

秸秆带状覆盖对土壤有机碳及其活性组分的影响

吴海梅^{1,2,3}, 周彦莉^{1,2,3}, 郑浩飞^{1,2,3}, 李亚伟^{1,2}, 马建涛^{1,2}, 夏博文^{1,2,3},
王凤仁^{1,2,3}, 尚旭民^{1,2,3}, 张旭辉⁵, 路建龙⁴, 逢蕾^{1,2,3}

(1. 甘肃农业大学农学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 甘肃省干旱生境作物学重点实验室, 甘肃 兰州 730070;
3. 甘肃农业大学植物生产类实验教学中心, 甘肃 兰州 730070; 4. 甘肃农业大学财经学院, 甘肃 兰州 730070;
5. 甘肃农业大学生命科学技术学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要:为了探讨秸秆带状覆盖对旱地不同剖面深度土壤总有机碳(TOC)、可溶性有机碳(DOC)、微生物量碳(MBC)和易氧化态碳(EOC)的影响,于2017—2020年在甘肃省布设秸秆带状覆盖试验,设玉米整秆带状覆盖(T_{SM})处理,以黑膜双垄沟全膜覆盖(T_{PM})和传统露地平作(T_{NM})为对照。结果表明:土壤有机碳和活性碳组分含量随土壤剖面深度增加而显著降低($P<0.05$); T_{SM} 较 T_{PM} 和 T_{NM} 显著提高了0~20 cm土层土壤总有机碳含量、可溶性有机碳含量和易氧化态有机碳含量,2019、2020年的测定结果具有相同趋势,TOC、DOC和EOC两年平均值 T_{SM} 分别比 T_{PM} 提高16.99%、67.65%和155.83%,比 T_{NM} 提高8.00%、31.20%和74.30%;2019、2020年 T_{SM} 均提高0~120 cm土层微生物量碳含量,各土壤剖面 T_{SM} 较 T_{PM} 两年平均提高了16.82%、21.49%、34.04%、26.28%和29.78%, T_{SM} 较 T_{NM} 两年平均提高了24.83%、51.32%、56.72%、78.94%和73.42%($P<0.05$)。2019、2020年0~20 cm DOC/TOC和EOC/TOC, T_{SM} 处理高于 T_{NM} 和 T_{PM} ,MBC/TOC T_{SM} 处理高于 T_{NM} ,说明 T_{SM} 提高了表层土壤有机碳、活性碳组分的含量和各活性碳组分的分配比率。

关键词: 秸秆带状覆盖;地膜覆盖;土壤有机碳;土壤活性碳组分;土壤质量

中图分类号: S153.6⁺2, S156 **文献标志码:** A

Effects of straw strip mulching on soil organic carbon and active carbon fractions

WU Haimei^{1,2,3}, ZHOU Yanli^{1,2,3}, ZHENG Haofei^{1,2,3}, LI Yawei^{1,2}, MA Jiantao^{1,2}, XIA Bowen^{1,2,3},
WANG Fengren^{1,2,3}, SHANG Xumin^{1,2,3}, ZHANG Xuhui⁵, LU Jianlong⁴, PANG Lei^{1,2,3}

(1. College of Agronomy, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China;

2. Key Laboratory of Arid Land Crop Science of Gansu Province, Lanzhou, Gansu 730070, China;

3. Experimental Teaching Center of Plant Production, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China;

4. College of Finance and Economics, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China;

5. College of Life Science and Technology, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China)

Abstract: To explore the effects of straw strip mulching on total organic carbon (TOC), dissolved organic carbon (DOC), microbial biomass carbon (MBC) and easily oxidizable carbon (EOC) at different depths of dry land, a straw strip mulching test was set up in Gansu Province during 2017 to 2020. Treatments included core straw strip coverage (T_{SM}), full black film double furrow coverage (T_{PM}), and traditional open field flat cultivation (T_{NM}) as the control. The results showed that the content of soil organic carbon and activated carbon components

收稿日期:2021-02-25

修回日期:2021-06-06

基金项目:国家自然科学基金(32160525);甘肃省自然科学基金(20JR5RA034);甘肃省高等学校创新基金(2020B125);甘肃农业大学研究生重点课程建设项目(GSAU-ZDKC-1909);盛彤笙创新基金(GSAU-STS-1736);甘肃农业大学省级大学生创新创业训练计划项目(S202110733006)

作者简介:吴海梅(1995-),女,甘肃武威人,硕士研究生,研究方向为土壤养分。E-mail:1518861554@qq.com

通信作者:逢蕾(1979-),女,山东诸城人,博士,副教授,主要从事覆盖栽培对土壤生态影响的研究。E-mail:125530457@qq.com

decreased significantly with the increase of soil profile depth ($P < 0.05$). T_{SM} significantly increased the total organic carbon content, soluble organic carbon content and soluble organic carbon content of the 0~20 cm soil layer compared with T_{PM} and T_{NM} . The content of easily oxidizable organic carbon had the same trend in 2019 and 2020. The two-year average T_{SM} of TOC, DOC and EOC was 16.99%, 67.65% and 155.83% higher than that of T_{PM} , and 8.00%, 31.20%, and 74.30% higher than that of T_{NM} in 2019 and 2020. T_{SM} increased the microbial biomass carbon content of 0~120 cm soil layer. Compared with T_{PM} , the T_{SM} of each soil profile increased by 16.82%, 21.49%, 34.04%, 26.28% and 29.78% on average. Compared with T_{NM} during the two-year period, the average of T_{SM} increased by 24.83%, 51.32%, 56.72%, 78.94% and 73.42% ($P < 0.05$). In 2019 and 2020, in the 0~20 cm, DOC/TOC and EOC/TOC of T_{SM} were both higher than that of T_{NM} and T_{PM} . MBC in T_{SM} was increased in the 0~120 cm soil profile. A higher MBC/TOC in T_{SM} indicated that T_{SM} increased the content of organic carbon, activated carbon components, activities of the surface soil, and distribution ratio of the carbon component.

Keywords: straw strip mulch; plastic film mulch; soil organic carbon; soil active carbon component; soil quality

土壤有机碳库是维持土壤生态系统碳平衡、稳定、健康与可持续的关键因素,受人类活动干扰的农田土壤碳库是土壤有机碳库的核心组成,因其被频繁干扰,农田土壤碳库活性组分处于动态变化中。土壤有机碳主要存在于土壤微生物体、动植物残体及被微生物分解和合成的所有含碳的有机物质之中,易受土壤微生物的数量和活性以及土壤理化性质的影响。土壤有机碳是土壤养分的重要组成部分,影响土壤理化性状,在土壤肥力和植物营养中也发挥着重要作用。土壤有机碳的数量是不同形态碳分解和合成的平衡结果,不能灵敏地反映土壤有机碳转化速率和质量变化^[1]。可溶性有机碳、土壤微生物量碳和易氧化态碳等土壤中的活性碳组分虽然在有机碳中所占的比例较小,但可以灵敏地反映不同农业管理措施如秸秆覆盖和耕作方式等对土壤有机碳转化速率和质量的影响,因此活性碳组分常被用作评价不同管理措施下土壤质量的一个重要指标^[2]。研究土壤有机碳和活性组分的变化,有利于揭示农业措施对土壤有机碳的影响机制^[3]。

在干旱区、半湿润半干旱区和半干旱区,秸秆覆盖措施因其良好的增产,保持土壤水分作用而得到了广泛的应用^[4],秸秆覆盖对土壤碳库的影响也颇受关注。崔凤娟等^[5]研究表明,秸秆覆盖较传统耕作处理显著提高土壤总有机碳、可溶性有机碳、微生物量有机碳、易氧化态有机碳的含量及土壤碳库各项指数。崔志强等^[6]研究表明,长期秸秆覆盖增加了土壤有机碳及其有机碳组分的含量,而地膜覆盖使表层土壤活性有机碳含量显著增加,深层活性有机碳含量变化不显著。蔡太义等^[7]研究表明,随着秸秆覆盖年限的延长,土壤有机碳含量呈增加的趋势。秸秆覆盖由于增加了土壤外源有机质的投入,影

响土壤有机碳活性和稳定性,改变了土壤有机碳和活性碳组分的组成与存在方式^[8-9]。前期关于秸秆覆盖对有机碳影响的研究多集中在对表层土壤的研究^[10],近几年,研究者发现深层土壤(>20 cm)碳储量丰富,比表层土壤碳更加稳定,研究农田生态系统深层有机碳的形成和稳定有重要意义^[11-12]。

玉米秸秆带状覆盖栽培技术,是一种利用玉米秸秆整秆进行田间局部覆盖、抗旱保墒的作物种植技术,即“种植带不覆盖秸秆,覆盖带不种植作物”,由此分为秸秆覆盖带和种植带,两带相间排列,播种带宽度不超过两带总宽度的 50%,播种带种植密度增加,总播种量不变。这项技术可大幅度提升旱地小麦和马铃薯产量。在小麦上,该技术较无覆盖露地平作栽培平均增产 44.4%,小麦产量与地膜覆盖产量接近^[13-14];在马铃薯上,较目前甘肃省主推的黑膜双垄沟全膜覆盖技术增产 13.1%,商品马铃薯率提高 14.7%~18.5%,田间病害也较黑膜覆盖和露地栽培明显减轻^[15]。目前关于该技术的研究主要集中在秸秆带状覆盖对作物产量^[16-17]、土壤水分^[18-19]和土壤温度^[19-20]的影响方面,本试验着重开展秸秆带状覆盖对土壤有机碳含量和活性碳组分影响的研究,研究结果可充实西北旱地秸秆带状覆盖土壤碳质量的理论研究。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验布设在甘肃省定西市通渭县平襄镇甘肃农业大学旱作试验基地(35°11'N~105°19'E),该地属中温带半干旱气候,海拔 1 750 m,年均气温 7.2℃,年日照时数 2 100~2 430 h,无霜期 120~170 d,多年平均降水量 339.7 mm。试验地土壤类型为

黄绵土, 0~200 cm 土层土壤平均容重为 $1.25 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 土壤速效氮含量为 $5.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 速效磷含量为 $10.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 速效钾含量为 $107.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ [21]。

1.2 试验设计

试验于 2017—2020 年进行。设 3 个处理, 分别为玉米整秆带状覆盖 (T_{SM})、黑膜双垄沟全膜覆盖 (T_{PM}) 和传统露地平作 (T_{NM}), 其中 T_{PM} 和 T_{NM} 为对照处理。每个处理设 3 次重复, 共 9 个小区, 完全随机区组排列。小区面积 60 m^2 ($10 \text{ m} \times 6 \text{ m}$)。 T_{SM} : 在播种后将玉米整秆覆盖于作物行间, 种植带 70 cm, 覆盖带 50 cm, 覆盖带和种植带相间排列, 在种植带上播种作物, 在覆盖带上均匀覆盖玉米秸秆整秆, 覆盖量 $9000 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。 T_{PM} : 在播种前使用聚乙烯黑色塑料地膜 (幅宽 1.2 m, 厚度 0.01 mm) 进行全膜双垄沟覆盖。 T_{NM} : 传统不覆盖露地平作 [19]。2017—2020 年种植作物为玉米-春小麦-冬小麦-马铃薯。

1.3 样品采集与分析

分别在 2019 年 7 月 10 日和 2020 年 10 月 1 日作物成熟期用直径为 5 cm 的土钻按 5 点取样法随机钻取 5 个层次的土壤样品, 取样深度为 0~20、20~40、40~60、60~90 cm 和 90~120 cm。样品等层混合均匀后分成两份, 一份拣去植物根系、碎屑等杂物, 过 2 mm 土壤筛, 储藏于 4°C 冰箱中用于测定土壤微生物量碳 (MBC) 和土壤可溶性有机碳 (DOC); 另一份风干后过 0.25 mm 筛, 用于测定土壤总有机

碳 (TOC) 和易氧化态碳 (EOC)。土壤 TOC 采用重铬酸钾外加加热法测定 [22]; DOC 采用去离子水浸提法 [23]。具体操作过程为, 称取 15 g 过 2 mm 筛的新鲜土壤于 50 mL 离心管中, 加入 30 mL 超纯水, 于 $250 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 速度振荡 30 min 后, 在离心机上以 $4000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 离心 30 min, 取上清液过 $0.45 \mu\text{m}$ 滤膜, 使用总有机碳分析仪 (METASH TOC-2000) 进行测定。MBC 采用氯仿熏蒸- K_2SO_4 浸提法测定 [23]; EOC 采用高锰酸钾氧化法测定 [24]。

1.4 数据处理

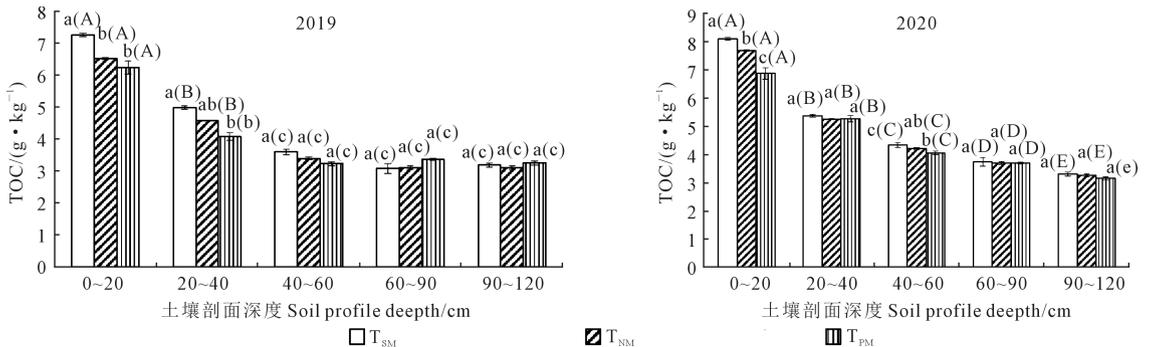
用 Excel 2019 和 Origin 2018 进行数据处理和绘图, SPSS 22.0 对数据进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 秸秆带状覆盖对土壤总有机碳 (TOC) 含量的影响

由图 1 可知, 2019、2020 年在 0~20 cm 土层 T_{SM} 较其他处理 TOC 含量差异显著 ($P < 0.05$), $T_{SM} > T_{NM} > T_{PM}$, 表明 T_{SM} 相较于 T_{NM} 和 T_{PM} 显著提高了土壤 TOC 含量, 2019 年分别提高 11.12% 和 16.12%, 2020 年分别提高 5.35% 和 17.78%。说明 T_{SM} 处理有利于有机碳的积累, 但处理 T_{PM} 有机碳含量低于 T_{NM} , 这可能是地膜增温保水加速了有机质矿化。

随土壤剖面深度增加, 各处理 TOC 含量降低, 以 40 cm 土层为拐点, 在 0~40 cm 范围内, 各处理土壤 TOC 含量迅速降低, 且 2019 年 T_{SM} 和 T_{NM} 处理达到极显著水平 ($P < 0.01$), T_{PM} 处理达到显著水平 ($P < 0.05$), 2020 年各处理均达到极显著水平 ($P < 0.01$)。



注: 括号内不同小写字母表示同一处理不同土壤剖面深度间差异显著 ($P < 0.05$), 不同大写字母表示同一处理不同土壤剖面深度间差异极显著 ($P < 0.01$); 括号外不同小写字母表示同一土壤剖面深度不同处理间差异显著 ($P < 0.05$), 不同大写字母表示同一土壤剖面深度不同处理间差异极显著 ($P < 0.01$), 下同。

Note: Lowercase letters in parentheses indicate significant differences in depth of different soil profiles with the same treatment ($P < 0.05$) and the uppercase letters indicate significant differences with different soil profiles with the same treatment ($P < 0.01$). The lowercase letters outside the brackets indicate significant differences between treatments with the same soil profile depth ($P < 0.05$) and the uppercase letters indicate significant differences between treatments with the same soil profile depth ($P < 0.01$), the same below.

图 1 不同处理下不同土壤剖面深度土壤总有机碳 (TOC) 含量分析

Fig.1 Analysis of total organic carbon (TOC) contents in different soil profile depths of different treatments

2.2 秸秆带状覆盖对土壤活性碳组分及土壤质量的影响

2.2.1 土壤可溶性有机碳(DOC)及可溶性有机碳分配比率(DOC/TOC) 由表 1 可知,秸秆带状覆盖后提高了各土层 DOC 含量。在 0~20 cm 土层,2019 年各处理 DOC 含量差异显著($P<0.05$), $T_{SM}>T_{NM}>T_{PM}$, T_{SM} 相较于 T_{NM} 和 T_{PM} 分别提高了 29.56% 和 68.71%,2020 年各处理 DOC 含量差异极显著($P<0.01$), $T_{SM}>T_{NM}>T_{PM}$, T_{SM} 相较于 T_{NM} 和 T_{PM} 提高了 32.73% 和 66.70%。2019、2020 年在 20~40 cm 土层 DOC 含量表现为 $T_{SM}>T_{PM}>T_{NM}$, T_{SM} 和 T_{PM} 间差异不显著, T_{SM} 显著高于 T_{NM} ($P<0.01$),两年分别提高了 14.24% 和 8.18%。40~60、60~90 cm 和 90~120 cm 土层土壤剖面各处理 DOC 含量变化趋于稳定。

2019、2020 年测定的结果趋势相同,在 0~40 cm 土层,各处理土壤 DOC 含量迅速降低,40~120 cm 土层 DOC 含量趋于稳定。2019 年 T_{SM} 、 T_{NM} 和 T_{PM} 在 0~120 cm 土层的变异系数分别为 42.52%、34.28% 和 24.22%,2020 年分别为 42.95%、27.87%

和 13.85%,说明 T_{SM} 处理下 DOC 含量随土层变化幅度最大。

DOC/TOC 在 0~20 cm 土壤剖面 2019、2020 年均表现为 T_{SM} 高于其他处理,40~120 cm 各处理间差异不大。表明 DOC 主要集中在浅层, T_{SM} 相较无覆盖和地膜覆盖提高了表层 DOC/TOC。

2.2.2 土壤微生物量碳(MBC)及微生物量碳分配比率(MBC/TOC) 由表 2 可知,2019、2020 年 MBC 含量在 0~120 cm 各土壤剖面均表现为 T_{SM} 显著高于其他处理。2019 年 MBC 含量在 0~20 cm 土层和 2020 年 40~60 cm 土层达到显著水平($P<0.05$),其余土层 T_{SM} 均达到极显著水平($P<0.01$)。2019、2020 年 MBC 含量 T_{SM} 较 T_{NM} 在各土壤剖面分别提高 38.76%、91.07%、108.63%、150.36%、129.58%、10.92%、11.57%、4.81%、7.50% 和 17.27%, T_{SM} 较 T_{PM} 各土壤剖面分别提高 19.81%、22.20%、44.30%、32.11%、41.63%、13.83%、20.77%、23.78%、20.45% 和 17.92%。

表 1 不同处理下不同土壤剖面深度可溶性有机碳(DOC)含量及分配比率(DOC/TOC)

Table 1 Analysis of dissolved organic carbon content and distribution ratio in different depth profile depths of different treatments

项目 Item	年份 Year	处理 Treatment	土壤剖面深度 Soil profile depth/cm					标准差 SD	CV/%
			0~20	20~40	40~60	60~90	90~120		
DOC /(mg·kg ⁻¹)	2019	T_{SM}	14.07Aa (ABa)	6.98Aa (Bb)	6.69Aa (Bbc)	6.40Aa (Bbc)	5.92Aa (Bc)	3.41	42.52
		T_{NM}	10.86Bb (Aa)	6.11Ab (Bb)	5.82Abb (Bb)	5.53Abb (Bb)	5.43Aab (Bb)	2.31	34.28
		T_{PM}	8.34Bc (Aa)	6.50Aab (Bb)	5.43Bb (Bbc)	4.95Bb (Bc)	4.85Ab (Bc)	1.46	24.22
		SD	2.87	0.44	0.65	0.73	0.53		
		CV/%	25.86	6.70	10.80	13.02	9.89		
	2020	T_{SM}	14.72Aa (Aa)	7.14Aa (Bb)	6.64Aa (Bc)	6.59Aa (Bc)	6.57Aa (Bc)	3.58	42.95
		T_{NM}	11.09Bb (Aa)	6.6Bb (Bb)	6.58Aa (Bb)	6.39Bb (Bb)	6.36Bb (Bb)	2.06	27.87
		T_{PM}	8.83Cc (Aa)	6.96Aba (Bb)	6.57Aa (Bc)	6.57Aa (Bc)	6.56Aa (Bc)	0.98	13.85
		SD	2.97	0.27	0.04	0.11	0.12		
		CV/%	25.73	3.98	0.57	1.69	1.82		
DOC/TOC	2019	T_{SM}	0.19Aa (Aa)	0.14Aa (Ab)	0.19Aa (Aa)	0.21Aa (Aa)	0.19Aa (Aa)	0.03	13.86
		T_{NM}	0.17ABab (a)	0.13Aa (b)	0.17A a(a)	0.18Aab (a)	0.18Aa (a)	0.02	10.84
		T_{PM}	0.14Bb (a)	0.16Aa (a)	0.17Aa (a)	0.15Ab (a)	0.15Aa (a)	0.01	8.60
		SD	0.03	0.01	0.01	0.03	0.02		
		CV/%	17.89	9.64	5.48	17.42	11.06		
	2020	T_{SM}	0.18Aa (ABb)	0.13Aa (Dd)	0.15Aa (Cc)	0.18Aa (Bb)	0.2Aab (Aa)	0.03	16.52
		T_{NM}	0.14BCb (Cd)	0.13Aa (De)	0.16Aa (Cc)	0.17Aa (Bb)	0.19Ab (Aa)	0.02	15.11
		T_{PM}	0.13Cc (Cd)	0.13Aa (Cd)	0.16Aa (Bc)	0.18Aa (Bb)	0.21Aa (Aa)	0.03	21.11
		SD	0.03	0.00	0.01	0.01	0.01		
		CV/%	17.64	0.00	3.61	3.21	5.00		

在 0~60 cm 土层 MBC 含量变化幅度较大, 60~120 cm 变化较小。2019 年 MBC 含量 $T_{PM} > T_{NM}$ 主要是气温和降雨对微生物的影响较大, 2019 年较 2020 年试验区温度高, 降雨少, 地膜覆盖发挥了增温保水的作用。

2019、2020 年 MBC/TOC 变化趋势相似, 2019 年在 0~20 cm 和 40~120 cm 土层 T_{SM} 处理的 MBC/TOC 高于其他处理, T_{SM} 显著高于 T_{NM} ($P < 0.05$)。2020 年 0~120 cm 各土层 T_{SM} 高于 T_{NM} , 20~120 cm 土层 T_{SM} 显著高于 T_{PM} ($P < 0.05$), 说明在各土壤剖面 T_{SM} 相较 T_{NM} 和 T_{PM} 可提高土壤 MBC 的分配比率。

2.2.3 土壤易氧化态有机碳 (EOC) 及易氧化态有机碳分配比率 (EOC/TOC) 由表 3 可知, 2019、2020 年 T_{SM} 极显著提高了 0~20 cm 土层 EOC 含量 ($P < 0.01$), 2019 年 T_{SM} 较 T_{NM} 和 T_{PM} 分别提高了 121.05% 和 94.44%, 2020 年 T_{SM} 较 T_{NM} 和 T_{PM} 分别提高了 27.54% 和 122.78%。2019 年 EOC 含量在 20~40 cm 土层 T_{SM} 显著高于 T_{NM} 和 T_{PM} , 分别高出 145.71% 和 196.55% ($P < 0.05$); 2020 年 EOC 含量在 20~40 cm 土层 T_{SM} 较

T_{PM} 提高了 42.65% ($P < 0.01$)。2019 年 T_{SM} 显著提高了 40~60 cm 土层 EOC 含量, 较 T_{NM} 和 T_{PM} 分别高出 270% 和 208.33%, 2020 年 T_{SM} 极显著提高了 40~60 cm 土壤剖面深度 EOC 含量, 较 T_{NM} 和 T_{PM} 分别高出 93.10% 和 43.59%。2019、2020 年均表现出 60~90 cm 土层土壤 EOC 含量无显著差异 ($P < 0.05$), 表明 T_{SM} 对深层土壤 EOC 含量无显著影响。

处理 T_{SM} 、 T_{NM} 和 T_{PM} 土壤 EOC 含量随土壤剖面深度增加极显著降低 ($P < 0.01$), T_{SM} 处理 60 cm 土层以下趋于稳定, T_{NM} 和 T_{PM} 40 cm 土层以下趋于稳定。2019 年在 0~20、20~40、40~60、60~90 cm 和 90~120 cm 土壤剖面 T_{SM} 处理土壤 EOC 含量分别为 2.1、0.86、0.37、0.19 $g \cdot kg^{-1}$ 和 0.12 $g \cdot kg^{-1}$, 最大值与最小值相差 17.50 倍, 变异系数达 112.5%; 2020 年在 0~20、20~40、40~60、60~90 cm 和 90~120 cm 土壤剖面 EOC 含量分别为 1.76、0.97、0.56、0.27 $g \cdot kg^{-1}$ 和 0.18 $g \cdot kg^{-1}$, 最大值和最小值相差 9.78 倍, 变异系数达 86.12%, 说明 EOC 随土层加深变化幅度较大, 更灵敏。

表 2 不同处理下不同土壤剖面深度微生物量碳 (MBC) 含量及分配比率 (MBC/TOC)

Table 2 Analysis of microbial biomass carbon content and distribution ratio in different soil profile depths of different treatments

项目 Item	年份 Year	处理 Treatment	土壤剖面深度 Soil profile depth/cm					标准差 SD	CV/%
			0~20	20~40	40~60	60~90	90~120		
MBC /($mg \cdot kg^{-1}$)	2019	T_{SM}	250.02Aa (Aa)	220.15Aa (Bb)	192.13Aa (Cc)	193.05Aa (Cc)	180.04Aa (Cc)	28.13	13.59
		T_{NM}	180.18Bb (Aa)	115.22Cc (Bb)	92.09Cc (BCc)	77.11Cc (Cc)	78.42Cc (Cc)	42.85	39.45
		T_{PM}	208.68Abb (Aa)	180.16Bb (Bb)	133.15Bb (Cc)	146.13Bb (Cc)	127.12Bb (Cc)	34.52	21.70
		SD	35.11	52.96	50.28	58.32	50.82		
		CV/%	16.49	30.82	36.14	42.03	39.54		
	2020	T_{SM}	260.33Aa (Aa)	220.75Aa (Bb)	191.94Aa (Cc)	169.64Aa (Dd)	165.52Aa (Ee)	39.47	19.58
		T_{NM}	234.7Bb (Aa)	197.85Bb (Bb)	183.14ABab (Cc)	157.80Bb (Dd)	141.15Bb (Ee)	36.33	19.86
		T_{PM}	228.7Cc (Aa)	182.78Cc (Bb)	155.07Cc (Cc)	140.84Cc (Dd)	140.37Cc (Dd)	37.28	21.99
		SD	16.80	19.12	19.26	14.48	14.30		
		CV/%	6.96	9.54	10.90	9.27	9.60		
MBC/TOC	2019	T_{SM}	3.45Aa (Cc)	4.43Aa (BCb)	5.38Aa (ABab)	6.30Aa (Aa)	5.69Aa (ABa)	1.12	22.18
		T_{NM}	2.76Ab (Aa)	2.53Bb (Aa)	2.70Cc (Aa)	2.50Cc (Aa)	2.53Bc (Aa)	0.12	4.60
		T_{PM}	3.36Aa (Ab)	4.45Aa (Aa)	4.12Bb (Aab)	4.34Bb (Aa)	3.94Bb (Aab)	0.43	10.61
		SD	0.37	1.11	1.34	1.90	1.58		
		CV/%	11.69	29.08	32.94	43.36	39.11		
	2020	T_{SM}	3.22ABab (Cd)	4.12Aa (Bc)	4.44Aa (Bbc)	4.55Aa (Bb)	5.02Aa (A)	0.67	15.69
		T_{NM}	3.06Bb (c)	3.77Bb (b)	4.37Aab (a)	4.28Aba (a)	4.32Bb (a)	0.56	14.10
		T_{PM}	3.34Aa (c)	3.48Cc (BCc)	3.83Bc (b)	3.82Bb (b)	4.46Bb (A)	0.43	11.44
		SD	0.14	0.32	0.33	0.37	0.37		
		CV/%	4.38	8.46	7.92	8.75	8.05		

EOC/TOC 的变化范围在 2.97%~28.97%,2019 年 EOC/TOC 在 0~40 cm 土层处理 T_{SM} 极显著高于 T_{NM} 和 T_{PM} ($P<0.01$),2019、2020 年 0~60 cm 土壤剖面深度 EOC/TOC 均表现出 T_{SM} 大于其他处理;表明 T_{SM} 提高了 0~60 cm 土层土壤剖面深度易氧化态有机碳的分配比率,且 EOC 的分配比率较大。

2.3 土壤有机碳和活性有机碳组分的相关性分析

将 2019、2020 年土壤有机碳和各碳组分的平均值进行相关性分析(表 4),土壤 TOC 与 DOC、MBC、EOC 和 EOC/TOC 之间呈极显著正相关关系,TOC

与 DOC/TOC、MBC/TOC 之间呈极显著负相关关系。DOC 与 MBC、EOC 和 EOC/TOC 之间呈极显著正相关关系,DOC 与 MBC/TOC 之间呈极显著负相关关系。DOC/TOC 与 MBC/TOC 之间呈极显著正相关关系,DOC/TOC 与 MBC、EOC 和 EOC/TOC 之间呈极显著负相关关系。MBC 与 EOC/TOC 之间是正相关关系,但未达显著水平。MBC/TOC 与 EOC 之间呈极显著负相关关系。EOC 与 EOC/TOC 之间呈极显著正相关关系。

表 3 不同处理下不同土壤剖面深度易氧化态有机碳含量及分配比率

Table 3 Analysis of easily oxidizable carbon content and distribution ratio in different depth profile depths of different treatment

项目 Item	年份 Year	处理 Treatment	土壤剖面深度 Soil profile depth/cm					标准差 SD	CV/%
			0~20	20~40	40~60	60~90	90~120		
EOC /(g·kg ⁻¹)	2019	T_{SM}	2.1Aa (Aa)	0.86Aa (Bb)	0.37Aa (Bc)	0.19Aa (Bc)	0.12Aa (Bc)	0.82	112.58
		T_{NM}	0.95Bb (Aa)	0.35Bb (Bb)	0.1Bb (Bb)	0.11Aa (Bb)	0.17Aa (Bb)	0.36	106.43
		T_{PM}	1.08Bb (Aa)	0.29Bb (Bb)	0.12Bb (Bb)	0.15Aa (Bb)	0.13Aa (Bb)	0.41	116.28
		SD	0.63	0.31	0.15	0.04	0.03		
		CV/%	45.75	62.64	76.50	26.67	18.90		
	2020	T_{SM}	1.76Aa (Aa)	0.97Aa (Bb)	0.56A (Cc)	0.27Aa (Cd)	0.18Bc (Cd)	0.64	86.12
		T_{NM}	1.38Bb (Aa)	0.89Aba (Bb)	0.29Bc (Cc)	0.35Aa (Cc)	0.46Aa (Cc)	0.46	68.12
		T_{PM}	0.79Cc (Aa)	0.68Bb (Bb)	0.39Bb (Bc)	0.28Aa (Bd)	0.43Aab (Bc)	0.21	41.38
		SD	0.49	0.15	0.14	0.04	0.15		
		CV/%	37.31	17.69	33.03	14.53	43.10		
EOC/TOC	2019	T_{SM}	28.97Aa (Aa)	17.27Aa (Bb)	10.05Aa (Cc)	6.19Aa (Ccd)	3.67Aa (Cd)	10.19	77
		T_{NM}	14.59Bb (Aa)	7.96Aa (Aab)	2.97Bb (Ab)	3.64Aa (Ab)	5.45Aa (Ab)	4.7	67.93
		T_{PM}	17.5Bb (Aa)	7.25Aa (Bb)	3.7Bb (Bb)	4.5Aa (Bb)	4.01Aa (Bb)	5.82	78.77
		SD	7.6	5.59	3.89	1.3	0.94		
		CV/%	37.35	51.64	69.87	27.16	21.59		
	2020	T_{SM}	21.81Aa (Aa)	18.11Aa (Bb)	13.04Aa (Cc)	7.14Aa (Cd)	5.47Bb (Cd)	6.98	53.20
		T_{NM}	18.05Aa (Aa)	16.88Aa (Aa)	6.38Bc (Ac)	9.52Aa (Abc)	14Aa (Aab)	4.94	38.07
		T_{PM}	11.56Ab (Aab)	12.84Ab (Aa)	9.73Bb (Abc)	7.62Aa (Ac)	13.62Aa (Aa)	2.43	21.92
		SD	5.19	2.76	3.33	1.26	4.82		
		CV/%	30.25	17.29	34.27	15.55	43.69		

表 4 各指标相关性分析

Table 4 Correlation of indicators

	TOC	DOC	DOC/TOC	MBC	MBC/TOC	EOC	EOC/TOC
TOC	1						
DOC	0.887**	1					
DOC/TOC	-0.399**	0.054	1				
MBC	0.812**	0.771**	-0.205	1			
MBC/TOC	-0.534**	-0.370**	0.478**	0.039	1		
EOC	0.919**	0.930**	-0.169	0.811**	-0.422**	1	
EOC/TOC	0.826**	0.821**	-0.188	0.766**	-0.358*	0.962**	1

注: * 表示在 0.05 水平下显著相关, ** 表示在 0.01 水平下显著相关。

Note: *, significant correlation at 0.05 level; **, significant correlation at 0.01 level.

3 讨论

3.1 秸秆带状覆盖对土壤有机碳及活性碳组分的影响

在本研究中,秸秆带状覆盖处理相较其他处理提高了有机碳和各碳组分含量。外源玉米秸秆覆盖增加了土壤有机质的输入^[5],可为微生物提供充足的碳源,促进微生物生长、繁殖,提高土壤微生物活性,而微生物分解的有机物质以及秸秆腐解物是有机碳和碳组分的主要来源^[25]。可溶性有机碳含量增加与土壤生物分泌、秸秆分解和微生物死亡等过程有关,秸秆带状覆盖处理提高土壤可溶性有机碳含量可能与秸秆分解和作物成熟期微生物死亡有关;土壤微生物量有机碳含量增加是因为秸秆带状覆盖不仅提供了有机物还具有增温保水和稳定土壤温度的作用,给土壤微生物提供了相对适宜的活动场所,增加了微生物的数量^[5]。黑膜双垄沟覆盖处理降低了有机碳和各碳组分含量可能是地膜的增温保水作用加速了土壤有机质的矿化^[26-28],也可能是地膜覆盖后减少了雨水对土壤的直接击打,使得土壤变沉实,微生物活性降低^[29],再者地膜阻碍了残枝落叶凋零后回归农田土壤。秸秆带状覆盖处理可以增加浅层土壤总有机碳和各碳组分含量^[26,30],是因为秸秆带状覆盖后不仅增加了有机物质输入,也可能是秸秆带状覆盖后,土壤表层受人类活动的干扰减少,再者土壤表层的温度低于无覆盖对照和地膜覆盖且较为稳定,减少了土壤表层有机碳被风蚀和氧化,因此表层土壤总有机碳含量、可溶性有机碳含量、微生物量有机碳含量和易氧化态有机碳含量增加,出现了有机碳和碳组分的表聚现象,这与前人^[31-32]得到的结果一致。随土壤剖面深度增加土壤有机碳和各碳组分含量降低,且在40 cm以下土壤有机碳含量和各碳组分含量逐渐趋于稳定。在0~40 cm各土壤剖面秸秆带状覆盖处理高于其他处理是因为枯枝落叶凋零后都在地表,以及植物残根大部分也在土壤表层,所以在表层土壤所积累的有机碳和碳组分含量较高,土壤剖面深度增加,微生物分布减少,因此有机碳循环速度较低,使得有机碳和碳组分在深层土壤中较稳定^[33]。

3.2 秸秆带状覆盖对土壤有机碳质量和碳组分相关性的影响

土壤中活性碳组分分配比率在一定程度上反映了土壤有机碳的质量和稳定程度。土壤水溶性有机碳在总有机碳中的分配比主要反映土壤有机

碳的稳定性及损失情况^[34],分配比越高,土壤有机碳的活性越大,稳定性也越差。微生物量有机碳分配比率可反映活性有机碳库的周转速率^[35];易氧化态有机碳分配比可反映土壤有机碳的活性强度,分配比值越大说明土壤有机碳的活性越强,被分解矿化的潜力越大^[35];本研究表明,处理和土壤剖面深度均影响土壤活性碳组分分配比率,改变了土壤质量。秸秆带状覆盖处理相较黑膜双垄沟覆盖处理和无覆盖处理提高了0~20 cm土层可溶性有机碳的分配比率,而在20~40 cm土层可溶性有机碳的分配比率变化幅度不大,说明0~20 cm土层秸秆带状覆盖处理下土壤有机碳流失的快,20~120 cm土层各处理土壤有机碳相对较稳定;2019、2020年各土层微生物量有机碳分配比率秸秆带状覆盖高于无覆盖对照说明秸秆带状覆盖处理提高了各土层的活性有机碳库的周转速率;2019、2020年秸秆带状覆盖处理提高了0~60 cm土层易氧化态有机碳的分配比率,说明秸秆带状覆盖处理提高了0~60 cm土层土壤有机碳的活性强度。相比较可溶性有机碳分配比率和微生物量有机碳分配比率,易氧化态有机碳的分配比率更大且易氧化态有机碳的分配比率与总有机碳含量呈极显著正相关关系,说明易氧化态有机碳含量的变化规律更接近于总有机碳含量的变化规律,易氧化态有机碳可以更灵敏地反应不同土壤剖面深度总有机碳的变化。但是从土壤固碳的角度看,黑膜双垄沟覆盖处理降低了20~90 cm土层土壤剖面的微生物量有机碳分配比率、0~40 cm各土壤剖面的易氧化态有机碳的分配比率和0~20 cm土壤剖面的可溶性有机碳分配比率,土壤中活性碳组分分配比率数值小则增加了土壤有机碳的稳定性,有利于碳的储存^[36]。

4 结论

1) 秸秆带状覆盖处理比黑膜双垄沟覆盖处理和无覆盖对照显著提高了0~20 cm土层土壤有机碳含量;随土层加深秸秆带状覆盖、黑膜双垄沟覆盖和无覆盖对照总有机碳含量均迅速下降,40~120 cm土层趋于稳定。

2) 秸秆带状覆盖处理比无覆盖对照和黑膜双垄沟覆盖处理提高了0~20 cm土层可溶性有机碳含量、0~120 cm土层土壤微生物量有机碳含量和0~40 cm土层易氧化态有机碳含量。

3) 土壤可溶性有机碳的分配比率、微生物量有机碳的分配比率和易氧化态有机碳的分配比率在不同处理和不同土壤剖面深度下差异较大。秸秆

带状覆盖提高了 0~20 cm 土壤剖面深度可溶性有机碳的分配比率、微生物量有机碳的分配比率和易氧化态有机碳的分配比率。土壤总有机碳含量与土壤可溶性有机碳含量、微生物量有机碳含量、易氧化态有机碳含量和易氧化态有机碳分配比率之间是极显著正相关关系,土壤总有机碳含量与土壤可溶性有机碳分配比率、微生物量有机碳分配比率之间是极显著负相关关系,因此在该地区土壤易氧化态有机碳相较于土壤可溶性有机碳和土壤微生物量有机碳可以更灵敏地反应土壤总有机碳的变化。

参考文献:

- [1] 路文涛,贾志宽,张鹏,等.秸秆还田对宁南旱作农田土壤活性有机碳及酶活性的影响[J].农业环境科学学报,2011,30(3):522-528.
LU W T, JIA Z K, ZHANG P, et al. Effects of straw returning on soil labile organic carbon and enzyme activity in semi-arid areas of southern Ningxia, China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2011, 30(3): 522-528.
- [2] YANG X D, FENG Y S, ZHANG X H, et al. Mineral soil conditioner requirement and ability to adjust soil acidity[J]. Scientific Reports, 2020, 10(1): 18207.
- [3] MEYER D D, BEKER S A, BÜCKER F, et al. Bioremediation strategies for diesel and biodiesel in oxisol from southern Brazil[J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2014, 95(Part B): 356-363.
- [4] 梁贻仓.不同农田管理措施下土壤有机碳及其组分研究进展[J].安徽农业科学,2013,41(24):9964-9966.
LIANG Y C. Research advances in soil organic carbon and its fractions under different farmland management method[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2013, 41(24): 9964-9966.
- [5] 崔凤娟,刘景辉,李立军,等.免耕秸秆覆盖对土壤活性有机碳库的影响[J].西北农业学报,2012,21(9):195-200.
CUI F J, LIU J H, LI L J, et al. Effect of zero tillage with mulching on active soil organic carbon [J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2012, 21(9): 195-200.
- [6] 崔志强,汪景宽,李双异,等.长期地膜覆盖与不同施肥处理对棕壤活性有机碳的影响[J].安徽农业科学,2008,36(19):8171-8173.
CUI Z Q, WANG J K, LI S Y, et al. Effects of long-term mulching and different fertilization treatments on active organic carbon in brown earth[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2008, 36(19): 8171-8173.
- [7] 蔡太义,黄耀威,黄会娟,等.不同年限免耕秸秆覆盖对土壤活性有机碳和碳库管理指数的影响[J].生态学杂志,2011,30(9):1962-1968.
CAI T Y, HUANG Y W, HUANG H J, et al. Soil labile organic carbon and carbon pool management index as affected by different years no-tilling with straw mulching[J]. Chinese Journal of Ecology, 2011, 30(9): 1962-1968.
- [8] ABBOUD F Y, FAVARETTO N, MOTTA A C V, et al. Phosphorus mobility and degree of saturation in oxisol under no-tillage after long-term dairy liquid manure application[J]. Soil and Tillage Research, 2018, 177: 45-53.
- [9] 王虎,王旭东,田霄鸿.秸秆还田对土壤有机碳不同活性组分储量及分配的影响[J].应用生态学报,2014,25(12):3491-3498.
WANG H, WANG X D, TIAN X H. Effect of straw-returning on the storage and distribution of different active fractions of soil organic carbon[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(12): 3491-3498.
- [10] HARRISON R B, FOOTEN P W, STRAHM B D. Deep soil horizons: contribution and importance to soil carbon pools and in assessing whole-ecosystem response to management and global change [J]. Forest Science, 2011, 57(1): 67-76.
- [11] EILERS K G, DEBENPORT S, ANDERSON S, et al. Digging deeper to find unique microbial communities: the strong effect of depth on the structure of bacterial and archaeal communities in soil[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2012, 50: 58-65.
- [12] MATHIEU J A, HATTÉ C, BALESSENT J, et al. Deep soil carbon dynamics are driven more by soil type than by climate: a worldwide meta-analysis of radiocarbon profiles [J]. Global Change Biology, 2015, 21(11): 4278-4292.
- [13] 宋亚丽,杨长刚,李博文,等.秸秆带状覆盖对旱地冬小麦产量及土壤水分的影响[J].麦类作物学报,2016,36(6):765-772.
SONG Y L, YANG C G, LI B W, et al. Effect of bundled straw mulching on yield of winter wheat and soil moisture in arid region [J]. Journal of Triticeae Crops, 2016, 36(6): 765-772.
- [14] 李守蕾,杨长刚,李福,等.玉米整秆带状覆盖量对旱地冬小麦土壤水分利用的影响[J].水土保持研究,2016,23(6):122-127.
LI S L, YANG C G, LI F, et al. Effects of whole maize straw mulching amounts on soil water use of winter wheat in dry land [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2016, 23(6): 122-127.
- [15] 韩凡香,常磊,柴守玺,等.半干旱雨养区秸秆带状覆盖种植对土壤水分及马铃薯产量的影响[J].中国生态农业学报,2016,24(7):874-882.
HAN F X, CHANG L, CHAI S X, et al. Effect of straw strip covering on ridges on soil water content and potato yield under rain-fed semiarid conditions [J]. Chinese Journal of Eco-agriculture, 2016, 24(7): 874-882.
- [16] 钱玉平,田慧慧,程宏波,等.秸秆覆盖及播种方式对马铃薯耗水特性和产量的影响[J].中国生态农业学报,2020,28(6):826-834.
QIAN Y P, TIAN H H, CHENG H B, et al. Effects of straw mulching and sowing methods on water consumption characteristics and yield of potato in arid region of northwest China [J]. Chinese Journal of Eco-agriculture, 2020, 28(6): 826-834.
- [17] 马建涛,程宏波,陈玉章,等.不同覆盖方式对旱地马铃薯耗水特性和产量的影响[J].生态学杂志,2020,39(7):2242-2250.
MA J T, CHENG H B, CHEN Y Z, et al. Effects of different mulching practices on soil water consumption and potato tuber yield in dryland farming [J]. Chinese Journal of Ecology, 2020, 39(7): 2242-2250.
- [18] 陈玉章,田慧慧,李亚伟,等.秸秆带状沟覆垄播对旱地马铃薯产量和水分利用效率的影响[J].作物学报,2019,45(5):714-727.
CHEN Y Z, TIAN H H, LI Y W, et al. Effects of straw strip mulching on furrows and planting in ridges on water use efficiency and tuber yield in dryland potato [J]. Acta Agronomica Sinica, 2019, 45

- (5): 714-727.
- [19] 马建涛,陈玉章,程宏波,等.覆盖方式对旱地不同熟性马铃薯土壤水热特征和产量的影响[J].灌溉排水学报,2020,39(7):7-16.
MA J T, CHEN Y Z, CHENG H B, et al. Effects of different mulching methods on soil moisture-temperature and tuber yield of potato cultivars with different maturities[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(7): 7-16.
- [20] 杨长刚,柴守玺.秸秆带状覆盖对旱地冬小麦产量及土壤水热利用的调控效应[J].应用生态学报,2018,29(10):3245-3255.
YANG C G, CHAI S X. Regulatory effects of bundled straw covering on winter wheat yield and soil thermal-moisture utilization in dryland[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(10): 3245-3255.
- [21] 李辉,柴守玺,常磊,等.秸秆带状覆盖下培土对马铃薯产量与水分利用效率的影响[J].农业工程学报,2019,35(21):107-115.
LI H, CHAI S X, CHANG L, et al. Effects of earthing up on yield and water use efficiency of potato under straw strip mulching planting pattern[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(21): 107-115.
- [22] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社,2016:30-34.
BAO S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2016: 30-34.
- [23] LIANG B C, MACKENZIE A F, Schnitzer M, et al. Management-induced change in labile soil organic matter under continuous corn in eastern Canadian soils[J]. Biology and Fertility of Soils, 1998, 26(2): 88-94.
- [24] VANCE E D, BROOKES P C, JENKINSON D S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1987, 19(6): 703-707.
- [25] 徐国伟,常二华,蔡建.秸秆还田的效应及影响因素[J].耕作与栽培,2005,(1):6-9.
XU G W, CHANG E H, CAI J. Effects and influencing factors of straw returning to field[J]. Culture With Planting, 2005, (1): 6-9.
- [26] 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.
- [27] 王琳,李玲玲,高立峰,等.长期保护性耕作对黄绵土总有机碳和易氧化有机碳动态的影响[J].中国生态农业学报,2013,21(9):1057-1063.
WANG L, LI L L, GAO L F, et al. Effect of long-term conservation tillage on total organic carbon and readily oxidizable organic carbon in loess soils[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2013, 21(9): 1057-1063.
- [28] 黄高宝,李玲玲,张仁陟,等.免耕秸秆覆盖对旱作麦田土壤温度的影响[J].干旱地区农业研究,2006,24(5):1-4,19.
HUANG G B, LI L L, ZHANG R Z, ET al. Effects of no-tillage with stubble retention on soil temperature of rainfed spring wheat field[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2006, 24(5): 1-4, 19.
- [29] 吴荣美,王永鹏,李凤民,等.秸秆还田与全膜双垄集雨沟播耦合对半干旱黄土高原玉米产量和土壤有机碳库的影响[J].生态学报,2012,32(9):2855-2862.
WU R M, WANG Y P, LI F M, et al. Effects of coupling film-mulched furrow-ridge cropping with maize straw soil-incorporation on maize yields and soil organic carbon pool at a semiarid loess site of China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(9): 2855-2862.
- [30] 王新建,张仁陟,毕冬梅,等.保护性耕作对土壤有机碳组分的影响[J].水土保持学报,2009,23(2):115-121.
WANG X J, ZHANG R Z, BI D M, et al. Effects of conservation tillage on soil organic carbon fractions[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2009, 23(2): 115-121.
- [31] 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].农业机械学报,2017,48(11):229-237.
WANG X D, ZHANG X, WANG Y L, et al. Effects of different tillage methods on soil organic carbon pool composition in dark loessial-soil on Loess Plateau[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(11): 229-237.
- [32] 陈文超,徐生,朱安宁,等.保护性耕作对潮土碳、氮含量的影响[J].中国农学通报,2015,31(9):224-230.
CHEN W C, XU S, ZHU A N, et al. Effects of conservation tillage on the content of carbon, nitrogen in fluvo-aquic soil[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2015, 31(9): 224-230.
- [33] 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.
- [34] JANDL R, SOLLINS P. Water-extractable soil carbon in relation to the belowground carbon cycle[J]. Biology and Fertility of Soils, 1997, 25(2): 196-201.
- [35] 许梦璐,吴炜,颜铮明,等.滨海滩涂不同土地利用类型土壤活性有机碳含量与垂直分布[J].南京林业大学学报(自然科学版),2020,44(4):167-175.
XU M L, WU W, YAN Z M, et al. Content and vertical distribution of soil labile organic carbons in different land use types in the tidal flat area[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition), 2020, 44(4): 167-175.
- [36] 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 X H, GUO H H, ZHU Z L, ET al. Effects of different straw return modes on contents of soil organic carbon and fractions of soil active carbon[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(9): 130-135.