

双季稻田冬季种植模式对土壤有机碳和碳库管理指数的影响

龙攀 苏姗 黄亚男 李超 肖志祥 祝志娟 刘莉 傅志强*

(湖南农业大学农学院, 长沙 410128)

摘要 为探讨冬季覆盖作物还田对稻田土壤碳库的影响,通过冬季种植油菜、紫云英、黑麦草、马铃薯,并以冬闲为对照进行大田试验,测定了不同冬季作物模式下早稻和晚稻的土壤有机碳、活性有机碳含量,并计算了稳态碳、碳库活度、活度指数、碳库指数和土壤碳库管理指数.结果表明:冬季作物还田增加了土壤有机碳含量,早稻和晚稻后的土壤有机碳含量比对照分别提高了1%~8%和3%~18%;油菜、黑麦草和紫云英还田均促进了土壤活性有机碳含量的增加,早稻后增加16.2%~84.2%,晚稻后增加24.4%~28.1%;冬季作物还田增加了土壤碳库管理指数,增加幅度为1.4%~41.8%.综上所述,冬种作物还田有利于提高土壤的固碳效应,并提升土壤质量,以种植黑麦草、紫云英的综合效果较佳.

关键词 双季稻; 冬季; 种植模式; 土壤有机碳; 活性有机碳; 碳库管理指数

Effects of winter cropping mode on soil organic carbon and carbon management index of double rice paddy. LONG Pan, SU Shan, HUANG Ya-nan, LI Chao, XIAO Zhi-xiang, ZHU Zhi-juan, LIU Li, FU Zhi-qiang* (*College of Agronomy, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China*).

Abstract: To explore the effects of winter crops recycling into paddy field on soil carbon pool, we cultivated rape, Chinese milk vetch, ryegrass and potato in winter season after harvesting double-season rice, with fallow as control (CK). The contents of soil organic carbon (SOC) and labile organic carbon (LOC) in the harvest of early and late rice were measured, and the stable carbon, activity of carbon pool, carbon pool index, carbon pool activity index and carbon pool management index (CMI) were calculated. Results showed that winter cover crops returning increased SOC content by 1%–8% and 3%–18% after harvest of early rice and late rice, respectively in comparison with CK. Cultivating rape, Chinese milk vetch and ryegrass all increased the LOC content, with enhancement of 16.2%–84.2% and 24.4%–28.1% after harvest of early rice and late rice, respectively. The CMI of all winter crop treatments presented a growth ratio of 1.4%–41.8% compared to CK. In conclusion, the cultivation of winter crop and recycling to field promoted soil carbon fixation and soil quality, among which the ryegrass and Chinese milk vetch showed better comprehensive effect.

Key words: double rice; winter; cropping mode; soil organic carbon; labile organic carbon; carbon pool management index.

碳循环研究已成为全球气候变化和可持续发展的核心问题之一.土壤碳库变化对全球温室效

本文由国家自然科学基金项目(31501277)、国家重点研发计划项目(2017YFD0300410)和湖南农业大学自然科学基金项目(15QN13)资助 This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (31501277), National Key Research and Development Program of China (2017YFD0300410), and Natural Science Foundation of Hunan Agricultural University (15QN13).

2019-01-11 Received, 2019-03-14 Accepted.

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zqf_cis@126.com

应和碳循环都有重大影响,发挥土壤碳汇效应已经成为减缓全球温室效应和降低大气温室气体浓度的有效方法^[1].土壤是陆地生态系统的核心之一,全球0~100 cm深度土壤有机与无机碳库储量约为2400 Pg,是植被系统的5倍,是大气碳库的3~4倍^[2-4].美国、法国等发达国家早已开展土壤有机碳库动态演变和固碳潜力的研究,完成了农业土壤有机碳库的国家尺度估算,并制定了CO₂排放清单及

提出减排配额的依据^[5-7].我国直到 20 世纪 90 年代中期才开始对不同土层的土壤有机碳储量进行估算^[8],经过几十年的探索,我国学者对土壤碳库的研究越来越成熟.杨滨娟等^[9]研究表明,单施绿肥能够显著提高土壤总有机碳和活性有机碳的积累,施有机肥或有机无机肥适当配施能提高土壤碳库管理指数和有机碳含量,有利于改善土壤质量,提高土壤肥力.廖伏明等^[10]研究发现,由于稻田土壤淹水时间长,具有积累更多有机碳的潜能,且积累的有机碳呈明显表层聚集趋势.李成芳等^[11]研究表明,免耕稻田秸秆覆盖改善了土壤理化性质,提高了土壤和水稻植株固碳能力.吴建富等^[12]研究发现,与单施化肥和稻草烧灰还田相比,稻草全量还田增加了土壤不同形态碳素含量和碳库管理指数,碳库管理指数、活性碳和矿化碳分别提高了 11.4%~21.5%、5.9%~7.9%和 27.1%~67.6%.相关研究发现,在一定程度上提高土壤管理水平,采用绿肥循环轮作、增加作物秸秆还田利用、施用不同有机肥等土壤管理措施可以使土壤碳含量增加,促进土壤碳固定^[2,13-17].

随着土地规模化经营的推广,机械化生产已成为必然的趋势.前人已探讨了不同冬季覆盖作物对双季稻田土壤碳库及温室气体排放的影响^[18-20],然而在全程机械化条件下,稻田不同冬季作物还田对土壤碳库的影响如何尚未见相关报道.本研究基于全程机械化操作条件下探讨了 5 种南方稻田多熟制种植模式对土壤碳库的影响,包括早稻-晚稻-油菜(稻稻油)、早稻-晚稻-马铃薯(稻稻薯)、早稻-晚稻-紫云英(稻稻肥)、早稻-晚稻-黑麦草(稻稻草),通过测定土壤有机碳、活性有机碳含量和土壤碳库管理指数的变化,分析不同种植模式对稻田土壤有机碳的影响,以期为南方双季稻区多熟制种植模式的固碳效应及其土壤碳库估算提供依据.

1 研究地区与研究方法

1.1 试验地概况

试验在浏阳市沿溪镇湖南农业大学教学科研综合基地(28°18'16" N,113°49'52" E)进行,该地区属于亚热带季风性湿润气候,年降雨量 1457~2247 mm,年平均气温为 16.7~18.2℃,全年活动积温(≥10℃)为 5030~5353℃,无霜期为 235~293 d,年日照时数为 1490~1850 h,年辐射量为 100~112 kcal·m⁻².土壤为红黄泥土,理化性状为:有机质 39.83 g·kg⁻¹、全氮 2.03 g·kg⁻¹、全磷 534.89 mg·kg⁻¹、

全钾 5.95 g·kg⁻¹、碱解氮 139.33 mg·kg⁻¹、有效磷 53.76 mg·kg⁻¹、速效钾 98.08 mg·kg⁻¹.

1.2 试验设计

采用大田小区试验,于 2016 年 11 月开始种植冬季作物,前后作均为双季稻,设置 5 个处理.5 个处理分别为 5 种不同的多熟制轮作模式:1)早稻-晚稻-黑麦草(稻稻草,T₁);2)早稻-晚稻-紫云英(稻稻肥,T₂);3)早稻-晚稻-马铃薯(稻稻薯,T₃);4)早稻-晚稻-油菜(稻稻油,T₄);5)早稻-晚稻-空闲(稻稻闲,CK),设为对照.每个处理设置 3 次重复,各小区面积 130 m²(13 m×10 m),田间布置采用随机区组设计.各处理在水稻季均进行翻耕后再种植,翻耕深度 15 cm 左右,除了马铃薯种植外,其余作物均采用机械化作业,且各冬季作物均翻入泥中作为基肥.为方便田间机械操作,区组间留足 3 m 过道供农机通行,小区间也均留 0.5 m 过道,各小区田埂用较厚薄膜覆盖,以防肥水串灌和渗漏.

冬季作物紫云英和黑麦草的播种量均为 22.5 kg·hm⁻²,均于 2016 年 11 月播种,其中黑麦草品种为‘特高’,紫云英品种为‘红花紫云英’;油菜品种为‘湘杂油 420’,播种量为 6 kg·hm⁻²,于 2016 年 11 月播种.黑麦草、紫云英、油菜均于 4 月 20 日收获.马铃薯品种为‘中早 5 号’,于 1 月 3 日播种,4 月 20 日收获.冬季作物只施用氮肥和磷肥,各处理的冬季施肥量相等,分别为 75 kg N·hm⁻²和 45 kg P₂O₅·hm⁻²,于播种前作为基肥施入.冬季作物收获时,秸秆经碾碎留于田中,再经旋耕机旋入泥中.4 种冬季作物的碳、氮含量如表 1 所示.

供试的早稻品种为杂交稻‘陆两优 996’,于 2017 年 3 月 26 日播种,5 月 2 日用插秧机移栽,移栽叶龄 3~4 叶,机插密度为 30 cm×11 cm,每穴 2~3 株,7 月 22 日收获;晚稻供试品种为杂交稻‘泰优 390’,于 6 月 23 日播种,7 月 28 日用插秧机移栽,移栽叶龄 3~4 叶,机插密度为 30 cm×11 cm,每穴 2~3 株,11 月 1 日收获.早稻季尿素分 2 次施用,

表 1 不同冬季作物秸秆的 C、N 含量
Table 1 Carbon and nitrogen contents of different winter crops straw

项目 Item	马铃薯 Potato	油菜 Rape	黑麦草 Ryegrass	紫云英 Chinese milk vetch
C (%)	39.91	45.30	36.31	42.98
N (%)	4.51	0.96	1.27	4.97
C/N	8.86	46.99	28.57	8.66

表 2 不同处理的还田生物量与还田碳量

Table 2 Quantity of returning biomass and carbon in different treatments (kg · hm⁻²)

处理 Treatment	冬季作物 Winter crop		早稻 Early rice		合计 Total	
	秸秆量 Quantity of straw	碳量 Quantity of carbon	秸秆量 Quantity of straw	碳量 Quantity of carbon	秸秆量 Quantity of straw	碳量 Quantity of carbon
T ₁	4.33	1.57	4.37	1.75	8.70	3.32
T ₂	2.68	1.15	4.33	1.73	7.01	2.88
T ₃	2.25	0.90	5.11	2.04	7.36	2.94
T ₄	3.51	1.14	4.47	1.79	7.98	2.93
T ₅	—	—	4.81	1.92	4.81	1.92

T₁: 早稻-晚稻-黑麦草 Early rice-late rice-ryegrass; T₂: 早稻-晚稻-紫云英 Early rice-late rice-Chinese milk vetch; T₃: 早稻-晚稻-马铃薯 Early rice-late rice-potato; T₄: 早稻-晚稻-油菜 Early rice-late rice-rape; CK: 早稻-晚稻-冬闲 Early rice-late rice-fallow. 下同 The same below.

40%作基肥,60%作分蘖肥,磷肥、钾肥作基肥一次性施用,施肥量分别为 120 kg N · hm⁻²、90 kg P₂O₅ · hm⁻²、105 kg K₂O · hm⁻².晚稻季尿素分 3 次施用,40%作基肥,50%作分蘖肥,10%作穗肥,磷、钾肥作基肥一次性施用,施肥量分别为 150 kg N · hm⁻²、90 kg P₂O₅ · hm⁻²、105 kg K₂O · hm⁻².2017 年的各季作物秸秆还田总量和还田碳量见表 2.

1.3 测定项目与方法

分别在早稻收获时期和晚稻收获时期于田间各小区分层采集 0~5、5~10 以及 10~20 cm 3 个层次土壤样品,每个小区采集 3 个点的混合土样,捡去作物根系和小石头,自然风干,磨碎,过 0.25 mm 筛,用于土壤有机碳的测定.土壤有机碳采用 K₂Cr₂O₇氧化法测定^[18].土壤活性有机碳采用 0.333 mol · L⁻¹高锰酸钾比色法测定^[19];称量处理过的约含 15 mg 有机碳的土样,放入塑料瓶(100 mL)内,用 25 mL 333 mmol · L⁻¹ KMnO₄ 振荡处理 1 h,振荡后以 4000 r · min⁻¹离心 5 min,取上清液,用去离子水按 1:250 比例稀释,然后用分光光度计在 565 nm 处比色测定,根据高锰酸钾的浓度变化计算活性有机碳含量.

以对照土壤作为参考农田土壤,根据公式(1)~(5)进行土壤碳库管理指数的计算:

- 稳态碳=总有机碳-活性有机碳
- (1)
- 碳库指数=农田土壤有机碳/参考农田土壤有机碳
- (2)
- 碳库活度=活性碳/稳态碳
- (3)
- 碳库活度指数=农田碳库活度/参考土壤碳库活度
- (4)
- 碳库管理指数=碳库指数×碳库活度指数×100
- (5)

1.4 数据处理

数据整理分析采用 Excel 2010 软件进行,图形

采用 Sigma 12 制作.采用 SPSS 软件对数据进行统计分析,不同处理间的方差分析采用 one-way ANOVA 进行,采用 Duncan 法进行处理间的差异比较(α=0.05).图表中数据为 3 个重复的平均值.

2 结果与分析

2.1 多熟制种植模式对土壤有机碳含量的影响

冬季作物秸秆还田总体上提高了土壤有机碳(SOC)的含量(图1).与对照相比,各冬季作物处理

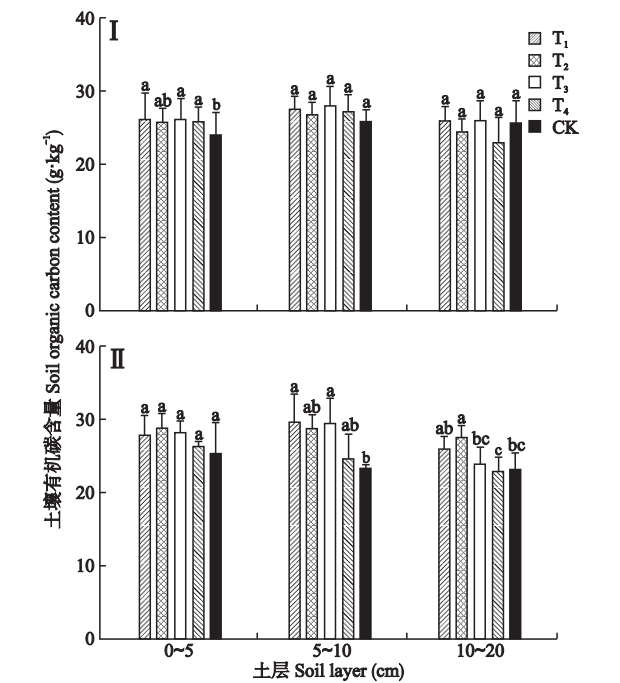


图 1 不同处理早稻与晚稻收获后的土壤有机碳含量
Fig.1 Soil organic carbon (SOC) content of different treatments after early and late rice harvest.

I: 早稻收获后 After early rice harvest; II: 晚稻收获后 After late rice harvest. T₁: 早稻-晚稻-黑麦草 Early rice-late rice-ryegrass; T₂: 早稻-晚稻-紫云英 Early rice-late rice-Chinese milk vetch; T₃: 早稻-晚稻-马铃薯 Early rice-late rice-potato; T₄: 早稻-晚稻-油菜 Early rice-late rice-rape; CK: 早稻-晚稻-冬闲 Early rice-late rice-fallow. 不同字母表示处理间差异显著(P<0.05) Different lowercase letters indicated significant difference among treatments at 0.05 level. 下同 The same below.

在早稻和晚稻收获后均不同程度地增加了 SOC 含量.就早稻收获后土壤而言,在 0~5 cm 土层,各冬季作物处理均高于对照 (23.95 g · kg⁻¹),与对照相比,稻稻薯 (26.12 g · kg⁻¹)、稻稻草 (26.11 g · kg⁻¹)、稻稻油 (25.85 g · kg⁻¹) 和稻稻肥 (25.71 g · kg⁻¹) 的 SOC 含量依次增加了 9.1%、9.0%、7.9% 和 7.4%;其中稻稻薯、稻稻草和稻稻油显著高于对照,其他各处理间差异不显著.在 5~10 cm 土层中,各处理 SOC 含量依次为稻稻薯>稻稻草>稻稻油>稻稻肥>对照;各冬季作物处理的 SOC 含量分别比对照增加了 8.2%、6.4%、4.9% 和 3.4%.在 10~20 cm 土层,各处理 SOC 含量依次表现为稻稻草>稻稻薯>对照>稻稻肥>稻稻油;与对照相比,各冬季作物处理差异不显著.综合各层,各冬季作物处理早稻收获后的 SOC 含量依次为稻稻薯>稻稻草>稻稻肥>稻稻油>对照,各冬季作物处理的 SOC 含量均高于对照,提高幅度在 1%~8%.

晚稻收获季,在 0~5 cm 土层,对照的 SOC 含量最低,其他冬季作物处理均高于对照,各处理 SOC 含量依次为稻稻肥>稻稻薯>稻稻草>稻稻油>对照,各冬季作物处理的增加幅度依次为 13.2%、10.9%、10.0% 和 3.8%,各处理间差异不显著.在 5~10 cm 土层,与对照相比,稻稻草和稻稻薯处理增碳效果显著,增加幅度分别为 27.1% 和 26.5%;稻稻肥和稻稻油的 SOC 含量均表现为增加,增加幅度分别为 23.4% 和 5.5%,但差异不显著.在 10~20 cm 土层,各处理 SOC 含量依次为稻稻肥>稻稻草>稻稻薯>对照>稻稻油;稻稻肥、稻稻草处理的 SOC 含量显著高于对照,其余处理之间差异不显著,与对照相比,稻稻肥、稻稻草和稻稻薯处理有机碳含量分别提高了 18.9%、11.6% 和 2.8%.综合各土层,各冬季作物处理晚稻收获季的 SOC 含量依次为稻稻肥>稻稻草>稻稻薯>稻稻油>对照,冬季作物处理 SOC 含量均高于对照,增幅为 3%~18%,其中以稻稻肥处理的增幅最大,其次为稻稻草和稻稻薯,而稻稻油增幅最低.

2.2 多熟制种植模式对土壤活性有机碳含量的影响

早稻季和晚稻季各处理对土壤活性有机碳 (LOC) 含量的影响不完全一致 (图 2).从早稻收获后的土壤来看,0~5、5~10 和 10~20 cm 土层的 LOC 含量均以稻稻油最高.具体来看,在 0~5 cm 土层,与对照相比,各冬季作物处理的土壤 LOC 含量均有不同程度的提高,增长幅度在 2.6%~80.3%,其中稻稻油 LOC 含量最大,为 5.80 g · kg⁻¹,与对照相比增幅

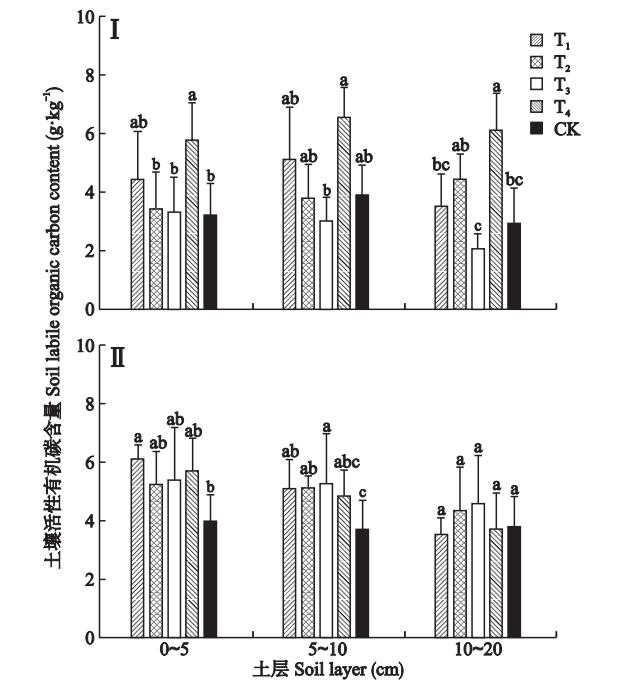


图 2 不同处理早稻和晚稻收获后的土壤活性有机碳含量
Fig.2 Labile organic carbon (LOC) content of different treatments after early and late rice harvest.

最大,差异达显著水平;其次为稻稻草,增幅为 37.2%;稻稻肥和稻稻薯则分别增加 6.4% 和 2.6%,均与对照差异不显著.在 5~10 cm 土层,同样以稻稻油的 LOC 含量最高,达 6.55 g · kg⁻¹,其次为稻稻草 (5.10 g · kg⁻¹),两者分别比对照高 68.4% 和 31.1%,稻稻油显著高于对照,稻稻薯略低于对照,但两者差异不显著.在 10~20 cm 土层,以稻稻油的 LOC 含量最高,为 6.13 g · kg⁻¹,显著高于稻稻草、稻稻薯和对照处理,与对照相比,稻稻油、稻稻肥和稻稻草的 LOC 含量有所增加,增幅分别为 109.2%、51.9% 和 19.5%,而稻稻薯则低于对照,降低 29.7%;各冬季作物处理中,稻稻油、稻稻肥与对照之间存在显著差异,其余稻稻草、稻稻薯和对照之间差异不显著.综合整个早稻收获后的 LOC 含量来看,与对照相比,稻稻油、稻稻草和稻稻肥均有利于土壤 LOC 含量的增加,其中以稻稻油最明显,LOC 含量增加 84.2%,而稻稻薯则使 LOC 比对照降低 16.5%.

从晚稻收获后的 LOC 含量来看,与对照相比,各冬季作物处理均不同程度地提高了 LOC 含量,尤其在 0~5 cm 和 5~10 cm 土层表现明显.在 0~5 cm 土层,以稻稻草的 LOC 含量最高,达 6.10 g · kg⁻¹,显著高于对照;其次为稻稻油,为 5.70 g · kg⁻¹,比对照高 43%;稻稻薯和稻稻肥分别比对照高 35.4% 和 31.2%;各冬季作物处理之间的差异不显著.在 5~

10 cm 土层,各冬季作物处理的 LOC 含量均高于对照,增幅在 31.2%~42.8%,各处理依次为稻稻草>稻稻肥>稻稻草>稻稻草油>对照,其中稻稻草、稻稻肥和稻稻草处理显著高于对照,而稻稻草油与对照差异不显著;各冬季作物处理之间差异不显著.在 10~20 cm 土层,各处理土壤 LOC 含量依次为稻稻草 (4.57 g·kg⁻¹)>稻稻肥(4.34 g·kg⁻¹)>对照(3.80 g·kg⁻¹)>稻稻草油(3.73 g·kg⁻¹)>稻稻草(3.53 g·kg⁻¹),所有处理之间差异均不显著,与对照处理相比,稻稻草、稻稻肥和稻稻草油处理的活性有机碳含量略有增加,增加幅度分别为 20.3%、14.2% 和 12.4%.综合来看,各冬季作物处理的 LOC 含量均高于对照,表明冬季作物还田能提高土壤 LOC 含量.

2.3 多熟制种植模式对早稻收获时土壤碳库管理指数的影响

碳库管理指数可以较好地反映土壤管理措施对土壤碳库的影响,能够较全面地指示不同土地利用措施对土壤有机碳库数量和质量的影响^[21].不同处理对早稻收获后的土壤碳库管理指数(CMI)的影响如表 3 所示.总体上,随着土层的加深,不同处理的 CMI 呈下降趋势,表明碳库的更新和变化随土层加深而变缓.各处理中,稻稻草降低了土壤各层的稳态碳含量,均提高了土壤各层次的碳库活度和碳库活度指数,并显著提高了土壤 CMI,与对照相比,稻稻草的稳态碳含量平均减少 12.2%,碳库活度增加 101.9%,碳库活度指数增加 121.3%,CMI 上升

126.0%,表明冬季油菜还田明显提高了土壤有机碳的活度,加速了土壤有机碳的转化.对于不同冬季作物处理,0~20 cm 土层各处理的 CMI 值分别为稻稻草油(226.03)>稻稻草(148.56)>稻稻肥(134.10)>对照(100)>稻稻草(94.44).可见,与对照相比,总体上稻稻草油、稻稻草和稻稻肥能不同程度地增加土壤有机碳的活跃程度和土壤碳库的更新,而稻稻草效果不明显.

2.4 多熟制种植模式对晚稻收获时土壤碳库管理指数的影响

从晚稻季的情况来看,稻稻草降低了土壤各层的稳态碳含量,提高了碳库活度和碳库活度指数(表 4).与对照相比,稻稻草处理的稳态碳含量下降 1.5%,碳库活度增加 25.9%,碳库活度指数增加 28%,土壤 CMI 综合上升 31.0%,变化趋势与早稻一致,但差异幅度大大降低.表明随种植季节的延续,油菜还田的效应减弱.与对照相比,除稻稻草以外,其余冬季作物处理提高了土壤的稳态碳含量,尤其以稻稻肥增幅最高,可见稻稻肥、稻稻草和稻稻草有利于有机碳在土壤中的积存.与对照相比,冬季作物处理总体提高了土壤的碳库活度、碳库活度指数和碳库管理指数,表明冬季作物还田增加了土壤有机碳库的活跃程度,促进了土壤有机碳的更新.综合各层的 CMI 来看,不同冬季作物处理相比,CMI 值依次为稻稻草(140.19)>稻稻草(137.59)>稻稻肥(135.53)>稻稻草油(131.04),各处理间差异不显著,

表 3 不同处理对早稻收获时土壤碳库管理指数的影响

Table 3 Effects of different treatments on soil carbon pool management index at early rice harvest

土层 Soil layer (cm)	处理 Treatment	稳态碳 Stable carbon (g·kg ⁻¹)	碳库指数 Carbon pool index	碳库活度 Activity of carbon pool	碳库活度指数 Carbon pool activity index	碳库管理指数 Carbon pool management index
0~5	CK	20.73a	1.00b	0.17b	1.00b	100.00c
	T ₁	21.70a	1.09a	0.21b	1.52b	163.70b
	T ₂	22.28a	1.07ab	0.16b	1.10b	118.70c
	T ₃	22.81a	1.09a	0.15b	1.06b	114.44c
	T ₄	20.05a	1.08a	0.31a	2.33a	252.25a
5~10	CK	21.96ab	1.00a	0.20ab	1.00b	100.00b
	T ₁	22.39ab	1.06a	0.25ab	1.32ab	140.63ab
	T ₂	22.95ab	1.04a	0.18ab	0.84b	87.30b
	T ₃	24.93a	1.09a	0.12b	0.86b	90.11b
	T ₄	20.57b	1.05a	0.32a	2.34a	243.36a
10~20	CK	22.70ab	1.00a	0.15b	1.00b	100.00b
	T ₁	22.45ab	1.02a	0.16b	1.45ab	141.36ab
	T ₂	19.92ab	0.96a	0.23ab	2.11a	196.30a
	T ₃	23.86a	1.02a	0.09b	0.81b	78.78b
	T ₄	16.79b	0.89a	0.42a	1.97a	182.49a

同列不同字母表示处理间差异显著(P<0.05) Different lowercase letters in the same column indicated significant difference among treatments at 0.05 level. 下同 The same below.

表 4 不同处理对晚稻收获时土壤碳库管理指数的影响
Table 4 Effects of different treatments on carbon pool management index at late rice harvest

土层 Soil layer (cm)	处理 Treatment	稳态碳 Stable carbon (g · kg ⁻¹)	碳库指数 Carbon pool index	碳库活度 Activity of carbon pool	碳库活度指数 Carbon pool activity index	碳库管理指数 Carbon pool management index
0~5	CK	21.35bc	1.00a	0.20a	1.00d	100.00b
	T ₁	21.78abc	1.13a	0.28a	1.65a	173.95a
	T ₂	23.47a	1.15a	0.23a	1.18cd	135.09ab
	T ₃	22.71ab	1.12a	0.25a	1.28bc	147.04a
	T ₄	20.59c	1.05a	0.27a	1.50ab	154.18a
5~10	CK	19.55b	1.00b	0.19b	1.00b	100.00b
	T ₁	24.46a	1.27a	0.21ab	1.14ab	143.32a
	T ₂	23.56a	1.24ab	0.22ab	1.19ab	147.74a
	T ₃	24.11a	1.27a	0.24ab	1.18ab	146.48a
	T ₄	19.68b	1.06ab	0.26a	1.34a	141.16a
10~20	CK	19.39b	1.00b	0.19ab	1.00ab	100.00abc
	T ₁	22.34a	1.12ab	0.16b	0.84b	95.49c
	T ₂	23.24a	1.20a	0.19ab	1.02ab	123.76ab
	T ₃	19.26b	1.03b	0.24a	1.23a	127.04a
	T ₄	19.13b	0.99b	0.20ab	1.00ab	97.79bc

说明随着季节的延续,不同类别作物之间的差异减小.

3 讨 论

3.1 多熟制种植模式对稻田土壤有机碳和活性有机碳的影响

土壤有机碳是农田的重要组成部分,虽然质量只占土壤很小的一部分,但它一方面是土壤肥力的重要象征,另一方面关系着土壤与大气间的碳平衡,对农业的可持续发展起重要作用^[22].土壤有机碳的来源很多,包括土壤中动植物残体、微生物及其分泌物以及外源有机物质.本研究中无论是早稻还是晚稻收获后的土壤都表现出冬季作物处理的 SOC 高于冬闲对照,这与唐海明等^[19]的研究结果相似,主要是由于冬季作物利用冬闲季的温光资源积累有机物,再通过秸秆还田进入土壤,增加了有机质的来源.农田土壤有机碳含量与有机质的输入有密切关系^[23],一般来说,土壤 SOC 含量与有机碳输入量呈正相关关系^[24].从本研究来看,大体呈现相似规律,秸秆有机碳输入量增加,土壤 SOC 含量也得到提高,这与前人研究结果一致^[18,25].值得注意的是,在本研究的 4 种冬季作物模式中,尽管稻稻薯模式通过马铃薯秸秆还田的碳量最低,但该处理早稻收获后的 SOC 含量最高;而稻稻油模式虽然通过油菜秸秆还田的碳量比稻稻肥模式通过紫云英秸秆还田的碳量高 1.7%,但其早稻收获后的 SOC 含量却比绿肥低 13.3%.表明在 4 种冬季作物中,马铃薯秸秆还田最有利于 SOC 的积累,而油菜秸秆还田则促进

SOC 的转化分解,不利于 SOC 的积累,这与张帆等^[26]的研究结果一致.可见土壤有机碳的累积不仅与有机质的输入量有关,还与输入的有机质来源有关,不同来源的有机质品质不同,会影响有机碳的活性.前人研究表明,土壤活性有机碳对环境变化响应敏感,容易被微生物转化及作物直接利用,对土壤碳库变化的预测具有重要意义^[27].土壤有机碳总量对人为活动和环境因子变化的反应敏感度不强,而活性有机碳是土壤中活跃的化学组成,对农田管理措施的反应敏感度高于有机碳^[28].本研究发现,不同冬季作物秸秆还田均增加了土壤活性有机碳含量,其中稻稻油处理含量最高,其次是稻稻草、稻稻肥和稻稻薯处理,这与唐海明等^[19]的研究结果相似.已有研究表明,土壤中活性有机碳含量越高,越能促进土壤微生物的活动,引起更多有机碳被分解,从而导致积累在土壤中的有机碳含量减少^[17],本研究中,马铃薯处理的土壤活性有机碳含量最低、有机碳含量最高,而油菜处理的活性有机碳含量最高、有机碳含量最低也可由此解释.然而冬季作物的品质究竟如何影响土壤有机碳的转化还需进一步深入研究.

3.2 多熟制种植模式对稻田土壤碳库管理指数的影响

土壤碳库管理指数作为反映土壤碳素动态变化灵敏而有效的指标,可从土壤碳组分的质和量上全面而动态地反映和评估不同管理措施对土壤碳库的影响^[21].前人研究认为,土壤碳库管理指数越高,表示活性有机碳占土壤总有机碳的比例越大,有机碳越容易被分解,质量也越高^[12,22].土壤碳库管理指数

与秸秆还田方式、试验年限和施肥等农业管理措施密切相关^[19,22]; 吴建富等^[12] 研究认为, 稻草还田均有利于耕作层土壤活性碳含量和碳库管理指数的提高, 土壤碳库管理指数易受施肥和耕种年限的影响。从本研究来看, 冬季作物秸秆还田提高了 0~5 cm 土壤碳库活库、碳库活度指数和碳库管理指数, 这与唐海明等^[19] 的研究结果一致, 表明冬季秸秆还田有利于提高表层土壤质量, 促进表层土壤养分循环。随着土层加深, 碳库活度、碳库活度指数和碳库管理指数总体呈下降趋势, 表明下层土壤的碳库转化与养分循环慢慢下降, 这与李琳等^[22] 的研究结果相似。早稻收获季的综合碳库管理指数高于晚稻收获季的综合碳库管理指数, 可见冬季作物还田对早稻土壤的影响强度高于对晚稻土壤的影响强度。从受冬季作物还田影响更大的早稻收获土壤来看, 4 种冬季作物中, 油菜处理的土壤碳库管理指数 (CMI 值) 最高, 其次为黑麦草、紫云英, 而马铃薯处理的 CMI 值最低, 表明油菜秸秆还田最有利于土壤质量的提高, 黑麦草和紫云英也能明显提高土壤质量, 而马铃薯秸秆还田对土壤质量的提升效果较差。冬季作物对土壤 CMI 的影响取决于秸秆的输入量和秸秆的品质特性, 从还田量上看, 马铃薯的还碳量最低, 这是导致其 CMI 低的原因之一; 另外一个原因是马铃薯对土壤微生物的激发效应不如其他作物, 主要表现在其土壤活性有机碳含量最低, 还具有最低的田间碳排放。据张帆等^[26] 研究表明, 在油菜、紫云英、黑麦草和马铃薯 4 种作物中, 马铃薯的微生物生物量碳和氮量均低于其他 3 种作物, 也表明马铃薯对微生物的激发效应不如其他作物明显, 本研究结果与之一致。各作物晚稻季的 CMI 值与早稻的趋势不一样, 这主要是由于晚稻季的土壤加入了早稻秸秆, 还受早稻秸秆还田的强烈影响。综合周年的结果来看, 碳库管理指数表现为稻稻油>稻稻草>稻稻肥>稻稻草>对照, 表明 4 种冬季作物均能促进有机碳的分解转化, 促进土壤养分循环, 有利于土壤质量提高。目前, 土壤提质改良和固碳减排是农业生产的重要内容, 冬季作物还田可更好地促进土壤这两方面的提升。从本试验结果来看, 4 种冬季作物中以黑麦草和紫云英的综合固碳改良效果最好, 而油菜更有利于土壤改良。

4 结 论

冬季作物秸秆还田有利于增加土壤有机碳含量, 并提高土壤的活性有机碳含量, 增加土壤碳库活

度和碳库管理指数, 随着土层的加深, 效果减弱。在油菜、紫云英、黑麦草和马铃薯 4 种冬季作物中, 油菜最有利于提高土壤活性有机碳含量, 提高土壤碳库管理指数, 起到提高土壤质量的效果; 黑麦草、紫云英既具有较好的固碳减排效果, 又有利于提升土壤质量。

参考文献

- [1] Xu N-Z (许乃政), Liu H-Y (刘红樱), Wei F (魏峰). Research progress of soil carbon pool and its change. *Jiangsu Agricultural Sciences* (江苏农业科学), 2011, **39**(2): 1-5 (in Chinese)
- [2] Carreira RS, Wagener ALR, Readman JW, et al. Changes in the sedimentary organic carbon pool of a fertilized tropical estuary, Guanabara Bay, Brazil: An elemental, isotopic and molecular marker approach. *Marine Chemistry*, 2002, **79**: 207-227
- [3] Milne E, Adamat RA, Batjes NH, et al. National and sub-national assessments of soil organic carbon stocks and changes: The GEFSOC modelling system. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2007, **122**: 3-12
- [4] Zhao S-C (赵生才). Evolution mechanism and development trend of farmland soil carbon pool in China: 236th Xiangshan science conference. *Earth Science Progress* (地球科学进展), 2005, **20**(5): 587-590 (in Chinese)
- [5] Houghton RA, Hackler JL, Lawrence KT. The U.S. carbon budget: Contributions from land-use change. *Science*, 1999, **285**: 574-578
- [6] Campbell JE, Moen JC, Ney RA, et al. Comparison of regression coefficient and GIS-based methodologies for regional estimates of forest soil carbon stocks. *Environmental Pollution*, 2008, **152**: 267-273
- [7] Tomlinson RW. Soil carbon stocks and changes in the Republic of Ireland. *Journal of Environmental Management*, 2005, **76**: 77-93
- [8] Guo J-J (郭晶晶). Soil C Stock Changes and Carbon Sequestration Potential in Typical Areas of the Yangtze River Basin. PhD Thesis. Beijing: China University of Geosciences, 2015 (in Chinese)
- [9] Yang B-J (杨滨娟), Huang G-Q (黄国勤), Lan Y (兰 延), et al. Effects of nitrogen application and winter green manure on soil active organic carbon and the soil carbon pool management index. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2014, **25**(10): 2907-2913 (in Chinese)
- [10] Liao F-M (廖伏明), Zhou K-L (周坤炉), Yang H-H (阳和华), et al. Comparison of grain quality between F₁ hybrids and their parents in Indica hybrid rice. *Chinese Journal of Rice Science* (中国水稻科学), 2003, **17**(2): 134-140 (in Chinese)
- [11] Li C-F (李成芳), Kou Z-K (寇志奎), Zhang Z-S (张枝盛), et al. Effects of rape residue mulch on greenhouse gas emissions and carbon sequestration from no-tillage rice fields. *Journal of Agro-Environment*

- Science* (农业环境科学学报), 2011, **30**(11): 2362–2367 (in Chinese)
- [12] Wu J-F (吴建富), Zeng Y-H (曾研华), Pan X-H (潘晓华), *et al.* Effects of rice straw returning mode on rice grain yield and soil carbon pool management index in double rice-cropping system. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2013, **24**(6): 1572–1578 (in Chinese)
- [13] Han X-Z (韩新忠). Effects of Straw Returning on Crops, Soil Microorganisms and Carbon Pool under Rice-wheat Rotation. Master Thesis. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2013 (in Chinese)
- [14] Zhang X-B (张旭博), Sun N (孙楠), Xu M-G (徐明岗), *et al.* Soil organic carbon in agricultural soils in China under global climate change. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2014, **47**(23): 4648–4657 (in Chinese)
- [15] Liu L-S (刘立生), Xu M-G (徐明岗), Zhang L (张璐), *et al.* Evolution characteristics of soil particulate organic carbon in the paddy field with long-term planting green manure. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer* (植物营养与肥料学报), 2015, **21**(6): 1439–1446 (in Chinese)
- [16] Nei S-A (聂三安), Zhou P (周萍), Ge T-D (葛体达), *et al.* Quantifying rice (*Oryza sativa* L.) photo-assimilated carbon input into soil organic carbon pools following continuous ^{14}C labeling. *Environmental Science* (环境科学), 2012, **33**(4): 1346–1351 (in Chinese)
- [17] Long P (龙攀), Sui P (隋鹏), Gao W-S (高旺盛), *et al.* Effects of winter cover crop straw recycling on soil organic carbon and soil carbon pool management index in paddy fields. *Journal of China Agricultural University* (中国农业大学学报), 2015, **20**(3): 153–160 (in Chinese)
- [18] Xiao X-P (肖小平), Tang H-M (唐海明), Nei Z-M (聂泽民), *et al.* Effects of cover crop residues in winter on soil organic carbon and carbon pool management index of double cropping paddy fields. *Chinese Journal of Eco-Agriculture* (中国生态农业学报), 2013, **21**(10): 1202–1208 (in Chinese)
- [19] Tang H-M (唐海明), Cheng K-K (程凯凯), Xiao X-P (肖小平), *et al.* Effects of different winter cover crops on soil organic carbon in a double cropping rice paddy field. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2017, **28**(2): 465–473 (in Chinese)
- [20] Tang H-M (唐海明), Xiao X-P (肖小平), Shuai X-Q (帅细强), *et al.* Effects of different winter covering crops cultivation on methane (CH_4) and nitrous oxide (N_2O) emission fluxes from double-cropping paddy field. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2012, **32**(5): 1481–1489 (in Chinese)
- [21] Tong X-G (佟小刚), Han X-H (韩新辉), Yang G-H (杨改河), *et al.* Carbon management index as an indicator for changes in soil organic carbon pool under conversion from cropland to forestland. *China Environmental Science* (中国环境科学), 2013, **33**(3): 466–473 (in Chinese)
- [22] Li L (李琳), Li S-J (李素娟), Zhang H-L (张海林), *et al.* Study on soil C pool management index of conservation tillage. *Journal of Soil and Water Conservation* (水土保持学报), 2006, **20**(3): 106–109 (in Chinese)
- [23] Zeng YH, Wu JF, He H, *et al.* Soil carbon pool management index under different straw retention regimes. *Agricultural Science and Technology*, 2012, **13**: 818–822
- [24] Meng L (孟磊), Cai Z-C (蔡祖聪), Ding W-X (丁维新), *et al.* Effects of long-term fertilization on N distribution and N_2O emission in fluvo-aquic soil in North China. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2008, **28**(12): 6197–6203 (in Chinese)
- [25] Peng H (彭华), Ji X-H (纪雄辉), Wu J-M (吴家梅), *et al.* Organic carbon and carbon pool management index in soil under different rice straw returning way in double-cropping paddy fields. *Ecology and Environmental Sciences* (生态环境学报), 2016, **25**(4): 563–568 (in Chinese)
- [26] 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): 734–739 (in Chinese)
- [27] Cai X-B (蔡晓布), Yu B-Z (于宝政), Peng Y-L (彭岳林), *et al.* The changes of soil organic carbon and carbon management index in alpine steppe. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2013, **33**(24): 7748–7755 (in Chinese)
- [28] Haynes RJ. Labile organic matter fractions as central components of the quality of agricultural soils: An overview. *Advances in Agronomy*, 2005, **85**: 221–268

作者简介 龙攀, 女, 1985年生, 讲师。主要从事稻田种植制度和水稻栽培研究。E-mail: longpan_lp@126.com

责任编辑 张凤丽

龙攀, 苏姗, 黄亚男, 等. 双季稻田冬季种植模式对土壤有机碳和碳库管理指数的影响. 应用生态学报, 2019, **30**(4): 1135–1142

Long P, Su S, Huang Y-N, *et al.* Effects of winter cropping mode on soil organic carbon and carbon management index of double rice paddy. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, **30**(4): 1135–1142 (in Chinese)