

长期施肥对南方红壤碳库管理指数的影响

熊翔宇, 程 谅

(华中农业大学 水土保持研究中心, 武汉 430070)

摘 要:了解田间施肥措施对南方红壤碳库管理指数的影响具有重要意义,以湖北贺胜桥镇建立 19 a 的长期施肥试验小区为研究对象,研究了不施肥(CK)、施用有机肥(T_1)、施氮磷钾肥(T_2)和氮磷钾肥与秸秆配施(T_3)4 种处理对南方红壤有机碳和碳库管理指数的影响及差异。结果表明:(1)长期施肥能显著降低土壤容重,显著增加毛管孔隙度、毛管持水量、饱和含水率和 pH($p < 0.05$)。(2)长期施肥显著增加了 3 个土层土壤中有有机碳(SOC)、活性有机碳(LOC)和总碳(TC)以及水溶性有机碳(WSOC)、热水提取碳(HWSC)和颗粒有机碳(POC)等活性有机碳组分含量,尤其是 T_3 处理 0—15 cm 土层 SOC、LOC、TC 和 POC 含量较 CK 分别提高了 78%、62%、113% 和 241%,且差异性显著($p < 0.05$); T_1 处理 0—15 cm 土层 WSOC 和 HWSC 较 CK 分别增加了 21.38 mg/kg 和 22.07 mg/kg,且差异性显著($p < 0.05$)。(3)敏感性指数表明,3 个土层中的 POC(33.33%~251.52%)、WSOC(5.60%~193.89%)和 HWSC(16.32%~147.14%)总体上高于 SOC(29%~59%),POC、WSOC 和 HWSC 比 SOC 更适合作为确定田间管理措施对土壤有机碳影响的指标。碳库管理指数(CMI)与 SOC、LOC 存在显著($p < 0.05$)和极显著($p < 0.01$)正相关关系,CMI 能反映土壤有机碳的变化情况。(4)CMI 表明, T_3 (CMI=176.16) $>T_1$ (CMI=157.18) $>T_2$ (CMI=134.93),本研究中最佳的田间施肥方式为 T_3 。研究结论可帮助优化区域内田间管理措施,改善土壤质量,提高农作物产量与质量。

关键词:长期施肥;有机碳;活性有机碳组分;敏感性指数;碳库管理指数

中图分类号:S158; S147.3

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2021)01-0073-07

Effects of Long-Term Fertilization on Carbon Management Index of Krasnozem in South China

XIONG Aoyu, CHENG Liang

(Research Center of Water and Soil Conservation, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

Abstract:In order to understand the effect of various fertilization measures on soil carbon and carbon stock management index, the long-term fertilization experiment area established for 19 years in Heshengqiao Town, Hubei Province was studied. The effects and differences of no fertilization (CK), application of organic fertilizer (T_1), NPK fertilizer (T_2) and NPK fertilizer combined with straw (T_3) on soil organic carbon and carbon management indexes were studied. The results show that: (1) long-term fertilization can significantly reduce soil bulk density, significantly increase capillary porosity, capillary water holding capacity, saturated water content and pH ($p < 0.05$); (2) long-term fertilization significantly increased the contents of soil organic carbon (SOC), labile organic carbon (LOC) and total carbon (TC) in the three soil layers, as well as the contents of water soluble organic carbon (WSOC), hot water soluble carbon (HWSC) and particulate organic carbon (POC); the contents of SOC, LOC, TC and POC in the 0—15 cm soil layer treated by T_3 increased by 78%, 62%, 113% and 241% compared with CK, and the difference was significant ($p < 0.05$); compared with CK, WSOC and HWSC in 0—15 cm soil layer under T_1 treatment increased by 21.38 mg/kg and 22.07 mg/kg, respectively, and the difference was significant ($p < 0.05$); (3) the sensitivity index showed that POC (33.33%~251.52%), WSOC (5.60%~193.89%) and HWSC (16.32%~147.14%) in the three soil layers were generally higher than SOC (29%~59%), and POC, WSOC and HWSC were more suitable indicators to determine the impact of field management measures on soil organic carbon than SOC; there was a significant ($p < 0.05$) and extremely significant ($p < 0.01$) positive correlation between

收稿日期:2020-03-30

修回日期:2020-04-08

资助项目:国家重点研发计划“高效开发型水土流失治理技术集成与示范”(2017YFC0505405)

第一作者:熊翔宇(1996—),男,湖北恩施人,硕士研究生,主要从事水土保持与生态恢复研究。E-mail:1390677979@qq.com

通信作者:程谅(1995—),男,安徽太湖人,硕士研究生,主要从事水土保持与生态恢复研究。E-mail:1601558599@qq.com

carbon management index (CMI) and SOC and LOC, and CMI could reflect the change of soil organic carbon; (4) meanwhile, according to the CMI value, T_3 (CMI=176.16) $>T_1$ (CMI=157.18) $>T_2$ (CMI=134.93), combined with the improvement of soil properties and organic carbon by each fertilization treatment, the best field fertilization method in this study was T_3 .

Keywords:fertilization treatment; organic carbon; labile organic carbon component; sensitivity index; carbon management index

土壤是碳的重要储存部位,是碳循环的重要组成部分^[1]。土壤有机碳是土壤肥力的重要指标之一,保持土壤有机碳有利于保持土壤肥力,增加农作物产量和质量^[2]。但是由于土壤有机碳贮量巨大,外界环境变化引起的土壤有机碳量变化在短期内无法表现出来^[3]。而水溶性有机碳(WSOC),颗粒有机碳(POC),热水提取碳(HWSC)等活性有机碳组分能灵敏的反映外界条件对土壤有机碳的细小影响^[4],是指示土壤有机碳状态、反映土壤碳库动态的较有用的敏感性指标^[5],同时活性有机碳组分对土壤碳库平衡和土壤化学、生物化学肥力保持具有重要意义^[6]。有机碳含量不能直接表征土壤肥力的高低,因此 Blair 等^[7]提出碳库管理指数(CMI),能较全面的反映外界条件对土壤有机碳含量和质量的影响。较高的 CMI 表明该种植系统中的管理措施改善土壤有机碳的能力比其他系统中的管理措施强。张丽莉等^[8]的研究指出,农作物种植制度是影响土壤质量演化和土壤可持续化利用的关键因素之一。研究长期不同施肥措施对土壤有机碳和碳库管理指数的影响,得出田间最佳的管理方式,有利于促进土壤碳固存,减少土壤碳排放,增加农作物的产量与质量。

南方红壤区是我国重要的粮食输出产区,研究各种田间管理措施和外界条件对南方红壤区土壤肥力的影响情况,有利于提高南方红壤区粮食作物的产量与质量。我国学者针对南方红壤区碳库管理指数的研究较多,陈晓旋等^[9]研究了模拟酸雨情况下对福州平原水稻田碳库管理指数的影响,发现酸雨显著降低了土壤的碳库管理指数,不利于水稻的生长。张鹏等^[10]在赣东北典型双季水稻区试验田研究不同的冬种模式对冬闲田的碳库管理指数的影响,发现冬季轮作(马铃薯、紫云英、油菜)模式是最佳的冬闲田种植模式。彭华等^[11]在湖南省长沙县研究不同稻草还田模式对土壤碳库管理指数的影响,发现稻田免耕覆盖稻草+冬季翻埋稻草的技术模式增加土壤有机碳,活性有机碳和碳库管理指数最高,是适合双季稻田稻草还田增碳的技术模式。国内对南方红壤区的碳库管理指数研究较丰富,特别是水稻田,但是对不同施肥措施对小麦—玉米轮作休耕系统红壤的碳库管理指

数的影响的研究还比较少,因此对于该系统还不明确何种田间施肥方式为最佳。本文通过长期定位试验研究 4 种施肥措施(不施肥,施有机肥,施氮磷钾肥,氮磷钾肥与秸秆配施)对小麦—玉米轮作休耕系统土壤有机碳和碳库管理指数的影响,探索出田间最佳的施肥方式。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

长期定位试验地点位于湖北省咸宁市贺胜桥镇(29°57′—30°02′N,114°16′—114°29′E),该地区气候温和,降水充沛,日照充足,四季分明,无霜期长。冬季盛行偏北风,偏冷干燥;夏季盛行偏南风,高温多雨。年平均气温 16.8℃,极端最高气温 41.4℃,极端最低气温为零下 15.4℃。年平均降水量 1 577.4 mm,年平均日照时间为 1 754.5 h,年平均无霜期为 245~258 d。主要灾害性天气有倒春寒、大暴雨、水灾、洪涝及夏旱、伏旱等。该地区土壤侵蚀类型有沟蚀、重力侵蚀、面蚀,其中以面蚀为主^[12]。

试验地点共设置 4 种施肥处理,每种处理 4 个重复,共设置 16 个小区,小区按随机区组排列,每个小区形状大小相同(长 7 m,宽 3 m)。小区建立于 1998 年,建立之前为荒草地,建立之后就开始施肥耕作,种植模式为夏玉米—冬小麦一年两熟模式,到 2016 年夏季开始休耕。施肥处理方式见表 1,设置了施有机肥(T_1)、施氮磷钾肥(T_2)、氮磷钾与秸秆配施(T_3)和不施肥(CK) 4 种处理,其中不施肥作为对照。秸秆为作物收割之后的玉米秸秆和小麦秸秆。耕作方式为人工浅翻耕,管理方式与当地耕地的管理方式一致。

表 1 施肥处理方式

处理	施肥措施	施肥量(kg·hm ⁻²)
CK	不施肥	—
T_1	施有机肥	猪粪:1000
T_2	施矿物质肥氮磷钾	N 175,P 150,K 115
T_3	矿物质肥氮磷钾和秸秆配施	N 175,P 150,K 115; 玉米或小麦秸秆 1666

注:N,P 和 K 化肥品种分别为尿素、三料磷肥和氯化钾。

1.2 土壤样品采集

样品采集时间为 2017 年 7 月,采集之前已休耕

将近一年时间,样品采集之后立即回实验室进行试验。在各个小区中,采用“S”型随机采样法,选择 5 个点,去除土壤表面枯落物后,分 3 个土层采样(0—15 cm,15—30 cm,30—45 cm),将各个小区采集的土样混合均匀,带回实验室备用。将土壤样品中的动植物残体、植物根系、砾石去除,一部分土样待自然风干后,过 60 目和 100 目土壤筛备用,另一部分新鲜土样存于 4℃ 的冰箱中备用。同时用 100 cm³ 体积的环刀采集各个土层的环刀样,用于测量土壤容重、毛管孔隙度、毛管持水量和饱和含水率等土壤基本性质,每层重复 3 次。

1.3 样品分析与方法

土壤容重和毛管孔隙度采用环刀法测定,饱和含水率与毛管持水量用烘干法测定,土壤 pH 用电位法测定(水土比为 2.5 : 1),LOC 采用高锰酸钾氧化法^[13]测量,POC 采用 Cambardella 和 Elliott^[14]提出的方法测量,WSOC 采用多水土比色法,HWSC 采用 Chantigny 等^[15]提出的方法测量,SOC 采用重铬酸钾氧化—外加热法测量^[16],TC 用总有机碳分析仪(Elementar, Vario TOC Select)测量。

灵敏性指数可以反映各个活性有机碳组分对管理措施反映的灵敏性,根据 Seema 等^[17]提出的灵敏性指数计算公式求各活性有机碳组分的灵敏性指数。

灵敏性指数= $\frac{\text{处理中 LOC 组分含量}-\text{对照中 LOC 组分含量}}{\text{对照中 LOC 组分含量}} \times 100\%$

碳库管理指数(CMI)采用 Blair 等^[3]提出的方法计算:

碳库管理指数(CMI)=CPI×LI×100%
式中:CPI 表示碳库指数,为样品有机碳含量与对照有机碳含量的比值;LI 表示碳库活度指数,为样品碳库活度与对照碳库活度的比值;碳库活度为活性有机碳含量与非活性有机碳含量的比值。

1.4 数据处理

数据的处理与统计分析在 Excel 2010 和 SPSS 20.0 软件中进行,用 Origin 2017 软件作图。相关性分析采用 Person 相关分析法。

2 结果

2.1 土壤基本性质

各施肥处理的土壤基本性质见表 2,4 种处理的土壤容重都随土层深度的增加而增加。在 0—15 cm 土层中,T₁,T₂ 和 T₃ 处理的土壤容重较 CK 分别降低了 10%,5%,6%,且差异性显著($p<0.05$),其中 T₁ 和 T₂,T₃ 差异性显著($p<0.05$),T₂ 和 T₃ 无显著差异。15—30 cm 土层中,CK 容重显著高于 T₁,T₂ 和 T₃ ($p<0.05$)。30—45 cm 土层中,各处理间容重无显著性差异。

在 0—15 cm 土层中,施肥处理 T₁,T₂ 和 T₃ 较 CK 能显著增加土壤毛管孔隙度,大小关系为 T₃>T₁>T₂。15—30 cm 和 30—45 cm 土层中,T₃ 显著高于 T₁,T₂ 和 CK($p<0.05$)。随着土层深度的增加 4 种处理的毛管孔隙度逐渐降低。毛管持水量的变化情况与之相似。

在 0—15 cm 土层中,3 种施肥处理较 CK 都能显著增加土壤饱和含水率,大小关系为 T₁>T₃>T₂,其中 T₁ 与 T₂,T₃ 有显著差异($p<0.05$),T₂ 和 T₃ 无显著差异($p>0.05$)。15—30 cm 和 30—45 cm 土层中,T₃ 显著高于 T₁,T₂ 和 CK($p<0.05$)。随着土层深度的增加 4 种施肥处理的饱和含水率呈降低趋势。

在 0—15 cm 土层中,T₁ 和 T₃ 处理土壤的 pH 显著高于 T₂ 和 CK($p<0.05$),T₁ 和 T₃ 无显著差异,T₂ 和 CK 无显著差异。15—30 cm 土层中,T₃ 处理土壤的 pH 显著高于 T₂ 和 CK,与 T₁ 无显著差异。30—45 cm 土层中,T₃ 显著高于 T₁,T₂ 和 CK($p<0.05$),T₁ 和 T₂ 无显著差异。随着土层深度的增加 4 种处理的土壤 pH 呈降低趋势。

表 2 不同施肥处理在不同土层的土壤基本性质

土层/cm	处理	容重(g·cm ⁻³)	毛管孔隙度/%	毛管持水量/%	饱和含水率/%	pH
0—15	CK	1.50±0.01a	40.92±1.29b	27.73±1.96c	29.06±1.02c	5.79±0.02b
	T ₁	1.35±0.1c	46.87±2.13a	29.06±0.87ab	36.01±0.97a	6.55±0.04a
	T ₂	1.42±0.01b	41.56±0.97b	28.36±1.10bc	32.95±2.02b	5.94±0.11b
	T ₃	1.41±0.02b	47.19±1.43a	30.17±1.09a	33.00±1.37b	6.52±0.04a
15—30	CK	1.55±0.02a	30.32±1.12c	19.62±0.86d	26.99±0.84c	4.49±0.03c
	T ₁	1.45±0.02c	36.92±1.22b	25.49±1.35b	31.30±1.45a	5.31±0.02ab
	T ₂	1.50±0.02b	35.29±1.35b	23.49±1.11c	28.82±1.41b	5.10±0.02b
	T ₃	1.48±0.02b	42.67±1.52a	28.85±2.01a	29.88±0.99b	5.96±0.04a
30—45	CK	1.56±0.04a	27.57±0.85c	17.61±0.56d	26.26±0.75bc	4.59±0.03c
	T ₁	1.53±0.02a	30.26±0.95b	22.30±1.37b	27.83±0.88a	4.78±0.04bc
	T ₂	1.55±0.03a	28.17±0.72c	19.86±0.77c	25.69±0.66c	4.81±0.02b
	T ₃	1.52±0.02a	40.67±1.83a	26.24±1.33a	26.59±0.73b	5.25±0.03a

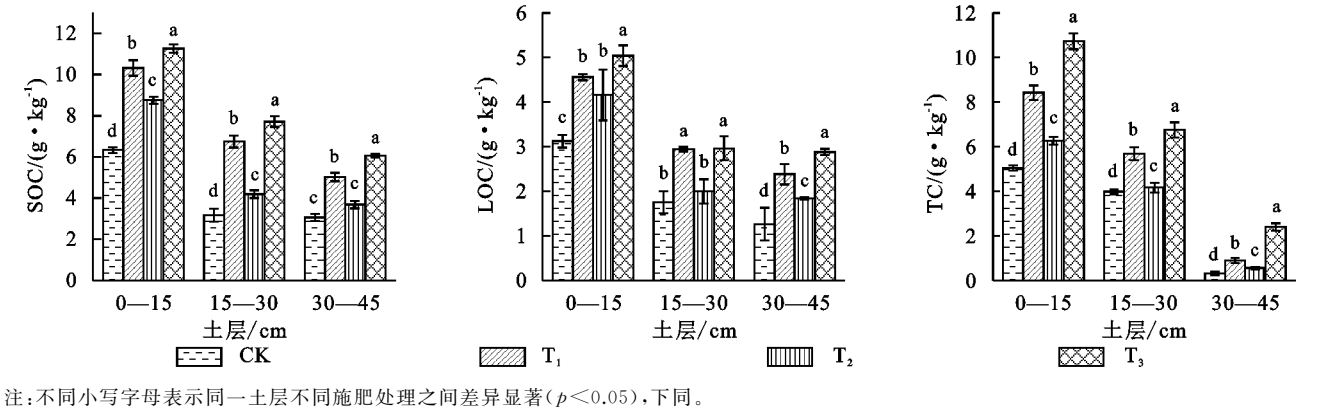
注:同一列不同字母表示同一深度不同施肥处理间差异显著($p<0.05$)。

2.2 总有机碳、活性有机碳和总碳

各种处理下不同土层深度 SOC, LOC, TC 变化情况见图 1。对于 SOC, 随着土层深度的增加 4 种处理下的 SOC 含量逐渐降低。在 0—15 cm 土壤中, T_1, T_2, T_3 处理下的 SOC 含量较对照(CK)分别提升了 63%, 38%, 78%, 且存在显著性差异($p < 0.05$), 其中 T_3 与 T_1, T_2 差异性显著($p < 0.05$), T_1 与 T_2 差异性显著($p < 0.05$)。在 15—30 cm 和 30—45 cm 土层中, 4 种处理间的差异性与

耕层一致。TC 的变化情况与 SOC 一致。

在 0—15 cm 土层中, T_1, T_2, T_3 处理下的 LOC 含量较对照(CK)分别提高了 46%, 33%, 62%, 且差异性显著($p < 0.05$), 其中 T_1 与 T_3, T_2 与 T_3 存在显著性差异($p < 0.05$), T_1 与 T_2 无显著性差异。15—30 cm 土层中, T_1 和 T_3 处理 LOC 含量显著高于 T_2 和 CK。30—45 cm 土层中, T_3 处理 LOC 含量显著高于 T_1, T_2 和 CK。随着土层深度的增加 4 种处理下的 LOC 含量呈下降趋势。



注:不同小写字母表示同一土层不同施肥处理之间差异显著($p < 0.05$),下同。

图 1 各种施肥处理下土壤有机碳、活性有机碳和总碳含量的变化情况

2.3 活性有机碳组分

不同处理下的活性有机碳组分含量变化情况见图 2。在 0—15 cm 土层中, T_1, T_2 和 T_3 处理下的 WSOC 含量分别为 50.33, 30.57, 33.41 mg/kg, 较 CK 分别提高了 74%, 6%, 15%, 且存在显著性差异($p < 0.05$), 其中, T_1 与 T_2, T_3 差异性显著, T_2 和 T_3 差异性显著($p < 0.05$)。15—30 cm 土层中, T_1 处理的 WSOC 含量显著高于 T_2, T_3 和 CK。30—45 cm 土层中, 4 种处理间的差异性与耕层一致。随着土层深度的增加 4 种处理 WSOC 含量呈降低趋势。

在 0—15 cm 土层中, T_1, T_2, T_3 和 CK 处理下的 HWSC 含量分别为 89.84, 78.83, 85.40, 67.77 mg/

kg, T_1, T_2 和 T_3 土壤中 HWSC 含量显著高于 CK($p < 0.05$), 其中 T_1 与 T_2, T_3 差异性显著, T_2 和 T_3 差异性显著($p < 0.05$)。15—30 cm 和 30—45 cm 土层中, 4 种处理间的差异性与耕层一致。随着土层深度的增加 4 种处理 HWSC 含量呈降低趋势。

在 0—15 cm 土层中, T_1, T_2 和 T_3 处理较 CK 能显著提高土壤中 POC 含量($p < 0.05$), 其中以 T_3 最高为 4.78 g/kg, 较 CK 提高了 241%, T_1 与 T_2, T_3 差异性显著, T_2 和 T_3 差异性显著($p < 0.05$)。15—30 cm 和 30—45 cm 土层中, T_3 处理 POC 含量显著高于 T_1, T_2 和 CK。随着土层深度的增加 4 种处理 POC 含量呈降低趋势。

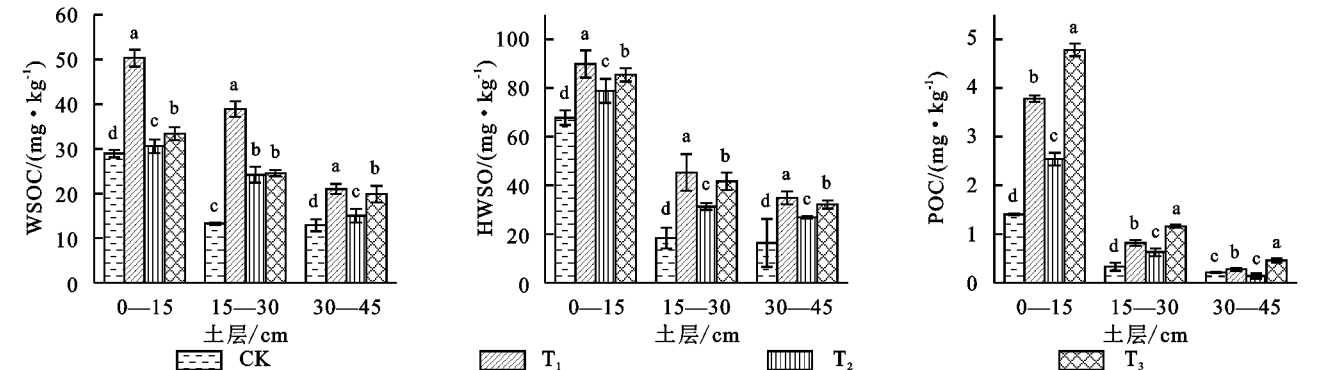


图 2 不同深度土壤各种施肥处理下各活性有机碳组分变化情况

2.4 灵敏性指数

计算出的不同土层活性有机碳组分在不同施肥处理下的灵敏性指数见图 3, 在 4 种处理下, 3 个土层的 WSOC 灵敏性指数范围为 5.60%~193.89%, 跨度较大; 3 个土层的 HWSC 灵敏性指数范围为 16.32%~

147.14%; 3 个土层的 POC 灵敏性指数范围为 33.33%~251.52%, 其中在 T_2 处理下的 30—45 cm 土层出现了异常值, 为 -33.33%。

2.5 碳库管理指数

图 4 为 4 种处理下不同土层土壤的 CMI。 T_1, T_2 和

T₃施肥处理下 3 个土层的 CMI 值都高于 100%。0—15 cm 土层中,4 种施肥处理土壤 CMI 的大小关系为 T₃(148.29)>T₁(142.00)>T₂(128.76)>CK(100.00);15—30 cm 土层中,3 种施肥处理土壤 CMI 的大小关系为 T₃(122.79)>T₁(118.69)>T₂(104.59)>CK(100.00);30—

45 cm 土层中,3 种施肥处理土壤 CMI 的大小关系为 T₃(257.40)>T₁(210.86)>T₂(171.43)>CK(100.00)。T₁,T₂和 T₃处理的 CMI 平均值分别为 157.18,134.93,176.16,所以总体上 4 种施肥处理的土壤 CMI 大小关系为 T₃>T₁>T₂>CK。

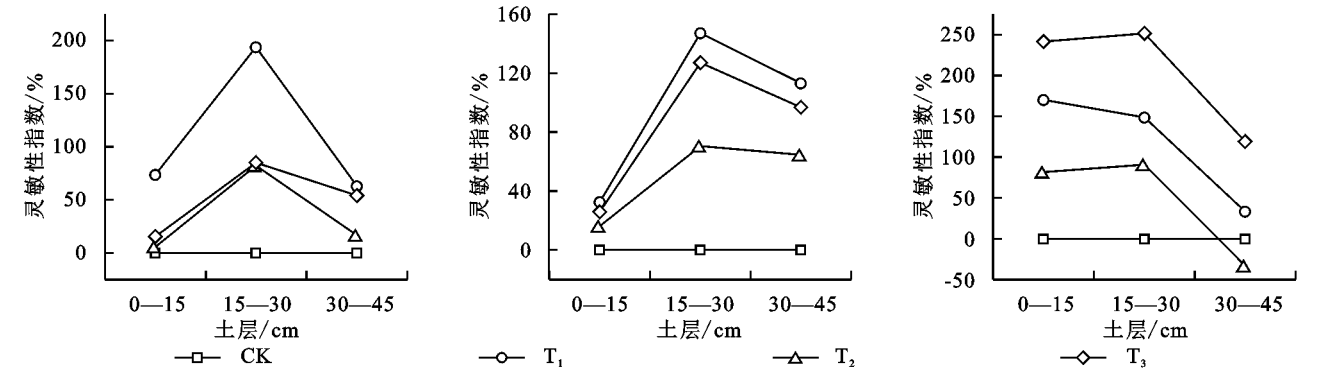


图 3 活性有机碳组分敏感性指数变化情况

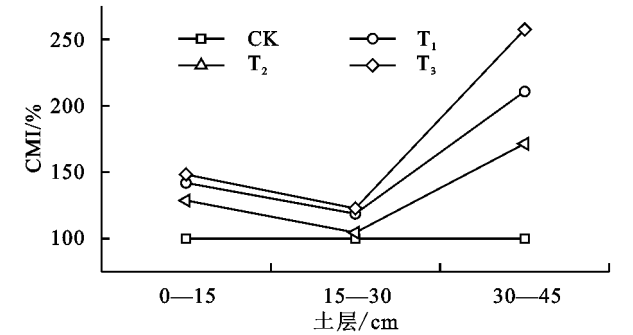


图 4 不同施肥处理下不同土层的碳库管理指数

2.6 各指标间的多因素方差分析及相关性分析

土层与施肥处理的交互作用显著性检验结果见表 3,结果显示,TC,SOC,LOC,POC,WSOC 和 HWSC 在不同土层间差异性极显著($p<0.01$),TC,SOC,LOC,POC,WSOC 和 HWSC 在不同施肥处理间差异性极显著($p<0.01$),TC,SOC,POC 和 WSOC 在土层和施肥处理交互作用下差异极显著($p<0.01$),LOC 在土层和处理交互作用下差异显著($p<0.05$),HWSC 在土层和施肥处理交互作用下差异不显著($p>0.05$)。

表 3 土层与处理的交互作用显著性检验

变异来源	TC	SOC	LOC	POC	WSOC
土层	161.82 **	449.31 **	358.62 **	2534.86 **	113.73 **
施肥处理	13.91 **	176.659 **	103.69 **	353.08 **	68.16 **
土层×施肥处理	4.9 **	6.68 **	2.95 **	149.61 **	6.1 **

注: * 表示在 0.01 水平上极显著相关。

分别对各个土层土壤的 CMI 与各指标进行相关性分析,结果见表 4。在 0—15 cm 土层,CMI 与 SOC,LOC 有极显著正相关关系,相关系数分别为 CMI 与 SOC 为 0.994,CMI 与 LOC 为 0.992;CMI 与 POC 有显著正相关关系,相关系数为 0.958;CMI 与 TC,WSOC,HWSC 和土壤基本性质无显著相关关系。在 15—30 cm 土层,CMI 与 SOC 和 TC 有显著正相关关系,相关系数分别为 0.971,0.975;CMI 与 LOC 有极显著正相关关系,相关系数为 0.990;CMI 与其他指标无显著相关关系。在 30—45 cm 土层,CMI 与 SOC 有显著正相关关系,相关系数为 0.965;CMI 与 LOC 有极显著正相关关系,相关系数为 0.994;CMI 与 TC 无显著相关关系。

表 4 不同土层 CMI 与各指标的相关性分析

土层/cm	SOC	LOC	TC	WSOC	HWSC	POC	DB	CP	CMC	SWC	pH
0—15	0.994 **	0.992 **	0.919	0.541	0.947	0.958 *	-0.863	0.872	0.905	0.841	0.899
15—30	0.971 *	0.990 **	0.975 *	0.682	0.923	0.945	-0.841	0.91	0.942	0.852	0.916
30—45	0.965 *	0.994 **	0.865	0.888	0.908	0.76	-0.971 *	0.828	0.971 *	0.400	0.892

注:表中 * 表示两指标间存在显著相关关系; ** 表示两指标间存在极显著相关关系。DB 表示容重;CP 表示毛管孔隙度;CMC 表示毛管持水量;SWC 表示饱和含水率。

3 讨论

3.1 不同施肥对土壤基本性质的影响

长期施氮磷钾肥对于农作物的产量有不利影响,施氮磷钾肥对降低土壤容重与增加孔隙度影响不显著,长期施氮磷钾肥还可能造成土壤板结,导致土壤

容重增大,土壤孔隙度降低,不利于作物的生长。而施有机肥和施氮磷钾与秸秆配饰的施肥方式能显著降低土壤容重,增加土壤孔隙度,可能是由于长期施肥,使作物根系和作物生物量增加,同时施肥土壤具有较高的微生物活性,在有机残渣分解过程中释放出有机酸和多糖,有机酸充当胶结剂,将土壤中的微孔

转化为大孔^[17]。邱吟霜^[18]的研究发现施用有机肥能有效降低土壤容重,改善土壤孔隙状况,本研究结果与之一致。与对照比较,降低土壤容重能力最强的是 T_1 , T_2 和 T_3 次之。土壤容重随深度增加而增大的原因是土壤越深,压实越严重,导致容重越大。总体上,施肥处理能显著增加土壤毛管孔隙度,这可能是导致各施肥处理下的土壤饱和含水率和毛管持水率高于 CK 的原因之一。各施肥处理下的饱和含水率和毛管持水率高于 CK 的原因还可能是,施肥使作物的根系生物量增多,导致土壤中孔隙度增大。施肥处理 T_1 和 T_3 能显著提高土壤 pH,表明施有机肥和氮磷钾与秸秆配施能防止土壤酸化,施氮磷钾对土壤 pH 无显著影响,有导致土壤酸化的可能。

3.2 不同施肥对 SOC, TC 和 LOC 及其组分的影响

本研究发现,长期使用有机无机肥都能显著提高土壤中有有机碳的含量,这与荣勤雷^[19]的研究结论一致。增加土壤中有有机碳(SOC)、活性有机碳(LOC)和总碳(TC)效果最好的是 T_3 ,原因是秸秆本身含有丰富的有机碳,同时 T_3 施肥处理让田间的小麦和玉米的生长发育优于 T_1 和 T_2 ,使得小麦和玉米的根系生物量多于其余两种施肥处理,导致 T_3 处理下的土壤中根系分泌物较 T_1 , T_2 多,分泌物中含有较丰富的有机碳。其次是 T_1 ,直接施用的有机肥中含有丰富的有机质^[20]和微生物,使其土壤中有有机碳含量明显高于缺乏外源碳的 T_2 处理,但是 T_1 处理由于缺乏氮磷钾肥提供的植物生长所必须的氮磷钾营养元素,可能导致小麦和玉米的生长发育较 T_3 差,根系生物量低。所以 4 种处理下土壤中 SOC, LOC 和 TC 含量的关系表现为: $T_3 > T_1 > T_2 > CK$ 。随着土层深度的增加, SOC, LOC 和 TC 含量降低与土壤中的根系生物量与根系分泌物减少有关。

施用肥料能显著增加耕层土壤中 POC, WSOC 和 HWSC 等活性有机碳组分的含量。韩成卫^[21]的研究发现有机肥中含有丰富的易被微生物分解的有机碳,输入土壤中后会释放出大量的 WSOC。同时 3 种施肥处理提高了土壤中的微生物活性,促进了土壤中有机化合物的分解与转化^[22],使得土壤中 WSOC, HWSC 和 POC 的含量增多。肥料的输入使得根系生长加快,根系分泌物大量增加,分泌物中含有少量的 WSOC 和 HWSC,导致施肥处理下的土壤中的 WSOC 和 HWSC 含量显著高于 CK ($p < 0.05$)。有机肥和秸秆增加了土壤中有有机碳的输入,其有机碳中含有丰富的 POC,从而提高了土壤中 POC 的含量^[23]。

土层与处理的交互作用显著性检验结果显示,在不同土层间,各类碳的含量存在极显著差异 ($p < 0.01$),随着土层深度的增加,各类碳的含量呈降低趋势,表明各类碳含量随着土层深度的增加,降低趋势

明显,因此在田间栽种时,应尽量避免挖坑过深,以防止作物根系在向下生长时吸收不到充足的养分,导致发育不良。不同处理间,各类碳的含量存在极显著差异 ($p < 0.01$),表明不同的施肥措施对土壤中各种碳含量影响巨大,现在田间施用的肥料大都为有机无机复合肥料,整体效益上优于氮磷钾肥料,但同样前者价格高于后者,因此考虑到经济效益,田间经营者应充分利用牲畜和人类粪便等天然有机肥和田间作物秸秆,同时配施适量的氮磷钾肥,在改善作物产量与质量的同时降低成本。在土层和处理的交互作用下,除 HWSC 外,其余种类的碳含量间存在显著 ($p < 0.05$) 和极显著 ($p < 0.01$) 差异,表明土层和施肥处理的交互作用对部分碳的含量影响较大。总体来看,土层与处理对土壤中各种碳的改善有决定性作用。因此田间经营者在进行田间管理的时候,要综合考虑环境因素和人为因素,合理高效利用环境因素提供的便利,做到可持续化生产。

3.3 灵敏性指数及不同施肥对 CMI 的影响

灵敏性指数可以帮助确定对田间施肥措施最有反映的 LOC 组分^[17]。本研究中 3 种活性有机碳组分的灵敏性指数 (5.60% ~ 251.52%) 整体上高于 Walkley 等^[24]报道的 SOC 作为指标的灵敏性指数 (29% ~ 59%),表明 3 种活性有机碳组分比 SOC 更适合作为判断各种施肥处理对田间土壤有机碳状态影响的指标。30—45 cm 土层 T_2 处理的 POC 含量低于 CK,使得 POC 的灵敏性指数在此处为负数,造成的原因可能是试验过程中因操作不当,使得配制的溶液飞洒出一小部分,导致测量结果偏低。

CMI 是描述土壤质量的重要工具,该指标能比较不同管理实践对养分供应、生产力和土壤碳库长期有效性的评价能力^[17]。赵亚南等^[25]研究发现长期施用氮磷钾肥配合秸秆能显著提高土壤碳库管理指数。张玉军等^[26]的研究发现在 0—40 cm 的潮土土壤中,氮磷钾肥与秸秆配施处理下的高活性有机质的 CMI 比其他处理都高。吴建富等^[27]研究发现氮磷钾肥与秸秆配施提高了水稻土壤 7.3% ~ 7.8% 的 CMI。本研究的 3 个土层中,与对照相比 ($CMI = 100$),3 种施肥处理都提高了土壤的碳库管理指数, T_3 处理下的 CMI 平均值为 176.16,其次是 T_1 为 157.18,最低的是 T_2 为 134.93, T_3 处理改善土壤 CMI 的能力优于 T_1 与 T_2 ,所以本研究中, T_3 是最佳的田间施肥处理方式。碳库管理指数(CMI)与各指标的相关性分析显示, CMI 与 SOC 和 LOC 存在显著 ($p < 0.05$) 和极显著 ($p < 0.01$) 正相关关系,总体上与 TC 和土壤基本性质无显著相关关系,表明碳库管理指数能反映田间管理措施对土壤有机碳的影响情况,而不能反映管理措施对土壤总碳和土壤基本性质的影响情况。

4 结论

长期施肥处理能改善土壤基本性质,显著提高土壤中 SOC, LOC, TC, WSOC, HWSC, POC 的含量 ($p < 0.05$)。在 3 个土层中,氮磷钾肥与秸秆配施对 SOC, LOC, TC 和 POC 含量的提升能力强于施有机肥和施氮磷钾肥,有机肥对 WSOC 和 HWSC 提升能力强于施氮磷钾肥和氮磷钾肥与秸秆配施。随着土层深度的增加,4 种处理下 SOC, LOC, TC, WSOC, HWSC 和 POC 含量呈降低趋势。在 3 个土层中,POC(33.33%~251.52%)、WSOC(5.60%~193.89%)和 HWSC(16.32%~147.14%)的灵敏性指数总体上高于 SOC(29%~59%),CMI 与 SOC, LOC 存在显著和极显著正相关关系,POC, WSOC, HWSC 和 CMI 能作为确定管理措施改善土壤有机碳的指标。4 种施肥处理下的 CMI 平均值表现为氮磷钾肥与秸秆配施(176.16) > 施有机肥(157.18) > 施氮磷钾肥(134.93) > 不施肥(100),氮磷钾肥与秸秆配施是区域内最佳的田间施肥方式。

参考文献:

- [1] Davidson E A, Trumbore S E, Amundson R. Soil warming and organic carbon content[J]. *Nature*, 2000, 408 (6814): 789-790.
- [2] Katyal J C, Rao N H, Reddy M N. Critical aspects of organic matter management in the Tropics: the example of India[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2001, 61(1/2): 77-88.
- [3] Post W M, Kwon W M. Soil carbon sequestration and land-use change: processes and potential[J]. *Global Change Biology*, 2000, 6(3): 317-327.
- [4] 沈宏,曹志洪,胡正义.土壤活性有机碳的表征及其生态效应[J].*生态学杂志*, 1999, 18(3): 32-38.
- [5] 胡海清,陆昕,孙龙.土壤活性有机碳分组及测定方法[J].*森林工程*, 2012, 28(5): 18-22.
- [6] Coleman D C, Reid C P P, Cole C V. Biological strategies of nutrient cycling in soil systems[J]. *Advances in Ecological Research*, 1983, 13(1): 1-55.
- [7] 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[J]. *Australian Journal of Agricultural Research*, 1995, 46(7): 1459-1466.
- [8] 张丽莉,武志杰,陈利军,等.不同种植制度土壤氧化还原酶活性和动力学特征[J].*生态环境学报*, 2009, 18(1): 343-347.
- [9] 陈晓旋,安婉丽,陈优阳,等.模拟酸雨对福州平原水稻田土壤碳库及碳库管理指数的影响[J].*水土保持学报*, 2019, 33(5): 294-302.
- [10] 张鹏,钟川,周泉,等.不同冬种模式对稻田土壤碳库管理指数的影响[J].*中国生态农业学报*, 2019, 27(8): 1163-1171.
- [11] 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.
- [12] 程谅,郭忠录,秦嘉惠.长期施肥对小麦—玉米轮作红壤抗蚀性的影响[J].*长江流域资源与环境*, 2019, 28(1): 212-221.
- [13] 李琳,李素娟,张海林,等.保护性耕作下土壤碳库管理指数的研究[J].*水土保持学报*, 2006, 20(3): 106-109.
- [14] Cambardella C A, Elliott E T. Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, 56(3): 777-783.
- [15] Chantigny M H. Dissolved and water-extractable organic matter in soils: a review on the influence of land use and management practices[J]. *Geoderma*, 2003, 113(3/4): 357-380.
- [16] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京朝阳区:中国农业出版社,2000.
- [17] Chaudhary S, Dheri G S, Brar B S. Long-term effects of NPK fertilizers and organic manures on carbon stabilization and management index under rice-wheat cropping system[J]. *Soil and Tillage Research*, 2017, 166: 59-66.
- [18] 邱吟霜.不同有机肥对土壤理化性质及玉米生长的影响[D].银川:宁夏大学,2019.
- [19] 荣勤雷.黄泥田有机培肥效应及机理研究[D].北京:中国农业科学院,2014.
- [20] 史向远,王秀红,周静,等.牛粪联合玉米秸秆好氧堆肥理化性状分析[J].*山西农业科学*, 2019, 47(7): 1217-1221.
- [21] 韩成卫,李忠佩,刘丽,等.去除溶解性有机质对红壤水稻土碳氮矿化的影响[J].*中国农业科学*, 2007, 40(1): 107-113.
- [22] 李娟,赵秉强,李秀英,等.长期有机无机肥料配施对土壤微生物学特性及土壤肥力的影响[J].*中国农业科学*, 2008, 41(1): 144-152.
- [23] 龚伟,颜晓元,蔡祖聪,等.长期施肥对小麦—玉米作物系统土壤颗粒有机碳和氮的影响[J].*应用生态学报*, 2008, 19(11): 2375-2381.
- [24] Walkley A, Black I A. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method[J]. *Soil Science*, 1934, 37(1): 29-38.
- [25] 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.
- [26] 张玉军,黄绍敏,李斌,等.长期施肥对潮土不同层次活性有机质及碳库管理指数的影响[J].*水土保持学报*, 2019, 33(3): 160-165.
- [27] 吴建富,曾研华,潘晓华,等.稻草还田方式对双季水稻产量和土壤碳库管理指数的影响[J].*应用生态学报*, 2013, 24(6): 1572-1578.