

稻田水旱轮作系统对土壤有机碳及产量的短期影响

曹培^{1,2}, 朱杰³, 朱波^{1,2}, 刘章勇^{1,2*}

(1. 长江大学湿地生态与农业利用教育部工程研究中心, 湖北荆州 434025; 2. 长江大学农学院, 湖北荆州 434025; 3. 湖北省襄阳市农业科学院, 湖北襄阳 441057)

摘要 [目的] 探明不同水旱轮作系统对稻田不同土层土壤活性有机碳组分、碳库管理指数、土壤有机碳储量和作物产量的短期影响。[方法] 2017年在荆州市江陵县三湖农场开展试验, 采用随机区组设计, 设置中稻-冬闲(RF)、中稻-油菜(RR)、中稻-小麦(RW)和春玉米-晚稻(MR)4种植模式。[结果] 与RF处理相比, MR处理显著降低了稻田不同层次的土壤总有机碳含量; 且RW、RR和MR处理均降低了稻田土壤活性有机碳含量。MR处理有利于碳库活度和碳库活性指数的提高, RR处理则利于稳态碳和碳库指数的提高。不同土层各处理的土壤有机碳储量差异趋势一致, 均为RR>RF>RW>MR, 与RF处理相比, RR处理土壤有机碳储量增加了8.14%。与RF处理相比, RW、RR和MR处理产量分别增加了46.71%、35.77%和35.33%。[结论] RR模式更有利于稻田土壤有机碳的固持, 是适宜在当地推广的水旱轮作模式。

关键词 水旱轮作; 土壤活性有机碳; 碳库管理指数; 土壤有机碳储量; 作物产量

中图分类号 S181 **文献标识码** A

文章编号 0517-6611(2019)04-0081-05

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2019.04.022



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Short-term Effects of Paddy-upland Rotation Systems on Soil Organic Carbon and Yield

CAO Pei^{1,2}, ZHU Jie³, ZHU Bo^{1,2} et al (1. Engineering Research Center of Ecology and Agricultural Use of Wetland, Ministry of Education, Yangtze University, Jingzhou, Hubei 434025; 2. College of Agriculture, Yangtze University, Jingzhou, Hubei 434025; 3. Xiangyang Academy of Agricultural Sciences, Xiangyang, Hubei 441057)

Abstract [Objective] In order to give an insight into soil active organic carbon in different soil layers, carbon pool management index, soil organic carbon storage and crop yields short-term affected by paddy-upland rotation systems. [Method] A field experiment was conducted at Sanhu Farm of Jiangling County of Jingzhou in 2017. Different cropping patterns were established following a design of randomized complete block with rice-fallow (RF), rice-rapeseed (RR), rice-wheat (RW) and maize-rice (MR). [Result] Compared with RF treatment, MR treatment significantly reduced the total organic carbon content in different layers of paddy soil, and RW, RR and MR treatment all reduced the active organic carbon content in paddy soil. MR treatment was benefit to increasing activity of carbon pool and carbon pool activity index; whereas, RR treatment was benefit to increasing stable carbon and carbon pool index. The soil organic carbon storage difference in different soil layers showed same tendency among paddy-upland rotation systems, all were RR > RF > RW > MR. Compared with RF treatment, soil organic carbon storage of RR treatment increased by 8.14%. Compared with RF treatment, the yield of RW, RR and MR treatment increased by 46.71%, 35.77% and 35.33%, respectively. [Conclusion] RR pattern is more conducive to the retention of soil organic carbon in paddy fields, and is suitable for the promotion of paddy-upland rotation system in the local area.

Key words Paddy-upland rotation; Soil active organic carbon; Carbon pool management index; Soil organic carbon storage; Crop yield

土壤有机碳(soil organic carbon, SOC)是陆地生态系统中最大的有机碳库,其全库容量达1550 Pg^[1],在全球碳循环过程中起着十分重要的作用,其微小的变动将会导致CO₂浓度较大的变动,并影响全球气候的变化^[1-3]。SOC的转化和稳定性与土壤可持续利用及碳循环关系密切,作为反映碳循环和土壤质量的指标^[4],因此准确认识SOC动态变化是全球生态系统特别是农业生态系统保持可持续性发展的需要。

土壤总有机碳含量及其储量是有机物质输入(残茬、分泌物和浸出物等)与输出(SOC矿化分解)之间动态变化平衡的结果^[5],其变化极其缓慢,短期内难以监测因农业措施导致的土壤质量的变化。然而,占土壤有机碳比例较小且周转速度较快的部分称作活性有机碳,能够作为土壤潜在生产力以及由土壤管理措施引起的土壤有机质变化的早期指标,而非活性有机碳则表征土壤长期积累和固碳能力^[6]。由土壤活性有机碳计算的碳库管理指数(carbon pool management

index, CPMI)不仅能反映土壤碳库有效性及质量,而且还能够相对全面地反映外界管理措施对土壤碳库中各组分在质、量上的变化,进而反映土壤质量变化的程度^[7]。因此,土壤活性有机碳和碳库管理指数能反映土壤质量和土壤肥力状况,是评价土壤管理的良好指标^[8]。

长江中下游地区是我国水稻的主产区,水稻种植面积达1500.7万hm²,占全国种植面积的49.7%^[9],水旱轮作系统是该地区主要的稻田种植方式,常见的有水稻-小麦和水稻-油菜轮作系统。随着农业生产的发展,该区种植业结构也在不断地调整,在市场的带动下,近年来该区玉米发展迅速,出现了春玉米-晚稻水旱轮作模式^[10]。水旱轮作系统的一个显著特征是作物系统的水旱交替轮换导致土壤系统季节间的干湿交替变化,引起水旱轮作作物季节间土壤物理、化学和生物学特性的交替变化^[11-12],这势必会影响土壤中的微生物,从而影响土壤活性有机碳组分。目前,对于农田不同利用方式下的研究多集中于长期效应,而对于稻田水旱轮作短期效应的研究较少,且说法不一。黄伟生等^[13]在洞庭湖区开展的研究表明,水稻-油菜轮作系统的SOC的含量低于水稻-冬闲。吴玉红等^[14]研究认为小麦茬口较油菜茬口稻田土壤碳矿化作用强,油菜-水稻轮作系统更有利

基金项目 国家重点研发计划项目(2017YFD0301400);国家自然科学基金项目(31801319);长江大学湿地生态与农业利用教育部工程研究中心开放基金(7011802311)。

作者简介 曹培(1993—),女,湖北孝感人,硕士研究生,从事农业生态研究。*通信作者,教授,博士生导师,从事农业生态研究。

收稿日期 2018-12-20

于土壤表土有机碳的积累。李清华等^[15]通过连续3年试验的研究表明,与冬闲—水稻相比,水旱轮作系统(水稻—紫云英、水稻—蚕豆、水稻—油菜、水稻—玉米)中以玉米—水稻产量最高。为此,通过设置稻田不同的水旱轮作试验,研究短期水旱轮作模式对稻田土壤活性有机碳组分及产量的影响,旨在探索适宜当地生产的稻田水旱轮作系统,为稻田作物生产及土壤培肥制度的建立提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况 试验于2017年3月至2018年5月在湖北省荆州市江陵县三湖农场试验基地进行,位于112°29′~112°35′E,30°10′~30°15′N。该区属北亚热带季风性湿润气候,

水热资源丰富,年均降雨量900~1100 mm,年平均气温16.0~16.4℃。试验田试验前为冬闲—单季稻制,土壤为潮土。供试土壤耕作层(0~20 cm)基本理化性状为:有机质28.59 g/kg、全氮2.44 g/kg、碱解氮170.88 mg/kg、全磷0.38 g/kg、速效磷12.67 mg/kg、全钾17.76 g/kg、速效钾159 mg/kg、pH 6.92、容重1.10 g/cm³。

1.2 试验设计 试验共设置4个处理,分别为中稻—冬闲(RF)、中稻—油菜(RR)、中稻—小麦(RW)、春玉米—晚稻(MR)。每个处理3次重复,采用随机区组排列。每小区面积98 m²(长14 m,宽7 m),各小区筑埂覆膜,防止水肥串流。各作物品种、种植方式、播种期、移栽期及收获期如表1。

表1 各作物品种、种植方式及生育期

Table 1 Crop variety, plant mode, the date of sowing, transplanting and harvest of each crop

作物 Crop	品种 Variety	种植方式 Plant mode	播种期 Sowing date	移栽期 Transplanting date	收获期 Harvest date
中稻 Middle season rice	隆两优华占	移栽	05-12	06-06	2017-09-25
油菜 Rape	华油杂 62	撒播	10-28	—	2018-05-09
小麦 Wheat	郑麦 9023	撒播	11-09	—	2018-05-16
春玉米 Spring maize	郑丹 958	移栽	03-29	04-23	2017-07-15
晚稻 Late rice	金优 207	移栽	06-23	07-27	2017-11-03

1.2.1 R-F. 中稻移栽密度22.4万穴/hm²(26.70 cm×16.70 cm),每穴3株苗。水稻全生育期施肥量为225 kg/hm² N、75 kg/hm² P₂O₅、180 kg/hm² K₂O;氮肥按照基肥:蘖肥:穗肥为4:3:3施用;磷肥作基肥一次施用;钾肥按照基肥:穗肥为1:1施用。水稻生长期间水分管理采用前期灌水、中期晒田、后期干湿交替的管理模式。病虫害防治按当地大面积生产统一实施。

1.2.2 R-R. 该模式中稻种植同R-F的中稻。油菜于水稻收获后,浅旋耕做厢播种,播种量为4.50 kg/hm²,基本苗密度6.00万株/hm²。油菜生育期间,施复合肥(N:P₂O₅:K₂O=16:10:22)600 kg/hm²、硼肥7.5 kg/hm²作基肥,提苗肥施尿素75 kg/hm²,基肥施尿素75 kg/hm²。

1.2.3 R-W. 该模式中稻种植同R-F的中稻。小麦于水稻收获后,浅旋耕做厢播种,播种量为225 kg/hm²,基本苗密度300万株/hm²。小麦生育期间,施复合肥(N:P₂O₅:K₂O=16:10:22)600 kg/hm²作基肥,追90 kg/hm² N。

1.2.4 M-R. 春玉米采用厢作,厢宽为1.00 m,沟宽为0.20 m,厢沟模式单位宽度为1.20 m,40 cm+80 cm宽窄行播种2行,窄行位于厢面,每个小区5厢。玉米按27.8 cm株距人工移栽,密度为6.00万株/hm²,移栽后人工覆膜。玉米生长期间,肥料于移栽时一次性基施,全生育期施肥量为240 kg/hm² N、135 kg/hm² P₂O₅、180 kg/hm² K₂O。于玉米6叶期揭去地膜并喷施玉米专用除草剂,其余田间管理措施同一般高产田。春玉米收获后泡田,破坏原厢沟模式进行旋田整地后人工移栽晚稻,移栽密度22.4万穴/hm²(26.70 cm×16.70 cm),每穴3株苗。晚稻全生育期施肥量为180 kg/hm² N、75 kg/hm² P₂O₅、150 kg/hm² K₂O;氮肥按照基肥:蘖肥:穗

肥为2:2:1施用;磷肥作基肥一次施用;钾肥按照基肥:穗肥为4:3施用。晚稻田间管理同中稻。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 土壤活性有机碳组分。R-F和M-R模式休闲期后及油菜和小麦收获后,用土钻在每个小区内按“S”形选取5个点,每点分别采集0~5、5~10和10~20 cm 3个层次土壤样品,同层混合,作为该小区混合样。样品采回后,一部分挑去细根放入4℃冰箱中保存,用于测定鲜土指标,剩下的土样置于阴凉、通风处风干,分别过筛(0.25 mm和0.149 mm)备用,用于测定干土指标。

土壤活性有机碳(ROC)采用Blair等^[7]提出的KMnO₄氧化法测定。土壤总有机碳(TOC)采用元素分析仪(ECS4024)测定。该研究土壤碳库管理指数以R-F模式为参照土壤,根据公式(1)~(5)进行土壤碳库管理指数的计算。

$$\text{稳态碳} = \text{总有机碳} - \text{活性有机碳} \quad (1)$$

$$\text{碳库指数(CPI)} = \text{样品全碳含量} / \text{参照土壤全碳含量} \quad (2)$$

$$\text{碳库活度(CPA)} = \text{活性碳含量} / \text{稳态碳含量} \quad (3)$$

$$\text{碳库活度指数(CPAI)} = \text{样品碳库活度} / \text{参照土壤碳库活度} \quad (4)$$

$$\text{碳库管理指数(CPMI)} = \text{碳库指数} \times \text{碳库活度指数} \times 100 \quad (5)$$

R-F和M-R模式休闲期后及油菜和小麦收获后,采用环刀法^[16]测定土壤容重(BD)。先在田间选择挖掘土壤剖面的位置,然后挖掘土壤剖面,按剖面层次,分0~5、5~10和10~20 cm层次采样,每层重复3次。全土有机碳储量计算方法^[5]如(6)式所示:

$$\text{SOC}_{\text{stocks}} = D \times \text{BD} \times \text{SOC} \times 10 \quad (6)$$

式中, SOC_{stocks} 为全土有机碳储量 (g/m^2), D 为土壤深度 (cm), BD 为土壤容重 (g/cm^3), SOC 为土壤有机碳浓度 (g/kg soil)。

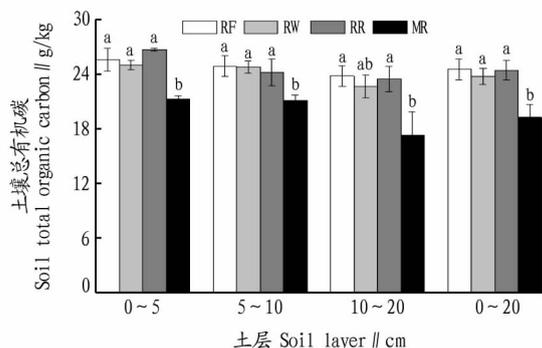
1.3.2 作物地上部生物量和产量测定。于收获期,每小区按照大田平均穗数取 6 穴水稻,分茎、叶和穗;取代表性油菜植株 3 株,分茎、角壳和籽粒;取代表性小麦植株 10 株,分茎、叶和穗;取代表性玉米植株 3 株,分茎、叶、鞘、穗轴、苞叶和籽粒;105 °C 下杀青 30 min,80 °C 下烘至恒重,测定干物质重,即可得各作物的地上部生物量。

于收获前调查玉米种植密度,每个小区收获中间一个层面 2 个连续 20 株的果穗,自然风干后考察穗粒数与千粒重,脱粒称重。水稻、油菜和小麦成熟后,各小区选取生长均匀的 $3 m^2$ 植株,脱粒并晒干,风选清除杂质后,测定总重和含水量,按照 14% 含水量折算水稻和玉米产量,按照 13% 含水量折算小麦产量。

1.4 数据统计与分析 所有试验数据均采用 Excel (Microsoft office, 2010) 进行分析整理,用 DPS 软件进行方差分析和多重比较。试验结果均以 3 次重复的平均值与标准误差表示。采用 Origin 9.0 软件作图。

2 结果与分析

2.1 水旱轮作系统对稻田土壤总有机碳含量的影响 稻田水旱轮作模式对土壤总有机碳的影响如图 1 所示,土壤总有机碳均随土层的增加而降低,在 0~10 cm 土层,RF、RW 和 RR 处理的土壤总有机碳显著高于 MR 处理,且它们之间无显著性差异;10~20 cm 土层,RF 和 RR 处理的土壤总有机碳显著高于 MR 处理,且 RW 处理与 RF 和 RR 处理,或与 MR 处理之间差异不显著。总体来看,0~20 cm 土层,与 RF 处理相比,RW、RR 和 MR 处理土壤总有机碳含量分别减少了 3.09%、0.34% 和 21.58%。



注:在同一土层,不同小写字母表示不同处理之间差异显著 ($P < 0.05$)

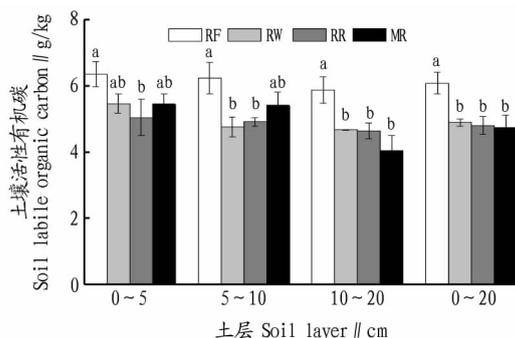
Note: Within the same soil depth, different lowercase letters stand for significant difference among different treatments at 0.05 level

图 1 稻田水旱轮作系统对土壤总有机碳的影响

Fig.1 Effects of different paddy-upland rotation systems on soil total organic carbon in paddy fields

2.2 水旱轮作系统对稻田土壤活性有机碳含量的影响 稻田水旱轮作系统对各个土层的活性有机碳组分表现出一定的差异性。各处理的活性有机碳组分在各个土层的变化趋

势与 TOC 一致,均随土层深度的增加而降低。如图 2 所示,在 0~5 cm 土层,与 RF 处理相比,RW、RR 和 MR 处理土壤活性有机碳含量分别减少了 13.97%、20.53% 和 14.20%,RF 处理土壤活性有机碳含量显著高于 RR 处理;在 5~10 cm 土层,RF 处理土壤活性有机碳含量显著高于 RW 和 RR 处理,且 MR 与 RW 和 RR 处理,或与 RF 处理之间无显著性差异;在 10~20 cm 土层,RW、RR 和 MR 处理土壤活性有机碳含量显著低于 RF 处理。总体来看,0~20 cm 土层,与 RF 处理相比,RW、RR 和 MR 处理土壤活性有机碳含量显著减少了 19.66%、21.02% 和 22.11%。



注:在同一土层,不同小写字母表示不同处理之间差异显著 ($P < 0.05$)

Note: Within the same soil depth, different lowercase letters stand for significant difference among different treatments at 0.05 level

图 2 稻田水旱轮作系统对土壤活性有机碳的影响

Fig.2 Effects of different paddy-upland rotation systems on soil labile organic carbon in paddy fields

2.3 稻田水旱轮作系统对土壤碳库管理指数的影响 不同水旱轮作系统对稻田土壤碳库管理指数的影响如表 2 所示,在 0~5 cm 土层,与 RF 处理相比,MR 处理的稳态碳含量减少了 18.00%,而 RR 和 RW 处理则增加了 12.47% 和 1.48%;RF 和 MR 处理的碳库活度、碳库活度指数显著高于 RR 处理,且各处理之间的碳库管理指数无显著性差异。在 5~10 cm 土层,与 RF 处理相比,MR 处理的稳态碳含量减少了 15.69%,而 RR 和 RW 处理则增加了 3.36% 和 7.38%;RF 和 MR 的碳库活度、碳库活度指数显著高于 RW 和 RR 处理;RR 处理的碳库指数显著高于 MR 处理;各处理之间的碳库管理指数无显著性差异。在 10~20 cm 土层,RR 处理的稳态碳含量显著高于 MR 处理;各处理的碳库指数、碳库活度指数均无显著性差异;RF 处理的碳库管理指数显著高于 MR 处理,且 RW 和 RR 处理与 RF 处理,或与 MR 处理之间无显著性差异。总体来看,0~20 cm 土层,与 RF 处理相比,MR 处理的稳态碳含量减少了 21.40%,而 RR 和 RW 处理则增加了 6.47% 和 2.36%;RF 和 MR 处理的碳库活度、碳库活度指数显著高于 RW 和 RR 处理;RR 处理的碳库指数显著高于 MR 处理,且 RF 和 RW 处理与 RR 处理,或与 MR 处理之间无显著性差异,相比于 RF 处理,MR、RW 和 RR 处理碳库管理指数分别减少了 21.01%、25.07% 和 23.55%。从整个稻田水旱轮作系统来看,MR 处理利于碳库活度和碳库活度指数的提高;

RR 处理则利于稳态碳和碳库指数的提高。由此说明,MR 处理是通过提高土壤活性有机碳含量来提高土壤有机碳库;

RR 处理主要是通过提高土壤的稳态碳含量来提高土壤有机碳含量。

表 2 稻田水旱轮作系统对不同层次土壤碳库管理指数的影响

Table 2 Effect of different paddy-upland rotation systems on soil carbon pool management index in paddy fields

土层 Soil layer cm	处理 Treatments	稳态碳 Stable carbon g/kg	碳库活性 Activity of carbon pool	碳库指数 Carbon pool index	碳库活性指数 Carbon pool activity index	碳库管理指数 Carbon pool management index//%
0~5	RF	19.26±0.85 b	0.33±0.01 a	1.00±0.00 a	1.00±0.00 a	100.00±0.00 a
	RW	19.55±0.47 b	0.28±0.02 ab	0.98±0.06 ab	0.85±0.04 ab	83.01±2.92 a
	RR	21.66±0.50 a	0.23±0.03 b	1.05±0.06 a	0.72±0.11 b	75.93±15.12 a
	MR	15.80±0.19 c	0.34±0.02 a	0.83±0.06 b	1.05±0.07 a	88.43±12.14 a
5~10	RF	18.67±0.67 a	0.33±0.02 a	1.00±0.00 ab	1.00±0.00 a	100.00±0.00 a
	RW	20.05±0.37 a	0.24±0.01 b	1.00±0.06 ab	0.72±0.06 b	72.30±10.08 a
	RR	19.30±1.45 a	0.26±0.02 b	0.98±0.09 a	0.77±0.05 b	75.53±8.71 a
	MR	15.74±0.49 b	0.34±0.03 a	0.85±0.04 b	1.05±0.15 a	90.59±17.14 a
10~20	RF	17.97±1.05 ab	0.33±0.03 a	1.00±0.00 a	1.00±0.00 a	100.00±0.00 a
	RW	18.00±1.25 ab	0.26±0.02 bc	0.96±0.07 a	0.82±0.13 a	76.48±7.21 ab
	RR	18.84±1.22 a	0.25±0.01 c	0.99±0.11 a	0.76±0.04 a	74.81±6.94 ab
	MR	13.26±2.13 b	0.31±0.02 ab	0.74±0.14 a	0.96±0.10 a	69.46±11.33 b
0~20	RF	18.47±0.90 a	0.33±0.01 a	1.00±0.00 ab	1.00±0.00 a	100.00±0.00 a
	RW	18.90±0.80 a	0.26±0.01 b	0.97±0.06 ab	0.79±0.05 b	76.45±3.72 a
	RR	19.66±0.83 a	0.24±0.01 b	1.00±0.09 a	0.76±0.03 b	74.93±8.98 a
	MR	14.51±1.09 b	0.33±0.00 a	0.79±0.09 b	0.99±0.04 a	78.99±11.00 a

注:在同一土层,不同小写字母表示不同处理之间差异显著($P<0.05$)

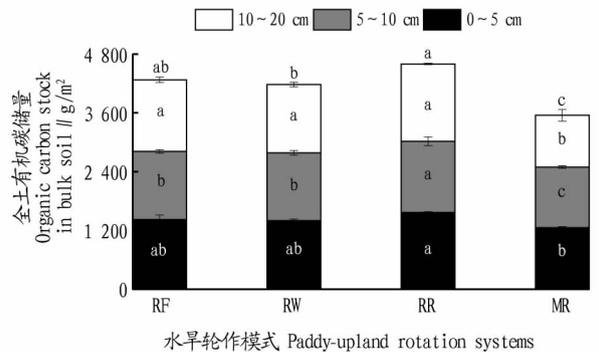
Note: Within the same soil depth, different lowercase letters stand for significant difference among different treatments at 0.05 level

2.4 不同种植模式对稻田土壤有机碳储量的影响 由图 3 可知,在 0~5 cm 土层,RR 处理土壤有机碳储量显著高于 MR 处理,与 RF 处理相比,RR 处理土壤有机碳储量增加了 10.11%,RW 和 MR 处理则减少了 1.39%、11.63%。在 5~10 cm,RR 处理显著高于其他处理,与 RF 处理相比,RR 处理土壤有机碳储量增加了 4.36%,RW 和 MR 处理则减少了 0.73%、11.77%。在 10~20 cm 土层,RF、RW 和 RR 处理的土壤有机碳储量显著高于 MR 处理,与 RF 处理相比,RR 处理土壤有机碳储量增加了 8.14%,RW 和 MR 处理则减少了 4.43%、27.67%。综合分析 0~20 cm 土层,RF、RW、MR 和 RR 处理的总 SOC 储量值分别为 1 417.62、1 372.40、1 162.85 和 1 537.27 g C/m²,与 RF 处理相比,RR 处理土壤有机碳储量增加了 8.14%,RW 和 MR 处理则减少了 4.43%、27.67%。

2.5 稻田水旱轮作系统对产量的影响 由图 4 可知,不同水旱轮作模式对作物产量的影响表现出作物季之间的差异性。对于不同水旱轮作模式的第 1 季,RF、RW、RR 和 MR 处理的年产量分别为 12.25、13.00、13.58 和 9.36 t/hm²。与 RF 处理相比,RW 和 RR 处理产量分别增加了 6.05% 和 10.84%,而 MR 处理显著减少了 23.61%,RF、RW 和 RR 处理之间无显著性差异,且显著高于 MR 处理。

对于不同水旱轮作模式的第 2 季,RF、RW、RR 和 MR 处理的年产量分别为 0、4.98、3.06 和 7.22 t/hm²。MR 处理的产量显著高于 RW 和 RR 处理,且 RW 处理显著高于 RR 处理,由于 RF 处理第 2 季为冬闲田,因此,RF 处理产量均显著低于其他处理。

从整个水旱轮作系统周年来看,各处理之间的产量表现为 RW>MR>RR>RF;与 RF 处理相比,RW、RR 和 MR 处理产量分别增加了 46.71%、35.77% 和 35.33%。RW、RR 和 MR 处



注:在同一土层,不同小写字母表示不同处理之间差异显著($P<0.05$)

Note: Within the same soil depth, different lowercase letters stand for significant difference among different treatments at 0.05 level

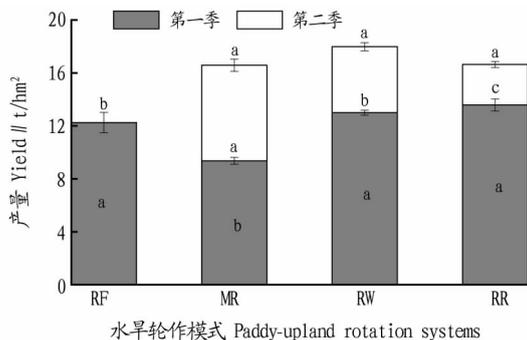
图 3 稻田水旱轮作系统对稻田土壤总有机碳储量的影响

Fig.3 Effects of different paddy-upland rotation systems on soil total organic carbon stock in paddy fields

理产量无显著性差异,且它们之间均显著高于 RF 处理。

3 讨论

农作物不仅是农田土壤中碳素的重要来源,也是土壤中碳素耗损的主要影响因素。耕种、施肥、灌溉等农业管理措施会影响农业土壤中碳库的质和量的迅速变化^[17]。作物轮作是调控农田土壤有机碳循环和积累的重要影响因素^[18]。吴玉红等^[14]研究认为无秸秆投入条件下小麦茬口较油菜茬口稻田土壤碳矿化作用强,油菜—水稻轮作系统更有利于土壤表土有机碳的积累。该研究中,不同水旱轮作模式下,RF、RR 和 RW 处理土壤总有机碳含量均显著高于 MR 处理,这主要是由于种植模式的不同,改变了稻田土壤理化性状,影响土壤有机质的矿化过程。该试验中,MR 模式作物生育期



注:在同一土层,不同小写字母表示不同处理之间差异显著 ($P < 0.05$)

Note: Within the same soil depth, different lowercase letters stand for significant difference among different treatments at 0.05 level

图4 不同水旱轮作系统下作物产量

Fig.4 Rice yield under different paddy-upland rotation system

较其他模式不同,第1季作物玉米收获时间为7月15日,正值全年高温阶段,此时翻耕整田,加速了土壤总有机碳含量的分解矿化速率,从而导致土壤总有机碳含量降低。该研究中,各处理土壤总有机碳和土壤活性有机碳均随土层的加深而减少,这与唐海明等^[19]的研究结果相似。不同轮作模式是通过轮作之间作物根系或残体归还的质量和数量的不同,从而影响土壤有机碳的矿化和固定过程,以此来改变土壤活性有机碳的数量^[18,20]。该研究中,RF处理的土壤活性有机碳均显著高于其他处理,这可能是由于RF处理第二季为冬闲,并未对土壤进行扰动,从而使土壤保持良好的结构,减缓了土壤有机质的氧化和矿化,减弱了土壤中微生物的保护性物质释放^[21-22]。

由土壤碳库指标和土壤碳库活度指标计算而来的土壤碳库管理指数,反映了外界管理措施对土壤有机碳总量和土壤有机碳组分的变化情况,是评价土壤管理的良好指标^[23]。王淑彬等^[24]研究表明冬种作物可以提高土壤碳库管理指数。该研究表明,MR处理利于碳库活度和碳库活度指数的提高;RR处理则利于稳态碳和碳库指数的提高。由此说明,MR处理是通过提高土壤活性有机碳含量来提高土壤有机碳库;RR处理主要是通过提高土壤的稳态碳含量来提高土壤有机碳含量。

RR模式相比RW、MR和对照(RF)模式有利于提高稻田耕层不同层次土壤有机碳储量,增加了土壤固碳潜力;随着土层增加,土壤有机碳储量总体上呈增加趋势,这与唐海明等^[19]的研究结果一致。有研究报道,油菜是一种养地作物^[25];殷艳等^[26]研究认为,稻—油轮作不但不消耗地力反而会增加土壤地力。RR模式主要是通过提高土壤总有机碳含量来提高土壤有机碳储量,因此RR模式较其他模式具有更高的土壤碳储量以及固碳潜力。王飞等^[27]研究认为,单季稻模式改为油菜—水稻、玉米—水稻、紫云英—水稻、蚕豆—水稻水旱轮作模式后,水稻季中油菜—水稻、玉米—水稻轮作方式的增产效果最好,以玉米—水稻轮作模式的产量最高,从旱作期来看,不同轮作模式旱作期2季作物的平均产

量以玉米—水稻轮作模式最高。该研究表明,对于第1季作物,RR、RW和RF处理显著高于MR处理,对于第2季作物,MR处理显著高于其他处理,由于RF处理第二季为冬闲,因此导致RF处理的周年产量显著低于其他处理。

4 结论

经过1年的水旱轮作系统种植试验,短期内,不同水旱轮作系统对稻田不同层次的总有机碳和活性有机碳表现出一定的差异性。在0~20 cm土层,RF、RW和RR处理的总有机碳含量和活性有机碳含量较MR处理分别增加了27.52%、23.58%、27.08%和28.39%、3.15%和1.39%。MR处理利于2季作物收获后各个土层碳库活度和碳库活度指数的提高,RR处理则利于2季作物收获后各个土层稳态碳的提高。由此说明,MR处理是通过提高土壤活性有机碳含量来提高土壤有机碳库;RR处理主要是通过提高土壤的稳态碳含量来提高土壤有机碳含量。从不同水旱轮作系统来看,RR处理较其他处理具有更高的土壤碳储量以及固碳潜力,且RW、RR和MR处理的周年产量均显著高于RF处理。因此,RR模式是适宜在长江中游平原区推广的一种水旱轮作模式。

参考文献

- [1] LAL R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security [J]. *Science*, 2004, 304(5677): 1623-1627.
- [2] LUO Z K, FENG W T, LUO Y Q, et al. Soil organic carbon dynamics jointly controlled by climate, carbon inputs, soil properties and soil carbon fractions [J]. *Global change biology*, 2017, 23(10): 4430-4439.
- [3] COX P M, PEARSON D, BOOTH B B, et al. Sensitivity of tropical carbon to climate change constrained by carbon dioxide variability [J]. *Nature*, 2013, 494(7437): 341-344.
- [4] 彭华, 纪雄辉, 吴家梅, 等. 不同稻草还田模式下双季稻土壤有机碳及碳库管理指数研究 [J]. *生态环境学报*, 2016, 25(4): 563-568.
- [5] XU Y, ZHAN M, CAO C G, et al. Effects of irrigation management during the rice growing season on soil organic carbon pools [J]. *Plant & soil*, 2017, 421(1/2): 337-351.
- [6] 李硕, 李有兵, 王淑娟, 等. 关中平原作物秸秆不同还田方式对土壤有机碳和碳库管理指数的影响 [J]. *应用生态学报*, 2015, 26(4): 1215-1222.
- [7] BLAIR G J, LEFROY R D B, LISE L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems [J]. *Australian journal of agricultural research*, 1995, 46(7): 1459-1466.
- [8] LIU X Y, RASHTI M R, DOUGALL A, et al. Subsoil application of compost improved sugarcane yield through enhanced supply and cycling of soil labile organic carbon and nitrogen in an acidic soil at tropical Australia [J]. *Soil & tillage research*, 2018, 180: 73-81.
- [9] 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, 2017.
- [10] 李淑娅, 田少阳, 袁国印, 等. 长江中游不同玉稻种植模式产量及资源利用效率的比较研究 [J]. *作物学报*, 2015, 41(10): 1537-1547.
- [11] 徐莹. 稻田节水灌溉对稻—油轮作温室气体排放及土壤有机碳的影响机制 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2016.
- [12] 范明生, 江荣凤, 张福锁, 等. 水旱轮作系统作物养分管理策略 [J]. *应用生态学报*, 2008, 19(2): 424-432.
- [13] 黄伟生, 彭佩钦, 苏以荣, 等. 洞庭湖区耕地利用方式对土壤活性有机碳的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 2006, 25(3): 756-760.
- [14] 吴玉红, 郝兴顺, 田霄鸿, 等. 秸秆还田对汉中南盆地稻田土壤有机碳组分、碳储量及水稻产量的影响 [J]. *水土保持学报*, 2017, 31(4): 325-331.
- [15] 李清华, 王飞, 林诚, 等. 水旱轮作对冷浸田土壤碳、氮、磷养分分化的影响 [J]. *水土保持学报*, 2015, 29(6): 113-117.
- [16] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [17] 金峰, 杨浩, 赵其国. 土壤有机碳储量及影响因素研究进展 [J]. *土壤*, 2000(1): 11-17.

chinensis) 监测”与“植物群落监测”中设置的指标、内容、方法和样地相同,不重复开展监测,其他的监测指标和方法单独设置和实施方法如下:“亚洲象 (*Elephas maximus*)”根据野象谷景区的实际情况采用踪迹法全年监测;“鸟类丰度”在望天树景区内设置样带,每年监测 1 次;“游客行为”在望天树景区内设置样带,每年监测 1 次。西双版纳国家级自然保护区的旅游影响生态环境监测,热带雨林和望天树 (*Shorea chinensis*) 监测的指标、内容和方法是根据《云南省_自然保护区与国家公园生物多样性监测技术规程》^[12] 设置和实施,其他几项监测的指标、内容和方法,是按照《自然保护区生态旅游规划技术规程》^[6] 中的相关原则,并根据实施监测景区的实际情况设置和实施。热带雨林是西双版纳国家级自然保护区的代表植被,望天树 (*Shorea chinensis*) 是国家 I 级保护植物、热带雨林的指示性物种,亚洲象 (*Elephas maximus*) 是国家 I 级保护动物,也是代表性和指示性物种。热带雨林、望天树、亚洲象均已被列为旅游影响监测的指标,西双版纳国家级自然保护区旅游影响监测的指标具有指示性和代表性。

3.3 监测内容、地点和指标需要进一步补充完善 西双版纳国家级自然保护区生态旅游影响生态环境监测,从监测的内容看,只开展了生物资源的监测,还可开展自然景观、水环境、空气环境、土壤环境等内容的监测。从监测的地点、指标看(表 1, 2),在 5 个景区开展“游客数量”监测,但只收集游客人数 1 项指标,还可增加客源地、满意度和停留时间等指标。5 个景区中有望天树分布的只有望天树景区,有亚洲象分布的只有野象谷景区,其他景区可以选择其他重要物种进行监测。“游客行为”“鸟种丰度”只在望天树景区开展,其他 4 个景区也可以开展监测。

4 结语

利用自然保护区的资源优势开展生态旅游活动,可以普

及自然科学知识,宣传自然保护区,提高游客的自然保护意识,履行保护区科普教育的职能。游客进入自然保护区后,必然会对自然保护区的生态环境造成影响。选择具有指标性和代表性的监测指标和固定监测点,建立相应的监测程序^[2],开展生态旅游影响监测,反映旅游活动对景区资源环境产生的影响,揭示旅游活动对关键物种、生物群落动态变化的影响机制,分析景区内生物多样性变化的原因,有效推进景区内自然资源和旅游活动的科学、规范管理,为减轻旅游对资源环境产生的影响提供科学依据,并为当地相关发展决策提供数据支持。

参考文献

- [1] 沈庆仲,浅析西双版纳自然保护区生态旅游[J].林业调查规划,2006,31(S2):22-25.
 - [2] 西双版纳国家级自然保护区管护局.云南北双版纳国家级自然保护区生物多样性监测计划(2014-2020)[Z].2014.
 - [3] 杨宇明,唐芳林.西双版纳国家级自然保护区总体规划研究[M].北京:科学出版社,2008:4-13.
 - [4] 吴兆录.西双版纳国家级自然保护区管理成效评价[M].北京:科学出版社,2008:31.
 - [5] 王兰新,郭贤明,赵建伟.自然保护区生物多样性监测重点分析:以西双版纳为例[J].环境科学导刊,2016,35(4):9-11.
 - [6] 李忠,唐小平,李云,等.自然保护区生态旅游规划技术规程:GB/T 20416—2006[S].北京:中国标准出版社,2006.
 - [7] 马建章,程鲲鹏.自然保护区生态旅游对野生动物的影响[J].生态学报,2008,28(6):2818-2827.
 - [8] 李文斌,杨登琴,邓红艳,等.生态旅游对野生鸟类行为的影响探讨[J].环境保护与循环经济,2017,37(11):42-43,54.
 - [9] 李继爱.生态旅游开发建设项目(龙门山景区)对绥中五花顶国家级自然保护区生物多样性影响评价[J].山东林业科技,2018,48(4):54-57.
 - [10] 王家亮,张发,刘硕然,等.生态旅游对大理苍山溪流细菌学指标的影响[J].大理大学学报,2017,2(12):79-83.
 - [11] 周菲菲.生态旅游开发对张家界自然保护区植物景观生态的多尺度影响[J].浙江林业科技,2018,38(2):21-28.
 - [12] 李玉媛,华朝明,方波,等.自然保护区与国家公园生物多样性监测技术规程 第 1 部分:森林生态系统及野生动植物:DB 53/T 391—2012[S].云南省质量技术监督局,2012.
- (上接第 85 页)
- [18] 丁雪丽,韩晓增,乔云发,等.农田土壤有机碳固存的主要影响因子及其稳定机制[J].土壤通报,2012,43(3):737-744.
 - [19] 唐海明,程凯凯,肖小平,等.不同冬季覆盖作物对双季稻田土壤有机碳的影响[J].应用生态学报,2017,28(2):465-473.
 - [20] HAO Y, LAL R, OWENS L B, et al. Effect of cropland management and slope position on soil organic carbon pool at the North Appalachian Experimental Watersheds[J]. Soil & tillage research, 2002, 68(2): 133-142.
 - [21] 王丹丹,周亮,黄胜奇,等.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[J].农业环境科学学报,2013,32(4):735-740.
 - [22] 张英英,蔡立群,武均,等.不同耕作措施下陇中黄土高原旱作农田土壤活性有机碳组分及其与酶活性间的关系[J].干旱地区农业研究,2017,35(1):1-7.
 - [23] 张贵龙,赵建宁,宋晓龙,等.施肥对土壤有机碳含量及碳库管理指数的影响[J].植物营养与肥料学报,2012,18(2):359-365.
 - [24] 王淑彬,王礼献,杨文亨,等.南方不同“冬种+双季稻”种植模式对土壤有机碳和作物产量的影响[J].生态学报,2018,38(18):6603-6610.
 - [25] 邹娟.冬油菜施肥效果及土壤养分丰缺指标研究[D].武汉:华中农业大学,2010.
 - [26] 殷艳,廖星,余波,等.我国油菜生产区域布局演变和成因分析[J].中国油料作物学报,2010,32(1):147-151.
 - [27] 王飞,李清华,林诚,等.冷浸田水旱轮作对作物生产及土壤特性的影响[J].应用生态学报,2015,26(5):1469-1476.