

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.11.032

耕作方式对稻麦轮作区土壤碳氮储量与层化率的影响

崔思远^{1,2} 曹光乔² 朱新开¹

(1. 扬州大学江苏省作物遗传生理重点实验室, 扬州 225009;
2. 农业部南京农业机械化研究所农业部现代农业装备重点实验室, 南京 210014)

摘要: 为研究不同耕作方式对稻麦轮作农田土壤碳氮固持和层化情况的影响,于2013年起在江苏省泰州市姜堰区河横生态农业科技示范园进行试验。试验设置了少耕秸秆还田(MT)、旋耕秸秆还田(RT)、翻耕秸秆还田(CT)、翻耕秸秆不还田(CT0)4种处理,分层采集各处理0~20 cm土壤,测定土壤容重、有机碳和全氮含量,计算碳氮比、层化率、土壤有机碳和全氮储量(等质量法)。结果表明,MT、RT、CT分别提高0~5 cm、5~10 cm和10~20 cm土壤的有机碳和全氮含量;10~20 cm土壤碳氮比随着耕作强度提高而减小;MT显著提高有机碳和全氮含量层化率,0~5 cm土层、10~20 cm土层碳氮比层化率随着耕作强度增加而增加;MT提高了0~20 cm土壤有机碳储量和0~10 cm土壤全氮储量,但是0~20 cm土壤碳氮储量不及RT和CT。秸秆还田提高0~20 cm土壤有机碳、全氮含量、碳氮比,显著增加了有机碳和全氮储量,具有良好的碳氮固持效应,但对土壤有机碳和全氮含量层化率影响不显著。研究结果可为探寻有利于农田土壤碳氮库构建、提高土壤肥力的耕作方式提供理论依据。

关键词: 耕作方式; 土壤有机碳; 土壤全氮; 土壤碳氮比; 有机碳储量; 全氮储量
中图分类号: S344.17 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)11-0275-08

Effects of Tillage on Stocks and Stratification of Soil Carbon and Nitrogen in Rice – Wheat System

CUI Siyuan^{1,2} CAO Guangqiao² ZHU Xinkai¹

(1. Key Laboratory of Crop Genetics and Physiology of Jiangsu Province, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China
2. Key Laboratory of Modern Agricultural Equipment, Ministry of Agriculture; Nanjing Research Institute for Agricultural Mechanization, Ministry of Agriculture, Nanjing 210014, China)

Abstract: Effects of tillage on soil carbon and nitrogen retention and stratification in rice-wheat system were studied to provide a theoretical basis for exploring tillage methods which could be beneficial to the construction of soil organic carbon (SOC) and total nitrogen (TN) pools and the improvement of soil fertility in farmland. A four-year field experiment was conducted based on Heheng demonstration park of eco-agricultural science and technology, including four treatments of minimum tillage with straw retention (MT), rotary tillage with straw retention (RT), conventional tillage with straw retention (CT) and conventional tillage without straw retention (CT0). Soil at 0~20 cm depth was collected to determine soil bulk density, content of SOC and TN. Then the ratio of C to N, the stratification ratio and the SOC and TN storage (using the equivalent soil mass approach) were calculated. Results showed that the contents of SOC and TN in 0~5 cm, 5~10 and 10~20 cm depths were increased by MT, RT and CT, respectively. Soil C:N ratio at 10~20 cm depth was decreased with the increase of tillage intensity. MT significantly increased the stratification ratio of SOC and TN, while the stratification ratio of C:N ratio at 0~5 cm and 10~20 cm depths was increased with the increase of tillage intensity. MT increased the SOC stocks at 0~20 cm depth and the TN stocks at 0~10 cm depth, but the TN stocks at 0~20 cm depth were lower than those of RT and CT. Straw retention significantly increased SOC and TN contents and C:N ratio, which were beneficial to SOC and TN sequestration, but it had no significant effect on

收稿日期: 2018-06-25 修回日期: 2018-07-26
基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD0200500)、中国农业科学院科技创新工程项目(农科院办(2014)216号)和中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(Y2016PT50)
作者简介: 崔思远(1987—),男,博士生,农业部南京农业机械化研究所助理研究员,主要从事农田土壤生态研究,E-mail: cui siyuan@126.com
通信作者: 朱新开(1968—),男,教授,博士生导师,主要从事麦类作物营养生理及高产高效栽培技术研究,E-mail: xkzhu@yzu.edu.cn

stratification ratio of SOC and TN contents at 0 ~ 20 cm depth.

Key words: tillage methods; soil organic carbon; soil total nitrogen; soil C:N ratio; soil organic carbon stocks; soil total nitrogen stocks

0 引言

土壤有机质是土壤的重要组成部分,是反映土壤肥力的重要指标之一,对土壤物理、化学、生物学特性及作物生产有重要的影响^[1-2]。作为有机质的重要组分,土壤有机碳(Soil organic carbon, SOC)与土壤结构稳定、作物高产及稳产性等密切相关。当SOC质量分数低于2%,会降低土壤结构稳定性,进而限制作物的高产稳产性^[3],而中国逾80%的耕地SOC低于该水平。PAN等^[4]基于中国第二次土壤普查的有机质数据和作物产量数据分析指出,有机质每提高1个百分点,作物产量可增加430 kg/hm²,稳产性提高3.5%。同时,SOC是重要的有机碳库,在全球碳循环过程中发挥着重要作用。区域尺度SOC微生物分解率的微小变化,都将引起全球尺度的气候变化^[5]。不合理的农业管理措施使农田SOC含量较初始水平降低30%~60%,但是60%~70%已损失的SOC可以通过有机物归还、降低耕作强度等科学的管理措施重新被土壤固定^[6]。据CHENG等^[7]估算,我国农田土壤的生物物理固碳潜力为2.2~2.9 Pg C,其中保护性耕作的固碳潜力为0.62 Pg C。因此,合理的耕作和秸秆管理措施具有保障粮食安全和固碳减排等多重意义。

氮素是限制土壤生产力的重要因子,对作物生长和生理代谢起着重要作用。土壤氮素和SOC存在一定的耦合关系,氮素变化能够影响土壤吸收大气CO₂的能力,进而影响土壤固碳作用^[8],SOC水平也在氮素矿化、固定和反硝化作用中起重要作用^[9],其相互耦合作用对作物生产以及气候变化等具有重要意义^[10]。

免耕可以减少因耕作造成的SOC损失,被认为是农田固碳减排最有效的措施之一^[11-12]。HAO等^[13]试验研究表明,免耕0~60 cm土层碳储量较传统耕增加了 5.178×10^4 kg/hm²,SOC含量提高了56.07%。王淑兰等^[14]研究表明,与连续翻耕相比,免耕或者免耕结合其他耕作可以提高土壤氮储量,5年平均值为3.6%~11.1%。作物秸秆含有丰富的营养元素,较多研究表明,秸秆还田可以显著提高有机碳和全氮含量^[15-17],但可能具有较大的点位变异性^[18]。SINGH等^[19]则指出,通过减少耕作或秸秆管理措施增加表层土壤固碳的效果有限。

虽然免耕具有诸多优势,但是长期连续免耕存

在一系列问题,如土壤夯实、杂草和病虫害问题突出等^[20-21],因此部分学者对少耕展开研究^[20, 22-23]。长江中下游平原稻麦两熟区是中国重要粮食产区之一,已有研究表明,该区耕作方式和秸秆还田显著影响土壤容重、孔隙结构及土壤碳库和构成等^[24-26]。长期免耕会导致土壤板结、插秧困难、作物根系较浅,而过度耕作则会导致土壤肥力下降、有机质损耗、温室气体排放增加等问题。目前该地区有关耕作方式和秸秆还田对土壤碳库、氮库变化影响的研究不够充分,相关机理仍不清楚。本研究拟通过研究少耕、旋耕、翻耕及秸秆还田条件下耕层SOC、全氮含量和碳氮比及层化率、碳氮储量的变化情况,阐明土壤耕作对土壤碳氮固持效应的影响,为长江中下游平原麦稻两熟区农田土壤碳库和氮库管理及建立合理的耕作制度提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验于2013年秋季在江苏省泰州市姜堰区河横生态农业科技示范园(32°60'N, 120°14'E)进行。该区地处长江中下游平原东部,属于亚热带季风气候,夏季高温多雨,冬季温和少雨,年均气温14.5℃;全年积温(大于等于0℃)5 365.6℃;年降水量约为990 mm,年日照时数约为22 060 h。试验区土壤为普通简育水耕人为土,土壤质地为重黏土,试验前0~20 cm土层主要理化性状为:容重1.31 g/cm³、有机碳质量比21.06 g/kg、全氮质量比2.27 g/kg、速效钾质量比为119.17 mg/kg、速效磷质量比为49.74 mg/kg、pH值7.24。该区为中国主要的水稻-冬小麦一年两熟区。

1.2 试验设计

试验始于2013年10月,基于长期旋耕农田设置:①少耕秸秆还田(Minimum tillage, MT):水稻季免耕,小麦季每2年浅旋一次,稻麦秸秆全量还田。②翻耕秸秆还田(Conventional tillage, CT):水稻季翻耕,小麦季旋耕,稻麦秸秆全量还田。③旋耕秸秆还田(Rotary tillage, RT):水稻季旋耕,小麦季旋耕,稻麦秸秆全量还田。④翻耕秸秆不还田(Conventional tillage without straw retention, CT0):水稻季翻耕,小麦季旋耕,稻麦秸秆均不还田。浅旋深度8 cm,旋耕深度11 cm,翻耕深度18 cm。每个小区面积500 m²,重复3次,秸秆还田处理冬小麦秸秆

还田量 5 200 kg/hm² 左右,水稻秸秆还田量约 9 500 kg/hm²。水稻、小麦均采用联合收获机收获,根茬约为 30 cm。4 种处理的作物品种、灌溉量、施肥量均相同,冬小麦品种为郑麦 9 号,水稻品种为南粳 9108。冬小麦播种时施用有机肥(主要成分质量分数为:有机质 45%、N 2.5%、K 2.5%)1 500 kg/hm²,复合肥(主要成分质量分数为:N 15%、P 15%、K 15%)375 kg/hm²,分蘖期和拔节期分别施用尿素 312 kg/hm²。水稻插秧时施肥种类和数量同小麦播种时,插秧后第 10 天起每 10 d 施用尿素 250 kg/hm²,共 4 次。

1.3 样品采集与测定分析

土样于 2017 年 10 月水稻收获后采集,分 0 ~ 5 cm、5 ~ 10 cm、10 ~ 20 cm 3 个层次,每小区 4 个重复,同一深度的 4 个重复样品混合成一个样品,带回实验室自然风干,剔除石砾及残茬等杂物,过 0.25 mm 筛,用于土壤有机碳和全氮的测定。

土壤容重采用环刀法,冬小麦收获后用体积为 100 cm³的环刀,分 0 ~ 5 cm、5 ~ 10 cm、10 ~ 15 cm、15 ~ 20 cm 4 个土壤层次采集原状土样,重复 3 次,密封带回实验室,干燥称质量(105℃,24 h),测定土壤容重。

土壤有机碳含量用重铬酸钾(K₂Cr₂O₇)氧化外源加热法测定,全氮含量用凯氏消煮法测定^[27]。土壤碳氮比由土壤有机碳含量与全氮含量之比计算得出^[28],层化率通过由 0 ~ 5 cm 土层土壤有机碳含量、全碳含量或碳氮比和大于 5 cm 土层(5 ~ 10 cm 及 10 ~ 20 cm)土壤有机碳含量、全氮含量或碳氮比之比计算得出^[29]。

1.4 有机碳和全氮储量的计算

采用等质量法^[30]计算土壤有机碳和全氮储量。等质量土壤有机碳和全氮储量指各层土壤有机碳和全氮储量与增加土壤质量中有机碳和全氮储量之和,计算方法为

$$M_{element} = 0.001 \left[\sum_{i=1}^n M_{soil,i} c_i + \left(M_j - \sum_{i=1}^n M_{soil,i} \right) c_{extra} \right]$$

(1)

其中

$$M_{soil,i} = 100\,000 \rho_{b,i} T_i$$

(2)

式中 i ——土壤层次, $i = 1、2、3$ 时,分别表示 0 ~ 5 cm、0 ~ 10 cm、0 ~ 20 cm 土壤层次

$M_{element}$ ——等质量土壤有机碳或全氮储量, kg/hm²

M_j ——已确定的相等土壤质量,即 $j = 1、2、3$ 时,分别为 0 ~ 5 cm、0 ~ 10 cm、0 ~ 20 cm 土层不同耕作处理土壤质量的最大值,其相应的 n 分别为 1、2、3

$M_{soil,i}$ ——各层次的土壤质量,kg/hm²
 c_i ——各层次土壤有机碳或全氮含量,g/kg
 c_{extra} ——增加土壤质量部分的有机碳或全氮含量,g/kg
 $\rho_{b,i}$ ——各层次土壤容重,g/cm³
 T_i ——各层次土壤厚度^[31],m

1.5 数据分析

采用 SPSS 17.0 软件进行统计分析,用单因素方差分析(ANOVA)对不同处理的变量进行 LSD 显著性差异分析。

2 结果与分析

2.1 不同耕作方式下土壤容重的变化

各处理 0 ~ 20 cm 不同土层土壤容重如图 1 所示(不同的小写字母表示同一土层不同处理间差异达显著水平($P < 0.05$),下同)。可以看出,随着土层的加深,各处理土壤容重均不断增大,不同处理间土壤容重有明显差异。与 CT0、CT 和 RT 相比,MT 显著提高 0 ~ 10 cm 土壤容重($P < 0.05$),RT、CT 较 CT0 明显降低了 0 ~ 10 cm 的土壤容重。0 ~ 5 cm 土壤容重由大到小顺序为 MT、CT0、CT、RT,MT 较 CT0 提高了 13.18%,而 RT、CT 分别较 CT0 下降了 11.15% 和 2.92%。5 ~ 10 cm 土层各处理间呈现相似的规律。在 10 ~ 15 cm 和 15 ~ 20 cm 土层,RT 容重显著高于 CT 和 CT0,由大到小依次为 RT、MT、CT0、CT。各土层 CT 容重均低于 CT0,说明机械耕作促进了秸秆与土壤的混合,降低了土壤容重。

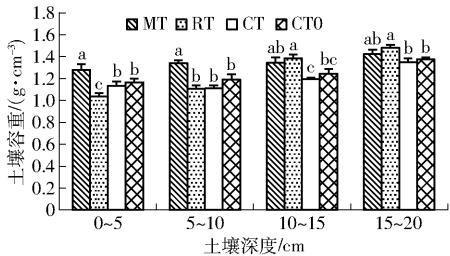


图 1 不同耕作处理的土壤容重

Fig. 1 Soil bulk density with different tillage treatments

2.2 不同耕作方式下土壤有机碳和全氮含量的变化

不同耕作方式下耕层土壤(0 ~ 20 cm)有机碳和全氮含量如图 2 所示,随着土层的加深,各处理有机碳含量均呈下降趋势。MT 显著($P < 0.05$)增加了 0 ~ 5 cm 土壤有机碳含量,分别比 RT、CT 和 CT0 提高 13.08%、18.40% 和 30.09%;与 CT0 相比,RT 显著提高了 5 ~ 10 cm 和 10 ~ 20 cm 土壤有机碳含量,CT 显著提高了 10 ~ 20 cm 土壤有机碳含量。5 ~ 10 cm 和 10 ~ 20 cm MT 有机碳含量与其他各处理之间的差异均不显著。

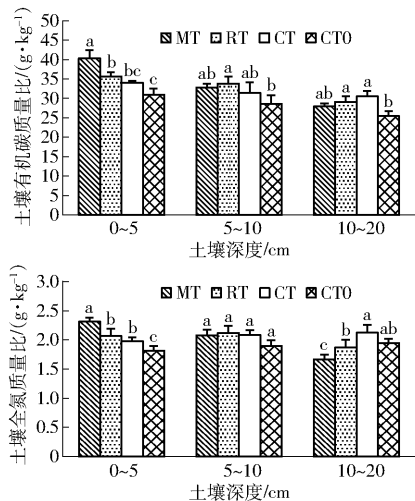


图2 不同耕作处理不同土层土壤有机碳和全氮质量比
Fig.2 Depth distribution of soil organic carbon and total N concentrations with different tillage treatments

0~5 cm 土壤全氮含量 MT 分别比 RT、CT 和 CT0 提高 11.93%、17.03% 和 31.19%，差异均达显著水平 ($P<0.05$)。10~20 cm 土壤全氮含量 CT 显著高于 RT 和 MT，分别提高了 13.35% 和 27.40%，同时 CT0 比 MT 高 16.80%。

2.3 不同耕作方式下土壤碳氮比的变化

各耕作处理 0~20 cm 不同层次土壤碳氮比为 13.07~17.56 (图 3)，且有随着土层加深而降低的趋势。0~5 cm 和 5~10 cm 土壤碳氮比各处理间均无显著性差异，10~20 cm 各处理土壤碳氮比由大到小为 MT、RT、CT、CT0，MT、RT 和 CT 处理碳氮比分别比 CT0 提高 28.23%、19.00% 和 9.97%，其中 MT 与 CT、CT0 之间，RT、CT 和 CT0 之间差异达显著水平 ($P<0.05$)。

2.4 不同耕作方式下土壤有机碳含量、全氮含量和碳氮比层化率的变化

MT 显著提高表层 0~5 cm 对其他层次有机碳和全氮层化率 ($P<0.05$)，MT 有机碳和全氮层化率分别比其他处理提高 13.27%~29.35% 和 13.91%~49.10% (图 4)。然而，MT 并未提高土壤碳氮比层

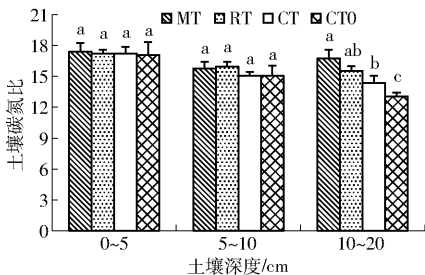


图3 不同耕作处理不同土层土壤碳氮比
Fig.3 Depth distribution of soil C: N ratios with different tillage treatments

化率。0~5 cm 土层、5~10 cm 土层碳氮比层化率 MT 低于 CT 和 CT0，但差异不显著，仅 RT 显著低于 CT0。0~5 cm 土层、10~20 cm 土层碳氮比层化率以 MT 最低，分别比 RT、CT 和 CT0 降低 6.26%、13.24% ($P<0.05$) 和 22.67% ($P<0.05$)。

2.5 不同耕作方式下土壤有机碳和全氮储量的变化

MT 因 0~5 cm、0~10 cm、0~20 cm 土层的土壤质量最大，故将其作为 M_j ($j=1,2,3$)，计算出各处理的等质量土壤有机碳和全氮储量 (表 1)。耕作方式和秸秆还田对土壤有机碳储量影响显著，且在不同土壤深度表现相似的趋势，各处理在 0~5 cm、0~10 cm、0~20 cm 土层土壤有机碳储量由大到小顺序为 MT、RT、CT、CT0。MT 有机碳储量在各土层均高于其他处理，但随着土壤深度加深，MT 与其他处理间的差异逐渐减小，在 0~5 cm 土层，MT 有机碳储量显著高于其他所有处理 ($P<0.05$)，在 0~10 cm 土层，MT 显著高于 CT 和 CT0，在 0~20 cm 土层，MT 显著高于 CT0。随着土壤深度的加深，各处理土壤有机碳储量的增加量有所不同，其中 0~20 cm 土层以 CT 的增加量最大，为 $4.229 \times 10^4 \text{ kg/hm}^2$ ，这与 10~20 cm CT 处理的有机碳含量相对较高有关。秸秆还田对有机碳储量影响显著，0~5 cm、0~10 cm、0~20 cm 土层有机碳储量 CT 分别比 CT0 提高 9.88%、9.80% 和 14.47%。

耕作方式显著影响土壤全氮储量，各处理 0~5 cm、0~10 cm 土层全氮储量由大到小顺序为 MT、

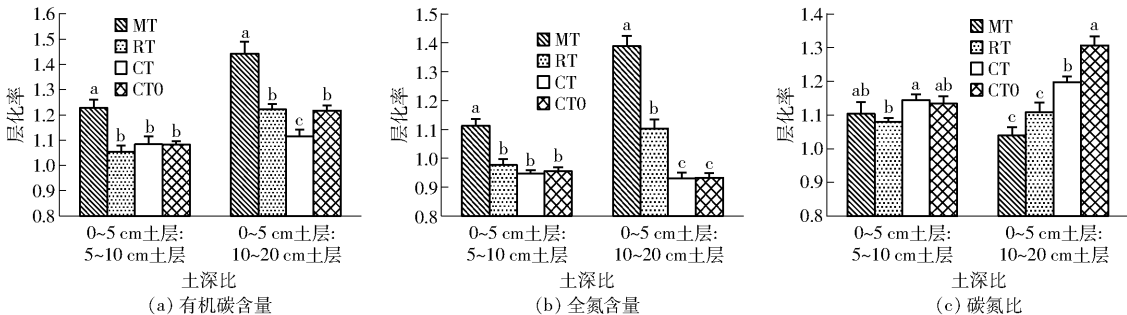


图4 不同耕作方式土壤有机碳含量、全氮含量和碳氮比的层化率
Fig.4 Stratification ratios of soil organic carbon concentrations, total N concentrations and C: N ratios with different tillage treatments

表 1 不同耕作方式土壤等质量有机碳和全氮储量

Tab.1 Soil organic carbon and total N stocks with different tillage treatments by using equivalent soil mass methods

土壤深度/ cm	土壤有机碳储量/(kg·hm ⁻²)				土壤全氮储量/(kg·hm ⁻²)			
	MT	RT	CT	CT0	MT	RT	CT	CT0
0~5	(2.577×10 ⁴) ^a	(2.279×10 ⁴) ^b	(2.176×10 ⁴) ^{bc}	(1.981×10 ⁴) ^c	(1.48×10 ³) ^a	(1.32×10 ³) ^b	(1.26×10 ³) ^b	(1.13×10 ³) ^c
0~10	(4.789×10 ⁴) ^a	(4.547×10 ⁴) ^{ab}	(4.286×10 ⁴) ^b	(3.904×10 ⁴) ^c	(2.88×10 ³) ^a	(2.74×10 ³) ^{ab}	(2.66×10 ³) ^{bc}	(2.40×10 ³) ^c
0~20	(8.687×10 ⁴) ^a	(8.600×10 ⁴) ^a	(8.518×10 ⁴) ^a	(7.441×10 ⁴) ^b	(5.20×10 ³) ^{ab}	(5.34×10 ³) ^{ab}	(5.60×10 ³) ^a	(5.09×10 ³) ^b

注:6.395×10⁵、1.31×10⁶、2.694×10⁶ kg/hm²分别为0~5 cm、0~10 cm和0~20 cm土层的最大土壤质量,即M_j(j=1、2、3)。表中同一行的不同小写字母表示同一土层不同处理间的差异达显著水平(P<0.05)。

RT、CT、CT0,但是0~20 cm土层为CT、RT、MT、CT0。在0~5 cm土层,MT全氮储量显著高于其他所有处理;0~10 cm土层,MT显著高于CT和CT0;0~20 cm土层,MT低于RT和CT,但与各处理的差异均不显著。与有机碳储量相似,随着土层加深,CT 0~20 cm的全氮储量增加量最大,为4.33×10³ kg/hm²。秸秆还田对全氮储量影响显著,0~5 cm、0~10 cm、0~20 cm土层全氮储量CT分别比CT0提高12.10%、10.92%和9.97%。

3 讨论

3.1 耕作方式对土壤有机碳含量、全氮含量和碳氮比的影响

从图2可看出,随着土层的加深,各处理耕层0~20 cm土壤有机碳含量均不断下降,与已有研究相似^[13,20,31]。耕作方式对有机碳在不同层次的分布有显著影响,MT较其他处理显著(P<0.05)增加了表层0~5 cm土壤有机碳含量,与部分已有研究结果一致^[32-33],这主要是由于MT秸秆主要覆盖在表层,秸秆腐解后主要进入0~5 cm土壤,同时MT可以促进团聚体的形成,提高土壤容重(图1),降低了土壤孔隙度,有利于降低有机碳的分解而增加有机碳含量,而耕作提高了土壤的通气性,使得有机碳更容易被分解^[34]。5~10 cm和10~20 cm有机碳含量分别以RT和CT最高,主要是因为RT和CT的耕作深度分别达到11 cm和18 cm,促使秸秆与该层次土壤的混合,与胡乃娟等^[25]在稻麦轮作区的研究一致。也有研究表明,免耕可以提高0~10 cm有机碳含量^[31,35],甚至达到80 cm^[36]。与CT0相比,CT增加了0~20 cm有机碳含量,并在10~20 cm达显著水平,说明秸秆还田可以显著提高土壤有机碳含量,与部分报道一致^[37-38]。然而,有研究也表明秸秆还田对土壤有机碳的固存无显著影响,甚至导致土壤有机碳含量的降低,可能引发了启动效应^[37,39]。

较多研究认为,免耕等保护性耕作有利于提高表层土壤全氮含量,但是对于深层土壤全氮含量是

否增加的看法并不一致^[40]。HUANG等^[41]认为免耕能够提高0~5 cm土壤全氮含量,但是5~10 cm全氮含量则低于传统耕作。本研究结果表明,MT显著提高0~5 cm土壤全氮含量,而5~10 cm各处理全氮含量无显著差异,10~20 cm则显著低于其他处理,主要原因是不同耕作处理促进了不同层次秸秆与土壤的混合,提高了相应层次的氮素供给。QIU等^[42]在吉林旱作农田的研究以及XUE等^[43]在双季稻田的研究表明,不同耕作处理土壤全氮含量均随土层加深逐渐下降。本研究中,随着土层的加深,MT全氮含量逐渐降低,RT先上升再下降,而CT和CT0则逐渐上升,具体原因尚不明确。VIGIL等^[44]研究认为,投入碳氮比较高的物料能够增加土壤氮素固定。本试验长期施用高碳氮比的有机肥,有利于氮素固定,可能会导致RT和CT全氮含量随深度加深而增加。0~20 cm不同土层CT全氮含量比CT0提高9.08%~12.10%,说明秸秆还田有利于提高土壤全氮含量,与已有研究结果一致^[43,45]。

本试验土壤碳氮比相对较高,为13.07~17.56,主要因为长期施用有机肥。秸秆还田提高土壤碳氮比;除了MT 10~20 cm碳氮比高于5~10 cm,各处理碳氮比均随着土层加深而降低,与XUE等^[43]研究基本一致。本研究中0~5 cm和5~10 cm土壤碳氮比各处理间均无显著性差异,10~20 cm各处理土壤碳氮比由大到小为MT、RT、CT,CT显著低于MT,可能是因为CT深层土壤较高的已腐解秸秆含量降低了碳氮比^[45]。

3.2 耕作方式对土壤有机碳含量、全氮含量和碳氮比层化率的影响

MT显著提高(P<0.05)表层0~5 cm和其他层次有机碳和全氮层化率,与已有报道一致^[46-47],主要是因为MT秸秆覆盖于土壤表面,导致表层土壤有机碳和全氮相对富集、深层土壤有机碳和全氮相对减少,从而使表层与各深层土壤有机碳和全氮层化率更大。而RT和CT秸秆在耕层空间分布更加均匀,层化率则相对较低。秸秆还田对土壤有机碳和全氮层化率的影响并不显著,这可能是由于秸

秆还田与不还田处理均为翻耕措施,土壤有机碳和全氮在耕层分布规律较为一致^[40]。

CT0 提高表层 0~5 cm 与其他层次,特别是与 10~20 cm 土层碳氮比层化率,MT 0~5 cm 土层、10~20 cm 土层碳氮比层化率显著低于 CT 和 CT0,主要原因是随着耕作强度增强,土壤碳氮比随土层加深而下降的速度越快(图 3)。然而,ZHANG 等^[45]则认为秸秆还田有利于增加土壤碳氮比层化率,因为秸秆还田处理秸秆输入的碳氮比比秸秆不还田处理根系输入的碳氮比高。

3.3 耕作方式对土壤有机碳、全氮储量的影响

本文以 MT 处理土壤质量为参考,通过等质量法计算土壤有机碳和全氮储量。结果表明,MT 较其他处理增加了 0~20 cm 的有机碳储量,与多数研究结果一致^[34,48]。秸秆还田条件下,MT 处理 0~5 cm 有机碳储量显著高于其他处理($P < 0.05$),随着深度加深,MT 与其他处理之间的差异逐渐减小,0~10 cm 碳储量 MT 仅显著高于 CT,0~20 cm 碳储量 MT 与 RT、CT 之间并无显著差异。这可能是因为 MT 仅显著提高 0~5 cm 有机碳含量,而随着土壤深度的增加,MT 有机碳含量快速下降,而 RT 和 CT 耕层有机碳含量相对均匀。魏燕华等^[31]对中国华北麦玉两熟区研究表明,MT 仅增加了表层 10 cm 有机碳储量,20~30 cm 及 30~50 cm 的土壤有机碳储量较 CT 均有一定程度的下降,从整个土层(0~50 cm)来看,MT 较 CT 未表现出明显的固碳优势。但是 XU 等^[48]对中国南方双季稻田的研究却表明,耕作措施对碳储量的影响可以达到 80 cm,二者差异可能和土地利用方式有关。从表 1 还可看出,各层次 CT 有机碳储量均高于 CT0,并且在 0~10 cm 和 0~20 cm 差异显著($P < 0.05$),说明秸秆还田增

加土壤有机碳输入,有利于提高耕层土壤有机碳储量。

一般认为,免耕等保护性耕作有利于提高土壤氮储量^[14,49],并且主要体现在上层土壤中,对深层土壤影响较小^[50]。本研究结果表明,MT 显著提高 0~5 cm、0~10 cm 土壤氮储量,但是由于其 10~20 cm 土壤全氮含量显著低于 RT 和 CT,导致其 0~20 cm 土壤氮储量低于 RT 和 CT。然而范如芹等^[51]研究表明,免耕对氮储量的提升效果并不明显,并且与作物轮作方式有关。秸秆还田有效提高 0~20 cm 各层次土壤氮储量,和已有报道一致^[45,52],主要因为秸秆还田可以促进氮素固定,提高土壤氮的积累^[53]。

4 结论

(1) 秸秆还田下,耕作方式对不同土层土壤有机碳和全氮含量影响显著,这主要与耕作深度有关。MT、RT、CT 分别提高 0~5 cm、5~10 cm 和 10~20 cm 土层有机碳和全氮含量。耕作方式主要影响 10~20 cm 土层土壤碳氮比,且耕作强度越大碳氮比越低。秸秆还田有利于提高 0~20 cm 土层土壤有机碳、全氮含量和碳氮比。

(2) MT 显著提高 0~5 cm 土层和其他各层次有机碳和全氮含量层化率,秸秆还田对土壤有机碳和全氮含量层化率影响不显著。耕作方式显著影响 0~5 cm 土层、10~20 cm 土层碳氮比层化率,碳氮比层化率随着耕作强度增加而增加。

(3) MT 提高了 0~20 cm 土层土壤有机碳储量和 0~10 cm 土层土壤全氮储量,有利于相应层次有机碳和氮的固定积累,但是 0~20 cm 土层土壤氮储量低于 RT 和 CT。秸秆还田显著提高 0~20 cm 土层有机碳和全氮储量,具有良好的碳氮固持效应。

参 考 文 献

- BARTON L, HOYLE F C, STEFANOVA K T, et al. Incorporating organic matter alters soil greenhouse gas emissions and increases grain yield in a semi-arid climate[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2016, 231: 320–330.
- JIN X, AN T, GALL A R, et al. Enhanced conversion of newly-added maize straw to soil microbial biomass C under plastic film mulching and organic manure management[J]. *Geoderma*, 2018, 313: 154–162.
- LOVELAND P, WEBB J. Is there a critical level of organic matter in the agricultural soils of temperate regions: a review[J]. *Soil and Tillage Research*, 2003, 70(1): 1–18.
- PAN G, SMITH P, PAN W. The role of soil organic matter in maintaining the productivity and yield stability of cereals in China[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2009, 129(1): 344–348.
- ALI R S, KANDELER E, MARHAN S, et al. Controls on microbially regulated soil organic carbon decomposition at the regional scale[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, 118: 59–68.
- LAL R. Soil carbon dynamics in cropland and rangeland[J]. *Environmental Pollution*, 2002, 116(3): 353–362.
- CHENG K, ZHENG J, NAYAK D, et al. Re-evaluating the biophysical and technologically attainable potential of topsoil carbon sequestration in China's cropland[J]. *Soil Use & Management*, 2013, 29(4): 501–509.
- GRUBER N, GALLOWAY J N. An earth-system perspective of the global nitrogen cycle[J]. *Nature*, 2008, 451(7176): 293–296.
- MAGILL A H, ABER J D. Dissolved organic carbon and nitrogen relationships in forest litter as affected by nitrogen deposition[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32(5): 603–613.

- 10 LAL R. Soil carbon sequestration to mitigate climate change[J]. *Geoderma*, 2004, 123(1–2): 1–22.
- 11 GHIMIRE R, LAMICHHANE S, ACHARYA B S, et al. Tillage, crop residue, and nutrient management effects on soil organic carbon in rice-based cropping systems: a review[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2017, 16(1): 1–15.
- 12 LU X, LIAO Y. Effect of tillage practices on net carbon flux and economic parameters from farmland on the Loess Plateau in China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 162: 1617–1624.
- 13 HAO Q, CHENG B, JIANG C. Long-term tillage effects on soil organic carbon and dissolved organic carbon in a purple paddy soil of Southwest China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(5): 260–265.
- 14 王淑兰, 王浩, 李娟, 等. 不同耕作方式下长期秸秆还田对旱作春玉米田土壤碳、氮、水含量及产量的影响[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(5): 1530–1540.
- WANG Shulan, WANG Hao, LI Juan, et al. Effects of long-term straw mulching on soil organic carbon, nitrogen and moisture and spring maize yield on rain-fed croplands under different patterns of soil tillage practice[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(5): 1530–1540. (in Chinese)
- 15 POEPLAU C, KÄTTERER T, BOLINDER M A, et al. Low stabilization of aboveground crop residue carbon in sandy soils of Swedish long-term experiments[J]. *Geoderma*, 2015, 237–238: 246–255.
- 16 LI Z, LAI X, YANG Q, et al. In search of long-term sustainable tillage and straw mulching practices for a maize-winter wheat-soybean rotation system in the Loess Plateau of China[J]. *Field Crops Research*, 2018, 217: 199–210.
- 17 ZHANG P, CHEN X, WEI T, et al. Effects of straw incorporation on the soil nutrient contents, enzyme activities, and crop yield in a semiarid region of China[J]. *Soil & Tillage Research*, 2016, 160: 65–72.
- 18 WANG S, ZHAO Y, WANG J, et al. The efficiency of long-term straw return to sequester organic carbon in Northeast China's cropland[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2018, 17(2): 436–448.
- 19 SINGH P, HEIKKINEN J, KETOJA E, et al. Tillage and crop residue management methods had minor effects on the stock and stabilization of topsoil carbon in a 30-year field experiment[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 518–519: 337–344.
- 20 TIAN S, NING T, WANG Y, et al. Crop yield and soil carbon responses to tillage method changes in North China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2016, 163: 207–213.
- 21 MEHRA P, BAKER J, SOJKA R E, et al. A review of tillage practices and their potential to impact the soil carbon dynamics [J]. *Advances in Agronomy*, 2018, 150: 185–230.
- 22 SUN H, KOAL P, LIU D, et al. Soil microbial community and microbial residues respond positively to minimum tillage under organic farming in Southern Germany[J]. *Applied Soil Ecology*, 2016, 108: 16–24.
- 23 WOLFF M W, ALSINA M M, STOCKERT C M, et al. Minimum tillage of a cover crop lowers net GWP and sequesters soil carbon in a California vineyard[J]. *Soil and Tillage Research*, 2018, 175: 244–254.
- 24 张翰林, 郑宪清, 何七勇, 等. 不同秸秆还田年限对稻麦轮作土壤团聚体和有机碳的影响[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(4): 216–220.
- ZHANG Hanlin, ZHENG Xianqing, HE Qiyong, et al. Effect of years of straw returning on soil aggregates and organic carbon in rice-wheat rotation systems[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 30(4): 216–220. (in Chinese)
- 25 胡乃娟, 张四伟, 杨敏芳, 等. 秸秆还田与耕作方式对稻麦轮作农田土壤碳库及结构的影响[J]. *南京农业大学学报*, 2013, 36(4): 7–12.
- HU Naijuan, ZHANG Siwei, YANG Minfang, et al. Effects of different tillage and straw return on soil carbon pool and soil structure under rice-wheat rotation system[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2013, 36(4): 7–12. (in Chinese)
- 26 房焕, 李奕, 周虎, 等. 稻麦轮作区秸秆还田对水稻土结构的影响[J/OL]. *农业机械学报*, 2018, 49(4): 297–302. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180434&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.04.034.
- FANG Huan, LI Yi, ZHOU Hu, et al. Effects of straw incorporation on paddy soil structure in rice-wheat rotation system[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(4): 297–302. (in Chinese)
- 27 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- 28 BLANCOCANQUI H, LAL R. No-tillage and soil-profile carbon sequestration: an on-farm assessment[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2008, 72(3): 693–701.
- 29 FRANZLUEBBERS A J. Soil organic matter stratification ratio as an indicator of soil quality[J]. *Soil & Tillage Research*, 2002, 66(2): 95–106.
- 30 ELLERT B H, BETTANY J R. Calculation of organic matter and nutrients stored in soils under contrasting management regimes. [J]. *Revue Canadienne De La Science Du Sol*, 1995, 75(4): 529–538.
- 31 魏燕华, 赵鑫, 翟云龙, 等. 耕作方式对华北农田土壤固碳效应的影响[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(17): 87–95.
- WEI Yanhua, ZHAO Xin, ZHAI Yunlong, et al. Effects of tillages on soil organic carbon sequestration in North China Plain[J]. *Transactions of the CSAE*, 2013, 29(17): 87–95. (in Chinese)
- 32 PUGET P, LAL R. Soil organic carbon and nitrogen in a Mollisol in central Ohio as affected by tillage and land use[J]. *Soil and Tillage Research*, 2005, 80(1): 201–213.
- 33 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.
- 34 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.
- 35 王旭东, 张霞, 王彦丽, 等. 不同耕作方式对黄土高原黑垆土有机碳库组成的影响[J/OL]. *农业机械学报*, 2017, 48(11): 229–237. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20171128&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.11.028.
- WANG Xudong, ZHANG Xia, WANG Yanli, et al. Effects of different tillage methods on soil organic carbon pool composition in dark loessial soil on loess plateau[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(11): 229–237. (in Chinese)
- 36 杨永辉, 武继承, 丁晋利, 等. 长期免耕对不同土层土壤结构与有机碳分布的影响[J/OL]. *农业机械学报*, 2017, 48(9): 173–182. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170922&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.09.022.
- YANG Yonghui, WU Jicheng, DING Jinli, et al. Effects of long-term no-tillage on soil structure and organic carbon distribution in different soil layers[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(9): 173–182. (in Chinese)
- 37 李新华, 郭洪海, 朱振林, 等. 不同秸秆还田模式对土壤有机碳及其活性组分的影响[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(9): 130–135.
- LI Xinhua, GUO Honghai, ZHU Zhenlin, et al. Effects of different straw return modes on contents of soil organic carbon and fractions of soil active carbon[J]. *Transactions of the CSAE*, 2016, 32(9): 130–135. (in Chinese)
- 38 ZHAO H, SHAR A G, LI S, et al. Effect of straw return mode on soil aggregation and aggregate carbon content in an annual maize-wheat double cropping system[J]. *Soil and Tillage Research*, 2018, 175: 178–186.
- 39 YEMADJE P L, CHEVALLIER T, GUIBERT H, et al. Wetting-drying cycles do not increase organic carbon and nitrogen mineralization in soils with straw amendment[J]. *Geoderma*, 2017, 304: 68–75.
- 40 薛建福. 耕作措施对南方双季稻田碳、氮效应的影响[D]. 北京: 中国农业大学, 2015.
- XUE Jianfu. Effects of tillage on soil carbon and nitrogen in double paddy cropping system of Southern China[D]. Beijing: China Agricultural University, 2015. (in Chinese)
- 41 HUANG M, ZHOU X, CAO F, et al. Long-term effect of no-tillage on soil organic carbon and nitrogen in an irrigated rice-based cropping system[J]. *Paddy & Water Environment*, 2016, 14(2): 367–371.
- 42 QIU S, GAO H, ZHU P, et al. Changes in soil carbon and nitrogen pools in a Mollisol after long-term fallow or application of chemical fertilizers, straw or manures[J]. *Soil and Tillage Research*, 2016, 163: 255–265.
- 43 XUE J, PU C, LIU S, et al. Effects of tillage systems on soil organic carbon and total nitrogen in a double paddy cropping system in Southern China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2015, 153: 161–168.
- 44 VIGIL M F, KISSEL D E. Equations for estimating the amount of nitrogen mineralized from crop residues[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1991, 55(3): 757–761.
- 45 ZHANG P, WEI T, LI Y, et al. Effects of straw incorporation on the stratification of the soil organic C, total N and C:N ratio in a semiarid region of China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2015, 153: 28–35.
- 46 LOU Y, XU M, CHEN X, et al. Stratification of soil organic C, N and C:N ratio as affected by conservation tillage in two maize fields of China[J]. *Catena*, 2012, 95: 124–130.
- 47 CORRAL-FERNÁNDEZ R, PARRAS-ALCÁNTARA L, LOZANO-GARCÍA B. Stratification ratio of soil organic C, N and C:N in Mediterranean evergreen oak woodland with conventional and organic tillage[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2013, 164: 252–259.
- 48 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.
- 49 许菁, 李晓莎, 许姣姣, 等. 长期保护性耕作对麦-玉两熟农田土壤碳氮储量及固碳固氮潜力的影响[J]. *水土保持学报*, 2015, 29(6): 191–196.
- XU Jing, LI Xiaosha, XU Jiaojiao, et al. Effects of long-term conservation tillage on soil organic carbon and nitrogen storages, soil carbon sequestration potential and nitrogen fixation potential in wheat-maize crop system[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 29(6): 191–196. (in Chinese)
- 50 胡宁, 娄翼来, 梁雷. 保护性耕作对土壤有机碳、氮储量的影响[J]. *生态环境学报*, 2010, 48(1): 223–226.
- HU Ning, LOU Yilai, LIANG Lei. Soil organic C and N stocks as affected by the conservation tillage[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 48(1): 223–226. (in Chinese)
- 51 范如芹, 梁爱珍, 杨学明, 等. 耕作与轮作方式对黑土有机碳和全氮储量的影响[J]. *土壤学报*, 2011, 48(4): 788–796.
- FAN Ruqin, LIANG Aizheng, YANG Xueming, et al. Effects of tillage and rotation on soil organic carbon and total nitrogen stocks of a black soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2011, 48(4): 788–796. (in Chinese)
- 52 YANG J, GAO W, REN S. Long-term effects of combined application of chemical nitrogen with organic materials on crop yields, soil organic carbon and total nitrogen in fluvo-aquic soil[J]. *Soil & Tillage Research*, 2015, 151: 67–74.
- 53 CAO Y, SUN H, ZHANG J, et al. Effects of wheat straw addition on dynamics and fate of nitrogen applied to paddy soils[J]. *Soil & Tillage Research*, 2018, 178: 92–98.