

DOI: 10.5846/stxb201803300677

王淑彬,王礼献,杨文亭,杨滨娟,周泉,黄国勤.南方不同“冬种+双季稻”种植模式对土壤有机碳和产量的影响.生态学报,2018,38(18): - .
Wang S B, Wang L X, Yang W T, Yang B J, Zhou Q, Huang G Q. Effects of multiple winter cropping on soil organic carbon and double-cropping rice yield in the south of China. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(18): - .

南方不同“冬种+双季稻”种植模式对土壤有机碳和产量的影响

王淑彬,王礼献,杨文亭,杨滨娟,周泉,黄国勤*

江西农业大学作物生理生态与遗传育种教育部重点实验室/江西农业大学生态科学研究中心,南昌 330045

摘要:设置了冬闲-双季稻、紫云英-双季稻、油菜-双季稻、大蒜-双季稻,马铃薯、紫云英、油菜轮作接茬双季稻 5 个处理,通过 3 年(2013—2015)大田试验,系统研究了双季稻田冬季复种对产量和土壤有机碳、活性有机碳及碳库管理指数等的影响。结果表明:冬种作物早稻产量均高于对照,晚稻产量除冬种油菜有所降低外,其他各冬种处理均高于对照。各冬种处理土壤总有机碳、活性有机碳、可溶性有机碳、微生物量碳含量和碳库指数较冬闲处理均有显著提高。土壤碳库管理指数除了冬季作物轮种处理外,其他冬种处理较冬闲处理均有显著提高。土壤总有机碳与活性有机碳和微生物量碳之间呈极显著相关,与可溶性有机碳和碳库管理指数存在显著相关,碳库活度和碳库活度指数各冬种处理也有所提高,但影响不显著。

关键词:冬种复种;有机碳;碳库;双季稻田

Effects of multiple winter cropping on soil organic carbon and double-cropping rice yield in the south of China

WANG Shubin, WANG Lixian, YANG Wenting, YANG Binjuan, ZHOU Quan, HUANG Guoqin*

Jiangxi Agricultural University/Key Laboratory of Crop Physiology, Ecology and Genetic Breeding, Research Center on Ecological Sciences, Nanchang 330045, China

Abstract: The study included a set of five treatments: winter fallow-double cropping rice; milk vetch-double cropping rice; rape-double cropping rice; garlic-double cropping rice; and potato, milk vetch, and rape rotation-double cropping rice. The effects of multiple winter-cropping on the early- and late-rice yields, soil organic carbon, active organic carbon, and carbon library management index in double cropping rice field were studied for a period of three years (2013 - 2015). The early-rice yields of winter-crop treatments were higher than that of the control treatment. The late-rice yields of the winter treatments were also higher than that of the control; however, the late-rice yield of winter rape was lower than that of the control. The total organic carbon, active organic carbon, soluble organic carbon, microbial biomass carbon content, and carbon library index of the winter treatment were extensively improved. In addition to the winter crop rotation, the soil-carbon library management indices of the other winter treatments were significantly improved. A significant correlation was observed between the total organic carbon and active organic carbon, microbial biomass of soil, total organic carbon with the soluble organic carbon, and the carbon library management index. The carbon storage activity and carbon-storage activity index were also improved, but the effects were not significant.

Key Words: replanting of winter cropping; organic carbon; carbon library; double cropping rice field

基金项目:国家科技支撑计划课题(2012BAD14B14)和江西省研究生创新专项资金项目(YC2013-B030)资助

收稿日期:2018-03-30; 修订日期:2018-07-05

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hgqjxnc@sina.com

土壤有机碳是碳循环中重要的碳库,其库容是大气碳库的 3.3 倍,它对于土壤生产力和全球碳循环至关重要^[1],其输入和分解与自身的蓄积和温室气体的排放密切相关^[2]。土壤有机碳的储量是根据土壤里面的植物残体量以及土壤在微生物的作用下分解损失量,这两者之间有一个平衡,会受到土壤自身特性、所处地区气候、耕作措施、施肥制度、轮作方式及灌溉制度等一系列因素的影响^[3-5]。不同学者对其组分的划分也有所不同^[6-7]。许多学者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^[8]。土壤活性有机碳一般包括可溶性有机碳、轻组有机碳、颗粒态有机碳、微生物量碳和易氧化有机碳等,它们在不同程度上反映土壤有机碳的有效性和土壤质量^[9-10]。可溶性有机碳对养分流动、土壤生物活性、碳储备和温室气体及水环境质量都有重要影响^[11-13]。虽然土壤活性有机碳在有机碳中所占的比重很小,但因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呈显著相关^[14]。有研究发现,土壤活性有机碳含量随季节变化而变化^[15]。肖小平等^[16]研究发现与冬闲对照相比,黑麦草-双季稻、紫云英-双季稻、油菜-双季稻 3 种不同冬季覆盖作物残茬还田后,土壤耕作层(0—20 cm)的土壤有机碳和活性有机碳含量均有所提高。王丽宏等^[17]研究发现传统耕作体系容易导致土壤有机碳损失,认为采用保护性耕作体系、改善轮作体系、缩短休闲期等措施可以减少农田土壤原有有机碳的损失。杨滨娟等^[18]通过研究不同紫云英翻压量结合不同施氮水平对土壤活性有机碳库各组分及碳库管理指数的影响,发现单施绿肥能够显著促进土壤总有机碳和活性有机碳的累积。周欢等^[19]研究表明秸秆还田能显著增加土壤有机碳和活性有机碳含量,不同耕作方式下土壤有机碳和活性有机碳含量存在差异。展茗等^[20]研究表明 3 种稻作模式(稻鸭复合种养、间歇灌溉、常规淹水灌溉)下土壤可溶性有机碳和微生物生物量碳在水稻拔节齐穗阶段含量最高,易氧化有机碳在水稻整个生育期内变化平稳,主要受稻作模式的影响。微生物生物量碳受水稻生育期的影响最大,可溶性有机碳受水稻生育期和稻作模式的影响均较大。

南方双季稻田区是我国水稻主产区,冬季复种方式多种多样^[21-22]。如何更好的发挥冬季作物的效益实现水稻生产的高产优质高效是目前研究的重要课题之一。鉴于土壤碳库对水稻生产的重要性,本试验研究不同冬种模式下双季稻田土壤碳库状态,探索不同冬季作物在稻田中的固碳作用,以期为南方双季稻地区选择适宜冬季作物提供一定的参考依据。

1 材料与方 法

1.1 试验地概况

本试验于 2012 年 10 月在江西省万年县农科所试验田进行,试验前土壤肥力比较均匀。供试土壤为壤土,试验前表层土壤(0—20 cm) pH 值为 6.08,有机质含量为 41.81 g/kg,全氮含量为 1.97 g/kg,有效磷含量为 16.38 mg/kg,速效钾含量为 130.00 mg/kg。

1.2 试验设计

试验设 5 个处理,每个处理重复 3 次,共 15 个试验小区,每个试验小区面积为 66 m²,随机排列,小区周围设置 1 m 左右的保护行。试验设计如下表 1 所示。

1.3 供试品种及田间管理

冬季紫云英品种为余江大叶籽,每年 9 月底 10 月初播种,播种量为 45 kg/hm²,于田间进行均匀撒播。紫云英每年施钙镁磷肥为 375 kg/hm²为基肥,第二年盛花期翻耕还田。冬季油菜品种 2013 年为蓉油 5 号,2014 年为绵丰油 18,2015 年为赣油杂 8 号。每年 9 月底 10 月初育苗,播种量为 22.5 kg/hm²,每公顷施 45% 三元复合肥 300 kg,尿素 150 kg 作为基肥。晚稻收获后进行油菜移栽,油菜籽收获后油菜秸秆切碎还田。大蒜品种为山东金乡蒜,每年 11 月初播种,播种量 250 kg/hm²,肥料施用为:每公顷施 45% 三元复合肥 750 kg,菜籽枯饼 900 kg,尿素 225 kg,全部用作基肥施用。马铃薯于 2012 年 11 月中旬播种,播种量 2000 kg/hm²,按株距 40 cm,行距 30 cm 播种。肥料施用为:施菜籽枯饼 900 kg/hm²,45% 三元复合肥 750 kg/hm²,全部作基肥施用。2013 年 4 月下旬收获。早稻品种 2013 年为天优 463,2014 年为株两优 09,2015 年为欣荣 08,播种时

间为3月底4月初,移栽时间为5月初,7月中旬收获。2013—2015年晚稻品种均为天优华占,播种时间为6月中旬,移栽时间为7月中下旬,10月下旬收获。水稻肥料用量参照当地常规施肥量:早、晚稻所用化肥:尿素(N46%),每公顷施330 kg,钙镁磷肥(P_2O_5 12%),每公顷施420 kg,氯化钾(K_2O 60%) 每公顷施200 kg。磷肥、钾肥全部作基肥,氮肥按基肥:分蘖肥:穗肥=5:3:2施用。分蘖肥在水稻移栽后5—7 d时施用,穗肥在主茎幼穗长1—2 cm时施用。早稻收获后稻草全部翻压还田,晚稻收获后稻草半量还田,其他田间管理措施同一般大田栽培。

表1 试验设计

Table 1 Treatments description

处理 Treatment	2012.10—2013.10	2013.10—2014.10	Ge 2014.10—2015.10
A(CK)	冬闲-早稻-晚稻 Fallow-early rice-late rice	冬闲-早稻-晚稻 Fallow-early rice-late rice	冬闲-早稻-晚稻 Fallow-early rice-late rice
B	紫云英-早稻-晚稻 Chinese milk vetch-early rice-late rice	紫云英-早稻-晚稻 Chinese milk vetch-early rice-late rice	紫云英-早稻-晚稻 Chinese milk vetch-early rice-late rice
C	油菜-早稻-晚稻 Rape-early rice-late rice	油菜-早稻-晚稻 Rape-early rice-late rice	油菜-早稻-晚稻 Rape-early rice-late rice
D	大蒜-早稻-晚稻 Garlic- early rice-late rice	大蒜-早稻-晚稻 Garlic- early rice-late rice	大蒜-早稻-晚稻 Garlic- early rice-late rice
E	马铃薯-早稻-晚稻 Potato-early rice-late rice	紫云英-早稻-晚稻 Chinese milk vetch-early rice-late rice	油菜-早稻-晚稻 Rape-early rice-late rice

表中A,B,C,D,E为处理号,CK表示对照,A处理为冬闲接茬早稻和晚稻连作处理,B处理为冬季紫云英接茬早稻和晚稻连作处理,C处理为冬季油菜接茬早稻和晚稻连作处理,D处理为冬季大蒜接茬早稻和晚稻连作处理,E处理为每年冬季分别为马铃薯、紫云英和油菜,接茬早稻和晚稻的三年一轮的轮作处理

1.4 测定项目及方法

1.4.1 作物考种与测产

2015年水稻成熟期每小区考查50株,计算单位面积有效穗数,按平均穗数进行取样,每小区取5株,考查穗长、每穗粒数、结实率、千粒重等产量构成因素,测产按各小区实打实收计算。

1.4.2 土壤有机碳测定

2015年于晚稻收获时采用5点取样法,于田间取(0—20 cm)土层,混合均匀,一部分自然风干,测定土壤有机碳,易氧化有机碳等。另一部分于冰箱内冷藏(4℃),用于测定土壤微生物量碳和可溶性有机碳。土壤活性有机碳库及碳库管理指数计算以试验地周边稻田土壤为参考土,其总有机碳含量为16.85 g/kg,活性有机碳含量为2.39 g/kg。方法如下:

①土壤有机碳(SOC):采用重铬酸钾外加热法^[23]。

②土壤活性有机碳(AOC),采用333 mmol/L高锰酸钾氧化法测定^[24-25]。

③土壤可溶性有机碳(DOC):称取2 g新鲜土样,放入50 mL蒸馏水中,震荡1 h,过滤,然后将滤液收集起来,离心15 min(1000 r/min)。将浮在表层的物质通过抽吸装置,用带有孔径为0.45 μm的滤膜进行抽滤,滤液加5 mL 0.8 mol/L $K_2Cr_2O_7$ 和5 mL浓 H_2SO_4 ,在185℃下消煮5 min,用0.2 mol/L Fe_2SO_4 滴定。

④土壤微生物生物量碳(MBC):采用氯仿熏蒸- K_2SO_4 提取方法^[26]。

⑤土壤碳库管理指数(CPMI)的计算方法^[27]:活性碳+稳态碳=总有机碳;碳库指数=样品全碳/参照土壤全碳;碳库活度=活性碳/稳态碳;碳库活度指数=样品碳库活度/参照碳库活度;碳库管理指数(CPMI)=碳库指数×碳库活度指数×100。

1.5 数据处理

采用Microsoft Excel 2010进行数据的分析及整理,作图。用SPSS17.0软件进行显著性分析,用LSD(least significant difference test)进行样本平均数的差异显著性比较。

2 结果与分析

2.1 双季稻田冬季复种对水稻产量的影响

由表 2 可以看出,早稻产量构成因素中:穗长最长的是处理 B,为 21.41,各处理与对照差异不显著。水稻有效穗数以处理 D 最高,处理 C 最小。处理 B、D、E 与对照冬闲处理差异显著。每穗粒数以处理 B 最高,处理 E 最小,各冬种处理与对照差异不显著。结实率以处理 D 最高,其次为处理 C,处理 D 与对照差异显著。千粒重处理 C 最高,其次为处理 B,再次为处理 E,最后为处理 D。各处理与对照差异不显著。产量以处理 D 最高,其次为处理 B,均与对照呈显著性差异。晚稻产量构成因素则是处理 B 的穗长最长,其次为处理 C,各处理与对照差异不显著。有效穗数以处理 B 最高,其次为处理 D,再次为处理 E,均与对照处理呈显著性差异。每穗粒数最高的是对照,其次是处理 D,各处理与对照差异不显著。结实率处理 B 最高,其次为处理 D,各处理与对照差异不显著。千粒重处理 B 最高,其次为处理 C,各处理与对照差异不显著。晚稻产量以处理 B 最高,其次为处理 E,再次为处理 D,均与对照处理呈显著性差异。水稻全年产量以冬种紫云英处理为最高。由此可以看出,稻田冬种作物能够增加有效穗数,显著提高水稻产量。

表 2 稻田冬种复种对水稻产量及其构成要素的影响

Table 2 Effect of winter crops and multiple cropping in paddy fields on rice yield and its components

稻季 Rice season	处理 Treatment	穗长 Spike length/cm	有效穗数 Effective panicle number/ ($10^4/\text{hm}^2$)	每穗粒数 Number of grain per ear	结实率/% Maturing rate	千粒重 Thousand- grain weight/g	产量 Yield/ (kg/hm^2)
早稻 Early rice	A(CK)	20.54a	298.45c	122.10b	86.23b	25.82a	7875d
	B	21.41a	312.23b	125.17a	85.77b	26.12a	8230b
	C	21.21a	300.91c	122.88ab	88.48ab	26.14a	8035c
	D	21.39a	318.58a	123.49ab	89.10a	26.00a	8390a
	E	20.70a	310.48b	121.84b	86.78ab	26.10a	8045c
晚稻 Late rice	A(CK)	20.25a	304.18b	125.98a	83.03a	25.20a	7745c
	B	21.15a	313.74a	123.79a	85.71a	26.06a	8160a
	C	20.77a	309.34ab	123.16a	83.13a	25.91a	7680c
	D	20.70a	313.65a	125.75a	84.86a	25.01a	7950b
	E	20.50a	312.82a	123.56a	84.52a	25.65a	8010b

数据为 3 个重复的平均值;同列不同的字母分别表示差异达 5%显著水平

2.2 双季稻田冬季复种对稻田土壤总有机碳和活性有机碳的影响

从图 1 可以看出,不同冬种处理土壤总有机碳含量以处理 B 最高,其次为处理 D,各冬种处理与对照差异

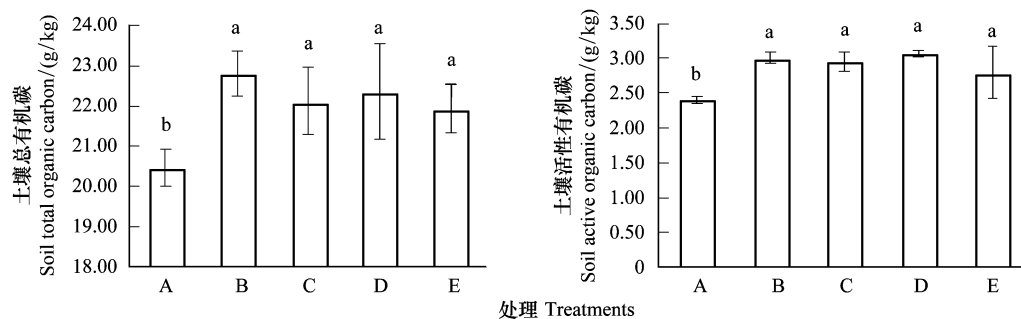


图 1 双季稻田冬季复种下对土壤总有机碳和活性有机碳含量的影响

Fig.1 Effect of winter green manure and upland multiple cropping patterns on total organic carbon and active organic carbon contents of soil

图中 A, B, C, D, E 处理参见表 1, 数据为 3 个重复的平均值;柱形图上的不同字母分别表示差异达 5%显著水平

显著,说明冬季种植作物能提高土壤总有机碳含量。土壤活性有机碳含量以处理 D 最高,其次为处理 B,再次为处理 C,最小为处理 E,各冬种处理均与对照呈显著性差异。说明种植不同冬季作物对提高活性有机碳的含量有显著效果。

2.3 双季稻田冬季复种对土壤活性有机碳各组分含量的影响

从表 3 可以看出,不同冬种处理下可溶性有机碳含量以处理 B 为最高,其次为处理 C 和 E,再次为处理 D,且各冬种处理与对照呈显著性差异。不同冬种处理微生物量碳含量也以处理 B 最大,其次为处理 D,且各冬种处理与对照处理差异显著。这可能是由于不同冬季作物对土壤中的微生物的影响不同,使得各处理土壤可溶性有机碳含量和微生物量碳存在显著差异。各冬种处理微生物熵除处理 C 以外,均高于对照,以处理 B 的最大,但各冬种处理与对照差异不显著。

表 3 双季稻田冬种复种对土壤活性有机碳组分的影响

Table 3 Effect of winter crops and multiple cropping in double cropping paddy fields on labile organic carbon of soils

处理 Treatment	可溶性有机碳/(g/kg) DOC	微生物量碳/(g/kg) MBC	微生物熵/% Microbial entropy
A(CK)	0.34b	0.46d	2.23a
B	0.46a	0.52a	2.27a
C	0.44a	0.49c	2.21a
D	0.42a	0.51b	2.26a
E	0.44a	0.50bc	2.267a

DOC:dissolved organic carbon;MBC:microbial biomass carbon;同列不同小写字母表示同一年度不同处理间差异显著($P<0.05$)

2.4 双季稻田冬季复种对土壤碳库管理指数的影响

由表 4 可知,土壤稳态碳以处理 B 为最高,其次为处理 D,各冬种处理均高于对照,但除处理 B 与对照差异显著外,其他处理与对照差异不显著。不同冬种处理土壤碳库指数均有所提高,处理 B 为最高,处理 E 最小,且均与对照差异显著。各冬种处理碳库活度均高于对照,以处理 C 和处理 D 最高,且各处理与对照均呈显著性差异。不同冬种处理的土壤碳库活度指数以处理 D 最高,且与对照差异显著。其他冬种处理均高于对照,但与对照差异不显著。各冬种处理碳库管理指数以处理 D 最高,其次为处理 B,且各冬种处理均高于对照,除处理 E 外,各冬种处理与对照均呈显著性差异。由此可见,种植不同冬季作物可以提高土壤碳库指数和碳库管理指数。

表 4 双季稻田冬季复种下的土壤碳库管理指数

Table 4 Carbon management index of soil under winter crops and multiple cropping in double cropping paddy field

处理 Treatment	活性有机碳/(g/kg) AOC	稳态碳/(g/kg) Steady carbon	碳库指数 CPI	碳库活度 Carbon storage activity	碳库活度指数 Carbon pool activity index	碳库管理指数 CPMI
A(CK)	2.41b	18.04b	1.21b	0.13b	0.81b	98.52b
B	3.01a	19.80a	1.35a	0.15a	0.92ab	125.02a
C	2.96a	19.15ab	1.31a	0.16a	0.94ab	123.06a
D	3.10a	19.26ab	1.33a	0.16a	0.98a	129.14a
E	2.80a	19.14ab	1.30a	0.15a	0.89ab	115.67ab

AOC:active organic carbon;CPI:carbon pool index;CPMI: carbon pool management index;同列不同小写字母表示同一年度不同处理间差异显著($P<0.05$)

2.5 土壤有机碳与土壤活性有机碳各组分及碳库管理指数的相关分析

由表 5 可以看出,土壤总有机碳与活性有机碳和微生物量碳之间呈极显著相关,与可溶性有机碳和碳库管理指数存在显著相关,这说明土壤总有机碳与土壤活性有机碳的关系比可溶性有机碳更为密切。此外,活性有机碳与可溶性有机碳、微生物量碳呈极显著相关,这说明活性有机碳含量会影响可溶性有机碳和微生物

量碳的含量。可溶性有机碳与微生物量碳和碳库管理指数存在极显著相关,微生物量碳与碳库管理指数也存在极显著相关,这说明不同土壤活性有机碳各组分之间关系密切,同时也说明了土壤可溶性有机碳和微生物量碳的变化与碳库管理指数的大小有关系。

表 5 土壤总有机碳与土壤活性有机碳各组分及碳库管理指数的相关分析

Table 5 Correlation coefficients of soil total organic carbon with soil labile organic carbon pool and CPMI

项目 Project	总有机碳 Total organic	活性有机碳 AOC	可溶性有机碳 DOC	微生物量碳 MBC	碳库管理指数 CPMI
总有机碳 Total organic	1				
活性有机碳 AOC	0.673 **	1			
可溶性有机碳 DOC	0.631 *	0.678 **	1		
微生物量碳 MBC	0.738 **	0.681 **	0.727 **	1	
碳库管理指数 CPMI	0.635 *	0.999 **	0.664 **	0.658 **	1

* 为显著相关($P < 0.05$), ** 为极显著相关($P < 0.01$)

3 讨论

3.1 双季稻田冬季复种对水稻产量的影响

冬季种植作物历史悠久,冬季种植不同作物对双季稻产量有不同的影响。于天一等^[28]研究表明,冬种马铃薯和紫云英增加了双季稻产量,冬种油菜降低了晚稻产量。本研究结果表明,冬种作物早稻产量均高于对照,晚稻产量除冬种油菜有所降低外,其他各冬作处理均高于对照。这与于天一等的研究结果一致。高菊生等^[29]多年的研究也表明,种植紫云英,提高水稻产量潜力最高,产量稳定性最好。本研究结果也表明,冬种紫云英处理全年产量为最高,原因可能是因为紫云英是豆科作物,有较好的固氮效果,翻压还田后能培肥地力,促进水稻的生长,从而提高水稻产量。而从本研究对各处理土壤有机碳的研究可以看出,冬种紫云英处理土壤的有机碳含量,可溶性有机碳含量及微生物量碳含量均高于其他处理。这说明土壤总有机碳高有助于提高土壤活性有机碳含量,从而提高作物产量。

3.2 双季稻田冬季复种对土壤总有机碳和活性有机碳的影响

土壤的活性有机碳库组分可分为可溶性有机碳、微生物量碳、颗粒有机碳及易氧化有机碳。大量研究认为,土壤不同形态碳素含量的变化与耕作方式、施肥方式、栽培方式、秸秆还田等农业管理措施密切相关^[14,19,27-32]。路丹等^[33]研究表明,免耕和稻草还田均能提高活性有机碳含量。周国朋等^[31]研究结果表明,江西黄泥田上,紫云英还田配施全量化肥较单施化肥能够显著提高土壤有机质和土壤可溶性有机碳含量。这与本研究结果一致。本研究还发现不同冬种处理的土壤总有机碳含量与冬闲相比均有不同程度的提高,主要的原因可能是冬种紫云英和油菜均有一定的还田量,增加了土壤里的有机残茬,对土壤有机质进行了补充^[30]。本研究结果还表明,冬季种植不同作物均可以显著提升土壤活性有机碳含量,这与前人研究结果一致^[32,34]。本研究中,冬作处理紫云英与油菜秸秆均还田,增加了土壤中的有机质,因此对提高活性有机碳含量有一定贡献。本研究还表明冬种复种处理微生物量碳提高明显,冬季种植紫云英和油菜的处理与冬闲处理间达到显著性差异。可能的原因是因为绿肥是还田作物,油菜也属于养地作物,增加了外源有机碳的来源,为微生物提高了充足的碳源,促进微生物的生长,提高其活性^[35]。

3.3 双季稻田冬种复种对土壤碳库管理指数的影响

土壤碳库管理指数(CPMI)因结合了土壤碳库指标和土壤碳库活度指标,不仅反映了外界管理措施对土壤有机碳总量的影响,也反映了土壤有机碳组分的变化情况^[36]。碳库管理指数是衡量土壤管理水平和供肥能力的良好的评价指标。肖小平等^[16]研究表明冬季作物残茬还田提高了土壤碳库活度、碳库活度指数、碳库指数和土壤碳库管理指数,其中以紫云英残茬还田的效果为最好,黑麦草和油菜残茬还田的效果次之。王晶等^[37]和宇万太等^[38]的研究结果显示,施有机肥或就有机肥与无机肥配合施用比不施肥和单施化肥显著提高

了土壤碳库管理指数。何翠翠等^[39]研究结果表明,长期单施化肥和长期秸秆还田两种措施均不利于黑土活性有机质的提高和碳库管理指数的增加,而有机无机肥配施的碳库管理指数显著提高,且随着有机肥施用量的增加碳库管理指数提升的效果越明显。说明土壤碳库管理指数能灵敏反应不同施肥方式对土壤有机碳的影响。而本研究表明,与对照冬闲相比,不同冬种处理土壤碳库指数(CPI)均显著增加,说明冬种作物能够提高碳库管理指数,而由于不同冬种处理的冬季作物类型和还田量的不同,以及作物或者秸秆还田后在稻田土壤中的腐解速度不同,土壤碳库管理指数存在差异。但种植冬季作物能显著提高土壤碳库指数和碳库管理指数。

3.4 土壤有机碳与活性有机碳各组分及碳库管理指数的相关分析

通过对土壤总有机碳、土壤活性有机碳及其各组分及碳库管理指数的相关分析可知,土壤总有机碳与活性有机碳关系密切,土壤活性有机碳在一定程度上依赖于土壤总有机碳储备量。此外,活性有机碳与可溶性有机碳、微生物量碳和碳库管理指数达到极显著相关,可溶性有机碳与微生物量碳和碳库管理指数存在显著相关,微生物量碳与碳库管理指数也存在极显著相关,这与杨滨娟等^[18]的研究结果一致。这说明不同土壤活性有机碳之间关系密切,尽管它们测定的方法不一样,但在一定程度上表征了土壤中活性程度较高的有机碳含量,同时说明了碳库管理指数能够指示土壤活性有机碳的变化。

4 结论

冬种作物可以提高双季稻产量,冬种绿肥对作物产量提高效果最好。冬种作物还可以显著提高土壤有机碳和活性有机碳含量,土壤碳库管理指数也有显著提高。

参考文献(References):

- [1] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, 2004, 304(5677): 1623-1627.
- [2] Houghton J T, Ding Y, Griggs D J, Nogueir M, van der Linden P J, Xiaosu D. *Climate Change 2001: the Physical Science basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press, 2001: 710-719.
- [3] 王丹丹, 周亮, 黄胜奇, 李成芳, 曹湊贵. 耕作方式与秸秆还田对表层土壤活性有机碳组分与产量的短期影响. *农业环境科学学报*, 2013, 32(4): 735-740.
- [4] 邵月红, 潘剑君, 孙波. 不同森林植被下土壤有机碳的分解特征及碳库研究. *水土保持学报*, 2005, 19(3): 24-28.
- [5] 曾骏, 郭天文, 于显枫, 董博. 长期施肥对土壤活性有机碳和碳库管理指数的影响. *土壤通报*, 2011, 42(4): 812-815.
- [6] Blair G J, Lefroy R D B, Lisle L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems. *Australian Journal of Agricultural Research*, 1995, 46(7): 1459-1466.
- [7] Dalal R C, Chan K Y, Dalal R C, Chan K Y. Soil organic matter in rainfed cropping systems of the Australian cereal belt. *Australian Journal of Soil Research*, 2001, 39(3): 435-464.
- [8] Six J, Elliott E T, Paustian K, Doran J W. Aggregation and soil organic matter accumulation in cultivated and native grassland soils. *Soil Science Society of America Journal*, 1998, 62(5): 1367-1377.
- [9] 郭景恒, 朴河春, 刘启明. 碳水化合物在土壤中的分布特征及其环境意义. *地质地球化学*, 2000, 28(3): 59-64.
- [10] 徐明岗, 于荣, 王伯仁. 土壤活性有机质的研究进展. *土壤肥料*, 2000, (6): 3-7.
- [11] Qualls R G. Biodegradability of Humic substances and other fractions of decomposing leaf litter. *Soil Science Society of America Journal*, 2004, 68(5): 1705-1712.
- [12] Kalbitz K, Schmerwitz J, Schwesig D, Matzner E. Biodegradation of soil-derived dissolved organic matter as related to its properties. *Geoderma*, 2003, 113(3/4): 273-291.
- [13] Marschner B, Kalbitz K. Controls of bioavailability and biodegradability of dissolved organic matter in soils. *Geoderma*, 2003, 113(3/4): 211-235.
- [14] 邵月红, 潘剑君, 孙波. 长期施肥对红壤不同形态碳的影响. *中国生态农业学报*, 2006, 14(1): 125-127.
- [15] Medowell W H, Currie W S, Aber J D, Yano Y. Effects of chronic nitrogen amendments on production of dissolved organic carbon and nitrogen in forest soils. *Water Air and Soil Pollution*, 1998, 105: 175-182.
- [16] 肖小平, 唐海明, 聂泽民, 郭立君, 刘征鹏, 汤文光, 汪柯, 杨光立. 冬季覆盖作物残茬还田对双季稻田土壤有机碳和碳库管理指数的影

- 响. 中国生态农业学报, 2013, 21(10): 1202-1208.
- [17] 王丽宏, 胡跃高, 杨光立, 曾昭海. 农田冬季覆盖作物对土壤有机碳含量和主作物产量的影响. 干旱地区农业研究, 2006, 24(6): 64-67.
- [18] 杨滨娟, 黄国勤, 兰延, 陈洪俊, 王淑彬. 施氮和冬种绿肥对土壤活性有机碳及碳库管理指数的影响. 应用生态学报, 2014, 25(10): 2907-2913.
- [19] 周欢, 蔡立群, 张仁陟, 董博, 孙成胜, 高小龙. 不同耕作方式下秸秆还田对土壤活性有机碳的影响. 甘肃农业大学学报, 2015, 50(1): 63-68.
- [20] 展茗, 曹凑贵, 江洋, 汪金平, 乐丽鑫, 蔡明历. 不同稻作模式下稻田土壤活性有机碳变化动态. 应用生态学报, 2010, 21(8): 2010-2016.
- [21] 孙卫民, 黄国勤. 不同复种模式对双季稻田生态服务功能的影响. 江西农业大学学报, 2012, 34(6): 1105-1111.
- [22] 唐海明, 肖小平, 孙继民, 汤文光, 汪柯, 李微艳, 杨光立. 种植不同冬季作物对稻田甲烷、氧化亚氮排放和土壤微生物的影响. 生态环境学报, 2014, 23(5): 736-742.
- [23] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [24] Lefroy R D B, Blair G J, Strong W M. Changes in soil organic matter with cropping as measured by organic carbon fractions and ^{13}C natural isotope abundance. *Plant and Soil*, 1993, 155-156(1): 399-402.
- [25] 徐明岗, 于荣, 孙小凤, 刘骅, 王伯仁, 李菊梅. 长期施肥对我国典型土壤活性有机质及碳库管理指数的影响. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(4): 459-465.
- [26] 吴金水. 土壤微生物生物量测定方法及其应用. 北京: 气象出版社, 2006.
- [27] 唐国勇, 李昆, 孙永玉, 张春华. 土地利用方式对土壤有机碳和碳库管理指数的影响. 林业科学研究, 2011, 24(6): 754-759.
- [28] 于天一, 逢焕成, 任天志, 李玉义, 唐海明, 杨光立, 肖小平, 汤文光, 陈阜. 冬季作物种植对双季稻根系酶活性及形态指标的影响. 生态学报, 2012, 32(24): 7894-7904.
- [29] 高菊生, 曹卫东, 李冬初, 徐明岗, 曾希柏, 聂军, 张文菊. 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. 生态学报, 2011, 31(16): 4542-4548.
- [30] 唐海明, 程凯凯, 肖小平, 汤文光, 汪柯, 李超, 张帆, 孙玉桃. 不同冬季覆盖作物对双季稻田土壤有机碳的影响. 应用生态学报, 2017, 28(2): 465-473.
- [31] 周国朋, 曹卫东, 白金顺, 聂军, 徐昌旭, 曾闹华, 高嵩涓, 王艳秋, 志水胜好. 多年紫云英-双季稻下不同施肥水平对两类水稻土有机质及可溶性有机质的影响. 中国农业科学, 2016, 49(21): 4096-4106.
- [32] 兰延. 稻田冬种复种模式优化研究[D]. 南昌: 江西农业大学, 2014.
- [33] 路丹, 何明菊, 区惠平, 何冰, 沈方科, 顾明华. 耕作方式对稻田土壤活性有机碳组分、有机碳矿化以及腐殖质特征的影响. 土壤通报, 2014, 45(5): 1144-1150.
- [34] 兰延, 黄国勤, 杨滨娟, 陈洪俊, 王淑彬. 稻田绿肥轮作提高土壤养分增加有机碳库. 农业工程学报, 2014, 30(13): 146-152.
- [35] 吴祥颖, 张潇潇, 李伏生. 沟灌方式和有机无机氮比例对甜糯玉米种植土壤酶活性和活性有机碳的影响. 土壤, 2014, 46(5): 832-838.
- [36] 张贵龙, 赵建宁, 宋晓龙, 刘红梅, 张瑞, 姬艳艳, 杨殿林. 施肥对土壤有机碳含量及碳库管理指数的影响. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(2): 359-365.
- [37] 王晶, 朱平, 张男, 解宏图, 张旭东. 施肥对黑土活性有机碳和碳库管理指数的影响. 土壤通报, 2003, 34(5): 394-397.
- [38] 宇万太, 赵鑫, 马强, 周桦. 长期定位试验下施肥对潮棕壤活性碳库及碳库管理指数的影响. 土壤通报, 2008, 39(3): 539-544.
- [39] 何翠翠, 王立刚, 王迎春, 张文, 杨晓辉. 长期施肥下黑土活性有机质和碳库管理指数研究. 土壤学报, 2015, 52(1): 194-202.