

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2023.02.027

刘强, 梁鑫, 董佩丽, 等. 不同施肥措施对黄土丘陵区农田土壤有机碳组分和碳库管理指数的影响. 土壤, 2023, 55(2): 446–452.

不同施肥措施对黄土丘陵区农田土壤有机碳组分和碳库管理指数的影响^①

刘 强^{1,2}, 梁 鑫¹, 董佩丽¹, 李 湘¹, 史爱玲¹, 王莉霞^{1*}, 徐德华³

(1 天水师范学院资源与环境工程学院, 甘肃天水 741000; 2 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100; 3 太原师范学院地理科学学院, 山西晋中 030619)

摘 要: 基于中科院安塞水土保持试验站长期定位试验, 研究了 5 种不同施肥措施, 包括不施肥(CK)、氮磷肥配施(NP)、氮磷钾肥配施(NPK)、单施有机肥(M)和有机肥配施氮磷肥(MNP)对土壤有机碳组分及碳库管理指数(CPMI)的影响。结果表明: 不同施肥处理均能增加不同土层土壤有机碳及其组分含量, 且土壤有机碳及其组分含量随土层深度增加而逐渐降低; 施用有机肥处理(M 和 MNP) 0~20 cm 土壤有机碳及其组分含量显著高于化肥处理(NP 和 NPK)和 CK 处理; 与 CK 处理相比, M 和 MNP 处理有机碳含量分别增加 133.59%、118.52% ($P<0.05$), 易氧化有机碳含量分别增加 51.73%、48.20% ($P<0.05$), 可溶性有机碳含量分别增加 61.54%、53.21% ($P<0.05$), 土壤微生物生物量碳含量分别增加 68.34%、113.04% ($P<0.05$); 除土壤微生物生物量碳以外, 不同施肥处理 20~40 cm 土壤有机碳及其组分含量均无显著差异; 不同施肥处理显著提高 0~20 cm 土壤 CPMI, M 处理下 CPMI 在所有施肥处理中最高。因此, 施用有机肥是有效提高旱区土壤质量, 增强土壤碳“汇”功能的农田施肥措施。

关键词: 施肥措施; 黄土丘陵区; 有机碳; 活性有机碳; 碳库管理指数

中图分类号: S182.2 **文献标志码:** A

Effects of Different Fertilization Methods on Farmland Soil Active Organic Carbon and Carbon Pool Management Indicators in Loess Hilly Area

LIU Qiang^{1,2}, LIANG Xin¹, DONG Peili¹, LI Xiang¹, SHI Ailing¹, WANG Lixia^{1*}, XU Dehua³

(1 College of Resources and Environmental Engineering, Tianshui Normal University, Tianshui, Gansu 741000, China; 2 Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3 School of Geography Science, Taiyuan Normal University, Jinzhong, Shanxi 030619, China)

Abstract: Based on the long-term experiment in Ansai Soil and Water Conservation Experimental Station, Chinese Academy of Sciences, this study investigated the effects of five different fertilization methods, including no fertilization (CK), combined application of nitrogen and phosphorus (NP), combined application of nitrogen, phosphorus and potassium (NPK), single application of organic fertilizer (M) and combined application of nitrogen and phosphorus in organic fertilizer (MNP) on soil organic carbon (SOC) composition and carbon pool management index (CPMI). The results show that different fertilization treatments increase SOC contents and components in different soil layers, and SOC content and components are decreased with the increase of soil depth. SOC contents and components in 0–20 cm treated with organic fertilizer (M and MNP) are significantly higher than those treated with chemical fertilizer (NP and NPK) and CK. Compared with CK, M and MNP increase SOC content by 133.59% and 118.52% ($P<0.05$), easily oxidized organic carbon content by 51.73% and 48.20% ($P<0.05$), soluble organic carbon content by 61.54% and 53.21% ($P<0.05$), soil microbial carbon content by 68.34% and 113.04% ($P<0.05$), respectively. Except for soil microbial carbon, no significant difference is found in SOC contents and components in 20–40 cm under different fertilization treatments. Different fertilization methods significantly increase soil CPMI in 0–20 cm, and CPMI is the highest under M. In conclusion, applying organic fertilizer can improve soil quality and enhance soil carbon sink function.

①基金项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFE0118100)、国家自然科学基金项目 (42077075)和甘肃省自然科学基金项目(22JR5RE195)资助。

* 通讯作者(wanglixia@tsnu.edu.cn)

作者简介: 刘强(1983—), 男, 甘肃兰州人, 博士, 副教授, 主要从事土壤生态研究。E-mail:guangmingliu1983@163.com

Key words: Fertilization methods; Loess hilly area; Soil organic carbon (SOC); Soil active organic carbon; Carbon pool management index (CPMI)

土壤有机碳(SOC)作为反映土壤质量的一个重要指标,对于提高土壤肥力具有重要意义^[1]。其可以改善土壤结构,保持土壤水分,改变微量元素的吸附特性,对土壤渗透性、腐蚀性、亲水性和养分循环等特性具有较强影响^[2]。同时,其具有胶体特性,能吸附较多阳离子,使土壤具有保肥性和缓冲性^[3-5],进而改善土壤物理化学性质,形成良好土壤结构^[4]。另外,其还可以改善土壤通气性,对土壤物理、化学和生物化学过程起着重要调控作用,其微小变化将对大气中的CO₂浓度产生重要影响^[6]。土壤活性有机碳主要可分为可溶性有机碳(DOC)、易氧化有机碳(ROC)和微生物生物量碳(MBC)等3类,虽然其在SOC总量中占比较小,稳定性较差^[7],易在短时间内降解^[8],但具有循环速率快、有效性较高等特点^[9]。在农田生态系统中,土壤碳库管理指数(CPMI)是土壤质量评估与土地管理的关键性指数,其充分考虑了土壤碳库数量与土壤碳库活度之间的关系,比活性有机碳能更为敏感地指示土壤碳库对不同管理措施的响应,可准确评价土壤质量水平^[10]。

施肥作为改善土壤质量的关键生产措施,影响SOC和营养物质输移,以及土壤固碳效果^[11],研究SOC及其活性组分在施肥环境下的动态机制对土壤碳库正向培育具有重要意义。Moharana等^[12]研究发现,施用有机肥比化肥显著提高了土壤中活性有机碳含量。梁贻仓^[7]基于长期施肥对耕作土壤DOC及其活性组分进行研究,发现施肥会显著影响SOC及其活性组分含量。郭亚军等^[13]基于长期施肥,采用施用有机肥或有机无机肥配施的试验方法,发现施用有机肥处理下SOC及其活性组分含量有明显增加。陈鸽等^[14]研究发现,施肥处理下SOC、ROC、DOC和MBC含量显著高于对照土壤。

目前,国内外对SOC组分及CPMI的研究较为广泛,并取得了一定的研究成果。这些研究主要集中在山地、森林、草原和草甸等生态系统,而对农田生态系统的研究较少,且已有研究多集中于东北、华北、长江中下游等地区^[8],而关于黄土丘陵区农田生态系统的研究尚有欠缺。鉴于此,本研究基于中科院安塞水土保持试验站长期定位试验,分析了不同施肥处理对SOC固存效应、活性组分含量以及CPMI的影响,以期提升黄土丘陵区农田土壤碳“汇”能力提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验在安塞区中科院水土保持试验站进行,其位于黄土高原丘陵沟壑区(109°18'57.99"E, 36°51'24.23"N),是国家野外站在该类型区唯一的农业生态系统试验站。安塞区海拔高度为1 012~1 731 m,主要山岳有高峁山、雅行山、白猪山、天泽山等。受温带大陆性半干旱季风气候影响,夏季高温多雨,冬季寒冷干燥,年均气温为8.8℃,年均降水量为505.3 mm,年均日照时数为2 395.6 h,全年无霜期约为157 d。植被多以矮小灌木丛为主,垂直多孔节理的黄土地貌广布,易受夏季强降雨侵蚀,水土流失问题严重。

安塞区农业种植类型以传统旱作农业为主,全年依靠降水维生,无灌溉条件。试验区主要土壤类型为黄绵土,0~20 cm土壤理化性质为pH 8.46,有机碳8.05 g/kg,全氮0.38 g/kg,全磷0.59 g/kg,全钾15.8 g/kg,有效磷9.72 mg/kg,速效钾81.1 mg/kg。

1.2 试验设计

试验小区为长方形(8.57 m×3.5 m),共设置5种施肥处理:不施肥(CK)、氮磷肥配施(NP)、氮磷钾肥配施(NPK)、单施有机肥(M)、有机肥配施氮磷肥(MNP)。每种施肥处理重复4次,采用随机区组排列。长期定位试验始于1999年,作物种植方式采用谷子-大豆-谷子-糜子轮作类型,其中2018年种植作物为大豆,2019年种植作物为谷子,试验各小区施肥长期保持不变。作物种植前将有机肥、钾肥和磷肥作为基肥一次性施入,氮肥在种植前只施入20%,剩余80%的氮肥在作物开花期追施。有机肥为羊粪,主要养分含量为有机碳24.36 g/kg,全氮11.24 g/kg,全磷17.43 g/kg,施用量为7 500 kg/hm²;氮肥为尿素(含N 460 g/kg),施用量为212 kg/hm²;磷肥为磷酸钙(含P₂O₅ 440 g/kg),施用量为170 kg/hm²;钾肥为硫酸钾(含K₂O 500 g/kg),施用量为120 kg/hm²。

1.3 土样采集与处理

土壤样品采集以试验小区为单位,于2019年谷子收获后5 d按“S”形选取5个采样点,采集0~20 cm和20~40 cm土层土样,四分法留取500 g左右。土样装袋贮存并带回实验室,一部分土壤样品在-4℃

保存,用于测定土壤 MBC 和 DOC;另一部分土壤样品在自然条件下风干、研磨和过筛,用于其他指标测定。

采用土水质量比 1 : 2.5 浸提, pH 计测定土壤 pH; 利用 $K_2Cr_2O_7$ 容量法测定 SOC 含量^[15]; 利用 $KMnO_4$ 氧化比色法测定 ROC 含量^[16]; 采用氯仿熏蒸-浸提法测定 MBC 含量^[17]; 采用 1 mol/L KCl 浸提-重铬酸钾容量法测定 DOC 含量^[18]。

1.4 数据处理与统计分析

将 CK 处理土壤碳库活度和有机碳含量作为参考,计算不同施肥处理的碳库管理指数。具体计算方法^[1]为:碳库指数(CPI)=各施肥处理 SOC 含量/CK 处理 SOC 含量;碳库活度(A)=ROC 含量/(SOC 含量-ROC 含量);碳库活度指数(AI)=各施肥处理碳库活度/CK 处理碳库活度;碳库管理指数(CPMI)=碳库指数×碳库活度指数×100%。

应用 Excel 2019 进行数据整理和图表制作;采用 SPSS17.0 进行不同施肥处理的单因素方差分析(one-way, ANOVA),用 Duncan 检验法进行多重比较,采用 Pearson 相关系数法对 SOC 及其活性组分之间进行相关性分析。

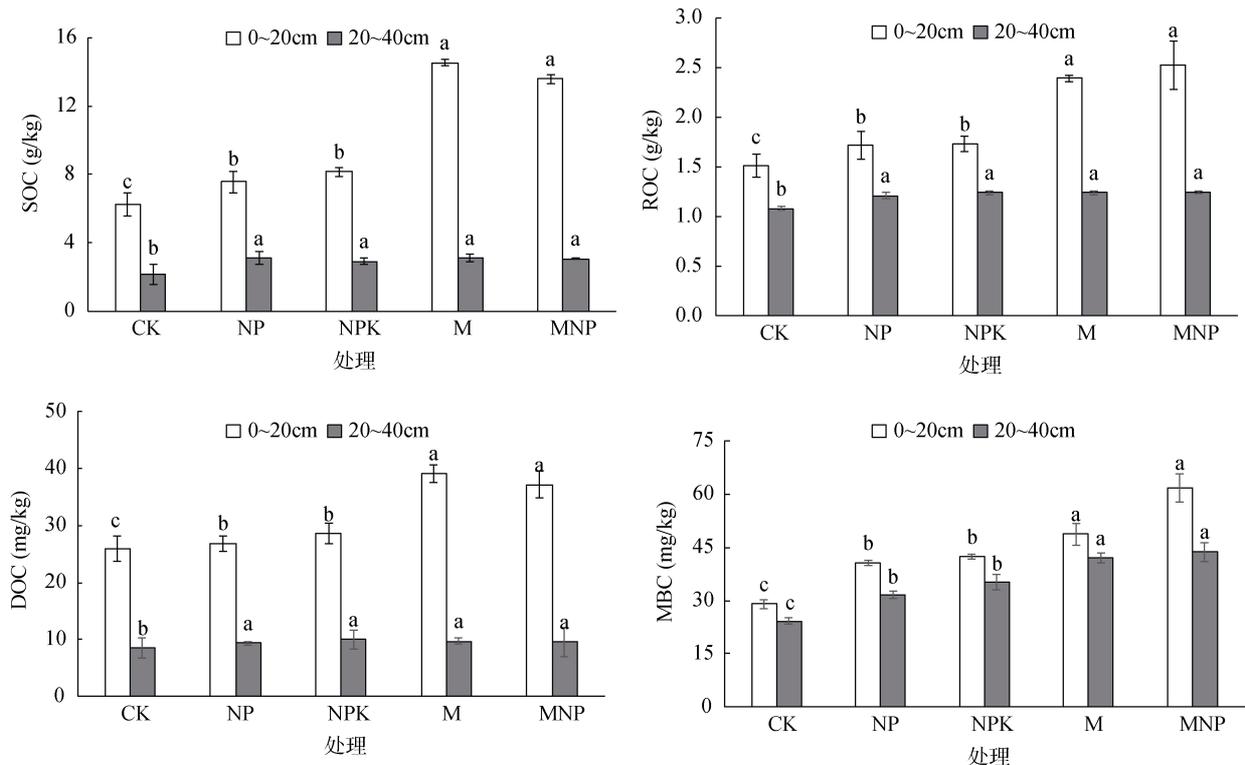
2 结果与分析

2.1 不同施肥处理土壤有机碳含量的变化

与 CK 处理相比,不同施肥处理均能增加不同土层 SOC 含量,且 SOC 含量随土层深度增加而降低(图 1A)。与 CK 处理相比,0~20 cm 土层 NP、NPK、M 和 MNP 处理 SOC 含量分别增加 21.42%、31.13%、133.59% 和 118.31% ($P<0.05$),有机肥处理(M 和 MNP)SOC 含量高于化肥(NP 和 NPK)和 CK 处理;与 CK 处理相比,NP、NPK、M 和 MNP 处理下 20~40 cm 土层 SOC 含量差异不显著,分别增加 12.01%、14.21%、15.03% 和 11.22%,M 处理 SOC 含量最高,比 CK 处理高 15.03%。

2.2 不同施肥处理土壤有机碳组分的变化

施肥能增加不同土层 ROC 含量,且 ROC 含量随土层深度增加而降低(图 1B)。与 CK 处理相比,0~20 cm 土层 NP、NPK、M 和 MNP 处理 ROC 含量分别增加 13.28%、14.07%、57.76% 和 48.20% ($P<0.05$),施用有机肥处理(M 和 MNP)ROC 含量高于化肥(NP 和 NPK)和 CK 处理;与 CK 处理相比,NP、NPK、M 和 MNP 处理 20~40 cm 土层 ROC 含量增加不显著,分别增加 12.28%、15.13%、14.76% 和 13.87%。



(图中小写字母不同表示同一土层不同处理间差异显著($P<0.05$))

图 1 不同施肥处理下 SOC、ROC、DOC 和 MBC 含量变化

施肥能增加不同土层 DOC 含量, 且 DOC 含量随土层深度增加而降低(图 1C)。与 CK 处理相比, 0~20 cm 土层 NP、NPK、M 和 MNP 处理 DOC 含量分别增加 10.86%、9.94%、61.54%、53.21% ($P<0.05$), 施用有机肥处理(M 和 MNP)DOC 含量高于化肥(NP 和 NPK)和 CK 处理; 与 CK 处理相比, NP、NPK、M 和 MNP 处理 20~40 cm 土层 DOC 含量增加不显著, 分别增加 3.13%、4.11%、10.35% 和 9.49%。

施肥能增加不同土层 MBC 含量, 且 MBC 含量随土层深度增加而降低(图 1D)。与 CK 处理相比, 0~20 cm 土层 NP、NPK、M 和 MNP 处理 MBC 含量分别增加 40.09%、46.05%、68.34%、113.04% ($P<0.05$);

与 CK 处理相比, NP、NPK、M 和 MNP 处理 20~40 cm 土层 MBC 含量分别增加 30.21%、45.83%、73.79% 和 81.12% ($P<0.05$)。施用有机肥处理(M 和 MNP)不同土层 MBC 含量高于化肥(NP 和 NPK)和 CK 处理。

2.3 不同施肥处理土壤有机碳组分比例和碳库管理指数的变化

土壤 MBC/SOC 比值随土层深度增加呈增加趋势(表 1)。不同施肥处理对 0~20、20~40 cm 土层 MBC/SOC 比值的影响达显著性水平 ($P<0.05$), MBC/SOC 比值分别为 0.34%~0.54%、0.46%~1.17%。

表 1 不同施肥处理对土壤活性有机碳组分占比和碳库管理指数的影响

土壤 (cm)	处理	MBC/SOC (%)	ROC/SOC (%)	DOC/SOC (%)	CPI	AI	A	CPMI (%)
0~20	CK	0.46 ± 0.05 b	24.87 ± 3.22 a	0.39 ± 0.06 a	1.00 ± 0.11 c	1.00 ± 0.02 a	0.33 ± 0.01 a	100.00 ± 0.06 c
	NP	0.54 ± 0.09 a	23.18 ± 2.03 b	0.35 ± 0.04 b	1.21 ± 0.10 b	0.91 ± 0.00 ab	0.29 ± 0.05 ab	110.11 ± 4.40 b
	NPK	0.52 ± 0.03 a	21.51 ± 1.71 b	0.35 ± 0.10 b	1.31 ± 0.04 c	0.83 ± 0.00 b	0.27 ± 0.04 b	108.73 ± 3.40 b
	M	0.45 ± 0.04 b	16.78 ± 0.02 c	0.27 ± 0.04 c	2.34 ± 0.03 a	0.58 ± 0.01 c	0.20 ± 0.05 c	135.72 ± 4.30 a
	MNP	0.34 ± 0.06 c	16.06 ± 0.02 c	0.26 ± 0.02 c	2.19 ± 0.04 a	0.61 ± 0.00 c	0.19 ± 0.04 c	133.59 ± 0.07 a
20~40	CK	0.46 ± 0.03 c	34.01 ± 2.33 b	0.78 ± 0.03 a	1.00 ± 0.01 b	1.00 ± 0.00 c	0.55 ± 0.02 b	100.00 ± 0.08 b
	NP	0.54 ± 0.04 c	34.02 ± 1.21 b	0.72 ± 0.03 a	1.12 ± 0.05 a	1.15 ± 0.01 a	0.61 ± 0.02 ab	129.47 ± 3.34 a
	NPK	0.59 ± 0.07 c	35.35 ± 2.18 a	0.71 ± 0.02 a	1.14 ± 0.06 ab	1.14 ± 0.01 a	0.65 ± 0.02 a	129.78 ± 4.20 a
	M	1.09 ± 0.02 b	37.26 ± 3.07 ab	0.77 ± 0.02 a	1.11 ± 0.02 a	1.18 ± 0.01 b	0.61 ± 0.01 a	130.80 ± 5.47 a
	MNP	1.17 ± 0.08 a	36.39 ± 2.68 a	0.75 ± 0.01 a	1.15 ± 0.02 a	1.14 ± 0.01 a	0.60 ± 0.02 ab	130.54 ± 1.11 a

注: 表中同列小写字母不同表示同一土层不同处理间差异显著 ($P<0.05$)。

土壤 ROC/SOC 比值随土层深度增加呈增加趋势(表 1)。施肥处理对 0~20、20~40 cm 土层 ROC/SOC 比值的影响达显著性水平 ($P<0.05$), ROC/SOC 比值分别为 16.06%~24.87%、34.01%~37.26%。

土壤 DOC/SOC 比值随土层深度增加也呈增加趋势(表 1)。施肥处理对 0~20 cm 土层 DOC/SOC 比值的影响达显著性水平 ($P<0.05$), DOC/SOC 比值为 0.26%~0.39%; 但对 20~40 cm 土层 DOC/SOC 比值的影响未达显著性水平, DOC/SOC 比值为 0.71%~0.78%。

施肥处理对 0~20 cm 土层 CPI、AI、A 和 CPMI 有显著影响, 而对 20~40 cm 土层没有显著影响(表 1)。其中, 0~20 cm 土层 CPMI 在 100~135.72, M 处理最高, 为 135.72; 20~40 cm 土层 CPMI 在 100~130.80, M 处理最高, 为 130.80。

2.4 土壤有机碳及其活性组分与土壤碳库管理指数的相关性

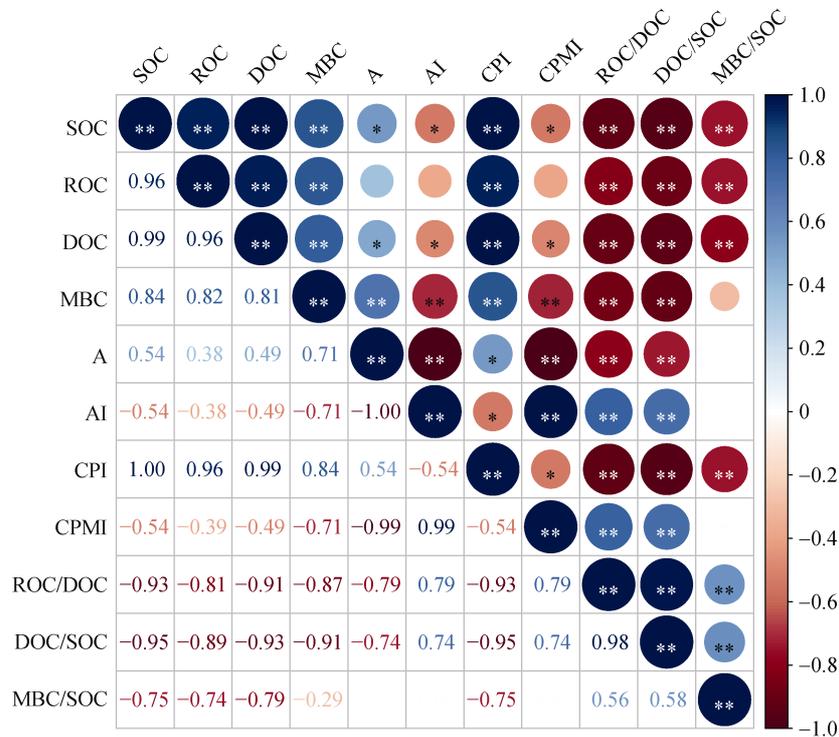
由图 2 可知, SOC 含量与 DOC、MBC 和 ROC

含量呈极显著正相关关系 ($P<0.01$), 与 CPMI 和 AI 呈显著负相关关系 ($P<0.05$), 与 CPI 呈极显著正相关关系 ($P<0.01$); 与 MBC/SOC、DOC/SOC 和 ROC/SOC 比值呈极显著负相关关系 ($P<0.01$)。DOC 含量与 CPMI 和 AI 呈显著负相关关系 ($P<0.05$)。MBC 含量与 CPMI 和 AI 呈极显著负相关关系 ($P<0.01$), 与 CPI 呈极显著正相关关系 ($P<0.01$)。CPMI 与 AI 呈极显著正相关关系 ($P<0.01$), 与 CPI 呈显著负相关关系 ($P<0.05$)。AI 与 CPI 呈显著负相关关系 ($P<0.05$)(图 2)。

3 讨论

3.1 不同施肥措施对土壤有机碳及其活性组分的影响

本研究发现, 施肥处理可提高不同土层 SOC 及其活性组分含量。在 0~20 cm 土层, 有机肥处理(M 和 MNP)SOC 及其活性组分含量高于化肥(NP 和 NPK)和 CK 处理。这是由于有机肥本身含有一定数量的有机碳, 施入土壤后可以使 SOC 及其活性组分得到更



(蓝色和红色分别代表正相关和负相关, 左半边中的数字代表相关系数, 与右上半边的图形对应;

*表示在 $P < 0.05$ 水平显著, **表示在 $P < 0.01$ 水平显著)

图 2 土壤有机碳及其组分与碳库管理指数的相关性

新和补偿, 且这种作用具有可持续性^[19]。施用有机肥可以为作物和土壤微生物提供养分, 促进作物地上部和根系的生长, 增加根系分泌物和有机残体的数量, 使土壤微生物和作物根系产生较大分子的多糖和分泌物, 与矿物颗粒胶结形成团聚体, 稳定土壤结构, 阻止 SOC 及其活性组分迅速分解^[20]。众多以长期施肥定位试验为平台的研究发现, 土壤施用有机肥能够有效促进 SOC 转化, 改善土壤质量, 提高 SOC 及其活性组分含量^[21-27]。在本研究中, 20 ~ 40 cm 土层 SOC 及其活性组分含量低于 0 ~ 20 cm 土层, 这是由于 SOC 随土壤表层到底层的深度增加而减少。0 ~ 20 cm 土层中微生物活性较高, 作物根系分泌物腐烂后形成有机胶体的固定作用, 使得 SOC 及其活性组分含量较高, 但随着土层深度增加, 有机胶体的固定作用减弱。在本研究中, 除 MBC 以外, 不同施肥处理 20 ~ 40 cm 土层 SOC 及其组分含量均无显著差异, 原因可能是土层越深土壤中植物根系残体和有机物料固定作用减弱, 土壤微生物活性降低, 导致土壤有机碳循环速率降低^[28], 造成有机碳及其活性组分在土壤中稳定存在, 各施肥处理之间差异不显著。

3.2 不同施肥措施对土壤碳库管理指数的影响

土壤碳库活度(A)可用来反映 SOC 的稳定程度。

本研究结果表明, 不同土层施用化肥处理 A 高于有机肥处理。土壤碳库指数(CPI)、碳库活度指数(AI)和碳库管理指数(CPMI)是相互关联的指标, 通过对土壤 CPMI 的研究, 可综合分析对土壤 CPI 和 AI 的影响, 反映土壤碳库数量和质量的动态变化。本研究结果表明, 与 CK 处理相比, 各施肥处理能不同程度地提高 0 ~ 20 cm 土壤 CPMI, 从而有利于改善土壤质量。施用有机肥处理(M 和 MNP)不同土层的 CPMI 高于化肥处理(NP 和 NPK)和 CK 处理, 表明施用有机肥可以增强土壤碳“汇”功能, 增加碳素稳定性。其中 M 处理 CPMI 值最大, 这是由于 M 处理本身含有一定数量的有机碳, 可以为作物和土壤微生物提供养分, 促进作物地上部和根系的生长, 增加根系分泌物和有机残体的数量, 与矿物颗粒胶结形成团聚体, 稳定土壤结构, 有利于形成激发效应, 阻止 SOC 的迅速分解, 增加 SOC 含量, 从而提高土壤 CPMI。施用化肥处理虽在一定程度上提高 A, 促进植物生长, 改善土壤质量, 增强土壤养分循环, 但缺乏有效且持续的碳源补充, 造成土壤微生物活性和质量降低, 减少了土壤碳库活化与养分供应, 造成土壤 CPMI 指数下降, 不利于提高土壤碳库质量。在 20 ~ 40 cm 土层, 不同施肥处理 CPMI 差异不显著, 这可能与土

壤微生物活性降低导致 SOC 循环速率降低, 使有机碳在土壤中稳定存在, 碳库活性降低有关^[29]。

本研究结果表明, 不同施肥处理 ROC、DOC 和 MBC 与 SOC 含量之间呈极显著正相关, 即 SOC 活性组分含量很大程度上依赖于 SOC 含量。SOC 及其活性组分含量和比例与 CPMI 之间存在显著相关性, 表明这些指标均可指示土壤碳素变化特征。

4 结论

1) 不同施肥处理均能有效提高不同土层 SOC 及其组分含量。不同施肥处理 0~20 cm 土层 SOC 及其组分含量具有显著差异, 而 20~40 cm 土层无显著差异(除 MBC 外), 且 SOC 及其组分含量随土层深度增加而降低。

2) 施用有机肥处理(M 和 MNP)0~20 cm 土层 SOC 及其组分含量高于化肥(NP 和 NPK)和 CK 处理; 除 MBC 外, 20~40 cm 土层 SOC 及其组分含量均无显著差异。

3) 不同施肥处理显著提高 0~20 cm 土层 CPMI, M 处理 CPMI 在所有施肥处理中最高; 20~40 cm 土层中各施肥处理 CPMI 差异不显著。

4) 施用有机肥是旱区提高土壤肥力, 增强土壤碳“汇”功能的农田施肥措施。

参考文献:

- [1] 何翠翠, 王立刚, 王迎春, 等. 长期施肥下黑土活性有机质和碳库管理指数研究[J]. 土壤学报, 2015, 52(1): 194-202.
- [2] 朱浩宇, 王子芳, 陆畅, 等. 缙云山 5 种植被下土壤活性有机碳及碳库变化特征[J]. 土壤, 2021, 53(2): 354-360.
- [3] 张方方, 岳善超, 李世清. 土壤有机碳组分化学测定方法及碳指数研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(2): 252-259.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 王改玲, 李立科, 郝明德. 长期施肥和秸秆覆盖土壤活性有机质及碳库管理指数变化[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(1): 20-26.
- [7] 梁贻仓. 不同农田管理措施下土壤有机碳及其组分研究进展[J]. 安徽农业科学, 2013, 41(24): 9964-9966.
- [8] 陈云峰, 韩雪梅, 胡诚, 等. 长期施肥对黄棕壤固碳速率及有机碳组分影响[J]. 生态环境学报, 2013, 22(2): 269-275.
- [9] 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.
- [10] 武琳, 黄尚书, 叶川, 等. 土地利用方式对江西红壤旱地碳库管理指数的影响[J]. 土壤, 2017, 49(6): 1275-1279.
- [11] Wang H Y, Wu J Q, Li G, et al. Changes in soil carbon fractions and enzyme activities under different vegetation types of the northern Loess Plateau[J]. Ecology and Evolution, 2020, 10(21): 12211-12223.
- [12] Moharana P C, Sharma B M, Biswas D R, et al. Long-term effect of nutrient management on soil fertility and soil organic carbon pools under a 6-year-old pearl millet-wheat cropping system in an Inceptisol of subtropical India[J]. Field Crops Research, 2012, 136: 32-41.
- [13] 郭亚军, 邱慧珍, 张玉娇, 等. 不同施肥方式对马铃薯农田土壤有机碳组分和碳库管理指数的影响[J]. 土壤通报, 2021, 52(4): 912-919.
- [14] 陈鸽, 汤春纯, 李祖胜, 等. 不同施肥措施对洞庭湖区旱地肥力及作物产量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(5): 689-697.
- [15] Tang H M, Xiao X P, Tang W G, et al. Long-term effects of NPK fertilizers and organic manures on soil organic carbon and carbon management index under a double-cropping rice system in Southern China[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2018, 49(16): 1976-1989.
- [16] 郭万里, 武均, 蔡立群, 等. 不同氮素水平下生物质炭、秸秆添加对陇中黄土高原旱作农田土壤活性有机碳的影响[J]. 水土保持学报, 2020, 34(1): 283-291.
- [17] 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[J]. 应用生态学报, 2019, 30(4): 1135-1142.
- [18] 刘红梅, 张海芳, 皇甫超河, 等. 长期氮添加对贝加尔针茅草原土壤微生物群落多样性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(4): 709-717.
- [19] 臧逸飞, 郝明德, 张丽琼, 等. 26 年长期施肥对土壤微生物量碳、氮及土壤呼吸的影响[J]. 生态学报, 2015, 35(5): 1445-1451.
- [20] Ali Kubar K, Huang L, Lu J W, et al. Long-term tillage and straw returning effects on organic C fractions and chemical composition of SOC in rice-rape cropping system[J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2019, 65(1): 125-137.
- [21] 慈恩, 王莲阁, 丁长欢, 等. 垄作免耕对稻田垡埂土壤有机碳累积和作物产量的影响[J]. 土壤学报, 2015, 52(3): 576-586.
- [22] An H, Li Q L, Yan X, et al. Desertification control on soil inorganic and organic carbon accumulation in the topsoil of desert grassland in Ningxia, northwest China[J]. Ecological Engineering, 2019, 127: 348-355.
- [23] 吴鹏博, 李立军, 张艳丽, 等. 轮作结合施肥对土壤有机碳及其组分和土壤养分的影响[J]. 土壤通报, 2020, 51(2): 416-422.
- [24] 王艳, 杨丽娟, 周崇峻, 等. 长期施肥对设施蔬菜栽培土壤易氧化有机碳含量及其剖面分布的影响[J]. 水土保持通报, 2010, 30(4): 32-35.
- [25] Walpolo B C, Arunakumara K. Decomposition of *Gliricidia*

- leaves: The effect of particle size of leaves and soil texture on carbon mineralization[J]. *Tropical Agricultural Research and Extension*, 2011, 13(1): 19.
- [26] 王栋, 李辉信, 李小红, 等. 覆草旱作对稻田土壤活性有机碳的影响[J]. *中国农业科学*, 2011, 44(1): 75–83.
- [27] 张文锋, 袁颖红, 周际海, 等. 长期施肥对红壤性水稻土碳库管理指数和双季水稻产量的影响[J]. *生态环境学报*, 2016, 25(4): 569–575.
- [28] 赵亚南, 柴冠群, 张珍珍, 等. 稻麦轮作下紫色土有机碳活性及其对长期不同施肥的响应[J]. *中国农业科学*, 2016, 49(22): 4398–4407.
- [29] 黄金花, 刘军, 杨志兰, 等. 秸秆还田下长期连作棉田土壤有机碳活性组分的变化特征[J]. *生态环境学报*, 2015, 24(3): 387–395.