

DOI: 10.11766/trxb201806200338

# 旱地转变为稻田对关键带红壤剖面土壤团聚体 碳含量的影响\*

刘真勇 高 振 王艳玲<sup>†</sup> 姚 怡

(南京信息工程大学应用气象学院生态气象环境研究中心, 南京 210044)

**摘 要** 在红壤关键带江西鹰潭孙家小流域观测站选取花生旱地、新稻田(< 30 a)及老稻田(> 200 a) 3 个典型剖面(0~120 cm), 按照 30 cm 的土层间隔自下而上地采集剖面样品, 采用湿筛法逐级提取了粒级为 > 250  $\mu\text{m}$ 、250~53  $\mu\text{m}$  及 < 53  $\mu\text{m}$  团聚体的样本, 分析各粒级团聚体的全碳含量及其对土壤全碳贡献率的变化, 探讨铁铝氧化物与团聚体碳含量的相关关系。结果表明: 红壤关键带的花生旱地和新、老稻田剖面土壤中 250~53  $\mu\text{m}$  团聚体所占比例高达 41.9%~58.2%; 花生旱地向新、老稻田转换的过程中, 剖面土壤 > 250  $\mu\text{m}$  团聚体的比例呈现出“低-高-低”的变化趋势, 250~53  $\mu\text{m}$  团聚体的比例呈现出“高-低-低”的变化趋势, 而 < 53  $\mu\text{m}$  团聚体的比例呈现出“低-低-高”的变化趋势; 从旱地转为稻田, 尤其是长期的水耕熟化作用会使各土层土壤及大小粒级团聚体的全碳含量显著增加, 且无定形氧化铁的形成对红壤旱地和老稻田的全碳含量有重要影响; 三个剖面的土壤全碳含量均随着剖面呈现出先快速降低, 后趋于平稳的变化规律, 但较深土层中 < 53  $\mu\text{m}$  团聚体对老稻田新增加的全碳贡献最大。

**关键词** 红壤关键带; 花生旱地; 稻田; 团聚体; 全碳

**中图分类号** S152.4; S153.3 **文献标识码** A

碳循环是影响全球气候变化的重要过程, 而土壤碳库的存储数量与质量是影响碳循环的重要环节<sup>[1]</sup>。土壤作为陆地碳库的重要组成部分, 包含的碳是影响土壤质量与功能的核心要素<sup>[2]</sup>, 它在促进土粒结构形成、增强团粒凝聚性方面有重要作用<sup>[3]</sup>, 而其分解和积累的过程直接影响着全球的碳平衡<sup>[4]</sup>。土壤团聚体是土壤结构的基本单元, 其形成过程也是土壤固碳的重要机制, 对提高土壤肥力以及调节养分均有重要作用<sup>[5-6]</sup>。花生旱地和水稻田是红壤关键带主要的两种种植模式, 了解其全碳稳定机制和矿化规律有助于土地的可持续利用。有研究表明, 在水耕条件下, 土壤全碳的积累过程大致可分为快速增长和趋于稳定两个阶段, 水耕利用的前

30 年土壤全碳快速增长, 水耕利用 80 年后增长趋于稳定<sup>[7]</sup>。还有学者认为, 稻田土壤较旱地土壤更具固碳潜力, 但对于稻田土壤固碳机制的认识并不深入, 现有的大部分资料主要是针对旱地和稻田的总体碳库进行比较, 而对旱地和稻田剖面土壤各粒级团聚体的全碳研究较少<sup>[8-9]</sup>。由于土壤深层剖面空间巨大, 对于碳的固定潜力较高, 这也意味着土壤全碳的垂直迁移过程具有重要意义<sup>[10]</sup>。而土壤团聚体的形成、稳定和性质均与不同形态的铁铝氧化物有关, 它们在有机无机复合过程中起到了连接作用<sup>[11]</sup>, 但铁铝氧化物在旱地转为稻田后对团聚体碳产生怎样影响的相关报道较少。在此基础上, 将其与地球“关键带”这种岩石、土壤、水、空气以及

\* 国家自然科学基金项目(41571130053, 41571286)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 41571130053, 41571286)

<sup>†</sup> 通讯作者 Corresponding author: E-mail: ylwang@nuist.edu.cn

作者简介: 刘真勇(1994—), 男, 江苏南京人, 硕士研究生, 主要从事土壤生态学研究。E-mail: 765842013@qq.com

收稿日期: 2018-06-20; 收到修改稿日期: 2018-08-19; 优先数字出版日期(www.cnki.net): 2018-11-26

生物相互作用、发生物质和能量交换高度异质性的地表环境相联系<sup>[12]</sup>，可以为红壤区生态系统的整合认知与调控管理提供很好的平台。

因此，本文在红壤关键带江西鹰潭孙家小流域观测站选取了花生旱地、新稻田及老稻田三个典型剖面，重点研究红壤花生旱地转为稻田与长期植稻过程中剖面土壤大小团聚体的粒级分布及其对全碳固存与分布的影响，探讨大小团聚体碳含量对土壤全碳的贡献率差异及其与铁铝氧化物的相关关系，来更好地理解与分析关键带红壤旱地与稻田剖面土壤的固碳特征与固存机制，以期为红壤关键带土壤全碳的管理提供基础数据，为红壤区土壤资源的可持续利用提供合理化建议与科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 样品采集

2016 年 11 月，在江西省鹰潭市余江县孙家小流域的红壤关键带观测站（N28°13.7'—28°14.1'，E116°54.2'—116°54.5'）选取花生旱地（PU）、新稻田（NP，<30a）、老稻田（OP，>200a）3 个典型剖面，按照 30 cm 的土层间隔自下而上地采集剖面样品，采样深度为 120 cm，每个土层采集 6 个重复样品。将土壤样品带回室内，除去小石块、植物残体以及动物遗体，在其自然风干时沿土壤自然结构轻轻剥成直径 10 mm 左右的小土块，风干后，保存备用。各土壤剖面的土层划分及其理化性质见表 1。

表 1 红壤关键带剖面土壤基本理化性质

Table 1 Physicochemical properties of the soil profiles at the Red Soil Critical Zone

利用方式 Land use	剖面深度 Profile depth	pH	有机质 OM	全氮 TN	全磷 TP	游离氧化铁 <i>f</i> -Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	游离氧化铝 <i>f</i> -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	无定形氧化铁 <i>a</i> -Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	无定形氧化铝 <i>a</i> -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
	/cm								
PU	0~30	3.69Cc	6.03Ab	1.01Ab	0.22Ab	84.5Aa	23.5Aa	2.24Ab	3.58Ab
	30~60	3.71Bc	3.24Bc	0.92Ab	0.16Bc	68.6Aa	17.0Ba	1.60Bb	3.24Ab
	60~90	3.78Ac	2.73Bc	0.94Aa	0.16Bc	78.3Aa	17.7ABa	1.48Bc	3.19Ab
	90~120	3.77Ac	2.44Bc	0.91Ab	0.16Bc	70.6Ab	13.9Bb	1.26Bc	3.10Ac
NP	0~30	4.31Aa	14.2Ab	1.36Ab	0.36Ab	46.4Ab	16.6Ab	4.84Ba	4.40Ca
	30~60	4.27Ab	4.41Bb	1.08Ba	0.24Bb	47.8Ab	19.2Aa	2.73Ca	5.11Ca
	60~90	4.25Ab	4.01Bb	1.04Ba	0.26Bb	42.7Ab	15.9Aa	4.26Ba	5.98Ba
	90~120	4.18Bb	5.39Bb	1.13Ba	0.27Bb	46.1Ab	18.8Ab	7.41Aa	7.99Aa
OP	0~30	4.06Db	36.6Aa	2.69Aa	0.55Aa	23.4Cc	10.9Bc	3.68Aab	3.09Bb
	30~60	4.51Ca	7.98Ba	1.01Bab	0.28Ba	50.5BCb	13.3Ba	2.00Bb	2.12Cc
	60~90	4.63Ba	9.15Ba	1.06Ba	0.33Ba	67.9Ba	23.6Ba	2.42Bb	2.64BCc
	90~120	4.78Aa	9.38Ba	1.08Ba	0.59Aa	156Aa	60.5Aa	2.05Bb	4.08Ab

注：1) PU, 花生旱地; NP, 新稻田; OP, 老稻田。下同。2) 大写字母不同表示相同剖面不同土层间差异显著 ( $P < 0.05$ )，小写字母不同表示相同土层不同剖面间差异显著 ( $P < 0.05$ )。Note: 1) PU, Peanut upland; NP, New paddy; OP, Old paddy. The same below. 2) Different uppercase letters indicate significant difference at 0.05 level between soils in different soil layers of the same soil profile, and different lowercase letters indicate significant difference at 0.05 level between soils the same in soil depth but different in soil profile

### 1.2 土壤团聚体样本的制备

采用湿筛法将土壤分成 3 个粒级<sup>[13]</sup>，即称取 20 g 风干土壤样品放入自上而下筛孔直径为 250 μm 和 53 μm 的套筛上，加去离子水使其没过土样 2 cm，静置 10 min 后，开启 DX-100 团聚体分析仪开关，30 次·min<sup>-1</sup> 筛分 30 min 后用去离子水由上至下冲洗

套筛上的土壤颗粒于已称重的铝盒中，放入 60℃ 烘箱中烘干称重，以此得到粒级为 > 250 μm 和 250~53 μm 团聚体的样本。将 <53 μm 的土壤溶液洗入烧杯中静置，待土壤样品沉淀，去除上清液，然后将 <53 μm 的土样用去离子水洗入已称重的铝盒中，在 60℃ 烘箱中烘干称重，得到 <53 μm 的团聚体样本。

### 1.3 土壤样品分析

游离态氧化铁 ( $f\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ) 和游离态氧化铝 ( $f\text{-Al}_2\text{O}_3$ ) 采用 DCB (连二亚硫酸钠-柠檬酸钠-重碳酸氢钠) 法提取。无定形氧化铁 ( $a\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ) 和无定形氧化铝 ( $a\text{-Al}_2\text{O}_3$ ) 采用酸性草酸铵缓冲液 (pH=3.17) 提取。提取液中的铁铝浓度采用电感耦合等离子光谱发生仪 (Inductive Coupled Plasma Emission Spectromete, 简称 ICP 仪) 测定。具体操作方法详见文献[14]。

土壤全碳利用元素分析仪 (Vario EL cube) 进行测定。团聚体对土壤全碳的贡献率 (%) = [某粒级全碳含量 ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) × 该粒级团聚体比例 (%) ] × 100 / [土壤全碳含量 ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) ]。

### 1.4 数据处理

数据使用 Excel 2007 整合计算, 统计分析采用 IBM SPSS Statistics 22 软件, 绘图采用 OriginPro 8.5 软件。

## 2 结果

### 2.1 旱地转为稻田对红壤剖面团聚体粒级组成的影响

花生旱地、新稻田与老稻田剖面土壤中 53~250  $\mu\text{m}$  微团聚体所占比例依次为 58.2%±3.38%、41.9%±5.44%和 47.4%±3.85%, 在三个粒级团聚体中占主导地位 (表 2)。从花生旱地向新、老稻田转换的过程中, 新稻田剖面土壤中 > 250  $\mu\text{m}$  团聚体的比例显著增加了 56%~166%, 而老稻田则较新稻田显著降低了 15%~70%; 53~250  $\mu\text{m}$  团聚体的比例表现为新稻田较花生旱地显著降低了 19%~39%, 而老稻田相较于新稻田无明显变化; 花生旱地与新稻田剖面土壤中 < 53  $\mu\text{m}$  团聚体的比例无显著差异, 而老稻田则较新稻田显著增加了 47%~168% (表 2)。可见随着淹水植稻时间的增加, 剖面土壤中 >250  $\mu\text{m}$  的大团聚体比例会先增大再减少, 53~250  $\mu\text{m}$  的微

表 2 旱地转为稻田对剖面红壤团聚体粒级组成的影响

Table 2 Effect of the conversion of upland peanut field into paddy field on particle size composition of soil aggregates in red soil profile

利用方式 Land use	剖面深度 Profile depth /cm	土壤团聚体组成 Particle size composition of soil aggregates /%		
		> 250 $\mu\text{m}$	53~250 $\mu\text{m}$	< 53 $\mu\text{m}$
PU		19.4Bb	60.7Aa	20.0Bb
NP	0~30	35.6Ab	49.0Ba	15.4Cc
OP		30.1ABb	44.3Ba	25.7Ab
PU		18.7Bb	61.1Aa	20.2Bb
NP	30~60	49.8Aa	37.0Cb	13.2Cc
OP		15.1Bc	49.6Ba	35.3Ab
PU		26.5Bb	57.2Aa	16.3Bc
NP	60~90	41.4Aa	43.2Ba	15.4Bb
OP		15.1Cc	51.7Aa	33.2Ab
PU		29.7Bb	53.9Aa	16.4Bc
NP	90~120	46.7Aa	38.4Cb	14.9Bc
OP		34.0Bb	44.1Ba	22.0Ac
PU		23.6±5.40Bb	58.2±3.38Aa	18.2±2.15Bb
NP	全剖面 Soil profile	43.4±6.26Aa	41.9±5.44Ba	14.7±1.07Bb
OP		23.6±9.91Bb	47.4±3.85Ba	29.0±6.27Ab

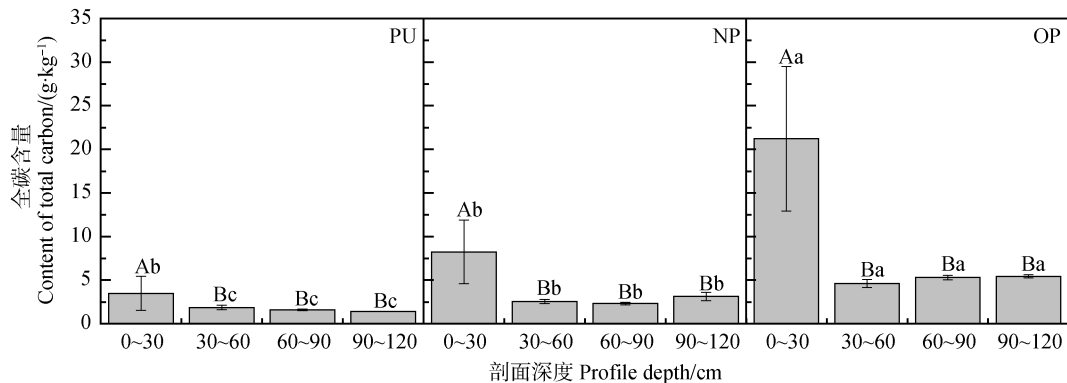
注: 大写字母不同表示不同剖面相同粒级间差异显著 ( $P<0.05$ ), 小写字母不同表示不同粒级相同剖面间差异显著 ( $P<0.05$ ) Note: Different uppercase letters indicate significant difference at 0.05 level between soil aggregates in different soil profiles of the same particle size, and different lowercase letters indicate significant difference at 0.05 level between soil aggregates in different particle size of the same soil profiles

团聚体比例则先减小，之后无明显变化，而 $< 53 \mu\text{m}$ 的团聚体比例只有在长期淹水之后才会显著增加。

与花生旱地相比，短期植稻（如新稻田）的剖面土壤中 $> 250 \mu\text{m}$ 大团聚体的比例在 $0\sim 120 \text{cm}$ 四个土层中均显著增加， $53\sim 250 \mu\text{m}$ 微团聚体的比例则显著降低，而 $< 53 \mu\text{m}$ 团聚体的比例在 $0\sim 30 \text{cm}$ 和 $30\sim 60 \text{cm}$ 两个土层显著降低，但 $60\sim 90 \text{cm}$ 和 $90\sim 120 \text{cm}$ 两个土层无明显变化，可见初期淹水植稻所增加的大团聚体来源于剖面的每个土层。与短期植稻相比，长期植稻（如老稻田）后的剖面土壤中 $>250 \mu\text{m}$ 大团聚体比例在四个土层中均显著降低； $53\sim 250 \mu\text{m}$ 微团聚体的比例则在 $0\sim 30 \text{cm}$ 的土层无明显变化，往下三个土层中均显著增加，而 $<53 \mu\text{m}$ 团聚体的比例则在整个剖面中增加显著。

## 2.2 旱地转为稻田下红壤全碳含量的垂直变化

红壤关键带的花生旱地与新、老稻田剖面土壤全碳含量均呈现出随着土层深度的加深先快速降低，然后趋于平稳的趋势（图 1）。剖面全碳平均含量的大小依次为：老稻田（ $9.2 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ） $>$ 新稻田（ $4.1 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ） $>$ 旱地（ $2.1 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ）；三个剖面土壤中 $0\sim 30 \text{cm}$ 土层的全碳含量均显著高于下面三个土层，且 $30\sim 120 \text{cm}$ 间三个土层的土壤全碳含量无显著差异。由图 1 可以看出，在花生旱地转换成新稻田及老稻田的过程中， $30\sim 60 \text{cm}$ 、 $60\sim 90 \text{cm}$ 和 $90\sim 120 \text{cm}$ 三个土层的土壤全碳含量均会随着淹水植稻时间的增加而显著增高；只有在 $0\sim 30 \text{cm}$ 的土层中，花生旱地与新稻田的土壤全碳含量无明显变化，但发育成老稻田后则显著增高。



注：误差线为标准差。大写字母不同表示相同剖面不同土层间差异显著（ $P < 0.05$ ），小写字母不同表示相同土层不同剖面间差异显著（ $P < 0.05$ ）  
 Note: The error bar represents the standard deviation. Different uppercase letters indicate significant difference at 0.05 level between soil layers in the same soil profile, and different lowercase letters indicate significant difference at 0.05 level between soil layers the same in depth, but different in soil profile

图 1 花生旱地与新、老稻田不同土层的全碳含量

Fig. 1 Contents of soil total carbon in the soil of the upland peanut field, new paddy field and old paddy field relative to soil layer

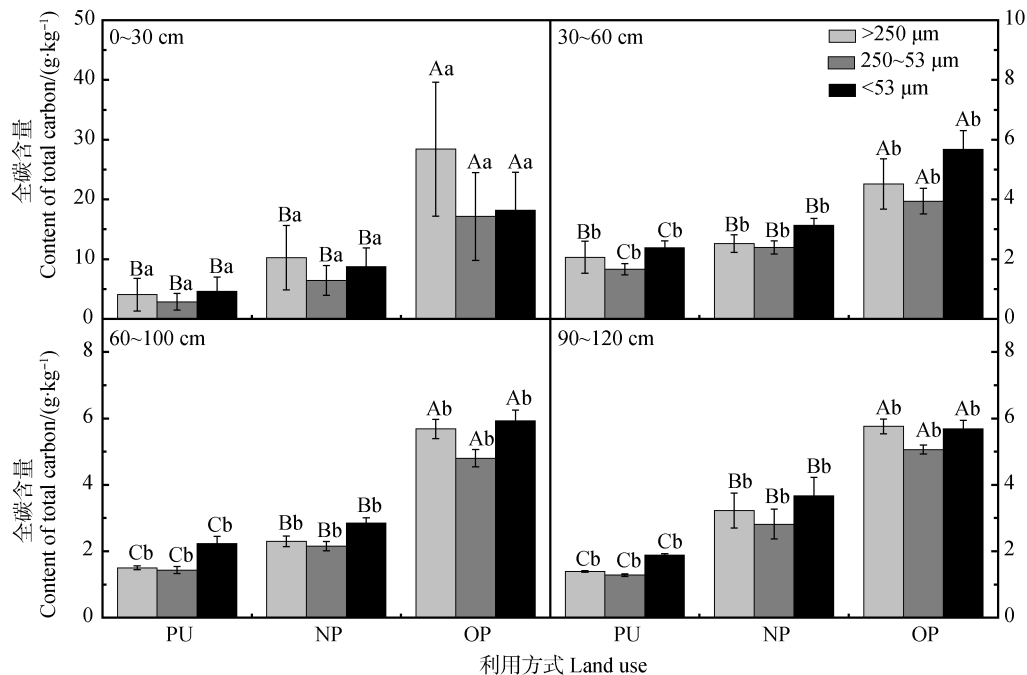
## 2.3 旱地转为稻田对红壤剖面各粒级团聚体全碳含量的影响

与花生旱地相比，短期植稻后 $0\sim 30 \text{cm}$ 土层中各粒级团聚体碳含量均无显著变化，而长期植稻的土壤则增加显著（图 2）。短期植稻对 $30\sim 60 \text{cm}$ 土层中 $> 250 \mu\text{m}$ 大团聚体的全碳含量无显著影响，但在长期植稻成为老稻田后，该粒级团聚体全碳含量则会显著增加； $53\sim 250 \mu\text{m}$ 和 $< 53 \mu\text{m}$ 团聚体的全碳含量则会随着淹水植稻时间的增加显著增加。而在 $60\sim 90 \text{cm}$ 和 $90\sim 120 \text{cm}$ 的土层中， $> 250 \mu\text{m}$ 、 $250\sim 53 \mu\text{m}$ 和 $<53 \mu\text{m}$ 三个粒级团聚体的全碳含量

都会随着淹水植稻时间的增加而显著增大，即各粒级全碳含量大小依次为老稻田 $>$ 新稻田 $>$ 旱地。

## 2.4 旱地转为稻田下红壤剖面团聚体全碳贡献率的变化

由表 3 可以看出，花生旱地剖面土壤中 $53\sim 250 \mu\text{m}$ 微团聚体对土壤全碳的贡献率高达 $51.6\% \pm 2.20\%$ ，显著高于 $> 250 \mu\text{m}$ 和 $< 53 \mu\text{m}$ 粒级团聚体；新稻田剖面土壤中各粒级团聚体对土壤全碳的贡献率大小依次为： $> 250 \mu\text{m}$ 粒级、 $53\sim 250 \mu\text{m}$ 粒级、 $< 53 \mu\text{m}$ 粒级，且各粒级间差异显著；而老稻田剖面土壤中各粒级团聚体对土壤全碳的贡献率无显著差



注：大写字母不同表示相同粒级相同土层不同剖面的差异显著 ( $P < 0.05$ )，小写字母不同表示在相同粒级相同剖面不同土层中的团聚体间差异显著 ( $P < 0.05$ )。Note: Different uppercase letters indicate significant difference at 0.05 level between soil aggregates the same in particle size and soil depth but different in soil profile, and different lowercase letters indicate significant difference at 0.05 level between soil aggregates the same in particle size in the same soil profile but in different soil layers

图 2 花生旱地转为稻田下不同粒级团聚体全碳含量的剖面分布

Fig. 2 Distribution of total carbon content in soil aggregates relative to particle size in the land after conversion from upland to paddy

异。从花生旱地向新、老稻田转换的过程中，新稻田土壤中  $> 250 \mu\text{m}$  团聚体对土壤全碳的贡献率显著增加了 63%~145%，而老稻田则较新稻田显著降低了 6%~71% (表 3)；新稻田土壤中  $53 \sim 250 \mu\text{m}$  团聚体的全碳贡献率显著降低了 22%~36%，而老稻田相较于新稻田无明显变化；新稻田土壤中  $< 53 \mu\text{m}$  团聚体的全碳贡献率无显著变化，而老稻田则较新稻田显著增加了 31%~168%。可见随着淹水植稻时间的增加，三个粒级团聚体对土壤全碳贡献率的整体变化趋势与土壤团聚体的组成基本一致，但三个粒级团聚体的全碳贡献率会因为各粒级团聚体含碳量的不同而与剖面土壤的团聚体组成产生较大差异。

短期植稻可以显著增加剖面土壤中  $> 250 \mu\text{m}$  大团聚体在 0~120cm 间四个土层中的全碳贡献率，而显著降低  $53 \sim 250 \mu\text{m}$  和  $< 53 \mu\text{m}$  团聚体的全碳贡献率，即短期淹水植稻大团聚体全碳贡献率的增加来源于剖面的每个土层。与新稻田相比，长期植稻后 0~30 cm 土层中  $> 250 \mu\text{m}$  团聚体的全碳贡献率无明显变化，而其他土层则显著降低；0~30 cm 土

层中  $53 \sim 250 \mu\text{m}$  和  $< 53 \mu\text{m}$  团聚体的全碳贡献率虽无明显变化，但在其他土层中则显著增加。

### 2.5 旱地转为稻田下红壤剖面团聚体全碳含量与土壤铁铝氧化物的相关性

相关分析表明 (表 4)，花生旱地中各粒级团聚体碳含量均与无定形氧化铁含量呈极显著正相关关系 ( $P < 0.01$ )，即随着土壤中无定形氧化铁含量的增加，土壤中各粒级团聚体的全碳含量也随之增大 (表 4)。短期淹水的新稻田土壤中各粒级团聚体的全碳含量与游离态及无定形铁铝氧化物均无显著相关关系；而长期淹水的老稻田土壤中各粒级团聚体全碳含量与无定形氧化铁呈极显著正相关关系 ( $P < 0.01$ )，而与游离氧化铁、游离氧化铝及无定形氧化铝均无显著相关关系。

## 3 讨论

稻田是经过人为淹水种稻、且水耕熟化作用明显的一种特殊土壤类型，土壤利用年限和人为管理

表 3 不同粒级团聚体碳对土壤全碳的贡献率

Table 3 Contributions of fractions of soil aggregates to soil total carbon

利用方式 Land use	剖面深度 Profile depth/cm	贡献率 Contribution rate /%		
		> 250 $\mu\text{m}$	250~53 $\mu\text{m}$	< 53 $\mu\text{m}$
PU		21.9Bb	51.3Aa	26.8Ab
NP	0~30	43.0Aa	39.8Ba	17.1Bb
OP		40.6Aa	35.5Bab	23.9ABb
PU		20.1Bc	54.2Aa	25.7Bb
NP	30~60	49.2Aa	34.7Cb	16.2Cc
OP		14.4Cb	42.3Ba	43.3Aa
PU		25.2Bb	51.9Aa	23.0Bb
NP	60~90	41.0Aa	40.1Ba	18.9Cb
OP		16.1Cc	46.8ABa	37.1Ab
PU		29.3Cb	48.9Aa	21.9Ab
NP	90~120	47.9Aa	34.5Cb	17.5Bc
OP		36.0Ba	41.1Ba	22.9Ab
PU	全剖面	24.1 $\pm$ 4.04Bb	51.6 $\pm$ 2.20Aa	24.3 $\pm$ 2.28ABb
NP	Soil profile	45.3 $\pm$ 3.90Aa	37.3 $\pm$ 3.10Bb	17.4 $\pm$ 1.14Bc
OP		26.8 $\pm$ 13.4Ba	41.4 $\pm$ 4.64Ba	31.8 $\pm$ 10.0Aa

注：大写字母不同表示不同剖面相同粒级间差异显著 ( $P<0.05$ )，小写字母不同表示不同粒级相同剖面间差异显著 ( $P<0.05$ )

Note: Different uppercase letters indicate significant difference at 0.05 level between soil aggregates in different soil profiles of the same particle size, and different lowercase letters indicate significant difference at 0.05 level between soil aggregates in different particle size of the same soil profiles

表 4 剖面红壤各粒级团聚体全碳含量与铁铝氧化物的相关系数

Table 4 Correlation coefficients of content of total carbon in soil aggregates with Fe-Al oxides in the soil profile relative to particle size fraction

利用方式 Land use	粒级大小 Particle size/ $\mu\text{m}$	游离氧化铁 $f\text{-Fe}_2\text{O}_3/(\text{g}\cdot\text{kg}^{-1})$	游离氧化铝 $f\text{-Al}_2\text{O}_3/(\text{g}\cdot\text{kg}^{-1})$	无定形氧化铁 $a\text{-Fe}_2\text{O}_3/(\text{g}\cdot\text{kg}^{-1})$	无定形氧化铝 $a\text{-Al}_2\text{O}_3/(\text{g}\cdot\text{kg}^{-1})$
PU	> 250	0.03	0.30	0.87**	0.37
	250~53	0.05	0.34	0.89**	0.39
	< 53	0.07	0.34	0.88**	0.39
NP	> 250	0.12	0.05	0.27	-0.40
	250~53	0.17	0.05	0.24	-0.40
	< 53	0.18	0.04	0.25	-0.43*
OP	> 250	-0.45*	-0.33	0.68**	0.24
	250~53	-0.40	-0.28	0.61**	0.27
	< 53	-0.46*	-0.35	0.65**	0.21

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: \* means the correlation is significant at the 0.05 level;

\*\* means the correlation is significant at the 0.01 level

措施的差异会造成稻田土壤团聚体组成和肥力性状的显著变化<sup>[15]</sup>。本研究发现,相较于花生旱地,短期植稻(< 30 a)会使剖面土壤中> 250  $\mu\text{m}$ 大团聚体的比例显著增加,53~250  $\mu\text{m}$ 微团聚体的比例显著降低,而< 53  $\mu\text{m}$ 团聚体比例则无明显变化;相较于短期植稻,长期植稻(> 200 a)的剖面土壤中> 250  $\mu\text{m}$ 大团聚体的比例却显著降低了15%~70%,53~250  $\mu\text{m}$ 微团聚体的比例则无明显变化,而< 53  $\mu\text{m}$ 团聚体比例显著增加了47%~168%(表2)。花生旱地与新、老稻田剖面土壤中均是53~250  $\mu\text{m}$ 微团聚体占主导地位,且花生旱地和老稻田剖面土壤中53~250  $\mu\text{m}$ 团聚体的比例显著高于其他两个粒级,而新稻田剖面土壤中> 250  $\mu\text{m}$ 和53~250  $\mu\text{m}$ 团聚体的比例差异不显著(表2),这可能是因为大团聚体对外部因素反应敏感,更新速率快<sup>[16]</sup>,短期植稻的新稻田水耕熟化作用强,有机质增加迅速,促进了> 250  $\mu\text{m}$ 团聚体的形成<sup>[17]</sup>,而53~250  $\mu\text{m}$ 微团聚体的稳定性则会比较高。有研究表明,多糖类物质和松结态有机质是大粒级微团聚体形成的主要原因,而黏粒和紧结态有机质则会影响到小粒级微团聚体的形成<sup>[18]</sup>;不同胶结物质的作用程度也会因为团聚体粒级的不同而存在差异<sup>[19]</sup>。从旱地发育成新、老稻田,每个土层中> 250  $\mu\text{m}$ 大团聚体的比例均会先增加、后降低;而250~53  $\mu\text{m}$ 微团聚体的比例则会在短期淹水植稻后就显著降低,< 53  $\mu\text{m}$ 粉黏粒团聚体则是在长期淹水植稻后才有显著增加(表2)。这是由于大团聚体的稳定性在很大程度上取决于植物根系和菌丝,它们作为有机胶结物质对土壤大团聚体的形成具有明显地促进作用,而土壤微团聚体的稳定受植物和微生物产生多糖类物质的影响<sup>[20]</sup>。由此可以说明旱地经过长期淹水作用的影响,剖面土壤中< 53  $\mu\text{m}$ 团聚体和紧结态有机质增多,导致在形成老稻田后剖面土壤中< 53  $\mu\text{m}$ 团聚体的比例得到显著增加。

红壤花生旱地转换为稻田可以显著增加土壤全碳含量(图1)。在水耕利用条件下,人为管理程度较高,肥料的不断施入及大量作物残体的归还,会使形成的土壤有机物质量增大,而稻田这种特殊的厌氧环境,就会使土壤全碳在水耕熟化的过程中慢慢增加<sup>[21-22]</sup>。本研究中的花生旱地、新稻田与老稻田三个剖面土壤的全碳含量均随着土层深度的加深先快速降低,然后趋于平稳(图1),这符合土壤全

碳的剖面变化规律<sup>[23-25]</sup>。三个剖面土壤各个土层中均是53~250  $\mu\text{m}$ 微团聚体的全碳含量最低,这可能是因为> 250  $\mu\text{m}$ 大团聚体包含了小粒径团聚体和有机胶结物<sup>[26]</sup>,而< 53  $\mu\text{m}$ 团聚体的黏粒含量较高,易与有机碳形成复合体有关<sup>[27]</sup>。但是在旱地转为新稻田及老稻田后,不同土层与不同粒级团聚体全碳含量的变化又会随着水耕时间的增加而存在差异;水耕熟化作用增加的土壤全碳,在0~30 cm土层中仅有长期植稻才会显著增加,并且增加的全碳来自于> 250  $\mu\text{m}$ 、53~250  $\mu\text{m}$ 和< 53  $\mu\text{m}$ 这三个粒级的团聚体;30~60 cm土层新增加的全碳在短期植稻后被53~250  $\mu\text{m}$ 和< 53  $\mu\text{m}$ 团聚体所固持,而长期植稻后三个粒级的全碳含量均增加显著;60~90 cm和90~120 cm土层中三个粒级团聚体所含全碳均随着植稻时间的增加持续增长,直至稻田土壤发育完全(图2)。

比表面积巨大的铁铝氧化物对可溶性有机物有较高的吸附能力,这在很大程度上决定了土壤有机碳的积累和稳定<sup>[28]</sup>。尤其是在酸性土壤中,有机碳与无定形铁铝氧化物之间的相互作用对有机碳的稳定机制有重要的调控作用<sup>[29]</sup>。这与本文的研究结果类似,红壤属于酸性土壤,土壤中无机碳含量非常低<sup>[30]</sup>,导致旱地和老稻田剖面土壤中> 250  $\mu\text{m}$ 、53~250  $\mu\text{m}$ 、< 53  $\mu\text{m}$ 三个粒级团聚体的全碳含量均与无定形氧化铁呈极显著正相关关系(表4),但新稻田土壤中这三个粒级团聚体的全碳含量却与游离态及无定形铁铝氧化物均无显著相关关系(表4),这可能是因为红壤中无定形氧化铁更有利于大团聚体的形成<sup>[31]</sup>,而新稻田剖面中> 250  $\mu\text{m}$ 大团聚体的比例显著高于花生旱地和老稻田(表2),说明新稻田无定形氧化铁增加迅速,使得三个粒级的全碳含量与土壤所含的无定形氧化铁无显著关系(表4)。有研究表明,稻田的固碳与碳更新主要反映在团聚体碳组分的变化上,新碳主要被粗团聚体的物理结构所保护<sup>[32]</sup>。在本研究中,旱地红壤53~250  $\mu\text{m}$ 微团聚体对土壤全碳的贡献率显著高于> 250  $\mu\text{m}$ 和< 53  $\mu\text{m}$ 团聚体(表3),这与旱地三个粒级团聚体比例大小一致(表2),所以旱地土壤的全碳主要来源于53~250  $\mu\text{m}$ 微团聚体;但新、老稻田却不同,虽然新、老稻田中53~250  $\mu\text{m}$ 微团聚体的比例占主导地位,但这一粒级比例相较于旱地已经有所下降(表2),并且> 250  $\mu\text{m}$ 和< 53  $\mu\text{m}$ 团聚体所含的全碳

含量高于 53~250  $\mu\text{m}$  微团聚体, 所以在短期植稻后, 新稻田剖面土壤中 > 250  $\mu\text{m}$  团聚体对全碳的贡献率显著增加, 明显高于另外两个粒级; 待稻田发育成型后, 老稻田剖面中 > 250  $\mu\text{m}$  团聚体的全碳贡献率会下降, < 53  $\mu\text{m}$  团聚体的贡献率会上升, 直至三个粒级对土壤全碳的贡献率无显著差异。

## 4 结 论

红壤关键带的花生旱地、新稻田和老稻田剖面土壤中 53~250  $\mu\text{m}$  微团聚体的比例高达 41.9%~58.2%。花生旱地转变为新、老稻田的过程中, 各土层土壤均呈现出 53~250  $\mu\text{m}$  团聚体先团聚成 > 250  $\mu\text{m}$  大团聚体, 而后分散成 < 53  $\mu\text{m}$  团聚体的过程。短期植稻与长期植稻都可以显著增加关键带红壤 60~90 cm 和 90~120 cm 这两个较深土层各粒级团聚体的全碳含量, 但只有长期植稻才能显著增加 0~30 cm 和 30~60 cm 这种较浅土层各粒级团聚体的全碳含量, 且旱地与老稻田各粒级团聚体的全碳含量与无定形氧化铁的含量呈极显著正相关关系。花生旱地中 53~250  $\mu\text{m}$  微团聚体对土壤全碳贡献率最大; 新稻田中 > 250  $\mu\text{m}$  大团聚体对土壤全碳贡献率最大; 而老稻田中 < 53  $\mu\text{m}$  团聚体对土壤新增加的全碳贡献最大, 并且集中在较深的土层中, 但 > 250  $\mu\text{m}$ 、53~250  $\mu\text{m}$  和 < 53  $\mu\text{m}$  这三个粒级的团聚体对土壤全碳的贡献率无显著差异。

## 参 考 文 献

- [ 1 ] Crowther TW, Todd-Brown KE, Rowe CW, et al. Quantifying global soil carbon losses in response to warming. *Nature*, 2017, 540 (7631): 104—108
- [ 2 ] Paustian K. Soil: Carbon sequestration in agricultural systems//Encyclopedia of agriculture & food systems. San Diego: Elsevier, 2014: 140—152
- [ 3 ] Zhao J, Chen S, Hu R, et al. Aggregate stability and size distribution of red soils under different land uses integrally regulated by soil organic matter, and iron and aluminum oxides. *Soil & Tillage Research*, 2017, 167: 73—79
- [ 4 ] 张艺, 尹力初, 戴齐. 后续施肥措施改变对红壤性水稻土团聚体有机碳组分的影响. *水土保持学报*, 2016, 30 (6): 278—283, 324  
Zhang Y, Yin L C, Dai Q. Effects of following-up fertilization reforming on the fractions of aggregate-associated organic carbon in red paddy soils (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*. 2016, 30 (6): 278—283, 324
- [ 5 ] 孟祥天, 蒋瑞霖, 王晓玥, 等. 生物质炭和秸秆长期还田对红壤团聚体和有机碳的影响. *土壤*, 2018, 50 (2): 326—332  
Meng X T, Jiang Y J, Wang X Y, et al. Effects of long-term application of biochar and straws on red soil aggregate composition and organic carbon distribution (In Chinese). *Soils*, 201850 (2): 326—332
- [ 6 ] 刘哲, 韩霖昌, 孙增慧, 等. 外源新碳对红壤团聚体及有机碳分布和稳定性的影响. *环境科学学报*, 2017, 37 (6): 2351—2359  
Liu Z, Han J C, Sun Z H, et al. Effects of fresh carbon on distribution and stability of aggregates and organic carbon in red soil (In Chinese). *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, 37 (6): 2351—2359
- [ 7 ] 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. *土壤学报*, 2003, 40 (3): 344—352  
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 (In Chinese). *Acta Pedologica sinica*, 2003, 40 (3): 344—352
- [ 8 ] 马蓓, 周萍, 童成立, 等. 亚热带丘陵区红壤不同土地利用方式下土壤有机碳的变化特征. *农业现代化研究*, 2017, 38 (1): 176—181  
Ma B, Zhou P, Tong C L, et al. Change in soil organic carbon with different land uses in subtropical hilly red soil region. *Research of Agricultural Modernization*, 2017, 38 (1): 176—181
- [ 9 ] 刘长红, 袁野, 杨君, 等. 稻田改为旱地后土壤有机碳矿化及微生物群落结构的变化. *应用与环境生物学报*, 2015, 21 (5): 960—966  
Liu C H, Yuan Y, Yang J, et al. Variation in soil organic carbon mineralization and microbial community structure induced by the conversion from double rice fields to drained fields (In Chinese). *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2015, 21 (5): 960—966
- [ 10 ] Lyu M, Xie J, Ukonmaanaho L, et al. Land use change exerts a strong impact on deep soil C stabilization in subtropical forests. *Journal of Soils and Sediments*, 2016, 17 (9): 2305—2317
- [ 11 ] 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
- [ 12 ] National Research Council (NRC). Basic research opportunities in earth science. Washington DC: National Academy Press, 2001
- [ 13 ] Torressallan G, Schulte R P O, Lanigan G J, et al. Clay illuviation provides a long-term sink for C sequestration in subsoils. *Scientific Reports*, 2017, DOI: 10.1038/srep45635



- [ 14 ] 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
- [ 15 ] 江春玉, 刘萍, 刘明, 等. 不同肥力红壤水稻土根际团聚体组成和碳氮分布动态. 土壤学报, 2017, 54 (1): 138—149  
Jiang C Y, Liu P, Liu M, et al. Dynamics of aggregates composition and C, N distribution in rhizosphere of rice plants in red paddy soils different in soil fertility (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2017, 54 (1): 138—149
- [ 16 ] Das B, Chakraborty D, Singh V K, et al. Effect of integrated nutrient management practice on soil aggregate properties, its stability and aggregate-associated carbon content in an intensive rice-wheat system. Soil & Tillage Research, 2014, 136: 9—18
- [ 17 ] 张艺, 戴齐, 廖超林, 等. 增施或减施有机物料对长期培肥红壤性水稻土团聚体组成的影响. 中国土壤与肥料, 2017 (1): 28—32  
Zhang Y, Dai Q, Liao C L, et al. Effects of organic material on the aggregation in long-term cultivated red paddy soils (In Chinese). Soil and Fertilizer Sciences, 2017 (1): 28—32
- [ 18 ] 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
- [ 19 ] 李娜, 韩晓增, 尤孟阳, 等. 土壤团聚体与微生物相互作用研究. 生态环境学报, 2013, 22 (9): 1625—1632  
Li N, Han X Z, You M Y, et al. Research review on soil aggregates and microbes (In Chinese). Ecology and Environmental Sciences, 2013, 22 (9): 1625—1632
- [ 20 ] 赵金花, 张丛志, 张佳宝. 农田生态系统中土壤有机碳与团聚体相互作用机制的研究进展. 中国农学通报, 2015, 31 (35): 152—157  
Zhao J H, Zhang C Z, Zhang J B. Research process of the interaction mechanism between soil organic carbon and soil aggregate (In Chinese). Chinese Agricultural Science Bulletin, 2015, 31 (35): 152—157
- [ 21 ] 李忠佩, 李德成, 张桃林, 等. 红壤水稻土肥力性状的演变特征. 土壤学报, 2003, 40 (6): 870—878  
Li Z P, Li D C, Zhang T L, et al. Dynamics of soil properties of paddy fields in red soil region (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2003, 40 (6): 870—878
- [ 22 ] 潘根兴, 李恋卿, 张旭辉, 等. 中国土壤有机碳库量与农业土壤碳固定动态的若干问题. 地球科学进展, 2003, 18 (4): 609—618  
Pan G X, Li L Q, Zhang X H, et al. Soil organic carbon storage of China and the sequestration dynamics in agricultural lands (In Chinese). Advance in Earth Sciences, 2003, 18 (4): 609—618
- [ 23 ] 慈恩, 朱洁, 彭娟, 等. 免作免耕对稻田土壤有机碳活性组分和  $\delta^{13}\text{C}$  的影响. 中国农业科学, 2013, 46 (5): 978—986  
Ci E, Zhu J, Peng J, et al. Active fractions and  $\delta^{13}\text{C}$  value of soil organic carbon in paddy fields under ridge-cultivation and no tillage system (In Chinese). Scientia Agricultura Sinica, 2013, 46 (5): 978—986
- [ 24 ] 盛浩, 周萍, 袁红, 等. 亚热带不同稻田土壤微生物生物量碳的剖面分布特征. 环境科学, 2013, 34 (4): 1576—1582  
Sheng H, Zhou P, Yuan H, et al. Profile of soil microbial biomass carbon in different types of subtropical paddy soils (In Chinese). Environment Science, 2013, 34 (4): 1576—1582
- [ 25 ] 武均, 蔡立群, 齐鹏, 等. 不同耕作措施下旱作农田土壤团聚体中有机碳和全氮分布特征. 中国生态农业学报, 2015, 23 (3): 276—284  
Wu J, Cai L Q, Qi P, et al. Distribution characteristics of organic carbon and total nitrogen in dry farm-land soil aggregates under different tillage methods in the Loess Plateau of central Gansu Province (In Chinese). Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015, 23 (3): 276—284
- [ 26 ] 毛艳玲, 杨玉盛, 邢世和, 等. 土地利用方式对土壤水稳性团聚体有机碳的影响. 水土保持学报, 2008, 22 (4): 132—137  
Mao Y L, Yang Y S, Xing S H, et al. Effects of land use on soil organic carbon in water-stable aggregates (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation, 2008, 22 (4): 132—137
- [ 27 ] 章明奎, 郑顺安, 王丽平. 利用方式对砂质土壤有机碳、氮和磷的形态及其在不同大小团聚体中分布的影响. 中国农业科学, 2007, 40 (8): 1703—1711  
Zhang M K, Zheng S A, Wang L P. Chemical forms and distributions of organic carbon, nitrogen and phosphorus in sandy soil aggregate fractions as affected by land uses (In Chinese). Scientia Agricultura Sinica, 2007, 40 (8): 1703—1711
- [ 28 ] 刘满强, 胡锋, 陈小云. 土壤有机碳稳定机制研究进展. 生态学报, 2007, 27 (6): 2642—2650  
Liu M Q, Hu F, Chen X Y. A review on mechanisms of soil organic carbon stabilization (In Chinese). Acta Ecologica Sinica, 2007, 27 (6): 2642—2650
- [ 29 ] Eusterhues K, Rumpel C, Kogel-Knabner I. Organomineral associations in sandy acid forest soils: Importance of specific surface area, iron oxides and micropores. European Journal of Soil Science, 2005, 56: 753—763
- [ 30 ] 胡亚鲜, Nikolaus J Kuhn. 利用土壤颗粒的沉降粒级研究泥沙的迁移与分布规律. 土壤学报, 2017, 54 (5): 1115—1124

- Hu Y X, Nikolaus J, Kuhn. Using settling velocity to investigate the patterns of sediment transport and deposition (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54 (5): 1115—1124
- [ 31 ] 王小红, 杨智杰, 刘小飞, 等. 中亚热带山区土壤不同形态铁铝氧化物对团聚体稳定性的影响. *生态学报*, 2016, 36 (9): 2588—2596
- Wang X H, Yang Z J, Liu X F, et al. Effects of different forms of Fe and Al oxides on soil aggregate stability in mid-subtropical mountainous area of southern China (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(9): 2588—2596
- [ 32 ] 李志鹏, 潘根兴, 张旭辉. 改种玉米连续 3 年后稻田土壤有机碳分布和  $^{13}\text{C}$  自然丰度变化. *土壤学报*, 2007, 44 (2): 244—251
- Li Z P, Pan G X, Zhang X H. Topsoil organic carbon pool and  $^{13}\text{C}$  natural abundance changes from a paddy after 3 years corn cultivation (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2007, 44 (2): 244—251

## Effect of Conversion of Upland into Paddy Field on Content of Carbon in Soil Aggregates along Soil Profile of Red Soil in Critical Red Soil Zone

LIU Zhenyong GAO Zhen WANG Yanling<sup>†</sup> YAO Yi

(*International Center for Ecology, Meteorology and Environment, College of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Sciences and Technology, Nanjing 210044, China*)

**Abstract** So far little has been reported in the literature on variation of carbon distribution in soil aggregates along a soil profile of a farmland converted from upland into paddy field at the Red Soil Critical Zone Observatory (RSCZO) in Yingtan, Jiangxi. This study was oriented to investigate (i) particle size composition and distribution of soil aggregates; (ii) changes in carbon content in soil aggregates, relative to fraction in particle size; and (iii) how iron-aluminum oxides affect carbon in the soil profiles of upland peanut fields, and old and new paddy fields of red soil. Soil samples were collected by layer from bottom to top in the profiles (0~120 cm) of upland peanut fields, new paddy fields (< 30 years) and old paddy fields (> 200 years) at the RSCZO located at the Sunjia watershed, Yingtan, Jiangxi Province of China. Soil aggregates in the soil samples were collected and fractionated, by > 250  $\mu\text{m}$ , 53~250  $\mu\text{m}$ , and < 53  $\mu\text{m}$ , with the wet sieving method. Carbon contents in the soil and aggregates were analyzed, and the relationships between soil iron-aluminum oxides and carbon in the soil aggregates were also discussed. Results show that the aggregates of the fraction of 53~250  $\mu\text{m}$  accounted for 41.9%~58.2% of the total in the soil profile, in all the three types of the field. The proportion of the fraction of > 250  $\mu\text{m}$ , 53~250  $\mu\text{m}$  and < 53  $\mu\text{m}$  varied in a trend of “low-high-low”, “high-low-low” and “low-low-high”, respectively, in all soil layers with the land use pattern changing from upland peanut field to new and old paddy field. Carbon contents in the soil and soil aggregates increased significantly after the field was converted from upland to paddy, especially after long-term paddy cultivation. The formation of amorphous iron oxide in the soil affected significantly the content of total carbon in the soil of the upland peanut field and old paddy field. The content of soil total carbon in the soil profiles of all the fields decreased rapidly at first and then leveled off with soil depth, and in deep soil layers, the fraction of aggregates < 53  $\mu\text{m}$  contributed the most to the increment in total carbon in the old paddy field.

**Key words** Red Soil Critical Zone Observatory (RSCZO); Upland Peanut field; Paddy field; Aggregate; Carbon

(责任编辑：卢萍)