

# 不同稻作模式下稻田土壤活性有机碳变化动态\*

展 茗 曹凑贵\*\* 江 洋 汪金平 乐丽鑫 蔡明历

(华中农业大学农业部华中作物生理生态与栽培重点开放实验室, 武汉 430070)

**摘 要** 通过大田试验,研究了稻鸭复合种养(RD)、间歇灌溉(RW)、常规淹水灌溉(CK)3种不同稻作模式下稻田土壤可溶性有机碳(DOC)、易氧化态有机碳(ROC)和微生物生物量碳(MBC)3种活性有机碳组分的动态变化规律.结果表明:3种稻作模式下土壤DOC、MBC在水稻拔节-齐穗阶段含量最高;ROC在水稻整个生育期内变化平稳,没有表现出显著的阶段性差异.MBC受水稻生育期的影响最大;DOC受水稻生育期和稻作模式的影响均较大;而ROC主要受稻作模式的影响.与CK相比,RD能显著提高土壤DOC和ROC及其有效率;而RW极显著降低了DOC及其有效率,明显提高了ROC及其有效率.3处理间MBC及微生物熵均没有显著差异.

**关键词** 稻鸭共作 常规淹水灌溉 间歇灌溉 土壤可溶性有机碳 土壤微生物生物量碳 土壤易氧化态有机碳

文章编号 1001-9332(2010)08-2010-07 中图分类号 S181,S511;X511 文献标识码 A

**Dynamics of active organic carbon in a paddy soil under different rice farming modes.** ZHAN Ming, CAO Cou-gui, JIANG Yang, WANG Jin-ping, YUE Li-xin, CAI Ming-li (*Ministry of Agriculture Key Laboratory of Huazhong Crop Physiology, Ecology and Production, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China*). -*Chin. J. Appl. Ecol.*, 2010, 21(8): 2010–2016.

**Abstract:** A field experiment was conducted to study the dynamics of dissolved organic carbon (DOC), readily oxidizable organic carbon (ROC), and microbial biomass carbon (MBC) in a paddy soil under integrated rice-duck farming (RD), intermittent irrigation (RW), and conventional flooded irrigation (CK), the three rice farming modes typical in southern China. Under these three farming modes, the soil DOC and MBC contents reached the highest during the period from rice booting to heading, while the soil ROC content had less change during the whole rice growth period. Two-factor variance analysis showed that soil MBC was greatly affected by rice growth stage, soil DOC was greatly affected by rice growth stage and farming mode, and soil ROC was mainly affected by farming mode. Comparing with CK, RD significantly increased the soil DOC and ROC contents and their availability, while RW significantly decreased the soil DOC content and its availability but increased the soil ROC content and its availability. No significant differences were observed in the soil MBC and microbial quotient among RD, RW, and CK.

**Key words:** integrated rice-duck farming; conventional flooded irrigation; intermittent irrigation; soil dissolved organic carbon; soil microbial biomass carbon; soil readily oxidizable organic carbon.

土壤有机碳(SOC)是全球碳循环中重要的碳库,在土壤生产力和全球碳循环中起着十分重要的作用.土壤有机碳是由一系列性质不同、分解程度不同的有机化合物构成的,其构成情况决定了土壤有机碳的周转特征和动态变化.近年来,各国学者对土

壤有机碳研究的热点集中在对外界因素非常敏感、周转速度快的土壤有机碳活性组分上<sup>[1]</sup>.土壤活性有机碳一般是指在一定的时空条件下,受环境条件影响强烈、易氧化分解、对植物和微生物活性较高的那部分土壤碳素.土壤活性有机碳根据其测定方法和所指有机碳的组分不同而被表述为可溶性有机碳(dissolved organic carbon DOC)、轻组有机碳、颗粒态碳、微生物生物量碳(microbial biomass carbon, MBC)、可矿化碳和易氧化态有机碳(readily oxidiza-

\* 国家“十一五”重大科技专项(2006BA520A02)和湖北省自然科学基金项目(4006-086063)资助.

\*\* 通讯作者. E-mail: cegui@mail.hzau.edu.cn

2009-11-25 收稿,2010-06-08 接受.

ble organic carbon, ROC), 它们在不同程度上反映土壤有机碳的有效性和土壤质量<sup>[2-3]</sup>。

土壤活性有机碳在 SOC 中所占的比重虽然很小, 但与土壤生产力密切相关, 对土壤养分的转化供应有着重要影响, 各碳库质量指数均与土壤养分含量有显著相关关系<sup>[4]</sup>。韩成卫等<sup>[5]</sup>研究发现, 去除 DOC 显著降低了培养期间土壤有机质的累计矿化量(平均 15.4%), 土壤有机氮的累计矿化量下降了 19.2%, 说明 DOC 在红壤水稻土 C、N 矿化中起重要作用。研究表明土壤微生物生物量碳与土壤有机质、全氮、全磷、全钾、水解氮、有效磷含量和阳离子交换量均呈显著或极显著相关<sup>[6]</sup>。

水稻是我国最重要的粮食作物, 水田是中国最具特色的农田系统, 在我国南方 80% 的耕地是水田, 稻田农业仍然是保证我国粮食安全的主要支撑。水稻土是当前有机碳含量水平较高, 固碳趋势明显且固碳潜力较大的特色耕作土壤<sup>[7]</sup>, 是我国应对气候变化增加土壤固碳能力建设的重要组成部分。随着我国水稻生产向高产、高效、节约、环保方向发展, 稻田养鸭等稻田复合种养模式、稻田节水灌溉模式等也逐渐在生产中应用推广。已有研究表明, 稻田养鸭和节水灌溉模式都能影响稻田土壤环境的变化和水稻生长特性<sup>[8-11]</sup>, 而这些变化势必会影响到稻田碳循环的改变。但关于稻田养鸭和节水灌溉后土壤有机碳组分的变化研究报道较少。因此, 本文研究了养鸭稻田、节水灌溉稻田土壤有机碳组分的变化规律, 以分析和预测这两种模式对土壤有机碳库的影响, 为认识和评价我国稻作模式的变化对碳循环的影响提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地点和供试材料

本研究于 2008 年 5—9 月在华中农业大学试验农场进行, 前作为油菜。试验地土壤为第四纪黄土性沉积物发育的水稻土, 耕层土壤厚 20 cm, 下为 10 cm 厚的犁底层, 地下水位常年在 1.5 m 以下。土壤基本性质为: 全氮  $1.09 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 全磷  $1.17 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 有机质  $16.76 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 硝态氮  $12.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 铵态氮  $0.52 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 土壤 pH 值 6.8, 土壤容重  $1.18 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。供试水稻为中稻品种两优培九 (*Oryza sativa*), 鸭子为本地麻鸭 (*Tadorna*)。

### 1.2 试验设计

试验田面积  $1260 \text{ m}^2$ , 用田埂分为 9 个小区, 埂高 20 cm, 并用塑料膜包被, 每小区面积为  $140 \text{ m}^2$

( $10 \text{ m} \times 14 \text{ m}$ )。设 3 个处理: 常规淹水稻作模式 (CK)、稻田养鸭模式 (RD, 以每公顷放养 300 只鸭为标准) 和节水灌溉模式 (RW, 以当前生产上推广面积较大的间歇灌溉模式为参考)。各小区随机区组设计, 3 次重复。试验田四周用水泥砌围, 并设有一进水口和出水口。

### 1.3 田间管理

2008 年 5 月 22 日田间整地, 于泡田后 4 d 施纯 N  $225 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$   $135 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$   $135 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 在水稻生长期不再追肥。5 月 27 日移栽, 9 月 10 日收割。每公顷 225000 穴, 每穴 2 苗。前茬油菜收获后, 残茬翻压还田。

小区间用泥巴砌成田埂, 覆上地膜, 防止肥水串流。田间开挖围沟, 深 30 cm、宽 40 cm。对于养鸭处理, 每个小区以 4 指规格尼纶丝网沿田埂围隔, 围网高度为 0.6~0.8 m, 以防鸭逃走, 水稻移栽后半个月放 15 日龄的雏鸭。在养鸭小区一角落放置一鸭棚, 以便鸭子休憩和喂食 (其目的为防止饲料进入稻田土壤和水体; 饲料为农家肉鸡花料, 为碳水化合物饲料, 主要组分为玉米 60.2%, 豆粕 27%, 鱼粉 2%, 菜粕 4%, 棉粕 3%, 磷酸氢钙 1.3%, 石粉 1.2%, 食盐 0.3%, 添加剂 1%)。8 月 20 日收鸭子。3 处理水稻行株距均为  $26.64 \text{ cm} \times 16.65 \text{ cm}$ 。CK 和 RD 处理各小区均实行淹灌 (无沟处水深 5~8 cm), 保持水层直至 RD 处理收鸭, 此后自然落干不再灌溉。节水处理采用间歇灌溉模式, 其技术要点为: 水稻返青期保持 3 cm 左右水层, 其余阶段灌水后水层深度达 3~4 cm, 至土壤含水率下降到饱和含水率的 80% 左右时再灌水 (田面微见裂纹), 反复进行干淹交替, 每次灌水后田间有水层持续时间 4~5 d、无水层持续时间 2~3 d。在水稻全生育期, 其他农艺措施各小区均相同。常规淹水处理和稻田养鸭处理在田间淹水期间土壤绝对含水量为 30%~32%; 间歇灌溉处理田间绝对含水量最低为 26%~27%。

### 1.4 土样采集及测定方法

**1.4.1 田间土样采集** 采样方式为 S 形 5 点采样法。土样采集从 5 月 30 日起, 每隔 7~9 d 采样 1 次, 直至 9 月 9 日, 采集耕作层 0~20 cm 表土, 混匀, 送回实验室进行前处理: 取部分新鲜土样进行相关项目的测定, 将剩余土壤在室温下完全风干, 研磨过 100 目筛, 以进行相关指标的测定。

**1.4.2 土壤有机碳组分的测定** 1) 土壤易氧化态有机碳 (ROC): 取约含 15~30 mg 碳的土样, 加入  $333 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  的  $\text{KMnO}_4$  溶液 25 ml, 振荡 1 h, 然后以

4000 r · min<sup>-1</sup> 离心 5 min, 取上清液用去离子水按 1 : 250 稀释, 将稀释液在 565 nm 波长处进行比色, 根据 KMnO<sub>4</sub> 的消耗量, 可求出土壤易氧化态有机碳含量. 土壤易氧化态有机碳有效率 = ROC/TOC × 100% .

2) 可溶性有机碳 (DOC): 称取 15 g 新鲜土样, 加入 30 ml 蒸馏水, 于室温下振荡 30 min, 4000 r · min<sup>-1</sup> 离心 15 min, 上清液过 0.45 μm 滤膜<sup>[12]</sup>, 滤液加 5 ml 0.8 mol · L<sup>-1</sup> K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> 和 5 ml 浓 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 在 185 ℃ 下消煮 5 min, 用 0.2 mol · L<sup>-1</sup> Fe<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 滴定. 土壤可溶性有机碳有效率 = DOC/TOC × 100% .

3) 土壤微生物生物量碳 (MBC): 采用氯仿熏蒸-K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 提取方法<sup>[13]</sup>. 称取相当于烘干土 10 g 的新鲜土样, 在真空干燥器中用氯仿熏蒸 24 h, 用反复抽真空方法除去残存氯仿, 再用 30 ml 0.5 mol · L<sup>-1</sup> K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 溶液振荡提取 30 min, 过滤的提取液用重铬酸钾容量法测定碳含量. 同时以不熏蒸土样为对照. 以熏蒸土样与不熏蒸土样提取的有机碳的差值分别乘以转换系数 K<sub>c</sub> (2.22), 计算土壤微生物生物量碳. 土壤微生物熵 = MBC/TOC × 100% .

4) 土壤总有机碳的测定采用重铬酸钾容量法.

1.5 数据处理

试验结果均以 3 次重复的平均值与标准差表示, 采用 DPS 3.01 软件对试验数据进行统计分析. 以稻作模式和水稻不同生育阶段作双因素方差分析, 均值的多重比较采用 LSD 法.

2 结果与分析

2.1 不同稻作模式下稻田土壤总有机碳的动态

由图 1 可以看出, 在水稻整个生育期内土壤 TOC 呈逐渐升高趋势, 水稻收获时土壤 TOC 含量明显高于水稻移栽时. 在水稻返青期及孕穗期土壤 TOC 出现了两个高峰. 从表 1 可以看出, 在水稻拔节-齐穗期间, RD 平均土壤 TOC 显著高于 CK 和 RW, 分别是 CK 和 RW 的 1.10 和 1.06 倍; 其他各生育阶段各处理 TOC 差异不显著.

2.2 不同稻作模式下稻田土壤可溶性有机碳动态及其有效率

从图 2 可以看出, 3 个处理的土壤 DOC 在分蘖期变化较平稳, 进入抽穗期后逐渐升高并达到一个小高峰 (移栽后 60 d 左右), 随后逐渐下降, 至收获时达到最低值, 这可能与成熟期稻田排水落干有关.

从不同处理来看 (表 1), 在水稻移栽-拔节和拔

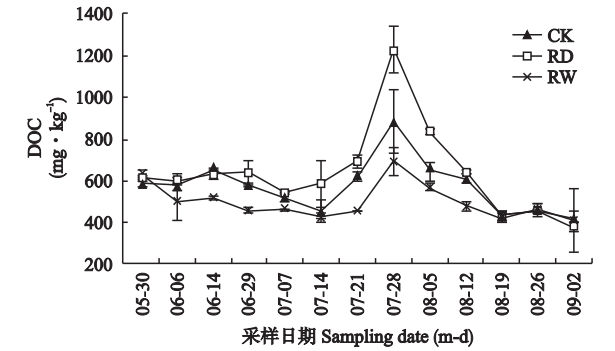


图 1 稻田土壤总有机碳 (TOC) 的动态  
Fig. 1 Dynamics of total soil organic carbon (TOC) in paddy fields.

CK: 常规淹水稻作模式 Conventional flooded irrigation system; RD: 稻田养鸭模式 Integrated rice-duck farming system; RW: 节水灌溉模式 Intermittent irrigation farming system. 下同 The same below.

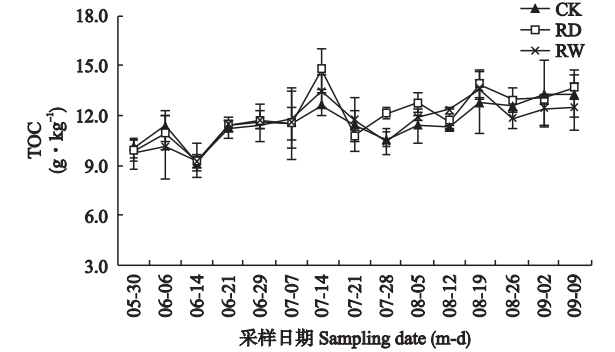


图 2 稻田土壤可溶性有机碳 (DOC) 的动态  
Fig. 2 Dynamics of soil dissolved organic carbon (DOC) in paddy fields.

节-齐穗期间 RD 的 DOC 显著或极显著高于 CK 和 RW, 同时 CK 的 DOC 又极显著高于 RW. RD 与 CK 土壤 DOC 的差异主要来自稻鸭共作期间, 该期间 RD 的 DOC 比 CK 高 14%. 从全生育期来看, 以 RD 的平均 DOC 最高, 达到 0.64 g · kg<sup>-1</sup>, 分别比 CK 和 RW 高 11.2% 和 27.5%, CK 比 RW 高 14.7%, 三者差异达到极显著水平. 可见, 稻田养鸭有增大土壤 DOC 的趋势, 而节水灌溉则降低了土壤 DOC.

土壤可溶性有机碳有效率表示土壤可溶性有机碳在总有机碳中的相对含量, 它是反映土壤有机碳库质量的一个重要指标之一. 从不同处理来看 (表 1), 在水稻移栽-拔节和拔节-齐穗期间 RD 的 DOC 有效率显著或极显著高于 CK 和 RW, CK 与 RW 之间差异不显著. 从全生育期来看, 以 RD 的平均 DOC 有效率最高, 达到 5.27%, 显著高于 CK 和 RW, 分别是 CK 和 RW 的 1.14 和 1.21 倍; CK 和 RW 之间差异不显著.



表 1 水稻不同生育阶段土壤有机碳组分的变化  
Tab.1 Variations of soil organic carbon components at different growth stages of rice

生育时期 Growth stage	处 理 Treatment	TOC (g · kg <sup>-1</sup> )	DOC (g · kg <sup>-1</sup> )	DOC 有效率 (%)	ROC (g · kg <sup>-1</sup> )	ROC 有效率 (%)	MBC (g · kg <sup>-1</sup> )	微生物熵 Microbial quotient (%)
移栽-拔节 Transplanting-booting	CK	10.86a	0.58bAB	4.89b	2.33a	23.58b	0.26a	2.26a
	RD	10.79a	0.60aA	5.84a	2.45a	24.55ab	0.28a	2.51a
	RW	10.56a	0.50bB	4.90b	2.49a	25.83a	0.25a	2.23a
拔节-齐穗 Booting-heading	CK	11.51b	0.65B	4.96B	2.23b	19.61a	0.41a	3.55a
	RD	12.62a	0.83A	6.69A	2.50a	20.28a	0.41a	3.28a
	RW	11.87b	0.53C	4.58B	2.48a	20.88a	0.39a	3.32a
齐穗-收获 Heading-harvesting	CK	13.25a	0.48a	3.91a	2.06B	16.71B	0.20a	1.66a
	RD	13.70a	0.48a	3.31a	2.57A	19.98A	0.22a	1.66a
	RW	12.52a	0.44a	3.53a	2.56A	21.12A	0.21a	1.65a

同列不同字母表示不同处理之间差异显著 ( $P<0.05$ ) Different letters in the same column meant significant difference among treatments at 0.05 level.

2.3 不同稻作模式下稻田土壤易氧化态有机碳的动态及其有效率

从图 3 可以看出,土壤 ROC 呈先升高,再下降,再略有升高,然后基本趋于平稳的变化趋势,在分蘖后期 ROC 含量达到最高(移栽后 50 ~ 65 d). 从不同处理来看(表 1),水稻全生育期内 RD、RW 的平均 ROC 含量均为  $2.51\text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,显著高于 CK( $2.21\text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ),其差异主要来自拔节-齐穗及齐穗-收获阶段,在此阶段 RW 和 RD 的 ROC 均显著高于 CK,而在移栽-拔节期间,3 处理之间没有显著差异.

从表 1 可以看出,3 个处理 ROC 有效率均在水稻移栽-拔节期间最高,约为 25%,显著高于后面的两个生育阶段. 从不同处理来看,水稻全生育期内 CK 的平均 ROC 有效率为 19.97%,极显著低于 RW,这种差异主要来自移栽-拔节和齐穗-收获阶段. CK 和 RD 在全生育期内的 ROC 有效率差异不显著,但在齐穗-收获阶段 RD 极显著高于 CK; RD 和 RW 差异不显著. 可见稻田进行复合种养和节水灌溉均可引起土壤 ROC 及其有效率的明显变化.

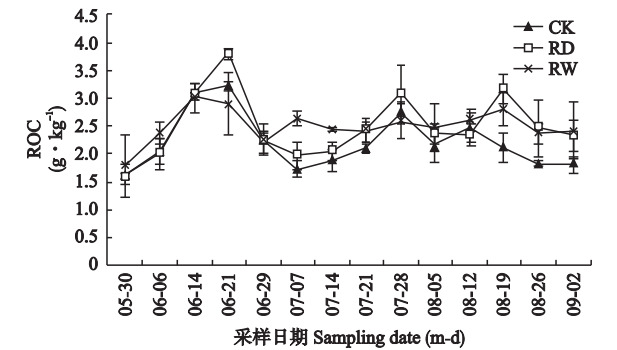


图 3 稻田土壤易氧化态有机碳 (ROC) 的动态  
Fig. 3 Dynamics of soil readily oxidizable organic carbon (ROC) in paddy fields.

2.4 不同稻作模式下稻田土壤微生物生物量碳 (MBC) 及微生物熵的动态

从图 4 可以看出,水稻移栽后 3 个处理土壤 MBC 逐渐上升,至孕穗抽穗阶段达到高峰,然后又逐渐下降,以拔节-齐穗期间最高,此期 CK、RD、RW 的 MBC 含量分别达到  $0.41$ 、 $0.41$  和  $0.39\text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  (表 1). 水稻全生育期内 CK、RD、RW 的平均 MBC 含量分别达到了  $0.28$ 、 $0.30$  和  $0.28\text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,不同处理之间并没有显著差异. 从表 1 可以看出,3 个处理土壤微生物熵均以拔节-齐穗期间最高,显著高于移栽-拔节和拔节-收获期;同时移栽-拔节期的土壤微生物熵又显著高于齐穗-收获期. 在水稻全生育期内 3 个处理土壤微生物熵没有显著差异.

2.5 不同稻作模式下稻田土壤活性有机碳组分变异来源

本研究采用各变异来源的平方和与总平方和的比值来表示引起某一指标变化的因素的影响程度. 从表 2 可以看出,土壤 DOC 对外界条件的变化较敏感. 水稻生育期和稻作模式及其交互作用对 DOC 的

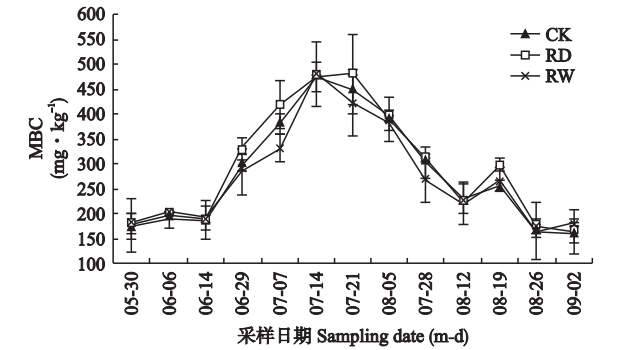


图 4 稻田土壤微生物生物量碳 (MBC) 的动态  
Fig. 4 Dynamics of soil microbial biomass carbon (MBC) in paddy fields.

表 2 土壤活性有机碳组分的双因素方差分析  
Tab. 2 Two-way ANOVA of active soil organic carbon

指 标 Indicator	项目 Item	方差 Sum of squares	F	Sig.	变异度 Variability
DOC	区组间 Block	7. 1	0	1	0
	稻作模式 Farming mode	85394. 4	2. 18	0. 23	21. 6
	生育期 Growth stage	216753. 4	5. 54	0. 07	54. 8
	稻作模式×生育期 Farming mode×growth stage	78191. 9	20. 47	0	19. 8
	误差 Error	15279. 5			3. 9
	总变异 Total variability	395626. 2			100
ROC	区组间 Block	0. 03	0. 78	0. 48	2. 6
	稻作模式 Farming mode	0. 54	7. 65	0. 04	55. 6
	生育期 Growth stage	0	0. 06	0. 94	0. 5
	稻作模式×生育期 Farming mode×growth stage	0. 14	2. 17	0. 12	14. 5
	误差 Error	0. 26			26. 8
	总变异 Total variability	0. 97			100
MBC	区组间 Block	1082. 5	1	0. 4	0. 6
	稻作模式 Farming mode	1494. 3	3. 7	0. 12	0. 8
	生育期 Growth stage	175990. 2	433. 4	0	93. 5
	稻作模式×生育期 Farming mode×growth stage	812. 2	0. 4	0. 83	0. 4
	误差 Error	8878. 4			4. 7
	总变异 Total variability	188257. 6			100

变化解释了 86. 2% 的变异来源,其中主要是生育期引起的变异,其对 DOC 解释了 54. 8% 的变异来源,稻作模式及其与生育期的交互作用对总变异的贡献相当. 生育期对 MBC 的变化解释了 93% 左右的变异来源. 可见水稻生育期的变化是引起土壤 MBC 变化的关键因素. 土壤 ROC 对外界条件的变化也较敏感,稻作模式对其解释了 55. 6% 的变异来源.

3 讨 论

3.1 稻田土壤有机碳组分的季节动态

土壤 DOC 来源复杂,植物凋落物和腐殖质的降解、微生物生物量和根际分泌物等是其主要来源<sup>[14]</sup>,而 DOC 的分解包括微生物的合成、矿化、淋失、吸附等<sup>[15]</sup>. 本研究表明,在水稻移栽后分蘖初期,土壤 DOC 较高,这是因为油菜残茬降解形成的简单化合物使 DOC 含量增加;随后 DOC 下降,至拔节前后达到最低值,这可能是由于该阶段 DOC 的补充来源减少,而土壤微生物活性增强,使土壤基础呼吸和 MBC 含量增加. 随着表层土壤微生物量的逐渐增大,土壤微生物对养分的需求不断增加,在养分、温度和湿度达到适合的情况下,土壤微生物量在短期内迅速增大,导致土壤微生物对溶解有机碳的需求猛增,使土壤溶解有机碳迅速降低<sup>[16]</sup>;到水稻孕穗-抽穗中期土壤 DOC 又逐渐升高,这与水稻根系分泌物增多有关;随着根系分泌能力的降低及成熟

期田间排水落干,DOC 又逐渐下降到最低值.

土壤微生物生物量是土壤有机质中最活跃和最易变化的部分,是反映土壤有机碳变化和土壤质量非常敏感的指标. 隋跃宇等<sup>[17]</sup>研究发现,土壤微生物生物量碳从玉米拔节期开始增加,到玉米大喇叭口期有一个相对高峰,以后随着作物生长及外界温度的降低,土壤微生物生物量碳含量明显下降. 甘德欣等<sup>[18]</sup>研究发现,常规淹水稻田土壤微生物生物量碳在分蘖初期和孕穗期较高,在分蘖盛期略有下降,齐穗期及其以后时期明显降低. 王延军等<sup>[19]</sup>发现,水稻移栽后 40 d 土壤微生物生物量碳较移栽 15 d 时都有所降低,这与长时间淹水及水稻地上、地下部分快速生长并与微生物争夺养分,使微生物的生长与繁衍受到抑制有关. 综合来看,土壤微生物生物量碳在作物生长季内具有明显的波动性,这种波动性主要与作物的生长发育过程有关,同时也受到农田管理措施和环境因子的影响. 一般情况下,当作物对养分需求量增加时,营养竞争抑制了微生物的生长,使土壤微生物生物量碳降低;当作物根系分泌和残体归还较多时,又会刺激土壤微生物的增长使土壤微生物生物量碳增加. 本研究中,水稻分蘖期土壤微生物生物量碳较低,在孕穗抽穗期较高,而在成熟期又有所下降(图 4),这与前人的研究结果一致<sup>[20]</sup>. 同时发现土壤微生物熵与土壤微生物生物量碳具有相似的季节动态,这与张帆等<sup>[21]</sup>研究结果相同.

### 3.2 不同稻作模式对稻田土壤有机碳组分的影响

目前关于稻鸭复合种养稻田土壤有机碳组分的研究较少。甘德欣等<sup>[18]</sup>研究发现,免耕稻田养鸭能提高土壤微生物生物量碳,认为这是由于没有使用农药避免了对土壤微生物的影响所致。而研究表明,养鸭稻田土壤微生物生物量碳并没有显著提高。稻田养鸭后,在稻鸭共作期间,土壤 DOC 含量显著提高,这可能与两方面的因素有关:一方面稻鸭共作期间,鸭子粪便在一定程度上增加了土壤 DOC 的来源<sup>[18]</sup>;其次,鸭子活动为稻田起到控草、杀虫、中耕、浑水、促进养分循环、增加土壤溶氧量、改善土壤氧化还原状况等作用<sup>[22-23]</sup>,促进了水稻根系生长<sup>[8-9]</sup>,导致水稻根系分泌能力增强,而通过根系分泌输入到土壤中的有机碳是土壤 DOC 的重要来源<sup>[24-25]</sup>。

土壤的水分状况通过影响土壤中氧化还原电位及微生物活性间接作用于有机质的降解,改变土壤有机碳组分特征。一般好氧条件下一种微生物可直接把有机物转化为  $\text{CO}_2$ ,而厌氧条件下需要一系列微生物接力来完成。因此好氧环境中有机物的分解速率快于厌氧环境,水田中有机物的残留率高于旱地<sup>[26]</sup>。研究表明,淹水可提高土壤有机碳的溶出,使土壤团聚体分散,进而增加可溶性有机碳量,提高土壤的有效碳库<sup>[27]</sup>。降雨和灌水可显著提高稻田土壤 DOC 含量<sup>[28]</sup>,而水分含量和淹水时间均能造成可溶性有机碳量的明显差异<sup>[29]</sup>。水分状况导致的土壤有效碳库的差异可能来自两方面:一是对土壤有效碳库总量的影响;二是对土壤微生物活性的影响。因此,本研究间歇灌溉稻田淹水环境的消失显著减少了土壤 DOC 含量。有研究表明干湿交替能显著降低土壤微生物生物量<sup>[30]</sup>,而本研究发现间歇灌溉对土壤微生物生物量碳没有显著影响(表 1)。但蔡晓红等<sup>[31]</sup>研究表明,控水模式和干湿交替模式下微生物生物量碳比浅水层连续灌溉模式高,这可能是由于浅水层连续灌溉模式不是一种合理的利于水稻生长的模式,也不利于改善稻田土壤理化环境,从而抑制了土壤微生物的生长繁殖,导致微生物生物量较低。这仍有待进一步证实。

### 参考文献

- [1] Six J, Elliot ET, Paustian K, *et al.* Aggregation and soil organic matter accumulation in cultivated and native grassland soils. *Soil Science Society of America Journal*, 1998, **62**: 1367-1377
- [2] Jiang P-K (姜培坤), Xu Q-F (徐秋芳). Effects of fertilization on soil active organic carbon under *Phyl-*

- lostachys praecox* stand. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2005, **16**(2): 253-256 (in Chinese)
- [3] Xu M-G (徐明岗), Yu R (于 荣), Wang B-R (王伯仁). Progress on the study of soil active organic matter. *Soils and Fertilizers* (土壤肥料), 2000(6): 3-7 (in Chinese)
- [4] Shao Y-H (邵月红), Pan J-J (潘剑君), Sun B (孙波). Effect of a long-term organic manure application on the different available carbons in red soils. *Chinese Journal of Eco-Agriculture* (中国生态农业学报), 2006, **14**(1): 125-127 (in Chinese)
- [5] Han C-W (韩成卫), Li Z-P (李忠佩), Li L (刘丽), *et al.* Influence of dissolved organic matter on transformations of carbon and nitrogen in paddy soils in subtropical China. *Ecology and Environment* (生态环境), 2006, **15**(6): 1300-1304 (in Chinese)
- [6] Li Z-P (李忠佩), Wu X-C (吴晓晨), Chen B-Y (陈碧云). Changes in transformation of soil organic carbon and functional diversity of soil microbial community under different land use patterns. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2007, **40**(8): 1712-1721 (in Chinese)
- [7] Pan G-X (潘根兴), Li L-Q (李恋卿), Zheng J-F (郑聚锋), *et al.* Perspectives on cycling and sequestration of organic carbon in paddy soils of China. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), 2008, **45**(5): 901-911 (in Chinese)
- [8] Zhang J-E (章家恩), Zhao M-Y (赵美玉), Chen J (陈 进), *et al.* Effects of duck-rice integrated farming system on soil fertility factors. *Ecology and Environment* (生态环境), 2004, **13**(4): 654-655 (in Chinese)
- [9] Wang Q-S (王强盛), Zhen R-H (甄若宏), Ding Y-F (丁艳锋), *et al.* Strong stem effect and physiological characteristics of rice plant under rice-duck farming. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2008, **19**(12): 2661-2665 (in Chinese)
- [10] Qian X-Q (钱晓晴), Shen Q-R (沈其荣), Bai Y-C (柏彦超), *et al.* Responses of different cultivars of rice to aerobic cultivation. *Acta Agronomica Sinica* (作物学报), 2004, **30**(6): 555-562 (in Chinese)
- [11] Yang S-H (杨士红), Peng S-Z (彭世彰), Xu J-Z (徐俊增). Study on impacts of soil moisture condition on paddy soil environment under water-saving irrigation. *Water Saving Irrigation* (节水灌溉), 2008(12): 1-4 (in Chinese)
- [12] Wright AL, Proven TL, Hons FM, *et al.* Dissolved organic C in compost-amended bermudagrass turf. *Hort-Science*, 2005, **40**: 830-835
- [13] Vance ED, Brookes PC, Jenkinson DS. An extraction method for measuring soil microbial biomass carbon. *Soil Biology & Biochemistry*, 1987, **19**: 703-704
- [14] Kalbitz K, Solinger S, Park JH, *et al.* Controls on the dynamics of dissolved organic matter in soils: A review. *Soil Science*, 2000, **165**: 277-304
- [15] McDowell WH, Kalbitz K, Kaiser K. Dissolved organic

- matter in soils—Future directions and unanswered questions. *Geoderma*, 2003, **113**: 179–186
- [16] Huang J-Y (黄靖宇), Song C-C (宋长春), Jin B (金波), *et al.* Influence of litter importation on basal respiration and labile carbon in restored farmland in Sanjiang Plain. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2008, **28** (7): 3417–3424 (in Chinese)
- [17] Sui Y-Y (隋跃宇), Zhang X-Y (张兴义), Jiao X-G (焦晓光). Effect of different fertilizer application strategies on soil microbial biomass during corn growth periods. *Chinese Journal of Eco-Agriculture* (中国生态农业学报), 2007, **15**(3): 52–54 (in Chinese)
- [18] Gan D-X (甘德欣), Huang H (黄 璜), Jiang T-J (蒋廷杰), *et al.* Decrease in CH<sub>4</sub> emission and its mechanism in no-tillage rice-duck complex system. *Rural Eco-Environment* (农村生态环境), 2005, **21**(2): 1–6 (in Chinese)
- [19] Wang Y-J (王延军), Zong L-G (宗良纲), Li R (李锐). Microbial biomass and paddy soil enzyme activity in organic and conventional farming systems. *Chinese Journal of Eco-Agriculture* (中国生态农业学报), 2008, **16**(1): 47–51 (in Chinese)
- [20] Banerjee B, Aggarwal PK, Pathak H, *et al.* Dynamics of organic carbon and microbial biomass in alluvial soil with tillage and amendments in rice-wheat systems. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2006, **119**: 173–189
- [21] Zhang F (张 帆), Huang F-Q (黄凤球), Xiao X-P (肖小平), *et al.* Short-term influences of winter crops on microbial biomass carbon, microbial biomass nitrogen and  $C_{mic}$ -to- $C_{org}$  in a paddy soil. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2009, **29**(2): 734–738 (in Chinese)
- [22] Wang J-P (汪金平), Cao C-G (曹凑贵), Jin H (金辉), *et al.* Effects of rice-duck farming on aquatic community in rice fields. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2006, **39**(10): 2001–2008 (in Chinese)
- [23] Fu Z-Q (傅志强), Huang H (黄 璜), Liao X-L (廖晓兰), *et al.* Effect of ducks on CH<sub>4</sub> emission from paddy soils and its mechanism research in the rice-duck ecosystem. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2008, **28**(5): 2107–2114 (in Chinese)
- [24] Aulakh MS, Wassmann R, Bueno C, *et al.* Characterization of root exudates at different growth stages of ten rice (*Oryza sativa* L.) cultivars. *Plant and Soil*, 2001, **3**: 139–148
- [25] Lu Y, Wassmann R, Neue HU, *et al.* Dynamics of dissolved organic carbon and methane emissions in a flooded rice soil. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, **64**: 2011–2017
- [26] Guo LP, Lin ED. Carbon sink in cropland soils and emission of greenhouse gases from paddy soils: A review of work in China. *Chemosphere-Global Change Science*, 2001, **3**: 413–418
- [27] Wang FL, Bettany JR. Influence of freeze-thaw and flooding on the loss of soluble organic carbon and carbon dioxide from soil. *Journal of Environmental Quality*, 1993, **22**: 709–714
- [28] Jiao K (焦 坤), Li Z-P (李忠佩). Dynamics and biodegradation of dissolved organic carbon in paddy soils derived from red clay. *Soils* (土壤), 2005, **37**(3): 272–276 (in Chinese)
- [29] Li Z-P (李忠佩), Zhang T-L (张桃林), Chen B-Y (陈碧云). Dynamics of soluble organic carbon and its relation to mineralization of soil organic carbon. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), 2004, **41**(4): 544–552 (in Chinese)
- [30] Wu J, Brookes PC. The proportional mineralization of microbial biomass and organic matter caused by air-drying and rewetting of a grassland soil. *Soil Biology & Biochemistry*, 2005, **37**: 507–515
- [31] Cai X-H (蔡晓红), Yang J-P (杨京平), Ma W-N (马维娜), *et al.* Effects of nitrogen supply levels and water schemes on rice rhizosphere microbial biomass carbon in rice development stage at paddy field. *Journal of Zhejiang University* (Agriculture & Life Science) (浙江大学学报·农业与生命科学版), 2008, **34**(6): 662–668 (in Chinese)

---

作者简介 展 茗,女,1973年生,博士研究生,讲师.主要从事农业生态系统研究,发表论文10余篇. E-mail: zhanming@mail.hzau.edu.cn

责任编辑 张凤丽

---