

灌淤土农田土壤有机碳及碳库管理指数 对施肥措施的响应

赵 营¹, 郭鑫年¹, 罗健航¹, 陈晓群¹, 马 芸²

(1. 宁夏回族自治区土壤与植物营养重点实验室, 宁夏农林科学院农业资源与环境研究所, 宁夏 银川 750002;
2. 宁夏农林科学院农产品质量标准与检测技术研究所, 宁夏 银川 750002)

摘 要: 为了探讨施肥对灌淤土水旱轮作农田土壤有机碳和碳库管理指数的影响特征, 寻求合适的土壤增碳措施, 在宁夏引黄灌区水稻-春小麦-春玉米轮作体系中, 通过 3 a 田间定位试验研究了不施肥(CK)、平衡施用化肥(NPK)、单施有机肥(M)、化肥+有机肥配施(NPK+M)、化肥+玉米秸秆(NPK+S)和农民习惯施肥(CON)6 个不同施肥措施对 0~20 cm 耕层土壤总有机碳、活性有机碳含量及碳库管理指数的影响。结果表明, 在同等氮素供应水平下, 无论水田或旱地, NPK、M、NPK+M 和 NPK+S 处理都能达到土壤增碳效果, 3 年的土壤培肥后, 其土壤总有机碳和活性有机碳含量分别达 10.03~10.60 g·kg⁻¹ 和 3.00~4.35 g·kg⁻¹, 与试验前(9.92 g·kg⁻¹ 和 2.48 g·kg⁻¹) 相比分别提高了 1.2%~6.8% 和 20.8%~75.2%, M 处理显著高于 CK。施用有机肥 3 a 以上, 才能显著提高土壤碳库、碳库活度、活度指数和碳库管理指数。因此, 从土壤总有机碳及其活性组分提升的角度考虑, 应在平衡施用 NPK 的基础上, 提倡水旱轮作农田长期增施有机肥来提高土壤碳库管理指数。

关键词: 灌淤土农田; 水旱轮作; 施肥; 土壤总有机碳; 土壤活性有机碳; 土壤碳库管理指数

中图分类号: S153.6; S158.2 **文献标志码:** A

Soil organic carbon and carbon management index affected by the different fertilization methods in the field of irrigation silting soils

ZHAO Ying¹, GUO Xin-nian¹, LUO Jian-hang¹, CHEN Xiao-qun¹, MA Yun²

(1. Key Laboratory of Soil and Plant Nutrition of Ningxia Hui Autonomous Region, Institute of Agricultural Resources and Environment, Ningxia Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Yinchuan, Ningxia 750002, China; 2. Institute of Quality Standard and Testing Technology for Agro-products of Ningxia Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Yinchuan, Ningxia 750002, China)

Abstract: In order to investigate the characteristics of fertilization effects on soil organic carbon and carbon management index of irrigation silting soils in the paddy-upland rotation field, and look for a suitable method for soil carbon improvement and sequestration, a three-year field experiment was conducted to study the effects of six different fertilization methods including no fertilizer (CK), balanced application of chemical fertilizers (NPK), application of manure (M), combination of or-inorganic fertilizers (NPK + M), chemical fertilizers plus maize straw (NPK + S), and conventional fertilizers by farmers (CON) on soil total organic carbon content, labile organic carbon content, and carbon management index of the 0~20 cm topsoil in the rotation system of paddy rice-spring wheat-spring maize in the Yellow River irrigation region of Ningxia. The results showed that soil organic carbon content was increased to some extent by treatments NPK, M, NPK + M, and NPK + S under the same N supply in paddy or upland fields. Compared with the soil before any treatment where the corresponding contents were 9.92 and 2.48 g·kg⁻¹, soil total and labile organic carbon contents were 10.03~10.60 and 3.00~4.35 g·kg⁻¹ with these treatments after three years fertilization, improved by 1.2%~6.8% and 20.8%~75.2%, respectively. A significant difference was further found between treatment M and CK. Soil carbon pool index, organic carbon activity, organic carbon activity index, and carbon management index were also significantly

收稿日期: 2015-05-12
基金项目: 国家自然科学基金项目(41401319); 宁夏自然科学基金项目(NZ13104)
作者简介: 赵 营(1979—), 男, 河南项城人, 副研究员, 博士, 主要从事土壤培肥与农田养分循环研究。E-mail: tony029@126.com。
通信作者: 马 芸(1967—), 女, 山东枣庄人, 高级实验师, 从事农产品与农化分析方法研究。E-mail: 345797930@qq.com。

increased by the application of manure after three years. Therefore, in consideration of soil organic carbon and increase in its labile component, a balance application of N, P, and K fertilizers should be the base to promote a long-term application of manure for the enhancement of soil carbon management index in the paddy – upland rotation field.

Keywords: the paddy-upland rotation system; fertilization; soil total organic carbon; soil labile organic carbon; soil carbon management index (CMI)

土壤有机质是土壤肥力的重要特征,维持农田土壤碳库平衡,增加土壤活性有机碳组分含量对土壤培肥起着重要作用。土壤有机碳的稳定机制决定着土壤固定和储备有机碳的能力,土壤有机碳稳定性对全球碳平衡起着重要作用,被认为是影响全球“温室效应”的主要因素^[1]。施肥是最直接影响土壤有机碳及其组分含量和碳库管理指数的因素^[1-6],秸秆还田或地表覆盖也是提高表层土壤有机碳及其组分含量、维持土壤有机碳库平衡的重要措施^[7-10]。在西北干旱绿洲区的旱作条件下,轮作模式对棉田土壤团聚体组成及有机碳分布存在不同的影响,棉花与大豆或玉米短期轮作倒茬有利于土壤团聚体的形成和稳定^[11]。施肥对水稻田土壤有机碳分布和组分特征影响已有研究^[4,12],水旱轮作由于存在明显的干湿交替,而这种干湿交替对土壤有机碳转化具有重要影响。水田和旱地土壤有机碳周转对水分的响应也已有探讨^[13],但施肥措施对水旱轮作体系农田土壤有机碳组分含量和碳库管理指数影响的研究尚待深入。

年际间水旱轮作是宁夏引黄灌区典型的农田耕作制度,但在水稻、春小麦和春玉米施肥中,重施化肥,轻施有机肥,施用有机肥农户比例不到40%,水稻、春小麦和麦套玉米平均施氮量分别高达306.0、318.0 kg·hm⁻²和631.5 kg·hm⁻²,作物的氮肥施用普遍严重过量,但土壤有机质含量并没明显提高^[14]。另外,水旱轮作作物秸秆还田的比例逐渐降低,农田土壤有机碳提升缓慢,亟需研究提出该轮作体系下农田土壤增碳的施肥管理措施。因此,本文通过3 a的田间定位培肥试验,以灌淤土土壤有机碳为研究对象,研究了不同施肥措施对水旱轮作农田耕层土壤总有机碳含量、土壤C/N值和活性有机碳含量的影响,分析评价了不同施肥措施下土壤碳库管理指数和碳库稳定性特征,为宁夏引黄灌区水旱轮作农田土壤增碳管理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于2008—2010年在宁夏引黄灌区的中宁

县舟塔乡康滩村进行,地理坐标为东经105°38'7",北纬37°30'38",该地海拔1 110 m,主要气候特点是干旱少雨,是典型的灌溉农业区,种植制度一般为水旱轮作(水稻与小麦或玉米2~3年际间轮作)。土壤类型为灌淤土,0~20 cm土壤的基础理化性质为:pH 7.3,有机质17.1 g·kg⁻¹(有机碳9.92 g·kg⁻¹),全氮1.08 g·kg⁻¹,无机氮(硝态氮+铵态氮)22.5 mg·kg⁻¹,有效磷19.4 mg·kg⁻¹,速效钾102.0 mg·kg⁻¹。

1.2 试验设计

试验设6个施肥处理:不施肥(CK,不施任何肥料)、平衡施用化肥(NPK)、单施有机肥(M)、化肥+有机肥配施(NPK+M)、化肥+玉米秸秆(NPK+S)和农民习惯施肥(CON),每个小区面积33 m²(5.5 m×6 m),随机区组排列,重复3次。习惯施肥处理按当地调查平均水平,其它各施肥处理在等氮量的基础上进行,NPK+M处理的氮输入比例为1:1,磷钾不足部分以化肥补充。氮肥为含N 46%尿素,磷肥为普通过磷酸钙P₂O₅ 12%,钾肥为硫酸钾K₂O 50%,有机肥为牛粪(鲜基:C 164.3 g·kg⁻¹、N 10.3 g·kg⁻¹、P₂O₅ 2.4 g·kg⁻¹、K₂O 13.8 g·kg⁻¹),秸秆为玉米秸秆(C 450.0 g·kg⁻¹、N 5.0 g·kg⁻¹、P₂O₅ 4.0 g·kg⁻¹、K₂O 16.7 g·kg⁻¹)还田量4.5 t·hm⁻²。不同施肥处理化肥和有机肥养分输入量如表1所示。

水旱轮作作物为水稻-春小麦-春玉米,各施肥处理小区的水旱轮作周期保持同步。供试水稻品种为宁粳28号,前茬作物为麦套玉米,2008年5月17日插秧,行穴距25 cm×9 cm,每穴3苗,9月29日收获取样。水稻氮肥基施50%,分别在分蘖期和孕穗期追施25%,有机肥和磷、钾肥全部基施。供试小麦品种为宁春16号,2009年3月9日播种,播种量为300 kg·hm⁻²,行距10 cm,7月16日收获。春小麦氮肥基施60%,分别在分蘖期和拔节期追施20%。农民习惯施肥处理2/3的氮肥和全部磷肥基施,1/3的氮肥在小麦灌头水前(分蘖前期)追施。供试玉米品种为郑大12号,2010年4月7日播种,播种量为60 kg·hm⁻²,宽窄行种植(宽90 cm×窄30

cm),栽培密度 7.5 万株·hm⁻²,9 月 23 日收获。 节前追施,40%的氮追施在玉米大喇叭口期。各个水
30%氮肥和全部磷、钾肥基施,30%的氮肥在玉米拔 旱轮作物生育期间的田间灌水等管理同当地大田。

表 1 2008—2010 年水旱轮作体系不同施肥措施下养分和有机碳输入量

Table 1 Nutrients and carbon input by different fertilization methods in the paddy-upland rotation system from 2008 to 2010									
年份 Year	作物 Crop	处理 Treatment	化肥/(kg·hm ⁻²) Chemical fertilizers			牛粪或玉米秸秆/(kg·hm ⁻²) Dairy manure or maize strawcal fertilizers			
			N	P ₂ O ₅	K ₂ O	C	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
2008	水稻 Paddy rice	NPK	240	120	180	—	—	—	—
		M	—	64	—	7886	240	56	322
		NPK + M	120	92	19	3943	120	28	161
		NPK + S	217	102	105	2025	23	18	75
		CON	300	120	—	—	—	—	—
2009	春小麦 Spring wheat	NPK	180	90	180	—	—	—	—
		M	—	48	—	5915	180	42	241
		NPK + M	90	69	59	2957	90	21	121
		NPK + S	157	72	105	2025	23	18	75
		CON	315	180	—	—	—	—	—
2010	春玉米 Spring maize	NPK	225	90	180	—	—	—	—
		M	—	38	—	7394	225	52	301
		NPK + M	112.5	64	29	3697	112.5	26	151
		NPK + S	202	72	105	2025	23	18	75
		CON	300	135	—	—	—	—	—

1.3 土样采集与测定

本研究土样来源于 3 a 的水旱轮作试验。试验前,采集 5 点混合 0 ~ 20 cm 耕层土样;每季作物收获后,按小区采集不同施肥处理 0 ~ 20 cm 耕层土样,3 点混合。土壤总有机碳采用重铬酸钾外加热法测定,活性有机碳采用 333 mmol·L⁻¹ KMnO₄ 氧化法测定,土壤非活性有机碳 = 土壤总有机碳 - 活性有机碳。

1.4 计算公式

土壤碳库管理指数计算公式参考张贵龙等^[15]的方法:碳库指数(Carbon pool index, CPI) = 样品总有机碳(g·kg⁻¹)/参照土壤总有机碳(g·kg⁻¹),以试验前起始土壤为参照土壤;土壤碳的不稳定性,即碳库活度(A) = 样品中的活性有机碳(LOC)/样品中的非活性有机碳(NLOC);碳库活度指数(Activity index, AI) = 样品的碳库活度(A)/对照的碳库活度(A0),试验前起始土壤为对照;碳库管理指数(Carbon management index, CMI):指土壤管理措施引起土壤有机碳变化的指标,能够反映农作施肥措施对土壤碳量下降或更新的程度,碳库管理指数 $CMI = CPI \times AI \times 100$ 。

文中所有数据采用 Excel 2007 和 DPS 7.05 软件

进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 水旱轮作农田土壤总有机碳及 C/N 值对不同施肥措施的响应

水旱轮作体系下,灌淤土农田土壤总有机碳含量和 C/N 值对不同施肥措施的响应如表 2 所示。结果表明,2008 年水稻和 2009 年春小麦季,不同施肥处理间土壤总有机碳含量差异未能达显著水平;到 2010 年春玉米季,M 相对于 CK 处理的土壤总有机碳含量才显著增加,但其与其它施肥措施间也无显著差异。无论水田还是旱田,NPK、M、NPK + M 和 NPK + S 处理都能起到一定的土壤增碳作用,经过 3 a 的土壤培肥,其土壤总有机碳含量达 10.03 ~ 10.60 g·kg⁻¹,与试验前的 9.92 g·kg⁻¹相比,NPK、M、NPK + M 和 NPK + S 处理土壤总有机碳分别提高了 1.2%、6.8%、2.9% 和 2.3%。农民习惯施肥(CON 处理)仅能基本维持土壤有机碳含量水平。因此,从土壤增碳的角度考虑,同等氮素供应水平下,大量单施有机肥(M 处理)的土壤增碳作用最好,且连续 3 a 以上施肥才有显著效果;其次是 NPK + M、NPK + S 和 NPK 处理。

表 2 水旱轮作体系灌淤土土壤总有机碳和 C/N 值对不同施肥措施的响应
Table 2 Effects of different fertilization methods on soil total organic carbon and the ratio of C/N in irrigation silting soils in the paddy-upland rotation system

处理 Treatment	土壤总有机碳 Soil total organic C/(g·kg ⁻¹)				土壤 C/N 比 Ratio of soil C/N			
	试验前 Original	2008 水稻 Paddy rice	2009 春小麦 Spring wheat	2010 春玉米 Spring maize	试验前 Original	2008 水稻 Paddy rice	2009 春小麦 Spring wheat	2010 春玉米 Spring maize
CK	9.92	9.47 ± 0.86 a	9.67 ± 0.84 a	9.49 ± 0.15 b	9.18	9.71 ± 0.55 a	9.54 ± 0.09 a	9.35 ± 0.43 a
NPK	9.92	9.88 ± 0.44 a	10.23 ± 0.54 a	10.03 ± 0.25 ab	9.18	9.42 ± 1.68 a	9.25 ± 0.47 a	9.57 ± 0.34 a
M	9.92	10.21 ± 0.99 a	10.07 ± 0.58 a	10.60 ± 0.24 a	9.18	10.00 ± 1.87 a	9.38 ± 0.13 a	9.81 ± 0.83 a
NPK + M	9.92	10.03 ± 0.41 a	10.23 ± 0.38 a	10.21 ± 0.46 ab	9.18	9.50 ± 0.84 a	9.67 ± 1.10 a	9.46 ± 0.91 a
NPK + S	9.92	9.88 ± 0.73 a	9.98 ± 0.76 a	10.15 ± 0.15 ab	9.18	8.61 ± 0.47 a	9.27 ± 0.67 a	9.41 ± 0.37 a
CON	9.92	9.96 ± 1.31a	9.82 ± 0.44 a	9.98 ± 0.71 ab	9.18	9.86 ± 0.67 a	9.45 ± 0.40 a	9.59 ± 0.43 a

注:表中同一作物季施肥处理间不同小写字母表示 5%显著水平,± 后面数据为标准差;下同。
Note: Different small letters among different fertilization methods in the same crop season showed significant difference at 5% , data after ± were standard deviation (SD); hereinafter.

表 2 还可以看出,同一个作物季不同施肥措施的土壤 C/N 值差异不显著,但相对于试验前基础比值(9.18),不同施肥措施都有调控土壤 C/N 值的作用。M 和 NPK + M 处理主要是通过施用高 C/N 值的牛粪来增加土壤有机碳含量进行调控,其土壤 C/N 值从试验前的 9.18 分别提高到 2008—2010 年不同作物季的 9.38 ~ 10.00 和 9.46 ~ 9.67。而 CK 处理是通过降低土壤氮素盈余量来提高土壤 C/N 值,2008 年水稻和 2009 年春小麦季分别为 9.71 和 9.54,但随着土壤有机碳的不断消耗,其 2010 年春

玉米季土壤 C/N 值又降为 9.35。另外,水田进行秸秆还田(NPK + S 处理)会加速土壤有机碳矿化,降低土壤 C/N 值,2008 年水稻季土壤 C/N 值仅为 8.61,低于试验前的基础比值 9.18。总体来说,各轮作作物季不同施肥措施下土壤 C/N 值一般都在 10 以下。

2.2 水旱轮作农田土壤活性与非活性有机碳含量对不同施肥措施的响应

表 3 结果表明,不同施肥措施对水旱轮作农田土壤活性有机碳含量影响各有差异,但对非活性有机碳含量的差异影响都不显著。

表 3 水旱轮作体系灌淤土土壤活性与非活性有机碳含量对不同施肥措施的响应
Table 3 Effects of different fertilization methods on soil labile and non-labile organic carbon of the irrigation silting soils in the paddy-upland rotation system

处理 Treatment	土壤活性有机碳 LOC/(g·kg ⁻¹)				土壤非活性有机碳 NLOC/(g·kg ⁻¹)			
	试验前 Original	2008 水稻 Paddy rice	2009 春小麦 Spring wheat	2010 春玉米 Spring maize	试验前 Original	2008 水稻 Paddy rice	2009 春小麦 Spring wheat	2010 春玉米 Spring maize
CK	2.48	2.53 ± 0.50 a	1.98 ± 0.30 a	2.38 ± 0.24 b	7.44	6.94 ± 1.33 a	7.69 ± 0.61 a	7.11 ± 0.26 a
NPK	2.48	2.77 ± 0.52 a	2.55 ± 0.06 a	3.00 ± 1.16 b	7.44	7.11 ± 0.28 a	7.68 ± 0.49 a	7.04 ± 1.41 a
M	2.48	2.95 ± 1.01 a	2.62 ± 0.59 a	4.35 ± 0.44 a	7.44	7.26 ± 0.83 a	7.45 ± 0.56 a	6.25 ± 0.30 a
NPK + M	2.48	3.03 ± 0.54 a	2.73 ± 0.14 a	3.43 ± 0.15 ab	7.44	7.01 ± 0.67 a	7.50 ± 0.36 a	6.78 ± 0.44 a
NPK + S	2.48	2.70 ± 0.33 a	2.65 ± 0.97 a	3.30 ± 0.98 ab	7.44	7.19 ± 0.83 a	7.32 ± 1.03 a	6.85 ± 1.06 a
CON	2.48	2.91 ± 0.95 a	2.65 ± 0.73 a	2.78 ± 0.94 b	7.44	7.05 ± 1.00 a	7.17 ± 0.49 a	7.20 ± 0.85 a

施肥对 2008 年水田和 2009 年旱地土壤活性有机碳含量均无显著影响,但在 2010 年春玉米季出现显著性差异,除 CK(2.38 g·kg⁻¹)外,其它施肥处理下土壤活性有机碳含量达 2.78 ~ 4.35 g·kg⁻¹,M 处理达到显著水平。相比试验前(2.48 g·kg⁻¹),M、NPK + M、NPK + S 处理对提高土壤活性有机碳效果明显,其 2010 年春玉米季土壤非活性有机碳含量降

低到 6.25 ~ 6.85 g·kg⁻¹,但这 3 个施肥处理间差异并不明显。参照表 2 数据,不同施肥措施下土壤活性有机碳组分占总有机碳比例最高的是 M 处理,不同作物季比例达 25.8% ~ 42.2%,平均为 32.8%;其次是 NPK + M 和 NPK + S 处理,不同作物季比例分别为 26.9% ~ 34.0%和 27.1% ~ 32.6%,平均分别为 30.2%和 29.2%。而 CK 处理会降低其活性有

机碳组分含量,尤其是在 2009 年旱地作物季表现更为突出。NPK 处理一定程度上也能提高土壤活性有机碳组分含量,这可能是平衡施肥增加了作物根系等秸秆残留物,但水田或旱地都未能达到显著水平。因此,从长远来看,在合理施用化肥的基础上增施有机肥是提高土壤活性有机碳组分的重要措施。

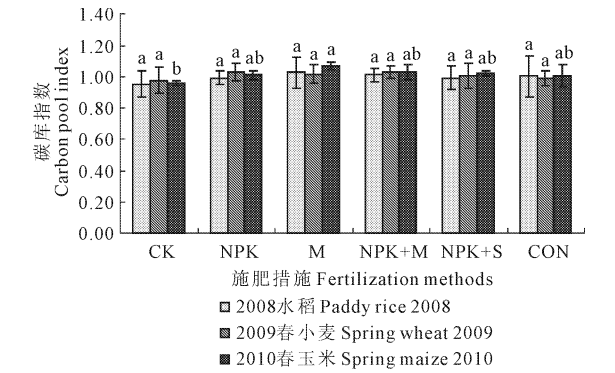
2.3 水旱轮作农田土壤碳库管理指数及其稳定性分析

施肥措施是影响土壤有机碳库储备和更新的重要因素,从而影响农田土壤有机碳平衡和稳定性。2008—2010 年水稻—春小麦—春玉米轮作体系下,不同施肥措施都或多或少地影响农田土壤有机碳库指数(CPI),如图 1 所示。2008 年水稻和 2009 年春小麦季,不同施肥处理间碳库指数差异不显著,说明短期的培肥并不能对土壤有机碳库产生明显的影响,直到 2010 年春玉米季,M 较 CK 处理显著提高了土壤碳库指数。由此可见,长期施用有机肥的增碳或固碳措施能显著提高农田土壤碳库指数。

碳库活度(A)是农田土壤活性有机碳组分的表征。图 2(a)结果表明,2008—2009 两年的土壤培肥对农田土壤碳库活度影响很小,主要是施肥措施对碳库活性组分影响很有限,培肥第 3 年(2010 年春玉米季)起,与 CK、CON 处理相比,M 处理能显著提高土壤碳库活度,但其与 NPK、NPK + M 和 NPK + S 处理间差异不显著。这表明,农民习惯施肥措施不利于农田土壤碳库活度的稳定,而持续增施有机肥是提高土壤碳库活度的关键。

碳库活度指数(AI)是指施肥处理后不稳定性与施肥前不稳定性比较。水旱轮作体系不同施肥措施下土壤碳库活度指数如图 2(b)所示,可以看出,2010 年春玉米季,不同施肥措施间的土壤碳库活度

指数存在显著差异,与 CK、CON 处理相比,M 处理也能显著提高土壤碳库活度指数,但与其它施肥处理间差异不明显。



注:图中误差棒表示标准差,同一作物季施肥处理间不同小写字母代表 5% 显著水平差异;下同。

Note: The vertical bars indicate the standard deviation of the mean, and the square columns in the same crop season with different small letters show significant difference at 5%; the same as below.

图 1 水旱轮作体系不同施肥措施下土壤碳库指数
Fig.1 Soil carbon pool index (CPI) by different fertilization methods in the paddy-upland rotation system

土壤碳库管理指数(CMI)表征着土壤有机碳的稳定性大小。图 3 是水旱轮作体系不同施肥措施下的土壤碳库管理指数差异比较,结果表明,M、NPK + M 和 NPK + S 处理都有利于土壤有机碳的提升和稳定,连续培肥 3 a 以上才能显著增碳和促进土壤有机碳组分的稳定。对不同施肥措施而言,M 处理最有利于农田土壤有机碳库的稳定,其次是 NPK + M 和 NPK + S 处理,CON 处理的效果最差。因此,应当在合理施用化肥的基础上,提倡农田长期增施有机肥来提高水旱轮作农田土壤碳库管理指数,促进土壤有机碳的稳定。

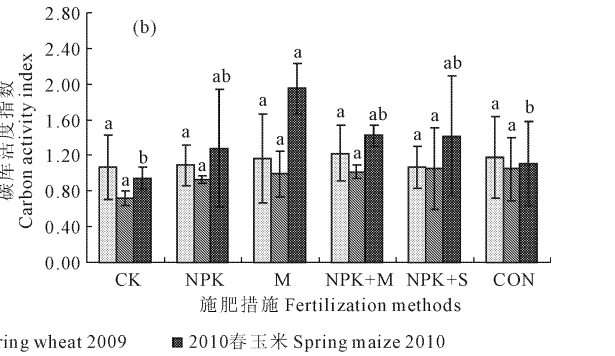
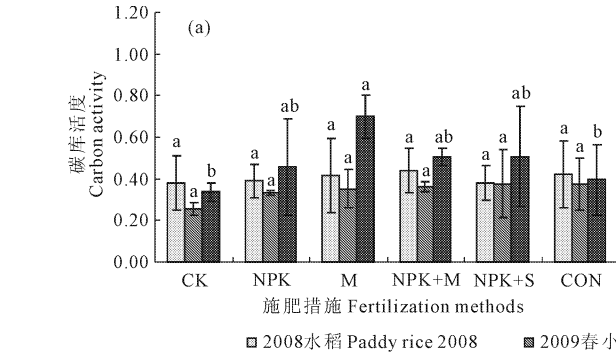


图 2 水旱轮作体系不同施肥措施下土壤碳库活度(a)与碳库活度指数(b)
Fig.2 Soil organic carbon activity (a) and activity index (b) by different fertilization methods in the paddy-upland rotation system

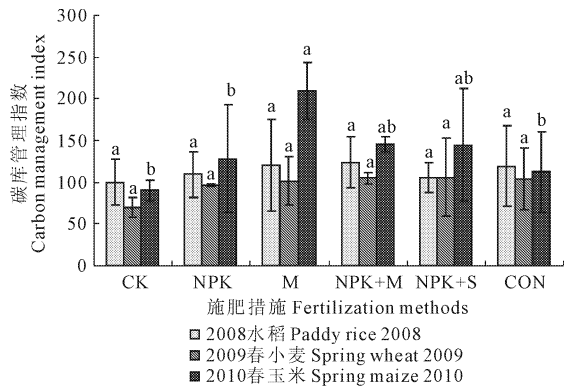


图 3 水旱轮作体系不同施肥措施下土壤碳库管理指数
Fig.3 Soil carbon management index (CMI) by different fertilization methods in the paddy-upland rotation system

3 讨 论

施肥、耕作和秸秆还田等措施都对农田土壤有机碳组分、碳库平衡和固碳潜力等产生影响^[1-12,15]。在东北黑土条件下,有机无机不同配比对土壤有机碳、活性有机碳、碳库管理指数及粮食产量均有影响,有机无机氮在 1:1 配比下能达显著水平;短期内少量施用牛粪不能显著增加土壤有机碳含量,但随着牛粪施用量的增加,土壤中的有机碳含量也明显增加^[3]。本研究也有类似结果,在 2008 年水稻和 2009 年春小麦前两个作物季,不同土壤培肥措施对水田或旱地土壤总有机碳、活性有机碳含量均无显著影响,但随着牛粪施用量增加,在 2010 年春玉米季,M 处理相对于 CK 处理土壤总有机碳才显著增加,说明在该水旱轮作体系下,短期连续增施有机肥在 3 a 以上才有明显的土壤增碳和改善土壤碳库活性组分的效果。许多研究已证实,在旱地土壤上,化肥氮与有机肥或秸秆配合以及长期施用有机肥有利于 0~20 cm 耕层土壤有机碳及其活性组分的累积^[5-6,16],种植绿肥后直接还田也能显著促进土壤总有机碳和活性有机碳的累积^[17]。长期单施化肥对土壤有机碳无明显影响^[18],这也解释了本试验中农民长期单施化肥(CON 处理)仅能维持土壤有机碳含量水平,而不能明显提高的原因。本试验由于是在等养分供应条件下进行,在水旱轮作体系有机无机配合以及化肥与秸秆配合的土壤增碳效果均未达显著水平,仅单施有机肥(M)处理在第 3 年有显著性差异。土壤有机碳库活性的提高,也与土壤微生物量碳和土壤速效养分供应密切相关^[18-19]。有机肥对土壤微生物量碳的影响最大,而土壤微生物量碳与土壤肥力关系紧密,土壤微生物量碳与土壤活性有机碳呈显著的正相关^[18],活性

有机碳与土壤碱解氮、速效钾含量都呈极显著正相关^[19]。而在该水旱轮作条件下,不同施肥措施下活性有机碳的变化对土壤微生物量碳、土壤速效养分含量影响的研究还需探讨。

土壤有机碳的累积和释放(矿化作用等)是一个动态平衡过程^[20],而土壤 C/N 值影响土壤微生物活性,从而影响土壤碳、氮的矿化和固定,通常土壤 C/N 值为 10 较为合适^[21],本试验中不同施肥措施下土壤 C/N 值通常都在 10 以下,但通过长期土壤增碳固碳和土壤氮素盈余的降低,土壤 C/N 值应该可以调控到 10 以上。在西北黄土旱塬黑垆土上^[22],长期增施有机肥和秸秆还田提高了土壤有机碳固定与积累。在洞庭湖平原红壤性水稻土上,与单施氮、磷、钾肥处理相比,有机肥与化学氮、磷、钾肥配施也更有利于土壤固碳能力的增强^[12]。而本试验水旱轮作灌淤土农田条件下,同等养分供应时,有机肥和化肥配施、秸秆和化肥配施的土壤固碳效应并没有单施有机肥的效果明显。

土壤碳库管理指数与土壤的化学性质尤其是土壤养分因子呈显著或极显著相关,反映了农业生产措施对土壤碳库的影响,运用土壤碳库管理指数可以很好地反映出土壤碳库的动态变化。碳库管理指数明显受施肥的影响,可反映农业生产措施对土壤碳库的影响,因此可用来评估土壤碳库的变化^[2]。活性有机碳含量与碳库管理指数存在极显著的相关性^[17]。本研究中,水旱轮作体系连续增施有机肥 3 a 后,才对土壤碳库活度、碳库活度指数和碳库管理指数产生显著影响;在黄土高原旱地土壤上,秸秆覆盖 4 a 后碳库管理指数才有显著提高^[10],这说明无论水旱轮作或旱地条件下,其土壤有机碳组分改善得极其缓慢,需要长期、合理地培肥措施才能显著提升土壤碳库。有研究表明,粮食作物产量与有机碳库活度呈显著或极显著相关^[17,23],施有机肥或有机、无机肥适当配施能提高土壤有机碳含量和土壤碳库管理指数,有利于改善土壤质量,提高土壤肥力。但水旱轮作的干湿交替条件下土壤碳库周转与旱地土壤不同,研究结果显示,风干土壤再湿润后会加剧土壤有机碳矿化,与未风干土壤相比,风干土壤再湿润后的 2~6 d,其有机碳矿化量提高 5 倍^[24]。在淹水条件下,无论水田还是旱地土壤有机碳矿化速率均高于好气条件^[13],干湿交替过程促进了有机碳的降解。这也解释宁夏引黄灌区水旱轮作农田土壤有机碳提升缓慢的原因,需要土壤培肥 3 a 以上才能够显著增碳和促进土壤有机碳组分的稳定。

4 结 论

(1) 在水旱轮作体系中, NPK、M、NPK + M 和 NPK + S 处理都能起到土壤增碳作用。同等氮素供应水平下, 2010 年春玉米种植后, NPK、M、NPK + M 和 NPK + S 处理土壤总有机碳和活性有机碳含量分别达 $10.03 \sim 10.60 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $3.00 \sim 4.35 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 与试验前($9.92 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $2.48 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)相比, 土壤总有机碳含量分别提高了 1.2%、6.8%、2.9% 和 2.3%, 土壤活性有机碳含量分别提高了 20.8%、75.2%、38.3% 和 33.1%。

相对于 CK 处理, M 处理的土壤增碳效果最好, 且连续施用有机肥 3 a 以上才能显著提高土壤总有机碳和活性有机碳含量; 其次是 NPK + M、NPK + S 和 NPK 处理, CON 处理仅能基本维持土壤总有机碳及活性组分含量水平。不同施肥措施均起到调节土壤 C/N 值的作用, 但其土壤 C/N 值一般都在 10 以下。

(2) 对不同施肥措施而言, M 处理最有利于农田土壤碳库的稳定, 其次是 NPK + M 和 NPK + S 处理, CON 处理效果最差。连续施用有机肥定位培肥 3 a 以上, 才能显著提高灌淤土农田土壤碳库、碳库活度、活度指数和碳库管理指数, 并明显促进土壤有机碳组分的稳定。

因此, 宁夏引黄灌区水旱轮作体系中, 在平衡施用氮、磷、钾肥的基础上, 适当增施有机肥有利于提高土壤碳库管理指数和土壤有机碳的稳定性, 但需要连续培肥 3 a 以上才能达到显著的效果。

参 考 文 献:

- [1] 尹云锋, 蔡祖聪. 不同施肥措施对潮土有机碳平衡及固碳潜力的影响[J]. 土壤, 2006, 38(6): 745-749.
- [2] 宇万太, 赵鑫, 马强, 等. 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[J]. 土壤通报, 2008, 39(3): 539-544.
- [3] 赵红, 吕贻忠, 杨希, 等. 不同配肥方案对黑土有机碳含量及碳库管理指数的影响[J]. 中国农业科学, 2009, 42(9): 3164-3169.
- [4] 陈小云, 郭菊花, 刘满强, 等. 施肥对红壤性水稻土有机碳活性和难降解性组分的影响[J]. 土壤学报, 2011, 48(1): 125-131.
- [5] 艾孜古丽·木拉提, 同延安, 杨宪龙, 等. 不同施肥对农田土壤有机碳及其组分的影响[J]. 土壤通报, 2012, 43(6): 1461-1466.

- [6] 曾骏, 董博, 张东伟, 等. 不同施肥方式对灌漠土土壤有机碳、无机碳和微生物量碳的影响[J]. 水土保持通报, 2013, 33(2): 35-38.
- [7] 马力, 杨林章, 肖和艾, 等. 施肥和秸秆还田对红壤水稻土有机碳分布变异及其矿化特性的影响[J]. 土壤, 2011, 43(6): 883-890.
- [8] 陈鲜妮, 岳西杰, 葛玺祖, 等. 长期秸秆还田对垆土耕层土壤有机碳库的影响[J]. 自然资源学报, 2012, 27(1): 25-32.
- [9] 张青, 李慧瑛, 孙媛, 等. 旱作条件下轮作模式和秸秆还田对土壤碳平衡的影响[J]. 西北农业学报, 2014, 23(11): 212-218.
- [10] 梁贻仓, 王俊, 刘全全, 等. 地表覆盖对黄土高原土壤有机碳及其组分的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2014, 32(5): 161-167.
- [11] 张凤华, 王建军. 不同轮作模式对土壤团聚体组成及有机碳分布的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2014, 32(4): 113-116, 139.
- [12] 李文军, 杨基峰, 彭保发, 等. 施肥对洞庭湖平原水稻土团聚体特征及其有机碳分布的影响[J]. 中国农业科学, 2014, 47(20): 4007-4015.
- [13] 王媛华, 苏以荣, 李杨, 等. 水田和旱地土壤有机碳周转对水分的响应[J]. 中国农业科学, 2012, 45(2): 266-274.
- [14] 王明国, 马玉兰, 冯静, 等. 宁夏农户施肥调查与评价[J]. 农业科学研究, 2009, 30(1): 13-15.
- [15] 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.
- [16] 廖敏, 彭英, 陈义, 等. 长期不同施肥管理对稻田土壤有机碳库特征的影响[J]. 水土保持学报, 2011, 25(6): 129-133, 138.
- [17] 杨滨娟, 黄国勤, 兰延, 等. 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[J]. 应用生态学报, 2014, 25(10): 2907-2913.
- [18] 董博, 张东伟, 郭天文, 等. 长期定位施肥对土壤有机碳和微生物量碳的影响[J]. 土壤通报, 2012, 43(6): 1467-1472.
- [19] 张恩平, 王维念, 张淑红. 长期定位施肥条件下土壤活性有机碳变化及其与土壤速效养分的相关性[J]. 沈阳农业大学学报, 2014, 45(5): 528-532.
- [20] 潘剑君, 郝珅存, 孟静娟. 中国土壤有机碳分解特征研究初报[J]. 土壤, 2011, 43(4): 505-514.
- [21] John L H, James D B, Samuel L T, et al. Soil fertility and fertilizers: An introduction to nutrient management (seventh edition) (photocopying)[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006: 119-120.
- [22] 樊廷录, 王淑英, 周广业, 等. 长期施肥下黑垆土有机碳变化特征及碳库组分差异[J]. 中国农业科学, 2013, 46(2): 300-309.
- [23] Majumder B, Mandal B, Bandyopadhyay P K, et al. Organic amendments influence soil organic carbon pools and rice-wheat productivity[J]. Soil Science Society of American Journal, 2008, 72: 775-785.
- [24] Clein J S, Schimel J P. Reduction in microbial activity in birch litter due to drying and rewetting events[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1994, 26(3): 403-406.