comparing effects of five plant species. *Plant and Soil*, 2002, 238 (2): 325—333
- [28] 苑亚茹, 韩晓增, 丁雪丽, 等. 不同植物根际土壤团聚体稳定性及其结合碳分布特征. *土壤通报*, 2012, 43 (2): 320—324
- Yuan Y R, Han X Z, Ding X L, et al. Distribution of aggregate-associated organic carbon and aggregate stability in rhizosphere of different plants (In Chinese). *Chinese Journal of Soil Science*, 2012, 43 (2): 320—324
- [29] 蒲琴, 胡玉福, 李亨伟, 等. 高寒草地2种固沙灌木根际土壤碳氮特征. *水土保持学报*, 2016, 30 (2): 272—276, 282
- Pu Q, Hu Y F, Li H W, et al. Characteristics of organic carbon and nitrogen in rhizosphere soil under 2 sand-fixation shrub of alpine desertified grassland (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 30 (2): 272—276, 282
- [30] 祝贞科, 沈冰洁, 葛体达, 等. 农田作物同化碳输入与周转的生物地球化学过程. *生态学报*, 2016, 36 (19): 5987—5997
- Zhu Z K, Shen B J, Ge T D, et al. Biogeochemical processes underlying the input and turnover of crop assimilative carbon in farmland and ecosystems (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36 (19): 5987—5997

## Dynamics of Aggregates Composition and C, N Distribution in Rhizosphere of Rice Plants in Red Paddy Soils Different in Soil Fertility

JIANG Chunyu<sup>1</sup> LIU Ping<sup>1, 2</sup> LIU Ming<sup>1</sup> WU Meng<sup>1</sup> LI Zhongpei<sup>1†</sup>

(<sup>1</sup> State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

(<sup>2</sup> University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract** 【Objective】 Soil aggregates are an essential material foundation of soil structure and an important carrier of soil nutrients. Rhizosphere is the most active region of matter and energy exchanging between crop and soil, and it differs from the bulk soil in many of physical and chemical conditions and biochemical processes, thereby influencing soil aggregation. A number of studies have been reported paying attention mostly to effects of organic manure application, tillage management and some other regulatory measures on soil aggregates during fallow seasons, rather than to differences of rhizospheric soil from bulk soil in dynamic variation of soil aggregate composition during the rice growing seasons. It is of great significance to study changes in volume of soil aggregates and contents of organic carbon and nitrogen therein in the rhizospheric and non-rhizospheric soils during the rice growing season to revelation of impacts of artificial cultivation on the changes and in-depth understanding of interactions between plant and soil and variation of soil quality. 【Method】 A field rhizo-bag experiment using two types of red paddy soils different in fertility was conducted in the Yingtan National Field Observation and Research Station of Farmland Ecosystem, Jiangxi Province, China. The soils were collected from the topsoil layers (0 ~ 15 cm) of two typical paddy fields near the station in March 2012. Two-layered root bags were used to separate rhizosphere from non-rhizosphere and bulk soil. During the experiment, root bags and the soils around were collected before rice transplanting and at the tillering, booting and maturing stages of rice, separately. The rhizosphere and non-rhizosphere soils were saved individually and separated into five aggregate-size fractions (> 2 mm, 1 ~ 2 mm, 0.25 ~ 1 mm, 0.053 ~ 0.25 mm and < 0.053 mm) using the wet sieving method. Mass fraction, percentage of aggregate destruction (PAD) and mean weight diameter (MWD) of water-stable macro-aggregates were calculated to determine stability of the aggregates. Organic carbon and total nitrogen in the aggregates were measured. 【Result】 Results show that the aggregates in the low fertility soil were dominated mainly with the fraction of > 0.25 mm macro-aggregates (56.2% ~ 64.0%), and the amounts of 0.25 ~ 1 mm size was the highest. Except for the aggregates 1 ~ 2 mm in size, all the fractions of aggregates in the rhizosphere soil changed significantly in content during the rice growing season. Sampling time and interactions between sampling time and rhizospheric effect remarkably affected the amounts of the fractions of 0.25 ~ 1 mm and 0.053 ~ 0.25 mm. In the high fertility soil, < 0.25 mm micro-aggregates accounted for 59.8% ~ 72.0% of the total soil aggregates, and the 0.053 ~ 0.25 mm fraction made up the largest proportion. Sampling time affected the content of > 0.25 mm macro-aggregates the most, while interactions between rhizospheric effect and sampling time did the content of > 2 mm fraction the most. Compared with non-rhizospheric soils, rhizospheric soils were low in PAD, but high in MWD, which indicates that rice cultivation helps improve stability of rhizosphere soil. Contents of organic carbon (SOC) and total nitrogen (TN) were the highest in the 1 ~ 2 mm fraction of aggregates and the lowest in the 0.053 ~ 0.25 mm fraction, and obviously much higher in macro-

aggregates than in micro-aggregates. The SOC content in rhizosphere aggregates during the crop maturing period did not have much difference from that before rice transplanting. But SOC contents in rhizosphere aggregates did fluctuate significantly during the tillering and booting stages of rice. The SOC content in the 0.053 ~ 0.25 mm fraction was significantly influenced by sampling time. In the low fertility soil, there was no significant difference in aggregate-associated SOC contents between rhizosphere and non-rhizosphere soils. But in the high fertility soil, SOC contents in the > 2 mm fraction at the tillering stage, in the 1 ~ 2 mm fraction at the booting stage and in the 0.053 ~ 0.25 mm fraction and < 0.053 mm fraction at the maturing stage were significantly lower in the rhizospheric soil than in the non-rhizospheric soil. The growth of rice decreased the content of TN in macro-aggregates. The effect of rice growth was more significant in the high fertility soil. **【Conclusion】** In the low fertility soil, rhizospheric effect affects mainly the composition and stability of aggregates, while sampling time does contents of SOC and TN in aggregates. In the high fertility soil, composition of aggregates and distribution of SOC and TN vary under the joint impact of rhizospheric effect and sampling time.

**Key words** Red paddy soil; Aggregate; Growth period; Soil organic carbon; Total nitrogen

(责任编辑：陈荣府)