

doi:10.3969/j.issn.1000-6362.2021.01.001

高奇奇,张玮,马立晓,等.采样深度和计算方法影响保护性耕作土壤碳氮储量的评估结果[J].中国农业气象,2021,42(1):1-12

# 采样深度和计算方法影响保护性耕作土壤碳氮储量的评估结果\*

高奇奇<sup>1</sup>, 张 玮<sup>2</sup>, 马立晓<sup>1</sup>, 任图生<sup>2</sup>, 张爱平<sup>1</sup>, 李贵春<sup>1</sup>, 胡正江<sup>3</sup>, 杜章留<sup>1,4\*\*</sup>

(1. 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081; 2. 中国农业大学土地科学与技术学院 北京 100193; 3. 中国农业大学桓台实验站, 山东桓台 256400; 4. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193)

**摘要:** 为探讨不同年限耕作措施下土壤有机碳 (SOC) 和全氮 (TN) 在土壤剖面中的分布和累积特征, 了解采样深度和计算方法对 SOC 和 TN 储量评估结果的影响, 基于山东桓台 (5a) 和河北栾城 (17a) 耕作定位试验, 设置翻耕 (CT)、旋耕 (RT) 和免耕 (NT) 三个处理 (秸秆均还田), 分析土壤剖面中 (桓台 60cm; 栾城 50cm) 土壤容重 ( $\rho_b$ )、SOC 和 TN 浓度的分布特征, 并比较不同土层深度下“固定深度法 (FD)”和“等效重量法 (ESM)”所计算 SOC 和 TN 储量的差异。结果表明, 连续多年保护性耕作后, NT 处理较 CT 促进了 SOC 和 TN 储量在表层积累, 增加了 SOC 和 TN 浓度的层化比率 (SR) 值。在山东桓台试验点, NT 处理较 CT 显著增加了 0–5cm 土层 SOC 和 TN 储量 ( $P < 0.05$ ), 增幅分别为 29% 和 30%, 而整个土壤剖面 (0–60cm) 的碳氮储量分别降低 8% 和 10%。河北栾城试验点, 0–10cm 土层 NT 和 RT 处理较 CT 分别增加 SOC 储量 10% 和 14%, 但在  $\geq 20$ cm 剖面中不同耕作处理之间的碳氮储量无显著差异。由于各处理之间  $\rho_b$  的差异, 传统 FD 法高估了山东桓台免耕处理 SOC 和 TN 储量, 但低估了河北栾城碳氮储量。因此, 为准确评估不同耕作措施下土壤碳氮固持效应, 推荐在“深层采样” ( $\geq 30$ cm) 策略基础上, 利用 ESM 法计算其储量。保护性耕作对改善土壤质量有积极作用, 但其通过土壤碳截留以缓解气候变化的潜力不应该被高估。

**关键词:** 保护性耕作; 土壤有机碳; 全氮; 固定深度法; 等效重量法

## Estimation of Soil Organic Carbon and Total Nitrogen Storages under Conservation Tillage as Influenced by Sampling Depths and Calculation Methods

GAO Qi-qi<sup>1</sup>, ZHANG Wei<sup>2</sup>, MA Li-xiao<sup>1</sup>, REN Tu-sheng<sup>2</sup>, ZHANG Ai-ping<sup>1</sup>, LI Gui-chun<sup>1</sup>, HU Zheng-jiang<sup>3</sup>, DU Zhang-liu<sup>1,4</sup>

(1. Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 2. College of Land Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100193; 3. Huantai Agroecosystem Experimental Station of China Agricultural University, Huantai, Shandong 256400; 4. College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193)

**Abstract:** The objectives of this study were to investigate the profile distribution and accumulation characteristics of soil organic carbon (SOC) and total nitrogen (TN) under different tillage treatments, and further to compare the effects of sampling depths and calculation methods on the evaluation of SOC and TN storages. Two field experiments were established at the Shandong Huantai (5 years) and Hebei Luancheng (17 years) sites. The experiments included three tillage treatments (with residue): conventional tillage (CT), rotary tillage (RT) and

\* 收稿日期: 2020-08-06

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (41671305)

\*\* 通讯作者: 杜章留, 研究员, 研究方向为土壤有机质稳定过程及其调控, 生物炭农用效应与作用机理, E-mail: duzlsd@163.com

第一作者联系方式: 高奇奇, E-mail: gaoqiqi06@163.com

no-tillage (NT). Soil samples were collected down to 60 and 50cm depths at Huantai and Luancheng site respectively. Soil bulk density ( $\rho_b$ ) and the distribution of SOC and TN concentrations were determined. The SOC and TN storages were calculated by the fixed depth (FD) and equivalent soil mass (ESM) methods. The results showed that soil depth significantly affected the soil  $\rho_b$ , the concentrations and storages of SOC and TN ( $P < 0.001$ ). Compared with CT, NT enhanced SOC and TN storages in the top layer, and increased the stratification ratio (SR) of SOC and TN concentrations, though the SR value of SOC at Luancheng site was not significant. RT (cf. CT) increased the storages of SOC and TN in the top layer and the SR value of TN concentration at the Luancheng site. Specifically, at the Huantai site, the SOC and TN storages under NT were 29% and 30% higher than that of CT in the 0–5cm soil layer ( $P < 0.05$ ), but were 8% and 10% lower in the 0–60cm soil profile. At the Luancheng site, the SOC storage in the NT and RT was higher by 10% and 14% than CT; but there was no significant differences in SOC and TN storages between tillage treatments in the deeper profiles (i.e.,  $\geq 20$ cm). Due to the varied soil  $\rho_b$  between the treatments in the surface layer, the FD method overestimated the SOC and TN storages in the NT soil at the Huantai site, but underestimated them at the Luancheng site. Therefore, to accurately assess the SOC sequestration induced by tillage conversion, the ESM instead of FD method was recommended to calculate SOC storages together with the "deeper sampling" strategy ( $\geq 30$ cm). Our study implicates that although conservation tillage has positive effect on soil quality, the potential for mitigating climate change through SOC sequestration should not be overestimated.

**Key words:** Conservation tillage; Soil organic carbon; Total nitrogen; Fixed depth; Equivalent soil mass

近年来, 以少免耕为代表的保护性耕作由于能够改善土壤理化特性 (如土壤结构、保水性能), 减少土壤侵蚀和燃料能源投入, 维持或提高作物产量等优点, 被视为增加土壤有机碳 (SOC) 截留和缓解气候变化的环境友好型农业措施<sup>[1–5]</sup>。据估计, 全球范围内土壤固碳潜力每年为 4 亿~12 亿 t 碳, 而实施保护性耕作后土壤固碳速率为  $100 \sim 1000 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ <sup>[6]</sup>。然而, 保护性耕作措施下土壤碳增汇效应具有较大不确定性, 尤其是学者更为关注的所固持碳库的长期属性尚不明确<sup>[7–10]</sup>。值得指出的是, 长期免耕由于秸秆在地表积累和扰动较少, 导致土壤有机质 (SOM) 及其它理化特性 (如容重、磷钾等养分) 呈分层现象, 可用层化比率 (stratification ratio, SR) 来表征<sup>[11]</sup>。系列研究表明, SR 与 SOC 固持密切相关并可作为评价土壤质量的指标<sup>[11–13]</sup>。鉴于不同耕作措施下层化特征的差异性, 传统表层采样和基于固定深度的碳库计算方法可能会对其固碳效果评估产生偏差, 甚至得到错误结论<sup>[8, 10, 14–15]</sup>。因此, 准确评估保护性耕作措施下剖面土壤碳氮分布特征和储量, 对阐释其固碳效应及其它生态服务功能具有重要意义。

大多研究认为, 长期免耕改变了 SOC 库的分布格局, 即表层增加而下层降低, 对整个剖面碳库储

量的影响变异较大<sup>[16–18]</sup>, 并与气候条件、土壤类型、初始有机碳水平、种植制度、试验时间和秸秆管理等因素有关<sup>[5, 9, 15, 19–21]</sup>。Du 等<sup>[15]</sup>在区域尺度上 (57 个试验点) 分析了中国免耕土壤固碳效应及影响因素, 发现长期免耕 SOC 在表层 (0–20cm) 增加, 深层 (30–40cm) 降低, 而在整个土壤剖面 (平均深度为 37.4cm) 较翻耕的固碳效应仅增加 3.8%。Li 等<sup>[22]</sup>在全球尺度上 (243 个试验点) 也发现, 实施保护性耕作并采用秸秆还田能显著增加表层 (0–30cm) 碳储量 (增幅为 27%~29%)。同时, Mondal 等<sup>[20]</sup>分析了全球尺度上 (522 个试验点) 免耕对土壤物理环境 (如容重、田间持水量等) 和 SOC 的影响, 发现免耕仅有利于表层 ( $< 10$ cm) SOC 积累。总之, 现有研究大多集中在表层土, 而忽视了深层土壤碳氮对耕作措施的响应。此外, 不同的计算方法也可能影响碳氮储量及不同管理措施间的差异性<sup>[7, 15]</sup>。基于“固定深度” (Fixed-depth, FD) 的传统计算土壤碳储量的方法, 忽视了转变管理方式后土壤容重差异所引起的土壤重量变化, 会导致碳储量计算结果产生一定偏差<sup>[15, 23]</sup>; 而“等效重量法” (Equivalent soil mass, ESM) 则考虑了不同处理之间土壤容重的变异性, 通过将特定土层中单位面积的土壤重量标准化来精确量化 SOC 储量<sup>[23–24]</sup>。已有研究显示, 不同计算方

法影响管理措施转变后(如耕作、土地利用方式、有机肥等)土壤碳氮储量变化,推荐采用ESM法可以有效消除这种偏差<sup>[7, 12, 15, 23, 25-26]</sup>。综上所述,为客观评估不同耕作措施下土壤碳氮固持效应,应综合考虑浅层采样法和土壤容重变异所导致的计算误差。

本研究在“深层采样”基础上,结合“等效重量法”,评估传统耕作转为保护性耕作后土壤剖面SOC和TN的分布及积累特征。利用两个耕作定位试验,比较不同耕作措施下剖面SOC和TN层化比率及其储量的差异性,以期揭示华北地区实施保护性耕作后土壤碳氮剖面分布和积累特征,阐释不同采样深度和计算方法对土壤碳氮储量评估结果的影响。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

研究在华北平原两个试验点开展。(1) 中国农业大学桓台实验站(36°54'N, 117°50'E),位于山东省桓台县。该地区属暖温带大陆性季风气候,年平均气温为11.8~12.9℃,多年平均降水量542.8mm,降水相对集中在6~9月。作物种植方式为冬小麦/夏玉米一年两熟制。土壤质地为砂壤土,砂粒、粉粒和黏粒含量分别为73.5%、12.5%和14.0%。(2) 中国科学院栾城农业生态系统实验站(37°50'N, 114°40'E),位于河北省石家庄市栾城区。该地区属于暖温带半湿润季风气候,年平均气温为12.5℃,年平均降水量为536mm。主要种植制度为冬小麦/夏玉米一年两熟制。土壤质地为粉壤土,砂粒、粉粒和黏粒含量分别为13.8%、66.3%和19.9%。

### 1.2 试验处理设置

山东桓台和河北栾城站均为冬小麦-夏玉米轮作模式,长期进行保护性耕作试验。山东桓台的耕作试验始于2007年10月冬小麦种植季节。试验采取裂区设计,主区为耕作方式,包括翻耕(CT)、旋耕(RT)和免耕(NT),裂区选择玉米秸秆粉碎还田模式。小区面积为72m<sup>2</sup>(6.0m×12m),每处理3次重复。河北栾城试验开始于2001年冬小麦种植季节。选择翻耕+玉米秸秆粉碎还田(CT)、旋耕+玉米秸秆粉碎还田(RT)和免耕+玉米秸秆直立还田(NT)3个处理,每处理3次重复。小区面积为1120m<sup>2</sup>(16m×25m)。两试验地有关处理的操作方式并不完全相同,详细信息参阅文献[27]。

### 1.3 样品采集和测定

#### 1.3.1 采样深度和容重测定

山东桓台试验站土样于2012年10月(5a定位试验)初玉米收获后采集,分7个土层即0-5、5-10、10-20、20-30、30-40、40-50和50-60cm取样;河北栾城试验站土样于2017年6月(17a定位试验)小麦收获后采集,分4个土层即0-10、10-20、20-30和30-50cm取样。用土壤容重采样器(内置环刀高5cm,直径5cm)在每个重复(小区)和每个土层采集3个有代表性的原状土样,每个处理下每个土层共9个样品。将样品先称湿重,然后取部分土样在105℃下烘干12h后,用天平(精度0.1mg)测定土样含水量,土壤容重( $\rho_b$ )通过计算单位体积中的烘干土壤重量获得<sup>[28]</sup>。每个重复下的其余土样混合,过2mm土筛后风干,用于土壤碳氮浓度的测定。

#### 1.3.2 土壤有机碳和全氮浓度的测定

土壤有机碳(SOC)和全氮(TN)浓度用CNS分析仪测定(Vario Max CNS, Elementar)<sup>[29]</sup>。由于两个试验地的土样均为碱性(pH值为8.5左右),测定之前需除去土样中碳酸盐。方法为将5g待测土样置于离心管,加入70mL浓度为0.5mol·L<sup>-1</sup>的盐酸,振荡器(150rpm)震荡24h以去除CaCO<sub>3</sub>。在3500rpm离心机中离心5min,去除上清液,继续加入去离子水,并离心。重复3~4次,用pH试纸检验,去离子水冲洗至中性,表明盐酸已去除干净;土样在105℃下烘干,研磨过0.25mm土筛后上机测定。

### 1.4 计算方法

#### 1.4.1 土壤碳氮浓度的层化比率

土壤碳氮浓度层化比率(Stratification ratio, SR)用来反映土壤剖面层与层之间SOC和TN分布的差异特征,以最上层与最下层SOC和TN浓度之比来表示。其中,山东桓台土样的SR值为0-5cm与50-60cm土层中碳氮浓度的比值,河北栾城土样中SR值为0-10cm与30-50cm土层中碳氮浓度的比值。

#### 1.4.2 土壤碳氮储量

采用两种方法即固定深度法(FD)和等效重量法(ESM)分别计算土壤剖面中SOC和TN的储量<sup>[23-24]</sup>。ESM法校正了不同处理之间在特定土层由于土壤容重差异而造成的土壤重量不一致性,具体计算步骤为

(1) 利用各层土壤厚度和容重计算某特定深度土层的土壤重量,即

$$M_{\text{soil}} = \sum_{i=1}^n (\rho_b \cdot d_i) \times 100 \quad (1)$$

式中,  $M_{\text{soil}}$  为单位面积土壤重量 ( $\text{Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ),  $\rho_b$  为土壤容重 ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ),  $d_i$  为土层厚度 ( $\text{cm}$ ),  $n$  为特定深度土层中划分的层数, 100 为单位转换系数。

(2) 选取特定深度中最轻土壤重量为参考质重 ( $M_{\text{ref}}$ ), 多余土壤重量 ( $M_{\text{ex}}$ ) 为

$$M_{\text{ex}} = M_{\text{soil}} - M_{\text{ref}} \quad (2)$$

(3) 基于“固定深度法”的储量计算式为

$$\text{SOC}_{\text{FD}} = \sum_{i=1}^n (\rho_b \cdot C_{\text{SOC}} \cdot d_i) \times 0.1 \quad (3)$$

$$\text{TN}_{\text{FD}} = \sum_{i=1}^n (\rho_b \cdot C_{\text{TN}} \cdot d_i) \times 0.1 \quad (4)$$

式中,  $\text{SOC}_{\text{FD}}$  和  $\text{TN}_{\text{FD}}$  分别为 SOC 和 TN 的固定深度储量 ( $\text{Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ),  $C_{\text{SOC}}$  和  $C_{\text{TN}}$  分别为 SOC 和 TN 浓度 ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ), 0.1 为转换系数。

因此, 基于“等效重量法”的储量为

$$\text{SOC}_{\text{ESM}} = \text{SOC}_{\text{FD}} - M_{\text{ex}} \cdot C_{\text{sn}} / 1000 \quad (5)$$

$$\text{TN}_{\text{ESM}} = \text{TN}_{\text{FD}} - M_{\text{ex}} \cdot C_{\text{sn}} / 1000 \quad (6)$$

式中,  $\text{SOC}_{\text{ESM}}$  和  $\text{TN}_{\text{ESM}}$  分别为 SOC 和 TN 的等效重量储量 ( $\text{Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ),  $C_{\text{sn}}$  分别为实测最深土层 (桓台点位 50–60cm; 栾城点位 30–50cm) 的 SOC 和 TN 浓度 ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )。

### 1.5 统计分析

采用双因素方差分析法 (Two-way ANOVA) 分析耕作处理、土层深度及其交互作用对土壤容重、

SOC 和 TN 的浓度和储量的影响。单因素方差分析不同耕作措施对  $\rho_b$ 、SOC 和 TN 浓度、储量及层化比率的影响, 平均值比较采用最小显著差异法 (LSD) 进行, 显著性分析均为  $P < 0.05$ 。上述分析均通过 SPSS 11.0 软件处理完成。

## 2 结果与分析

### 2.1 采样深度对土壤容重观测结果的影响

不同耕作措施下土壤容重 ( $\rho_b$ ) 在剖面中的分布见图 1。由图可见, 对于山东桓台试验点, 不同处理下 0–60cm 剖面中土壤  $\rho_b$  的变化范围为  $1.46 \sim 1.62 \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ , 随着土层深度增加, NT (免耕) 和 RT (旋耕) 处理  $\rho_b$  呈现增大趋势, 40cm 以上土层表现尤为明显。土层深度极显著影响土壤  $\rho_b$  ( $P < 0.001$ ), 但耕作方式与土层深度的交互作用不显著 (表 1)。在 0–5cm 土层, NT 相较于 CT (翻耕) 处理的  $\rho_b$  呈增加趋势, 但差异不显著。在 10–20cm 土层, NT 和 RT 处理的  $\rho_b$  分别比 CT 增加了 9% 和 5%, 且 NT 与 CT 处理间差异达到显著水平 ( $P < 0.05$ )。在大于 20cm 土层, 不同耕作措施间的土壤容重无显著差异。

在河北栾城试验站 0–50cm 土壤剖面中, 不同耕作处理的土壤容重变化范围为  $1.18 \sim 1.59 \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ , 且随着土层深度增加  $\rho_b$  呈增加趋势。在 0–10cm 土层, NT 处理土壤  $\rho_b$  分别比 CT 和 RT 降低 14% 和 11%, 但 CT 与 RT 差异不显著。在大于 10cm 土层中 (10–20、20–30 和 30–50cm), 各耕作处理之间的土壤容重差异不显著。

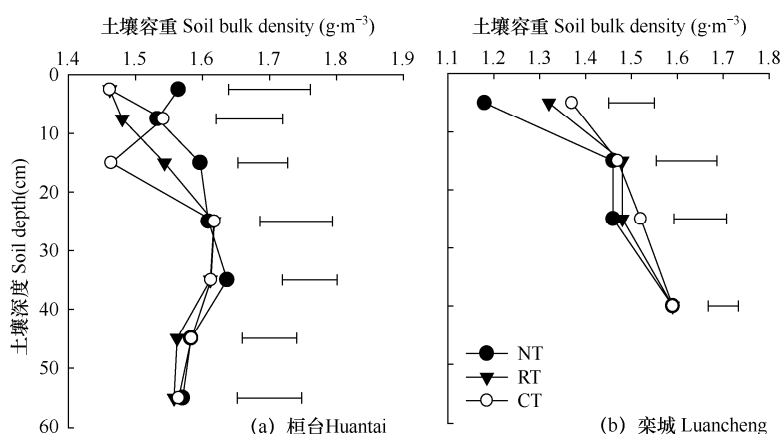


图 1 不同耕作措施下土壤容重的剖面分布

Fig. 1 Vertical distribution of soil bulk density under different tillage treatments

注: 短线代表同一土壤深度下不同耕作措施之间的最小显著性差异 (LSD,  $P=0.05$ )。NT、RT 和 CT 分别代表免耕、旋耕和翻耕方式。下同。

Note: The error bars represent least significant difference (LSD,  $P=0.05$ ) for comparison among tillage treatments at the same depth. NT is no-tillage, RT is rotary tillage, CT is conventional tillage. The same as below.

表 1 耕作方式、土层深度及其交互作用对土壤容重、SOC 和 TN 浓度及储量的影响

Table 1 The effects of tillage, soil depth and their interaction on the soil bulk density, concentrations and storage of SOC and TN		容重 Bulk density	土壤有机碳浓度 SOC content	全氮浓度 TN content	土壤有机碳储量 SOC stock	全氮储量 TN stock
桓台 Huantai	耕作 Tillage	0.026	0.002	0.011	<0.001	<0.001
	土层深度 Soil depth	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
	耕作×土层深度 Tillage×depth	0.209	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
栾城 Luancheng	耕作 Tillage	0.119	0.734	0.338	0.824	0.619
	土层深度 Soil depth	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
	耕作×土层深度 Tillage×depth	0.573	0.005	<0.001	0.111	0.048

2.2 采样深度对 SOC 和 TN 浓度观测结果的影响

2.2.1 土壤有机碳和全氮在土壤剖面中的分布

由图 2 可见，不同耕作措施下 SOC 和 TN 浓度在剖面中的分布特征不同。总体上看，表层土壤各处理之间差异较大，而深层土壤处理间差异较小。尽管各处理下 SOC 浓度随土层深度增加呈降低趋势，但 CT 处理在 0–20cm 土层碳氮的浓度分布相对均匀，而保护性耕作处理之间的差异较大。对于山东桓台试验点，耕作措施、土层深度及其交互作用均显著影响 SOC 浓度 ( $P<0.05$ , 表 1)。在 0–5cm 土层中，NT 处理 SOC 浓度较 CT 增加了 23%。但在 10–20cm 土层中，NT 和 RT 较 CT 处理 SOC 浓度分别降低了 37%和 34%。在大于 20cm 的土层中，不同耕作措施下 SOC 浓度差异不显著。在河北栾城 0–50cm 土壤剖面中，不同耕作处理下 SOC 浓度变化范围为 4.40~17.05g·kg<sup>-1</sup>，亦随土层深度增加呈下降趋势。双因素方差分析表明，耕作措施对 SOC 浓度无显著影响，但土层深度及其与耕作方式的交互作用对碳氮浓度影响显著 ( $P<0.05$ , 表 1)。在 0–10cm

土层，NT 和 RT 处理 SOC 浓度较 CT 处理分别增加了 22%和 17%，但 NT 与 RT 处理差异不显著。在较深的土层中（10–20、20–30 和 30–50cm），耕作措施未显著影响 SOC 浓度。

与 SOC 变化趋势类似，TN 浓度亦随土层深度增加而降低（图 3）。对于山东桓台试验点，不同处理下 TN 浓度在土壤剖面的变化范围为 0.37~1.14g·kg<sup>-1</sup>。在 0–5cm 土层中，NT 较 RT 和 CT 处理分别增加了 23%和 5%，但 RT 与 CT 差异不显著。在 10–20cm 土层，NT 和 RT 的 TN 浓度较 CT 处理分别降低 37%和 31%，而 NT 与 RT 差异不显著。在河北栾城 0–50cm 土壤剖面中，不同耕作处理间 TN 浓度变化范围为 0.53~1.79g·kg<sup>-1</sup>。特别在 0–10cm 土层中，NT 和 RT 处理的 TN 浓度分别比 CT 增加了 26%和 24%。而在 20–30cm 土层中，RT 较 CT 处理的 TN 浓度降低了 17%。在 10–20cm 和 30–50cm 土层中，各耕作处理间 TN 浓度的差异不显著。

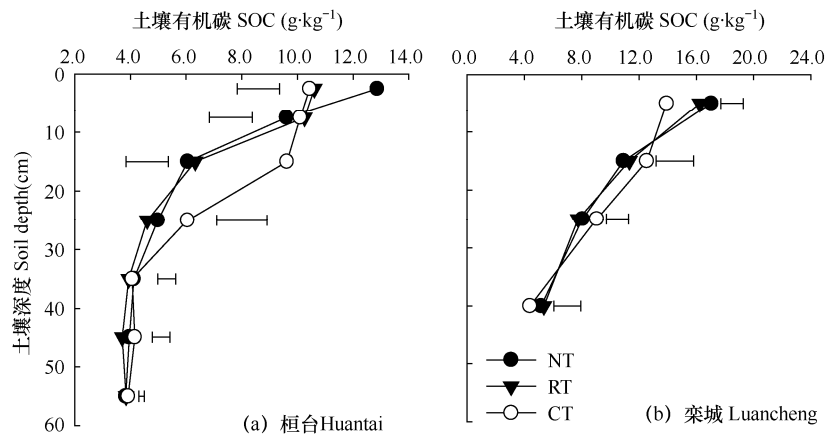


图 2 不同耕作措施下土壤有机碳浓度的剖面分布

Fig. 2 Vertical distribution of concentrations of soil organic carbon (SOC) under different tillage treatments

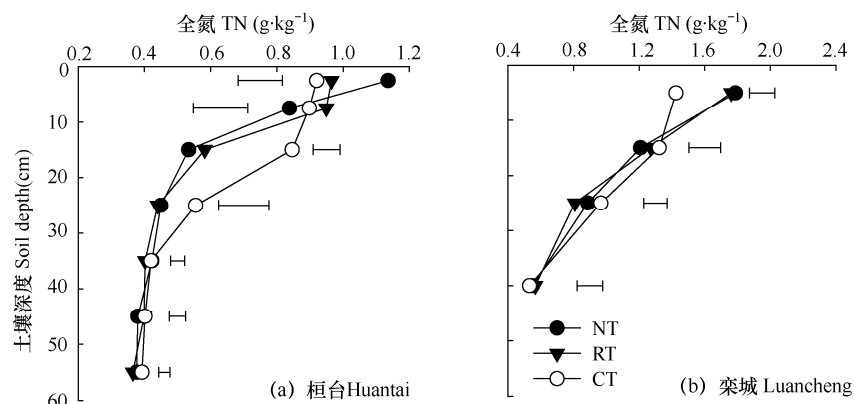


图 3 不同耕作措施下全氮 (TN) 浓度的土壤剖面分布

Fig. 3 Vertical distribution of concentrations of total nitrogen(TN) under different tillage treatments

### 2.2.2 土壤有机碳和全氮的层化比率

图 4 为不同耕作措施下 SOC 和 TN 浓度的层化比率 (stratification ratio, SR)。由图可见, 山东桓台试验点 SOC 的 SR 值变化范围为 2.67~3.37, NT 处理的 SR 值显著高于 CT 和 RT 处理 ( $P<0.05$ ); 不同处理间 TN 的 SR 值大小表现为 NT(3.02)>RT(2.66)=CT(2.34), RT 与 CT 处理之间差异不显著。由图还可看出, 河北栾城试验点不同耕作措施之间 SOC 的 SR 值无显著差异 (3.17~3.30), 但 NT 和 RT 较 CT 处理显著增加了 TN 的 SR 值 ( $P<0.05$ )。

### 2.3 采样深度对两种方法计算土壤碳氮储量结果的影响

#### 2.3.1 基于固定深度法计算 SOC 和 TN 储量

利用固定深度法计算的不同土层深度下 SOC 和

TN 储量见表 2。由表可见, 对于山东桓台试验点 (5a), 耕作措施、土层深度及其交互作用均显著影响 SOC 和 TN 储量 ( $P<0.05$ )。采样深度为 0~5cm 时, 不同耕作措施下基于固定深度法计算的 SOC 和 TN 储量的变化趋势均表现为 NT>RT=CT。其中, NT 处理较 CT 的 SOC 和 TN 储量分别显著增加 32% 和 33%。在 0~10cm 剖面, 各处理间的 SOC 和 TN 储量并无显著差异。采集更深土壤剖面, 即 0~20、0~30、0~40、0~50、0~60cm 时, 各处理之间的 SOC 和 TN 储量变化趋势均为 CT>RT=NT, CT=NT。在 0~20cm 土层, NT 处理较 CT 的 SOC 和 TN 储量分别降低 8% 和 9%, 在整个土壤剖面 (0~60cm), 基于 FD 法计算的 SOC 储量变化范围为 50.62~8.56Mg·hm<sup>-2</sup>, NT 处

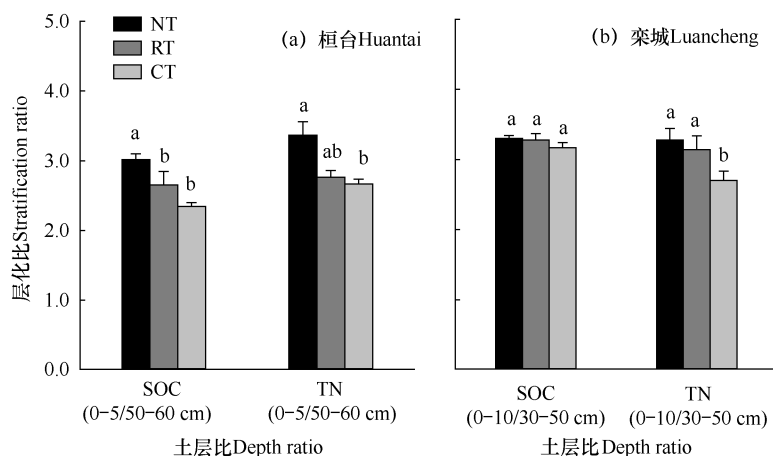


图 4 不同耕作措施下 SOC 和 TN 浓度的层化比(SR)

Fig. 4 The stratification ratios(SR) of SOC and TN as influenced by tillage treatments

注: 山东桓台土样的层化比(SR 值)为 0~5cm 与 50~60cm 土层中碳氮浓度的比值, 河北栾城土样中 SR 值为 0~10cm 与 30~50cm 土层中碳氮浓度的比值。

Note: Stratification ratio (SR): The SR value of the soil sample in Hantai, Shandong is the ratio of the carbon and nitrogen concentration in the soil layer of 0~5cm and 50~60cm, and which in Luancheng, Hebei is the ratio of the carbon and nitrogen concentration in the soil layer of 0~10cm and 30~50cm.

表 2 不同耕作措施下 SOC 和 TN 储量在土壤剖面的分布 (Mg·hm<sup>-2</sup>)

Table 2 The storages of SOC and TN in the soil profile under different tillage treatments(Mg·ha<sup>-1</sup>)

处理 Treatment	土层 Soil depth (cm)	山东桓台 (5a) Shandong Huantai (5 years)				河北栾城 (17a) Hebei Luancheng (17 years)			
		固定深度法		等效重量法		固定深度法		等效重量法	
		FD-based stock		ESM-based stock		FD-based stock		ESM-based stock	
		SOC	TN	SOC	TN	SOC	TN	SOC	TN
NT	0-5	10.07a	0.89a	9.87a	0.87a	—	—	—	—
RT		7.75b	0.70b	7.75b	0.70b	—	—	—	—
CT		7.64b	0.67b	7.64b	0.67b	—	—	—	—
NT	0-10	17.43a	1.53a	17.13a	1.50a	20.01ab	2.10b	20.01ab	2.10b
RT		15.33a	1.41a	15.32a	1.41a	21.52a	2.33a	20.72a	2.25a
CT		15.41a	1.37a	15.30a	1.35a	19.12b	1.95b	18.25b	1.85c
NT	0-20	27.08ab	2.38ab	26.39ab	2.31ab	35.96a	3.86a	35.96a	3.86a
RT		25.08b	2.30b	24.89b	2.29b	38.19a	4.21a	37.31a	4.12a
CT		29.48a	2.61a	29.48a	2.61a	37.60a	3.90a	36.67a	3.78a
NT	0-30	35.11ab	3.11ab	34.45b	3.04b	47.66a	5.15a	47.67a	5.15a
RT		32.52b	3.01b	32.34b	3.00b	50.75a	5.52a	48.77a	5.32a
CT		39.32a	3.51a	39.32a	3.51a	51.53a	5.39a	50.22a	5.22a
NT	0-40	41.85ab	3.80ab	41.10b	3.72b	—	—	—	—
RT		38.86b	3.66b	38.68b	3.65b	—	—	—	—
CT		45.86a	4.18a	45.86a	4.18a	—	—	—	—
NT	0-50	48.12ab	4.40ab	47.37b	4.33b	64.07a	6.89a	64.09a	6.90a
RT		44.64b	4.29b	44.53b	4.28b	67.74a	7.32a	65.82a	7.13a
CT		52.44a	4.82a	52.44a	4.82a	65.57a	7.08a	64.23a	6.92a
NT	0-60	54.68ab	4.99ab	53.65b	4.91b	—	—	—	—
RT		50.62b	4.85b	50.54b	4.85b	—	—	—	—
CT		58.56a	5.43a	58.56a	5.43a	—	—	—	—

注：—表示该站该层未测。不同字母代表同一剖面中不同耕作处理之间差异显著 (P<0.05)。

Note: Different small letters indicate the significant difference between different tillage treatments at 0.05 level.

理比 CT 降低 7%；TN 储量变化范围为 4.85～5.43Mg·hm<sup>-2</sup>，NT 处理比 CT 降低了 8%。

由表 2 可见，对于河北栾城试验点 (17a)，改变耕作措施仅影响表层 (0-10cm) SOC 和 TN 储量。双因素方差分析表明，除土层深度外 (P<0.05)，耕作方式及其与土层深度的交互作用对 SOC 和 TN 储量的影响均不显著。在 0-10cm 土层，不同耕作措施下 SOC 和 TN 储量的变化趋势为 NT=RT>CT，NT=CT。其中，耕作处理之间 SOC 储量变化范围为 19.12～21.52Mg·hm<sup>-2</sup>，RT 较 CT 处理增加了 13%；TN 储量变化范围为 1.95～2.33Mg·hm<sup>-2</sup>，RT 较 CT 处理增加了 19%。对于更深土壤剖面 (如 0-20、0-30 和 0-50cm)，FD 计算方法所得 SOC 和 TN 储量处理

之间均无显著差异，在整个土壤剖面 (0-50cm)，基于 FD 法的 SOC 储量变化范围为 64.07～67.74Mg·hm<sup>-2</sup>，而 TN 储量变化范围为 6.89～7.32Mg·hm<sup>-2</sup>。可见，山东桓台和河北栾城两个试验点的数据均表明，利用固定深度法对不同耕作措施下土壤 SOC 和 TN 储量进行对比时，土层采样深度均对评价结果影响显著。

2.3.2 基于等效重量法计算 SOC 和 TN 储量

利用等效重量法 (ESM) 计算的不同土层深度下 SOC 和 TN 储量见表 2。在山东桓台试验点，采集 0-5cm 表层土壤时，不同耕作措施下 SOC 和 TN 储量的变化趋势均表现为 NT>RT=CT。其中，NT 处理较 CT 的 SOC 和 TN 储量分别显著增加 29%和

30%。对于 0–10cm 剖面, 处理之间的 SOC 和 TN 储量无显著差异。采集更深土壤剖面时(即 0–20、0–30、0–40、0–50 和 0–60cm), 不同耕作措施之间的 SOC 和 TN 储量变化趋势均为  $CT > RT = NT$ ,  $CT = NT$ 。以常规采样 0–20cm 剖面为例, NT 处理较 CT 的 SOC 和 TN 储量分别降低 10% 和 11%。考虑到整个土壤剖面(0–60cm)时, ESM 法计算的 SOC 储量变化范围为  $50.54 \sim 58.56 \text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , NT 处理比 CT 降低了 8%; TN 储量变化范围为  $4.85 \sim 5.43 \text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , NT 处理比 CT 降低了 10%。

由表 2 可见, 在河北栾城试验点(17a), 不同耕作方式仅影响表层(0–10cm)土壤碳氮储量。在 0–10cm 土层, 基于 ESM 法计算的 SOC 和 TN 储量的变化趋势均为  $NT = RT > CT$ ,  $NT = CT$ 。具体而言, 与 CT 相比, NT 和 RT 处理的 SOC 储量分别增加了 10% 和 14%, TN 储量分别增加了 14% 和 22%。考虑到更深土壤剖面(如 0–20、0–30 和 0–50cm)时, 耕作处理之间的 SOC 和 TN 储量处理之间均无显著差异。考虑整个土壤剖面(0–50cm), 基于 ESM 法的 SOC 储量变化范围为  $64.09 \sim 65.82 \text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 而 TN 储量变化范围为  $6.90 \sim 7.13 \text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。综上所述, 利用等效重量法(ESM)计算 SOC 和 TN 储量时, 采样深度耕作对处理之间土壤碳氮评估结果产生影响。

### 2.3.3 两种计算方法数值的比较

在山东桓台试验点, 固定深度法(FD)计算的 NT 处理下 SOC 和 TN 储量略高于等效重量法(ESM), 且因采样深度而异(表 2)。具体而言, 在 0–5、0–10、0–20、0–30、0–40、0–50 和 0–60cm 剖面中, FD 法较 ESM 法分别高估 SOC 储量 0.20、0.30、0.69、0.66、0.75、0.75 和  $1.03 \text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 分别高估 TN 储量为 0.02、0.03、0.07、0.07、0.08、0.07 和  $0.08 \text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。在河北栾城试验站点, 计算方法也影响了不同耕作处理之间 SOC 和 TN 储量的差异性。在 0–10cm 土层, 基于 FD 法计算 NT 和 RT 处理的 SOC 储量比 CT 处理分别增加了 0.89 和  $2.40 \text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 而 ESM 法计算的储量差异分别为 1.76 和  $2.47 \text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。说明 FD 法低估了免耕(NT)处理在 0–10cm 土层的固碳效应(与 CT 相比), FD 法比 ESM 法低估了  $0.87 \text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。考虑到更深土壤剖面( $\geq 20 \text{ cm}$ )时, 利用 FD 法计算的 NT 和 RT 处理的

SOC 储量与 CT 处理的差值分别为  $-1.64$  和  $0.59 \text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$  (0–20cm)、 $-3.87$  和  $-0.78 \text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$  (0–30cm)、 $-1.48$  和  $2.17 \text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$  (0–50cm)。而基于 ESM 法计算的 SOC 储量, 各层差异分别为  $-0.71$  和  $0.64 \text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$  (0–20cm)、 $-2.55$  和  $-1.45 \text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$  (0–30cm)、 $-0.14$  和  $1.59 \text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$  (0–50cm)。因此, 即使在 0–20、0–30 和 0–50cm 剖面中, FD 法也低估了免耕的 SOC 储量(与 CT 相比较), 低估幅度分别为 0.93、1.32 和  $1.34 \text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。在整个剖面(0–50cm), 两种方法计算的 RT 处理的固碳效应(与 CT 相比较)差异不大, 在  $-0.67 \sim 0.05 \text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$  区间。

## 3 结论与讨论

### 3.1 讨论

以少耕和免耕为代表的保护性耕作在蓄水保墒、防治水土流失、降低能耗投入和改善土壤质量等方面的优越性能, 已在美国、加拿大、巴西和澳大利亚等地区得到广泛应用, 也是近年来农业农村部重点推广的一种保护性农业措施<sup>[6,15]</sup>。然而, 保护性耕作能否增加 SOC 储量仍存在不确定性, 其固碳效应除了与气候条件、土壤类型、秸秆管理等因素有关外, 还可能受到采样深度和计算方法的影响<sup>[10,15–18]</sup>。本研究基于华北平原两个定位试验, 比较分析了采样深度和计算方法对不同耕作措施下土壤碳氮储量评估结果的影响。

本研究结果表明, 在山东桓台实施保护性耕作 5a 后, 免耕显著增加了 SOC 和 TN 层化比率, 而河北栾城 17a 的试验点中免耕仅增加了 TN 的层化比率, SOC 层化比率在统计上不显著。这种 SOC 和 TN 在各层土壤剖面中的分布特点可能是由于耕作方式所导致的土壤扰动及秸秆分布的差异造成的<sup>[14]</sup>。对翻耕而言(CT), 作物秸秆被机具翻入耕层中分布较均匀(0–18cm)。对于保护性耕作系统, RT 处理在旋耕机作用下对土壤扰动仅限制在表层(0–10cm), 而 NT 处理的秸秆覆盖在地表, 仅在冬小麦和夏玉米播种时对土壤有稍微扰动。有研究将土壤有机质层化比率(SR)推荐为评价土壤质量的重要指标<sup>[11,30]</sup>, 基于北美洲 3 个耕作定位试验结果表明, 免耕较翻耕处理的土壤碳氮 SR 值较高, 土壤质量较好, 并且此规律不受土壤类型和气候状况的影响<sup>[11]</sup>。随后也有系列研究表明, 保护性耕作提高了 SOC 及其它活性碳组分的 SR 值, 土壤质量得以改善<sup>[13–14,27,30–31]</sup>。此外, 也有研究认为, SOC 层化系数



增加与 SOC 固持速率和潜力有关<sup>[11, 13]</sup>。

在本研究中, 采样深度显著影响土壤容重、SOC 和 TN 浓度和储量 ( $P < 0.05$ )。土壤有机碳浓度随土层深度的增加而降低, 主要因为表层是作物残体和植物根系的集中区域, 微生物活动强, 有利于 SOC 的积累<sup>[31-32]</sup>。此外, 在山东桓台 5a 耕作试验中 (除特别说明外, 以下讨论 SOC 和 TN 储量均以 ESM 计算) 0-5cm 土层中 NT 处理较 CT 显著增加了 SOC 和 TN 储量, 增幅分别为 29% 和 30%。进一步考虑到 0-10cm 和 0-20cm 剖面时, NT 和 CT 处理之间 SOC 和 TN 储量无显著差异。但在  $\geq 30$ cm 的剖面中 (0-30、0-40、0-50、0-60cm), 两种保护性耕作处理 (NT 和 RT) 的 SOC 和 TN 储量均显著低于传统翻耕处理 (CT)。以 0-60cm 剖面为例, NT 和 RT 的 SOC 储量比 CT 处理分别降低了 8% 和 14%, 而 TN 储量分别降低了 10% 和 11%。在河北栾城连续 17a 的耕作试验中, RT 处理较 CT 显著增加了 0-10cm 土层 SOC 和 TN 储量, 增幅分别为 14% 和 22%。而在  $\geq 20$ cm 的剖面中 (0-20、0-30、0-50cm), 不同耕作措施之间的 SOC 和 TN 储量无显著差异。上述分析表明, 客观评估耕作方式转变后 SOC 和 TN 储量变化, 不能仅仅关注于表层土壤, 忽视深层土壤碳氮变异性可能会出现偏差, 甚至导致错误结论, 因此需要考虑整个土壤剖面。这一观点与其它研究一致<sup>[7, 10, 15-17]</sup>。田康等<sup>[33]</sup>通过 Meta 分析 (157 个试验点) 探讨了中国实施保护性耕作表层土壤 (旱地 0-20cm, 水田 0-15cm) 的固碳情况, 认为与传统翻耕相比较, 免耕和免耕+秸秆还田均显著提高了 SOC 的相对增加速率。在研究其它农业管理措施 (如施用有机肥、土地利用方式、土壤侵蚀) 过程中, 亦需要考虑上述问题。在喀斯特地区, Hu 等<sup>[12]</sup>发现在扰动较少的森林转变为农田后 SOC 损失量与采样深度密切相关, 在 0-10、0-20、0-40、0-60 和 0-100cm 剖面 SOC 储量分别损失 19.1%、25.1%、30.6%、36.8% 和 37.9%。在评价不同耕作方式下土壤固碳效应时, Du 等<sup>[14]</sup>认为, 采样深度至少要包括整个耕层 ( $\geq 30$ cm)。基于巴西 3 个长期耕作定位试验 (15~26a), Boddey 等<sup>[34]</sup>发现 100cm 土壤剖面的免耕固碳速率较表层 (0-30cm) 增加了 59%。关于采样深度的问题, 一些学者提出了 40cm<sup>[7]</sup>或 100cm<sup>[35]</sup>不等, 而 IPCC<sup>[36]</sup>建议的采样深度为 30cm。综上所述, 采样深度是影响耕作措施等其它管理方式转变后土壤碳氮储量评

估结果的重要因素, 在今后研究中需给予高度重视。

耕作措施对 SOC 和 TN 储量的影响除了与采样深度有关外, 还可能与其计算方法有关<sup>[15, 26]</sup>。在山东桓台试验点, FD 法计算的 NT 处理下 SOC 和 TN 储量略高于 ESM 法, 且不同采样深度间稍有差异。具体而言, 在 0-5、0-10、0-20、0-30、0-40、0-50 和 0-60cm 剖面中, FD 法较 ESM 法高估 SOC 储量分别为 0.20、0.30、0.69、0.66、0.75、0.75 和  $1.03\text{Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。基于 FD 法计算 SOC 储量稍高的原因与实施免耕后增加了 0-5cm 和 10-20cm 土层土壤容重有关。这是因为单位体积 SOC 和 TN 储量依赖于土壤重量, 而不同耕作措施下同等深度的土壤重量是不相等的<sup>[23-24]</sup>。在实施免耕初期, 由于扰动少, 容重增大, 土壤变紧实<sup>[13-14]</sup>, 因此会增加同等采样深度下的土壤重量, 进而夸大了免耕土壤固碳效应。这一结论也与其它研究结果一致<sup>[7, 15, 23]</sup>。Palm 等<sup>[7]</sup>发现, 在 0-30cm 土层采用, FD 法计算的免耕 SOC 储量比翻耕高  $4\text{Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$ , 而基于 ESM 法计算的碳储量则减少至  $2\text{Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。此外, 基于 Meta 分析, Du 等<sup>[15]</sup>发现, 若仅考虑 0-30cm 土层, 基于 FD 法计算的免耕土壤固碳速率 ( $0.300\text{Mg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ) 显著高于 ESM 法计算的结果 ( $0.141\text{Mg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ )。

在河北栾城试验站点, 两种计算方法也影响不同耕作处理之间 SOC 和 TN 库的差异性。在 0-10cm 土层, 基于 FD 法所计算 NT 和 RT 处理的 SOC 储量比 CT 处理分别增加了 0.89 和  $2.40\text{Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$ , 而 ESM 法差异分别为 1.76 和  $2.47\text{Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。说明 FD 法低估了免耕表层土壤 (0-10cm) 固碳效应 (与 CT 相比), 与 ESM 法相比降低了  $0.87\text{Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。考虑到更深土壤剖面 ( $\geq 20$ cm), 利用 FD 法所得 NT 和 RT 处理的 SOC 储量与 CT 处理的差值分别为 -1.64 和  $0.59\text{Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$  (0-20cm)、-3.87 和  $-0.78\text{Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$  (0-30cm)、-1.48 和  $2.1\text{Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$  (0-50cm)。而基于 ESM 法计算的差异分别为 -0.71 和  $0.64\text{Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$  (0-20cm)、-2.55 和  $-1.45\text{Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$  (0-30cm)、-0.14 和  $1.59\text{Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$  (0-50cm)。因此, 即使考虑到更深 0-20、0-30 和 0-50cm 剖面, 传统固定深度法也低估了免耕 SOC 储量 (与 CT 相比较), 降低幅度分别为 0.93、1.32 和  $1.34\text{Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。这一结果表明传统固定深度方法低估了免耕土壤固碳效应。究其原因, 与连续实施 17a 免耕后表层 (0-10cm) 土壤容重降低有关。多年免耕后大量秸秆在地表积累, 表层土

壤生物活性高(如蚯蚓活动)<sup>[31]</sup>,团聚性较高<sup>[37-38]</sup>,土壤结构得以改善,容重降低。因此,在同等采样深度下免耕土壤重量较轻,从而低估了免耕 SOC 储量。而 ESM 法则可以校正处理之间由于容重变异而导致的土壤重量差异性,从而较准确地计算转变管理措施后(如土地利用方式变化)SOC 及其它养分储量的变化<sup>[12, 23, 39]</sup>。

值得指出的是,准确评估不同管理措施下的土壤碳氮变化特征,需要统筹考虑采样深度和计算方法。本研究中,山东桓台和河北栾城试验点的结果均可佐证上述观点。在其它研究中,Du 等<sup>[15]</sup>也发现,免耕相对翻耕的 SOC 库变化率与采样深度和计算方法均有关,若仅考虑 0-20cm 土层,基于 FD 法和 ESM 法计算的 SOC 库变化率分别为 0.395 和 0.128Mg·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>;而对于 0-30cm 剖面,上述碳库变化率分别为 0.30 和 0.41Mg·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>;若考虑到 0-40cm 剖面,两种方法计算的 SOC 库变化率分别为 0.287 和 0.415Mg·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>。Hu 等<sup>[12]</sup>也研究表明,在 0-40cm 土层,基于固定深度法会低估土地利用方式变化造成的 SOC 和 TN 损失,但在 0-60cm 和 0-100cm 剖面中则相反。由此可见,“深层采样”策略并不能消除土壤容重变异(通常发生在表层)所带来的评估偏差。

近年来,一些学者提出气候变化智慧型农业(climate-smart agriculture)概念<sup>[40]</sup>,强调通过优化管理措施(如耕作、施肥、作物覆盖等)增加土壤固碳和温室气体减排,同时提供其它生态系统服务。其中以少免耕为代表的保护性耕作由于具有改善土壤质量、维持/提高作物产量、减排增汇等优点,作为气候智慧型农业措施的范例被广泛推荐<sup>[41-42]</sup>。然而,本研究 and Palm 等<sup>[7, 15-17]</sup>均证实,少免耕措施会导致 SOM 层化效应,能够改善土壤质量,增加碳库在表层积累,而在整个剖面的碳库储量变异较大,甚至呈现降低趋势。因此,保护性耕作可作为一种适应气候变化的措施,但其土壤固碳效应值得商榷。

### 3.2 结论

免耕导致 SOC 和 TN 在土壤剖面中高度层化,并提高表层(山东桓台点 0-5cm、河北栾城点 0-10cm)SOC 和 TN 储量。考虑更深土层时,山东桓台试验点在 ≥30cm 剖面,两种保护性耕作处理的碳氮储量显著低于传统翻耕,而河北栾城试验点在 ≥20cm 剖面,不同耕作处理之间的碳氮储量无显著

差异。另外,传统“固定深度法”高估了山东桓台试验点免耕处理 SOC 和 TN 储量,但在河北栾城试验点被低估。因此,为准确评估不同耕作管理措施下土壤碳氮库的变化情况,推荐在“深层采样”策略的基础上(≥30cm),利用等效重量法计算其储量。保护性耕作对改善土壤质量具有积极作用,但其通过 SOC 截留来缓解气候变化的潜力不应该被高估。

### 参考文献 References

- [1] Zhang H L, Lal R, Zhao X, et al. Opportunities and challenges of soil carbon sequestration by conservation agriculture in China[J]. *Advances in Agronomy*, 2014, 124: 1-36.
- [2] Lal R. Sequestering carbon and increasing productivity by conservation agriculture[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 70(3): 55A-62A.
- [3] Li Y, Li Z, Cui S, et al. Residue retention and minimum tillage improve physical environment of the soil in croplands: a global meta-analysis[J]. *Soil and Tillage Research*, 2019, 194: 104292.
- [4] Schmidt E S, Villamil M B, Amiotti N M. Soil quality under conservation practices on farm operations of the southern semiarid pampas region of Argentina[J]. *Soil and Tillage Research*, 2018, 176: 85-94.
- [5] Sun W, Canadell J G, Yu L, et al. Climate drives global soil carbon sequestration and crop yield changes under conservation agriculture[J]. *Global Change Biology*, 2020, 26(6): 3325-3335.
- [6] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security[J]. *Science*, 2004, 304(5677): 1623-1627.
- [7] Palm C, Blanco-Canqui H, DeClerck F, et al. Conservation agriculture and ecosystem services: an overview[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2014, 187: 87-105.
- [8] Yang X, Drury C F, Wander M M. A wide view of no-tillage practices and soil organic carbon sequestration[J]. *Acta Agriculturae Scandinavica*, 2013, 63(6): 523-530.
- [9] Chenu C, Angers D A, Barré P, et al. Increasing organic stocks in agricultural soils: knowledge gaps and potential innovations[J]. *Soil and Tillage Research*, 2019, 188: 41-52.
- [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 X B, He W Q, Li X F, et al. Review on the mechanism of soil organic carbon sequestration and its influence factors in cropland soils[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2010, 31(4): 487-494. (in Chinese)
- [11] Franzluebbers A J. Soil organic matter stratification ratio as an indicator of soil quality[J]. Soil and Tillage Research, 2002, 66(2): 95-106.
- [12] Hu Y, Du Z, Wang Q, et al. Combined deep sampling and mass-based approaches to assess soil carbon and nitrogen losses due to land-use changes in karst area of southwestern China[J]. Solid Earth, 2016, 7(4): 1075-1084.
- [13] Sa J C D, Lal R. Stratification ratio of soil organic matter pools as an indicator of carbon sequestration in a tillage chronosequence on a Brazilian Oxisol[J]. Soil and Tillage Research, 2009, 103(1): 46-56.
- [14] Du Z, Ren T, Hu C. Tillage and residue removal effects on soil carbon and nitrogen storage in the North China Plain[J]. Soil Science Society of America Journal, 2010, 74(1): 196-202.
- [15] Du Z, Angers D A, Ren T, et al. The effect of no-till on organic C storage in Chinese soils should not be overemphasized: a meta-analysis[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2017, 236: 1-11.
- [16] Angers D A, Eriksen-Hamel N S. Full-inversion tillage and organic carbon distribution in soil profiles: a meta-analysis[J]. Soil Science Society of America Journal, 2008, 72(5): 1370-1374.
- [17] Luo Z, Wang E, Sun O J. Can no-tillage stimulate carbon sequestration in agricultural soils: a meta-analysis of paired experiments[J]. Agriculture Ecosystems and Environment, 2010, 139(1-2): 224-231.
- [18] Xiao L, Zhou S, Zhao R, et al. Evaluating soil organic carbon stock changes induced by no-tillage based on fixed depth and equivalent soil mass approaches[J]. Agriculture Ecosystems and Environment, 2020, 300: 106982.
- [19] Wan X, Xiao L, Vadeboncoeur M A, et al. Response of mineral soil carbon storage to harvest residue retention depends on soil texture: a meta-analysis[J]. Forest Ecology and Management, 2018, 408: 9-15.
- [20] Mondal S, Chakraborty D, Bandyopadhyay K K, et al. A global analysis of the impact of zero-tillage on soil physical condition, organic carbon content, and plant root response[J]. Land Degradation and Development, 2020, 31(5): 557-567.
- [21] Wiesmeier M, Urbanski L, Hobley E, et al. Soil organic carbon storage as a key function of soils: a review of drivers and indicators at various scales[J]. Geoderma, 2019, 333: 149-162.
- [22] Li Y, Li Z, Chang S, et al. Residue retention promotes soil carbon accumulation in minimum tillage systems: implications for conservation agriculture[J]. Science of The Total Environment, 2020, 740: 140147.
- [23] Lee J, Hopmans J W, Rolston D E, et al. Determining soil carbon stock changes: simple bulk density corrections fail[J]. Agriculture Ecosystems and Environment, 2009, 134(3): 251-256.
- [24] Ellert B H, Bettany J R. Calculation of organic matter and nutrients stored in soils under contrasting management regimes[J]. Canadian Journal of Soil Science, 1995, 75(4): 529-538.
- [25] Xu S, Zhang M, Zhang H, et al. Soil organic carbon stocks as affected by tillage systems in a double-cropped rice field[J]. Pedosphere, 2013, 23(5): 696-704.
- [26] 梁爱珍, 张晓平, 杨学明, 等. 耕作方式对耕层黑土有机碳库储量的短期影响[J]. 中国农业科学, 2006(6): 1287-1293.
- Liang A Z, Zhang X P, Yang X M, et al. Short-term effects of tillage on soil organic carbon storage in the plow layer of black soil in Northeast China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2006(6): 1287-1293. (in Chinese)
- [27] 杜章留, 任图生, 胡春胜. 保护性耕作对太行山前平原土壤热水解和酸解有机碳的影响[J]. 中国农业科学, 2013, 46(11): 2249-2256.
- Du Z L, Ren T S, Hu C S. Conservation tillage on soil carbon extracted by hot water and acid hydrolysis in the piedmont region of Taihang mountains[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2013, 46(11): 2249-2256. (in Chinese)
- [28] Grossman R B, Reinsch T G. Bulk density and linear extensibility[M]. In: Dane J H, Topp G C. (eds.) Methods of soil analysis. Part 4. Physical methods. SSSA Book Ser. 5. SSSA, Madison, WI. 2002: 201-228.
- [29] Nelson D W, Sommers L E. Total carbon, organic carbon, and organic matter: laboratory methods[M]. In: Sparks D L, et al. (eds.) Methods of soil analysis. Part 3. SSSA Book Ser. 5. SSSA, Madison, WI. 1996: 961-1010.

- [30] Yang X M, Drury C F, Reynolds W D, et al. Impacts of long-term and recently imposed tillage practices on the vertical distribution of soil organic carbon[J]. *Soil and Tillage Research*, 2008, 100(1-2): 120-124.
- [31] 杜章留, 高伟达, 陈素英, 等. 保护性耕作对太行山前平原土壤质量的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2011, 19(5): 1134-1142.
- Du Z L, Gao W D, Chen S Y, et al. Effect of conservation tillage on soil quality in the piedmont plain of Mount Taihang[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2011, 19(5): 1134-1142. (in Chinese)
- [32] 任景全, 王连喜, 陈书涛, 等. 免耕与翻耕条件下农田土壤呼吸的比较[J]. *中国农业气象*, 2012, 33(3): 388-393.
- Ren J T, Wang L X, Chen S T, et al. Comparison of soil respiration from farmlands under no-tillage and tillage regimes[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2012, 33(3): 388-393. (in Chinese)
- [33] 田康, 赵永存, 邢喆, 等. 中国保护性耕作农田土壤有机碳变化速率研究: 基于长期试验点的 Meta 分析[J]. *土壤学报*, 2013, 50(3): 433-440.
- Tian K, Zhao Y C, Xing Z, et al. A meta-analysis of long-term experiment data for characterizing the topsoil organic carbon changes under different conservation tillage in cropland of China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50(3): 433-440. (in Chinese)
- [34] Boddey R M, Jantalia C P, Conceicao P C, et al. Carbon accumulation at depth in Ferralsols under zero-till subtropical agriculture[J]. *Global Change Biology*, 2010, 16(2): 784-795.
- [35] Olson K R. Soil organic carbon sequestration, storage, retention and loss in U.S. croplands: issues paper for protocol development[J]. *Geoderma*, 2013, 195-196: 201-206.
- [36] IPCC. IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories, prepared by the national greenhouse gas inventories programme[R]. IGES, Hayama, Japan, 2006.
- [37] Du Z, Ren T, Hu C, et al. Soil aggregate stability and aggregate-associated carbon under different tillage systems in the North China Plain[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2013, 12(11): 2114-2123.
- [38] Du Z, Ren T, Hu C, et al. Transition from intensive tillage to no-till enhances carbon sequestration in microaggregates of surface soil in the North China Plain[J]. *Soil and Tillage Research*, 2015, 146: 26-31.
- [39] 宇涛, 李占斌, 李鹏, 等. 基于 FD 和 ESM 法的黄土丘陵区典型流域土壤碳氮含量及储量研究[J]. *西安理工大学学报*, 2020, 36(1): 1-9.
- Yu T, Li Z B, Li P, et al. Soil organic carbon and nitrogen content and storage in a typical watershed in the hilly area of the Loess Plateau based on FD and ESM method[J]. *Journal of Xi'an University of Technology*, 2020, 36(1): 1-9. (in Chinese)
- [40] Lipper L, Thornton P, Campbell B M, et al. Climate-smart agriculture for food security[J]. *Nature Climate Change*, 2014, 4(12): 1068-1072.
- [41] Bai X, Huang Y, Ren W, et al. Responses of soil carbon sequestration to climate smart agriculture practices: a meta-analysis[J]. *Global Change Biology*, 2019, 25(5): 2591-2606.
- [42] 谢立勇, 叶丹丹, 张贺, 等. 旱地土壤温室气体排放影响因素及减排增汇措施分析[J]. *中国农业气象*, 2011, 32(4): 481-487.
- Xie L Y, Ye D D, Zhang H, et al. Review of influence factors on greenhouse gases emission from upland soils and relevant adjustment practices[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2011, 32(4): 481-487. (in Chinese)