

# 长期施肥和秸秆还田对设施蔬菜土壤有机碳的影响

薛旭杰<sup>1</sup>, 康晓晗<sup>1</sup>, 石小霞<sup>1</sup>, 赵 诣<sup>2</sup>, 孟凡乔<sup>1\*</sup>

(1. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193; 2. 辽宁工业大学化学与环境工程学院, 锦州 121001)

**摘 要:** 为了明确施肥和秸秆还田等措施对华北地区设施蔬菜土壤有机碳的影响, 该研究以寿光设施蔬菜生产为对象, 进行了连续 11 a 的长期定位试验, 设置了对照 (CK)、有机肥+秸秆还田 (MS)、有机肥+优化氮肥 (N1M)、有机肥+常规氮肥 (N2M)、有机肥+优化氮肥+秸秆还田 (N1MS)、有机肥+常规氮肥+秸秆还田 (N2MS) 6 个处理, 通过测定分析土壤有机碳含量、储量、有机物料碳转化效率、固碳速率等, 探讨不同施肥和秸秆还田措施下土壤有机碳的变化规律。结果表明, 施加有机肥+优化氮肥条件下, N1MS 处理可以提高 >30~60 cm 土壤有机碳含量, 比 N1M 处理显著提高了 40.5% ( $P<0.05$ ), 而施加有机肥+常规氮肥条件下, 施加秸秆的增碳效果不明显; N2M 显著增加表层 (0~30 cm) 土壤有机碳含量 ( $P<0.05$ ), 比 N1M 处理提升 47.0%; 在有机肥+秸秆还田条件下, 0~30 cm 土层土壤有机碳随着施氮量的增加而增加, 增加量大小顺序为 N2MS (106.5%) > N1MS (64.2%) > MS (39.9%); N2MS 的土壤固碳速率在 0~30 和 0~90 cm 土层分别为 1.85 和 3.74 t/(hm<sup>2</sup>·a)。因此, 只考虑表层 (0~30 cm) 土壤固碳是远远不够的, 应重视设施蔬菜等集约农业生产方式的深层土壤固碳。施用氮肥有利于提高有机物料转换为土壤有机碳的效率, 且随着氮肥量的增加, 有机物料的碳转化效率明显提高。设施蔬菜生产中, 由于有机肥投入水平较高, 秸秆还田转化为土壤有机碳的效率反而降低, 秸秆还田和氮肥之间并未显现出对土壤有机碳的正交互作用, 应进一步优化肥料和秸秆投入方式和水平, 在维持蔬菜高产的前提下提高资源利用效率。

**关键词:** 土壤; 有机碳; 秸秆; 设施蔬菜; 氮肥; 深层土壤; 有机物料转化效率

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.z.011

中图分类号: S155.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2022)-Supp.-0098-08

薛旭杰, 康晓晗, 石小霞, 等. 长期施肥和秸秆还田对设施蔬菜土壤有机碳的影响[J]. 农业工程学报, 2022, 38(增刊): 98-105. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.z.011 <http://www.tcsae.org>

Xue Xujie, Kang Xiaohan, Shi Xiaoxia, et al. Effects of long-term fertilization and straw returning on soil organic carbon in plastic-shed vegetable production[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(Supp.): 98-105. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.z.011 <http://www.tcsae.org>

## 0 引 言

中国政府在第七十五届联合国大会一般性辩论上提出了中国碳达峰、碳中和的时间表, 即二氧化碳排放力争于 2030 年前达到峰值, 争取 2060 年前实现碳中和<sup>[1]</sup>。

《京都议定书》指出, 通过采取碳封存的形式, 不仅会通过增加土壤有机质数量实现碳中和, 还会改善土壤性质、环境质量和提高生物多样性<sup>[2]</sup>。在 1 m 土层, 全球碳库总量约 2 500 Pg, 其中土壤有机碳 (Soil Organic Carbon, SOC) 和土壤无机碳 (Soil Inorganic Carbon, SIC) 分别为 1 550 和 950 Pg<sup>[3]</sup>。土壤碳库微小程度的增加, 可能会对全球温室气体抵消做出重大贡献; 与其他固碳减排方式相比, 土壤固碳经济效益大、固碳持续时间长, 是缓解温室效应的有效途径<sup>[4]</sup>。中国是蔬菜生产大国, 很多地区采用集约化、规模化的设施生产模式, 对于增加农业效益、提高农民收入和维持农村经济稳定发展做出了重要贡献<sup>[5]</sup>。山东寿光是中国最大的蔬菜生产和集散中心, 以寿光为代表的很多蔬菜产区, 都存在着施肥量大、灌溉频繁、肥料浪费、地下水氮素积累、土壤养分不平衡和

酸化等问题<sup>[6]</sup>, 直接或间接影响土壤碳库的变化。

施肥和秸秆还田是农业生产的重要管理措施, 对土壤 SOC 和理化性质具有重要影响。研究发现, 经过长时间蔬菜种植, 土壤 SOC 含量不断增加, 在增加土壤碳库同时, 有效改善了土壤肥力, 保障了蔬菜优质高产<sup>[7]</sup>。Yan 等<sup>[8]</sup>研究表明, 土地从粮食作物转变为设施蔬菜生产, 显著提高土壤 SOC (42.0%)。Luan 等<sup>[9]</sup>发现, 施用有机肥可以增加设施蔬菜的 SOC, 但降低了土壤 SOC 稳定性。单施化肥降低土壤 C/N 比, 导致 SOC 的加速矿化<sup>[10]</sup>, 降低土壤 SOC 含量, 而有机肥和无机肥混合施用可减轻该问题的发生<sup>[11]</sup>。设施蔬菜生产中, 秸秆还田可以直接增加土壤有机物料输入量, 提升土壤 SOC 水平, 每年增加 SOC 0.58 t/hm<sup>2</sup><sup>[12]</sup>。韩笑<sup>[13]</sup>对 70 个粮食作物生产长期定位试验进行 Meta 分析, 发现施氮和秸秆还田处理对 SOC 提高有较好的正向交互作用, 当每年施氮量为 400 kg/hm<sup>2</sup> 时, 表层土壤 SOC 固碳效应达到 0.67 t/(hm<sup>2</sup>·a)。Meng 等<sup>[14]</sup>研究表明, 秸秆还田和氮肥的交互作用显著 ( $P<0.001$ ), 在玉米秸秆施加水平增加时, 氮肥对 SOC 提高更为明显。

以上研究大多集中于施肥或秸秆还田等单因素对农田土壤 SOC 的影响, 且受试验期限的影响, 对深层土壤 SOC 含量变化关注较少。基于前期对蔬菜生产中土壤 SOC 的文献分析和生产调研, 提出这样一个科学假设, 即设施蔬菜生产与大田粮食作物相比, 氮肥投入量巨大,

收稿日期: 2022-07-29 修订日期: 2022-11-18

基金项目: 十三五国家重点研发计划项目 (2016YFD0201204, 2017YFD0800605)

作者简介: 薛旭杰, 研究方向为土壤碳循环。Email: 1045832750@qq.com  
\*通信作者: 孟凡乔, 博士, 教授, 研究方向为土壤碳氮循环、可持续农业。  
Email: mengfq@cau.edu.cn

和秸秆还田长期配施条件下，对土壤 SOC 提升的正交互作用可能不明显或者不存在，且在长期蔬菜栽培生产条件下，由于大量有机肥等投入，深层土壤 SOC 也会得到显著增加。为此，本研究基于山东寿光 2004 年开始的长期定位试验，在 2015 年采集土壤样品，分析其 SOC 的变化规律及影响机制，为优化设施蔬菜生产的管理措施、提高区域农田土壤固碳提供理论和技术支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

本试验位于山东省寿光市古城街道罗家庄(36°55' N, 118°45' E)。该地区为滨海河流冲积平原，典型大陆性季风气候，年均温 12.4℃，年均降水量约为 590 mm，降雨主要集中于 6—8 月，占全年降水量的 63.0%。本设施蔬菜长期定位试验开始于 2004 年 2 月，试验温室为传统的厚土墙、水泥立柱结构，占地面积约 714 m<sup>2</sup>（长 84 m，宽 8.5 m），连续种植番茄，按照当地农民传统经验进行管理。栽培模式为传统的双行畦栽，畦宽 1.0 m，畦间距 0.4 m，行距 0.6 m，株距为 0.35~0.40 m。种植密度为 35 000 株/hm<sup>2</sup>，针对番茄常见的病虫害（叶霉病、晚疫病、白粉虱等），每 7~10 d 打药（杀菌剂、杀虫剂）1 次。土壤类型为潮褐土，试验开始前土壤基本理化性质见表 1。

表 1 试验前土壤理化性质

Table 1 Soil physical and chemical properties in the experiment

| 土壤深度<br>Soil<br>depth/cm | 有机质<br>SOM/<br>(g·kg <sup>-1</sup> ) | 全氮<br>Total-N/<br>(g·kg <sup>-1</sup> ) | 有效磷<br>Available<br>P/(mg·kg <sup>-1</sup> ) | 速效钾<br>Available<br>K/(mg·kg <sup>-1</sup> ) | pH 值 <sup>a</sup><br>pH<br>value | EC <sup>b</sup> /<br>(μS·cm <sup>-2</sup> ) |
|--------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------|---------------------------------------------|
| 0~10                     | 18.3                                 | 1.37                                    | 437                                          | 299                                          | 5.71                             | 351                                         |
| >10~30                   | 11.0                                 | 1.04                                    | 243                                          | 147                                          | 6.34                             | 208                                         |
| >30~60                   | 4.7                                  | 0.47                                    | 136                                          | 111                                          | 6.60                             | 211                                         |

注：a 液土比为 2.5:1；b 液土比为 5:1。

Note: a liquid-soil ratio is 2.5:1; b liquid-soil ratio is 5:1.

### 1.2 试验设计

本试验探究施肥、秸秆还田等管理措施对设施蔬菜土壤 SOC 的影响，一共设置 6 个处理，每个处理设置 3 个重复，如表 2 所示。

表 2 试验设计管理措施

Table 2 Experimental design management measures

| 处理<br>Treatments                                                                   | 有机肥<br>Manure/<br>(t·hm <sup>-2</sup> ) | 小麦秸秆<br>Wheat straw/<br>(t·hm <sup>-2</sup> ) | 施氮量<br>N fertilizer/<br>(kg·hm <sup>-2</sup> ) |
|------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------------|------------------------------------------------|
| 对照 Control (CK)                                                                    | /                                       | /                                             | /                                              |
| 有机肥+秸秆还田处理<br>Manure and straw incorporation (MS)                                  | 10                                      | 8                                             | /                                              |
| 有机肥+优化氮肥处理<br>Manure and optimized nitrogen (N1M)                                  | 10                                      | /                                             | 389                                            |
| 有机肥+优化氮肥+秸秆还田处理<br>Manure, optimized nitrogen and straw<br>incorporation (N1MS)    | 10                                      | 8                                             | 389                                            |
| 有机肥+常规氮肥处理<br>Manure and conventional nitrogen (N2M)                               | 10                                      | /                                             | 1 167                                          |
| 有机肥+常规氮肥+秸秆还田处理<br>Manure, conventional nitrogen and straw<br>incorporation (N2MS) | 10                                      | 8                                             | 1 167                                          |

全年番茄种植两季，其中 2—6 月为冬春季，8 月—次年 1 月为秋冬季，7 月为休闲期。在每季作物种植前施加基肥（风干鸡粪+小麦秸秆），翻耕土地 40 cm，施用

有机肥鸡粪（碳和氮质量分数分别为 28.8%和 2.7%）的同时施加小麦秸秆（碳和氮质量分数分别 41.1%和 0.6%，均粉碎成 1~5 cm），灌溉的同时进行追加尿素（含氮量 46.3%），秋冬季追肥 9 次，冬春季 12 次。灌溉方式均采用大水漫灌，每季灌溉次数约 9~12 次，冬春季灌溉量约 410 mm，秋冬季灌溉量约 624 mm。秸秆还田从 2007 年开始。

### 1.3 土样采集与指标分析

土壤样品的采集时间为 2015 年 7 月番茄收获后。每个处理小区沿对角线利用土钻进行土壤采样，每个小区取 3 钻进行充分混合以获得具有代表性的样品。采集土壤深度为 90 cm，每 30 cm 作为 1 个土层，即 3 土层分别为 0~30、>30~60、>60~90 cm。土样带回实验室，过 2 mm 筛，风干后，封于自封袋中在室温保存。在土钻取样的同时，用不锈钢环刀（高 5 cm，直径 5 cm）于每个试验小区进行取样（每个土层取 1 个土样），测量容重。土壤全碳采用 Thermo Elemental Analyzer 1112 元素分析仪测定。将土壤用酸洗方法去除 SIC，之后用元素分析仪测定 SOC<sup>[15]</sup>。SOC 储量的计算利用固定深度法对土壤 SOC 储量进行计算<sup>[16]</sup>：

$$\text{SOC}_{\text{stock}} = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^n (\text{SOC}_i \times \text{BD}_i \times T_i) \quad (1)$$

式中  $\text{SOC}_{\text{stock}}$  为一定深度土壤 SOC 储量，t/hm<sup>2</sup>； $\text{SOC}_i$  为第  $i$  层土壤 SOC 含量，g/kg； $\text{BD}_i$  为第  $i$  层土壤容重，g/cm<sup>3</sup>； $T_i$  为第  $i$  层土壤深度，cm； $n$  为土层数。

碳转换效率（Carbon conversion Efficiency, CE）用式（3）计算。

$$\Delta \text{SOC}_{\text{积}} = \Delta \text{SOC}_{\text{处理}} - \Delta \text{SOC}_{\text{CK}} \quad (2)$$

$$\text{CE} = \frac{\Delta \text{SOC}_{\text{积}}}{F \times C_1 + S \times C_2} \times 100 \quad (3)$$

式中  $\Delta \text{SOC}_{\text{积}}$  为一定深度土壤 SOC 储量的积累量，t/hm<sup>2</sup>； $\Delta \text{SOC}_{\text{处理}}$  表示经过 11 a 各处理 SOC 储量变化量，t/hm<sup>2</sup>， $\Delta \text{SOC}_{\text{CK}}$  表示经过 11 a CK 的储量变化量，t/hm<sup>2</sup>。CE 表示有机物料（有机肥和秸秆）的碳转化效率，即单位数量的有机物料转化成 SOC 的比例，%。 $\Delta \text{SOC}_{\text{积}}$  为 11 a SOC 储量的积累量（不包含根系归还和根系分泌物中碳），t/hm<sup>2</sup>； $F$  代表 11 a 有机肥的施入量，t/hm<sup>2</sup>； $S$  为 11 a 秸秆的施入量，t/hm<sup>2</sup>； $C_1$ 、 $C_2$  分别为所施加有机肥或秸秆的碳含量， $C_1$  取 28.8%， $C_2$  取 41.1%。

### 1.4 数据处理

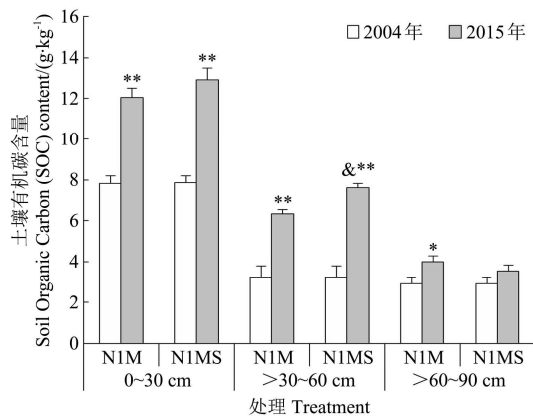
采用 IBM SPSS statistics 25.0 对土壤 SOC 含量、SOC 储量和 CE 等指标，进行处理间和土层间单因素方差分析（One-way Analysis of Variance, One-way ANOVA），并对施氮量和秸秆还田交互作用对 SOC 含量的影响进行检验，且方差分析中平均值的多重比较采用 Duncan's Multiple-range Test 检验，图表均由 Microsoft Excel 2010 完成。

## 2 结果与分析

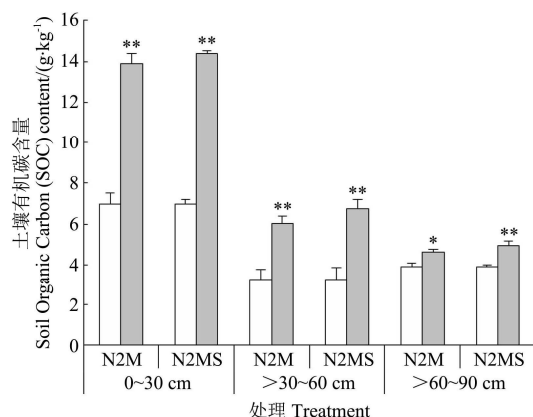
### 2.1 氮肥与有机肥配施条件下秸秆还田对土壤 SOC 含量的影响

经过 11 a 的番茄种植, 土壤 SOC 在 3 个土层都有所增加, 且随着土壤深度增加而降低。有机肥+优化氮肥条件下(图 1a), 相比于 2004 年, 2015 年表层(0~30 cm)土壤, N1M 和 N1MS 处理的 SOC 含量都增加显著( $P<0.01$ ), 分别为 53.3%和 64.2%; 在>30~60 cm 土层, N1M 和 N1MS 的 SOC 增加效果为 97.6%和 138.1%。对于 2015 年, 在 3 个土层中, 只有>30~60 cm 体现出秸秆还田的增碳效果, 其中 N1MS 的 SOC 含量比 N1M 显著提高 40.5% ( $P<0.05$ )。

施加有机肥+常规氮肥条件下(图 1b), 与 2004 年相比, 经过 11 a 番茄种植后各土层 SOC 含量都有不同程度的增加, 在 0~30 cm 土层, N2M 和 N2MS 处理土壤 SOC 含量增加显著( $P<0.01$ ), 分别增加 99.4%和 106.5%; 在>30~60 cm 土层与表层增幅相近, 分别增加 89.1%和 112.4%; >60~90 cm 土层增幅最低, N2MS 增加 27.1%, N2M 增加不显著。对于 2015 年, 在 3 个土层, 秸秆还田都没有体现出对 SOC 的增加效果。



a. 有机肥+优化氮肥  
a. Organic fertilizer + optimized N fertilization



b. 有机肥+常规氮肥  
b. Organic fertilizer + conventional N fertilization

注: & 表示 2015 年同一土壤层次下不同处理间的差异显著性 ( $P<0.05$ ); \* 和 \*\* 分别表示同一处理同一土层不同年份间的差异显著 ( $P<0.05$ )、差异极显著 ( $P<0.01$ )。下同。

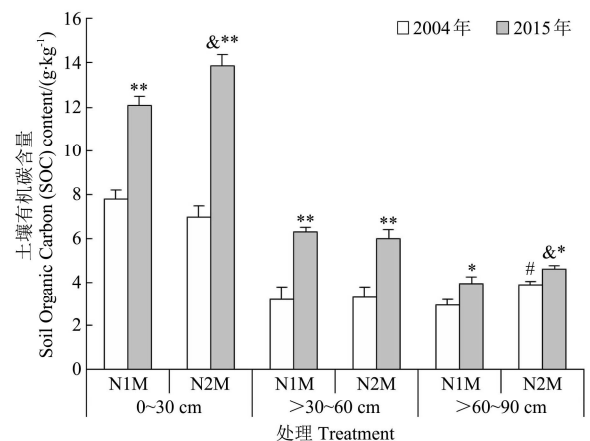
Note: & indicates the difference between different treatments under the same soil layer in 2015 is significant ( $P<0.05$ ); \* and \*\* indicate the difference between different years in the same soil layer in the same treatment are significant ( $P<0.05$ ) and highly significant ( $P<0.01$ ) respectively. The same below.

图 1 有无秸秆还田措施下土壤剖面有机碳含量

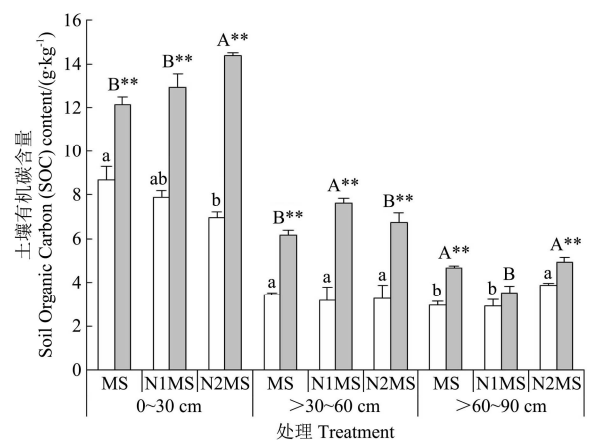
Fig.1 Organic carbon content in soil profile with or without straw returning measures

## 2.2 施用有机肥和有无秸秆还田下氮肥对土壤 SOC 含量的影响

在单施有机肥、秸秆不还田情况下(图 2a), 常规氮肥(N2)比优化氮肥(N1)显著增加 SOC 含量, 分别为 47.0% (0~30 cm) 和 17.3% (>60~90 cm), 但在 30~60 cm 土层 2 个氮肥水平相近。与试验开始前(2004 年)相比, 2015 年 SOC 都有显著增加(>60~90 cm 的 N2M 处理除外), 在 N1 条件下, 增加幅度分别为 53.3% (0~30 cm)、97.6% (>30~60 cm) 和 36.3% (>60~90 cm); 在 N2 条件下, 增加幅度分别为 99.4% (0~30 cm) 和 89.5% (>30~60 cm)。



a. 有机肥  
a. Organic fertilizer



b. 有机肥+秸秆还田条件  
b. Organic fertilizer + straw returning

注: 不同小写字母和#表示 2004 年同一土壤层次下不同处理间的差异达显著水平 ( $P<0.05$ ); 不同大写字母和&表示 2015 年同一土壤层次下不同处理间差异达显著水平 ( $P<0.05$ )。

Note: Different lowercase letters and # indicate significant level of difference between treatments at the same soil layer in 2004 ( $P<0.05$ ); different capital letters and & indicate significant level of difference between treatments at the same soil layer in 2015 ( $P<0.05$ ); indicates significant difference between different years at the same soil layer for the same treatment ( $P<0.05$ ).

图 2 不同施氮水平下土壤剖面有机碳含量

Fig.2 Organic carbon content in soil profile under different fertilizer N levels

在有机肥配合秸秆还田情况下(图 2b), 不同氮肥水平间, 不同土层 SOC 含量呈现不同规律: 在 0~30 cm, N2>N1>N0; 在>30~60 和>60~90 cm 土层, 都表现为 N2>N0, 但是 N1 在>30~60 cm 土层 SOC 含量显著高于 N2 和 N0, 在>60~90 cm 则显著低于 N2 和 N0。

与试验开始前（2004 年）相比，2015 年各处理 SOC 都有显著增加 ( $P<0.01$ )，在 0~30 cm 增加幅度为 39.9% (MS)、64.2% (N1MS) 和 106.5% (N2MS)，在下面的 2 个土层 SOC 增加幅度逐渐减小，>30~60 cm 为 78.6% (MS)、138.1% (N1MS) 和 112.4% (N2MS)，>60~90 cm 的增幅为 58.4% (MS)、21.6% (N1MS) 和 27.1% (N2MS)。

### 2.3 有机肥施用下氮肥和秸秆还田对土壤 SOC 含量的影响

氮肥和秸秆还田对各土层 SOC 含量的影响如表 3 所示。施氮量在 0~30 cm 和>60~90 cm 土层对 SOC 变化有显著影响，在>30~60 cm 土层影响不显著，而秸秆还田与施氮正好相反，只在>30~60 cm 土层对 SOC 变化有显著影响，可能是因为 0~30 cm 土层 SOC 达到潜在的

表 3 氮肥和秸秆还田措施对 SOC 含量的影响

Table 3 Effects of N fertilizer and straw returning on SOC

| 土层<br>Soil layer/cm | 管理措施<br>Management measures | 自由度 <i>f</i><br>Freedom | 均方<br>Mean square | <i>F</i> | <i>P</i> |
|---------------------|-----------------------------|-------------------------|-------------------|----------|----------|
| 0~30                | 秸秆还田                        | 1                       | 1.374             | 2.548    | 0.149    |
|                     | 氮肥量                         | 1                       | 19.457            | 36.086   | 0.000    |
|                     | 秸秆还田+氮肥量                    | 1                       | 0.097             | 0.180    | 0.682    |
| >30~60              | 秸秆还田                        | 1                       | 3.413             | 4.874    | 0.048    |
|                     | 氮肥量                         | 1                       | 0.801             | 1.143    | 0.361    |
|                     | 秸秆还田+氮肥量                    | 1                       | 0.154             | 0.220    | 0.651    |
| >60~90              | 秸秆还田                        | 1                       | 1.374             | 1.717    | 0.226    |
|                     | 氮肥量                         | 1                       | 7.426             | 9.283    | 0.016    |
|                     | 秸秆还田+氮肥量                    | 1                       | 0.097             | 0.121    | 0.736    |

表 4 2004 年与 2015 年山东寿光设施番茄不同施肥和秸秆还田措施下各层土壤 SOC 储量

Table 4 Soil SOC reserves of plastic-shed tomato in different layers under different fertilization and straw returning measures in Shouguang, Shandong Province in 2004 and 2015

| SOC 储量和固碳速率<br>SOC reserves and sequestration                         | 处理<br>Treatments | 0~30 cm     | >30~<br>60 cm | >60~<br>90 cm | 0~<br>90 cm   |
|-----------------------------------------------------------------------|------------------|-------------|---------------|---------------|---------------|
| 2004 年 SOC 储量<br>SOC reserves in 2004/(t·hm <sup>-2</sup> )           | CK               | 32.3±1.3b   | 21.3±0.3a     | 16.0±1.5ab    | 69.6±2.2a     |
|                                                                       | MS               | 37.0±2.68a  | 15.0±0.4b     | 13.1±0.9b     | 65.1±3.1a     |
|                                                                       | N1M              | 33.5±1.3b   | 13.9±2.5b     | 13.0±1.1b     | 60.4±4.9a     |
|                                                                       | N2M              | 29.7±1.0b   | 13.8±0.8b     | 17.3±0.4a     | 60.8±0.5a     |
|                                                                       | N1MS             | 33.5±1.3b   | 13.9±2.5b     | 13.0±1.1b     | 60.4±4.9a     |
|                                                                       | N2MS             | 29.7±1.0b   | 13.8±0.8b     | 17.3±0.4a     | 60.8±0.5a     |
| 2015 年 SOC 储量<br>SOC reserves in 2015/(t·hm <sup>-2</sup> )           | CK               | 44.5±0.5C** | 21.6±1.3C     | 17.1±1.6C     | 83.2±0.4D     |
|                                                                       | MS               | 52.5±1.7B** | 27.6±0.7B**   | 21.5±0.5AB**  | 101.7±2.7C**  |
|                                                                       | N1M              | 52.3±1.6B** | 27.4±0.5B**   | 18.3±1.7BC    | 98.0±2.6C**   |
|                                                                       | N2M              | 61.8±1.5A** | 27.9±1.7B**   | 20.8±0.4AB**  | 110.5±3.5AB** |
|                                                                       | N1MS             | 54.6±0.7B** | 33.3±0.6A**   | 16.0±0.3C     | 104.0±0.9BC** |
|                                                                       | N2MS             | 62.3±1.2A** | 31.0±2.7B**   | 22.2±1.1A*    | 115.5±3.1A**  |
| 固碳速率<br>SOC sequestration rate/(t·hm <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> ) | MS               | 0.30±0.18b  | 1.13±0.13b    | 0.67±0.10a    | 2.10±0.41b    |
|                                                                       | N1M              | 0.60±0.47b  | 1.21±0.19b    | 0.38±0.06b    | 2.18±0.72b    |
|                                                                       | N2M              | 1.81±0.18a  | 1.26±0.20ab   | 0.21±0.08b    | 3.28±0.46a    |
|                                                                       | N1MS             | 0.81±0.28b  | 1.74±0.20a    | 0.18±0.05b    | 2.73±0.53b    |
|                                                                       | N2MS             | 1.85±0.19a  | 1.54±0.10ab   | 0.35±0.05b    | 3.74±0.34a    |

注：固碳速率的计算方法是将各处理经过 11 a 的储量积累量  $\Delta\text{SOC}_{\text{积}}$ ，除以年份数（11 a）。不同小写字母表示 2004 年和固碳速率同一土壤层次下不同处理间的差异达显著水平 ( $P<0.05$ )；不同大写字母表示 2015 年同一土壤层次下不同处理间的差异达显著水平 ( $P<0.05$ )。

Note: The carbon sequestration rate was calculated by dividing the storage accumulation  $\Delta\text{SOC}_{\text{积}}$  of each treatment after 11 years by the number of years (11 years). Different lowercase letters indicate significant level of difference between treatments at the same soil layer in 2004 and carbon sequestration rate ( $P<0.05$ ); different capital letters indicate significant level of difference between treatments at the same soil layer in 2015 ( $P<0.05$ ).

### 2.5 氮肥和秸秆还田对有机物料碳转换效率 (CE) 的影响

根据 11 a 有机物料的投入量以及各个处理土壤 SOC

碳饱和，大量灌溉使 SOC 以颗粒物或溶解性有机质形态通过土壤空隙淋溶至下层。在 3 个土层中，秸秆还田和氮肥量交互作用不显著 ( $P>0.05$ )。

### 2.4 施肥和秸秆还田对土壤 SOC 储量和固碳速率的影响

2004 与 2015 年不同处理土壤容重差别都在 9.0% 以内，土壤 SOC 储量变化主要受 SOC 含量影响，因此，土壤 SOC 储量在 0~30、>30~60 以及>60~90 cm 土层与 SOC 含量变化规律类似。总的来看，在 0~90 cm 土层，2015 年 N2MS 的 SOC 储量最高为 115.5 t/hm<sup>2</sup>，N2M、N1MS、MS、N1M 次之，分别为 110.5、104.0、101.7、98.0 t/hm<sup>2</sup>，且均显著高于不施加有机肥 CK (表 4)。

对于 4 个施肥和秸秆还田处理的固碳速率 (即 11 a 试验期间每年的土壤 SOC 储量增加量)，在 0~30 cm 土层，常规氮肥处理 (N2MS 和 N2M) 固碳速率 (1.85 和 1.81 t/(hm<sup>2</sup>·a)) 显著高于优化氮肥处理 (N1MS 和 N1M)，前者分别是后者的 2.3 和 3 倍，而不施氮处理 (MS) 固碳速率只有 0.3 t/(hm<sup>2</sup>·a)；秸秆还田 (N1MS 和 N2MS) 相比于不还田 (N1M 和 N2M) 的固碳效率并未表现出明显差异。在>30~60 cm 土层，与 0~30 cm 土层相反，氮肥水平间无显著性差异，而秸秆还田 (N1MS) 有效提高了固碳速率，比不施加秸秆 (N1M) 提高了 43.8%。在>60~90 cm 土层，不施氮处理固碳速率显著高于施氮的 4 个处理 ( $P<0.05$ )。对于整个 0~90 cm 土层，常规氮肥 (N2MS 和 N2M) 的 SOC 固碳速率 (3.74 和 3.28 t/(hm<sup>2</sup>·a)) 比优化氮肥 (N1MS 和 N1M) 分别提高了 37.0% 和 50.5%。

储量的增加量，计算各个处理的有机物料 CE，结果如表 5 所示。在 0~30 cm 土层，常规氮肥比优化氮肥的有机物料 CE 要高，其中 N2M 比 N1M 高了 204.9%，N2MS

比 N1MS 高出 130.3%。不施加秸秆比秸秆还田的有机物料 CE 要高, 其中 N2M 处理有机物料 CE 比 N2MS 增加 79.4%。在研究的 5 个处理当中, 不施氮肥 MS 处理有机物料 CE 最低, 仅有 2.9%。0~90 cm 土层与 0~30 cm 土层规律相似, 常规氮肥处理的有机物料 CE 显著高于优化氮肥, 其中 N2M 比 N1M 高了 50.1%, N2MS 比 N1MS 高出 36.8%。秸秆不还田处理的 CE 均显著高于秸秆处理, N1M 比 N1MS 高 46.9%, N2M 比 N2MS 高 68.8%。

表 5 2004—2015 年不同处理间有机物料中的碳转化效率

Table 5 Carbon conversion efficiency in organic materials among different treatments from 2004 to 2015

| 处理<br>Treatments | 有机物料<br>碳输入<br>Organic<br>material<br>carbon<br>input/<br>(t·hm <sup>-2</sup> ) | 0~30 cm                                                                                             |                                         | 0~90 cm                                                                                             |                                     |
|------------------|---------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|
|                  |                                                                                 | SOC 储量<br>积累量<br>SOC reserve<br>accumulation<br>$\Delta$ SOC <sub>0/</sub><br>(t·hm <sup>-2</sup> ) | 有机<br>物料<br>Organic<br>material<br>CE/% | SOC 储量<br>积累量<br>SOC reserve<br>accumulation<br>$\Delta$ SOC <sub>0/</sub><br>(t·hm <sup>-2</sup> ) | 有机物料<br>Organic<br>material<br>CE/% |
| MS               | 116.0                                                                           | 3.3±1.98b                                                                                           | 2.9c                                    | 23.0±4.51b                                                                                          | 19.8c                               |
| N1M              | 63.4                                                                            | 6.5±5.17b                                                                                           | 10.3bc                                  | 24.0±7.92b                                                                                          | 37.9b                               |
| N2M              | 63.4                                                                            | 19.9±1.98a                                                                                          | 31.4a                                   | 36.1±5.06ab                                                                                         | 56.9a                               |
| N1MS             | 116.0                                                                           | 8.9±3.08b                                                                                           | 7.6c                                    | 30.0±5.83ab                                                                                         | 25.8c                               |
| N2MS             | 116.0                                                                           | 20.4±2.09a                                                                                          | 17.5b                                   | 41.1±3.74a                                                                                          | 35.3b                               |

### 3 讨 论

#### 3.1 氮肥和秸秆还田对土壤 SOC 的影响

土壤 SOC 输入和输出平衡决定了土壤 SOC 含量与储量的变化。针对农业管理, 要提高土壤 SOC 需要从增加植物残留量和根系分泌以及降低土壤 SOC 的矿化方面入手。研究发现, 施加氮肥可以提高土壤 SOC 含量<sup>[9, 11-12, 17]</sup>, 机理包括氮肥可以促进植物产量、残留物以及根系分泌物的增加<sup>[18]</sup>。Xu 等<sup>[19]</sup>研究表明, 氮的添加改变菜地土壤 C:N 不平衡, 增强了 SOC 的稳定性。本试验结果表明, 在高量有机肥下, 施加氮肥可以显著增加土壤 SOC 含量和储量, 且随着施氮量的增高而显著增加, 而 Ren 等<sup>[20]</sup>类似研究发现, 在施用有机肥的基础上, 不同施氮水平对 SOC 含量影响不显著, 与本研究结果相反。原因可能是本试验施加较高量的外源有机物料 (秸秆+有机肥), 在较高施氮水平条件下, 作物产量提高, 土壤微生物生长增加, 将外源有机物料转化成 SOC 的速率增加, 从而提高土壤有机碳含量。氮肥对 SOC 的影响, 受土壤碳氮含量和外源有机物料的影响, 一方面土壤碳氮之间相互影响<sup>[21]</sup>, 另一方面也会影响微生物对有机质的分解<sup>[22]</sup>。

秸秆还田是土壤 SOC 重要的投入来源, 还可以改变土壤含水量、孔隙度、温度等性质, 对有机肥、氮肥的分解和利用产生影响。邵洪峰等<sup>[23]</sup>指出, 秸秆还田可以提高总 SOC 量 (8.1%~26.8%), 其中可溶性有机碳增加 54.1%~69.4%, 这表明秸秆还田不仅可以有效增加 SOC 含量, 而且还可以改变土壤活性有机碳的组分含量。还有研究发现, 加入有机肥和秸秆还田后未观察到 SOC 含量显著增加<sup>[20]</sup>。本试验结果表明, 经过 11 a 的蔬菜种植, 在高量有机肥下, 秸秆还田可以提高土壤 SOC 含量和储量, 这与前人研究结果一致<sup>[12]</sup>。秸秆还田一方面作

为碳源直接增加 SOC, 增加土壤团聚体的稳定性<sup>[24]</sup>, 另一方面可以提高土壤肥力、降低土壤密度增加孔隙度, 并为作物提供适宜的生活条件, 增加作物产量和根系分泌, 而且还可以降低微生物对 SOC 的矿化作用<sup>[25]</sup>。

秸秆还田配施氮肥对提升土壤 SOC 有着正向交互作用<sup>[14, 17, 26]</sup>。汪军等<sup>[26]</sup>发现, 相同施氮条件下, 双季秸秆土壤 SOC 显著高于单季秸秆, 相同秸秆还田条件下, 不同施氮量间土壤 SOC 无显著差异, 而氮肥和秸秆的交互作用对 SOC 有显著影响。本研究发现, 氮肥和秸秆还田对 SOC 没有交互影响, 其原因可能是: 1) 前人对秸秆和氮肥的交互作用的研究都集中在粮田, 而本研究设施蔬菜生产过程中有机肥投入较高, 减弱秸秆和施肥的交互作用<sup>[12]</sup>。2) 本研究设施菜田所施加的秸秆和氮肥量普遍高于粮田, 有研究表明, 秸秆还田量过多会使秸秆对土壤有机质增加的效率降低<sup>[27]</sup>, 在秸秆还田下, 施用氮肥过量对提高 SOC 的作用效果不显著<sup>[27-28]</sup>。杨滨娟等<sup>[27]</sup>也指出, 秸秆还田下减施氮肥 15%反而可以增加 SOC 含量。韩笑<sup>[13]</sup>研究发现, 当施氮量大于 200 kg/(hm<sup>2</sup>·a) 时, 氮肥和秸秆还田的交互作用不显著。因此施氮量和秸秆还田量过高时 SOC 含量不一定会得到有效的提高, 交互作用就会不显著。

#### 3.2 氮肥和秸秆还田措施对固碳速率的影响

研究结果表明, 施氮肥和秸秆还田都可以促进土壤固碳, 且随着施氮量增高, 土壤固碳速率显著增高, 这与很多研究结果一致。王光翔<sup>[29]</sup>认为, 现代农业固碳速率均超过 510 kg/(hm<sup>2</sup>·a), 但当施氮量提高到 2 倍后, 土壤固碳速率反而会减少。Kong 等<sup>[30]</sup>在北京大兴田间试验研究发现, 20 a 间水浇田和望天田转变为菜地后, 耕层土壤的固碳速率分别为 0.47 和 0.53 t/(hm<sup>2</sup>·a)。前述对固碳速率的研究大多停留在耕层<sup>[30-31]</sup>, 有些研究认为土壤固碳主要体现在表层土壤, 对深层的影响较小, 这是由于试验期限较短造成的。本研究发现, 0~90 cm 土层各施氮和秸秆处理的土壤固碳速率 (2.18~3.74 t/(hm<sup>2</sup>·a)) 是耕层 (0~30 cm) 的 1.8~3.6 倍, 与刘杨等<sup>[32]</sup>研究结果相似。因此, 对于设施蔬菜等集约农业生产方式的土壤固碳速率, 应加强对深层土壤的研究, 否则会严重低估农业固碳能力。

#### 3.3 有机物料的碳转化效率

本研究表明, 秸秆还田虽然可以增加土壤 SOC 含量和储量, 但会降低有机物料的碳转化效率。造成此现象可能因为: 1) 在蔬菜番茄生产种植中施入了大量的有机肥, 土壤中 SOC 已经达到潜在的碳饱和<sup>[33]</sup>, 在高碳土壤中即使碳投入量增加到 2~3 倍, 土壤 SOC 也很少增加<sup>[34]</sup>。2) 秸秆还田量过高会降低秸秆腐解率<sup>[35]</sup>。3) 秸秆中含有大量的木质素, 木质素是三维网状高分子化合物, 具有很强的稳定性, 在土壤中不易被降解<sup>[36]</sup>, 相比已发酵的有机肥来说, 秸秆分解转化成 SOC 需要更长的时间和更适宜的环境。本研究还发现, 施用氮肥有利于提高有机物料转换为土壤 SOC 的效率, 且随着氮肥量的增加, 有机物料的碳转化效率明显提高, 这与 Sun 等<sup>[37]</sup>

研究结果一致, 其结果表明高、低氮肥对秸秆腐解的促进程度分别为 15.8% 和 7.9%。

## 4 结 论

设施蔬菜生产中, 高量施用氮肥、有机肥和秸秆还田的情况下, 11 a 间土壤 SOC 储量有大幅度增加, 其中高量氮肥+秸秆还田+有机肥 (N2MS) 的土壤固碳速率在 0~30 和 0~90 cm 分别为 1.85 和 3.74 t/(hm<sup>2</sup>·a), 说明不考虑深层土壤会大大低估集约农业生产方式下土壤固碳速率, 因此不能忽视深层土壤的固碳。施用氮肥有利于提高有机物料转换为土壤 SOC 的效率, 且随着氮肥量的增加, 有机物料的碳转化效率明显提高。然而, 设施蔬菜生产中, 由于有机肥投入水平较高, 秸秆还田转化为土壤有机碳的效率反而降低, 秸秆还田和氮肥之间并显现出对土壤有机碳的正交互作用。因此, 如何优化当前我国集约设施蔬菜生产的肥料和秸秆投入, 在增加土壤碳库同时, 增加秸秆等资源转换利用效率, 是需要进一步完善的议题。

### [参 考 文 献]

- [1] 李俊峰, 李广. 碳中和——中国发展转型的机遇与挑战[J]. 环境与可持续发展, 2021, 46(1): 50-57.  
Li Junfeng, Li Guang. Carbon neutrality: Opportunities and challenges for China's development and transformation[J]. Environment and Sustainable Development, 2021, 46(1): 50-57. (in Chinese with English abstract)
- [2] 陈林, 万攀兵. 《京都议定书》及其清洁发展机制的减排效应——基于中国参与全球环境治理微观项目数据的分析[J]. 经济研究, 2019, 54(3): 55-71.  
Chen Lin, Wan Panbing. Emission reduction effects of the Kyoto Protocol and its Clean Development Mechanism (CDM): Analysis based on data from China's participation in global environmental governance micro-projects[J]. Economic Research Journal, 2019, 54(3): 55-71. (in Chinese with English abstract)
- [3] Lal R. Carbon management in agricultural soils[J]. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 2007, 12(2): 303-322.
- [4] 蔡育蓉, 王立刚. 北方典型农业生态系统的固碳减排路径及模式[J]. 中国生态农业学报, 2022, 30(4): 641-650.  
Cai Yurong, Wang Ligang. Carbon sequestration and emission reduction paths and models of typical agricultural ecosystems in northern China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2022, 30(4): 641-650. (in Chinese with English abstract)
- [5] 黄得志, 任晓燕, 吴明丽, 等. 设施栽培对土壤环境质量的影响[J]. 甘肃农业大学学报, 2011, 46(3): 70-73.  
Huang Dezhi, Ren Xiaoyan, Wu Mingli, et al. Effect of plastic-shed cultivation on soil environmental quality[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2011, 46(3): 70-73. (in Chinese with English abstract)
- [6] 张宏威, 康凌云, 梁斌, 等. 长期大量施肥增加设施菜田土壤可溶性有机氮淋溶风险[J]. 农业工程学报, 2013, 29(21): 99-107.  
Zhang Hongwei, Kang Lingyun, Liang Bin. Long term large-scale fertilization increases the risk of soil soluble organic nitrogen leaching in plastic-shed vegetable fields[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(21): 99-107. (in Chinese with English abstract)
- [7] 金家铭, 刘晓宇, 陈寅. 设施蔬菜种植对土壤有机碳的影响研究[J]. 智慧农业导刊, 2022, 2(3): 18-20.  
Jin Jiaming, Liu Xiaoyu, Chen Yin. Effects of plastic-shed vegetable planting on soil organic carbon[J]. Journal of Smart Agriculture, 2022, 2(3): 18-20. (in Chinese with English abstract)
- [8] Yan Y, Tian J, Fan M, et al. Soil organic carbon and total nitrogen in intensively managed arable soils [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2012, 150: 102-110.
- [9] 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 plastic-shed vegetable production system[J]. Soil and Tillage Research, 2019, 191: 185-196.
- [10] 魏小波, 何文清, 黎晓峰, 等. 农田土壤有机碳固定机制及其影响因子研究进展[J]. 中国农业气象, 2010, 31(4): 487-494.  
Wei Xiaobo, He Wenqing, Li Xiaofeng, et al. Research progress on fixation mechanism and influencing factors of farmland soil organic carbon[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2010, 31(4): 487-494. (in Chinese with English abstract)
- [11] 温延臣. 不同施肥制度潮土养分库容特征及环境效应[D]. 北京: 中国农业科学院, 2016.  
Wen Yanchen. Characteristics of Nutrient Storage Capacity and Environmental Effects of Different Fertilization Systems in Fluvo Aquic Soil[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2016. (in Chinese with English abstract)
- [12] 赵诣. 农业管理措施对不同生产体系土壤碳库的影响[D]. 北京: 中国农业大学, 2020.  
Zhao Yi. Effects of Agricultural Management Measures on Soil Carbon Pools in Different Production Systems[D]. Beijing: China Agricultural University, 2020. (in Chinese with English abstract)
- [13] 韩笑. 农田管理措施对土壤碳库和温室气体排放的影响 [D]. 北京: 中国农业大学, 2018.  
Han Xiao. Effects of Farmland Management Measures on Soil Carbon Pool and Greenhouse Gas Emissions[D]. Beijing: China Agricultural University, 2020. (in Chinese with English abstract)
- [14] Meng F, Dungait J A J, Xu X, et al. Coupled incorporation of maize (*Zea mays* L.) straw with nitrogen fertilizer increased soil organic carbon in Fluvic Cambisol[J]. Geoderma, 2017, 304: 19-27.
- [15] Bughio M A, Wang P L, Meng F Q, et al. Neoformation of pedogenic carbonates by irrigation and fertilization and their contribution to carbon sequestration in soil[J]. Geoderma, 2016, 262: 12-19.
- [16] 王大鹏, 吴小平, 罗雪华, 等. 海南植胶区土壤有机碳储量的估算[J]. 热带农业科学, 2016, 36(10): 1-5.  
Wang Dapeng, Wu Xiaoping, Luo Xuehua, et al. Estimation of soil organic carbon storage in Hainan rubber planting area[J]. Chinese Journal of Tropical Agriculture, 2016, 36(10): 1-5. (in Chinese with English abstract)

- [17] 雷宝坤, 陈清, 范明生, 等. 寿光设施菜田碳、氮演变及其对土壤性质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2008(5): 914-922.  
Lei Baokun, Chen Qing, Fan Mingsheng, et al. Evolution of carbon and nitrogen in Shouguang protected vegetable field and its effect on soil properties[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2008(5): 914-922. (in Chinese with English abstract)
- [18] Neff J C, Townsend A R, Gleixner G. Variable effects of nitrogen additions on the stability and turnover of soil carbon[J]. Nature, 2002, 419(6910): 915-917.
- [19] Xu X, Zhang Q, Song M, et al. Soil organic carbon decomposition responding to warming under nitrogen addition across Chinese vegetable soils[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2022, 242: 113932.
- [20] Ren T, Wang J G, Chen Q. Is the heavy supply of manure adequate to stabilize soil organic matter in greenhouse vegetable planting system[J]. Acta Horticulturae, 2014, 1018: 167-174.
- [21] Smith C J, Hunt J R, Wang E, et al. Using fertiliser to maintain soil inorganic nitrogen can increase dryland wheat yield with little environmental cost[J]. Agriculture Ecosystems and Environment, 2019, 286: 106610-106644.
- [22] Al-Kaisi M M, Yin X, Licht M A. Soil carbon and nitrogen changes as influenced by tillage and cropping systems in some Iowa soils[J]. Agriculture Ecosystems and Environment, 2005, 105(4): 635-647.
- [23] 邵洪峰, 梅洪飞, 潘忠潮, 等. 玉米秸秆还田对土壤有机碳、微生物功能多样性及甘蓝产量的影响[J]. 浙江农业学报, 2016, 28(5): 838-842.  
Shao Yangfeng, Mei Hongfei, Pan Zhongchao, et al. Effects of returning corn straw to the field on soil organic carbon, microbial functional diversity and cabbage yield[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2016, 28(5): 838-842. (in Chinese with English abstract)
- [24] 黄璐, 赵国慧, 李廷亮, 等. 秸秆还田对黄土旱塬麦田土壤团聚体有机碳组分的影响[J]. 农业工程学报, 2022, 38(13): 123-132.  
Huang Lu, Zhao Guohui, Li Tingliang, et al. Effects of straw returning on the organic carbon components of soil aggregates in wheat fields on the loess plateau[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(13): 123-132. (in Chinese with English abstract)
- [25] 段燕, 夏雨龙, 卢恩佳, 等. 秸秆还田对土壤有机碳积累影响的研究进展[J]. 农业技术与装备, 2021(7): 65-67.  
Duan Yan, Xia Yulong, Lu Enjia, et al. Research progress on the effect of straw returning on soil organic carbon accumulation[J]. Agricultural Technology & Equipment, 2021(7): 65-67. (in Chinese with English abstract)
- [26] 汪军, 王德建, 张刚, 等. 连续全量秸秆还田与氮肥用量对农田土壤养分的影响[J]. 水土保持学报, 2010, 24(5): 40-44, 62.  
Wang Jun, Wang Dejian, Zhang Gang, et al. Effects of continuous total straw returning and nitrogen fertilizer application on soil nutrients in farmland[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010, 24(5): 40-44, 62. (in Chinese with English abstract)
- [27] 杨滨娟, 黄国勤, 徐宁, 等. 秸秆还田配施不同比例化肥对晚稻产量及土壤养分的影响[J]. 生态学报, 2014, 34(13): 3779-3787.  
Yang Bingjuan, Huang Guoqin, Xu Ning, et al. Effects of straw returning and different proportions of chemical fertilizers on late rice yield and soil nutrients[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(13): 3779-3787. (in Chinese with English abstract)
- [28] 王学敏, 刘兴, 郝丽英, 等. 秸秆还田结合氮肥减施对玉米产量和土壤性质的影响[J]. 生态学杂志, 2020, 39(2): 507-516.  
Wang Xuemin, Liu Xing, Hao Liying, et al. Effect of straw return combined with N fertilizer reduction on maize yield and soil properties[J]. Chinese Journal of Ecology, 2020, 39(2): 507-516. (in Chinese with English abstract)
- [29] 王光翔. 基于 1:5 万土壤数据库的农业管理措施改变对苏北旱地有机碳影响研究[D]. 福建: 福建农林大学, 2016.  
Wang Guangxiang. Study on The Impact of Changes in Agricultural Management Measures Based on 1:50000 Soil Database on Organic Carbon in Drylands in Northern Jiangsu[D]. Fujian: Fujian Agriculture and Forestry University, 2016. (in Chinese with English abstract)
- [30] Kong X B, Zhang F R, Wei Q, et al. Influence of land use change on soil nutrients in an intensive agricultural region of North China[J]. Soil and Tillage Research, 2006, 88(1/2): 85-94.
- [31] Ussiri D A N, Lal R. Long-term tillage effects on soil carbon storage and carbon dioxide emissions in continuous corn cropping system from an alfisol in Ohio[J]. Soil and Tillage Research, 2009, 104(1): 39-47.
- [32] 刘杨, 于东升, 史学正, 等. 不同蔬菜种植方式对土壤固碳速率的影响[J]. 生态学报, 2012, 32(9): 2953-2959.  
Liu Yang, Yu Dongsheng, Shi Xuezheng, et al. Effects of different vegetable planting methods on soil carbon sequestration rate[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(9): 2953-2959. (in Chinese with English abstract)
- [33] Jensen J L, Schjønning P, Watts C W, et al. Relating soil C and organicmatter fractions to soil structural stability[J]. Geoderma, 2019, 337: 834-843.
- [34] Campbell C A, Zentner R P, Bowren K E, et al. Effect of crop rotations and fertilization on soil biochemical properties in a thick Black Chernozem[J]. Canadian Journal of Soil Science. 1991, 71: 377-387.
- [35] 徐国伟, 翟志华, 杨久军, 等. 秸秆还田量对直播稻苗期生长和土壤的影响[J]. 广东农业科学, 2015, 42(19): 1-7.  
Xu Guowei, Zhai Zhihua, Yang Jiujun, et al. Effects of straw returning amount on the growth and soil of direct seeding rice at seedling stage[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2015, 42(19): 1-7. (in Chinese with English abstract)
- [36] 中国科学院武汉植物园. 武汉植物园在森林植被凋落物中木质素的降解研究取得进展[J]. 高科技与产业化, 2019(8): 69.  
Wuhan Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences. Wuhan Botanical Garden has made progress in the degradation of lignin in forest vegetation litter[J]. High-Technology & Commercialization, 2019(8): 69. (in Chinese with English abstract)
- [37] 孙昭安, 张轩, 胡正江, 等. 秸秆与氮肥对比对农田土壤内外源碳释放的影响[J]. 环境科学, 2021, 42(1): 459-466.  
Sun Zhaoan, Zhang Xuan, Hu Zhengjiang, et al. How



different ratios of straw incorporation to nitrogen fertilization  
influence endogenous and exogenous carbon release from

agricultural soils[J]. *Environmental Science*, 2021, 42(1):  
459-466. (in Chinese with English abstract)

## Effects of long-term fertilization and straw returning on soil organic carbon in plastic-shed vegetable production

Xue Xujie<sup>1</sup>, Kang Xiaohan<sup>1</sup>, Shi Xiaoxia<sup>1</sup>, Zhao Yi<sup>2</sup>, Meng Fanqiao<sup>1\*</sup>

(1. College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China;

2. College of Chemistry and Environmental Engineering, Liaoning University of Technology, Jinzhou 121001, China)

**Abstract:** China has a vast acreage of cropland for plastic-shed vegetable production, in which carbon sequestration and greenhouse gas emission reduction achieved via various optimized farming practices are of great significance to the green agricultural development of the nation and of the world. In order to clarify the effects of fertilizer application and straw returning on soil organic carbon (SOC) in plastic-shed vegetable production in northern China, a long-term field experiment initiated in 2004 was conducted in Shouguang plastic-shed vegetable base. In this experiment, 6 treatments were set up to study the change rule of soil organic carbon under different fertilization and straw returning measures by measuring and analyzing soil organic carbon content, storage, carbon conversion efficiency of organic materials, and carbon fixation rate of organic matter. The treatment included control (CK), organic fertilizer + straw return (MS), organic fertilizer + optimized nitrogen (N) fertilization (N1M), organic fertilizer + conventional N fertilization (N2M), organic fertilizer + optimized N fertilization combined with straw return (N1MS), and organic fertilizer + conventional N fertilization combined with straw return (N2MS). The SOC contents and stocks at 0-30, >30-60, and >60-90 cm layers for pre- and post-experiment were monitored. The results showed that N1MS treatment could significantly increase soil organic carbon content in 30~60 cm soil layer ( $P<0.05$ ), which was 40.5% higher than that of N1M treatment, while under N2M treatment, the effect of straw returning on SOC increasing was not significant. N2M treatment significantly increased the soil organic carbon content by 47.0% for 0-30 cm and 17.3% for >60-90 cm layers, compared with that of optimized N fertilization (N1M). With the application of organic fertilization and straw returning, SOC contents in the 0-30 cm layer increased with the increase of N fertilization application, and the increase of SOC content was at the order of N2MS (106.5%) > N1MS (64.2%) > MS (39.9%). In the 0-90 cm soil layer, the highest SOC stock was 115.5 t/hm<sup>2</sup> for N2MS in 2015, followed by 110.5, 104.0, 101.7, and 98.0 t/hm<sup>2</sup> for N2M, N1MS, MS, and N1M treatments, respectively, and all were significantly higher than those without organic fertilizer (CK). the SOC sequestration rate of N2MS in 0-30 and 0-90 cm layers was 1.85 and 3.74 t/(hm<sup>2</sup>·a) respectively, which indicated that for intensive cropping like plastic-shed vegetable production, deep-soil carbon stock should be accounted for national carbon quantification. In the 0-30 cm soil layer, the organic material carbon conversion efficiency of the scenario of conventional N fertilization was significantly higher than that of optimized N fertilization, in which N2M was 204.9% higher than that of N1M and N2MS was 130.3% higher than that of N1MS, which indicated the increase of N fertilization rate was helpful to improve the conversion efficiency of organic materials to SOC. In the 0-30 cm soil layer, the carbon conversion efficiency of organic material in N1M treatment was 35.5% higher than that in N1MS, and in N2M it was 79.4% higher than that in N2MS. In plastic-shed vegetable production, straw returning reduced the conversion efficiency of organic matter to organic carbon, and fertilizer nitrogen and straw returning have no positive interaction on organic carbon accumulation, due to the high level of organic fertilizer. In China, the carbon sequestration efficiency and carbon conversion efficiency of organic fertilizer and straw in plastic-shed vegetable production should be further improved by optimizing chemical and organic fertilizer inputs.

**Keywords:** soils; organic carbon; straw; plastic-shed vegetable; nitrogen fertilizer; deep-soil; conversion efficiency of organic materials