

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2024.04.009

周珺, 王莹, 孙德龙, 等. 长期施肥对设施土壤活性有机碳含量及碳库管理指数的影响. 土壤, 2024, 56(4): 760–768.

# 长期施肥对设施土壤活性有机碳含量及碳库管理指数的影响<sup>①</sup>

周珺, 王莹, 孙德龙, 付瑞桐, 安晶, 张玉玲\*

(沈阳农业大学土地与环境学院/农业农村部东北耕地保育重点实验室/土肥高效利用国家工程研究中心, 沈阳 110866)

**摘要:**以连续 8 年设施定位施肥田间试验为依托, 选择不施肥(CK)、4 个单施化肥(N0PK、N1PK、N2PK、N3PK)、有机肥(M)和 4 个化肥与有机肥配施(MN0PK、MN1PK、MN2PK、MN3PK)共 10 个处理, 研究长期定位施肥对设施土壤总有机碳、活性有机碳及其组分(高、中和低活性有机碳)含量和碳库管理指数及其剖面分布的影响。研究表明, 在 0~50 cm 土层, 各施肥措施土壤总有机碳、活性有机碳含量均随土层深度加深呈逐渐下降趋势。与 CK 相比, 单施化肥对土壤总有机碳含量影响不显著, 单施有机肥和化肥与有机肥配施均可显著提高 0~20 cm 土层土壤总有机碳含量( $P<0.05$ ), 增幅分别为 104.9%~135.3% 和 97.6%~139.6%, 也可显著提高 0~50 cm 土层土壤活性有机碳含量( $P<0.05$ ), 增幅分别为 33.8%~235.5% 和 33.8%~251.3%。在 0~20 cm 土层, 与施用相同化肥相比, 化肥与有机肥配施显著提升了土壤总有机碳含量( $P<0.05$ ), 增幅分别为 76.8%~174.7%; 有机肥与中量化肥配施(MN2PK)处理施入有机肥中有机碳固定率为最大, 平均为 26.6%。在 0~20 cm 土层, 与施用相同化肥相比, 化肥与有机肥配施显著提升了土壤活性有机碳和高活性有机碳含量( $P<0.05$ ), 增幅分别为 99.6%~259.4% 和 122.2%~330.7%; 土壤活性有机碳及其组分与总有机碳含量之间呈显著线性正相关( $P<0.05$ ), 其中高活性有机碳与总有机碳含量的相关系数最大( $r=0.953$ )。与施用相同化肥相比, 化肥与有机肥配施可显著提高 0~20 cm 土层土壤活性有机碳及其高和中活性组分的碳库管理指数( $P<0.05$ ), 土壤活性及其高和中活性组分的碳库管理指数随施氮量的增加而增加。综上, 在设施番茄栽培条件下, 连续 8 年化肥与有机肥配施可显著提高 0~20 cm 土层土壤总有机碳、活性有机碳及其高活性组分含量, 进而显著提高了 0~20 cm 土层土壤活性有机碳及其高活性组分的碳库管理指数, 提高了设施土壤肥力, 改善了设施土壤质量; 有机肥与中量化肥配施(MN2PK)是设施番茄可持续生产较为合理的管理措施。

**关键词:**长期施肥; 土壤活性有机碳; 土壤碳库管理指数; 设施番茄栽培

中图分类号: S156 文献标志码: A

## Effects of Long-term Fertilization on Soil Labile Organic Carbon Content and Carbon Pool Management Index in Greenhouse

ZHOU Jun, WANG Ying, SUN Delong, FU Ruitong, AN Jing, ZHANG Yuling\*

(College of Land and Environmental Science, Shenyang Agricultural University / Key Laboratory of Northeast Arable Land Conservation, Ministry of Agriculture and Rural Affairs / National Engineering Research Center for Efficient Utilization of Soil and Fertilizer Resources, Shenyang 110866, China)

**Abstract:** In this study, a located fertilization experiment was conducted in a greenhouse for eight years, in which different treatments were set up as follows, no fertilization treatment (CK), four treatments of chemical fertilizer (N0PK, N1PK, N2PK, N3PK), manure treatment (M), and four treatments of chemical fertilizer combination with manure (MN0PK, MN1PK, MN2PK, MN3PK). The effects of long-term fertilization on soil total organic carbon (TOC), labile organic carbon (LOC) and its components (highly, moderately and lowly LOC) contents, and carbon pool management index (CPMI) and their profile distribution were studied. In the 0–50 cm layer, soil TOC and LOC contents of all fertilization measures showed a gradual decrease with the depth of soil layer. Compared with CK, the effects of application of chemical fertilizer (N0PK, N1PK, N2PK, N3PK) on soil TOC contents were not significant. The application of manure and the chemical fertilizer combination with manure (MN0PK, MN1PK, MN2PK, MN3PK) significantly increased soil TOC contents in the 0–20 cm layers ( $P<0.05$ ), increased by 104.9%–135.3% and 97.6%–139.6%, respectively, and significantly increased the soil LOC contents in 0–50 cm soil layers ( $P<0.05$ ), increased by 33.8%–235.5% and

①基金项目: 国家科技支撑计划项目子课题(2015BAD23B01-6)资助。

\* 通讯作者(zhangyuling@syau.edu.cn)

作者简介: 周珺(1998—), 女, 辽宁抚顺人, 硕士研究生, 主要从事设施土壤有机碳方面研究。E-mail: 1602587442@qq.com

33.8%–251.3%, respectively. In the 0–20 cm layer, the chemical fertilizer combination with manure significantly increased soil TOC contents compared with application of chemical fertilizer by 76.8% – 174.7%, fixation ratios of organic carbon from manure under the medium application of chemical fertilizer combination with manure (MN2PK) treatment was the largest, with an average of 26.6%. In the 0–20 cm layer, the chemical fertilizer combination with manure significantly increased soil LOC and highly LOC contents compared with application of chemical fertilizer by 99.6%–259.4% and 122.2% – 330.7%, respectively. The contents of soil LOC and its components were significantly linearly positively correlated with soil TOC content ( $P<0.05$ ), the correlation coefficient between contents of highly LOC and TOC was the largest ( $r=0.908$ ). Compared with the application of the same chemical fertilizer, the chemical fertilizer combination with manure significantly increased CPMI of soil LOC and its highly and moderately components in the 0–20 cm layer ( $P<0.05$ ), CPMI of LOC, highly and moderately LOC increased with the increase of nitrogen application rate. In summary, under the condition of greenhouse tomato cultivation for eight years, the chemical fertilizer combination with manure significantly increased the contents of soil TOC, LOC and its highly components in the 0–20 cm layer, and CPMI of soil LOC and its highly components were significantly improved. The chemical fertilizer combination with manure increased soil fertility and improved soil quality. Medium-weight treatments of chemical fertilizer combination with manure treatments (MN2PK) is a reasonable management practice for sustainable production of tomatoes in greenhouse.

**Key words:** Long-term fertilization; Soil labile organic carbon; Soil carbon pool management index; Greenhouse tomato cultivation

我国设施农业发展迅速, 至 2020 年设施栽培面积已突破  $4.0 \times 10^6 \text{ hm}^2$ <sup>[1]</sup>。设施生产土壤肥力是保障蔬菜产量与品质的关键<sup>[2]</sup>。土壤有机碳是衡量土壤肥力的核心指标, 土壤活性有机碳对施肥等管理措施的响应非常敏感<sup>[3]</sup>。因此开展设施蔬菜栽培土壤活性有机碳含量及碳库管理指数对施肥措施响应的研究, 对于设施蔬菜栽培的合理施肥具有重要意义。

土壤活性有机碳是指对植物养分供应有最直接作用, 且在土壤中易被微生物分解矿化、有效性较高的那部分有机碳<sup>[4]</sup>。通常利用 333 mmol/L 高锰酸钾溶液氧化将土壤有机碳分为活性和非活性有机碳<sup>[5]</sup>, 利用不同浓度高锰酸钾溶液(33、167 和 333 mmol/L)氧化又进一步将活性有机碳分为高、中和低活性组分<sup>[4,6]</sup>。土壤碳库管理指数综合了碳库指数和碳库活度指数, 可以反映土壤质量的高低, 可用来评价田间管理措施的好坏<sup>[7]</sup>。土壤碳库管理指数越高, 说明土壤系统正在恢复、改善, 而碳库管理指数越低, 说明土壤系统正在衰退<sup>[8]</sup>。不同施肥措施对农田土壤活性有机碳含量及碳库管理指数影响较大<sup>[7,9]</sup>。单施有机肥及化肥与有机肥配施均会显著提高农田土壤活性有机碳含量<sup>[10–11]</sup>, 其含量随着土层的加深而降低<sup>[10]</sup>。长期不同施肥措施显著提高土壤高、中和低活性有机碳含量及其碳库管理指数<sup>[6,9,12]</sup>, 化肥与有机肥配施提升效果高于单施化肥<sup>[6,11]</sup>。Li 等<sup>[7]</sup>研究发现施用有机肥显著提高了农田土壤碳库管理指数。梁琼等<sup>[13]</sup>通过对长期设施菜地土壤的研究发现设施土壤活性有机碳含量显著高于露地土壤。土壤活性有机碳及其组分含量

与总有机碳含量呈显著线性正相关关系, 不同施肥措施主要影响土壤活性有机碳含量及其碳库管理指数, 进而影响到土壤有机碳数量和质量, 因此土壤活性有机碳含量及其碳库管理指数的变化可以较好地反映土壤有机碳数量和质量的变化<sup>[6–7]</sup>。

目前, 关于不同施肥措施对农田土壤活性有机碳含量和碳库管理指数方面已有较深入的研究, 但关于设施蔬菜栽培高温高湿、半封闭的特殊环境条件下, 土壤活性有机碳含量和碳库管理指数的研究报道相对较少。前人研究发现连续化肥与有机肥配施可显著提高设施土壤总有机碳含量<sup>[14]</sup>, 但长期施肥对土壤活性有机碳含量和碳库管理指数及其剖面分布的影响如何, 目前还尚不清楚。本研究依托连续 8 年设施番茄栽培定位施肥田间试验, 探讨长期不同施肥措施对土壤活性有机碳组分含量和碳库管理指数及其剖面分布的影响, 以期对设施蔬菜栽培的科学合理施肥提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

试验在沈阳农业大学设施生产试验基地进行, 该试验基地处于松辽平原南部的中心地带, 位于  $41^{\circ}49' \text{ N}$ ,  $123^{\circ}34' \text{ E}$ , 试验地土壤类型为棕壤。试验基地于 2012 年建成, 常年使用设施薄膜覆盖塑料大棚。于 2012 年和 2013 年春季整地时施入腐熟牛粪( $22\ 500 \text{ kg/hm}^2$ , 鲜重)和腐熟鸡粪( $37\ 500 \text{ kg/hm}^2$ , 鲜重)进行基础地力培肥。2012 年试验之前土壤理化性质见表 1。

表 1 2012 年试验之前土壤理化性质  
Table 1 Physicochemical properties of tested soil before experiment in 2012

土层(cm)	有机质(g/kg)	全氮(g/kg)	碱解氮(mg/kg)	全磷(g/kg)	有效磷(mg/kg)	全钾(g/kg)	速效钾(mg/kg)	pH	容重(g/cm <sup>3</sup> )
0~10	25.2	2.1	58.5	0.8	13.5	19.3	29.7	7.1	1.3
10~20	8.4	1.2	53.2	0.7	11.3	18.5	42.5	7.0	1.6
20~40	9.8	1.5	34.2	0.4	8.5	18.6	35.5	7.0	1.8
40~60	12.0	1.5	26.6	0.3	9.2	17.2	63.3	7.0	1.9

## 1.2 定位施肥试验设计

定位施肥试验于 2013—2020 年进行。本研究选取 10 个施肥处理,分别为不施肥(CK)、单施有机肥(M)、4 个单施化肥(N0PK、N1PK、N2PK、N3PK)和 4 个化肥与有机肥配施(MN0PK、MN1PK、MN2PK、MN3PK)。其中, M 为施有机肥 75 000 kg/(hm<sup>2</sup>·a)(2013—2020 年施用的有机肥年平均有机碳和全氮分别为 124.22 和 16.32 g/kg); N0、N1、N2 和 N3 表示氮肥(尿素, N 46%)的 N 施用量,分别为 0、187.5、375.0 和 562.5 kg/(hm<sup>2</sup>·a); P 和 K 分别为磷肥(过磷酸钙, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 12%)的 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 施用量和钾肥(硫酸钾, K<sub>2</sub>O 60%)的 K<sub>2</sub>O 施用量,分别为 225 和 450 kg/(hm<sup>2</sup>·a)。各处理随机排列, 3 次重复。

各处理 60 cm 深用塑料薄膜隔开,每一处理小区面积 3.8 m<sup>2</sup>。各试验小区 3 条垄,行距为 0.6 m,每条垄移栽 8 株番茄,株距为 0.3 m,各小区移栽番茄 24 株(2013—2014 年,每株番茄留 3 穗花,每穗花留 4 个果;2015—2020 年,每株番茄留 4 穗花,每穗花留 4 个果)。田间试验每年栽培春季番茄,番茄生长期为 4—8 月,其余时间为土壤休耕。田间试验每年施肥管理相同,有机肥作为基肥均匀撒施地表,随人为耕翻约 15~20 cm,全部磷肥、1/3 氮肥和 1/3 钾肥作为底肥施入,2/3 氮肥和 2/3 钾肥分别于第一穗果和第二(三)穗果膨大期分 2 次进行滴灌追施,每次追施量相同。各处理在番茄移栽时灌缓苗水,缓苗后采用滴灌系统进行灌溉,每隔 3~5 d 灌水一次,持续至番茄采收结束,各施肥处理灌水定额相同,平均为 94.3 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>。

## 1.3 土壤样品采集与分析

本研究于 2020 年 9 月中旬进行土壤采集,各小区随机布设 5 点,每点取样深度均为 0~10、10~20、20~30、30~40 和 40~50 cm,相同土层 5 点充分混合为一个样本。土壤样品经过风干、研磨、过 60 目和 10 目筛备用。

土壤总有机碳(TOC)采用外加热—重铬酸钾容量法测定;依据 KMnO<sub>4</sub> 氧化剂浓度(33、167 和 333 mmol/L)划分活性有机碳组分,其中 33 mmol/L KMnO<sub>4</sub> 氧化的有机碳为高活性有机碳(HLOC),167 和 33 mmol/L

KMnO<sub>4</sub> 氧化的有机碳的差值为中活性有机碳(MLOC),333 和 167 mmol/L KMnO<sub>4</sub> 氧化的有机碳的差值为低活性有机碳(LLOC),333 mmol/L KMnO<sub>4</sub> 氧化的有机碳为活性有机碳(LOC),不被 333 mmol/L KMnO<sub>4</sub> 氧化的为非活性有机碳(NLOC)。

以不施肥处理(CK)为参照,土壤碳库管理指数计算公式<sup>[9]</sup>如下:

$$\text{碳库管理指数(CPMI)} = \text{碳库指数(CPI)} \times \text{碳库活度指数(AI)} \times 100 \quad (1)$$

$$\text{碳库指数(CPI)} = \text{施肥处理 TOC} / \text{不施肥处理 TOC} \quad (2)$$

$$\text{碳库活度指数(AI)} = \text{施肥处理碳库活度(A)} / \text{不施肥处理碳库活度(A)} \quad (3)$$

$$\text{碳库活度(A)} = \text{LOC(或 HLOC、MLOC、LLOC)/NLOC} \quad (4)$$

## 1.4 数据统计与分析

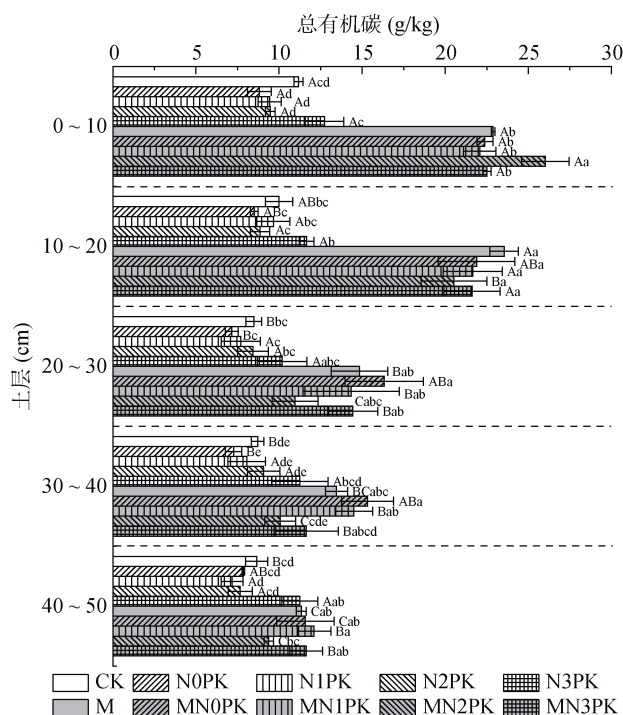
数据采用 SPSS 21.0 统计软件进行单因素方差分析, Duncan 法进行差异显著性检验, Origin 2021 作图,图表中数据均为平均值±标准误。

## 2 结果

### 2.1 长期施肥土壤总有机碳含量

在 0~20 cm 土层,与不施肥(CK)相比,单施有机肥(M)和 4 个化肥与有机肥配施(MN0PK、MN1PK、MN2PK 和 MN3PK)处理土壤总有机碳(TOC)含量均显著增加( $P<0.05$ ),增幅分别为 104.9%~135.3% 和 97.6%~139.6%,但 N0PK、N1PK、N2PK 和 N3PK 处理 TOC 含量均无显著变化;N3PK 处理 TOC 含量显著高于 N0PK、N1PK 和 N2PK 处理( $P<0.05$ ),化肥与有机肥配施处理 TOC 含量均显著高于相同单施化肥处理( $P<0.05$ ),增幅为 76.8%~174.7%(图 1)。在 20~50 cm 土层, MN0PK 相较 N0PK 和 MN1PK 相较 N1PK, TOC 含量显著提高了 47.5%~128.2% 和 68.7%~86.5%( $P<0.05$ ); MN2PK 相较 N2PK 和 MN3PK 相较 N3PK, TOC 含量提升了 11.1%~30.1% 和 3.4%~41.7%,但差异并不显著(图 1)。总体上,在 0~50 cm 土层, N1PK、N2PK 和 N3PK 处理 TOC 含量随土层加深变化并不大;其他处理 TOC 含量随

着土层的加深呈显著下降趋势, 且 0 ~ 20 cm 土层 TOC 含量均显著高于 20 ~ 50 cm 土层 ( $P < 0.05$ )。



(图中大写字母不同表示相同处理不同土层间差异显著 ( $P < 0.05$ ), 小写字母不同表示相同土层不同处理间差异显著 ( $P < 0.05$ ); 下同)

图1 不同施肥处理土壤总有机碳含量

Fig. 1 Soil TOC contents under different fertilization treatments

图2为进一步求得有机肥(M)及有机肥与化肥配施处理施入有机肥中的有机碳固定率(M处理减去CK或有机无机肥配施减去对应单施化肥的土壤总有机碳储量的增量除以8年施入的有机肥中有机碳的累积量), 各处理均表现为0~20 cm土层明显大于20~50 cm土层, 其中0~20 cm土层施入有机肥中的有机碳固定率为15.56%~28.55%, 且以MN2PK处理有机碳固定率为最大。

## 2.2 长期施肥土壤活性有机碳及其组分含量

在0~50 cm土层, 土壤活性有机碳(LOC)含量的剖面分布与TOC含量的剖面分布相似, 即LOC含量随着土层的加深大体呈下降趋势(图3)。CK、4个单施化肥、有机肥(M)和4个化肥与有机肥配施处理土壤LOC含量分别占TOC含量的15.3%~29.8%、16.3%~37.6%、19.4%~29.5%和19.5%~33.3%。与CK相比, M和化肥与有机肥配施处理均增加土壤LOC含量, 增幅分别为33.8%~235.5%和33.8%~251.3%。在0~40 cm土层, 与相同单施化肥处理相比, 化肥与有机肥配施处理显著提升了土壤LOC含量 ( $P < 0.05$ ), 增幅为23.7%~259.4%。在40~50 cm

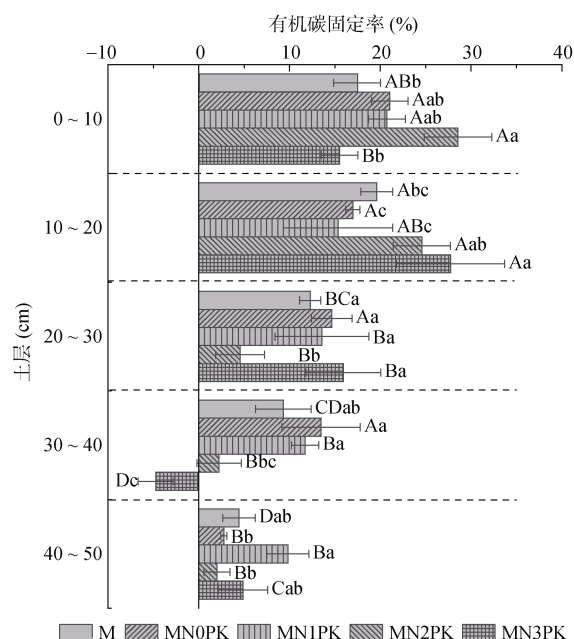


图2 连续8年单施有机肥及化肥与有机肥配施处理有机肥中的有机碳固定率

Fig. 2 Fixation ratios of organic carbon from manure under manure and chemical fertilizer combination with manure treatments for eight years

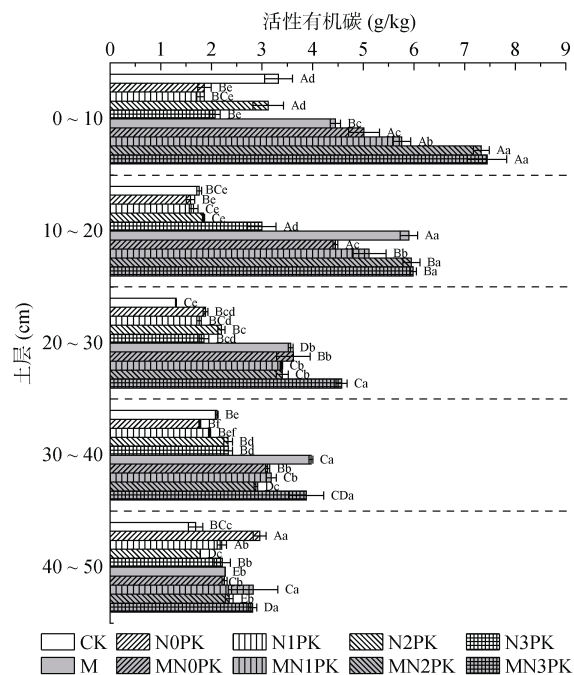


图3 不同施肥处理土壤活性有机碳含量

Fig. 3 Soil LOC carbon contents under different fertilization treatments

土层, 除MN0PK外, 其他3个化肥与有机肥配施处理较相同单施化肥处理显著增加了LOC含量 ( $P < 0.05$ ), 增幅为27.1%~31.9%。在0~20 cm土层, 化肥与有机肥配施处理土壤LOC含量随施氮量增加呈显著增加趋势 ( $P < 0.05$ )。

由图4A可知, 在0~50 cm土层, CK、4个单施化肥、有机肥(M)和4个化肥与有机肥配施处理土壤高

活性有机碳(HLOC)含量分别占 TOC 含量的 7.1% ~ 10.0%、6.1% ~ 11.1%、6.4% ~ 10.6% 和 6.2% ~ 13.2%; M 和化肥与有机肥配施处理土壤 HLOC 含量均高于 CK 处理。在 0 ~ 20 cm 土层, 化肥与有机肥配施处理土壤 HLOC 含量显著高于相同单施化肥处理( $P < 0.05$ ), 增幅为 122.2% ~ 330.7%。M 和化肥与有机肥配施处理土壤 HLOC 含量随土层深度增加呈显著下降趋势。

由图 4B 可知, 在 0 ~ 50 cm 土层, CK、4 个单施化肥、有机肥(M)和 4 个化肥与有机肥配施处理土壤中活性有机碳(MLOC)含量分别占 TOC 含量的 1.6% ~ 13.1%、1.7% ~ 13.2%、3.0% ~ 12.5% 和 0.6% ~ 13.8%。在 0 ~ 10 cm 土层, 化肥与有机肥配施处理土壤 MLOC 含量较相同单施化肥处理提高了 96.4% ~ 562.6%, 除 MN2PK 外, 其他处理均增加显著( $P < 0.05$ )。在 10 ~ 20 cm 土层, 化肥与有机肥配施处理土壤 MLOC 含量较相同单施化肥处理显著提高了 195.9% ~ 887.3%( $P < 0.05$ ), 以 MN0PK 处理增幅最大。在 20 ~ 30 cm 土层, MN0PK 较

N0PK 处理、MN3PK 较 N3PK 处理土壤 MLOC 含量显著提高了 116.9%、131.2%( $P < 0.05$ )。

由图 4C 可知, 在 0 ~ 50 cm 土层, CK、4 个单施化肥、有机肥(M)和 4 个化肥与有机肥配施处理土壤低活性有机碳(LLOC)含量分别占 TOC 含量的 1.9% ~ 9.5%、2.0% ~ 16.4%、1.2% ~ 10.9% 和 3.3% ~ 18.4%。在 0 ~ 40 cm 土层, 化肥与有机肥配施处理土壤 LLOC 含量较单施化肥处理均有所提高。其中, 在 0 ~ 10 cm 土层, 除 MN2PK 外, 其他处理显著提高了 74.3% ~ 417.4%( $P < 0.05$ ), 以 MN1PK 处理增幅为最大; 在 10 ~ 20 cm 土层, MN0PK 和 MN2PK 处理分别显著提高了 53.9% 和 597.9%( $P < 0.05$ ); 在 20 ~ 30 cm 土层, MN2PK 和 MN3PK 处理土壤 LLOC 含量分别显著提高了 149.7% 和 330.2%( $P < 0.05$ ); 在 30 ~ 40 cm 土层, MN1PK 和 MN3PK 处理分别显著提高了 96.9% 和 123.8%( $P < 0.05$ )。

相关分析表明(图 5), 土壤 LOC 及其 HLOC、

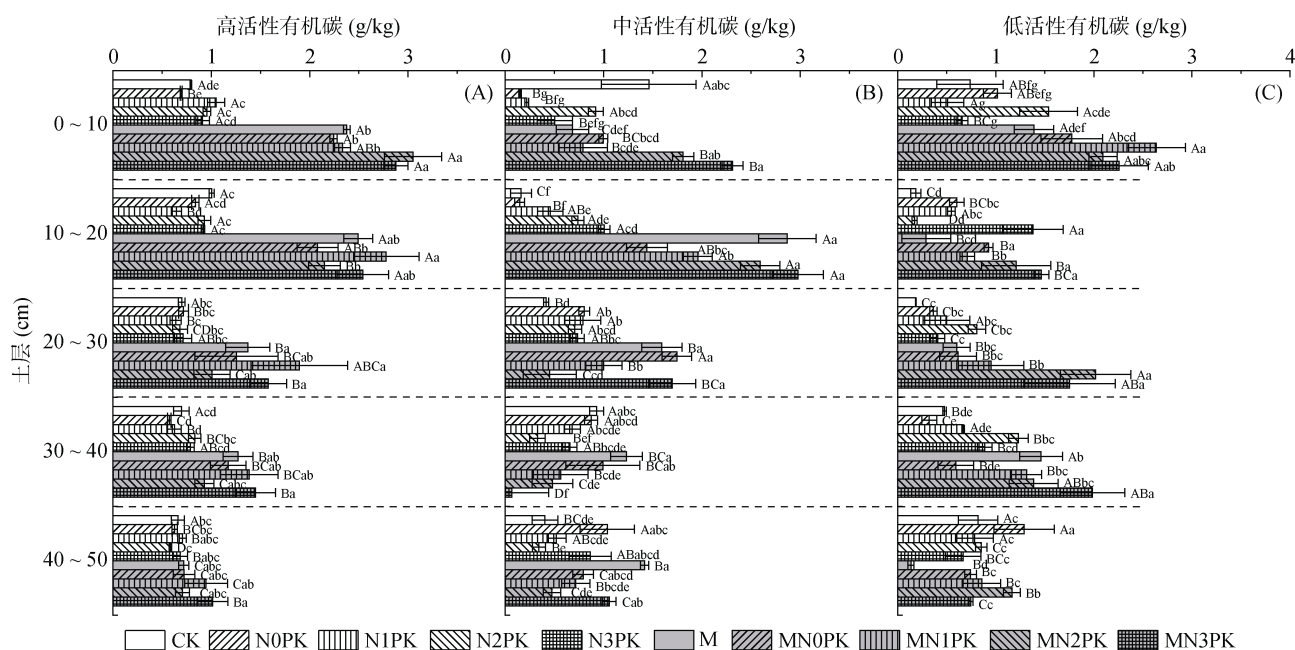


图 4 不同施肥处理土壤高、中、低活性有机碳含量

Fig. 4 Soil highly, moderately and lowly LOC contents under different fertilization treatments

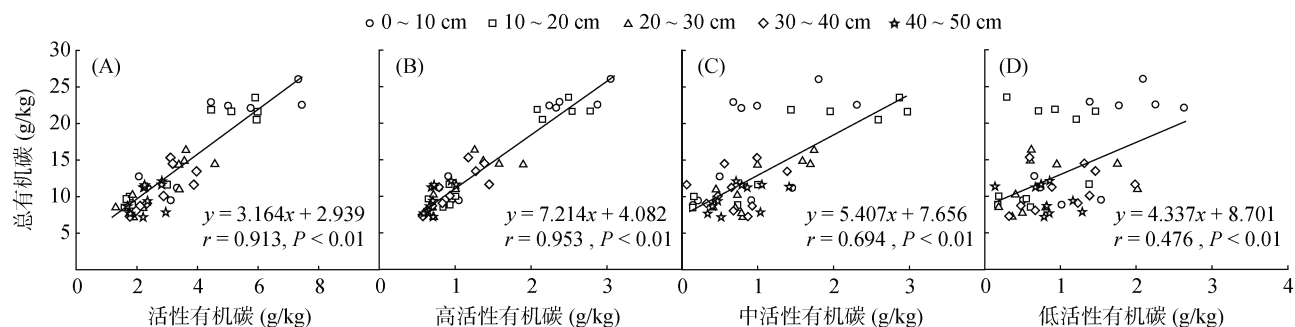


图 5 土壤活性有机碳及其组分含量与总有机碳含量的相关性

Fig. 5 Relationships between soil LOC, and its fractions (HLOC, MLOC and LLOC) and TOC

MLOC、LLOC 含量与 TOC 含量之间均呈极显著线性正相关, 其中 HLOC 与 TOC 的相关系数最大, 表明土壤 LOC 及其 HLOC、MLOC、LLOC 含量可以指示 TOC 的变化, 其中 HLOC 指示 TOC 的变化效果最好。

### 2.3 长期施肥土壤碳库管理指数

由表 2 可以看出, 以 CK 作为参考, 在 40~50 cm 土层, N3PK 处理土壤碳库指数(CPI)显著提高( $P<0.05$ ); 在 0~40 cm 土层, M 和 4 个化肥与有机肥配

表 2 不同施肥处理土壤碳库管理指数  
Table 2 Soil CPMIs under different fertilization treatments

土层(cm)	处理	碳库指数	碳库管理指数			
			活性有机碳	高活性有机碳	中活性有机碳	低活性有机碳
0~10	CK	1.0 ± 0.0 Acd	100.2 ± 11.4 Ad	99.9 ± 3.0 Ae	100.0 ± 0.4 Ac	100.8 ± 3.2 Ade
	N0PK	0.8 ± 0.1 Ad	50.1 ± 4.5 De	78.2 ± 1.9 Ef	9.1 ± 1.0 Ef	86.7 ± 13.2 Ce
	N1PK	0.8 ± 0.1 Ad	46.4 ± 3.2 Ce	114.6 ± 7.4 Ae	12.7 ± 1.0 Df	56.8 ± 1.5 Bf
	N2PK	0.9 ± 0.0 Ad	98.9 ± 12.8 Bd	136.4 ± 0.8 Ad	64.7 ± 4.6 CDd	158.8 ± 2.1 Cbc
	N3PK	1.1 ± 0.1 Ac	52.6 ± 4.1 Ce	104.3 ± 2.1 Be	39.2 ± 2.2 Be	52.5 ± 4.8 Ef
	M	2.1 ± 0.0 ABb	116.3 ± 3.4 Ecd	261.0 ± 5.1 Abc	48.1 ± 5.0 De	132.0 ± 0.7 Ccd
	MN0PK	2.0 ± 0.0 Ab	136.1 ± 9.8 Bc	255.5 ± 7.5 Ac	60.6 ± 2.1 Ed	152.7 ± 28.7 Cc
	MN1PK	2.0 ± 0.1 ABb	163.9 ± 4.3 Bb	279.1 ± 8.7 Ab	64.4 ± 8.2 Dd	262.6 ± 0.4 ABa
	MN2PK	2.3 ± 0.1 Aa	214.9 ± 1.7 Ba	374.3 ± 31.4 Aa	124.0 ± 2.2 Bb	204.3 ± 6.1 Cab
	MN3PK	2.0 ± 0.0 Ab	235.5 ± 19.6 Ba	405.2 ± 0.7 Aa	153.5 ± 3.3 Da	226.8 ± 36.8 CDa
10~20	CK	1.0 ± 0.1 Ab	97.9 ± 4.9 Ae	98.6 ± 1.5 Ae	96.2 ± 20.1 Af	99.4 ± 28.3 Ad
	N0PK	0.9 ± 0.0 Ab	89.1 ± 5.8 Ce	83.2 ± 4.6 Bef	32.5 ± 1.7 Dg	326.6 ± 43.5 ABc
	N1PK	1.0 ± 0.1 Ab	100.8 ± 5.2 Be	69.5 ± 4.1 Df	83.1 ± 1.2 Cf	324.9 ± 33.4 Ac
	N2PK	0.9 ± 0.1 Ab	106.4 ± 1.6 Bde	94.8 ± 5.1 Cde	129.4 ± 12.6 Be	109.9 ± 2.2 Dd
	N3PK	1.2 ± 0.0 Ab	177.8 ± 27.3 Acd	95.3 ± 7.1 Bce	177.4 ± 10.7 Ad	829.7 ± 20.6 Aa
	M	2.4 ± 0.1 Aa	359.8 ± 13.9 Aab	268.4 ± 13.4 Ac	470.1 ± 8.2 Ab	170.2 ± 7.1 Cd
	MN0PK	2.2 ± 0.2 Aa	294.2 ± 34.9 Abc	195.0 ± 2.4 Bd	278.4 ± 15.2 Bcd	501.6 ± 9.7 Ab
	MN1PK	2.2 ± 0.0 Aa	306.3 ± 25.6 Abc	298.7 ± 7.0 Ab	378.0 ± 0.1 Ac	409.0 ± 49.5 Ac
	MN2PK	2.1 ± 0.2 Aa	341.9 ± 40.3 Aab	254.4 ± 10.8 Ac	472.8 ± 8.9 Ab	520.5 ± 38.5 Bb
	MN3PK	2.2 ± 0.2 Aa	422.3 ± 33.8 Aa	322.4 ± 1.7 Ba	537.2 ± 10.9 Aa	771.4 ± 29.7 BCa
20~30	CK	1.0 ± 0.1 Ac	99.4 ± 0.2 Ad	99.8 ± 3.9 Af	98.7 ± 7.2 Af	99.5 ± 0.8 Ad
	N0PK	0.8 ± 0.1 Ac	166.3 ± 8.6 Bc	124.4 ± 1.3 Ae	239.5 ± 1.3 Bc	251.3 ± 15.3 Bcd
	N1PK	0.9 ± 0.1 Ac	150.1 ± 8.4 Acd	96.1 ± 0.4 Bf	243.5 ± 18.2 Ac	317.0 ± 116.7 Acd
	N2PK	1.0 ± 0.1 Ac	195.1 ± 12.1 Ac	103.1 ± 1.1 Cf	195.8 ± 25.0 Acd	571.7 ± 13.7 Ab
	N3PK	1.2 ± 0.2 Abc	148.2 ± 10.3 Acd	91.4 ± 3.7 Cf	182.3 ± 21.7 Ade	262.0 ± 6.7 Bcd
	M	1.8 ± 0.2 Bcb	306.2 ± 9.2 Bb	217.5 ± 5.3 Bb	489.1 ± 9.8 Aa	281.0 ± 34.8 Bcd
	MN0PK	2.4 ± 0.3 Aa	287.1 ± 28.7 Ab	186.1 ± 8.3 Bc	427.5 ± 28.8 Ab	236.4 ± 29.5 Bcd
	MN1PK	1.7 ± 0.3 ABb	299.2 ± 25.7 Ab	286.0 ± 6.7 Aa	204.8 ± 3.4 Bcd	389.6 ± 11.7 Abc
	MN2PK	1.3 ± 0.2 Bbc	323.7 ± 18.1 Ab	151.7 ± 1.5 Bd	139.2 ± 7.5 Bef	1407.7 ± 113.9 Aa
	MN3PK	1.7 ± 0.2 ABb	440.5 ± 29.8 Aa	298.0 ± 2.9 Ca	452.5 ± 15.9 Bab	1240.8 ± 121.1 Aa
30~40	CK	1.0 ± 0.0 Ade	99.5 ± 2.3 Ad	98.9 ± 12.4 Afg	100.0 ± 6.4 Ab	99.4 ± 4.3 Ade
	N0PK	0.8 ± 0.1 Ae	84.1 ± 2.7 Ce	86.0 ± 0.7 Bfg	87.6 ± 1.3 Cbc	81.8 ± 8.7 Ce
	N1PK	0.9 ± 0.1 Ade	95.3 ± 5.2 Bde	80.5 ± 0.4 Cg	75.3 ± 11.4 Cc	141.9 ± 8.1 ABcd
	N2PK	1.0 ± 0.1 Ade	112.6 ± 1.9 ABc	120.0 ± 4.7 Bde	35.8 ± 7.6 De	239.6 ± 1.4 Bb
	N3PK	1.3 ± 0.2 Abcd	106.2 ± 0.7 Bc	112.2 ± 0.6 Aef	68.3 ± 7.4 Bcd	177.4 ± 10.7 Cc
	M	1.5 ± 0.1 CDabc	201.9 ± 5.4 Ca	193.0 ± 18.9 Bb	159.8 ± 7.5 Da	380.8 ± 17.0 Aa
	MN0PK	1.8 ± 0.2 ABa	140.6 ± 5.2 Bb	178.7 ± 1.6 Bbc	140.4 ± 9.7 Da	148.6 ± 8.5 Ccd
	MN1PK	1.7 ± 0.1 ABab	146.7 ± 7.9 Bb	226.4 ± 4.6 Bab	73.6 ± 4.3 Dcd	267.6 ± 36.4 ABb
	MN2PK	1.2 ± 0.1 Bcde	145.2 ± 2.9 Cb	139.7 ± 10.2 Bcd	66.0 ± 33.9 Ccd	258.1 ± 24.7 Cb
	MN3PK	1.3 ± 0.2 Bbcd	216.8 ± 27.8 Ba	265.7 ± 10.4 Da	52.1 ± 3.2 Ede	376.2 ± 33.3 Ca
40~50	CK	1.0 ± 0.1 Acd	100.1 ± 8.6 Ae	100.4 ± 10.3 Acd	94.7 ± 5.8 Af	103.8 ± 33.5 Ade
	N0PK	0.9 ± 0.0 Acd	226.9 ± 15.1 Aa	122.9 ± 6.5 Bbc	392.2 ± 9.7 Aa	346.5 ± 22.2 Aa
	N1PK	0.8 ± 0.1 Ad	153.2 ± 6.9 Abc	125.7 ± 2.2 Abc	167.8 ± 1.8 Bd	153.6 ± 10.6 ABbc
	N2PK	0.9 ± 0.1 Acd	111.7 ± 3.8 Be	93.8 ± 5.0 Cd	96.7 ± 6.5 BCf	151.1 ± 15.1 Cbc
	N3PK	1.3 ± 0.1 Aab	100.2 ± 15.4 Be	114.3 ± 1.9 Acd	153.7 ± 14.0 Ade	137.7 ± 13.2 Dcd
	M	1.3 ± 0.0 Dab	136.0 ± 1.1 Dd	103.1 ± 2.4 Dcd	335.0 ± 12.2 Bb	22.9 ± 5.1 De
	MN0PK	1.3 ± 0.2 Bab	135.1 ± 0.8 Bd	109.8 ± 13.9 Ccd	218.1 ± 0.5 Cc	124.8 ± 6.9 Cde
	MN1PK	1.4 ± 0.1 Ba	74.2 ± 0.3 Cf	145.5 ± 7.9 Cab	132.8 ± 15.4 Ce	149.1 ± 6.4 Bbc
	MN2PK	1.1 ± 0.0 Bbc	149.8 ± 5.7 Cc	115.4 ± 11.6 Ccd	142.1 ± 5.1 Bde	208.9 ± 15.7 Cab
	MN3PK	1.3 ± 0.1 Bab	178.9 ± 8.2 Bab	164.1 ± 5.7 Ea	244.4 ± 9.6 Cc	133.2 ± 5.1 Dcd

注: 表中同列数据大写字母不同表示相同处理不同土层间差异显著( $P<0.05$ ), 小写字母不同表示相同土层不同处理间差异显著( $P<0.05$ )。



施处理土壤 CPI 均显著提高( $P<0.05$ ); 在 40 ~ 50 cm 土层, 除 MN2PK 处理外, M 和其他 3 个化肥与有机肥配施处理土壤 CPI 也均显著提高( $P<0.05$ ); 土壤 CPI 随着土层深度的增加而降低, 化肥与有机肥配施较相同单施化肥处理土壤 CPI 提高了 3.4% ~ 180.7%。在 0 ~ 50 cm 土层, 土壤活性有机碳碳库管理指数(CPMI)随土层深度的增加均表现为先升高再下降的趋势, M 和 4 个化肥与有机肥配施处理土壤 CPMI 均显著提高( $P<0.05$ ), 分别较 CK 和相同单施化肥处理增幅 16.0% ~ 267.5% 和 29.0% ~ 348.1%。在 0 ~ 50 cm 土层, 各处理土壤高、中和低活性有机碳的 CPMI 均随土层深度的增加大致表现为先升高再降低的趋势。与相同单施化肥处理相比, 化肥与有机肥配施处理显著提高了 0 ~ 30 cm 土层 HLOC 的 CPMI( $P<0.05$ ), 显著提高了 0 ~ 20 cm 土层 MLOC 的 CPMI( $P<0.05$ )。化肥与有机肥配施处理土壤活性有机碳各组分的 CPMI 因土层不同而异, 其中在 0 ~ 10 cm

土层表现为 HLOC>LLOC>MLOC, 在 10 ~ 20 cm 土层表现为 LLOC>MLOC>HLOC, 在 0 ~ 20 cm 土层, 土壤 HLOC 和 MLOC 的 CPMI 均以 MN3PK 处理为最高。总体上, 在 0 ~ 20 cm 土层, 化肥与有机肥配施处理土壤 LOC 及其 HLOC 和 MLOC 的 CPMI 均随化学氮肥施用量的增加而增加。

相关分析发现(表 3), 在 0 ~ 40 cm 土层, HLOC 与 LOC 的 CPMI 之间均呈显著正相关( $P<0.05$ ); 除 30 ~ 40 cm 外, 各土层 MLOC 与 LOC 的 CPMI 之间呈显著正相关( $P<0.05$ ); 除 10 ~ 20 cm 和 40 ~ 50 cm 外, 各土层 LLOC 与 LOC 的 CPMI 之间呈显著正相关( $P<0.05$ )。另外, 在 0 ~ 10 cm 土层, HLOC、MLOC 和 LLOC 组分的 CPMI 之间呈显著正相关( $P<0.05$ ); 在 10 ~ 20 cm 土层, HLOC 与 MLOC 之间, 以及 30 ~ 40 cm 土层 HLOC 与 LLOC 之间的 CPMI 也呈显著正相关( $P<0.05$ )。由此可见, 长期施肥土壤活性有机碳库, 尤其是高活性有机碳库能很好地反映土壤有机碳库的变化。

表 3 土壤活性有机碳组分的碳库管理指数与活性有机碳的碳库管理指数的相关系数  
Table 3 Correlation coefficients between CPMIs of soil LOC fractions (HLOC, MLOC and LLOC) and CPMI of LOC

	0 ~ 10 cm				10 ~ 20 cm				20 ~ 30 cm				30 ~ 40 cm				40 ~ 50 cm			
	HLOC	MLOC	LLOC	LOC	HLOC	MLOC	LLOC	LOC	HLOC	MLOC	LLOC	LOC	HLOC	MLOC	LLOC	LOC	HLOC	MLOC	LLOC	LOC
HLOC	1.00	0.74*	0.82*	0.95**	1.00	0.96**	0.32	0.96**	1.00	0.60	0.37	0.87*	1.00	0.10	0.79*	0.90**	1.00	0.18	0.18	0.25
MLOC		1.00	0.66*	0.88*		1.00	0.39	0.98**		1.00	0.06	0.64*		1.00	0.00	0.23		1.00	0.28	0.76*
LLOC			1.00	0.88*			1.00	0.46			1.00	0.70*			1.00	0.92**			1.00	0.61

注: \*, \*\* 分别表示相关性达  $P<0.05$  和  $P<0.01$  显著水平。

### 3 讨论

#### 3.1 长期化肥与有机肥配施显著提高了土壤总有机碳及活性有机碳含量

本研究中, 连续 8 年施用化肥及化肥与有机肥配施土壤总有机碳含量随土层深度增加呈下降趋势, 主要积累在 0 ~ 20 cm 土层, 化肥与有机肥配施可显著提高 0 ~ 20 cm 土壤总有机碳含量, 其中中用量化肥与有机肥配施(MN2PK)提高土壤总有机碳的效果最为明显(图 1)。这一研究结果与前人在设施土壤及农田土壤的研究结果相同<sup>[14-15]</sup>。这可能是由于本研究中化肥和有机肥主要施用在 0 ~ 20 cm 土层, 且单施有机肥及化肥与有机肥配施不仅可直接增加有机碳投入, 而且也可增加根系分泌物有机碳投入<sup>[7,16]</sup>; 另一方面设施环境高温、高湿, 土壤有机质大量矿化分解, 设施大棚常年封闭, 释放到空气的 CO<sub>2</sub> 还会被作物和生物固定到土壤, 补充土壤新有机碳库。另外, 本研究中 MN2PK 处理

施入有机肥中的有机碳固定率为最大(图 2), 这也是中用量化肥与有机肥配施提升土壤总有机碳效果最为明显的关键所在。

土壤活性有机碳由氨基酸、简单碳水化合物、部分土壤微生物生物量和其他简单有机化合物组成, 周转时间快<sup>[6,17]</sup>。本研究表明连续 8 年单施有机肥及化肥与有机肥配施均显著提高了 0 ~ 20 cm 土层土壤活性有机碳含量, 其中高用量化肥与有机肥配施(MN3PK)增加效果更为显著(图 3)。这与前人对设施栽培长期定位施肥试验的结果相一致<sup>[10,18]</sup>, 说明有机肥输入增加了土壤有机质的来源, 进而驱动活性碳库的变化, 促进了土壤活性有机碳的累积。另外, 本研究发现连续 8 年单施化肥对土壤总有机碳含量无显著影响且有下降趋势(图 1), 这主要是由于在设施内高温高湿环境条件下, 在没有外源有机碳的输入时, 施用化肥能加速土壤有机碳的分解<sup>[2]</sup>, 不能有效固碳<sup>[19]</sup>。本研究中不同施肥措施对土壤活性有机碳占总有机碳比例的影响较小, 这与赵亚南等<sup>[6]</sup>对 22 年定位施肥

试验的结果相一致,但却与张瑞等<sup>[20]</sup>对3年定位施肥试验的结果有所不同。这主要是因为土壤有机碳由不同活性的碳库组成,短期施肥对土壤有机碳的影响首先表现在活性碳库上,对周转速度较慢的非活性碳库的影响较为缓慢<sup>[20]</sup>;长期施肥能维持有机碳的持续输入,促使各个碳库之间的相互转化,非活性碳库也逐渐发生变化,直至碳库间达到动态平衡并维持在一定的比例<sup>[6]</sup>。本研究结果也意味着在设施高温高湿等特殊环境条件下,长期化肥与有机肥配施会促使活性有机碳库和非活性有机碳库之间的相互转化,进而维持土壤有机碳库的动态平衡。

土壤各组分活性有机碳含量及其比例因气候条件、土壤类型、种植方式、土层深度等不同而异<sup>[21]</sup>。徐明岗等<sup>[4]</sup>研究发现红壤以高活性有机碳为主,而垆土、灰漠土和潮土以高活性和中活性有机碳两部分为主。长期定位施肥能提高农田土壤高、中和低活性有机碳含量<sup>[6,9]</sup>,且化肥与有机肥配施提升效果高于单施化肥<sup>[9]</sup>,土壤表层以低活性有机碳组分的占比最大<sup>[9,12]</sup>。本研究中长期化肥与有机肥配施显著提高了土壤活性和高活性有机碳含量,其含量随土层深度加深呈下降趋势,且化肥与有机肥配施处理提升效果高于相同单施化肥处理,以低活性有机碳含量占总有机碳含量的比例为最大(图4),这与前人对农田土壤的研究结果相似<sup>[9,12]</sup>。但本研究中连续8年单施化肥对土壤活性有机碳及其各组分含量的影响显著,与李磊等<sup>[9]</sup>长期定位单施化肥处理能提高土壤高、中和低活性有机碳含量的研究结果并不完全一致。这可能是因为在设施内高温高湿等环境条件下,长期单施化肥处理快速消耗了土壤的活性有机碳库。此外,本研究结果显示土壤活性有机碳及其各组分含量与总有机碳含量均呈显著线性正相关关系,其中高活性有机碳含量与总有机碳含量之间的线性相关性最大(图5),这说明在设施内高温高湿和半封闭环境条件下,长期施肥土壤活性有机碳库,尤其是高活性有机碳库可以很好地反映土壤总有机碳库的变化。

### 3.2 长期化肥与有机肥配施提高了土壤碳库管理指数

土壤碳库管理指数的变化与施肥方式、种植模式等措施密切相关<sup>[22-23]</sup>。研究发现农田土壤碳库指数为1.2~3.4<sup>[7]</sup>,南方双季水稻体系长期不同施肥措施土壤碳库指数为1.0~1.7<sup>[11]</sup>。本研究发现设施土壤碳库指数为0.8~2.4(表2),对比其他类型土壤,设施土壤碳库指数较低,与连玉珍等<sup>[24]</sup>的研究结果一致。另外,本研究中连续8年施用有机肥和化肥与有机肥配

施均可显著提高土壤碳库指数和碳库管理指数(表2),与权玲等<sup>[25]</sup>在设施土壤和Tang等<sup>[26]</sup>在农田土壤的研究结果一致,这说明施用有机肥是提高设施土壤碳库管理指数的重要措施。也有研究发现,施用有机肥和化肥与有机肥配施均可显著提高土壤高、中和低活性有机碳的碳库管理指数<sup>[6]</sup>,长期单施化肥也可提高土壤高、中和低活性有机碳的碳库管理指数<sup>[9]</sup>,本研究结果则显示施用有机肥和化肥与有机肥配施均可显著提升0~40 cm土层土壤有机碳的碳库指数和管理指数,0~20 cm土层土壤高和中活性有机碳的碳库管理指数显著高于施用相同化肥处理。另外,本研究中化肥与有机肥配施0~20 cm土层土壤碳库管理指数及高和中活性组分的碳库管理指数均随施氮量的增加而增加(表2)。这说明在设施内高温高湿等特殊环境条件下,连续每年有机肥施用以及根系分泌物进入和残留根系归还,既增加了土壤有机碳数量,也影响了土壤有机碳的稳定性,进而增加了土壤中有有机碳的活性<sup>[27-28]</sup>;有机肥与磷、钾肥和不同用量氮肥配施,也会影响土壤有机碳和有机物质的矿化分解、养分解与积累<sup>[29]</sup>,高用量氮肥施用促进了土壤有机碳和有机物质的矿化分解(图2),进而提高了土壤活性有机碳及其组分的碳库管理指数。由此可见,设施番茄栽培条件下,长期化肥与有机肥配施提高了设施土壤总有机碳及其活性有机碳含量以及碳库管理指数,设施土壤质量得到改善和提升,中用量化肥与有机肥配施(MN2PK)管理措施对于番茄的可持续生产具有重要意义。

## 4 结论

在设施番茄栽培连续8年定位施肥条件下,不同施肥措施土壤总有机碳和活性有机碳含量均随土层深度加深(0~50 cm土层)呈逐渐下降趋势;与不施肥相比,单施有机肥和化肥与有机肥配施均可显著提高0~20 cm土层土壤总有机碳、活性有机碳和高活性有机碳含量。化肥与有机肥配施0~20 cm土壤活性有机碳及其高活性组分含量和碳库管理指数均显著高于单施化肥处理,土壤活性及其高和中活性有机碳的碳库管理指数均随化肥施氮量的增加而增加。土壤活性有机碳及其高、中和低活性有机碳含量与总有机碳含量有密切关系,其中高活性有机碳与总有机碳含量的相关系数最大。综合考虑,设施生产中75 000 kg/(hm<sup>2</sup>·a)有机肥与中量化肥(N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>和K<sub>2</sub>O用量分别为375、225和450 kg/(hm<sup>2</sup>·a))配施是设施番茄可持续生产较为合理的管理措施。



## 参考文献:

- [1] 于泓, 卢维宏, 张乃明. 我国设施栽培土壤退化特征及修复技术研究进展[J]. 蔬菜, 2021(11): 35–42.
- [2] Luan H A, Gao W, Huang S W, et al. Partial substitution of chemical fertilizer with organic amendments affects soil organic carbon composition and stability in a greenhouse vegetable production system[J]. Soil and Tillage Research, 2019, 191: 185–196.
- [3] 骆坤, 胡荣桂, 张文菊, 等. 黑土有机碳、氮及其活性对长期施肥的响应[J]. 环境科学, 2013, 34(2): 676–684.
- [4] 徐明岗, 于荣, 孙小凤, 等. 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[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(4): 459–465.
- [5] Blair G J, Lefroy R, 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.
- [6] 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.
- [7] Li J, Wen Y C, Li X H, et al. Soil labile organic carbon fractions and soil organic carbon stocks as affected by long-term organic and mineral fertilization regimes in the North China Plain[J]. Soil and Tillage Research, 2018, 175: 281–290.
- [8] 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.
- [9] 李小磊, 张玉军, 申凤敏, 等. 长期施肥对红壤性水稻土不同土层活性有机质及碳库管理指数的影响[J]. 中国农业科学, 2020, 53(6): 1189–1201.
- [10] 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.
- [11] Tang H M, Li C, Xiao X P, et al. Effects of long-term fertiliser regime on soil organic carbon and its labile fractions under double cropping rice system of Southern China[J]. Acta Agriculturae Scandinavica, Section B — Soil & Plant Science, 2020, 70(5): 409–418.
- [12] 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.
- [13] 梁琼, 王婵, 刘杰, 等. 设施菜地土壤有机碳及酶活性特征[J]. 北京农学院学报, 2018, 33(1): 43–48.
- [14] 孙莹, 侯玮, 迟美静, 等. 氮肥与有机肥配施对设施土壤腐殖质组分的影响[J]. 土壤学报, 2019, 56(4): 940–952.
- [15] Xin X L, Zhang J B, Zhu A N, et al. Effects of long-term (23 years) mineral fertilizer and compost application on physical properties of fluvo-aquic soil in the North China Plain[J]. Soil and Tillage Research, 2016, 156: 166–172.
- [16] Zhao Y N, Zhang Y Q, Liu X Q, et al. Carbon sequestration dynamic, trend and efficiency as affected by 22-year fertilization under a rice–wheat cropping system[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2016, 179(5): 652–660.
- [17] Shang Q Y, Yang X X, Gao C M, et al. Net annual global warming potential and greenhouse gas intensity in Chinese double rice-cropping systems: A 3-year field measurement in long-term fertilizer experiments[J]. Global Change Biology, 2011, 17(6): 2196–2210.
- [18] Lou Y, Xu M, Wang W, et al. Soil organic carbon fractions and management index after 20 yr of manure and fertilizer application for greenhouse vegetables[J]. Soil Use and Management, 2011, 27(2): 163–169.
- [19] Brown K H, Bach E M, Drijber R A, et al. A long-term nitrogen fertilizer gradient has little effect on soil organic matter in a high-intensity maize production system[J]. Global Change Biology, 2014, 20(4): 1339–1350.
- [20] 张瑞, 张贵龙, 姬艳艳, 等. 不同施肥措施对土壤活性有机碳的影响[J]. 环境科学, 2013, 34(1): 277–282.
- [21] Huang X L, Jiang H, Li Y, et al. The role of poorly crystalline iron oxides in the stability of soil aggregate-associated organic carbon in a rice–wheat cropping system[J]. Geoderma, 2016, 279: 1–10.
- [22] 苑广源, Munyampirwa T, 毛丽萍, 等. 16 年保护性耕作措施对粮草轮作系统土壤碳库及稳定性的影响[J]. 水土保持学报, 2021, 35(3): 252–258, 267.
- [23] 杨苏, 刘耀斌, 王静, 等. 不同有机物料投入下黄河故道土壤有机碳积累特征的研究[J]. 土壤, 2021, 53(2): 361–367.
- [24] 连玉珍, 庄朝飞, 仇晓玉, 等. 土地利用方式对土壤活性有机碳及碳库管理指数的影响[J]. 高原农业, 2020, 4(1): 26–33.
- [25] 权玲, 徐灵颖, 赵旭, 等. 稻改设施有机蔬菜土壤碳氮磷含量与生态化学计量特征研究[J]. 中国土壤与肥料, 2022(9): 184–193.
- [26] 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.
- [27] Tirol-Padre A, Ladha J K. Assessing the reliability of permanganate-oxidizable carbon as an index of soil labile carbon[J]. Soil Science Society of America Journal, 2004, 68(3): 969.
- [28] Gong W, Yan X Y, Wang J Y, et al. Long-term manuring and fertilization effects on soil organic carbon pools under a wheat–maize cropping system in North China Plain[J]. Plant and Soil, 2009, 314(1): 67–76.
- [29] Zhang Y R, Li Y, Liu Y L, et al. Responses of soil labile organic carbon and carbon management index to different long-term fertilization treatments in a typical yellow soil region[J]. Eurasian Soil Science, 2021, 54(4): 605–618.