DOI：10.11766/trxb202311030452 **CSTR：32215.14.trxb202311030452**
舒业勤，彭复细，雷文硕，姜彤彤，陈玉梅，刘伟民，张振华，夏银行. 稻油复种不同措施下土壤有机碳组分积累及其稳定性特征[J]. 土壤学报，2025，62（2）：495–503.
SHU Yeqin，PENG Fuxi，LEI Wenshuo，JIANG Tongtong，CHEN Yumei，LIU Weimin，ZHANG Zhenhua，XIA Yinhang. Characteristics of Soil Organic Carbon Fraction Accumulation and Stability under Different Rice-rape Rotation Measures[J]. Acta Pedologica Sinica，2025，62（2）：495–503.

稻油复种不同措施下土壤有机碳组分积累及其稳定性特征*

舒业勤[1, 2]，彭复细[1, 2]，雷文硕[1, 2]，姜彤彤[1]，陈玉梅[3]，刘伟民[1, 4]，张振华[1, 2†]，夏银行[1, 2†]

（1. 湖南农业大学资源学院，长沙 410128；2. 岳麓山实验室，长沙 410128；3. 衡阳市农业科学研究院，湖南衡阳 421000；4. 湖南省烟草公司长沙市公司，长沙 410007）

摘 要：复种油菜是南方稻区促进稳粮增油的重要种植模式，研究秸秆全量还田下，稻油复种不同种植措施对土壤有机碳积累及其稳定性特征的影响，对深入解析稻田土壤碳循环、充分利用冬闲田种植油菜具有重要意义。基于田间定位试验（8 年），以水稻-水稻-冬闲（稻稻闲）为对照，探究水稻–水稻–油菜（稻稻油）、水稻–油菜翻耕（稻油翻）和水稻–油菜免耕（稻油免）三种稻油复种处理下土壤有机碳及其组分积累特征。结果表明：相对稻稻闲，稻油复种各处理使有机碳含量在 0～20 cm 土层增加 5.28%～25.13%，尤其稻稻油处理，在 20～40 cm 土层增幅为 18.48%～43.97%，其中稻油翻和稻油免处理达到显著水平；除稻油翻处理在 0～20 cm 土层外，稻油复种均显著提高了不同层次土壤中矿物结合态有机碳（Mineral-associated organic carbon，MAOC）含量。同时，在 0～20 cm 和 20～40 cm 土层中，稻油复种各处理均显著降低了有机碳中颗粒态有机碳（Particulate organic carbon，POC）的比例，提高了其 MAOC 的占比，且在两个土层中提高比例分别为 2.31%～7.49% 和 1.56 %～2.66%。其原因可能是稻油复种不同程度地提高了 0～20 cm 土层中有机碳转化相关酶（β-葡萄糖苷酶、β-1,4-葡聚糖酶和漆酶）活性以及微生物生物量碳，进而促进土壤颗粒有机碳向矿物结合态有机碳的转化。综上，秸秆全量还田下冬季复种油菜促进了稻田土壤有机碳的积累，且提高了矿物结合态有机碳的占比，增强了土壤碳库的稳定性。

关键词：稻油复种；有机碳；有机碳组分；酶活性；稳定性
中图分类号：S158 **文献标志码：**A

Characteristics of Soil Organic Carbon Fraction Accumulation and Stability Under Different Rice–rape Rotation Measures

* 国家自然科学基金青年基金项目（42207409）、湖南省重点研发计划项目（2022NK2009）和湖南省自然科学基金青年基金项目（2022JJ40185）资助 Supported by the Youth Found of the National Natural Science Foundation of China（No. 42207409），the Science and Technology Innovation Program of Hunan Province，China（No. 2022NK2009），and the Youth Found of the Natural Science Foundation of Hunan Province，China（No. 2022JJ40185）

† 通讯作者 Corresponding author，E-mail：zhzh1468@163.com；bank.12345@163.com
作者简介：舒业勤（1999—），女，湖南长沙人，硕士研究生，主要研究方向为农田土壤碳循环过程。E-mail：996616730@qq.com

收稿日期：2023–11–03；收到修改稿日期：2024–03–19；网络首发日期（www.cnki.net）：2024–04–08

SHU Yeqin[1, 2], PENG Fuxi[1, 2], LEI Wenshuo[1, 2], JIANG Tongtong[1], CHEN Yumei[3], LIU Weimin[1, 4], ZHANG Zhenhua[1, 2†], XIA Yinhang[1, 2†]

(1. *College of Resource*, *Hunan Agricultural University*, *Changsha* 410128, *China*; 2. *Yuelushan Laboratory*, *Changsha* 410128, *China*; 3. *Hengyang Academy of Agricultural Sciences*, *Hengyang*, *Hunan* 421000, *China*; 4. *Changsha Branch of Hunan Provincial Tobacco Company*, *Changsha* 410007, *China*)

Abstract: 【Objective】Rape multiple-cropping is an important planting mode to promote grain stabilization and rapeseed increase in South China rice growing area. We explored the influence of soil organic carbon (SOC) accumulation and its stability characteristics under different rice–rape rotation measures with whole-straw returning, which is of great significance for in-depth analysis of soil carbon cycle in paddy fields by making full use of winter fallow fields to plant rape. 【Method】This study is based on an 8-year yield localization experiment. In contrast with rice–rice–winter fallow, we explored the characteristics of SOC and its fraction accumulation under three rice–rape rotation treatments: rice–rice–rape, rice–rape tillage, and rice–rape no tillage. 【Result】The results indicated that the content of SOC in 0–20 cm soil layer was increased by 5.28%–25.12% under the three rice–rape rotation treatments, especially under the rice–rice–rape treatment. Also, the increasing rate of SOC in 20–40 cm soil layer was 18.48%–43.97%, among which the rice–rape tillage and the rice–rape no tillage treatment reached a significant level. Except for rice–rape tillage treatment in 0–20 cm soil layer, the content of mineral-associated organic carbon (MAOC) from all the rice–rape rotation measures was increased significantly in different soil layers. At the same time, the ratio of particulate organic carbon (POC) to SOC was significantly decreased while the ratio of MAOC to SOC increased in each treatment from both 0–20 cm and 20–40 cm soil layer. The increasing rate of MAOC/SOC were 2.31%–7.49% and 1.56 %–2.66% in the two soil layers, respectively. Possible causes of these results may be that rice–rape rotation increased the activity of organic carbon invertase enzyme (β-glucosidase、β-1, 4-glucanase and Laccase) as well as microbial biomass carbon in 0–20 cm soil layer to varying degrees, thereby promoting the conversion of POC to MAOC. 【Conclusion】In summary, rape multiple-cropping in winter fallow not only promoted the accumulation of SOC in paddy field, but also increased the ratio of MAOC/SOC, ultimately enhancing the stability of soil carbon pool.

Key words: Rice–rape rotation; Soil organic carbon; Soil organic carbon fraction; Soil enzyme activity; Stability of soil organic carbon pool

稻田作为我国主要的耕地类型之一，贡献了全国粮食总量的 31.20%[1]。大部分稻田集中在南方地区，该地区光水热资源丰富，适合发展多熟制农业。2021—2023 年连续三年的中央一号文件均指出：要充分利用冬闲田发展油菜。水稻–油菜复种不仅保障了粮食的供应，也满足了人们对油料的需求。而粮油产量的提升很大程度上取决于土壤肥力，促进土壤有机碳积累是增加土壤肥力的有效途径，0.1%的有机质在南方稻区相当于 0.6 t·hm^{-2} 的粮食产量[2]。但是，稻油作物频繁的复种为土壤有机质的提升带来了新的挑战[3]。因此，提高稻油复种系统土壤有机碳积累，对保障国家粮油安全具有重要的作用。

秸秆等有机物料输入是土壤有机碳积累的主要来源[4]。有机物料还田后在土壤颗粒态有机碳（Particulate organic carbon，POC）和矿物结合态有机碳（Mineral-associated organic carbon，MAOC）之间的分配影响着土壤有机碳积累及其稳定性。其中，POC 通常是分解程度较低的碳，易被微生物利用，用于表征活性的土壤碳库；MAOC 是分解程度较高的碳，难以被微生物利用，其占比越高，土壤碳库相对越稳定，更利于有机碳积累[5]。POC 和 MAOC 的积累受到不同农业措施的调控。如，小麦–豌豆复种下秸秆还田促进了有机碳各组分的积累，但降低了 MAOC 的占比[6]；秸秆还田下，玉米–牧草复种相对单一玉米种植提高了 MAOC 的占比，增强了土壤碳库的稳定性[7]。全球 meta 分析表明，集约化种植下，复种频率的增加虽减少了土壤有机碳积累，但增加了 MAOC 含量；而免耕相对于常规耕作降低了土壤有机碳及其各组分含量[8]。上述研究表明，复种作物类型和耕作措施的不同均会改变土壤有机碳及其组分的积累。稻油复种作为典型的水旱轮作制度，其独特的土壤氧化还原条件有

别于单一的旱作和稻作复种系统[9]，不同的农业措施是如何影响土壤有机碳及其组分积累的，需要深入研究。

前期研究发现，在秸秆不还田条件下，长期稻稻油复种相对稻稻闲处理提高了水稻产量，但其土壤有机碳积累相对缓慢[10]；将油菜作为绿肥复种，降低了水稻光合碳向土壤积累，尤其是向 MAOC 中的分配[11]。秸秆还田作为增加土壤有机碳积累的重要措施，也是解决稻油频繁种植下农业固体废弃物的有效途径[12]，而其还田下不同复种频次和耕作措施对土壤有机碳及其组分积累影响的研究相对较少。基于此，本研究依托八年稻油复种定位试验，探究水稻和油菜秸秆全量还田下，水稻–水稻–油菜、水稻–油菜翻耕和水稻–油菜免耕等不同复种措施下土壤有机碳及其组分 POC 和 MAOC 的积累特征，以期为制定合理的稻油复种措施、充分利用秸秆，提高土壤有机碳积累和减少农业固体废弃物乱堆乱放引发的环境污染等问题提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　定位试验设计

试验地位于湖南省衡阳市农业科学院实验基地（26.85°N，112.49°E），年平均气温为 18.0 ℃，年平均降雨量为 1 322 mm。供试土壤为第四纪红壤发育的水稻土。定位试验始于 2014 年，包括四种稻油复种处理，分别为：水稻–水稻–冬闲（稻稻闲，RRF）、水稻–水稻–油菜（稻稻油，RRO）、水稻–油菜翻耕（稻油翻，ROT）、水稻–油菜免耕（稻油免，RON）。除免耕处理中水稻、油菜季均不翻耕外，其他处理中每季作物种植前均翻耕。每种处理设置 4 个重复小区，随机区组排列，每个小区面积为 50.9 m^2。所有处理除成熟的水稻籽粒和油菜籽粒外，秸秆全部还田。稻稻闲和稻稻油处理中两季稻秸秆总还田量分别约为 9 400 和 10 712 $kg·hm^{-2}$，稻稻油处理中油菜秸秆还田量约为 6 331 $kg·hm^{-2}$；稻油翻和稻油免处理中，一季稻秸秆还田量分别约为 8 420 和 6 411 $kg·hm^{-2}$，油菜秸秆还田量分别约为 12 740 和 11 895 $kg·hm^{-2}$。

在每年三熟处理中，每季作物的施肥量均为氮肥（N）120 $kg·hm^{-2}$、磷肥（P_2O_5）67.5 $kg·hm^{-2}$、钾肥（K_2O）120 $kg·hm^{-2}$；在每年两熟处理中，每季作物的 N、P_2O_5 和 K_2O 施用量均为 150、67.5 和 120 $kg·hm^{-2}$。每季作物肥料均采用尿素、过磷酸钙和氯化钾，按基肥、分蘖（或苗）肥和穗（或薹）肥施用，施用比例分别为 5∶2∶3、1∶0∶0 和 1∶0∶1。

1.2　土壤样品采集

连续耕种八年后，于 2022 年晚稻收获后采集土壤样品。利用土钻采集 0～20 cm 和>20～40 cm 土层样品，每个小区按照“S”形采样法，避开边行采集 5 个点，充分混匀为一个土壤样品，挑除可见的动植物残体和石砾后，按照四分法分取一部分土样保存于 4℃恒温冰箱，用于微生物生物量和酶活性的测定；另一部分土样自然风干后过筛，用于土壤有机碳、POC、MAOC 及其他土壤基本理化性质的测定。

1.3　指标测定

土壤基本理化性质（有机碳、全氮、pH）采用《土壤农化分析》[13]中的方法进行测定。土壤 β-葡萄糖苷酶（S-β-GC）和 β-1,4-葡聚糖酶（S-C1）活性的测定均采用比色法，其中底物均为对硝基苯酚[14]，单位以每天每克土壤生成 1 μmol 对硝基苯酚定义为一个酶活力单位（$U·g^{-1}$）。土壤漆酶活性则采用以 ABTS 为底物的方法进行测定[15]，单位以每天每克土壤生成 1 μmol　ABTS 自由基定义为一个酶活力单位（$U·g^{-1}$）。微生物生物量碳（MBC）含量测定采用氯仿熏蒸–K_2SO_4 浸提法[16]。

土壤 POC 和 MAOC 含量测定参照章晓芳等[17]的方法，具体步骤如下：称取 10.00 g 过 2 mm 筛的风干土样于 100 mL 离心管中，加入 50 mL 5 $g·L^{-1}$ 六偏磷酸钠溶液后放入 180 $r·min^{-1}$ 的摇床中连续振荡 18 h，振荡后的悬浊液过 0.053 mm 筛，利用去离子水少量多次冲洗筛中土壤至筛下流水呈无色，其中筛上部分为颗粒有机物（>0.053 mm，POM），筛下部分为矿物结合态有机物（<0.053 mm，MAOM），将两部分均置于 60 ℃烘箱内烘干。土样烘干后，研磨过 0.149 mm 筛，测定有机碳含量。土壤 POC 含量以及 POC/SOC（%）计算公式如下：

$$\text{POC 含量（g·kg}^{-1}\text{）}=\text{颗粒有机物中有机碳含量（g·kg}^{-1}\text{）}\times\frac{\text{颗粒有机物质量（g）}}{\text{土壤质量（g）}}$$

$$\text{POC/SOC}(\%)=\frac{\text{POC含量}(\text{g}\cdot\text{kg}^{-1})}{\text{SOC含量}(\text{g}\cdot\text{kg}^{-1})}\times 100$$

MAOC 和 MAOC/SOC（ % ）的计算与上述公式一致，将式中 POC 改为 MAOC 即可。

1.4 数据处理

所有试验数采用 Graph pad（9.3.1）和 SPSS 20. 0 进行作图和统计分析，在进行数据分析前分别利用 Shapro-Wilk 方法和 Levene's 方法检验数据的正态分布和方差齐性，均符合。处理间的差异采用单因素方差分析（One-way ANOVA）进行检验，利用邓肯（Duncan）法进行比较，$P < 0.05$ 时认为影响显著。环境因子与有机碳组分占比之间的相关关系利用皮尔逊相关性分析（Pearson correlation analysis）进行检验。

2 结 果

2.1 不同种植措施下土壤理化性质

经过八年复种后，稻稻闲、稻稻油、稻油翻和稻油免各处理 SOC 含量在 0～20 cm 土层分别为 15.08、18.86、17.66 和 15.87 g·kg^{-1}；在 20～40 cm 土层分别为 7.11、8.43、10.24 和 9.26 g·kg^{-1}（表 1）。相对稻稻闲处理，稻油复种各处理使 SOC 含量在 0～20 cm 土层增加 5.28%～25.13%，尤其稻稻油处理；在 20～40 cm 土层增幅达 18.48%～43.97%，其中稻油翻和稻油免处理达到显著水平（P <0.05）。这些结果表明稻油复种促进了土壤有机碳的积累，且稻稻油三季种植主要促进了表层 SOC，而稻油两季种植对深层次 SOC 积累的促进效果较为明显。

稻油复种下土壤全氮含量与 SOC 具有相似的趋势（表 1）。与稻稻闲相比，稻油复种各处理使全氮含量在 0～20 cm 土层显著增加 12.06%～43.94%，在 20～40 cm 土层显著增加 23.80%～31.62%（P <0.05）。相对稻稻闲，稻油复种各处理在 0～20 和 20～40 cm 土层均未显著改变土壤 C/N，稻油两季种植在 20～40 cm 显著降低了土壤 pH（P <0.05）。

2.2 不同种植措施下土壤 POC 和 MAOC 含量及其占有机碳比例

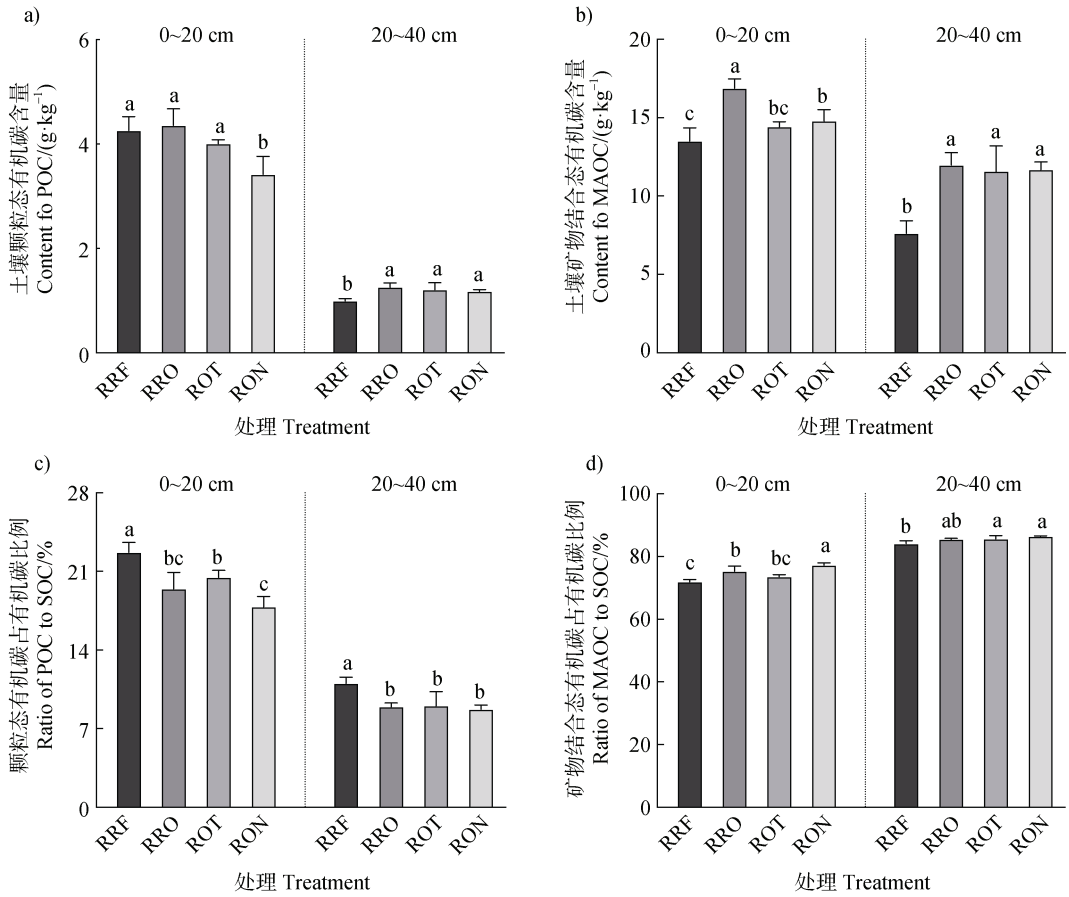
稻油复种不同程度地改变了 POC 和 MAOC 的含量（图 1a、图 1 b）。相对稻稻闲，仅稻油免处理显著改变了 0～20 cm 土层 POC 含量，使其含量降低 19.71%（P<0.05）；稻油复种各处理均显著增加了 20～40 cm 土层的 POC 含量，增幅为 18.62%～26.14%（P<0.05）。稻油复种各处理相比于稻稻闲使 MAOC 含量在 0～20 cm 和 20～40 cm 土层分别增

表 1 稻油复种不同种植措施对不同土层土壤理化性质的影响

Table 1 Effects of different rice-rape rotation measures on soil physical and chemical properties in different soil layers

土层 Soil layer	处理 Treatment	有机碳 SOC/（g·kg^{-1}）	全氮 TN/（g·kg^{-1}）	碳氮比 C/N	pH
0～20 cm	RRF	15.08±0.42b	1.98±0.24c	7.69±1.00a	6.41±0.26a
	RRO	18.86±0.73a	2.85±0.00a	6.61±0.25a	6.45±0.11a
	ROT	17.66±1.03a	2.25±0.11b	7.90±0.84a	6.57±0.27a
	RON	15.87±1.36b	2.22±0.14b	7.17±0.84a	6.46±0.22a
20～40 cm	RRF	7.11±1.46b	1.39±0.01c	5.12±1.05a	7.13±0.24a
	RRO	8.43±0.72ab	1.83±0.12a	4.63±0.58a	7.21±0.04a
	ROT	10.24±1.00a	1.75±0.04ab	5.86±0.55a	6.82±0.08b
	RON	9.26±1.39a	1.72±0.02b	5.38±0.78a	6.73±0.12b

注：RRF，稻稻闲处理；RRO，稻稻油处理；ROT，稻油翻处理；RON，稻油免处理。表中数值为平均值±标准差。同一列中同一土层无相同字母表示处理之间差异显著（P<0.05）；下同。Note：RRF，Rice-Rice-winter fallow；RRO，Rice-Rice-Oilseed rape；ROT，Rice-Oilseed rape tillage；RON，Rice-Oilseed rape no tillage. Each value in this table is the mean ± standard deviation. Different letter in the same column for the same soil layer indicates significant differences among treatments（P<0.05）. The same below.



注：图中误差线为标准差，同一土层不同处理无相同字母表示处理之间存在显著差异（$P<0.05$）；下同。Note：Error bars in the figures indicate standard deviation. Different treatments in the same soil layer without the same letter indicate significant differences among treatments（$P<0.05$）. The same below.

图 1　稻油复种不同种植措施下土壤颗粒态有机碳和矿物结合态有机碳含量及其占有机碳比例

Fig. 1　The content of POC and MAOC，as well as its ratio to SOC in different rice-rape rotation measures

加 6.75%～25.00%和 51.74%～57.06%，其中除了稻油翻处理下 0～20 cm 土层未达到显著外，其余均达到显著水平（$P<0.05$）。

稻油复种显著改变了 POC 和 MAOC 占 SOC 的比例（图 1c、图 1d）。相对稻稻闲，稻油复种各处理使 POC/SOC 比值在 0～20 cm 和 20～40 cm 分别显著降低 9.80%～21.33%和 18.01%～20.75%（$P<0.05$），使 MAOC/SOC 比值在 0～20 cm 和 20～40 cm 分别显著提高 2.31%～7.49%和 1.56 %～2.66%（$P<0.05$）。该结果表明稻油复种提高了土壤有机碳库的稳定性。

2.3　不同种植措施下土壤酶活性和微生物生物量及其与有机碳组分占比的相关性

在土壤碳转化相关酶活性方面，相对稻稻闲，稻稻油和稻油免处理均显著提高了 0～20 cm 和 20～40 cm 土层的β-葡萄糖苷酶和β-1,4-葡聚糖酶活性；稻油翻处理显著提高了 20～40 cm 土层 β-葡萄糖苷酶活性，以及 0～20 cm 和 20～40 cm 土层 β-1,4-葡聚糖酶活性（图 2a、图 2b，$P<0.05$）；稻稻油和稻油翻处理显著提高了 0～20 cm 土层漆酶活性，稻油复种各处理均显著提高了 20～40 cm 土层漆酶活性，尤其稻稻油处理（图 2c，$P<0.05$）。在微生物生物量方面，与稻稻闲相比，稻稻油处理显著提高了 20～40 cm 土层 MBC 含量（图 2d，$P<0.05$）。

相关性分析表明，POC/SOC 比值在 0～20 cm 土层与 β-1,4-葡聚糖酶活性呈显著负相关，在 20～40 cm 土层与土壤有机碳和 β-1,4-葡聚糖酶活性均呈显著负相关；MAOC/SOC 比值在 0～20 cm 土层与土壤 β-葡萄糖苷酶活性、β-1,4-葡聚糖酶活性呈显著正相关，在 20～40 cm 土层与土壤有机碳和 β-1,4-

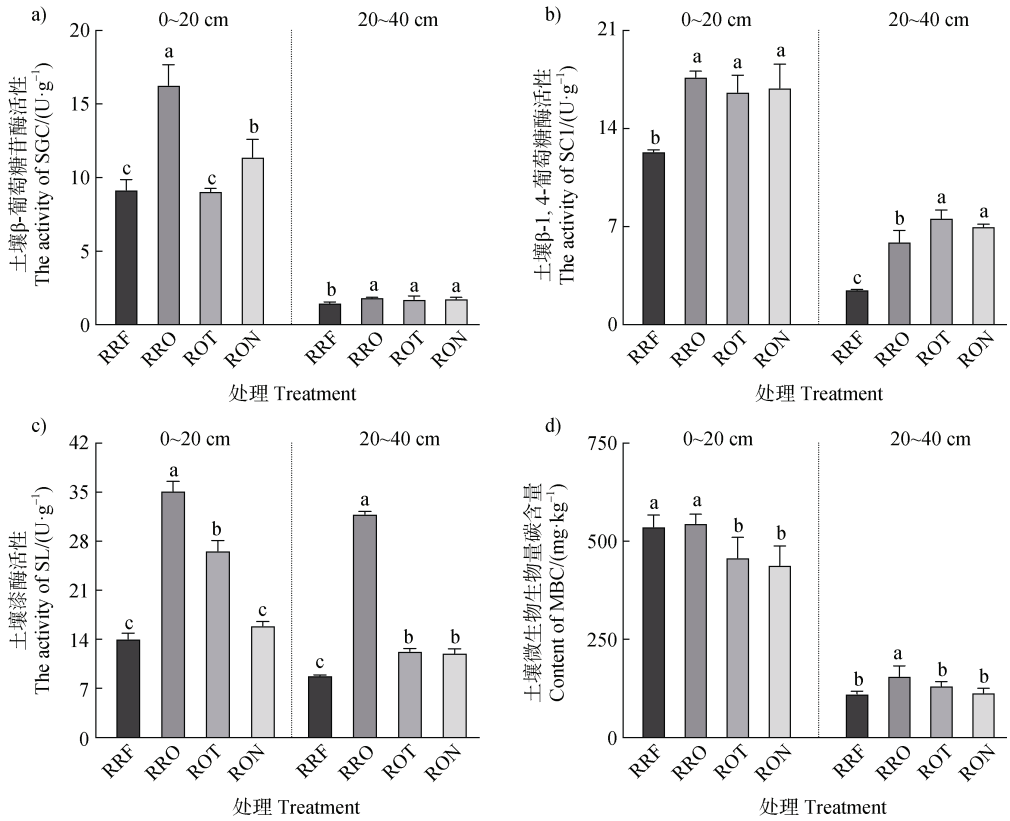


图 2 稻油复种不同种植措施下土壤酶活性和微生物生物量碳含量

Fig. 2 The soil enzyme activities and the content of MBC in different rice-rape rotation measures

表 2 稻油复种不同种植措施下土壤酶活性和微生物生物量与有机碳组分占比的相关性分析

Table 2 Correlation analysis between the ratio of organic carbon fractions and soil enzyme activities and microbial biomass under different rice-rape rotation measures

土层 Soil layer	有机碳组分占比 Ratio of SOC fraction	SOC	MBC	SGC	SC1	SL
0～20 cm	POC/SOC	–0.271	0.345	–0.471	–0.699**	–0.206
	MAOC/SOC	0.187	–0.393	0.502*	0.639**	0.134
20～40 cm	POC/SOC	–0.714**	–0.372	–0.505	–0.824**	–0.380
	MAOC/SOC	0.662**	0.132	0.459	0.785**	0.147

注：SGC 代表 β-葡萄糖苷酶活性，SC1 代表 β-1,4-葡聚糖酶活性，SL 代表漆酶活性；*代表不同处理间存在显著差异（$P<0.05$），**代表不同处理间存在极显著差异（$P<0.01$）。Note：SGC represents the activities of β-glucosidase，SC1 represents the activities of β-1,4-glucanase，and SL represents the activities of Laccase. * represents significant differences between different treatments（$P<0.05$），and ** represents very significant differences between different treatments（$P<0.01$）.

葡聚糖酶活性均呈显著正相关（表 2）。该结果表明稻油复种提高了土壤有机碳库的稳定性。

3 讨 论

3.1 稻油复种对土壤有机碳积累的影响

水稻–油菜复种是充分利用冬闲田的重要举措，是保障国家粮油安全的有效途径。稻油作物频繁复种对土壤地力的要求越来越高，促进该系统下土壤有机碳积累对提升粮油产量和减少温室气体排放均具有重要的意义。连续八年的定位试验结果表明，在水稻和油菜秸秆全量还田条件下，相对稻稻闲，无论是在双季稻基础上增加一季油菜种植，还是单季稻与油菜复种，均能提高稻田土壤有机碳含

量（表 1）。这有别于秸秆不还田条件下，与稻稻闲相比，稻稻油复种减缓了土壤有机碳积累的结果[10]，表明了秸秆还田可以扭转稻油作物频繁复种对地力的不利影响，促进土壤有机碳积累，进而培肥土壤。其主要原因可能是增加或替换一季油菜秸秆还田均向土壤多输入大量的碳源，并增加了碳转化相关酶活性（图 2a–图 2c），促进了秸秆碳源向土壤有机碳的转化与积累。该措施也能有效防止农业生产中频繁种植造成的大量秸秆乱堆乱放引发的环境风险。进一步分析发现，相对于稻稻闲处理，稻稻油三季种植对 0～20 cm 表层土壤有机碳积累促进作用较强，而稻油两季复种则对犁底层以下 20～40 cm 土层土壤有机碳积累的促进效果更为显著（表 1）。这可能是由于水稻根系集中在 0～20 cm 土层，而油菜根系发达，入土深度可达 40～100 cm[18]，且单季稻相对于双季稻种植后复种的油菜生育期长，生物量大、根系更为发达，通过根系分泌物或残体能向土壤输入更多的碳。以往研究表明，集约化种植系统中常规耕作相对于免耕更有利于有机碳积累[8]。在本研究中，与稻油免耕相比，稻油翻耕促进了 0～20 cm 土层有机碳的含量，而在 20～40 cm 土层没有显著差异。这表明 0～20 cm 土层中的翻耕措施有利于秸秆与土壤混合，促进秸秆碳向土壤有机碳转化；在稻田犁底层以下的 20～40 cm 土层中，油菜根系及其分泌物是有机碳积累的主要来源，其在免耕和常规耕作措施下可能无显著差异。此外，秸秆还田量是影响土壤有机碳含量变化的重要因素之一[19]，在本研究中，稻油翻相较于稻油免处理具有更高的秸秆还田总量也是导致两者在 0～20 cm 土层有机碳含量存在差异的原因之一。

3.2　稻油复种对土壤有机碳组分及其稳定性的影响

土壤 POC 与 MAOC 之间的分配规律可以表征有机碳的抗分解能力及其被微生物分解的难易程度，指示土壤碳库的稳定性，在一定程度上反映土壤肥力和土壤质量状况[20]。因此，探明稻油复种下土壤 POC 和 MAOC 的含量及其占比，有助于揭示土壤有机碳积累规律及其稳定性特征。本研究表明稻油复种不同程度地影响了 POC 和 MAOC 的积累（图 1）。在 0～20 cm 土层，除稻油免降低了 POC 含量外，其余各处理对 POC 积累无显著影响，但稻油复种各处理均显著增加了该层 MAOC 含量。其原因可能是稻稻油和稻油翻两个处理下大量的秸秆还田后经过翻耕与土壤充分接触，既提高了与易分解碳源相关的 β-葡萄糖苷酶和 β-1,4-葡聚糖酶活性，也提高了与木质素等难分解碳源相关的漆酶活性（图 2a–图 2c），使秸秆各组分分解较完全，进而促使分解后的碳与矿物相结合形成 MAOC[21]，而 POC 变化不显著；在稻油免处理中，秸秆在还田后与土壤表面接触，仅提高了与易分解碳相关的酶活性（图 2a、图 2b），易分解碳源彻底分解后易与矿物结合[22]，使其 POC 与进行翻耕的稻稻闲处理相比具有较低含量，而其 MAOC 含量较高。在 20～40 cm 土层，稻油复种各处理均显著增加了 POC 和 MAOC 含量（图 1a、图 1b），这可能是复种的油菜根系入土较深，增加了深层土壤根系及其分泌物碳源，使 POC 和 MAOC 形态的碳含量均显著增加[23]。

深入分析发现，稻油复种各处理在 0～20 和 20～40 cm 土层均显著降低了 POC 占有机碳的比例，同时提高了 MAOC 的占比（图 1c、图 1d），表明在秸秆还田下，稻油复种能够显著提高土壤碳库的稳定性，有利于有机碳的长效积累。稻油复种相对于稻稻闲增加了植物种植多样性，这与植物多样化种植可以增强土壤碳库稳定性的研究结果相一致[24]。土壤有机碳的稳定化过程是由微生物活动驱动的[25]，稻油复种下大量的秸秆、根系及其分泌物进入土壤后，显著提高了表层和深层土壤碳转化相关酶活性，且不同程度提高了深层土壤微生物生物量（图 2），增强了微生物对碳源的分解和利用，进而促进输入的碳源向 MAOC 中分配。

3.3　稻油复种对土壤其他性质的影响及其质量评价

稻油复种秸秆还田不仅促进了土壤有机碳积累，提高了碳库的稳定性，同时对土壤其他理化性质也产生了一定影响。在本研究中，土壤全氮含量与有机碳积累趋势基本一致，且土壤 C/N 比值在各处理间无显著差异（表 1），这表明在秸秆全量还田条件下，稻油复种促进了土壤碳氮的协同积累。全氮的积累在一定程度上可以提高土壤氮素供应能力。我们前期研究表明长期稻油复种通过提高系统内氮素利用效率，促进水稻增产 5.31%～7.38%[10]。在本研究中，稻稻油相对于稻稻闲使两季水稻平均增产 14.78%。值得一提的是，与稻稻闲相比，稻稻油三季复种中多一季的油菜秸秆还田对 0～20 和 20～40 cm 土层 pH 无显著影响，这与其他研究中秸

秆还田会造成土壤 pH 下降的结果不同[26]，表明了秸秆还田不会导致稻稻油三季复种系统土壤酸化。然而，稻油两季复种与稻稻闲、稻稻油三季复种相比，均使 20～40 cm 土层 pH 下降（表 1），这可能是两季复种下油菜生育期长，输入的根系残体和根际分泌物多，且旱作时间相对较长，引起了深层土壤的 pH 下降[27]。此外，在本试验中，相较于稻油两季复种，稻稻油处理下具有较低的秸秆还田总量，但其表层土壤有机碳含量却较高（表 1），这表明稻稻油三季复种模式具有更高的固碳效率。因此，无论是从保障粮油安全的角度，还是培育肥沃和健康土壤的角度，在南方地区开展稻稻油三季复种结合秸秆还田是一种相对较好的农业耕种措施。

4 结 论

秸秆全量还田下，稻油复种各措施均能促进不同层次土壤有机碳积累，显著提高 MAOC 占总有机碳的比例，增强有机碳库稳定性，有利于土壤碳库的长效储存。其中，稻稻油复种对表层土壤有机碳提升更为显著，且对各层土壤 pH 均无显著影响。在不考虑劳动力的条件下，从保障粮油产量、培肥土壤和提高土壤质量的角度考虑，稻稻油复种是一种相对较优的复种模式。

参考文献（References）

[1] National Bureau of Statistics of China. China statistical yearbook[M]. Beijing：China Statistics Press，2022. [中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京：中国统计出版社，2022.]

[2] Pan G X，Zhao Q G. Study on evolution of organic carbon stock in agricultural soils of China：Facing the challenge of global change and food security[J]. Advances in Earth Science，2005，20（4）：384—393. [潘根兴，赵其国. 我国农田土壤碳库演变研究：全球变化和国家粮食安全[J].地球科学进展，2005，20（4）：384—393.]

[3] Shen R F，Yan X Y，Zhang G L，et al. Status quo of and strategic thinking for the development of soil science in China in the new era[J]. Acta Pedologica Sinica，2020，57（5）：1051—1059. [沈仁芳，颜晓元，张甘霖，等. 新时期中国土壤科学发展现状与战略思考[J].土壤学报，2020，57（5）：1051—1059.]

[4] Zhao Y，Zhang J，Müller C，et al. Temporal variations of crop residue effects on soil N transformation depend on soil properties as well as residue qualities[J]. Biology and Fertility of Soils，2018，54：659—669.

[5] Angst G，Mueller K E，Castellano M J，et al. Unlocking complex soil systems as carbon sinks：Multi-pool management as the key[J]. Nature Communications，2023，14：2967.

[6] Wu J，Cai L Q，Zhang R Z，et al. Distribution of soil particulate organic carbon fractions as affected by tillage practices in dry farmland of the Loess Plateau of central Gansu Province[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture，2018，26（5）：728—736. [武均，蔡立群，张仁陟，等. 耕作措施对旱作农田土壤颗粒态有机碳的影响[J]. 中国生态农业学报，2018，26（5）：728—736.]

[7] Rui Y C，Jackson R D，Cotrufo M F，et al. Persistent soil carbon enhanced in Mollisols by well-managed grasslands but not annual grain or dairy forage cropping systems[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences，2022，119（7）：e2118931119.

[8] Aaron M P，Aison E K，Cotrufo M F. Restoring particulate and mineral-associated organic carbon through regenerative agriculture[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences，2023，120（21）：e2217481120.

[9] Chen X B，Hu Y J，Xia Y H，et al. Contrasting pathways of carbon sequestration in paddy and upland soils[J]. Global Change Biology，2021，27（11）：2478—2490.

[10] Lu S，Zhang Z H. Long-term rice-rice-rape rotation significantly improved soil structure and rice yield[J]. Chinese Journal of Soil Science，2018，49（2）：409—414. [卢胜，张振华. 长期稻油轮作改良土壤结构提高水稻产量[J]. 土壤通报，2018，49（2）：409—414.]

[11] Liu W M，Shu Y Q，Xia Y H，et al. Distribution and stabilization of photosynthetic carbon in rice-soil system under long-term multiple cropping of green manure[J]. Acta Pedologica Sinica，2023，60（4）：1067—1076. [刘伟民，舒业勤，夏银行，等. 长期复种绿肥下光合碳在水稻-土壤系统中的分配与稳定[J]. 土壤学报，2023，60（4）：1067—1076.]

[12] Cheng C，Wang J J，Cheng H H，et al. Effects of straw returning and tillage system on crop yield and soil fertility quality in paddy field under double-cropping-rice system[J]. Acta Pedologica Sinica，2018，55（1）：247—257. [成臣，汪建军，程慧煌，等. 秸秆还田与耕作方式对双季稻产量及土壤肥力质量的影响[J]. 土壤学报，2018，55（1）：247—257.]

[13] Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. 3rd ed. Beijing：China Agriculture Press，2000. [鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京：中国农业出版社，2000.]

[14] Guan S Y. Soil enzymes and its research methods[M]. Beijing：Agriculture Press，1986. [关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京：农业出版社，1986.]

[15] Auriol M，Filali-Meknassi Y，Tyagi R D，et al. Laccase-catalyzed conversion of natural and synthetic hormones from a municipal wastewater[J]. Water

Research，2007，41（15）：3281—3288.

[16] Vance E D，Brookes P C，Jenkinson D S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C[J]. Soil Biology & Biochemistry，1987，19（6）：703—707.

[17] Zhang X F，Zheng S M，Xia Y H，et al. Responses of soil organic carbon fractions to land use types in hilly red soil regions，China[J]. Environmental Science，2020，41（3）：1466—1473. [章晓芳，郑生猛，夏银行，等. 红壤丘陵区土壤有机碳组分对土地利用方式的响应特征[J]. 环境科学，2020，41（3）：1466—1473.]

[18] Zhang Y Y，Mo F，Han J，et al. Research progress on the native soil carbon priming after straw addition[J]. Acta Pedologica Sinica，2021，58（6）：1381—1392. [张叶叶，莫非，韩娟，等. 秸秆还田下土壤有机质激发效应研究进展[J]. 土壤学报，2021，58（6）：1381—1392.]

[19] Cong P，Pang H C，Wang J，et al. Effect of returning chopped and pelletized straw at a high rate enhancing soil organic carbon in subsoil of farmlands of black soil[J]. Acta Pedologica Sinica，2020，57（4）：811—823. [丛萍，逄焕成，王婧，等. 粉碎与颗粒秸秆高量还田对黑土亚耕层土壤有机碳的提升效应[J]. 土壤学报，2020，57（4）：811—823.]

[20] Cotrufo M F，Ranalli M G，Haddix M L，et al. Soil carbon storage informed by particulate and mineral-associated organic matter[J]. Nature Geoscience，2019，12（12）：989—994.

[21] Lavallee J M，Soong J L，Cotrufo M F. Conceptualizing soil organic matter into particulate and mineral-associated forms to address global change in the 21st century[J]. Global Change Biology，2020，26：261—273.

[22] Niu C Y，Weng L P，Lian W L，et al. Carbon sequestration in paddy soils：Contribution and mechanisms of mineral-associated SOC formation[J]. Chemosphere，2023，333：138927.

[23] Villarino S H，Pinto P，Jackson R B，et al. Plant rhizodeposition：A key factor for soil organic matter formation in stable fractions[J]. Science Advances，2021，7（16）：eabd3176.

[24] Hu Q J，Thomas B W，Powlson D，et al. Soil organic carbon fractions in response to soil，environmental and agronomic factors under cover cropping systems：A global meta-analysis[J]. Agriculture，Ecosystems & Environment，2023，355：108591.

[25] Sokol N W，Bradford M A. Microbial formation of stable soil carbon is more efficient from belowground than aboveground input[J]. Nature Geoscience，2019，12（1）：46—53.

[26] Liang F，Li B Z，Vogt R D，et al. Straw return exacerbates soil acidification in major Chinese croplands[J]. Resources，Conservation and Recycling，2023，198：107176.

[27] Wei L，Ge T D，Zhu Z K，et al. Comparing carbon and nitrogen stocks in paddy and upland soils：Accumulation，stabilization mechanisms，and environmental drivers[J]. Geoderma，2021，398：115121.

（责任编辑：卢　萍）