

DOI: 10.20103/j.stxb.202403170547

袁玉玉, 王洋, 崔政武, 徐光辉, 王楠, 徐林浩. 黑土区不同耕作方式对土壤有机碳及其组分的影响. 生态学报, 2025, 45(7): 3183-3191.

Yuan Y Y, Wang Y, Cui Z W, Xu G H, Wang N, Xu L H. The effect of different tillage methods on soil organic carbon and its components in the black soil area of Northeast China. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(7): 3183-3191.

黑土区不同耕作方式对土壤有机碳及其组分的影响

袁玉玉^{1,2}, 王 洋^{1,*}, 崔政武¹, 徐光辉¹, 王 楠^{1,2}, 徐林浩^{1,3}

1 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 湿地生态与环境重点实验室, 长春 130102

2 中国科学院大学, 北京 100049

3 延边大学融合学院, 延吉 136200

摘要: 针对以秸秆覆盖还田等保护性耕作为主的东北黑土有机碳的赋存与变化尚不清楚, 以休耕轮作 (包含三个条带: 种植带、休闲带、覆盖带)、常规耕作和免耕三种耕作措施的长期定位试验为基础, 研究土壤有机碳 (SOC) 及溶解性有机碳 (DOC)、易氧化有机碳 (ROC)、轻组有机碳 (LFOC)、重组有机碳 (HFOC)、颗粒态有机碳 (POC) 和矿物结合态有机碳 (MAOC) 的变化特征。结果表明, SOC 及组分随着土壤深度的增加呈下降趋势, 20—40cm 土壤各处理的 SOC 及组分含量差异不显著; 休耕轮作 0—20cm SOC 含量较高, 较常规耕作和免耕高 17.33%—21.57%。休耕轮作种植带和免耕 0—20cm 土壤 ROC 和 DOC 含量最高, 休闲带 0—20cm POC 和 LFOC 含量最高。休耕轮作显著促进 0—10cm 土壤 POC 含量增加, 对下层土壤的作用不明显, 但促进了各层次土壤 LFOC 含量不同程度的增加。休耕轮作表层土壤 POC/SOC、LFOC/SOC 均高于常规耕作, 秸秆覆盖还田有助于 SOC 组分组成的优化。SOC 与 ROC、DOC、POC、MAOC、HFOC 均呈极显著相关关系 ($P < 0.01$), 与 LFOC 呈显著相关关系 ($P < 0.05$), 表明活性有机碳组分受到 SOC 含量及耕作方式的显著影响, 休耕轮作和免耕显著提高了 0—20cm 土壤活性有机碳组分含量, 也改善了 SOC 不同组分结构比例, 有助于土壤有效养分的提升。

关键词: 黑土; 休耕轮作; 有机碳; 有机碳组分; 秸秆覆盖

The effect of different tillage methods on soil organic carbon and its components in the black soil area of Northeast China

YUAN Yuyu^{1,2}, WANG Yang^{1,*}, CUI Zhengwu¹, XU Guanghui¹, WANG Nan^{1,2}, XU Linhao^{1,3}

1 Northeast Institute of Geography and Agricultural Ecology, Chinese Academy of Sciences, Key Laboratory of Wetland Ecology and Environment, Changchun 130102, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 Yanbian University Fusion College, Yanji 136200, China

Abstract: The long-term effects of different tillage practices on soil organic carbon accumulation and transformation in the black soil remain poorly understood. This study aims to fill this knowledge gap by examining how various tillage methods affect soil carbon content over time, with a focus on the implications for soil health and agricultural sustainability. Based on a long-term field experiment of fallow crop rotation (including three zones: crop zone, fallow zone, and mulch zone), conventional tillage, and no-tillage, the variation characteristics of soil organic carbon (SOC) and its different components, including dissolved organic carbon (DOC), readily oxidizable carbon (ROC), light fraction organic carbon (LFOC), heavy fraction organic carbon (HFOC), particulate organic carbon (POC), and mineral-associated organic carbon (MAOC) were investigated. The results showed that: The contents of SOC and its components decreased with the increasing

基金项目: 吉林省自然科学基金 (YDZJ202201ZYTS529); 国家基础资源调查专项 (2021FY100402); 吉林省科技发展计划项目 (20210203005SF)

收稿日期: 2024-03-17; **网络出版日期:** 2025-01-02

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wangyangw@iga.ac.cn

of soil depth, with no significant differences in SOC and component concentrations observed among the 20—40cm soil layer across all treatments. This suggests that the upper soil layers are more dynamic in terms of carbon cycling and are more influenced by tillage practices. The SOC contents in the 0—20cm soil layer for fallow crop rotation was 17.33%—21.57% higher than those of conventional tillage and no-tillage. The ROC and DOC contents in 0—20cm soil for crop zone of fallow crop rotation and no-tillage were high, whereas POC and LFOC contents in fallow zone of fallow crop rotation were high. Fallow crop rotation significantly enhanced the increase in POC content in the 0—10cm soil layer, with less effect on subsoil, and it increased LFOC content across all soil layers to varying extents. The POC/SOC and LFOC/SOC for the surface soil layer of the fallow crop rotation were all higher than those in the conventional tillage, indicating the straw mulch was helpful to optimize SOC component composition. There were significant correlations between SOC and ROC, DOC, POC, MAOC and HFOC ($P<0.01$) and LFOC ($P<0.05$), indicating that the active organic carbon components were significantly affected by SOC and tillage methods. These correlations suggest that tillage practices not only influence the total SOC content but also affect the dynamics of different carbon pools, which can have long-term implications for soil carbon storage and nutrient cycling. Fallow crop rotation and no-tillage methods could significantly increase the active organic carbon contents in 0—20cm soil layer and improve the proportion of SOC component structure, thereby contributing to the accumulation of available soil nutrients.

Key Words: black soil; fallow crop rotation; soil organic carbon; organic carbon fractions; straw mulch

土壤碳库是陆地生态系统中最大的碳库,土壤碳库微小的变化都会对大气 CO_2 和全球气候变化产生巨大影响,在调节全球碳循环中具有重要地位^[1]。土壤有机碳(Soil Organic Carbon, SOC)赋存及其对全球变化的响应是生物地球化学领域研究的热点,受到国内外学者的广泛关注,SOC 库由不同稳定性及周转速率的多种功能碳库组成^[2],依据实践需要主要划分为物理分组、化学分组与生物分组,人类耕作活动等外界因素影响下,碳库组分与分子组成等属性会发生显著变化。SOC 的物理分组包括密度分组、粒径分组、团聚体分组,其中密度分组可将 SOC 分为轻组有机碳(Light Fraction Organic Carbon, LFOC)和重组有机碳(Heavy Fraction Organic Carbon, HFOC),通常用密度浮选分离法得到 LFOC,可识别不同分解阶段的植物残体组成,LFOC 仅占 SOC 的一小部分,但 LFOC 周转速度快,是不稳定有机碳的良好指标,而 HFOC 的分解速率非常缓慢^[3],是稳定的有机碳库^[4]。粒径分组可分为颗粒态有机碳(Particulate Organic Carbon, POC, $>53\mu\text{m}$)和矿物结合态有机碳(Mineral-associated Organic Carbon, MAOC, $<53\mu\text{m}$),POC 的周转时间一般小于十年,而 MAOC 的周转时间可达数百年^[5];两者在成因、周转和功能方面具有明显差异而成为解释 SOC 库和土壤结构关系的理想方式^[6]。化学分组是基于 SOC 在提取剂中的溶解性、水解性和化学反应性可分为溶解性有机碳(Dissolved Organic Carbon, DOC)、易氧化有机碳(Readily Oxidizable Carbon, ROC)等^[7],DOC 是土壤微生物生长、分解 SOC 的重要能源;而 ROC 是易于分解的有机碳,可基本区分土壤稳定性有机碳^[8],并对外部环境的响应非常敏感,可不同程度上反映 SOC 的有效性和时效性^[9]。

作为世界四大黑土区之一,东北黑土区在维持我国农业可持续生产及保障粮食安全等方面发挥了重要作用,然而由于不合理的耕作制度,黑土肥力退化严重,SOC 含量有所下降^[10]。保护性耕作的显著特征是秸秆覆盖、轮作、减少耕作频率,通过增加地表覆盖与土壤含水率,加强表层土壤抗蚀能力,提升 SOC 含量^[11]。长期秸秆还田能显著提高 POC 含量,免耕结合秸秆还田能降低 LFOC 的分解速率,增加活性有机碳组分,提高土壤肥力^[12]。目前,关于保护性耕作对黑土区土壤物理性质与养分等方面的研究已有较多报道,而关于保护性耕作对 SOC 组分特征及其变化的研究较少,需进行深入系统的探讨。本研究采用多种有机碳分组方法,以传统耕作为对照,探讨免耕、休耕轮作、秸秆还田等处理下对 SOC 及其组分的稳定性影响,对预测长期保护性耕作下东北黑土有机碳的固存特征有重要意义。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验区位于吉林省长春市中国科学院东北地理与农业生态研究所黑土农业试验基地(125°33′28″E, 44°12′21″N)。该区属北温带大陆性季风半湿润气候,年平均温度和日照时数分别为 4.9℃ 和 2432.9h;年平均降水 516.4mm,主要集中在 4—9 月,雨热同期。长期定位试验开始前主要以玉米连作为主,耕作方式为多年连续垄距(1.6m)的传统模式,土壤类型为中层黑质壤土。

1.2 试验设置与样品采集

试验始于 2006 年 5 月,采用休耕轮作模式种植玉米。试验处理如下:(1)休耕轮作:大垄间距为 1.6m;大垄由两个小垄组成,其间距为 0.4m;株距为 0.14—0.15m,种植密度 6.5—7.0 万株/hm²。第一年秋收时,留茬高度 0.35m,将剩余秸秆有序摆放在 0.4m 小垄的玉米根茬中间,堆放高度不超过根茬高度;第二年耕作垄的位置在第一年留的根茬一侧 0.26m 处;第三年的垄在第二年留的根茬一侧 0.26m 处(图 1),第四年的耕作垄回到第一年的位置上。采样时各处理的休耕轮作情况为:①种植带,为休闲两年的秸秆覆盖带。13 年间共种植玉米 5 次,休耕 8a;②覆盖带,上一年度的种植带,秋收时进行秸秆覆盖。13 年间共种植玉米 4 次,休耕 9a;③休闲带,下一年度的种植带,距上一次种植间隔 4 次,休耕 9a。(2)免耕处理:除春季播种外,不再搅动土壤,秋收后将玉米秸秆覆盖地表。(3)常规耕作:自然垄向,春季进行整地,深度约为 7.5—10cm,随后进行灭茬中耕起垄播种,秋收后秸秆全部运出农田。施肥量为氮肥 180kg/hm²,磷肥和钾肥均为 82.5kg/hm²,基施时施入 40%的氮肥和全部的磷、钾肥,拔节期施入 60%的氮肥。



图 1 休耕轮作示意图

Fig.1 Schematic diagram of fallow crop rotation

2018 年秋收后,采用多点取样法对 0—10cm、10—20cm、20—40cm 的土层进行取样。每个样点设置 3 个重复,3 个重复混合成一个样品。采样点呈“S”型分布。土壤样品带回实验室,经去除动植物残体及凋落物后充分混匀,一部分新鲜土样保存于 4℃ 冰箱,进行 DOC 测定;一部分土样风干后,过 60 目、100 目筛备用,测定 SOC、ROC、POC、MAOC。

1.3 测试与分析

SOC 采用重铬酸钾外加热法测定^[13];LFOC 和 HFOC 采用密度分离法提取后测定^[14];POC 和 MAOC 采用六偏磷酸钠分散法分离后测定^[15];ROC 采用高锰酸钾氧化法测定^[8]。DOC 采用蒸馏水浸提后测定^[16]。

试验数据采用 Microsoft Excel 2010 进行统计与计算,采用 SPSS 22.0 进行单因素方差分析与多重比较。采用 Origin 2022 作图。

2 结果

2.1 SOC 含量分布

不同耕作模式下 SOC 含量如图 2 所示,除休耕轮作种植带外,各处理中 SOC 含量变化趋势较为一致,0—10cm 表层土壤含量最高,由表层至 20—40cm 深层的含量呈下降趋势。0—10cm 层中 SOC 含量为 16.66—23.90g/kg,各处理 SOC 含量并没有显著差异;休耕轮作覆盖带 SOC 含量最高,分别比种植带和休闲带含量高 39.12%和 46.66%,并比常规耕作和免耕高 17.33%和 21.57%。10—20cm 休耕轮作种植带 SOC 含量最高,显著高于休闲带和覆盖带,与常规耕作和免耕处理相比较没有明显差异。20—40cm 常规耕作 SOC 含量最高,但各处理间没有显著性差异。

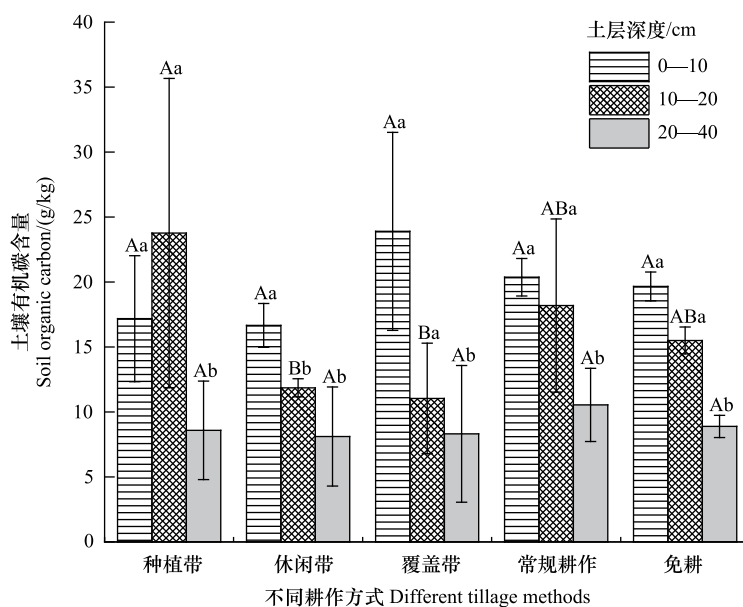


图 2 不同耕作方式下 SOC 含量分布

Fig.2 SOC content distribution under different cultivation methods

2.2 SOC 的化学分组

化学分组的主要成分包括 DOC 和 ROC。不同耕作模式下土壤 ROC 和 DOC 含量如图 3 所示,随着土壤深度的增加,ROC 含量随着深度增加呈下降趋势。0—10cm 土壤 ROC 含量为 905.25—1109.73mg/kg,免耕 ROC 含量最高,分别比种植带、休闲带、覆盖带和常规耕作高 0.27%、10.34%、22.54%和 2.53%;10—20cm 土壤 ROC 含量值为 716.86—832.59mg/kg,覆盖带 ROC 含量最低,分别比种植带、休闲带、常规耕作和免耕低 11.82%、12.39%、13.90%和 5.04%;20—40cm 土壤种植带 ROC 含量最高,其次是覆盖带和常规耕作,免耕含量最低。

随着土壤深度增加,DOC 含量整体呈下降趋势。0—10cm 土壤 DOC 含量为 196.56—298.21mg/kg,休耕轮作种植带 DOC 含量最高,分别比休闲带、覆盖带、常规耕作和免耕高 51.72%、4.52%、27.97%和 47.58%;10—20cm 土壤 DOC 含量值为 109.67—188.58mg/kg,休耕轮作休闲带 DOC 含量最低,分别低于种植带、覆盖带、常规耕作和免耕 40.19%、36.60%、37.21%和 41.84%;20—40cm 土壤常规耕作处理 DOC 含量最高,其次休闲带和覆盖带,免耕 DOC 含量最低。

2.3 SOC 的粒径分组

粒径分组可将 SOC 分为 POC(粒径 $>53\mu\text{m}$)和 MAOC(粒径 $<53\mu\text{m}$)。由图 4 可知,随着土壤深度的增加,POC 整体呈下降趋势。0—10cm 土壤的 POC 含量为 11.45—15.36g/kg,休闲带的 POC 含量最高,分别比种植

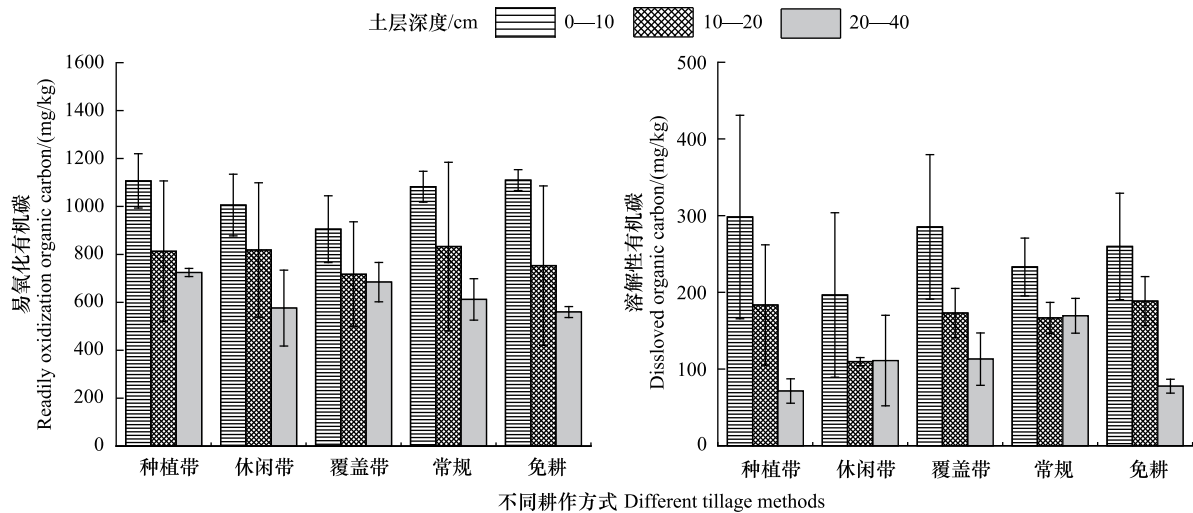


图3 不同耕作方式下的 ROC 和 DOC 含量分布

Fig.3 ROC and DOC content distribution under different cultivation methods

带、覆盖带、常规耕作和免耕高 13.53%、4.19%、34.15%、3.78%; 10—20cm 土壤休耕轮作的覆盖带含量最低, 分别比种植带、休闲带、常规耕作和免耕低 26.12%、22.51%、30.24%、32.13%; 20—40cm 土壤常规耕作和免耕处理的 POC 含量最高, 其次是休闲带, 种植带处理的含量最低。

随着土壤深度的增加, MAOC 含量并没有呈现与 POC 含量相同的分布规律。0—10cm 土壤中, MAOC 的含量为 1.30—9.19g/kg, 休耕轮作中的覆盖带含量最高, 分别比种植带、休闲带、常规耕作和免耕处理高 151.51%、612.40%、30.30%、88.89%; 10—20cm 土壤中, 休闲带的 MAOC 含量最低, 分别低于种植带、覆盖带、常规耕作和免耕 247.89%、10.60%、124.58%、65.25%; 20—40cm 土壤常规耕作处理的 MAOC 含量最高, 其次是种植带和免耕, 休闲带含量最低。

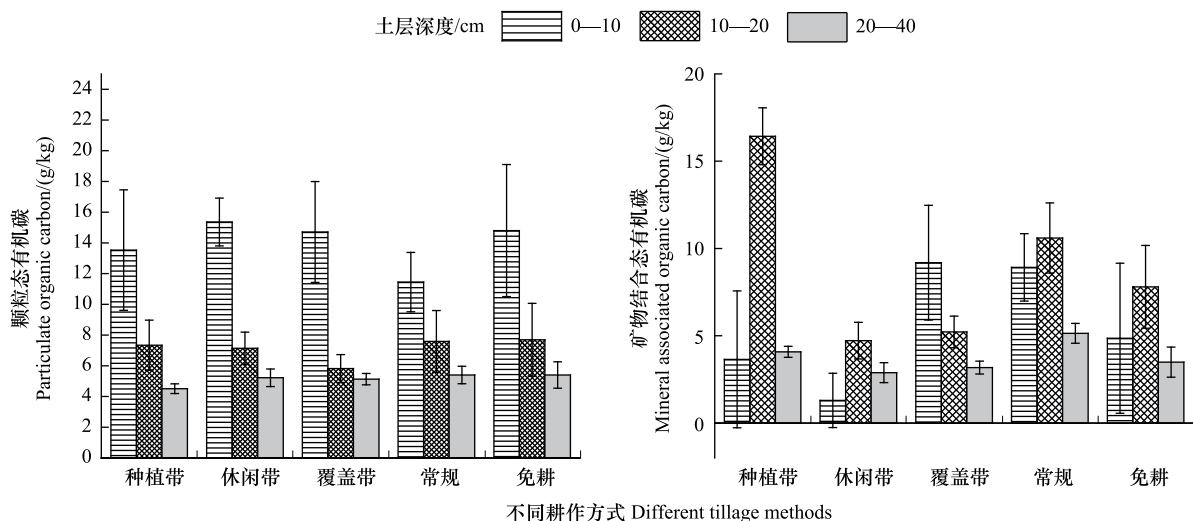


图4 不同耕作方式下的 POC 和 MAOC 含量分布

Fig.4 POC and MAOC contents distribution under different cultivation methods

表1为不同处理方式下的 POC 在 SOC 中的分配比例, POC/SOC 值在一定程度上表现了土壤的固碳潜力, 是反映有机质稳定程度的重要指标, POC 比例越高, SOC 就越不稳定, 周转速度就越快, 土壤的固碳能力

相对来说就越差^[6]。由表可知,随着土壤深度的增加,POC/SOC 值呈先下降后上升的趋势,且 20—40cm 的 POC/SOC 值整体上小于 0—10cm。0—10cm 土层中,POC/SOC 值表现为休闲带>种植带>免耕>覆盖带>常规耕作;10—20cm 土层中,POC/SOC 值表现为:休闲带>覆盖带>免耕>常规耕作>种植带;20—40cm 土层中,POC/SOC 值表现为:休闲带>覆盖带>免耕>种植带>常规耕作。0—40cm 土壤中 POC/SOC 值整体上表现为休耕轮作中的休闲带最高,常规耕作处理最低。

表 1 不同耕作方式下的 POC/SOC 平均值

Table 1 POC/SOC value under different cultivation methods

土壤剖面深度 Soil profile depth	0—10cm	10—20cm	20—40cm	土壤剖面深度 Soil profile depth	0—10cm	10—20cm	20—40cm
种植带 Crop zone	0.788	0.309	0.525	常规耕作 Conventional tillage	0.562	0.417	0.512
休闲带 Fallow zone	0.922	0.602	0.644	免耕 No-tillage	0.753	0.497	0.608
覆盖带 Mulch zone	0.615	0.527	0.617				

POC 颗粒态有机碳 Particulate organic carbon;SOC 土壤有机碳 Soil organic carbon

2.4 SOC 的密度分组

物理分组(密度分组)可将 SOC 分为 LFOC 和 HFOC。由图 5 可知,随着土壤深度的增加,LFOC 的含量呈下降趋势。0—10cm 土壤中,LFOC 为 2.16—4.40g/kg,其中休闲带的 LFOC 含量最高可达 4.40g/kg,分别比种植带、覆盖带、常规耕作和免耕高 23.94%、23.25%、103.70%、12.24%;10—20cm 土壤中,常规耕作处理中的 LFOC 含量最低,分别低于种植带、休闲带、覆盖带和免耕 93.04%、136.52%、126.96%、112.17%;20—40cm 土壤中,免耕处理的 LFOC 含量最高,其次是覆盖带和种植带,常规耕作处理含量最低。

HFOC 含量整体上随土壤深度的增加也呈下降趋势。0—10cm 土壤中,HFOC 含量为 12.22—20.33g/kg,其中覆盖带的 HFOC 含量最高,分别比种植带、休闲带、常规耕作和免耕高 49.16%、66.37%、11.64%、29.16%;10—20cm 土壤中,覆盖带的 HFOC 含量最低,分别低于种植带、休闲带、常规耕作和免耕 155.63%、8.55%、102.38%、55.11%;20—40cm 土壤中,常规耕作的 HFOC 含量最高,其次是免耕和种植带,覆盖带中的含量最低。

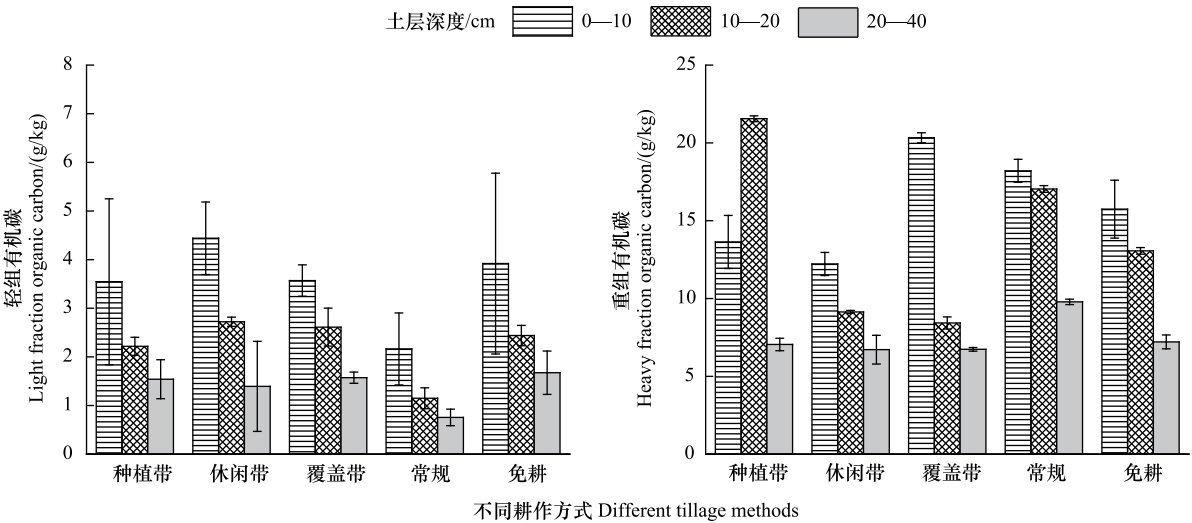


图 5 不同耕作方式下的 LFOC 和 HFOC 含量分布

Fig.5 LFOC and HFOC contents distribution under different cultivation methods

LFOC 是土壤碳库中活性较大的碳,是土壤碳库的重要指标,其占 SOC 库的比例反映了 SOC 库的质量高低^[17]。如表 2 所示,在 0—40cm 的土层范围内,各个土层均为 HFOC 含量最高,占 SOC 的 70%以上,常规耕

作处理的 LFOC 分配值最低,休闲带中的 LFOC 分配值最高。0—10cm 土层中,各处理的 LFOC 分配值表现为:休闲带>种植带>免耕>覆盖带>常规耕作,10—20cm 也呈现出相似规律;20—40cm 土层中,各处理的 LFOC 分配值表现为:覆盖带>免耕>种植带>休闲带>常规耕作。

表 2 不同耕作方式下 LFOC 和 HFOC 在 SOC 中的分配比例

Table 2 Distribution proportion of LFOC and HFOC in organic carbon under different cultivation methods

土壤剖面深度 Soil profile depth	0—10cm		10—20cm		20—40cm	
	LFOC	HFOC	LFOC	HFOC	LFOC	HFOC
种植带 Crop zone	0.206	0.794	0.093	0.907	0.179	0.821
休闲带 Fallow zone	0.266	0.734	0.230	0.770	0.172	0.828
覆盖带 Mulch zone	0.149	0.851	0.237	0.763	0.189	0.811
常规耕作 Conventional tillage	0.106	0.894	0.063	0.937	0.072	0.928
免耕 No-tillage	0.199	0.801	0.157	0.843	0.188	0.812

LFOC 轻组有机碳 Light fraction organic carbon; HFOC 重组有机碳 Heavy fraction organic carbon

3 讨论

SOC 含量随着土壤深度的增加整体呈下降趋势,休耕轮作覆盖带 SOC 含量在 0—10cm 表层含量高于其他处理组,主要是由于上一年覆盖在土壤表层的秸秆分解所致,但是休耕轮作种植带和休闲带低于免耕和常规耕作,这与苑广源等人^[3]的研究结果相似,主要是由于保护性耕作模式下经过 1—2 年的秸秆分解,聚集在土壤表层作物残体被微生物大量分解后进入土壤所致。在 10—20cm 土壤中休耕轮作种植带 SOC 含量最高,表明长期休耕轮作对 0—20cm 表层 SOC 含量有一定提高效应,这与前人^[18—19]的研究结果相一致。休耕轮作对 20—40cm 深层 SOC 并没有明显的提升作用,20—40cm 土壤常规耕作 SOC 含量最高,可能是因为常规耕作有翻耕处理,使作物残茬比免耕和休耕轮作更均匀的分布在土壤深处^[20]。

ROC 和 DOC 是土壤中的活性组分,对土壤的变化极为敏感,可在土壤中快速周转,可作为土壤质量变化的评价指标。0—10cm 土壤中免耕和休耕轮作种植带 ROC 含量高于常规耕作,而 10—20cm 土壤中常规耕作的 ROC 含量最高,这是由于休耕轮作和免耕处理是将秸秆堆积在土壤表层,常规耕作将作物残茬和有机残体与下层土壤翻混,使得 0—20cm ROC 含量分布比较均匀;DOC 含量也呈现类似分布,休耕轮作和免耕对 0—10cm DOC 含量具有提升作用,但对 10—40cm DOC 影响有限。

LFOC 是土壤碳库活性组分,易被微生物分解利用,对不同耕作措施响应敏感,是衡量土壤碳库质量的重要指标^[21]。HFOC 是结构复杂,不易被微生物分解利用的 SOC 稳定组分,可用于指示 SOC 的固存性能。研究表明,LFOC 含量随着土壤深度的增加而降低,主要是由植物残体和根系在土壤剖面中分布决定的,植物残体和根系主要聚集在土壤表层,这与张军科等人^[17]的研究一致。相关研究表明,保护耕作措施能够提高土壤微生物活性,改善 LFOC、HFOC 之间的动态转化^[22]。休耕轮作和免耕均可提高土壤 LFOC 含量,且 LFOC/SOC 值整体上也高于常规耕作,表明休耕轮作和免耕有利于 SOC 的转化,或是常规耕作秸秆离田,SOC 得不到补充,或破坏了土壤团聚体使 LFOC 的物理保护作用降低。秸秆还田影响微生物数量及活性,也增加了 SOC 及其活性组分含量,进而提高了 LFOC/SOC 值^[23]。

POC 被认为是活性有机碳库的重要组成部分和衡量标准,在土壤中的周转速度比较快,与表层土壤植物残体积累和根系分布紧密相关,MAOC 被认为是长期稳定的有机碳组分,由于其与矿物质结合以及小团聚体的物理保护作用^[24],周转时间从几年到几千年不等,被认为是土壤中的惰性碳库^[5]。具有较高 MAOC/SOC 值的土壤有机质活性低,不易被生物所利用,可从一定程度上评估土壤有机质活性及固碳潜力^[6]。而对于 POC/SOC 值较高的土壤有机质更易于被矿化^[25],本研究结果的 POC/SOC 值整体偏高,其原因主要是作物根系生物量较高且与丛枝菌根相互作用以及作物秸秆覆盖还田使得 POC 的形成及分配的比例较高。常规耕作 0—40cm 土壤 POC/SOC 整体上低于其他处理组,可能是秸秆离田,SOC 得不到有效补充,并且耕作过程可导

致团聚体破坏使得 POC 的物理保护作用被削弱;10—20cm 土壤 POC/SOC 值均低于 0—10cm 和 20—40cm 土层,可能是由于 10—20cm 层缺少秸秆直接覆盖还田及根系分布较少所形成。其中覆盖带 POC/SOC 值在休耕轮作和免耕处理中较低,说明秸秆覆盖虽然有利于 SOC 增加,但形成 POC 的过程并被团聚体保护还需一定的作用时间,表明秸秆还田固碳是一个长期的过程。

不同碳组分以及含水率之间的 Pearson 相关关系如表 3 所示,SOC 和所有有机碳组分均呈显著性正相关($P<0.05$),这一结果表明无论是物理、化学还是生物意义上划分的有机碳组分,其含量很大程度上取决于 SOC 储量^[26]。ROC、DOC、LFOC 与 MAOC 的相关关系不显著,含水率与 ROC 和 POC 之间呈显著性正相关($P<0.05$),可能是含水量影响土壤微生物的活性,进而影响活性有机碳含量,这与赵林林等人^[27]的研究是一致的。

表 3 不同碳组分以及含水率之间的 Pearson 相关性分析

Table 3 Pearson correlation analysis between different carbon components and water content

变量 Variable	SOC	ROC	DOC	POC	MAOC	LFOC	HFOC	含水率/% Moisture content
SOC	1	0.717 **	0.787 **	0.721 **	0.695 **	0.519 *	0.983 **	0.102
ROC		1	0.794 **	0.877 **	0.124	0.742 **	0.626 *	0.596 *
DOC			1	0.842 **	0.262	0.646 **	0.723 **	0.441
POC				1	0.003	0.864 **	0.605 *	0.541 *
MAOC					1	-0.148	0.791 **	-0.414
LFOC						1	0.355	0.499
HFOC							1	0.005
含水率 Moisture content/%								1

ROC 易氧化有机碳 Readily oxidizable carbon;DOC 溶解性有机碳 Dissolved organic carbon;MAOC 矿物结合态有机碳 Mineral-associated organic carbon; ** 在 0.01 级别(双尾),相关性显著,* 在 0.05 级别(双尾),相关性显著

相较于常规耕作和免耕,休耕轮作提高了 0—20cm SOC 含量,而对 20—40cm SOC 的影响不显著,主要是由于保护性耕作对表层 SOC 含量有不同程度的提高,而对深层 SOC 含量提高不显著^[28—29]。休耕轮作对 ROC 并无显著的提升作用,可能与休耕轮作时间较短,ROC 累积较少所导致^[30]或与土壤类型及气候条件有关,这与其他研究有一定差别^[31]。DOC 在休耕轮作种植带和覆盖带 0—20cm 土壤含量最高,反映了休耕轮作可促进土壤活性有机碳增加但也易于流失。休耕轮作模式下表层土壤 POC 含量、POC/SOC 值、LFOC 含量、LFOC/SOC 值均高于常规耕作,这与张赛、刘杰等人^[32—33]的研究是一致的,表明秸秆还田保护性耕作模式可以显著提升土壤养分的有效性。

4 结论

休耕轮作不同程度地提高了表层 0—20cm 土壤 SOC 含量,但对 20—40cm 土壤 SOC 含量影响不显著,这与休耕轮作秸秆覆盖还田时间较短有关。休耕轮作与免耕处理不同程度促进了 0—20cm 耕作层土壤 DOC 和 ROC 含量提高,种植带 DOC 含量最高,免耕处理的 ROC 含量最高;不同耕作方式对 20—40cm 犁底层土壤 DOC 和 ROC 含量影响较小。休耕轮作提高了 0—20cm 表层土壤 POC 含量,其中休闲带 POC 含量最高,而 20—40cm 土壤常规耕作和免耕处理的 POC 含量最高;随着土壤深度的增加,POC/SOC 值呈先下降后上升的趋势,表明长期休耕轮作有助于土壤 POC 的形成。休耕轮作促进了不同层次土壤 LFOC 含量的增加,随着土壤层次的增加 LFOC 含量增加的幅度变小,LFOC/SOC 值在休耕轮作处理中最高,表明休耕轮作秸秆覆盖还田有助于 LFOC 在土壤中累积。

参考文献 (References):

- [1] Sakschewski B, von Bloh W, Boit A, Poorter L, Peña-Claros M, Heinke J, Joshi J, Thonicke K. Resilience of Amazon forests emerges from plant

- traitdiversity. *Nature Climate Change*, 2016, 6: 1032-1036.
- [2] 冯继广, 张秋芳, 袁霞, 朱彪. 氮磷添加对土壤有机碳的影响: 进展与展望. *植物生态学报*, 2022, 46(8): 855-870.
- [3] 张军科, 江长胜, 郝庆菊, 吴艳, 谢德体. 耕作方式对紫色水稻土轻组有机碳的影响. *生态学报*, 2012, 32(14): 4379-4387.
- [4] Hao X X, Han X Z, Wang C, Yan J, Lu X C, Chen X, Zou W X. Temporal dynamics of density separated soil organic carbon pools as revealed by $\delta^{13}\text{C}$ changes under 17 years of straw return. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2023, 356: 108656.
- [5] Lavallee J M, Soong J L, Cotrufo M F. Conceptualizing soil organic matter into particulate and mineral-associated forms to address global change in the 21st century. *Global Change Biology*, 2020, 26(1): 261-273.
- [6] 胡丹阳, 张欢, 宿宝巍, 张娅璐, 王永宏, 纪佳辰, 杨洁, 高超. 长江下游沿江平原土壤发育过程中碳库分配动态. *环境科学*, 2024, 45(1): 314-322.
- [7] 姚忠凯. 玉米秸秆和生物炭添加对颗粒态、矿物结合态有机碳激发效应的影响[D]. 重庆: 重庆三峡学院, 2023.
- [8] Blair G J, Lefroy R, Lisle L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems. *Australian Journal of Agricultural Research*, 1995, 46(7): 1459.
- [9] 顾晓娟, 于耀泓, 刘悦, 吴梦佳, 刘林云慧, 莫其锋. 华南典型人工林对土壤易氧化有机碳的影响. *森林与环境学报*, 2023, 43(2): 145-151.
- [10] 逢娜. 不同有机物料还田对黑土有机碳固持与 CO_2 排放的影响[D]. 延吉: 延边大学, 2022.
- [11] 朱勇, 李建业, 张程远, 张兴义. 长期保护性耕作对坡耕地黑土有机碳组分的影响. *农业工程学报*, 2023, 39(10): 103-111.
- [12] 李宇航, 谷思玉, 何婉莹, 王紫颖, 车延静, 袁望博, 杨佳宇. 保护性耕作对黑土有机碳组分和玉米产量的影响. *土壤通报*, 2023, 54(2): 336-345.
- [13] 鲍士旦. 土壤农化分析. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 30-38.
- [14] Strickland T C, Sollins P. Improved method for separating light- and heavy-fraction organic material from soil. *Soil Science Society of America Journal*, 1987, 51(5): 1390-1393.
- [15] Cambardella C A, Elliott E T. Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, 56(3): 777-783.
- [16] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2000: 40-42.
- [17] 苑广源, Munyampirwa T, 毛丽萍, 张燕, 杨宪龙, 沈禹颖. 16 年保护性耕作措施对粮草轮作系统土壤碳库及稳定性的影响. *水土保持学报*, 2021, 35(3): 252-258, 267.
- [18] 王碧胜. 长期保护性耕作土壤团聚体有机碳转化过程及机制[D]. 北京: 中国农业科学院, 2019.
- [19] Meurer K H E, Haddaway N R, Bolinder M A, Kätterer T. Tillage intensity affects total SOC stocks in boreo-temperate regions only in the topsoil—a systematic review using an ESM approach. *Earth-Science Reviews*, 2018, 177: 613-622.
- [20] 严昌荣, 刘恩科, 何文清, 刘爽, 刘勤. 耕作措施对土壤有机碳和活性有机碳的影响. *中国土壤与肥料*, 2010(6): 58-63.
- [21] Tan Z, Lal R, Owens L, Izaurralde R C. Distribution of light and heavy fractions of soil organic carbon as related to land use and tillage practice. *Soil and Tillage Research*, 2007, 92(1/2): 53-59.
- [22] 胡月华. 土壤有机碳组分及微生物功能多样性对耕作方式与秸秆覆盖量的响应. *江苏农业科学*, 2023, 51(4): 206-212.
- [23] 闫雷, 周丽婷, 孟庆峰, 李思莹, 戴建军, 张宇飞, 喇乐鹏. 有机物料还田对黑土有机碳及其组分的影响. *东北农业大学学报*, 2020, 51(5): 40-46.
- [24] Cotrufo M F, Ranalli M G, Haddix M L, Six J, Lugato E. Soil carbon storage informed by particulate and mineral-associated organic matter. *Nature Geoscience*, 2019, 12(12): 989-994.
- [25] 蔡岸冬, 徐香茹, 张旭博, 徐明岗, 张文菊. 不同利用方式下土壤矿物结合态有机碳特征与容量分析. *中国农业科学*, 2014, 47(21): 4291-4299.
- [26] 袁继红, 任琼, 周莉荫, 缪沪君, 迟韵阳, 万方, 王金平, 万松贤. 鄱阳湖湿地不同环境条件土壤有机碳组分特征及其影响因素. *生态学杂志*, 2023, 42(6): 1323-1329.
- [27] 赵林林, 吴志祥, 孙瑞, 杨川. 海南琼中不同林龄橡胶林土壤有机碳组分及其影响因素. *云南农业大学学报: 自然科学版*, 2023(5): 886-893.
- [28] 王新建, 张仁陟, 毕冬梅, 汪娟. 保护性耕作对土壤有机碳组分的影响. *水土保持学报*, 2009, 23(2): 115-121.
- [29] 张婧, 张仁陟, 张军, 蔡立群. 黄土高原长期保护性耕作对麦-豆轮作土壤有机碳组分的影响. *甘肃农业大学学报*, 2015, 50(2): 32-39, 52.
- [30] 苏琳. 保护性耕作方式对土壤有机碳及组分含量的影响[D]. 甘肃: 甘肃农业大学, 2012.
- [31] 王琳. 长期保护性耕作对黄绵土总有机碳及其组分动态的影响[D]. 甘肃: 甘肃农业大学, 2013.
- [32] 张赛, 王龙昌, 黄召存, 赵琳璐, 杜娟, 贾会娟. 土壤活性有机碳不同组分对保护性耕作的响应. *水土保持学报*, 2015, 29(2): 226-231, 252.
- [33] 刘杰, 李玲玲, 谢军红, 邓超超, 彭正凯, Yeboah Stephen, Lamptey Shirley. 连续 14 年保护性耕作对土壤总有机碳和轻组有机碳的影响. *干旱地区农业研究*, 2017, 35(1): 8-13.