

长期秸秆和地膜覆盖对旱作冬小麦 农田土壤碳组分的影响

邢文超^{1,2}, 王俊^{1,2,3}, 朱少青^{1,2}, 谈光野^{1,2}, 温萌萌^{1,2}, 豆莹^{1,2}

(1.西北大学城市与环境学院,陕西西安710127; 2.陕西省地表系统与环境承载力重点实验室,陕西西安710127;

3.中国科学院水利部水土保持研究所,陕西杨凌712100)

摘要:地表覆盖秸秆和地膜是我国西北旱作农田土壤固碳的重要田间管理措施,但其对土壤碳组分的长期影响尚不明确。基于田间定位试验,设生育期高量秸秆覆盖(9 000 kg·hm⁻²,HSM)、生育期低量秸秆覆盖(4 500 kg·hm⁻²,LSM)、夏闲期秸秆覆盖(9 000 kg·hm⁻²,FSM)、生育期地膜覆盖(PM)和无覆盖对照(CK)共5个处理,研究了秸秆覆盖和地膜覆盖12 a和13 a后旱作冬小麦农田土壤总有机碳(SOC)、颗粒有机碳(POC)、潜在矿化碳(PCM)和微生物量碳(MBC)含量的变化规律。2 a平均结果表明:与CK相比,HSM和LSM处理均显著提高了0~10 cm土层各碳组分含量以及10~20 cm土层SOC、POC、MBC含量,同时还显著提高了0~20 cm土层POC和MBC占SOC的比例;而FSM和PM处理对各土层土壤碳组分含量及其占SOC的比例均无显著影响。土壤碳组分含量相互之间均存在极显著正相关关系。综上可知,长期生育期秸秆覆盖能有效提高旱作冬小麦农田耕层土壤有机碳及其组分含量,且提高覆盖量有助于促进土壤碳固存。

关键词:秸秆覆盖;地膜覆盖;土壤有机碳;颗粒有机碳;潜在矿化碳;微生物量碳

中图分类号:S153.6⁺2; S512 **文献标志码:**A

Effects of long-term straw and plastic film mulching on soil carbon fractions in dryland winter wheat farmland

XING Wenchao^{1,2}, WANG Jun^{1,2,3}, ZHU Shaoqing^{1,2}, TAN Guangye^{1,2}, WEN Mengmeng^{1,2}, DOU Ying^{1,2}

(1. College of Urban and Environment Science, Northwest University, Xi'an, Shaanxi 710127, China;

2. Shaanxi Key Laboratory of Earth Surface System and Environmental Carrying Capacity, Xi'an,

Shaanxi 710127, China; 3. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences

and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Surface mulching with crop straw and plastic film is an effective measure for soil carbon sequestration in dryland cropping systems. However, how soil carbon fractions respond to long term surface mulching is still unclear. Five treatments were set up as straw mulching during growing season at rates of 9 000 kg·hm⁻²(HSM) and 4 500 kg·hm⁻²(LSM), straw mulching at a rate of 9 000 kg·hm⁻² during summer fallow period (FSM), plastic film mulch during growing season (PM), and no mulching control (CK). This study explored the effects of straw mulching and film mulching for 12 a and 13 a on soil organic carbon (SOC), particulate organic carbon (POC), potential carbon mineralization (PCM), and microbial biomass carbon (MBC) under winter wheat in the Loess Plateau of China. Averaged across 2 a, compared to CK, both HSM and LSM increased the contents of all carbon fractions at 0~10 cm, and the contents of SOC, POC, and MBC at 10~20 cm. The proportions of POC and MBC to SOC were also greater in HSM and LSM than CK at 0~20 cm. Both FSM and PM had no effects on soil carbon fractions and their proportions to SOC at all soil layers when compared to CK. Soil carbon fractions were highly

收稿日期:2022-09-08

修回日期:2022-10-20

基金项目:国家自然科学基金项目(31570440);陕西省国际科技合作与交流计划重点项目(2020KWZ-010);陕西省农业科技创新驱动项目(NYKJ-2021-XA-005)

作者简介:邢文超(1996-),男,陕西商洛人,硕士研究生,研究方向为农田土壤碳氮。E-mail:xingwc0911@163.com

通信作者:王俊(1974-),男,河南虞城人,教授,主要从事旱作农田生态系统持续管理研究。E-mail:wangj@nwu.edu.cn

correlated with each other. In summary, long term straw mulching during the growing season enhanced carbon fractions in topsoil, and the increased straw mulching rate would help to sequester more carbon into soils.

Keywords: straw mulching; plastic film covering; soil organic carbon; particulate organic carbon; potential mineralized carbon; microbial biomass carbon

黄土高原地区是我国重要的冬小麦种植区,干旱少雨、水土流失、养分贫瘠等问题制约了该地区农业的可持续发展,其中土壤肥力日趋衰竭是限制该地区粮食增产的重要因素^[1]。在农田生态系统中,土壤有机碳(Soil organic carbon, SOC)不仅是土壤肥力的重要衡量指标^[2],同时还通过碳循环间接影响全球气候变化。由于其较高的背景含量, SOC对农田管理措施的响应较为缓慢^[3],因此单独测定 SOC 含量往往不能够准确反映土壤碳库的变化情况^[4]。相比之下,土壤颗粒有机碳(Particulate organic carbon, POC)、潜在矿化碳(Potential mineralized carbon, PCM)和微生物量碳(Microbial biomass carbon, MBC)不仅随时间变化快,对农田管理措施的响应也十分迅速^[5]。其中,POC 作为半活性碳组分,对表层土壤植物残体的积累和根系分布的变化非常敏感,可作为土壤有机碳库变化的早期指示指标^[6]。PCM 是土壤微生物分解有机物质过程中每单位微生物量所产生的 CO₂量,可以有效地反映土壤有机碳的分解程度和土壤微生物的活性^[7];MBC 是指示土壤微生物数量的重要指标^[8],二者通常被认为是土壤有机碳库的活性组分,在一定程度上能更加准确地反映土壤结构和性质的稳定性^[9-11]。

秸秆覆盖和地膜覆盖具有保墒抑蒸、改善土壤温度等作用^[12-13],近年来在我国旱作农业区得到广泛应用。与无覆盖措施相比,秸秆覆盖增加了有机质输入,可提高土壤碳组分含量^[14-15]。例如叶元生等^[16]对甘肃冬小麦农田的研究发现,秸秆覆盖 1 a 后 0~20 cm 土层 SOC 含量可提高 6.18%~11.49%;张英英等^[17]对黄土高原冬小麦农田的研究表明,秸秆覆盖 5 a 后 0~30 cm 土层 SOC 和 MBC 含量分别提高了 16.30%和 41.88%;戴伊莎等^[18]在重庆的旱作玉米田间试验表明,秸秆覆盖 1 a 后 0~10 cm 土层 POC 含量提高了 38.5%。与秸秆覆盖不同,地膜

覆盖可显著改善土壤水热条件,加速了土壤碳的矿化过程^[19]。例如皮小敏等^[20]对陕西关中地区冬小麦-夏玉米轮作农田的研究表明,地膜覆盖 1 a 后土壤表层 SOC 含量显著下降;而付鑫等^[4]在陕西长武的试验表明,地膜覆盖 1 a 对耕层 SOC 和 MBC 的影响并不显著,但显著降低了 POC 和 PCM 含量。也有学者在吉林省玉米农田进行了 9 a 的免耕秸秆覆盖试验,结果表明长期秸秆覆盖可增加玉米产量,提高土壤全氮和全碳含量^[21]。但综合来看,目前相关研究多为 1~5 a 的短期试验,而秸秆和地膜长期覆盖对土壤碳组分影响的研究尚不多见。

本文基于黄土高原旱作冬小麦长期覆盖定位试验,系统分析了秸秆和地膜连续覆盖 12 a 和 13 a 后 SOC 及其组分的变化特征,旨在为更加合理有效地评价不同覆盖措施对农田土壤有机碳库的影响提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

试验在陕西省长武县洪家镇十里铺村(35°12'N, 107°45'E)的黄土旱塬上进行。该区海拔为 1 200 m,属暖温带半湿润大陆性易旱区,多年平均降水 579 mm,其中 7~9 月降水占全年降水的 57%,年均气温 9.1℃,年日照数 2 230 h。供试土壤为粘壤质黑垆土,土质较疏松,质地均匀。该区农作物以小麦、玉米为主,一年一熟。2008 年 9 月试验开始前 0~40 cm 土层土壤的基本理化性质见表 1。

1.2 试验设计

试验始于 2008 年 9 月,共设 5 个处理:无覆盖对照(CK),夏闲期秸秆覆盖 9 000 kg·hm⁻²(FSM),生育期高量秸秆覆盖 9 000 kg·hm⁻²(HSM),生育期低量秸秆覆盖 4 500 kg·hm⁻²(LSM),生育期地膜覆盖(PM)。各处理重复 3 次,

表 1 0~40 cm 土层土壤基础理化性质

Table 1 Soil basic physical and chemical properties of 0~40 cm depths

土层 Soil layer /cm	有机碳 Organic carbon /(g·kg ⁻¹)	全氮 Total nitrogen /(g·kg ⁻¹)	有效磷 Available phosphorus /(mg·kg ⁻¹)	速效钾 Available potassium /(mg·kg ⁻¹)	pH
0~10	8.73	0.81	5.40	139.9	8.18
10~20	8.32	0.73	3.60	119.4	8.17
20~40	6.28	0.53	1.60	122.0	8.24

共 15 个小区,完全随机排列。小区面积为 66.56 m²,小区间距 0.5 m,各组间距 1.0 m。

供试冬小麦品种为‘长武 134’,于每年 9 月下旬播种,次年 6 月收获,种植方式为旱地垄作,行距 20 cm,播种密度为 150 kg · hm⁻²。各小区按 N 135 kg · hm⁻²和 P₂O₅ 90 kg · hm⁻²将尿素(N ≥ 46.6%)和磷肥(总 P₂O₅ ≥ 46%,有效 P₂O₅ ≥ 43%)在冬小麦播种时全部作为基肥施入土壤;全生育期无灌溉,必要时人工除草。秸秆覆盖处理使用收获后的冬小麦秸秆,将其剪碎成 10~15 cm 长度的小段后均匀覆于行间,其中 FSM 处理秸秆覆盖在每年 6 月底前一季小麦收获后进行,9 月底下一季小麦播种时人工移除,覆盖时长约 90 d;HSM 和 LSM 处理在小麦播种后立即进行,次年收获后人工移除,覆盖时长约 270 d。PM 处理在每年小麦播种后用 1.2 m 宽白色透明地膜覆盖整个小区,次年小麦收获后人工移除残膜。

1.3 样品采集与测定

分别于 2020 年 6 月 20 日(覆盖 12 a)和 2021 年 6 月 24 日(覆盖 13 a)冬小麦收获后,采用“S”形 5 点取样法采集各小区 0~10、10~20、20~40 cm 土层土样,剔除石块和动植物残体等杂质,将同一土层的土样混合均匀,自然风干,过 2 mm 筛备用。

土壤用盐酸预处理后,过 0.15 mm 筛,SOC 含量使用 EA3000 元素分析仪^[22]测定;POC 含量采用六偏磷酸钠分散法^[23]测定;PCM 含量采用密闭培养法^[5]测定;MBC 含量采用氯仿熏蒸法^[24]测定。

不同碳组分的占比:各碳组分含量占土壤有机碳含量的百分比值^[25]。

1.4 数据分析

采用 Excel 2016 绘制图表,并运用 SPSS 26.0 软件对数据进行单因素方差分析(ANOVA)和相关性分析。

2 结果与分析

2.1 不同覆盖处理对土壤有机碳(SOC)的影响

图 1 为不同覆盖处理对 0~40 cm 土层 SOC 含量影响情况。0~10 cm 土层,2020 年和 2021 年生育期秸秆覆盖处理 SOC 含量均高于其他处理,HSM 和 LSM 处理较 CK 处理 2 a 平均分别提高了 10.61% 和 6.71%($P < 0.05$),且 HSM 显著高于 LSM;PM 和 FSM 无显著影响(图 1A)。10~20 cm 土层,HSM 处理 SOC 含量高于其他处理,2 a 平均较 CK 提高了 5.35%($P < 0.05$),PM 处理显著低于 HSM 和 LSM 处理(图 1B)。20~40 cm 土层,不同处理之间 SOC 含量 2 a 间均无显著差异(图 1C)。

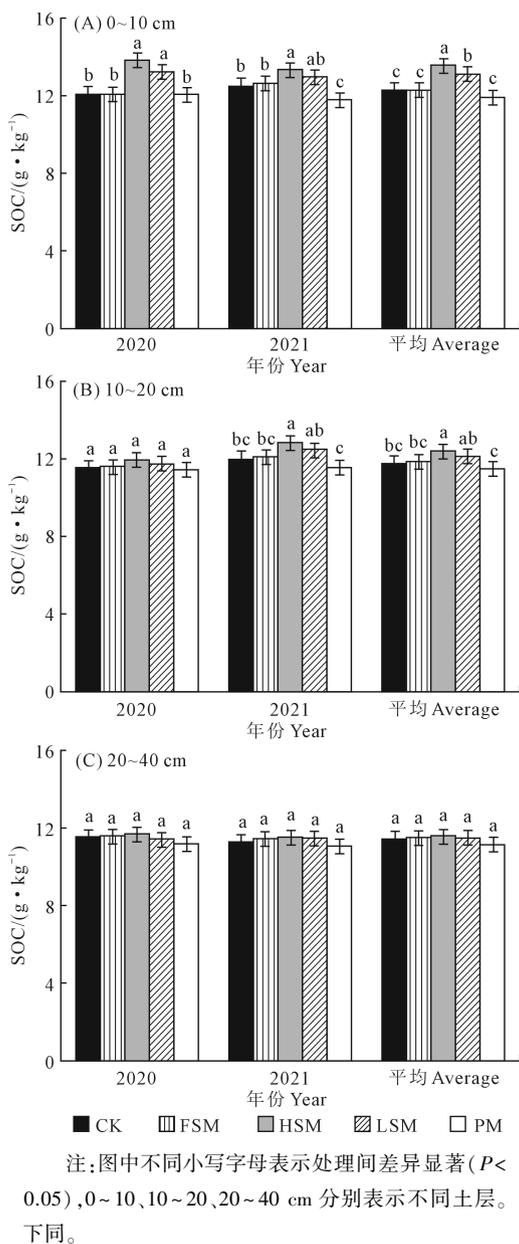


图 1 不同覆盖处理下各土层土壤有机碳(SOC)含量
Fig.1 Soil organic carbon (SOC) content of different soil depths under different mulching treatments

2.2 不同覆盖处理对土壤颗粒有机碳(POC)的影响

图 2 为不同覆盖处理对 0~40 cm 土层 POC 含量及其占 SOC 比例(POC/SOC)的影响情况。随土层加深,各处理土壤 POC 含量均呈逐渐下降趋势。0~10 cm 土层,HSM 处理 POC 和 POC/SOC 均显著高于其他处理,2 a 平均分别较 CK 提高了 34.59% 和 21.63%;LSM 处理 POC 和 POC/SOC 在 2020 年显著高于 CK,而 2021 年与 CK 差异不显著,2 a 平

均分别提高了 20.88% 和 13.33% ($P < 0.05$); FSM 和 PM 处理与 CK 差异不显著(图 2A、B)。10~20 cm 土层, POC 含量和 POC/SOC 在处理间的变化与 0~10 cm 土层基本一致, 2 a 平均 HSM、LSM 处理土壤 POC 含量和 POC/SOC 较 CK 分别提高了 23.21%、

14.42% 和 16.90%、11.03% ($P < 0.05$) (图 2C、D)。20~40 cm 土层, HSM 处理 POC 含量和 POC/SOC 在 2021 年显著高于其他处理, 2 a 平均分别较 CK 提高了 12.86% 和 11.34% ($P < 0.05$), 其他处理与 CK 相比无显著差异(图 2E、F)。

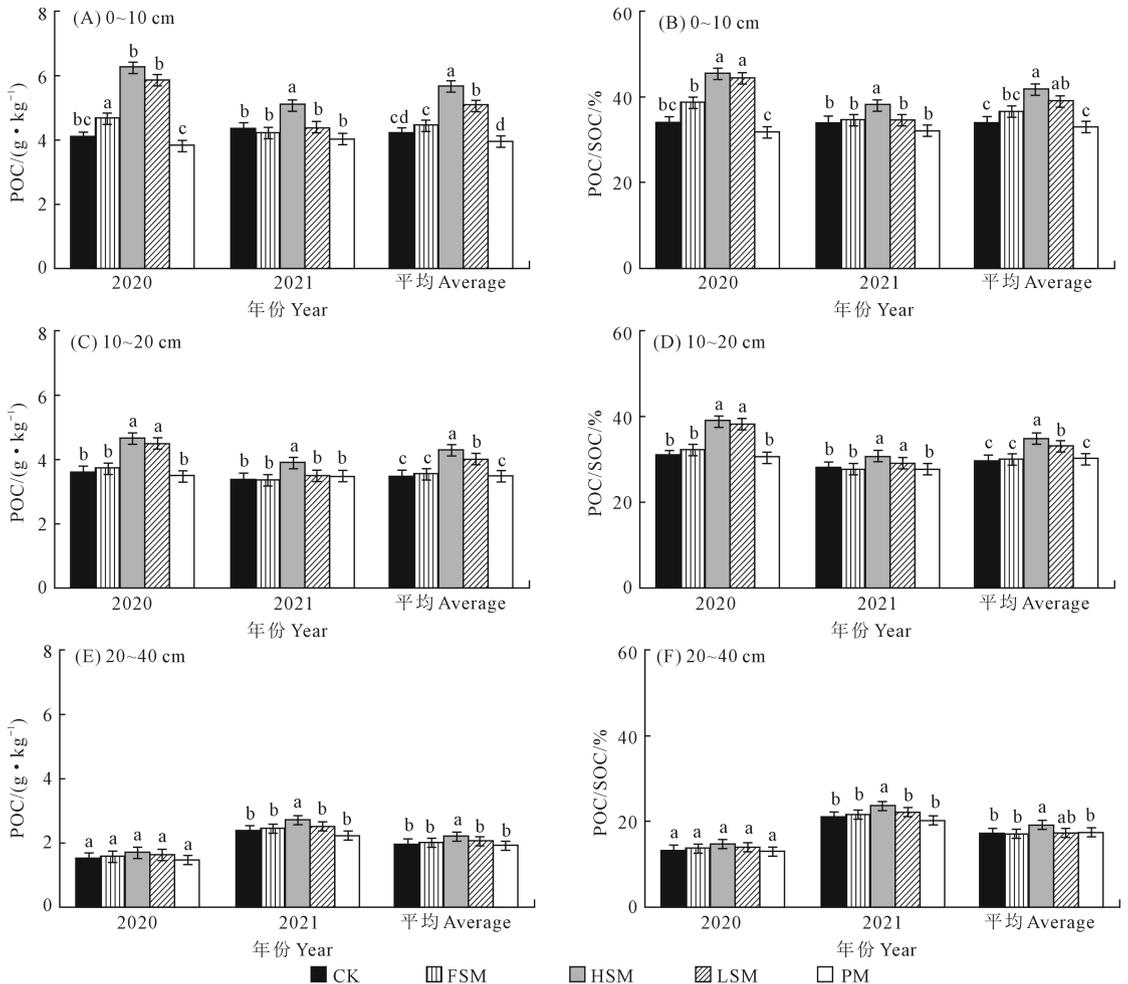


图 2 不同覆盖处理下各土层土壤颗粒有机碳(POC)含量及其占 SOC 的比例

Fig.2 Soil particulate organic carbon (POC) content and its proportion to SOC of different soil depths under different mulching treatments

2.3 不同覆盖处理对土壤潜在矿化碳(PCM)的影响

图 3 为不同覆盖处理对 0~40 cm 土层土壤 PCM 含量及其占 SOC 比例的影响情况。随土层加深,各处理 PCM 含量均呈下降趋势。0~10 cm 土层, HSM 和 LSM 处理 PCM 含量 2 a 间均显著高于其他处理,且 HSM 显著高于 LSM(图 3A), 2 a 平均 2 个处理分别较 CK 提高了 9.18% 和 4.50% ($P < 0.05$)。10~20 cm 和 20~40 cm 土层,各处理间土壤 PCM 含量均无显著差异(图 3C、E)。此外,土壤 PCM 占 SOC 比例(PCM/SOC)在 3 个土层处理间差异均不显著(图 3B、D、F)。

2.4 不同覆盖处理对土壤微生物量碳(MBC)的影响

图 4 为不同覆盖处理对 0~40 cm 土层土壤 MBC 含量及其占 SOC 的比例影响情况。随土层加深,各处理 MBC 含量均呈下降趋势。0~10 cm 土层, HSM 和 LSM 处理 MBC 含量及其占比均显著高于其他处理,与 CK 相比, 2 a 平均 MBC 含量分别提高了 47.10% 和 33.34%, MBC/SOC 分别提高了 27.65% 和 20.16% ($P < 0.05$), 且 HSM 显著高于 LSM; 2021 年 PM 处理 MBC 含量显著低于 CK(图 4A、B)。10~20 cm 土层, 土壤 MBC 含量及其占比在处理间的变化与 0~10 cm 土层一致, HSM 和 LSM

处理 MBC 含量、MBC/SOC 均显著高于其他处理,2 a 平均较 CK 分别提高了 51.32%、34.44% 和 44.39%、31.12% ($P < 0.05$); FSM 和 PM 处理对 MBC 含量及其占比无显著影响(图 4C、D)。20~40 cm 土层,两个指标均表现为各处理间无显著差异(图 4E、F)。

2.5 土壤碳组分相关性

由表 2 可知,不同覆盖措施下土壤碳组分间均存在极显著相关性,说明 POC、PCM 和 MBC 含量很大程度依赖于土壤 SOC 的贮存量,其中 POC 与 SOC 的相关系数最大,可用来指示 SOC 的早期变化。虽然半活性组分 POC 和活性组分 PCM、MBC 的研究方法不相同,在一定程度上可以相互反映,且能够表征土壤 SOC 的质量变化。

3 讨论

本研究表明,生育期秸秆覆盖 13 a 后 SOC 的含量显著增加,而夏闲期秸秆覆盖和地膜覆盖对 SOC 积累并无显著影响,这与李蓉蓉等^[26]研究结果一

致。生育期秸秆覆盖后,秸秆分解增加了有机物输入,秸秆覆盖的稳温保水作用也为土壤微生物提供了良好的生存条件^[27-28],促进其更有效地分解外源有机物质,从而提高 SOC 含量^[29]。生育期高量秸秆覆盖处理(HSM)0~10 cm 土层 2 a 平均 SOC 含量显著高于生育期低量秸秆覆盖处理(LSM),表明增加秸秆覆盖量能有效促进土壤碳固存,这与王永栋等^[30]、李廷亮等^[31]研究结果相似。与 CK 相比,夏闲期秸秆覆盖(FSM)0~40 cm 各土层 SOC 并无显著差异,原因可能是夏闲期土壤水热条件较好,促进了微生物矿化^[4, 26],加快了有机碳的分解;且覆盖时间比较短,种植小麦前移除秸秆减少了土壤中秸秆碳的输入^[32]。地膜覆盖(PM)对土壤 SOC 也无显著影响,这与梁贻仓等^[33]报道一致,可能是因为地膜覆盖保温保水效果比秸秆覆盖更好,过高的土壤水分和温度会加速微生物对土壤有机质的分解矿化,同时地膜覆盖也会阻隔作物凋落物等有机碳源的输入^[28]。

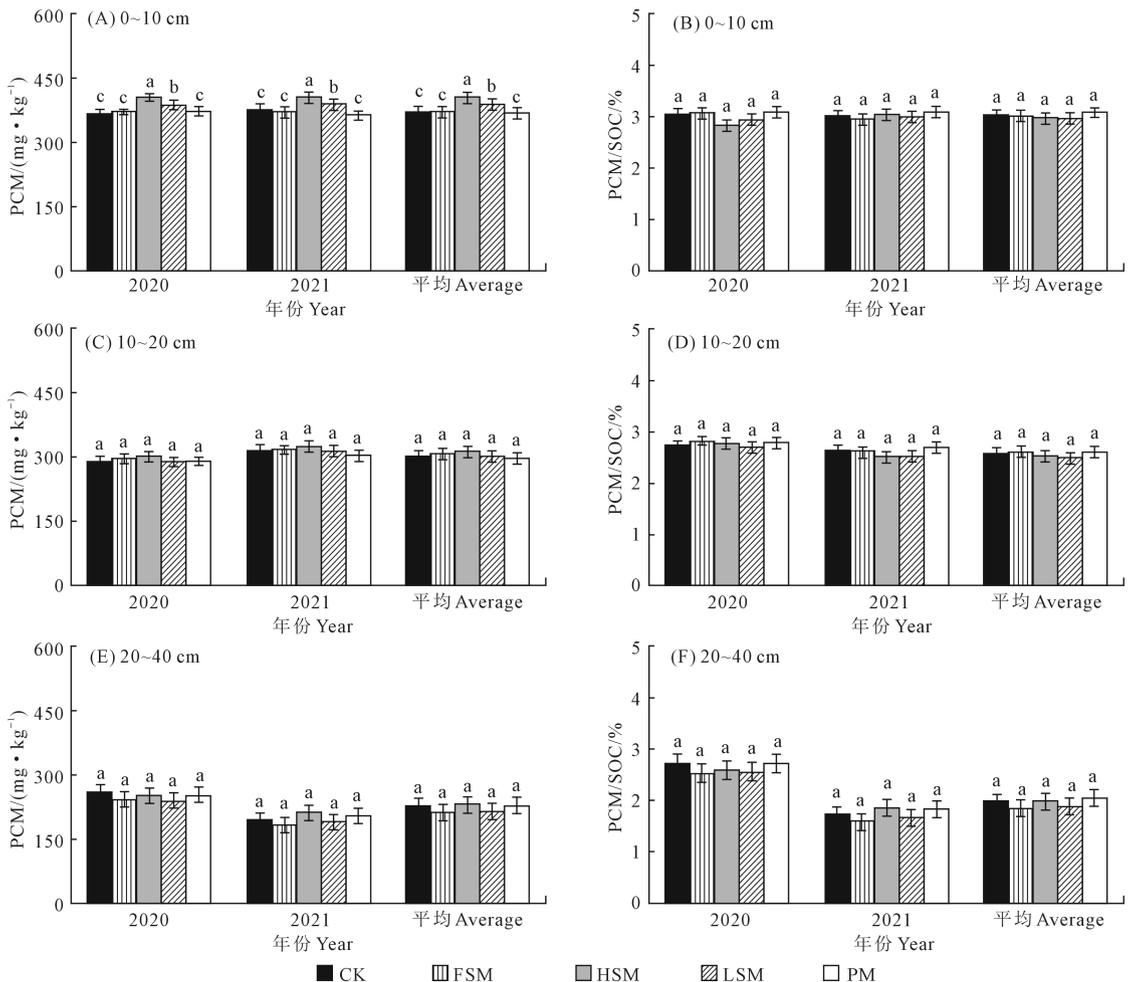


图 3 不同覆盖处理下各土层土壤潜在矿化碳(PCM)含量及其占 SOC 的比例

Fig.3 Soil potential carbon mineralization (PCM) content and its proportion to SOC of different soil depths under different mulching treatments

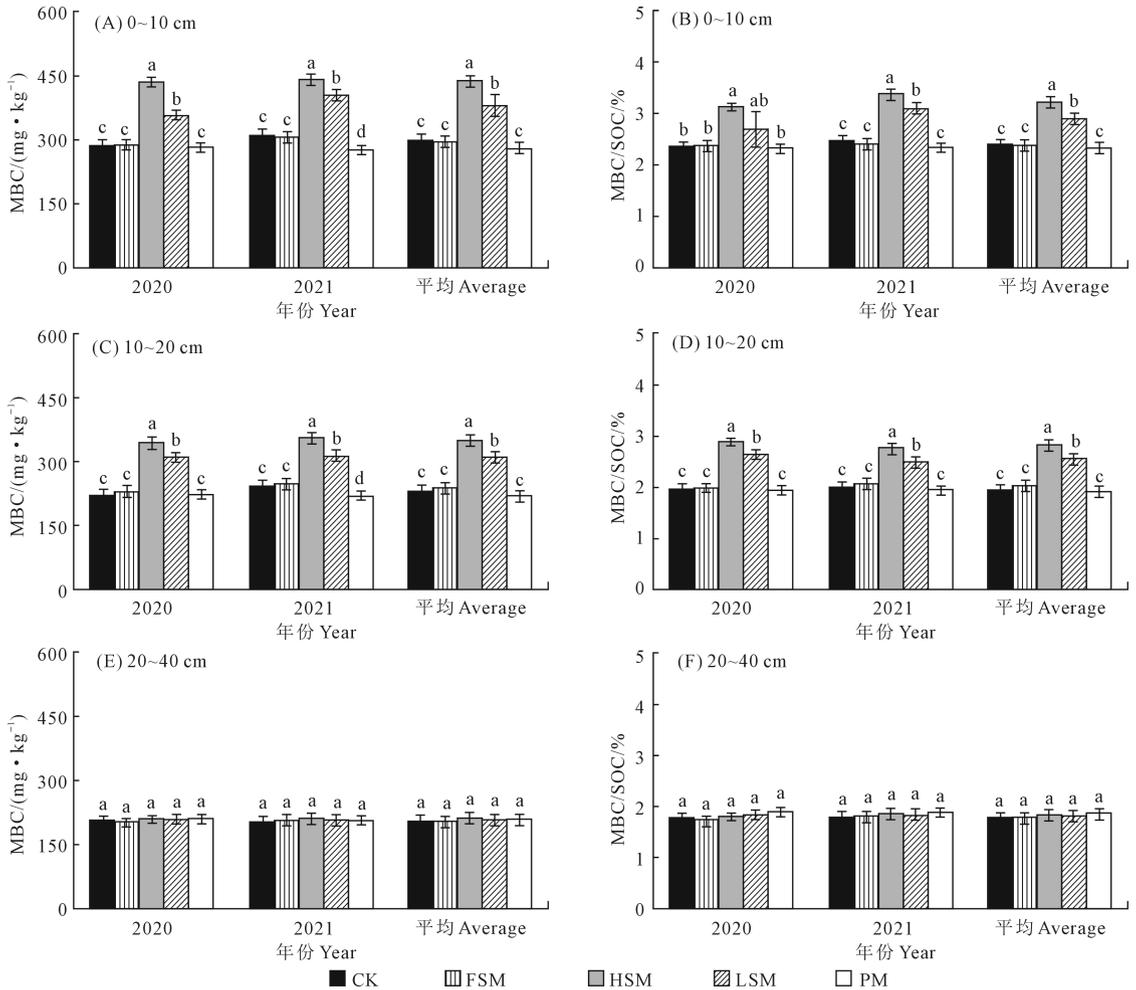


图 4 不同覆盖措施下各土层土壤微生物量碳 (MBC) 含量及其占 SOC 的比例

Fig.4 Soil microbial biomass carbon (MBC) content and its proportion to SOC of different soil depths under different mulching treatments

表 2 土壤有机碳及其组分间相关性

Table 2 Correlations among soil organic carbon and its fractions

指标 Index	SOC	POC	PCM	MBC
SOC	1			
POC	0.773 **	1		
PCM	0.653 **	0.809 **	1	
MBC	0.742 **	0.824 **	0.764 **	1

注: ** 表示极显著相关 ($P < 0.01$)。

Note: ** indicates highly significant correlation ($P < 0.01$).

土壤 POC 作为一种半活性碳组分,主要由未分解或者半分解的动植物残体和根系残体组成。它在土壤中周转速度较快,对土壤表层植物残体的积累变化非常敏感^[5]。本研究表明,两个生育期秸秆覆盖处理均显著提高了 0~20 cm 土层 POC 含量,这与李海波等^[34]研究结果一致。HSM 处理对 POC 的提升程度大于 LSM 处理,表明更多的秸秆残体输入可有效促进土壤团聚^[35],进而提高 POC 含量。FSM 处理 POC 含量与 CK 差异不显著,也是因为冬小麦

播前秸秆移除使碳源输入减少,土壤团聚作用减弱所致^[6, 36-37]。地膜覆盖与无覆盖处理之间土壤 POC 含量差异不显著,可能是地膜覆盖加速了土壤有机质矿化,导致土壤水稳定性团粒数量减少^[38]。另外,与其他处理相比,生育期秸秆覆盖还显著提高了各土层土壤 POC 占 SOC 的比例,说明生育期秸秆覆盖处理下,土壤的团聚保护作用有效提高了 POC 对 SOC 的贡献率。本研究中各处理土壤 POC/SOC 变化范围为 13.11%~45.48%,这与姬强等^[6]在冬小麦-夏玉米轮作农田的报道一致,但比武均等^[39]在黄土高原旱作农田报道的范围值 (54.02%~76.78%) 低,数据差异可能是覆盖年限及田间管理方式不同所致,同时也表明与 SOC 相比,土壤 POC 组分对管理措施的反应更为敏感。

PCM 和 MBC 作为土壤有机碳库的活性组分,不仅能够反映土壤稳定性,还能迅速响应农田管理措施^[8, 40-41]。本研究表明,生育期秸秆覆盖对 0~10 cm 土层土壤 PCM、MBC 含量提升效果显著,这与吴

海梅等^[14]研究结果一致,其原因在于秸秆覆盖具有保湿增温效应,同时增加了底物供应,共同刺激了土壤微生物生长代谢^[27, 42]。夏闲期秸秆覆盖对土壤 PCM 和 MBC 含量影响不显著,可能由于试验地区降雨主要集中在夏闲期(7~9月),此时土壤含水量较大,且夏季土壤温度较高,加快了微生物代谢速率所致^[43]。地膜覆盖同样对土壤 PCM 和 MBC 含量影响不显著,这与毛海兰等^[27]的研究结果相似。付鑫等^[4]研究表明地膜覆盖会降低土壤 PCM 含量,是因为地膜覆膜影响了土壤与环境的空气交换,增加了土壤 CO₂浓度,进而对微生物呼吸产生一定的抑制作用;而李世清等^[44]研究则发现地膜覆膜会提高土壤 MBC 含量。研究者所得结果不同可能与试验年限和供试作物等不同有关。

本研究中土壤 PCM 占 SOC 比例(PCM/SOC)变化范围为 1.67%~3.09%,这与吴海梅等^[14]在甘肃省旱作农田的研究结果相似,而土壤 MBC 占比(MBC/SOC)变化范围为 1.79%~3.42%,则与孔德杰等^[45]在陕西关中地区研究结果相似,但低于李廷亮等^[31]在晋南旱地研究的结果。两种活性碳组分的占比变化范围与前人的研究不完全一致,可能是由于各试验所在地水热条件、土壤类型和土层深度不同所致。生育期秸秆覆盖显著提高了 0~20 cm 土层 MBC 占 SOC 的比例,且 HSM 促进作用大于 LSM,表明增加外源碳输入数量能显著促进 MBC 的积累,这与钱瑞雪等^[46]研究结果一致;而 HSM 和 LSM 并未显著提高 PCM 占 SOC 的比例,表明 PCM/SOC 不会因 SOC 的增加而发生明显的变化。由于 PCM 反映了土壤有机碳被微生物分解矿化的潜力,土壤 PCM 占比未发生变化也表明生育期秸秆覆盖是一种有效的农田土壤固碳方式^[7]。

通常情况下,SOC 由于其较高的背景值以及对气候变化、农田管理措施等响应的滞后性,短期内变化较为缓慢^[41];而土壤碳组分 POC、PCM 和 MBC 可以快速响应地表环境的变化。本研究表明,不同覆盖措施下土壤有机碳及其组分之间均极显著相关,说明半活性碳组分 POC 以及活性碳组分 PCM 和 MBC(尤其是 MBC)能够较为准确地反映土壤碳库的改变^[40]。由此可见,研究土壤碳组分不仅可以预测土壤总有机碳的变化趋势,还能更加准确地对农田的耕作、栽培等管理措施效果做出评价。

4 结 论

与不覆盖相比,旱作冬小麦农田长期生育期秸秆覆盖在表层土壤(0~20 cm)表现出显著的固碳效

应,且增加覆盖量能显著提高表层 SOC 以及土壤活性碳组分含量,而休闲期覆盖和地膜覆盖总体上并未显著影响 SOC 及其组分含量。生育期秸秆覆盖同时还显著提高了 0~20 cm 土层 POC 和 MBC 占 SOC 的比例。SOC 与土壤 POC、PCM、MBC 之间具有显著相关性。在黄土高原旱作农业区,应积极推广生育期高量秸秆覆盖以促进农田土壤固碳,提高土壤肥力。

参 考 文 献:

- [1] 王芳芳,肖波,孙福海,等. 黄土高原生物结皮覆盖对风沙土和黄绵土溶质运移的影响[J]. 应用生态学报, 2020, 31(10): 3404-3412.
WANG F F, XIAO B, SUN F H, et al. Effects of biological soil crusts on solute transport characteristics of sandy and loessal soils on the Loess Plateau, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(10): 3404-3412.
- [2] TANG H M, LI C, XIAO X P, et al. Effects of long-term fertiliser regime on soil organic carbon and its labile fractions under double cropping rice system of southern China [J]. Acta Agriculturae Scandinavica, Section B-Soil & Plant Science, 2020, 70(5): 409-418.
- [3] SAINJU U M, SCHOMBERG H H, SINGH B P, et al. Cover crop effect on soil carbon fractions under conservation tillage cotton[J]. Soil and Tillage Research, 2007, 96(1/2): 205-218.
- [4] 付鑫,王俊,赵丹丹. 地膜覆盖对黄土高原旱作春玉米田土壤碳氮组分的影响[J]. 水土保持学报, 2017, 31(3): 239-243.
FU X, WANG J, ZHAO D D. Effects of plastic film mulching on soil carbon and nitrogen fractions in a dryland spring maize field on the loess plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31(3): 239-243.
- [5] SAINJU U M, CAESAR-TONTHAT T, JABRO J D. Carbon and nitrogen fractions in dryland soil aggregates affected by long-term tillage and cropping sequence[J]. Soil Science Society of America Journal, 2009, 73(5): 1488-1495.
- [6] 姬强,孙汉印,王勇,等. 土壤颗粒有机碳和矿质结合有机碳对4种耕作措施的响应[J]. 水土保持学报, 2012, 26(2): 132-137.
JI Q, SUN H Y, WANG Y, et al. Responses of soil particulate organic carbon and mineral-bound organic carbon to four kinds of tillage practices[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2012, 26(2): 132-137.
- [7] 陈吉,赵炳梓,张佳宝,等. 长期施肥潮土在玉米季施肥初期的有机碳矿化过程研究[J]. 土壤, 2009, 41(5): 719-725.
CHEN J, ZHAO B Z, ZHANG J B, et al. Research on process of fluvo-aquic soil organic carbon mineralization in initial stage of maize growth under long-term different fertilization[J]. Soils, 2009, 41(5): 719-725.
- [8] 范凯,何永涛,孙维,等. 不同管理措施对西藏河谷农田土壤微生物量碳的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2013, (1): 20-24.
FAN K, HE Y T, SUN W, et al. Different management on soil microbial biomass carbon in the Tibetan plateau farmland[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2013, (1): 20-24.
- [9] 张鹏,李涵,贾志宽,等. 秸秆还田对宁南旱区土壤有机碳含量及土壤碳矿化的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(12):

- 2518-2525.
ZHANG P, LI H, JIA Z K, et al. Effects of straw returning on soil organic carbon and carbon mineralization in semi-arid areas of Southern Ningxia, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(12): 2518-2525.
- [10] 张国, 曹志平, 胡娟娟. 土壤有机碳分组方法及其在农田生态系统研究中的应用[J]. *应用生态学报*, 2011, 22(7): 1921-1930.
ZHANG G, CAO Z P, HU C J. Soil organic carbon fractionation methods and their applications in farmland ecosystem research: a review[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(7): 1921-1930.
- [11] DONG Q, YANG Y C, YU K, et al. Effects of straw mulching and plastic film mulching on improving soil organic carbon and nitrogen fractions, crop yield and water use efficiency in the Loess Plateau, China[J]. *Agricultural Water Management*, 2018, 201: 133-143.
- [12] DAI Z J, HU J S, FAN J, et al. No-tillage with mulching improves maize yield in dryland farming through regulating soil temperature, water and nitrate-N[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2021, 309: 107288.
- [13] XIAO L A, ZHAO R Q, KUHN N J. Straw mulching is more important than no tillage in yield improvement on the Chinese Loess Plateau[J]. *Soil and Tillage Research*, 2019, 194: 104314.
- [14] 吴海梅, 周彦莉, 郑浩飞, 等. 秸秆带状覆盖对土壤有机碳及其活性组分的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2022, 40(1): 61-69.
WU H M, ZHOU Y L, ZHENG H F, et al. Effects of straw strip mulching on soil organic carbon and active carbon fractions[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2022, 40(1): 61-69.
- [15] 王钰皓, 庞津雯, 杨佳霖, 等. 不同覆盖方式对旱作农田土壤碳氮含量及玉米产量的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2022, 40(1): 20-29, 41.
WANG Y H, PANG J W, YANG J L, et al. Effects of different mulching methods on soil carbon and nitrogen content and maize yield in semiarid farmland[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2022, 40(1): 20-29, 41.
- [16] 叶元生, 黄彩霞, 柴守玺, 等. 秸秆带状覆盖对旱地冬小麦农田土壤特性及产量的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2021, 39(6): 146-152.
YE Y S, HUANG C X, CHAI S X, et al. Effects of straw strip mulching on soil characteristics and yield of winter wheat in dryland[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2021, 39(6): 146-152.
- [17] 张英英, 蔡立群, 武均, 等. 不同耕作措施下陇中黄土高原旱作农田土壤活性有机碳组分及其与酶活性间的关系[J]. *干旱地区农业研究*, 2017, 35(1): 1-7.
ZHANG Y Y, CAI L Q, WU J, et al. The relationship between soil labile organic carbon fractions and the enzyme activities under different tillage measures in the Loess Plateau of central Gansu province[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2017, 35(1): 1-7.
- [18] 戴伊莎, 贾会娟, 熊瑛, 等. 保护性耕作措施对西南旱地玉米田土壤有机碳、氮组分及玉米产量的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2021, 39(3): 82-90.
DAI Y S, JIA H J, XIONG Y, et al. Impact of conservation tillage measures on maize yield, soil organic carbon and nitrogen components of maize field in rain-fed region in southwest China[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2021, 39(3): 82-90.
- [19] 刘美霞, 刘秀, 赵燕, 等. 地膜覆盖对旱作春玉米农田土壤微生物碳源代谢的影响[J]. *生态学报*, 2022, 42(22): 9213-9225.
LIU M X, LIU X, ZHAO Y, et al. Effects of film mulching on soil microbial carbon source metabolism in dry-farmland[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(22): 9213-9225.
- [20] 皮小敏, 孙本华, 崔全红, 等. 不同覆盖措施对壤土碳氮及水分的影响[J]. *干旱区研究*, 2017, 34(4): 806-814.
PI X M, SUN B H, CUI Q H, et al. Effect of different mulching on soil carbon, nitrogen and moisture contents in eum-orthic anthrosols[J]. *Arid Zone Research*, 2017, 34(4): 806-814.
- [21] 徐欣, 王笑影, 鲍雪莲, 等. 长期免耕不同秸秆覆盖量对玉米产量及其稳定性的影响[J]. *应用生态学报*, 2022, 33(3): 671-676.
XU X, WANG X Y, BAO X L, et al. Effects of long-term no-tillage and stover mulching on maize yield and its stability[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, 33(3): 671-676.
- [22] AZIZ I, MAHMOOD T, ISLAM K R. Effect of long term no-till and conventional tillage practices on soil quality[J]. *Soil and Tillage Research*, 2013, 131: 28-35.
- [23] 方华军, 杨学明, 张晓平, 等. 东北黑土区坡耕地表层土壤颗粒有机碳和团聚体结合碳的空间分布[J]. *生态学报*, 2006, 26(9): 2847-2854.
FANG H J, YANG X M, ZHANG X P, et al. Spatial distribution of particulate organic carbon and aggregate associated carbon in topsoil of a sloping farmland in the black soil region, Northeast China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(9): 2847-2854.
- [24] 赵丹丹, 王俊, 付鑫. 长期定位施肥对旱作农田土壤有机碳及其组分的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2017, 35(1): 97-102.
ZHAO D D, WANG J, FU X. Effect of long-term fertilization on soil organic carbon and its fractions under dryland farming system[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2017, 35(1): 97-102.
- [25] JENKINSON D S, POWLSON D S. The effects of biocidal treatments on metabolism in soil-V: a method for measuring soil biomass[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1976, 8(3): 209-213.
- [26] 李蓉蓉, 王俊, 毛海兰, 等. 秸秆覆盖对冬小麦农田土壤有机碳及其组分的影响[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(3): 187-192.
LI R R, WANG J, MAO H L, et al. Effects of straw mulching on soil organic carbon and fractions of soil carbon in a winter wheat field[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31(3): 187-192.
- [27] 毛海兰, 王俊, 付鑫, 等. 秸秆和地膜覆盖条件下玉米农田土壤有机碳组分生长季动态[J]. *中国生态农业学报*, 2018, 26(3): 347-356.
MAO H L, WANG J, FU X, et al. Seasonal dynamics of soil organic carbon fractions under straw and plastic film mulching of spring maize[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2018, 26(3): 347-356.
- [28] 卜玉山, 邵海林, 王建程, 等. 秸秆与地膜覆盖春玉米和春小麦耕层土壤碳氮动态[J]. *中国生态农业学报*, 2010, 18(2): 322-326.
BU Y S, SHAO H L, WANG J C, et al. Dynamics of soil carbon and nitrogen in plowed layer of spring corn and spring wheat fields mulched with straw and plastic film[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2010, 18(2): 322-326.
- [29] ZHANG P, WEI T, JIA Z K, et al. Soil aggregate and crop yield changes with different rates of straw incorporation in semiarid areas of northwest China[J]. *Geoderma*, 2014, 230/231: 41-49.

- [30] 王永栋, 武均, 蔡立群, 等. 秸秆还田量对陇中旱作麦田土壤团聚体稳定性和有机碳含量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2022, 40(2): 232-239, 249.
- WANG Y D, WU J, CAI L Q, et al. Effects of straw returning amount on stability of soil aggregates and organic carbon content in dryland wheat field of the Loess Plateau[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2022, 40(2): 232-239, 249.
- [31] 李廷亮, 王嘉豪, 黄璐, 等. 秸秆还田替代化肥对土壤有机碳组分及冬小麦产量的影响[J]. 山西农业科学, 2022, 50(6): 771-780.
- LI T L, WANG J H, HUANG L, et al. Effects of straw returning and replacing chemical fertilizer on soil organic carbon fractions and winter wheat yield[J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2022, 50(6): 771-780.
- [32] WANG J, FU X, SAINJU U M, et al. Soil carbon fractions in response to straw mulching in the Loess Plateau of China[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2018, 54(4): 423-436.
- [33] 梁怡仓, 王俊, 刘全全, 等. 地表覆盖对黄土高原土壤有机碳及其组分的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2014, 32(5): 161-167.
- LIANG Y C, WANG J, LIU Q Q, et al. Effects of soil surface mulching on soil organic carbon and its fractions in a wheat field in Loess Plateau, China[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2014, 32(5): 161-167.
- [34] 李海波, 韩晓增, 尤孟阳. 不同土地利用与施肥管理下黑土团聚体颗粒有机碳分配变化[J]. 水土保持学报, 2012, 26(1): 184-189.
- LI H B, HAN X Z, YOU M Y. Particulate organic carbon distribution in aggregates differing in land use and long-term fertilization in black soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26(1): 184-189.
- [35] 付鑫, 王俊, 刘全全, 等. 不同覆盖材料及旱作方式土壤团聚体和有机碳含量的变化[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(6): 1423-1430.
- FU X, WANG J, LIU Q Q, et al. Soil aggregate and organic carbon contents with different surface mulching under dryland farming system[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2015, 21(6): 1423-1430.
- [36] 黎嘉成, 高明, 田冬, 等. 秸秆及生物炭还田对土壤有机碳及其活性组分的影响[J]. 草业学报, 2018, 27(5): 39-50.
- LI J C, GAO M, TIAN D, et al. Effects of straw and biochar on soil organic carbon and its active components[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2018, 27(5): 39-50.
- [37] 高飞, 贾志宽, 张鹏, 等. 秸秆覆盖对宁南旱作农田活性有机质及碳库管理指数的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2011, 29(3): 107-111, 117.
- GAO F, JIA Z K, ZHANG P, et al. Effect of straw mulching on soil active organic carbon and soil C pool management index in the arid areas of Southern Ningxia[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2011, 29(3): 107-111, 117.
- [38] 张少宏, 付鑫, IHSAN M, 等. 秸秆和地膜覆盖对黄土高原旱作小麦田土壤团聚体氮组分的影响[J]. 水土保持学报, 2020, 34(1): 236-241, 248.
- ZHANG S H, FU X, MUHAMMAD I, et al. Effects of straw and plastic film mulching on nitrogen composition of soil aggregates in dryland wheat field on the Loess Plateau[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34(1): 236-241, 248.
- [39] 武均, 蔡立群, 张仁陟, 等. 耕作措施对旱作农田土壤颗粒态有机碳的影响[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(5): 728-736.
- WU J, CAI L Q, ZHANG R Z, et al. Distribution of soil particulate organic carbon fractions as affected by tillage practices in dry farmland of the Loess Plateau of central Gansu province[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2018, 26(5): 728-736.
- [40] 张赛, 王龙昌, 黄召存, 等. 土壤活性有机碳不同组分对保护性耕作的响应[J]. 水土保持学报, 2015, 29(2): 226-231, 252.
- ZHANG S, WANG L C, HUANG Z C, et al. Effects of conservation tillage on active soil organic carbon composition[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 29(2): 226-231, 252.
- [41] SAINJU U M, SINGH B P, WHITEHEAD W F, et al. Carbon supply and storage in tilled and nontilled soils as influenced by cover crops and nitrogen fertilization[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2006, 35(4): 1507-1517.
- [42] 白重九, 王健波, 董雯怡, 等. 长期免耕旱作对冬小麦生长季土壤剖面有机碳含量的影响[J]. 中国农业气象, 2021, 42(3): 169-180.
- BAI C J, WANG J B, DONG W Y, et al. Effects of long-term no-tillage on soil organic carbon contents of winter wheat in different soil layers and growth period[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2021, 42(3): 169-180.
- [43] 李利利, 王朝辉, 王西娜, 等. 不同地表覆盖栽培对旱地土壤有机碳、无机碳和轻质有机碳的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(2): 478-483.
- LI L L, WANG C H, WANG X N, et al. Effects of soil-surface mulching on organic carbon, inorganic carbon and light fraction organic carbon in dryland soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2009, 15(2): 478-483.
- [44] 李世清, 李东方, 李凤民, 等. 半干旱农田生态系统地膜覆盖的土壤生态效应[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2003, 31(5): 21-29.
- LI S Q, LI D F, LI F M, et al. Soil ecological effects of plastic film mulching in semiarid agro-ecological system[J]. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 2003, 31(5): 21-29.
- [45] 孔德杰, 朱金霞, 任成杰, 等. 麦豆长期轮作下秸秆还田对土壤碳氮组分及作物产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2022, 40(5): 190-200.
- KONG D J, ZHU J X, REN C J, et al. Effects of straw return on soil carbon and nitrogen components and crop yield under long-term wheat-soybean rotation[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2022, 40(5): 190-200.
- [46] 钱瑞雪, 刘岩, 陈智文, 等. 玉米秸秆添加对土壤碳氮周转相关酶活性动态的影响[J]. 土壤通报, 2020, 51(5): 1109-1117.
- QIAN R X, LIU Y, CHEN Z W, et al. Effects of maize residue amendment on the dynamics of enzyme activities related with soil carbon and nitrogen turnover[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2020, 51(5): 1109-1117.