

不同耕作方式对灌溉农田土壤有机碳组分的影响

刘小刚^{1,2,3}, 王成宝^{2,3}, 杨思存^{1,2,3*}, 蔡立群¹, 霍琳^{2,3}, 温美娟^{2,3}

¹甘肃农业大学资源与环境学院, 甘肃 兰州

²甘肃省农业科学院土壤肥料与节水农业研究所, 甘肃 兰州

³国家农业科学白银观测实验站, 甘肃 兰州

收稿日期: 2024年3月6日; 录用日期: 2024年6月11日; 发布日期: 2024年6月19日

摘要

为探究引黄灌区不同耕作方式下有机碳及有机碳组分的分布特征, 在甘肃省农业科学院白银沿黄灌区农业试验站设置田间试验。运用重铬酸钾外加热法、333 mol/L高锰酸钾溶液氧化法、六偏磷酸钠提取法、密度分组、酸水解法等方法, 研究旋耕(RT对照)、免耕(NT)、深松(ST)、深松 + 秸秆还田(STS)处理对0~40 cm土层有机碳及有机碳组分的分布。结果表明, 在0~40cm土层, 不同耕作方式下, 土壤有机碳含量(SOC)在8.53~12.64 g/kg之间, 易氧化有机碳(ROOC)含量在3.72~6.69 g/kg之间, 颗粒态有机碳(ROC)含量在1.29~3.56 g/kg之间, 矿质结合态有机碳(MOC)含量在2.86~5.64 g/kg之间, 轻组有机碳(LFOC)含量在0.82~2.61 g/kg之间, 重组有机碳(HFOC)含量在5.93~10.38 g/kg之间, 惰性有机碳(RPC)含量在5.20~7.87 g/kg之间。有机碳含量及有机碳各组分含量的变化呈现随深度增加而影响逐渐减弱的垂直分布规律。与旋耕相比, 秸秆还田显著增加了SOC、ROOC、ROC、MOC、LFOC、HFOC、RPC的含量, 深松显著增加了ROOC、ROC、LFOC的含量, 免耕显著增加0~20cm的ROOC、ROC、HFOC的含量。不同类型的有机碳之间存在着一定的转换关系, 秸秆还田对不同类型的有机碳含量均存在一定的促进作用, 深松和免耕也能对少部分类型有机碳含量呈促进作用。保护性耕作措施对维持土地生产力具有重要意义。

关键词

保护性耕作, 有机碳, 活性有机碳, 惰性有机碳, 颗粒态有机碳, 引黄灌区

Effects of Different Tillage Methods on Soil Organic Carbon Fractions in Irrigated Farmland

Xiaogang Liu^{1,2,3}, Chengbao Wang^{2,3}, Sicun Yang^{1,2,3*}, Liqun Cai¹, Lin Huo^{2,3}, Meijuan Wen^{2,3}

*通讯作者。

文章引用: 刘小刚, 王成宝, 杨思存, 蔡立群, 霍琳, 温美娟. 不同耕作方式对灌溉农田土壤有机碳组分的影响[J]. 有机化学研究, 2024, 12(2): 207-219. DOI: 10.12677/jocr.2024.122018

¹College of Resources and Environment, Gansu Agricultural University, Lanzhou Gansu²Institute of Soil Fertilizer and Water Saving Agriculture, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou Gansu³National Agricultural Science Silver Observation Experimental Station, Lanzhou GansuReceived: Mar. 6th, 2024; accepted: Jun. 11th, 2024; published: Jun. 19th, 2024

Abstract

In order to explore the distribution characteristics of organic carbon and organic carbon components under different tillage methods in the Yellow River irrigation area, a field experiment was set up in the Agricultural Experimental Station of Baiyin Yellow River Irrigation Area of Gansu Academy of Agricultural Sciences. The potassium dichromate external heating method, 333 mol/L potassium permanganate solution oxidation method, hexametaphosphate extraction method, density grouping, acid hydrolysis method and other methods were used. The distribution of organic carbon and organic carbon fractions in the 0~40 cm soil layer was studied by rotary tillage (RT control), no-tillage (NT), subsoiling (ST) and subsoiling + straw returning (STS). The results showed that in 0~40 cm soil layer, under different tillage methods, soil organic carbon content (SOC) ranged from 8.53 g/kg to 12.64 g/kg; the content of readily oxidizable organic carbon (ROOC) ranged from 3.72 to 6.69 g/kg; the content of particulate organic carbon (ROC) ranged from 1.29 to 3.56 g/kg, and the content of mineral-bound organic carbon (MOC) ranged from 2.86 to 5.64 g/kg. The light fraction organic carbon (LFOC) content ranged from 0.82 to 2.61 g/kg, and the heavy fraction organic carbon (HFOC) content ranged from 5.93 to 10.38 g/kg; the content of inert organic carbon (RPC) was between 5.20~7.87 g/kg. The change in organic carbon content and the content of each component of organic carbon showed a vertical distribution law that the influence gradually weakened with the increase of depth. Compared with rotary tillage, straw returning significantly increased the contents of SOC, ROOC, ROC, MOC, LFOC, HFOC, RPC, LP1-C and LP2-C. Subsoiling significantly increased the contents of ROOC, ROC and LFOC. No-tillage significantly increased the content of ROOC, ROC and HFOC in 0~20 cm. There is a certain conversion relationship between different types of organic carbon. Straw returning had a certain promoting effect on different types of organic carbon content. Subsoiling and no-tillage can also promote the content of organic carbon in a small number of types. Conservation tillage measures are of great significance to maintain land productivity.

Keywords

Conservation Tillage, Organic Carbon, Active Organic Carbon, Inert Organic Carbon, Granular Organic Carbon, Yellow Diversion Irrigation Area

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Open Access

1. 前言

土壤有机碳的含量及其组分的分布在很大程度上影响着土壤碳库的稳定[1], 土壤碳库的相对稳定性不仅影响土壤的固碳能力, 并且会对土壤有机碳的排放过程产生影响, 同时也是缓解温室效应的途径之一[2]。土壤有机碳组分的研究是近年来的研究热点[3]。土壤有机碳受耕作措施方面的影响最为直接有效,

适宜的物料添加和耕作方式可以有效提高土壤的有机碳含量，有机碳的分组是以某一特性作为分组标准[4]，划分出来时某一类的化合物的混合物，不同的分类方法间的组分在组成上会有重叠，并不是组成结构单一的化合物[5]。目前有机碳的分组方法主要有化学、物理和生物三种方法[6]。按物理性质分为颗粒碳有机碳，矿物态结合碳，主要存在于土壤团聚体的内部或外部，周转速度快，对环境条件变化颇为敏感[7]。按密度分为轻组有机碳和重组有机碳，土壤肥力的大小对土壤轻重组有机碳的影响显著，按氧化的程度可分为易氧化有机碳，能敏锐感知土壤内部有机碳的变化[8]。按有机碳的稳定性可分为活性有机碳、慢性有机碳和惰性有机碳，其特点是稳定性差，迁移能力强，可以对农田耕作措施的改变做出快速响应，因此常被用来评估农田耕作措施对土壤质量的影响。惰性有机碳相对稳定，活性低，其含量高说明有助于有机碳的积聚[9] [10] [11]。不同耕作方式的改变导致了各种有机碳组分的变化，从而影响土壤碳库的稳定性[12] [13]，但是目前对于有机碳组分的转化机制及稳定性机制还缺乏相关的定论，不利于合理耕作方式的探究，当前土壤有机碳越来越受到关注，土壤有机碳作为土壤质量高低的标准，已经成为重要的参考依据之一。

当前我国大力推进各种保护性耕作措施，来改善土壤有机碳质量，旋耕是引黄灌区以往以来的传统耕作方式，由于长期以来对土壤进行扰动性耕作，不仅破坏了土壤结构，而且还加速了有机碳的损失，土壤有机碳是土壤肥力的核心，其周转过程涉及一系列物理、化学过程，是影响土壤生产力的决定性因素，使得土壤肥力下降，作物产量停滞不前。目前有关保护性耕作对有机碳的研究大多数停留在有机碳含量变化，因此本文采用免耕、旋耕和深松与秸秆还田相结合的耕作手段，通过对有机碳物理组分和化学组分指标的变化情况分析，为引黄灌区培肥地力提供理论依据和技术支撑。

2. 材料方法

2.1. 试验区概况

试验设在甘肃省农业科学院白银沿黄灌区农业试验站(37°05'N, 104°40'E)，是由黄河水提升而形成的灌区，属于干旱区，土壤类型为灰钙土，质地为中壤。该试验开始于 2017 年，采用玉米连作的种植方式。试验区气候状况见表 1，土壤基本理化性质见表 2。

Table 1. Indicators of climatic basic conditions in the test area
表 1. 试验区气候基础状况指标

气候指标	年平均降水量	蒸发量	年平均气温	>0℃积温	>10℃积温	年日照时数	辐射量
数值	259 mm	2369 mm	6.6℃	3208℃	2622℃	2919 h	616.2 kJ/cm ²

Table 2. Basic physical and chemical properties of soil in experimental area
表 2. 试验区土壤基本理化性质

养分 0~20 cm	有机质 (g/kg)	全氮 (g/kg)	全磷 (g/kg)	全钾 (g/kg)	碱解氮 (mg/kg)	速效钾 (mg/kg)	速效磷 (mg/kg)	pH
含量	12.58	1.22	1.09	1.35	45.4	193	11.5	8.25

2.2. 试验设计

试验于 2017 年开始，设 4 个处理：(1) 旋耕(RT，机械旋耕)；(2) 免耕(NT，土壤不耕作)；(3) 深松(ST，全方位深松机深松 35 cm)；(4) 深松 + 秸秆还田(STS，全方位深松机深松 35 cm，秋季将收获后的秸秆全部翻压还田)，以旋耕处理为对照(CK)，小区面积 900 m²；每个处理重复 3 次，随机区组排列。旋耕采用东方红 1GQN-125 型旋耕机，耕作深度平均 15 cm，深松采用沃野 ISQ-340 型全方位深松机，在秋

季玉米收获后深松 1 次。小区面积 900 m²，种植作物采用玉米连作(先玉 335)，密度为 6.75 万株/hm²，灌溉技术采用当地成熟的灌溉施肥技术，施肥量 N375 kg/hm²、P2O5150 kg/hm²；40%的氮肥和全部磷肥作为基肥，于播种前结合整地施入耕层，剩余 60%氮肥于玉米拔节期结合灌水追施；玉米全生育期灌水 4 次，灌溉定额 5400 m³/hm²，灌水分配比例为出苗~拔节 16%、拔节~抽雄 28%、抽雄~乳熟 31%、乳熟~成熟 25%。不同耕作处理实施后的耙耱、镇压、开沟覆膜等措施及田间管理同当地大田。2023 年 4 月中旬播种，10 月上旬收获玉米。

2.3. 取样与测定方法

2.3.1. 采样方法

玉米收获后，在每个试验小区采用五点法取样法，分别取 0~20 cm、20~40 cm，两个层次的原状土约 2 kg，带回试验站，掰成 1 cm 的小块，风干之后去除粗根和小石块，装袋带回实验室，根据不同类型有机碳实验指标的土样要求，处理土样。

2.3.2. 测定方法

有机碳[14]：称取过 0.25 mm 孔筛的风干土样 0.5 g (精确到 0.0001 g)，放入一干燥的硬质试管中，用移液管准确加入标准溶液 5 mL，加 H₂SO₄ 5 mL 充分摇匀，管口盖上小漏斗，以冷凝蒸出只水汽。将 8~10 个试管放入自动控温的铝块管座中，放入温度为 185~190℃的石蜡油中，必须使温度在 170℃~180℃之间，待试管液体沸腾发生气泡开始计时，煮沸 5 分钟，取出试管，待冷却之后，移入 250 mL 三角瓶中，总体积为 60~70 mL，然后加入 3 滴指示剂，用 0.2 mol/L 的硫酸亚铁溶液滴定，颜色变为暗绿，即为滴定终点。

易氧化有机碳[15]：称取过 0.5 mm 土壤筛的含碳 15 mg 的风干土；将上述土放入 100 mL 离心管中，加入 25 mL 的 333 mol/L KMnO₄ 溶液，拧紧盖子，然后在 200 r/pm 下振荡 1 h 空白实验同时进行(不含土样，其它操作样)：振荡后在 4000 r/pm 离心 5 min，每一离心管中用微量移液器吸取 0.4 mL 滤液转入 100 mL 容量瓶，用蒸馏水定容至 100 mL (稀释 250 倍)：稀释液在 565 nm 波长处进行比色，同时标准系列浓度的 KMnO₄ 溶液也比色，使样品浓度在标准系列范围内。

颗粒态有机碳[16]：土壤颗粒有机碳的测定，部分采用六偏磷酸钠提取法进行提取测定。将采集土样剔除石砾与植株残茬在自然条件下风干，过 2 mm 孔径筛。称取待测土样 10 g 置于 50 mL 塑料瓶中，并加 5 g/L 的六偏磷酸钠溶 30 mL，摇匀后置于摇床上振荡 18 h，将分散液和土壤全部置于 0.053 mm 和 0.25 mm 筛上，清水冲至水流清晰不含细土颗粒为止。筛上大于 53 μm 的土壤转移到事先称好质量的铝盒中，放置于 60℃恒温烘箱中烘干并称重，计算烘干后土样重占整个土样的比例，即为土壤颗粒组分比例。颗粒态有机碳(0.053~0.25 mm)，然后在 60℃下烘干称重。测定各粒级有机碳含量，乘以各粒级所占土壤的百分比计算细颗粒有机碳的含量(g/kg 全土)。矿物结合态有机碳(MAOC, <0.053 mm)：在测定颗粒态有机碳的过程中，将筛下部分(<0.053 μm)的有机质在 60℃条件下烘干，称重，测定有机碳含量，乘以各粒级所占土壤的百分比计算出矿物结合态有机碳含量。

轻重组有机碳[17]：采回的土样剔除肉眼可见的植物根系，在室温下全部风干后，研磨并过 2 mm 筛。称取 25 g 土壤，放入 150 mL 三角瓶中，加入比重 1.70 g/mL 的 NaI 溶液 50 mL，在 200 r/min 条件下振荡 1 h，将振荡后的样品置于 100 mL 离心管中，然后在 2500 r/min 离心 20 min，将浮在 NaI 表面的轻组有机质倾倒入装有 0.45 mm 纤维滤膜的容器过滤器中进行抽滤，依次用总量 100 mL 0.01 mol/L CaCl₂ 和 100 mL 蒸馏水冲洗纤维滤膜上轻组有机质至少 3 次。再向离心管中加入 50 mL 比重为 1.70 g/mL 的 NaI 溶液进行第 2 次浸提，步骤同上。将两次浸提的轻组有机质转移至烧杯，在 60℃下烘干、称重。烘干的轻组有机质用玛瑙研钵研细，过 0.25 mm 筛。离心管中的剩余土为重组，土样依次用 0.01 mol/L CaCl₂

洗净土样中的 NaI, 再用蒸馏水冲洗土样若干次, 洗净土样中的 CaCl_2 。在 60°C 下烘干、称重, 将烘干的重组土样研细, 用于测定重组有机碳。

惰性碳: 上述剩余残渣用去离子水洗涤土壤成近中性, 烘干、研磨、过 0.15 mm 筛子, 用重铬酸钾外加热法测定土壤中的碳。

实验仪器: 分光光度计、离心机、摇床尼龙筛子油浴锅烘箱比重计离心机, 真空泵, 容器过滤器, 油浴锅, 滴定仪, 80/100 消煮管、TOC 仪。

2.4. 计算方法

$$\text{SOC} = \frac{\frac{c \times 5}{V_0} \times V_0 - V \times 10^{-3} \times 3.0 \times 1.1}{m \times k} \times 1000 \quad (1)$$

式中: c —— $0.8000 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ($1/6\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$)标准溶液的浓度;

5 ——重铬酸钾标准溶液加入的体积(mL);

V_0 ——空白滴定用去 FeSO_4 体积(mL);

V ——样品滴定用去 FeSO_4 体积(mL);

3.0 ——碳原子的摩尔质量($\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$);

10^{-3} ——将 mL 换算为 L; 1.1 为氧化校正系数;

m ——烘干土样质量(g);

k ——将风干土换算成烘干土的系数(即为 $1-W\%$, $W\%$: 风干土样含水量)。

$$\text{ROC} = \frac{\text{空白} - \text{样品} \times 25 \times 9 \times ts}{m} \times 1000 \quad (2)$$

式中: 空白、样品——机器测定的读数 mM;

25 ——待测液总体积 ml;

9 ——氧化过程中 1 mol 高锰酸钾消耗 9 mg 碳;

M ——称取样品的质量 g。

$$\text{WPOC} = \frac{M_1}{M_0} \times 100\% \quad (3)$$

式中: WPOC——颗粒有机物所占土壤质量的比例(%);

M_0 ——待测土样的重量(g);

M_1 ——过筛后的烘干土壤重量(g)。

$$\text{Ct} - \text{POC} = \text{CPOC} \times \frac{\text{WPOC}}{100} \quad (4)$$

式中, $\text{Ct} - \text{POC}$ ——供试土壤中颗粒态有机碳的含量($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$);

CPOC——土壤颗粒组分中有机碳的含量(g/kg)。

$$\text{WMAOC} = 100 - \text{WPOC} \quad (5)$$

式中, WMAOC——矿物结合有机碳所占土壤质量的比例(%)。

$$\text{Ct} - \text{MAOC} = \text{CMAOC} \times \frac{\text{WMAOC}}{100} \quad (6)$$

式中, $\text{Ct} - \text{MAOC}$ ——供试土壤中矿物结合有机碳的含量(g/kg);

CMAOC——土壤矿物结合有机碳组分中有机碳的含量(g/kg)。

$$\text{轻组有机质质量}\% = \frac{\text{烘干后的轻组有机质质量}}{\text{称取的土壤质量}} \quad (7)$$

$$\text{土壤轻组有机碳} = \text{轻质有机质质量}\% \times \text{轻质有机质含碳量} \quad (8)$$

$$\text{重组有机质质量}\% = \frac{\text{烘干后的重组有机质质量}}{\text{称取的土壤质量}} \quad (9)$$

$$\text{土壤重组有机碳} = \text{重质有机质质量}\% \times \text{重质有机质含碳量} \quad (10)$$

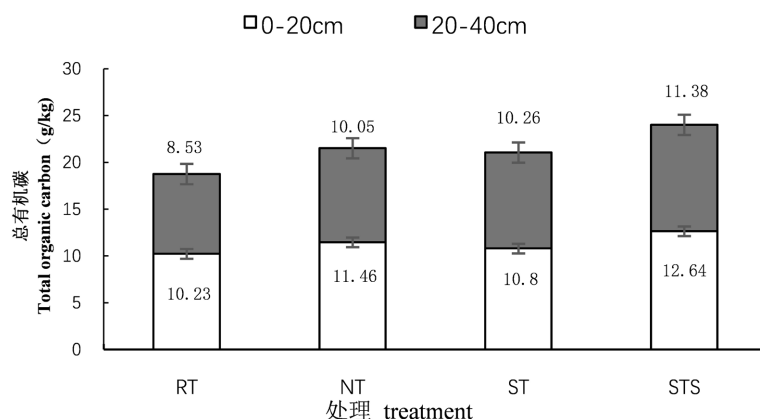
2.5. 数据处理

采用 Excel 2019、IBM SPSS Statistics 23.0 和 Origin 2021 软件进行试验数据处理和统计分析。采用单因素分析不同耕作处理之间的差异显著性，显著性水平 $p < 0.05$ ，图表中数据为平均值。

3. 结果分析

3.1. 不同耕作方式对灌溉农田土壤总有机碳的影响

由图 1 可以看出，在 0~40 cm 土层，总有机碳含量由大到小依次为 STS > NT > ST > RT，随着土层的加深，总有机碳含量表现为减小的趋势，处理 RT、NT、ST、STS 在 0~20 cm 土层的总有机碳含量较 20~40 cm 土层的有机碳，分别减少了 20%、14%、5%、11%，各个处理的总有机碳含量的降低幅度由大到小依次为 RT > NT > STS > ST。从不同处理来看，在 0~20 cm 土层，总有机碳含量由大到小依次为 STS > NT > ST > RT，其中处理 STS、ST 较对照差异显著，分别提高了 23%、6%，处理 NT 较对照 RT 差异不显著。在 20~40 cm 土层，总有机碳含量由大到小依次表现为 STS > ST > NT > RT，其中处理 STS 较对照 RT 差异显著，提高了 33%，处理 ST、NT 较对照 RT 差异不显著。



注：不同小写字母表示相同土层数据间的差异显著性($P < 0.05$)，下同。

Figure 1. Total organic carbon content of irrigated farmland soils under different tillage methods (g/kg)

图 1. 不同耕作方式下灌溉农田土壤总有机碳含量(g/kg)

3.2. 不同耕作方式对土壤有机碳物理分组的影响

3.2.1. 不同耕作方式对轻、重组有机碳含量的的影响

由图 2 可以看出，在 0~40 cm 土层，STS 处理的轻组有机碳含量较其它三个处理呈现出较大差异，

随着土层的加深呈现出轻组有机碳含量减小的趋势, 处理 RT、NT、ST、STS 的轻组有机碳含量在 0~20 cm 土层较 20~40 cm 土层分别降低了 46%、32%、90%、92%, 轻组有机碳含量降低的幅度由大到小依次为 STS > ST > RT > NT, 免耕处理的降低幅度最小, 可能是因为免耕处理未受到剧烈的扰动, 从而导致降低幅度小。从不同土层来看, 在 0~20 cm 土层, 轻组有机碳含量表现为 STS > ST > NT > RT, 其中处理 STS、ST 较 RT 差异显著, 分别提高了 117%、54%, 秸秆还田之后对轻组有机碳含量的提高幅度较大。处理 NT 较 RT 差异不显著。在 20~40 cm 土层, 各处理轻组有机碳含量表现为 STS > NT > ST > RT, 只有处理 STS 较 RT 差异显著, 处理 ST、NT 较 RT 差异不显著。由图 3 可以看出, 在 0~40 cm 土层, 随土层的加深, 有机碳含量表现为降低, 处理 RT、NT、ST、STS 在 20~40 cm 土层的重组有机碳含量较 0~20 cm 土层有机碳含量分别降低了 26%、32%、37%、35%, 降幅由大到小依次为 ST > STS > NT > RT。从不同处理来看, 在 0~20 cm 土层, 处理 STS、NT、ST 的重组有机碳含量较 RT 差异显著, 分别增加了 37%、24%、13%。在 20~40 cm 土层, 处理 STS、ST 的重组有机碳含量较 RT 差异显著, 分别提高了 29%、15%。处理 NT 的重组有机碳含量较 RT 差异不显著。结合图 3、图 4 综合来看, 轻组有机碳和重组有机碳含量表现为较大的差异, 重组有机碳的含量远远高于轻组有机碳的含量。

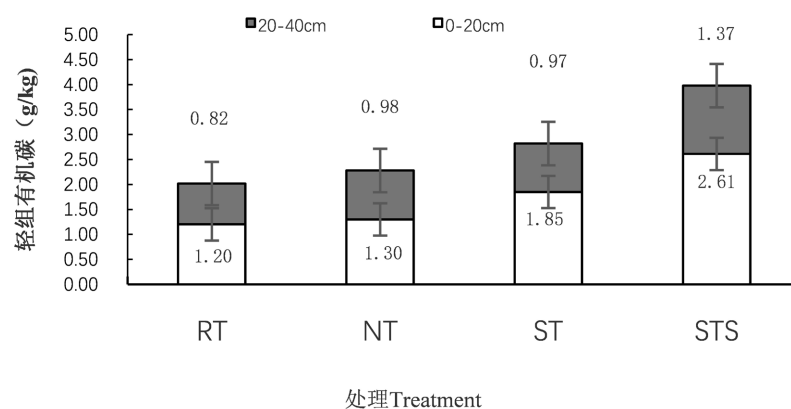


Figure 2. Organic carbon content of light groups in irrigated farmland under different tillage methods

图 2. 不同耕作方式下灌溉农田轻组有机碳含量(g/kg)

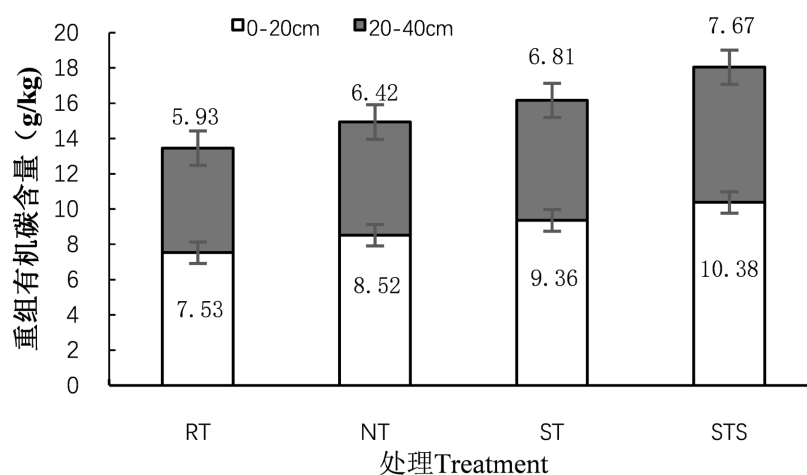


Figure 3. The content of heavy fraction organic carbon in irrigated farmland under different tillage methods (g/kg)

图 3. 不同耕作方式下灌溉农田重组有机碳含量(g/kg)

3.2.2. 不同耕作方式对颗粒态、矿质结合态有机碳的影响

从图 4 可以看出,随着土层的加深,颗粒态有机碳随着土层的加深,呈减小的趋势,土层加深导致植物残枝落叶减少,并且随着深度的加深土壤温度降低也会影响土壤颗粒态有机碳。处理 RT、NT、ST、STS 随土层增加分别减小了 19%、88%、9%、61%,变化幅度由大到小的顺序为 NT > STS > RT > ST。从不同处理来看,在 0~20 cm 土层,各处理的颗粒态有机碳含量由大到小依次为 STS > NT > ST > RT, STS、ST、NT 较 RT 差异显著,分别提高了 132%、52%、82%,ST 处理提高的最为明显。在 20~40 cm 土层,各处理的颗粒态有机碳含量由大到小依次为 STS > ST > NT > RT, ST、STS 较 RT 差异显著,分别提高了 70%、67%,NT 较 RT 差异不显著。不同层次之间,均是对照 RT 含量最小。耕作模式在 0~20 cm 土层对颗粒态有机碳的影响较 20~40 cm 土层强烈。

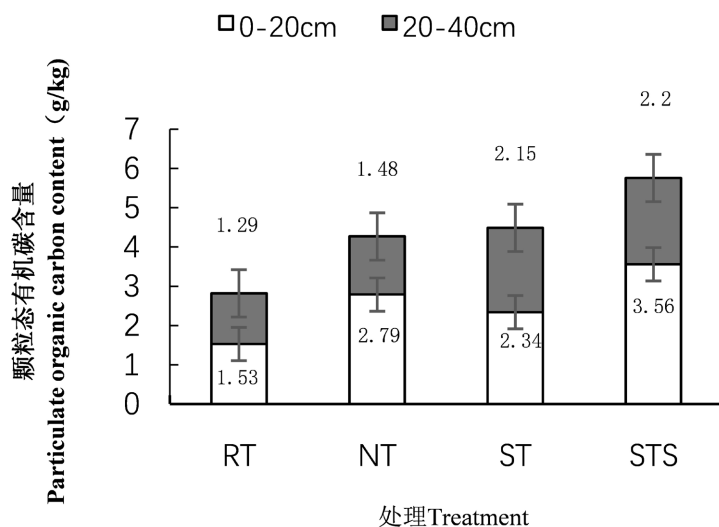


Figure 4. Particulate organic carbon content (g/kg) in irrigated farmland under different tillage methods

图 4. 不同耕作方式下灌溉农田颗粒态有机碳含量(g/kg)

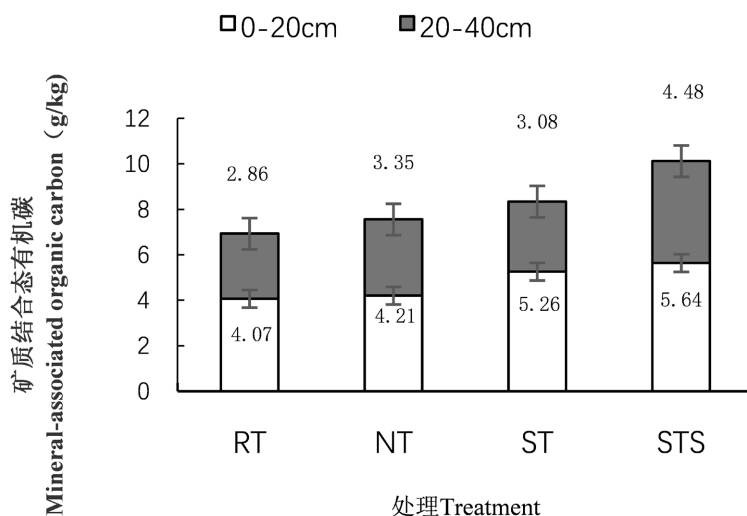


Figure 5. Mineral bonded organic carbon content (g/kg) in irrigated farmland under different tillage methods

图 5. 不同耕作方式下灌溉农田矿质结合态有机碳含量(g/kg)

由图 5 可以看出,随着土层的加深,矿质结合态有机碳含量呈减少趋势,土层加深土壤中的矿物质含量减少,从而使得土壤矿质结合态有机碳含量降低。处理 RT、NT、ST、STS 随着土层增加,分别较少了 42%、26%、71%、26%,减小幅度由大到小依次为 $ST > RT > NT = STS$ 。从不同层次来看,在 0~20 cm 土层,STS、ST 较 RT 差异显著,分别提高了 38%/29%,处理 NT 较 RT 差异不显著。在 20~40 cm 土层,处理 STS 较 RT 差异限制,提高了 57,处理 ST、NT 较 RT 差异不显著,随着土层加深,深松处理对矿物质结合态有机碳的影响有所减缓,秸秆还田对有机质与矿物质的结合有促进作用。

3.3. 不同耕作方式对农田土壤有机碳化学组分影响

3.3.1. 不同耕作方式对惰性有机碳含量的影响

由图 6 可以看出,从不同土层来看,随着土层的增加,各个处理的惰性有机碳含量均表现为下降,在 0~40 cm 土层,各处理的惰性有机碳含量由大到小依次为 $STS > ST > NT > RT$,处理 RT、NT、ST、STS 在 0~20 cm 土层较 20~40 cm 土层分别增加了 24%、30%、17%、16%,降低幅度依次为 $NT > RT > ST > STS$,免耕处理的惰性有机碳随着土层的加深,减小的幅度最为明显,而深松加秸秆还田的方式减小幅度最小。从不同处理来看,在 0~20 cm 土层,各处理的惰性有机碳含量由大到小依次为 $STS > NT > ST > RT$,处理 STS 的惰性有机碳含量较对照 RT 差异显著,提高了 20%,处理 ST、NT 的惰性有机碳含量较 RT 差异不显著,在 20~40 cm 土层,惰性有机碳含量由大到小依次表现为 $STS > ST > NT > RT$,处理 STS 的惰性有机碳含量较 RT 差异显著,提高了 30%,处理 NT、ST 的惰性有机碳含量较 RT 差异不显著。

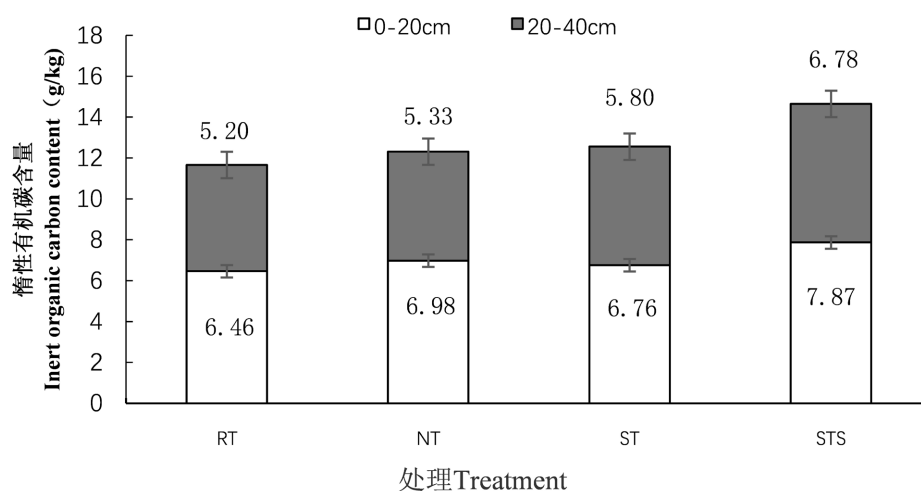


Figure 6. Inert organic carbon content (g/kg) in irrigated farmland under different tillage methods
图 6. 不同耕作方式下灌溉农田惰性有机碳含量(g/kg)

3.3.2. 不同耕作方式对易氧化有机碳含量的影响

从图 7 可以看出,随着土层的加深,易氧化有机碳含量呈现减小的趋势,NT 两个层次间差异较大,20~40 cm 土层相较于 0~20 cm 土层减少了 45%。RT、ST、STS 分别减小了 21%、7%、8%,减小幅度大小为 $NT > RT > ST > STS$ 。在 0~20 cm 土层,含量大小顺序为 $STS > ST > NT > RT$ 。处理 NT、ST、STS 较 RT 差异均显著,易氧化有机碳含量分别提高了 24%、35%、49%,在 20~40 cm 土层,含量大小顺序为 $STS > ST > NT > RT$ 。处理 STS、ST 较 RT 差异显著,易氧化有机碳含量分别提高了 97%、68%、处理 NT 较 RT 差异不显著。

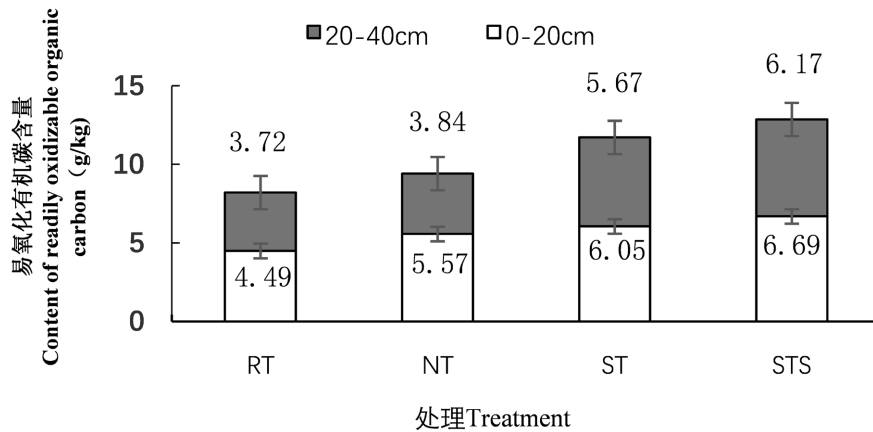
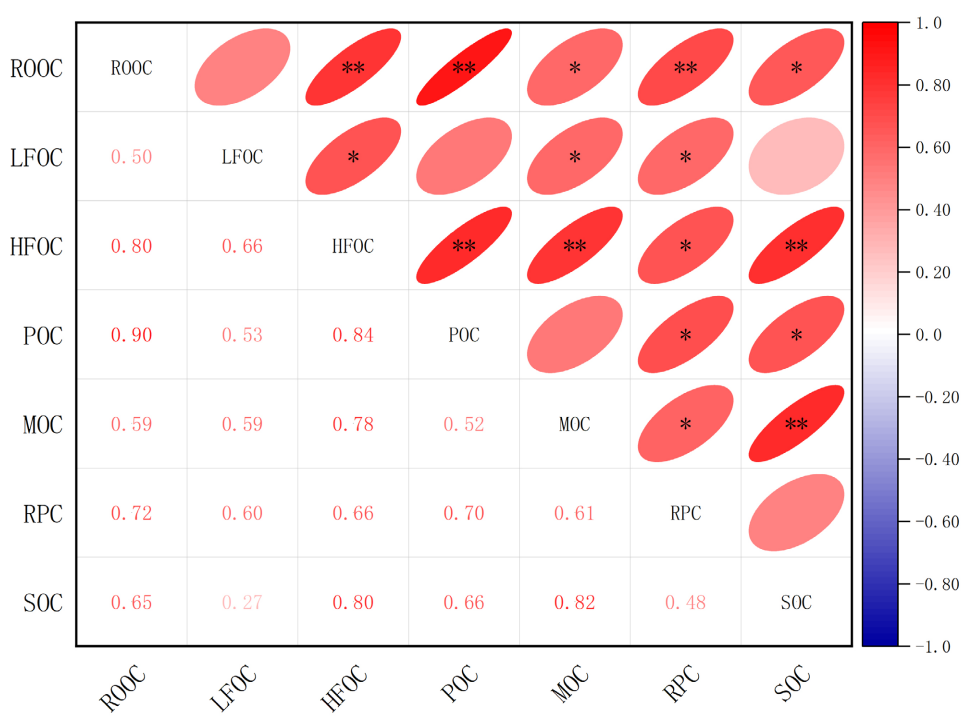


Figure 7. Content of readily oxidized organic carbon in irrigated soil under different tillage methods (g/kg)
图 7. 不同耕作方式下灌溉农田土壤易氧化有机碳含量(g/kg)

3.4. 不同耕作方式下各组分之间的相关性分析



注：SOC 表示总有机碳，ROOC 表示易氧化有机碳，LFOC 表示轻组有机碳，HFOC 表示重组有机碳，POC 表示颗粒态有机碳，MOC 表示矿质结合态有机碳，RPC 表示惰性有机碳，*表示在 0.05 水平上显著相关，**表示在 0.01 水平上显著相关，右向红色椭圆表示正相关，椭圆大小表示相关系数大小，下同。

Figure 8. Pearson correlation between 0~20 cm soil total organic carbon and different organic carbon components
图 8. 0~20 cm 土壤总有机碳和不同有机碳组分之间的 Pearson 相关性

将土壤总有机碳含量与土壤各有机碳组分含量进行 Pearson 相关性分析发现(图 8、图 9)，在 0~40 cm 土层，SOC 与 ROOC、MOOC、差异不显著。随着土层加深 ROOC 与 LFOC 不相关，而在 0~20 cm 呈显

显著正相关($p < 0.01$), LFOC 与 POC 在 0~20 cm 呈显著正相关($p < 0.05$), 20~40 cm 不相关。在 20~40 cm MOC 与 RPC 不相关, 但在 20~40 cm 呈显著正相关($p < 0.05$), 以上结果反映出随着土层的加深相同组分之间存在着差异性。

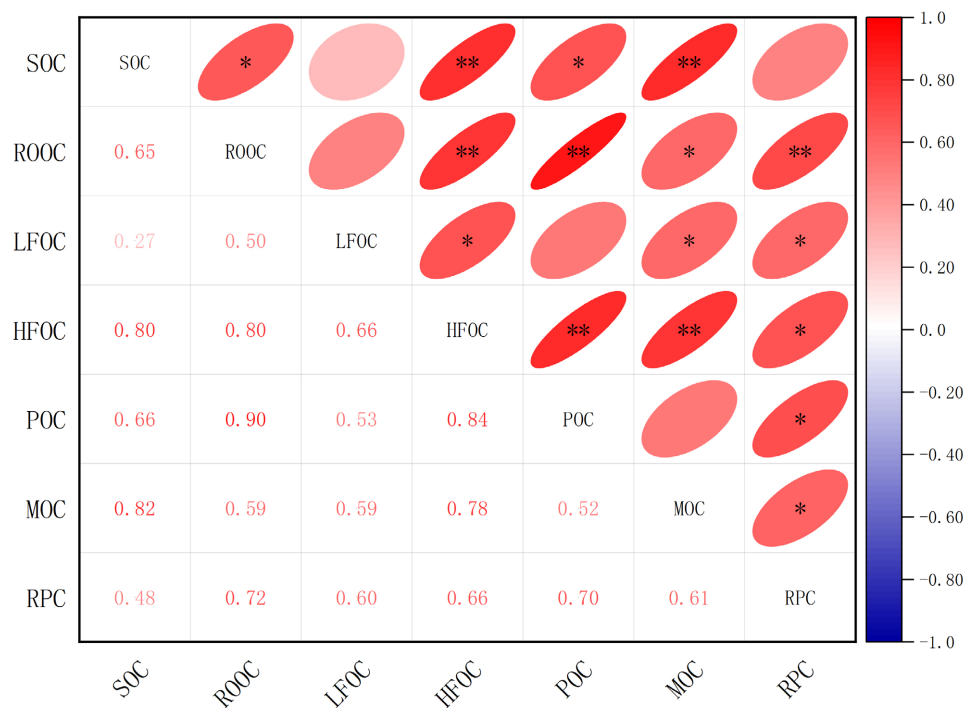


Figure 9. Pearson correlation between 20~40 cm soil total organic carbon and different organic carbon components

图 9. 20~40 cm 土壤总有机碳和不同有机碳组分之间的 Pearson 相关性

4. 讨论

土壤有机碳是土壤肥力的重要指标[18], 其含量和组分随着耕作等管理措施的变化而变化, 而有机碳根据其性质又可以分为多种类型, 因而对土壤有机碳各组分变化的探究, 有助于制定土壤管理策略[19], 土壤中的活性有机碳, 惰性有机碳, 重组有机碳主要来源是植物通过一系列的生物化学过程中分解形成的有机质, 可以在土壤中长期保留, 表征土壤有机碳的稳定性[20]。本研究通过对各个组分的分析研究, 得出来不同组分的有机碳在不同耕作方式下的变化情况, 其中易氧化碳作为活性碳, 是有机碳的重要组成部分, 可以在土壤有机碳发生变化前反映土壤的微小变化, 并且直接参与土壤生物化学转化过程, 其有效性高, 并且容易被微生物利用和分解, 其数量受耕作方式等其它因素的影响较为显著[21]。从本实验结果来看, 随着土层的加深, 易氧化有机碳的含量表现为随土层的加深含量减少, 其中秸秆还田能明显增加 0~40 cm 土层的易氧化有机碳含量, 除此之外, 免耕也能提高易氧化有机碳含量, 这与周欢等[22]人的研究结果一致, 其原因可能是免耕能增加其通透性, 而秸秆的输入使得微生物的物料充足。土壤颗粒态有机碳是由未完全分解的植物残体以及根系残体组成, 对于玉米作物而言, 表层土壤受其影响较为敏感, 并且周转速度较快, 能敏感的反映作物残体归还量和有机碳的周转情况, 本研究中, 颗粒态有机碳随着土壤深度的增加, 颗粒态有机碳含量减少, 在 0~20 cm 土层, 处理深松加秸秆还田较其它三个处理显著的增加了颗粒态有机碳的含量, 这与于建光等[23]人的研究结果一致, 然而免耕处理的颗粒态有机碳含量高于深松处理, 可能是深松处理连年耕作在一定程度上损失的根系有机质, 而免耕处理根系有较

多的根系有机质。土壤中的矿物态有机质被认为是有机碳固持的重要机制之一,这部分有机碳其含量相对较高,属于惰性碳库,李欢等[24]研究结果表明,添加秸秆物质,可显著增加稻田土壤的矿物态有机碳的含量,在本研究中,在 0~20 cm 土层,秸秆还田处理矿物结合态有机碳含量最高,在 20~40 cm 土层,深松加秸秆还田的耕作方式使得土壤中的矿物结合态有机碳含量显著高于其他处理,随着土层的加深,秸秆还田增加了深层土壤的矿物结合态有机碳含量。轻组有机碳是属于土壤碳库的活性部分,轻组有机碳对耕作方式,秸秆还田等人类活动较为敏感,是衡量土壤碳库质量的重要指标,在本研究中,深松处理和深松加秸秆还田处理免耕处理均在一定程度上增加了轻组有机碳的含量,在 0~20 cm 土层,处理深松和深松加秸秆还田处理较对照差异显著,在 20~40 cm 土层,只有深松加秸秆还田较对照差异显著,秸秆还田提高了整体的轻组有机碳含量,而深松可以提高表层的含量,这与胡月华等人[25]的研究结果一致。而土壤重组有机碳是土壤碳库中较为稳定的有机碳,可以指示评价土壤有机碳的固存性能,在本研究中,就 0~40 cm 土壤整体而言,重组有机碳含量大小相差较小,重组有机碳含量表现为表层高,相较于轻组有机碳含量远大于轻组有机碳含量,深松加秸秆还田显著提高两个层次的有机碳含量,深松提高了 0~20 cm 土层的重组有机碳含量,这与高雪莹等人[26]的研究结果相似。土壤有机碳可以被划分为活性碳库和惰性碳库,在对有机碳的分组研究基础之上,在本研究中,在 0~40 cm 土层,深松加秸秆还田处理重组有机碳含量较对照差异显著,其它处理之间差异均不显著。

综上所述,通过进一步比较不同耕作方式下有机碳各组分的含量发现,土壤易氧化有机碳、轻重组有机碳、颗粒、矿物结合态有机碳以及活性碳库、惰性碳库的含量以及变化和分布规律基本趋于一致,秸秆还田的保护性耕作方式显著提高其含量。其次通过对两个层次的各组分碳含量分析可以得出,各处理均有表层富集的现象。所以对于引黄灌区的灌溉农田,采用秸秆全量还田且深松的耕作方式有利于碳的固持。

5. 结论

(1) 除慢性有机碳含量外,保护性耕作较传统耕作均提高了有机碳及有机碳各组分的含量,其中秸秆还田提高最显著。秸秆还田能显著提升土壤固碳能力。

(2) 总有机碳含量和各有机碳组分含量之间存在相关性,可见土壤有机碳及各组分之间相互促进和转化。随着土层的加深,各组分含量呈现出降低的趋势,旋耕和免耕的降低幅度小。

参考文献

- [1] 舒馨,朱安宁,张佳宝,等. 保护性耕作对潮土不同组分有机碳、氮的影响[J]. 土壤通报, 2014, 45(2): 432-438.
- [2] 杨思存,王成宝,霍琳,等. 不同耕作措施对甘肃引黄灌区耕地土壤有机碳的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(2): 114-121.
- [3] 蒋如,宁诗琪,隋宗明,等. 长期轮作施肥处理对植烟土壤有机碳组分和酶活性的影响[J]. 土壤, 2023: 1-8.
- [4] 刘玲,崔俊芳,杨红薇,等. 长期外源有机物料添加对川中丘陵区农田土壤养分和有机碳组分的影响[J]. 土壤, 2023, 55(5): 991-1000.
- [5] 蔡岸冬,徐香茹,张旭博,等. 不同利用方式下土壤矿物结合态有机碳特征与容量分析[J]. 中国农业科学, 2014, 47(21): 4291-4299.
- [6] 赵林林,吴志祥,孙瑞,等. 土壤有机碳分类与测定方法的研究概述[J]. 热带农业工程, 2021, 45(3): 154-161.
- [7] 刘彩霞,薛建福,杜天庆,等. 不同作物对连作玉米田土壤总有机碳与颗粒有机碳的影响[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2018, 38(12): 1-7.
- [8] 巫芯宇,廖和平,杨伟. 耕作方式对稻田土壤有机碳与易氧化有机碳的影响[J]. 农机化研究, 2013, 35(1): 184-188.
- [9] 李慧璇,马红亮,尹云锋,等. 亚热带天然阔叶林凋落物分解过程中活性、惰性碳氮的动态特征[J]. 植物生态学

- 报, 2023, 47(5): 618-628.
- [10] 昌龙然, 谢德体, 慈恩, 等. 稻田垄作免耕对根际土壤有机碳及颗粒态有机碳的影响[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2012, 37(11): 49-53.
- [11] 陈坚淇, 贾亚男, 贺秋芳, 等. 不同土地利用方式对岩溶区土壤有机碳组分稳定性的影响[J]. 环境科学, 2023: 1-14.
- [12] 王永栋. 秸秆还田与耕作措施对旱作农田土壤团聚体和有机碳组分的影响[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 甘肃农业大学, 2022.
- [13] 刘嘉琳. 内蒙古典型草原植被退化对土壤有机碳组分及其稳定性的影响[D]: [硕士学位论文]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2022.
- [14] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 第3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [15] Biederbeck, V.O., Janzen, H.H. and Zentner, P.P. (1994) Labile Soil Organic Matter as Influenced by Cropping Practices in All Arid Environment. *Soil Biology*, **26**, 1647-1656. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(94\)90317-4](https://doi.org/10.1016/0038-0717(94)90317-4)
- [16] Cambardella, C.A. and Elliott, E.T. (1992) Particulate Soil Organic-Matter Changes a Grassland Cultivation Sequence. *Soil Science Society of America Journal*, **56**, 777-783. <https://doi.org/10.2136/sssaj1992.03615995005600030017x>
- [17] Janzen, H.H., Campbell, C.A., Brandt, S.A., et al. (1992) Light-Fraction Organic Matter in Soils from Long-Term Crop Rotations. *Soil Science Society of America Journal*, **56**, 1799-1806. <https://doi.org/10.2136/sssaj1992.03615995005600060025x>
- [18] 张延. 秸秆还田下耕作措施对农田黑土有机碳组分及其稳定性的影响[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院东北地理与农业生态研究所), 2019.
- [19] 杨玲, 张前兵, 王进, 等. 管理措施对绿洲农田土壤总有机碳及易氧化有机碳季节变化的影响[J]. 石河子大学学报(自然科学版), 2013, 31(5): 549-555.
- [20] 胡海清, 陆昕, 孙龙. 土壤活性有机碳分组及测定方法[J]. 森林工程, 2012, 28(5): 18-22.
- [21] 谢锦升, 杨玉盛, 解明曙, 等. 土壤轻组有机质研究进展[J]. 福建林学院学报, 2006(3): 281-288.
- [22] 周欢, 蔡立群, 张仁陟, 等. 不同耕作方式下秸秆还田对土壤活性有机碳的影响[J]. 甘肃农业大学学报, 2015, 50(1): 63-68.
- [23] 于建光, 李辉信, 胡锋, 等. 施用秸秆及接种蚯蚓对土壤颗粒有机碳及矿物结合有机碳的影响[J]. 生态环境, 2006(3): 606-610.
- [24] 李欢, 王艳玲, 殷丹, 等. 水稻秸秆/根系添加对稻田红壤发生层颗粒态及矿物结合态有机碳的影响[J]. 土壤通报, 2022, 53(2): 384-391.
- [25] 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[J]. 江苏农业科学, 2023, 51(4): 206-212.
- [26] 高雪莹, 孙元宏, 赵兴敏, 等. 添加玉米秸秆对黑钙土重组有机碳含量及有机无机复合的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(9): 1829-1835.