

DOI: 10.11766/trxb202112060640

刘伟民, 舒业勤, 夏银行, 向红坤, 高鹏, 赵紫薇, 黄晶, 高菊生, 张振华. 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.

LIU Weimin, SHU Yeqin, XIA Yinhang, XIANG Hongkun, GAO Peng, ZHAO Ziwei, HUANG Jing, GAO Jusheng, ZHANG Zhenhua. 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.

长期复种绿肥下光合碳在水稻-土壤系统中的分配与稳定*

刘伟民¹, 舒业勤¹, 夏银行¹, 向红坤¹, 高鹏¹, 赵紫薇¹, 黄晶²,
高菊生^{2†}, 张振华^{1†}

(1. 湖南农业大学资源学院, 长沙 410128; 2. 中国农业科学院衡阳红壤实验站/湖南祁阳农田生态系统国家野外科学观测研究站, 湖南祁阳 426182)

摘要: 冬季复种绿肥是我国南方稻区传统的培肥增产模式, 探究长期冬种绿肥下光合碳在水稻-土壤系统中的分配规律, 对深入解析稻田土壤碳循环、充分发挥绿肥的生态功能具有重要意义。基于稻-稻-绿肥复种长期定位试验(38年), 针对稻-稻-紫云英、稻-稻-油菜和稻-稻-休闲三种处理, 采用¹³C-CO₂脉冲标记技术, 研究长期冬季复种绿肥下光合碳在早稻季分蘖期水稻-土壤系统中的分配特征。结果表明, 与冬季休闲处理相比, 复种紫云英和油菜处理使早稻地上部¹³C-光合碳积累量每穴分别增加19.9 mg和80.6 mg; 复种紫云英处理使早稻地下部¹³C-光合碳积累量每穴降低2.7 mg, 而复种油菜处理对早稻地下部¹³C-光合碳积累量无显著影响。同时, 冬季复种紫云英和油菜减少了早稻¹³C-光合碳向土壤的分配, 积累量每穴分别降低7.6 mg和7.8 mg; 复种紫云英处理对水稻¹³C-光合碳在土壤颗粒有机碳(POC)和矿物结合态有机碳的分配比例无显著影响, 复种油菜处理促进了水稻¹³C-光合碳向土壤POC中的分配, 使¹³C-POC的占比增加35.3%。综上, 长期复种绿肥促进了水稻分蘖期光合碳在水稻-土壤系统中的积累, 与冬季休闲处理相比, 冬季复种绿肥使光合碳在水稻-土壤系统中积累量增加3.7%~28.0%; 增加了光合碳向水稻地上部的分配, 减少了其向水稻地下部及土壤中的分配比例; 且复种油菜处理减弱了土壤中水稻光合碳的稳定性; 从增加有机碳总量和光合碳稳定性的角度可知, 复种紫云英是相对较好的一种冬季复种绿肥模式。

关键词: 稻田; 绿肥; 光合碳; ¹³C脉冲标记; 有机碳组分

中图分类号: S158 **文献标志码:** A

Distribution and Stabilization of Photosynthetic Carbon in Rice-soil System Under Long-term Multiple Cropping of Green Manure

LIU Weimin¹, SHU Yeqin¹, XIA Yinhang¹, XIANG Hongkun¹, GAO Peng¹, ZHAO Ziwei¹, HUANG Jing², GAO Jusheng^{2†}, ZHANG Zhenhua^{1†}

* 湖南省科技创新计划项目(2021RC2081)、湖南省重点研发计划项目(2022NK2009)和国家绿肥产业技术体系项目(CARS-22)资助
Supported by the Science and Technology Innovation Program of Hunan Province, China (No. 2021RC2081), the Key Research and Development Project of Hunan Province, China (No. 2022NK2009) and China Agriculture Research System (No. CARS-22)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: gaojusheng@caas.cn; zhzh1468@163.com

作者简介: 刘伟民(1997—), 男, 湖南长沙人, 硕士研究生, 主要研究方向为农田土壤碳氮循环过程。E-mail: 310893248@qq.com

收稿日期: 2021-12-06; 收到修改稿日期: 2022-03-31; 网络首发日期(www.cnki.net): 2022-06-22

(1. College of Resource college of Resources, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China; 2. National Field Observation and Research Station of Farmland Ecosystem in Qiyang, Hunan Province/Hengyang Red Soil Experimental Station, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Qiyang, Hunan 426182, China)

Abstract: 【Objective】 Winter multiple cropping of green manures such as Chinese milk vetch and rapeseed is a traditional system for improving soil fertility and crop yield in the rice field in southern China. Thus, it is of great importance to analyze the soil carbon (C) cycle and the ecological functions of green manure by exploring the distribution of photosynthetic C in a rice-soil system under long-term winter cropping of green manure. 【Method】 In this study, based on a 38-year rice-rice-green manure cropping experiment, the ^{13}C -CO₂ pulsing labeling technology was used to study the distribution characteristics of photosynthetic C in a rice-soil system at the tillering stage of early rice season under long-term green manure (Chinese milk vetch, rapeseed and winter fallow). At the same time, the stability of ^{13}C -photosynthetic C in soil was studied by measuring the content and distribution ratio of ^{13}C in particulate organic C (POC) and mineral associated-organic C (MAOC). 【Result】 The results showed that the biomass of rice at the tillering stage was not significantly changed but the root/shoot ratio was decreased by 12.6%–19.4% with the long-term multiple cropping of green manure. Compared with winter fallow treatment, the cropping of green manure promoted the distribution of ^{13}C -photosynthetic C in the shoot of early rice, and the accumulation of ^{13}C -photosynthetic C was increased by 19.9 mg·plant⁻¹ and 80.6 mg·plant⁻¹ in cropping of Chinese milk vetch and rapeseed treatments, respectively. The ^{13}C -photosynthetic C accumulation in the root of early rice was decreased by 2.7 mg·plant⁻¹ under Chinese milk vetch treatment, while it was not significantly affected by rapeseed treatment. This result infers that long-term multiple cropping of green manure increased soil nutrient supply and reduced the ratio of root to shoot of early rice, which allows the rice to distribute more biomass to the shoot. Meanwhile, the cropping of Chinese milk vetch and rapeseed treatments reduced the distribution of ^{13}C -photosynthetic C in the soil by 7.6 mg·plant⁻¹ and 7.8 mg·plant⁻¹ respectively. The proportions of rice ^{13}C -photosynthetic C to POC and MAOC were not significantly affected by the cropping of Chinese milk vetch, but the proportion of ^{13}C -photosynthetic C in POC was increased by 35.3% with multiple cropping of rapeseed. 【Conclusion】 The long-term multiple cropping of green manure promoted the accumulation of rice photosynthetic C in the plant-soil system. Compared with winter fallow treatment, the accumulation of photosynthetic C in the rice-soil system increased by 3.7%–28.0% in cropping of Chinese milk vetch and rapeseed treatments. On the other hand, the long-term multiple cropping of green manure increased the distribution of photosynthetic C to the shoot of rice and reduced the proportion of photosynthetic C to the root of rice and soil. Moreover, the stability of rice photosynthetic C in soil was weakened by multiple cropping of rapeseed treatments. From the perspective of increasing the total organic carbon and the stability of photosynthetic carbon, the cropping of Chinese milk vetch treatment is a better system for winter multiple cropping of green manures.

Key words: Paddy field; Green manure; Photosynthetic carbon; ^{13}C -CO₂ pulsing labeling; Soil organic carbon fraction

土壤有机碳是陆地生态系统最大的碳库,也是大气 CO₂ 的主要来源。增加土壤有机碳固持是缓解全球气候变化和提升农田土壤肥力的重要途径^[1]。水稻是我国主要粮食作物,我国稻田面积达 3 000 多万公顷,占全国耕地面积的 27.4%,水稻产量占全国粮食作物总产的 36.1%^[2]。研究表明,过去 20 多年间我国农田土壤增加的有机碳有 74% 来源于水稻土耕层有机碳的积累^[3],水稻土表现出明显的固碳效应,且其有机碳处于持续增加状态,年平均固碳效率为 0.28 t·hm⁻²^[4]。水稻光合碳是稻田土壤有机碳积累的重要来源。前人^[5]研究表明,约有 4%~6%

的光合碳通过根际沉积作用进入稻田土壤有机碳库。光合碳进入土壤后,一部分以游离态形式赋存于粒径较大 (>0.53 μm) 的土壤颗粒中,构成土壤颗粒态有机碳 (Particulate Organic Carbon, POC),易被微生物利用,周转速率快;另外一部分则被粒径小于 0.53 μm 矿物颗粒吸附或包封,不易被微生物利用,形成相对稳定的矿物结合态有机碳 (Mineral-Associated Organic Carbon, MAOC)。光合碳在 POC 和 MAOC 之间的分配规律可以表征土壤有机碳抗分解能力及其被微生物利用的难易程度,指示土壤有机碳的稳定性。因此,研究光合碳在水

稻-土壤系统中的分配,对进一步认识稻田土壤有机碳积累规律与稳定性特征具有重要意义。

光合碳在植物-土壤系统中的运输和分配受土壤类型、作物品种及其生育期和农艺措施等因素影响^[6-9]。通过盆栽 ^{13}C - CO_2 标记试验结果可知,施氮促进了光合碳在水稻-土壤系统中的积累,提高了根际土壤 ^{13}C 的累积和回收率^[10],且在较高施氮水平下,水稻光合碳通过根际沉积的积累作用更强^[11];施磷也可以增加水稻-土壤系统中光合碳含量,却降低了光合碳在水稻土中的分配,尤其是在根际土壤 POC 中的积累^[12]。上述研究表明施肥措施不同会改变光合碳在水稻-土壤系统中的分配。然而,光合碳在植物-土壤系统中的积累及其通过根际沉积作用向土壤中的分配与稳定对施肥措施的响应规律尚不完全清晰,仍需深入探索。

冬季复种绿肥是增加水稻土有机碳积累、培肥土壤的重要农艺措施^[13]。紫云英和油菜是南方稻区稻-稻-绿肥复种系统中常见的绿肥种类。这两种绿肥长期与双季稻复种可使土壤有机碳含量增加 5%~8%,且复种不同绿肥引起的土壤有机碳积累差异明显^[14-15]。研究发现,冬季复种绿肥会影响水稻根系生长,改变水稻根冠比^[16-17]。水稻根系生长变化影响光合碳向地下部的分配,进而造成其在不同有机碳组分中的积累差异^[18]。长期不同绿肥复种处理下光合碳在水稻-土壤系统中的分配规律如何?尤其是水稻光合碳通过根际沉积作用对土壤有机碳积累的贡献尚有待研究。

目前,关于水稻光合碳的研究多基于室内盆栽试验展开,而在田间管理条件下光合碳在水稻-土壤中的分配规律鲜有报道。本研究依托 38 年稻-稻-绿肥复种定位试验,采用 ^{13}C -脉冲标记技术,研究长期冬季复种紫云英、油菜处理下光合碳在水稻-土壤系统中的分配规律,及其通过根际沉积作用在土壤 POC 和 MAOC 中的积累特征,以期制定合理的稻田绿肥复种措施,提高水稻土有机碳积累、培肥土壤提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 定位试验设计

试验地位于湖南祁阳中国农业科学院红壤实验站(26°45'N, 111°52'E),海拔 150 m,年平均气

温和降水量分别为 18.3℃和 1 250 mm。供试土壤为第四纪红色黏土发育的水稻土,土壤质地为壤质黏土。定位试验始于 1982 年,采用双季稻-绿肥种植模式。设置双季稻-紫云英(DDZ)、双季稻-油菜(DDY)和双季稻-休闲(DDX)3 个处理,其中 DDX 从 1985 年开始设置。每个处理设置三个重复,随机区组排列,小区面积为 37.5 m²(2.5 m×15.0 m)。紫云英和油菜播种量分别为 7.5 kg·hm⁻²、37.5 kg·hm⁻²。绿肥种植期间不施肥,于晚稻收割前 10~15 d 将绿肥种子撒播于田间,次年早稻移栽前 2 周左右将绿肥全部翻压还田,水稻秸秆不还田。所有处理水稻季施肥量一致,早稻和晚稻施肥量相同,N、P₂O₅和 K₂O 的施用量分别为 153 kg·hm⁻²、84 kg·hm⁻²和 129 kg·hm⁻²,分为基肥和追肥两次撒施。基肥施用三元(14-14-14)复合肥 600 kg·hm⁻²;追肥为尿素和 KCl,施用量分别为 N 69 kg·hm⁻²和 K₂O 45 kg·hm⁻²。水稻季种植规格一致,收获后,所有稻草移走不还田。标记试验开始前(2020 年 6 月 5 日),各处理土壤基本理化性质见表 1。

1.2 ^{13}C - CO_2 标记试验

在早稻分蘖旺盛期(2020 年 6 月 6 日至 2020 年 6 月 12 日)进行 ^{13}C - CO_2 标记试验,标记试验装置及方法参考 Lu 和 Conrad^[19]建立的方法。标记筒由透明聚氯乙烯塑料管制成,内径 15 cm,下端(开口)埋入土壤 15 cm,上端(封闭)高出土壤 75 cm,可揭开。侧面装有橡胶管及三通阀,供注入标记气体。根据每个小区的生长情况,选取一穴(本试验中水稻插秧时两株水稻苗插作一穴)具有代表性的水稻植株(每个处理三小区,每小区一穴),进行 7 d 的脉冲标记,每天标记 8 h。每天 9:00 开始标记,每隔一小时向标记筒内注入 35 mL 的 ^{13}C - CO_2 (99 atom% ^{13}C),16:00 注入最后一次,1 h 后结束标记(即每天注入 8 次),每天标记结束后揭开标记筒,整个标记试验每穴水稻共使用 1 960 mL 的 ^{13}C - CO_2 (99 atom% ^{13}C)。7 d 后标记试验结束,采集水稻及土壤样品。

1.3 样品采集

标记结束后,轻轻从标记筒中取出整穴水稻,将水稻按地上部、地下部分开后用自来水清洗干净,然后在 105℃下杀青 30 min,在 60℃下烘干至恒重。同时采集标记筒内深度 15 cm 的土壤,经挑除石块和动植物残体、混匀后风干,室温保存。

表 1 供试土壤基本理化性质

		Table 1 Physical and chemical properties of tested soil							
处理 Treatment	pH	有机碳 SOC/ (g·kg ⁻¹)	全氮 TN/ (g·kg ⁻¹)	碳氮比 C/N	全磷 TP/ (g·kg ⁻¹)	全钾 TK/ (g·kg ⁻¹)	碱解氮 AN/ (mg·kg ⁻¹)	有效磷 AP/ (mg·kg ⁻¹)	速效钾 AK/ (mg·kg ⁻¹)
DDZ	5.75±0.06a	24.79±1.91a	2.29±0.05a	10.83±1.06a	1.25±0.05a	10.71±0.37a	156.79±6.35a	73.30±3.51b	115.55±14.17a
DDY	5.73±0.15a	23.25±0.87ab	2.26±0.07a	10.29±0.69a	1.28±0.20a	10.34±1.36a	150.09±5.74a	95.83±10.85a	93.75±4.51b
DDX	5.65±0.06a	21.76±0.21b	2.20±0.09a	9.92±0.39a	1.38±0.05a	11.49±0.66a	146.76±2.96a	75.77±12.18b	96.67±3.46b

注: DDZ, 双季稻-紫云英复种; DDY, 双季稻-油菜复种; DDX, 双季稻-冬闲处理。表中数值为三个实验重复的“平均值±标准差”。同列不同字母表示处理之间存在显著差异 ($P<0.05$)。下同。Note: DDZ, Rice-Rice-Chinese milk vetch; DDY, Rice-Rice-Rapeseed; DDX, Rice-Rice-winter fallow. Each value in the table is the mean ± standard deviation of 3 repetitions. Different letters in the same column represent significant differences among different treatments ($P<0.05$). The same below.

1.4 指标测定

土壤基础理化性质采用《土壤农化分析》^[20]中的方法进行测定。

POC 和 MAOC 含量测定参照章晓芳等^[21]的方法, 具体操作如下: 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, 以 180 r·min⁻¹ 在摇床上连续振荡 18 h, 振荡后的悬浊液过 53 μm 筛, 用少量去离子水多次冲洗筛子, 至筛下流水无色, 其中筛上部分为颗粒有机物 (> 53 μm, POM), 筛下部分为矿物结合态有机物 (< 53 μm, MAOM), 分别于 60℃ 下烘干。烘干后的有机物研磨过 0.149 mm 筛, 测定有机碳含量。土壤中 POC、颗粒态氮 (Particulate Total Nitrogen, PTN) 含量及 POC/SOC (%) 计算公式如下:

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

$$\text{PTN含量}/(\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}) = \frac{\text{颗粒有机物中氮含量}}{(\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}) \times \frac{\text{颗粒有机物质量}/\text{g}}{\text{土壤质量}/\text{g}}}$$

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

$$^{13}\text{C-POC总量}/\text{mg} = \frac{\text{颗粒有机物中}^{13}\text{C含量}/(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}) \times \text{颗粒有机物质量}/\text{g}}{\text{颗粒有机物质量}/\text{g}}$$

土壤中光合碳向 POC 分配比例 / % =

$$\frac{^{13}\text{C-POC总量}/\text{mg}}{^{13}\text{C-POC总量}/\text{mg} + ^{13}\text{C-MAOC总量}/\text{mg}} \times 100$$

MAOC、矿物结合态氮 (Mineral-Associated Total Nitrogen, MATN) 含量、MAOC/SOC (%)、¹³C-MAOC 总量、土壤中光合碳向 MAOC 分配比例的计算与上述公式一致, 将 POC 改为 MAOC、PTN 改为 MATN 即可。

水稻植株与土壤样品的有机碳含量以及 ¹³C 丰度使用同位素比率质谱仪 (MAT253 型, 美国热电公司) 测定。¹³C 含量的测定参照王婷婷等^[10]、王莹莹等^[12]的方法, 由标记样和非标记样中 ¹³C 的丰度来确定, 具体公式如下:

$$^{13}\text{C含量}/(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}) = \frac{[\text{标记样品中}^{13}\text{C丰度}/\% - \text{非标记样品中}^{13}\text{C丰度}/\%] \times \text{样品碳含量}/(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1})}{\div 100}$$

1.5 数据处理

采用 Origin 8.5 和 SPSS 20.0 进行数据处理和统计分析, 差异显著性采用单因素方差分析 (One-way ANOVA) 进行检验, 采用邓肯 (Duncan) 法进行多重比较 ($P<0.05$)。

2 结果

2.1 长期复种绿肥下的水稻生物量和根冠比

冬季复种紫云英、油菜和冬季休闲三种处理下水

稻生物量分别为每穴 13.83、13.63、13.36 g；复种绿肥具有提高水稻地上部生物量，降低其地下部生物量的趋势，但均未达到显著水平（图 1a）。复种紫云英使水稻生物量的根冠比显著降低 19.4%（图 1a，

$P<0.05$ ）。同时，复种绿肥具有提高水稻地上部总碳量，降低其地下部总碳量的趋势，但均未达到显著水平（图 1b）。复种紫云英和油菜使水稻总碳量的根冠比显著降低，分别降低 20.9%和 20.4%（图 1b， $P<0.05$ ）。

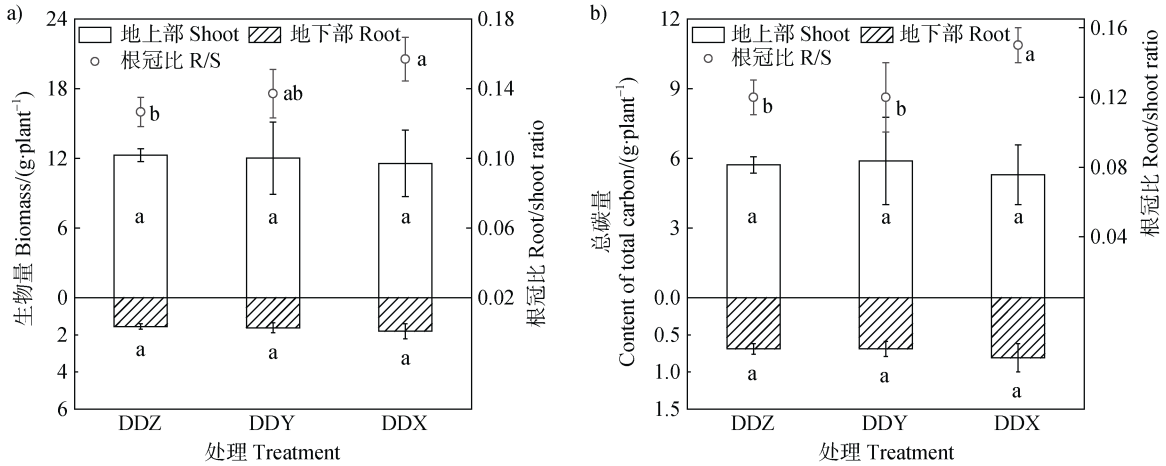


图 1 冬季复种绿肥对水稻生物量和根冠比 (a) 及对水稻总碳量和根冠比的影响 (b)

Fig. 1 Effects of winter planting green manure on biomass and the root-shoot ratio of rice (a), on TC and the root-shoot ratio of rice (b)

2.2 光合碳在水稻-土壤系统中的分配

在水稻-土壤系统中，¹³C-光合碳主要分配至水稻地上部，达 93%以上，少量运输至地下部和土壤中（图 2a）。与冬季休闲处理相比，冬季复种绿肥使 ¹³C-光合碳在水稻-土壤系统中积累量增加 3.7%~28.0%。其中，复种紫云英使水稻地上部 ¹³C-光合碳总量每穴增加 19.94 mg，分配比例上升 4.0%；分配至水稻地下部和土壤中 ¹³C-光合碳总量每穴分

别降低 2.68 mg 和 7.63 mg，分配比例下降 1.1%和 3.0% ($P<0.05$)。复种油菜使 ¹³C-光合碳在水稻地上部积累总量每穴增加 80.62 mg，分配比例上升 3.7%；在水稻地下部积累总量不变；向土壤分配的总量每穴降低 7.81 mg，分配比例下降 3.3% ($P<0.05$)。上述结果表明，冬季复种绿肥增加了光合碳在水稻-土壤系统中的积累，提高了其向水稻地上部的分配，降低了向水稻地下部和土壤中的运输与分配比例。

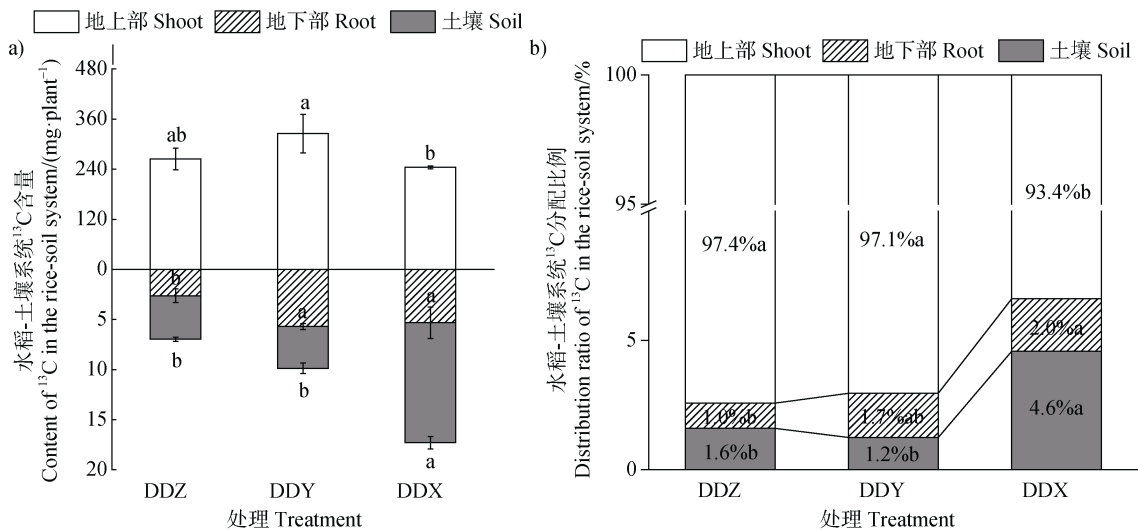


图 2 ¹³C 在水稻-土壤系统中的含量 (a) 及分配比例 (b)

Fig. 2 The content (a) and distribution ratio (b) of ¹³C in the rice-soil system

2.3 土壤 POC、MAOC 及光合碳在土壤相应组分中的分配

长期复种绿肥使水稻土有机碳含量增加 6.9%~13.9% (表 1); POC 和 MAOC 含量具有增加的趋势, 尤其是紫云英处理; 与冬闲相比, 复种绿肥使 POC 占比降低 2.37%~2.88%, MAOC 占比增加 2.66%~3.77% (表 2)。长期复种绿肥并未显著改变稻田土壤总的 C/N 比 (表 1), 但是提高了土壤颗粒有机物中 C/N 比 (表 2)。

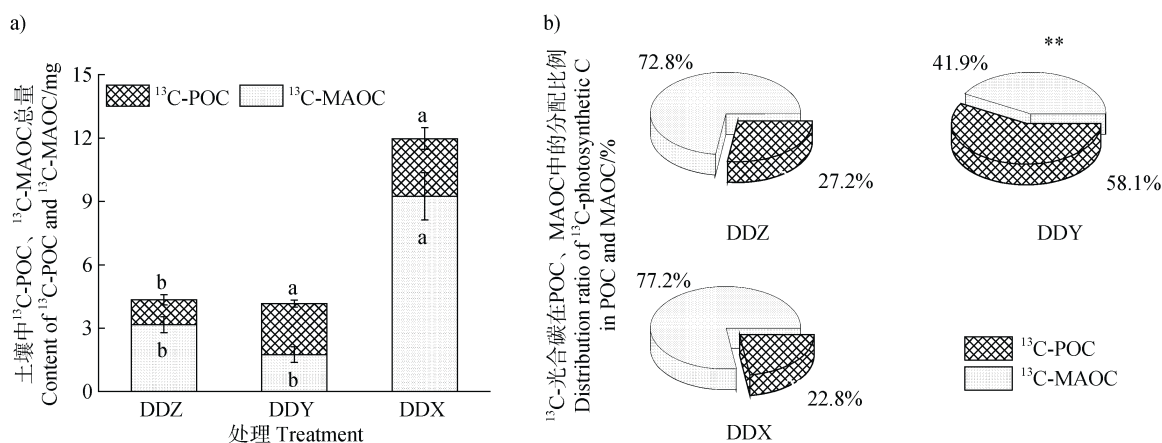
冬季复种绿肥改变了土壤中光合碳向 POC、MAOC 的分配。与冬季休闲处理相比, 从含量的角度, 复种紫云英显著降低了土壤中 ^{13}C -POC 和 ^{13}C -MAOC 总量, 降低幅度分别为 56.7%和 65.8% ($P<0.05$); 复种油菜显著降低了 ^{13}C -MAOC 总量, 降低幅度为 81.1% ($P<0.05$, 图 3a)。在分配比例上, 复种紫云英并未显著改变 ^{13}C -光合碳在 POC 和 MAOC 组分中分配比例; 而复种油菜显著提高了土壤中光合碳向 POC 的分配, 增幅达 35.3% ($P<0.05$, 图 3b)。

表 2 不同绿肥复种下土壤颗粒有机碳与矿物结合态有机碳

Table 2 POC and MAOC in different treatments

处理 Treatment	POC/($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	MAOC/($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	POC/PTN	MAOC/MATN	POC/SOC/%	MAOC/SOC/%
DDZ	8.70±0.30a	15.39±1.60a	22.21±0.76a	8.07±1.75a	35.26±3.57a	62.01±2.13a
DDY	8.32±0.46a	14.67±0.50a	19.59±2.10ab	8.33±0.28a	35.77±1.23a	63.12±2.20a
DDX	8.30±0.27a	12.92±1.43a	17.05±1.95b	8.02±0.78a	38.14±1.57a	59.35±6.12a

注: POC, 颗粒态有机碳; MAOC, 矿物结合态有机碳; PTN, 颗粒态氮; MATN, 矿物结合态氮; SOC, 土壤有机碳。下同。
Note: POC, particulate organic carbon; MAOC, mineral-associated organic carbon; PTN, particulate total nitrogen; MATN, mineral-associated total nitrogen; SOC, soil organic carbon. The same below.



注: **代表同一组分有机碳的不同处理间存在极显著差异 ($P<0.01$)。Note: ** significant differences among different treatments within the same fraction of SOC ($P<0.01$) .

图 3 ^{13}C 在 POC、MAOC 中的总量 (a) 及分配比例 (b)

Fig. 3 Content (a) and distribution ratio (b) of ^{13}C in POC, MAOC

3 讨论

3.1 长期复种绿肥对水稻生物量及其根冠比的影响

冬季复种绿肥可将富余的速效养分 (如氮素) 吸收同化为绿肥自身生物量, 绿肥残体还田后又能提高土壤有机质、改善土壤结构, 其分解释放的速

效养分可供后茬作物生长^[22]。与以往研究结果^[14]相同, 在本研究中长期复种绿肥使水稻土有机碳含量增加 6.9%~13.9% (表 1), 证明了绿肥复种具有土壤培肥的效果。紫云英和油菜复种下均未显著改变水稻地上部和地下部的生物量, 却降低了水稻根冠比, 尤其是复种紫云英处理 (图 1a), 表明绿肥复

种使水稻中更多比例的物质分配至地上部，在一定程度上降低了地下部生物量所占比例，这与前期研究中高含量有机质土壤通常能提升水稻地下部生物量的结果^[23]不同。其主要原因可能是冬季复种绿肥处理不同程度地提高了土壤碱解氮、有效磷和速效钾的含量（表 1），满足了水稻生长对养分的需求；相比而言，冬闲处理土壤养分含量较低，水稻将更多比例的光合碳分配至地下部，促进根系生长，增加根系与土壤接触面积，提高其获取养分的能力^[24]。此外，绿肥残体翻压还田后，腐解过程中产生的有毒气体以及某些有机酸、硫化氢等还原性毒性物质，一定程度上也会影响水稻根系生长^[25-26]。在水稻生物量不变的情况下，水稻根冠比降低，更多的生物量被分配至地上部，也间接地为绿肥复种提高水稻产量提供了证据^[27]。

3.2 光合碳在水稻-土壤系统中分配对冬季复种绿肥的响应

光合碳是植物-土壤系统碳循环的重要组成部分，其通过叶片光合作用的固定，运输至植物地下部，并经过根系分泌物和根系脱落进入土壤，构成土壤有机碳^[28]。因此，光合碳在植物-土壤系统中的积累与分配规律影响着土壤有机碳固定。本研究发现，长期复种紫云英和油菜使光合碳在水稻-土壤系统中的总积累量增加 3.7%~28.0%（图 2），表明了复种绿肥可增强水稻植株体内光合碳的合成，这可能是由于绿肥还田提高了水稻各个生育期剑叶叶绿素含量和净光合作用速率^[29]，进而增强了其光合作用。进一步分析发现，与水稻生物量的根冠比趋势一致，绿肥复种处理降低了水稻植株体内光合碳向地下部的分配（图 2b），进而降低水稻总碳在根系中的分配（图 1b），印证了在养分充足条件下水稻植株会将更多的生物量分配至地上部。

光合碳向土壤的分配是通过水稻根际沉积的形式实现的，水稻根系生物量越高，光合碳向土壤中的输入量越多^[18]。本研究中，长期复种绿肥并未显著改变水稻根系生物量，却显著降低了土壤中光合碳的含量和分配比例（图 2）。这一方面是由于绿肥复种降低了水稻根冠比，从而降低了光合碳向土壤的分配；除水稻自身影响外，土壤有机质含量和养分状况也是影响植物光合碳向土壤分配的重要因子^[30]。通常，较高的土壤有机质含量会促进根系生长，使根系分泌更多的光合碳进入土壤^[30]。但在

本研究中，各个处理下土壤有机碳含量与进入土壤中光合碳累积量的趋势并不一致。这一方面是因为本研究中冬闲处理的地下部生物量更大（图 1a），另一方面可能是因为冬闲处理下土壤有机碳和速效养分含量均较低（表 1），植物为了获取营养物质，会分泌更多的糖类物质调节微生物活性或者直接分泌酸类物质来活化土壤养分^[31]，从而促进水稻光合碳向土壤输入。此外，长期复种绿肥土壤有机碳的积累除来源于水稻光合碳，更多的是来自冬季绿肥的翻压还田（依据当年绿肥还田量，计算得到紫云英还碳量为 414.4 kg·hm⁻²，油菜还碳量为 247.1 kg·hm⁻²），这也可能是造成土壤有机碳和水稻光合碳积累不一致的原因。

整体上，水稻光合碳主要分配至地上部，尤其是长期冬季复种绿肥处理。因此，在农业生产实际中提倡水稻秸秆还田，更有利于大量的植株光合碳进入土壤，促进水稻土有机质积累，培肥土壤^[32]。

3.3 水稻光合碳在土壤中的稳定性对冬季复种绿肥的响应

土壤有机碳与矿物的结合形式决定了其稳定性，将有机碳在土壤中的存在形式划分为 POC 和 MAOC，可以更好地表征土壤碳库的稳定性；其中，MAOC 占有有机碳的比例越高，土壤有机碳的抗分解能力越强，越易在土壤中积累^[33]。探明植物光合碳在土壤 POC 和 MAOC 中的分配规律，有助于揭示其在土壤中的稳定性机制。与冬闲处理相比，复种绿肥处理下土壤总 POC 和 MAOC 含量均表现出增加的趋势（表 2），而水稻光合碳在 POC 和 MAOC 中积累量均较低（图 3a），这可能是土壤总有机碳积累和水稻光合碳向土壤分配总量的差异引起的。进一步分析表明，相对于冬闲，复种绿肥处理下土壤总 MAOC 占有有机碳的比例无显著变化（表 2），而水稻光合碳分配至 MAOC 中的量及其比例均显著降低，尤其是长期复种油菜处理（图 3b），表明了长期绿肥复种对土壤总有机碳库的稳定性无显著影响，而降低了以水稻光合碳为来源的有机碳的稳定性。土壤有机碳的稳定化过程是微生物驱动的，且受到养分（氮素）供应的调节^[34-35]。一般情况下，土壤 C/N 比越低，有机碳被微生物利用的程度越高，使其与矿物结合得越紧密^[36]。即碳固持的氮效率（固定单位碳所需的氮量）取决于土壤的 C/N 比以及颗粒有机态和矿物结合态有机质中的 C/N 比^[33, 37]。长

期复种绿肥提高了土壤的 C/N 比 (表 1), 使微生物对水稻光合碳的利用程度弱于冬闲处理, 进而降低其在 MAOC 中的分配。总体上, 水稻光合碳主要以根系分泌物的形式进入土壤, 易被微生物利用, 使得水稻光合碳在 MAOC 中的分配比例高于 MAOC 占有机碳的比例 (表 2, 图 3); 而在复种油菜处理中得到相反的结果 (图 3), 可能是其 MAOC 中较高的土壤 C/N 比引起的, 具体原因尚需更深入的研究分析。

4 结 论

长期冬季复种紫云英和油菜均能促进光合碳在水稻-土壤系统中的积累, 提高光合碳向水稻地上部的分配, 减少其向水稻地下部及土壤的运输比例。此外, 冬季复种油菜减少了土壤中光合碳向 MAOC 的分配比例, 降低了水稻光合碳在土壤中的稳定性。本研究是在水稻生长旺盛的分蘖期展开的, 缺乏对水稻整个生育期光合碳分配规律的认识, 有待进一步研究。

参考文献 (References)

- [1] Si S C, Wu Y C, Li Y, et al. The current research progress and prospects of cultivated and grassland soil health—A Review[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2022, 59 (3): 626—641. [司绍诚, 吴宇澄, 李远, 等. 耕地和草地土壤健康研究进展与展望[J]. *土壤学报*, 2022, 59 (3): 626—641.]
- [2] Zhu D F, Zhang Y P, Chen H Z, et al. Innovation and practice of high-yield rice cultivation technology in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48 (17): 3404—3414. [朱德峰, 张玉屏, 陈惠哲, 等. 中国水稻高产栽培技术创新与实践[J]. *中国农业科学*, 2015, 48 (17): 3404—3414.]
- [3] Huang S, Sun Y N, Zhang W J. Changes in soil organic carbon stocks as affected by cropping systems and cropping duration in China's paddy fields: A meta-analysis[J]. *Climatic Change*, 2012, 112 (3/4): 847—858.
- [4] Wu J S, Li Y, Tong C L, et al. The key geo-biochemical processes of the long-term carbon sequestration and its mechanisms in the subtropical paddy soils[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2018, 39 (6): 895—906. [吴金水, 李勇, 童成立, 等. 亚热带水稻土碳循环的生物地球化学特点与长期固碳效应[J]. *农业现代化研究*, 2018, 39 (6): 895—906.]
- [5] Ge T, Yuan H, Zhu H, et al. Biological carbon assimilation and dynamics in a flooded rice-Soil system[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2012, 48: 39—46.
- [6] Yu P, Zhang Y L, Wang C X, et al. Distribution of photosynthetic carbon in rice-soil system relative to rice growth stage[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54 (5): 1218—1229. [于鹏, 张玉玲, 王春新, 等. 不同生育期光合碳在水稻-土壤系统中的分配[J]. *土壤学报*, 2017, 54 (5): 1218—1229.]
- [7] Liu P, Jiang C Y, Li Z P. Quantitative research on effects of nitrogen application rate on distribution of photosynthetic carbon in rice-soil system using ^{13}C pulse labeling technique[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52 (3): 567—575. [刘萍, 江春玉, 李忠佩. ^{13}C 脉冲标记定量研究施氮量对光合碳在水稻-土壤系统中分布的影响[J]. *土壤学报*, 2015, 52 (3): 567—575.]
- [8] Li P F, Jiang C Y, Li Z P. Effect of different fertilization methods on distribution of photosynthetic carbon in peanut-soil system using ^{13}C pulse labeling technique[J]. *Soils*, 2019, 51 (5): 923—928. [李朋发, 江春玉, 李忠佩. 不同施肥处理对光合碳在花生-土壤系统中分配的影响[J]. *土壤*, 2019, 51 (5): 923—928.]
- [9] Liu Y, Ge T, Zhu Z, et al. Carbon input and allocation by rice into paddy soils: A review[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2019, 133: 97—107.
- [10] Wang T T, Zhu Z K, Zhu H H, et al. Input and distribution of photosynthesized carbon in soil-rice system affected by water management and nitrogen fertilization[J]. *Environmental Science*, 2017, 38 (3): 1227—1234. [王婷婷, 祝贞科, 朱捍华, 等. 施氮和水管理对光合碳在土壤-水稻系统间分配的量化研究[J]. *环境科学*, 2017, 38 (3): 1227—1234.]
- [11] Tan L M, Wu H, Li H, et al. Input and distribution of rice photosynthesized carbon in the tillering stage under different nitrogen application following continuous ^{13}C labeling[J]. *Environmental Science*, 2014, 35 (5): 1933—1938. [谭立敏, 吴昊, 李卉, 等. 不同施氮量下水稻分蘖期光合碳向土壤碳库的输入及其分配的量化研究: ^{13}C 连续标记法[J]. *环境科学*, 2014, 35 (5): 1933—1938.]
- [12] Wang Y Y, Xiao M L, Zhang Y, et al. Allocation and stabilization responses of rice photosynthetic carbon in the plant-soil system to phosphorus application[J]. *Environmental Science*, 2019, 40 (4): 1957—1964. [王莹莹, 肖谋良, 张响, 等. 水稻光合碳在植株-土壤系统中分配与稳定对施磷的响应[J]. *环境科学*, 2019, 40 (4): 1957—1964.]
- [13] Cao W D, Bao X G, Xu C X, et al. Reviews and prospects on science and technology of green manure in China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2017, 23 (6): 1450—1461. [曹卫东, 包兴国, 徐昌旭, 等. 中国绿肥科研 60 年回顾与未来展望[J]. *植物营养与肥料学报*,

- 2017, 23 (6): 1450—1461.]
- [14] Gao J S, Cao W D, Li D C, et al. Effects of long-term double-rice and green manure rotation on rice yield and soil organic matter in paddy field[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31 (16): 4542—4548. [高菊生, 曹卫东, 李冬初, 等. 长期双季稻绿肥轮作对水稻产量及稻田土壤有机质的影响[J]. *生态学报*, 2011, 31 (16): 4542—4548.]
- [15] Yang Z P, Zheng S X, Nie J, et al. Effects of long-term winter planted green manure on distribution and storage of organic carbon and nitrogen in water-stable aggregates of reddish paddy soil under a double-rice cropping system[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2014, 13 (8): 1772—1781.
- [16] Thorup-Kristensen K, Boogaard R. Vertical and horizontal development of the root system of carrots following green manure[J]. *Plant and Soil*, 1999, 212 (2): 145—153.
- [17] He Y, Yan T R, Guo C C, et al. Effect of methods of straw returning and planting on root growth and rice yield[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35 (7): 105—114. [何艳, 严田蓉, 郭长春, 等. 秸秆还田与栽插方式对水稻根系生长及产量的影响[J]. *农业工程学报*, 2019, 35 (7): 105—114.]
- [18] Ge T D, Liu C, Yuan H Z, et al. Tracking the photosynthesized carbon input into soil organic carbon pools in a rice soil fertilized with nitrogen[J]. *Plant and Soil*, 2015, 392 (1/2): 17—25.
- [19] Lu Y, Conrad R. In situ stable isotope probing of methanogenic archaea in the rice rhizosphere[J]. *Science*, 2005, 309 (5737): 1088—1090.
- [20] Bao S D. Soil and agriculture chemistry analysis[M]. 3rd Ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000. [鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 中国农业出版社, 2000.]
- [21] 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.]
- [22] Ma D, Yin L, Ju W, et al. Meta-analysis of green manure effects on soil properties and crop yield in northern China[J]. *Field Crops Research*, 2021, 266(25): 108146.
- [23] Liu K L, Zhang H M, Han T F, et al. Effects of long-term application of chemical and organic fertilizers on root biomass and nutrient in double cropping rice system[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50 (18): 3540—3548. [柳开楼, 张会民, 韩天富, 等. 长期化肥和有机肥施用对双季稻根茎生物量及养分积累特征的影响[J]. *中国农业科学*, 2017, 50 (18): 3540—3548.]
- [24] Xu G W, Wang H Z, Zhai Z H, et al. Effect of water and nitrogen coupling on root morphology and physiology, yield and nutrition utilization for rice[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31 (10): 132—141. [徐国伟, 王贺正, 翟志华, 等. 不同水氮耦合对水稻根系形态生理、产量与氮素利用的影响[J]. *农业工程学报*, 2015, 31 (10): 132—141.]
- [25] Wang Q S, Bo Y X, Yu K L, et al. Analysis and research prospect of effect of green manure returning on rice cropping ecosystem[J]. *Soils*, 2021, 53 (2): 243—249. [王强盛, 薄雨心, 余坤龙, 等. 绿肥还田在稻作生态系统的效应分析及研究展望[J]. *土壤*, 2021, 53 (2): 243—249.]
- [26] Du K, Xie Y Q, Lin Z M, et al. Effect of nitrogen on rice seedling growth and nutrient uptake under wheat straw returning[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2016, 39 (1): 18—25. [杜康, 谢源泉, 林赵森, 等. 秸秆还田条件下氮肥对水稻幼苗生长及养分吸收的影响[J]. *南京农业大学学报*, 2016, 39 (1): 18—25.]
- [27] Gao J S, Xu M G, Dong C H, et al. Effects of long-term rice-rice-green manure cropping rotation on rice yield and soil fertility[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2013, 39 (2): 343—349. [高菊生, 徐明岗, 董春华, 等. 长期稻-稻-绿肥轮作对水稻产量及土壤肥力的影响[J]. *作物学报*, 2013, 39 (2): 343—349.]
- [28] Wang C, Xiao R, Cui Y, et al. Photosynthate-¹³C allocation in the plant-soil system after ¹³C-pulse labeling of *Phragmites australis* in different salt marshes[J]. *Geoderma*, 2019, 347: 252—261.
- [29] Yuan Y H, Fan H B, Huang Q R, et al. Effects of long-term fertilization on rice photosynthetic traits and water use efficiency[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2009, 28 (11): 2239—2244. [袁颖红, 樊后保, 黄欠如, 等. 长期施肥对水稻光合特性及水分利用效率的影响[J]. *生态学杂志*, 2009, 28 (11): 2239—2244.]
- [30] Zhu Z K, Ge T D, Xiao M L, et al. Belowground carbon allocation and dynamics under rice cultivation depends on soil organic matter content[J]. *Plant and Soil*, 2017, 410 (1/2): 247—258.
- [31] Xu J, Zhang Y Z, Zhang P F, et al. The structure and function of the global citrus rhizosphere microbiome[J]. *Nature Communications*, 2018, 9 (1): 4894.
- [32] Gao R P, Zhao P Y, Han Y F, et al. Effects of straw returning and nitrogen application on soil water, carbon and nitrogen coupling and crop yield[J]. *Soils*, 2021, 53 (5): 952—960. [高日平, 赵沛义, 韩云飞, 等. 秸秆还田与氮肥运筹对土壤水碳氮耦合及作物产量的影响[J]. *土壤*, 2021, 53 (5): 952—960.]
- [33] 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.
- [34] Castellano M J, Mueller K E, Oik D C, et al. Integrating plant litter quality, soil organic matter stabilization, and

- the carbon saturation concept[J]. *Global Change Biology*, 2015, 21 (9): 3200—3209.
- [35] 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.]
- [36] Khan K S, Mack R, Castillo X, et al. Microbial biomass, fungal and bacterial residues, and their relationships to the soil organic matter C/N/P/S ratios[J]. *Geoderma*, 2016, 271: 115—123.
- [37] Craig M E, Turner B L, Liang C, et al. Tree mycorrhizal type predicts within-site variability in the storage and distribution of soil organic matter[J]. *Global Change Biology*, 2018, 24 (8): 3317—3330.

(责任编辑: 陈荣府)