

东北半干旱黑土区玉米秸秆还田方式对土壤水溶性有机碳含量及其组分的影响

高盼¹, 申慧波¹, 王宇先¹, 蔡姗姗²,
徐莹莹¹, 杨慧莹¹, 王晨¹, 张巩亮¹

(1. 黑龙江省农业科学院齐齐哈尔分院, 黑龙江 齐齐哈尔 161006; 2. 黑龙江省黑土保护利用研究院, 黑龙江 哈尔滨 150086)

摘要:为明确不同秸秆还田方式下土壤有机碳组分的变化特征,基于6 a 秸秆还田长期定位试验,利用三维荧光光谱技术,对无秸秆还田(CK)、秸秆覆盖还田(FG)、秸秆翻埋还田(FM)处理下土壤有机碳(SOC)含量及水溶性有机碳(WSOC)含量及其结构特征进行分析。结果表明:(1)与CK相比,FM处理0~40 cm 土层SOC含量提高7.87%~29.54%,FG处理0~30 cm 土层SOC含量增加1.91%~18.61%,30~40 cm 土层SOC含量降低7.67%;FM和FG处理0~40 cm 土层土壤WSOC含量分别提升13.42%~39.42%和0.28%~26.34%。(2)通过WSOC三维荧光光谱发现,各土层CK($E_x/E_m=300/34$ 、 $E_x/E_m=300/340$ 、 $E_x/E_m=240/340$ 、 $E_x/E_m=300/340$)处理WSOC荧光特征峰为溶解性微生物代谢产物和类色氨酸蛋白质物质荧光峰;FM($E_x/E_m=340/430$ 、 $E_x/E_m=340/430$ 、 $E_x/E_m=340/435$ 、 $E_x/E_m=340/435$)和FG($E_x/E_m=270/440$ 、 $E_x/E_m=270/435$ 、 $E_x/E_m=340/435$ 、 $E_x/E_m=340/430$)处理为类腐殖酸类物质荧光特征峰,腐殖化程度较高,结构较为复杂;荧光区域积分表明,FM和FG处理类腐殖酸类物质(V)和富里酸类物质(III)的积分百分比分别较CK增加12.18%~27.39%、11.98%~30.72%和3.96%~5.73%、2.99%~5.40%。(3)土壤WSOC包含两个组分,C1($E_x/E_m=340/435$ 、270/435)组分为类腐殖酸类物质,C2($E_x/E_m=290/345$ 、240/345)组分为溶解性微生物代谢产物和类色氨酸蛋白质物质; F_{max} 值结果表明,0~40 cm 土层的C1组分相对含量表现为FM>FG>CK,表明秸秆翻埋还田更有助于土壤中营养物质含量增加和形成更高分子量的有机物。综上,不同秸秆还田方式均可提升SOC和土壤WSOC含量,增加腐殖化程度,加强土壤的供肥能力,翻埋还田处理提升作用更为显著。

关键词: 秸秆还田方式;土壤有机碳;水溶性有机碳;荧光结构;东北黑土区

中图分类号:S156; S513 文献标志码:A

Effects of corn straw returning methods on content and components of soil water soluble organic carbon in the semiarid black soil region of northeast China

GAO Pan¹, SHEN Huibo¹, WANG Yuxian¹, CAI Shanshan²,
XU Yingying¹, YANG Huiying¹, WANG Chen¹, ZHANG Gongliang¹

(1. Qiqihar Branch of Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Qiqihar, Heilongjiang 161006, China;

2. Heilongjiang Province Black Soil Protection and Utilization Research Institute, Harbin, Heilongjiang 150086, China)

Abstract: To examine the changes in soil organic carbon components under different straw returning methods, based on a 6-year straw returning long-term positioning experiment, three-dimensional fluorescence spectroscopy technology was used to analyze the content and structural characteristics of soil organic carbon (SOC) and water-soluble organic carbon (WSOC). The treatments included no straw returning (CK), straw covering returning (FG), and straw burying returning (FM). The results showed that: (1) Compared with CK, FM treatment increased the SOC content in the 0~40 cm soil layer by 7.87%~29.54%, FG treatment increased the SOC content in the 0~30 cm soil layer by 1.91%~18.61%, and the SOC content in the 30~40 cm soil layer decreased by 7.67%.

收稿日期:2023-10-27

修回日期:2024-02-26

基金项目:西部风沙干旱区节水栽培技术集成与示范推广(CX23GG11);黑龙江省省属科研院所科研业务费项目(CZKYF2021-2-C021);齐齐哈尔市科技计划创新激励项目(CNYGG-2023029)

作者简介:高盼(1990-),女,黑龙江齐齐哈尔人,助理研究员,主要从事土壤培肥与改良研究。E-mail:3250655758@qq.com

通信作者:申慧波(1974-),男,黑龙江哈尔滨人,研究员,主要从事耕作栽培与土壤改良。E-mail:13936641617@163.com

The WSOC content in the 0~40 cm soil layer increased by 13.42% to 39.42% and 0.28% to 26.34% respectively after FM and FG treatments. (2) The WSOC three-dimensional fluorescence spectroscopy found that the fluorescence characteristic peaks of CK ($Ex/Em=300/340$, $Ex/Em=300/340$, $Ex/Em=240/340$, $Ex/Em=300/340$) in various soil layers were soluble microbial metabolites and tryptophan like protein substances. FM ($Ex/Em=340/430$, $Ex/Em=340/430$, $Ex/Em=340/435$, $Ex/Em=340/435$) and FG ($Ex/Em=270/440$, $Ex/Em=270/435$, $Ex/Em=340/435$, $Ex/Em=340/430$) were fluorescent characteristic peaks of humic acid like substances, with a high degree of humification and a complex structure. The fluorescence region integration showed that FM and FG treatments increased the integration percentages of humic acid like substances (V) and fulvic acid like substances (III) by 12.18% to 27.39%, 11.98% to 30.72%, and 3.96% to 5.73%, 2.99% to 5.40%, respectively, compared with CK. (3) Soil WSOC consists of two components; C1 ($Ex/Em=340/435$, $270/435$) component was composed of humic acid like substances, and C2 ($Ex/Em=290/345$, $240/345$) component was composed of soluble microbial metabolites and tryptophan like protein substances. The F_{max} value results indicated that the relative content of C1 component in the 0~40 cm soil layer was FM>FG>CK, suggesting that burying and returning straw to the field was more conducive to increasing the nutrient content in the soil and forming higher molecular weight organic matter. In summary, different straw returning methods increased the content of soil SOC and WSOC and the degree of humification and strengthened the soil's fertilizer supply capacity. However, the improvement effect of burying and returning farmland was more significant.

Keywords: straw returning method; soil organic carbon; water soluble organic carbon; fluorescent structure; black soil region of northeast China

土壤有机碳(SOC)是指土壤中各种正价态的含碳有机化合物,不仅与土壤肥力密切相关,而且对地球碳循环有巨大的影响,既是温室气体“源”,也是其重要的“汇”^[1]。土壤水溶性有机碳(Water-soluble organic carbon, WSOC)是土壤碳中最活跃的部分,是土壤中及其重要的部分,且易受耕作方式、气候条件及施肥方式等因素的影响,是指示土壤 SOC 变化的灵敏指标^[2]。近年来,关于秸秆还田对土壤 WSOC 的影响,不同的研究者得出了不同的结论。魏丹等^[3]研究结果指出有机物料还田可以增加土壤 WSOC 含量,使富里酸类物质在化学结构上芳香性较强且结构趋于简单化,促进养分释放。任卫东等^[4]研究了长期秸秆还田配施化肥对 WSOC 含量的影响,结果表明玉米不同生育期土壤 WSOC 含量变化较小,且非根际土壤含量较高。高淑青等^[5]研究了添加玉米秸秆条件下土壤 WSOC 对温度变化的响应,认为秸秆还田+适宜的温度有助于土壤 WSOC 的积累。东北平原黑土区是我国的主要玉米产区,土壤肥力的保持和提高影响着我国粮食安全。近年来,由于化肥过度施用和不合理的机械耕作,土壤 SOC 含量及品质均呈下降趋势,威胁着粮食生产及土壤生态环境^[6]。因此,改善土壤肥力、创造良好的土壤环境对农业生产具有重要意义。

有研究表明,三维荧光光谱和平行因子分析法(PARAFAC)可以将复杂的三维荧光光谱分解为单

独的荧光成分,并减弱荧光化合物之间的干扰,已成为解析溶解性有机质和腐殖酸类物质结构、组成特性的重要方法。以往关于应用荧光光谱探明不同秸秆还田方式对土壤 WSOC 荧光特性和结构特征影响的报道较少^[7]。基于此,本论文以黑龙江省西部半干旱区 6 a 玉米秸秆还田定位试验的农田土壤为研究对象,对秸秆翻埋还田和覆盖还田下的 WSOC 含量、组成及结构进行分析评价,探究不同秸秆还田方式对提升 SOC 和 WSOC 含量及 WSOC 芳香性的影响,以期为东北旱地玉米秸秆的利用以及土壤地力培肥技术提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验在黑龙江省农业科学院齐齐哈尔分院长期定位试验基地(123°41'E, 47°16'N)进行。该地区地势平坦,属于中温带大陆性季风气候,年平均降水量 400 mm,雨热同期,降水主要分布在 5—10 月。试验地土壤类型为碳酸盐黑钙土,0~20 cm 土层土壤基本理化性质为:碱解氮 $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效磷 $16.9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效钾 $134 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,有机质 $26.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,pH 值为 7.82。

1.2 试验设计

秸秆还田定位试验始于 2016 年,至 2022 年已持续 7 a。采用大区对比设计,设置秸秆不还田(对

照,CK)、秸秆覆盖还田(FG)、秸秆翻埋还田(FM)3个处理,具体操作如下:FM处理:机械收获时秸秆粉碎,秸秆粉碎长度 ≤ 10 cm,并在土壤结冻前用栅栏式五铧犁深翻还田25~35 cm,翻耕后重耙1次,播种前再耙1次。FG处理:机械收获时秸秆粉碎,秸秆粉碎长度 ≤ 10 cm,全部覆盖地表。秸秆为全量还田,还田量均为 $15\ 000\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。各处理小区面积为 0.35 hm^2 ,供试作物为玉米(‘嫩单19’),于4月25日机械精量播种,密度 $8.25\text{ 万株}\cdot\text{hm}^{-2}$,收获日期为9月29日。各处理施肥量均为 $750\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,采用免耕播种一体机深施金正大牌控释肥(总养分 $\geq 48\%$,氮:磷:钾=26:11:11);播后喷灌,各处理灌水量均为35 mm;玉米4叶期化学除草,化除后7 d,生育期不扰动土壤。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 土样采集 于2022年9月28日玉米收获前,采用S型取样法在各处理小区的0~10、10~20、20~30、30~40 cm土层采集土壤混合样品(重复3次)。土壤样品风干后过2 mm筛网进行化学分析。

1.3.2 土壤有机碳含量测定 称取风干土样0.2 g,采用重铬酸钾外加热法^[8]测定土壤有机碳含量。

1.3.3 土壤水溶性有机碳提取及含量测定 称取过60目筛风干土样5.0 g,置于100 mL离心管内,加蒸馏水60 mL,搅匀,置于恒温水浴振荡器上振荡($180\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$, $45^\circ\text{C}\pm 2^\circ\text{C}$)1.5 h,取出后 $4\ 000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 离心18 min,上清液用中速定量滤纸过滤。WSOC溶液碳含量采用TOC分析仪(multiN/C2100,德国耶拿)测定^[9]。

1.3.4 荧光光谱测定

(1)三维荧光光谱(3DEEM):在波长范围扫描样品,并能同时记录激发波长(E_x)、发射波长(E_m)、荧光强度(F_{\max}), E_x 、 E_m 和 F_{\max} 为坐标轴画一个三维图。

(2)WSOC荧光光谱测定:使用超纯水将WSOC溶液稀释至 $15\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,以备荧光测定。荧光光谱的测定采用(F-7000,日立)荧光光度计。设置光电倍增管(PMT)电压为700 V,激发波长(E_x)200~490 nm,间隔10 nm,发射波长(E_m)250~550 nm,间隔5 nm,激发光和发射光的狭缝宽度均为5 nm。

(3) F_{\max} 值:使用平行因子分析方法(PARAFAC)识别出各组分相对含量 F_{\max} 。

1.3.5 荧光区域积分 为定量揭示秸秆还田对WSOC的影响,使用Origin软件对3个处理下的土壤WSOC荧光光谱不同区域(I、II、III、IV、V)的荧光数据进行积分^[3],表中数值为各区域积分值占

总区域积分值的百分比。

1.4 数据处理

采用SPSS 19.0分析差异显著性。Microsoft Office Excel 2010进行数据分析,利用MATLAB 2010消除三维荧光图谱的拉曼散射和PARAFAC分析。采用Origin 9.1进行荧光区域积分分析。

2 结果与分析

2.1 秸秆还田方式对土壤有机碳和水溶性有机碳含量的影响

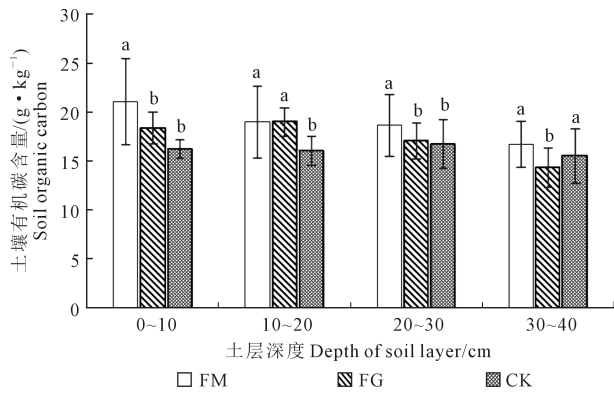
2.1.1 秸秆还田方式对SOC含量的影响 不同处理下SOC的含量如图1所示,与CK相比,FM处理在0~40 cm土层的SOC含量均有提升,各土层分别提高29.54%、18.55%、11.54%和7.87%;FG处理在0~10、10~20、20~30 cm分别增加13.05%、18.61%、1.91%,30~40 cm土层SOC含量降低7.67%。FM处理表层(0~10 cm)的SOC含量显著高于10~20、20~30、30~40 cm土层。FM处理各土层的SOC含量均高于FG处理。

2.1.2 秸秆方式对WSOC的影响 由图2可知,各土层土壤WSOC含量均表现为FM>FG>CK。秸秆还田后,表层(0~10 cm和10~20 cm)土壤WSOC含量均显著提高($P<0.05$)。FM处理0~10、10~20、20~30、30~40 cm土层土壤WSOC含量分别较CK显著提高38.42%、38.20%、13.61%、13.42%。FG处理4个土层土壤WSOC含量也分别较CK增加22.45%、26.34%、2.72%、0.28%。FM处理的土壤WSOC含量随土壤深度增加呈现逐渐降低趋势,FG处理的WSOC含量随土层变化趋势不明显。

2.1.3 秸秆还田方式对WSOC/SOC值的影响 通过对比不同秸秆还田模式的WSOC/SOC值(图3)可以看出,WSOC/SOC变化范围为0.75%~0.88%。与CK相比,FM处理在0~10、10~20、20~30、30~40 cm土层的WSOC占比分别提升0.05、0.13、0.01和0.04个百分点,FG处理在各土层的WSOC占比增加0.09、0.05、0.01和0.03个百分点。

2.2 基于三维荧光结构图谱的WSOC组分分析

2.2.1 0~40 cm土层土壤WSOC三维荧光图谱 不同秸秆还田模式下WSOC荧光图谱(图4)结果显示,秸秆还田处理下的0~40 cm土层土壤WSOC三维荧光光谱具有类似指纹图谱特征,0~10、10~20、30~40 cm土层,CK($E_x/E_m = 300/340$ 、 $E_x/E_m = 300/340$ 、 $E_x/E_m = 300/340$)处理荧光特征峰均为溶解性微生物代谢产物荧光峰。FM($E_x/E_m = 340/430$ 、 $E_x/E_m = 340/430$ 、 $E_x/E_m = 340/435$)和FG



注:不同小写字母代表同一土层不同处理间差异显著 ($P < 0.05$),下同。

Note: Different lowercase letters represent significant differences between different treatments in the same soil layer ($P < 0.05$). The same below.

图 1 秸秆还田对土壤有机碳的影响

Fig.1 Effect of straw returning on soil organic carbon

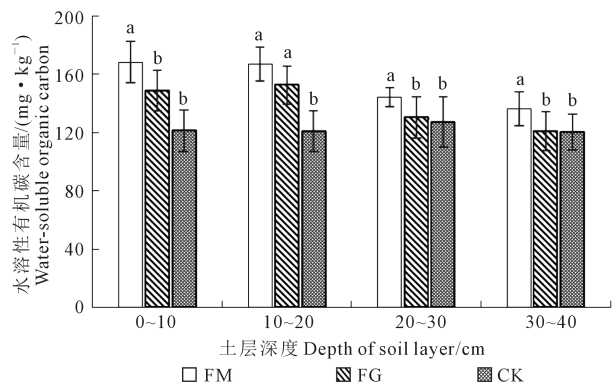


图 2 秸秆还田对土壤水溶性有机碳的影响

Fig.2 Effect of straw returning on soil water-soluble organic carbon

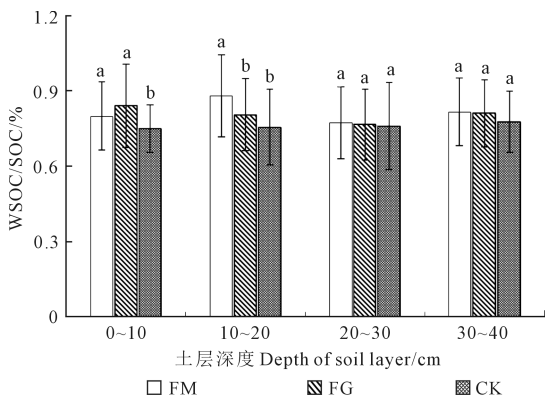


图 3 秸秆还田对 WSOC/SOC 的影响

Fig.3 Effect of straw returning on WSOC/SOC

($Ex/Em = 270/440$ 、 $Ex/Em = 270/435$ 、 $Ex/Em = 340/430$) 处理下荧光特征峰均为类腐殖酸物质荧光峰。20~30 cm 土层,CK ($Ex/Em = 240/340$) 处理的荧光特征峰为类色氨酸芳香蛋白质类物质荧光峰,FM ($Ex/Em = 340/435$) 和 FG ($Ex/Em = 340/435$) 处理

的荧光特征峰仍均为类腐殖酸物质荧光峰。其中溶解性微生物代谢产物和类色氨酸蛋白质物质荧光峰由荧光效率高、分子量小的有机物质产生,类腐殖酸物质荧光峰由结构较为稳定、分子量大的有机物质产生^[10]。

2.2.2 秸秆还田方式下三维荧光各区域积分的变化 各区域积分所占比例如表 1 所示,不同处理对类酪氨酸蛋白质类物质 (I)、类色氨酸芳香蛋白质类物质 (II)、富里酸类物质 (III)、溶解性微生物代谢产物 (IV) 以及类腐殖酸类物质 (V) 所占比例均有不同的影响。

CK 处理 0~40 cm 土层的土壤 WSOC 溶解性微生物代谢产物 (IV) 积分百分比分别较 FM 和 FG 处理提高 11.71%~23.08% 和 10.33%~24.02%,且差异达显著水平 ($P < 0.05$);类色氨酸芳香蛋白质类物质 (II) 积分百分比比较 FM 和 FG 处理增加 3.95%~9.06% 和 4.00%~10.08%。FM 和 FG 处理各土层的土壤 WSOC 类腐殖酸类物质 (V) 积分百分比分别较 CK 处理提升 12.18%~27.39% 和 11.98%~30.72%;富里酸类物质 (III) 的积分百分比分别提高 3.96%~5.73% 和 2.99%~5.40%。

2.2.3 WSOC 荧光组分的 PARAFAC 方法分析 运用 PARAFAC 分析方法,将不同秸秆还田模式下土壤 WSOC 的三维荧光数据进行分解^[12],共识别出两个荧光组分 (图 5)。其中,组分 C1 ($Ex/Em = 340/435, 270/435$) 包含 2 个激发峰、1 个发射峰,为类腐殖酸物质,主要来源于作物腐解产生的有机物^[13],组分 C2 ($Ex/Em = 290/345, 240/345$) 同样包含 2 个激发峰和 1 个发射峰为溶解性微生物代谢产物和类色氨酸蛋白质物质。两个荧光峰处,C1 的发射波 (Em) 波长高于 C2,说明该组分中含有分子量和芳香度更高的有机物质。

2.2.4 WSOC 各组分的 F_{max} 值 WSOC 各组分的荧光强度值反映了其相对含量,可用来表征土壤 WSOC 的结构变化^[13]。如图 6 所示,土壤 WSOC 不同组分的 F_{max} 值在不同深度土层表现不同。PARAFAC 分析方法识别出各组分相对含量表明 FM 和 FG 处理的土壤 WSOC 以 C1 组分为主,CK 处理以 C2 组分为主。FM 处理在 0~40 cm 土层的 C1 组分 F_{max} 值变化范围为 60%~64%,FG 处理在 4 个土层的相对含量为 60~61%;FM 和 FG 处理下的 C1 组分以类腐殖酸物质为主。CK 处理的 C2 组分在各土层的 F_{max} 值变化区间是 66%~83%,即 CK 处理 WSOC 主要包含的是溶解性微生物代谢产物和类色氨酸蛋白质物质。

表1 0~40 cm 土层三维荧光结构区域积分百分比
Table 1 Fluorescence area integral percentage in 0~40 cm soil depth

土壤深度 Soil depth/cm	处理 Treatment	I	II	III	IV	V
0~10	FM	3.30±0.27a	5.28±0.04a	19.53±0.47a	10.52±0.20b	61.37±1.64a
	FG	3.33±0.19a	4.78±0.12a	19.16±0.29a	10.30±0.09b	62.44±1.89a
	CK	3.02±0.33a	9.52±0.36a	13.80±0.33a	25.71±0.66a	47.95±1.74b
10~20	FM	3.00±0.21a	4.52±0.65a	18.73±1.21a	9.62±0.88b	64.13±2.68a
	FG	2.84±0.16a	4.47±0.72a	17.76±1.16a	11.00±1.23b	63.93±2.91a
	CK	3.48±0.22a	8.47±1.08a	14.77±1.23a	21.33±1.98a	51.95±3.02a
20~30	FM	2.99±0.22a	4.46±0.65b	17.43±1.14a	10.29±0.52b	64.83±3.65a
	FG	2.02±0.34a	3.54±0.87b	16.93±1.06a	9.35±0.71b	68.16±4.02a
	CK	3.55±0.18a	13.62±1.37a	12.01±0.98a	33.37±1.44a	37.44±3.62b
30~40	FM	2.91±0.21a	4.59±0.46b	17.86±1.56a	8.80±1.98b	65.84±4.37a
	FG	3.13±0.13a	4.72±0.38b	17.44±1.34a	11.12±1.34b	63.60±5.03a
	CK	3.86±0.26a	12.03±1.28a	13.12±1.62a	28.88±3.09a	42.12±3.99b

注:同列不同小写字母表示同一土层不同处理间差异显著($P<0.05$)。

Note: Different lowercase letters represent significant differences between different treatments in the same soil layer ($P<0.05$).

3 讨论

3.1 不同秸秆还田方式下 SOC 和土壤 WSOC 的积累效应

研究表明, SOC 含量易受自然环境条件和耕作措施影响, 处于消耗和累积的动态变化中^[14]。种植方式、施肥方式或气候因子发生变化时, SOC 含量也会相应改变^[15-16]。张蛟等^[17]研究发现, 江苏沿海滩涂种植水稻后, 表层 SOC 含量有所增加。Sharma 等^[18]和李涵等^[19]研究表明, 秸秆覆盖还田能够显著提高总 SOC 含量, 且其含量随土层深度的增加而减少。本研究中, 与 CK 相比, FM 和 FG 处理在 0~10 cm 和 10~20 cm 土层 SOC 含量显著提高, 主要是因为秸秆大部分在表层, 且还田后产生了激发效应, 土壤微生物可获得更充足的碳源, 加速了微生物生长代谢活动, 促进土壤有机碳矿化及作物残体分解, 使土壤碳素转化为缓慢有效的碳源, 有利于 SOC 积累。FM 处理亚表层(20~30 cm 和 30~40 cm) SOC 含量增幅不及表层(0~10 cm 和 10~20 cm) 土壤, 原因是翻耕可将部分秸秆带入下层土壤, 但无法充分形成秸秆层, 有机碳转化量不足。本研究还表明, FG 处理 30~40 cm 土层 SOC 含量降低 7.67%, 主要是因为该土层几乎无外源碳输入, 且有机碳长期处于消耗中, 土壤 SOC 无更新和积累。FM 处理各土层的 SOC 含量均高于 FG 处理, 可能是由于翻耕增加了秸秆与土壤的接触面积^[20], 增加了 SOC 的累积量。FM 处理的 SOC 含量随土层深度增加呈逐渐降低的趋势, 可能是秸秆量随土层加深逐渐降低, 土壤微生物对有机质分解作用也减弱^[21]。

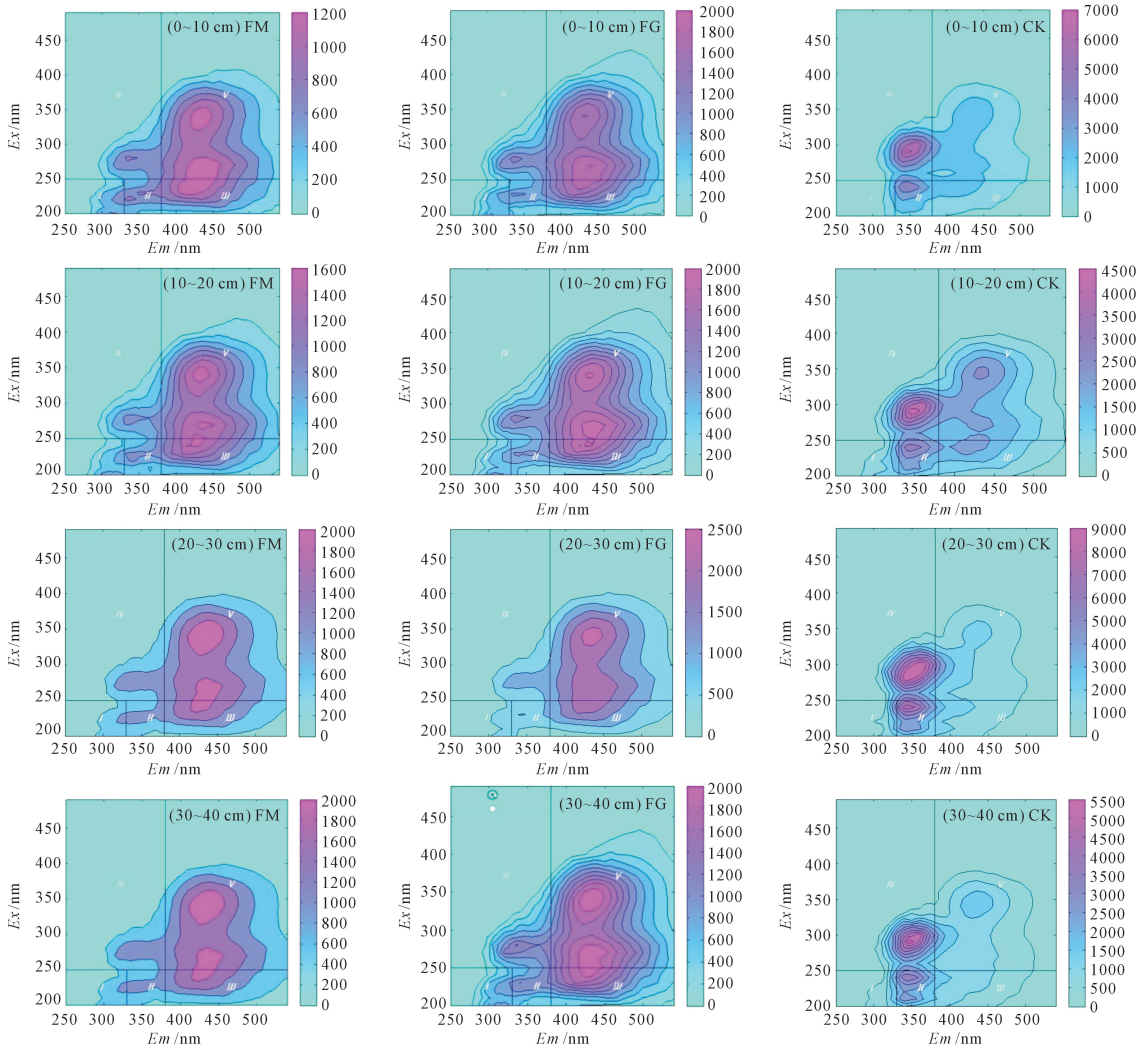
土壤中 WSOC 主要来源于动植物残体腐解转化和土壤腐殖质的分解, 是土壤碳储存库中最活跃

的组成部分, 可作为衡量土壤肥力和土壤质量变化的重要指标^[22]。农业管理措施是影响土壤 WSOC 含量的主要因素之一^[23]。本研究表明, 秸秆还田后 0~40 cm 土层土壤 WSOC 含量表现均为 FM>FG>CK。主要是因为翻埋将秸秆带入土壤下层, 而且秸秆腐解过程释放大量水溶性有机化合物, 土壤微生物活跃, 从而导致地下部分的生物量和根系分泌物等的增加, 进而诱发土壤中其他的化学和生物过程, 导致中、下层土壤 WSOC 含量的增加^[24]。本研究中, 表层(0~10 cm 和 10~20 cm) 土壤 WSOC 含量均较 CK 显著提高, 亚表层(20~30 cm 和 30~40 cm) 土壤 WSOC 含量增加较少。可能是因为地表土壤受秸秆还田的影响而 WSOC 含量较高, 秸秆富含易被微生物降解的有机碳, 施入土壤后会释放出大量的 WSOC^[25]; 而亚表层直接输入的碳源有限, 且土壤的通气透水性较差, 微生物活动也较弱, 所以水溶性有机碳增加不多^[26]。

研究认为 WSOC/SOC 的值越大则土壤微生物量的活性越强, 对管理措施的响应越敏感^[27]。本研究中, 0~10 cm 土层土壤 WSOC 含量占 SOC 含量的比例以 FG 处理最高, 而 10~20 cm 土层则为 FM 处理最高, 原因是 FG 处理秸秆几乎覆盖在土壤表面, 而翻埋处理将大部分秸秆带入 10~20 cm 土层。

3.2 不同秸秆还田方式下三维荧光结构特性和各区域积分的差异

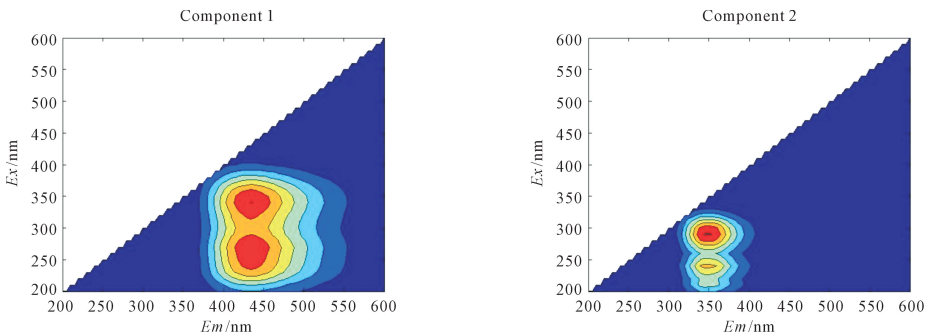
在腐殖质的多元酚形成理论中, 木质素、非木质素和微生物代谢产生的多元酚和醌有机化合物聚合为大分子腐殖酸类物质^[24]。本研究中, FM、FG 处理各土层的土壤 WSOC 均以腐殖酸类物质占主导地位。WSOC 的结构较为复杂、腐殖化程度较高。主要是因为含水量低、玉米秸秆残体较丰富的黑



注: Ex 为激发波长, Em 为发射波长。区域 I 代表类酪氨酸 Ex (200~250 nm)、 Em (250~330 nm), II 代表类色氨酸芳香蛋白质类物质 Ex (200~250 nm)、 Em (330~380 nm), 区域 III 为富里酸类物质 Ex (200~250 nm)、 Em (380~550 nm), 区域 IV 为溶解性微生物代谢产物 Ex (250~490 nm)、 Em (250~380 nm), 区域 V 为腐殖酸类物质 Ex (250~490 nm)、 Em (380~550 nm)^[11]。滚动条代表荧光强度。0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm、30~40 cm 表示土壤深度。下同。

Note: Ex is the excitation wavelength, and Em is the emission wavelength. Area I represents tyrosine like Ex (200~250 nm) and Em (250~330 nm), Area II represents tryptophan like aromatic protein like substances Ex (200~250 nm) and Em (330~380 nm), Area III represents fulvic acid like substances Ex (200~250 nm) and Em (380~550 nm), Area IV represents dissolved microbial metabolites Ex (200~250 nm) and Em (380~550 nm), Area V represents humic acid like substances Ex (200~250 nm) and Em (380~550 nm). The scrollbar indicates fluorescence intensity. 0~10 cm, 10~20 cm, 20~30 cm, and 30~40 cm represent soil depth. The same below.

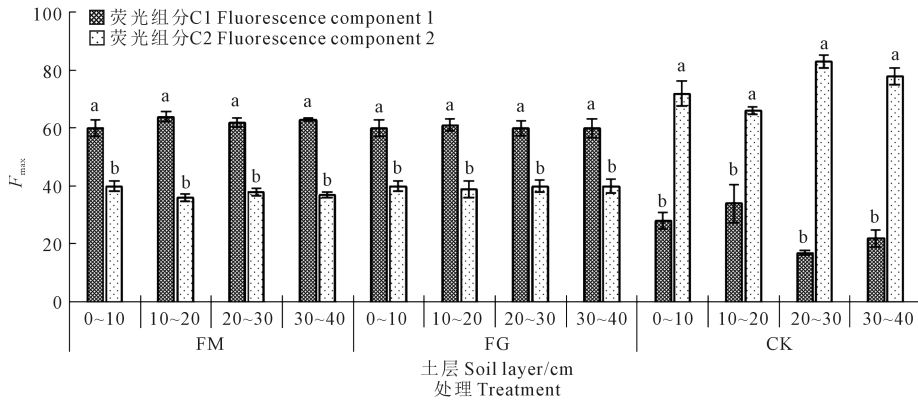
图 4 0~40 cm 土层土壤 WSOC 荧光结构三维图谱
Fig.4 WSOC fluorescence three-dimensional spectrum in 0~40 cm layer



注: Ex 为激发波长, Em 为发射波长。Component 1 为荧光组分 C1, Component 2 为荧光组分 C2。

Note: Ex is the excitation wavelength, and Em is the emission wavelength. Component 1 is the C1 component, while Component 2 is the C2 component.

图 5 PARAFAC 方法分析 WSOC 的荧光组分
Fig.5 PARAFAC method for analyzing the fluorescence components of WSOC

图6 WSOC 各荧光组分 F_{max} 值Fig.6 F_{max} values of various fluorescent components of WSOC

土农田中,有机化合物易聚合为芳香度高、腐殖化程度高的物质^[28]。FM 和 FG 处理在 0~10、20~30、30~40 cm 土层的荧光结构差异不大,而在 10~20 cm 土层 FM 处理的激发波长增加明显,主要是因为翻耕将秸秆带入下层土壤,此土层是 FM 处理的秸秆富集层,这与 FM 处理在此土层 WSOC 含量结果相一致。CK 处理的土壤 WSOC 荧光结构在不同土层无明显变化,土壤 WSOC 以溶解性微生物代谢产物等荧光效率高、分子量小的有机物质为主,主要是由于土壤长期无外源碳的输入,玉米根系分泌物和残体凋落物有限,微生物碳源少,因而未形成分子量、结构更复杂的物质^[29]。

王盛勇^[30]研究表明,土壤中类色氨酸蛋白质物质和溶解性微生物代谢产物与微生物数量和活性显著相关。本研究中,CK 处理 0~10、10~20、30~40 cm 土层溶解性微生物代谢产物与类腐殖酸物质积分为 1:2 和 1:1.5 左右,而 20~30 cm 土层两种物质的积分百分比接近 1:1,且 20~30 cm 土层类色氨酸蛋白质积分百分比高于其他土层,可能是此土层是犁底层,土壤对这两种物质的吸附性较强,微生物代谢缓慢,导致土壤中溶解性微生物代谢产物和类色氨酸蛋白质物质的积累^[31]。与 CK 相比,FM 和 FG 处理土壤 WSOC 中的类腐殖酸和富里酸物质区域积分百分比增加,主要是因为有机物料的施入提高土壤微生物活性,促进土壤中活性蛋白质类物质转化为类富里酸与类腐殖酸物质^[32]。

3.3 不同秸秆还田方式下 WSOC 荧光组分特征和 F_{max} 值的差异

本研究表明,FM 和 FG 处理各土层 WSOC 均以类腐殖酸物质为主,结合三维荧光图谱结果分析,可能是因为秸秆还田使土壤中植物残体增加,从而腐解产生高分子量有机物有关^[33]。FM 和 FG 处理

使土壤 WSOC 中的类腐殖酸物质增加,且二者结构趋于简单化,有利于 WSOC 中低分子量荧光组分的形成,进而提升了土壤供肥能力^[34]。CK 处理则以更易降解的分子量小的溶解性微生物代谢产物和类色氨酸蛋白质物质为主,前者是微生物作用下植物残体和腐殖质转化而成,后者是细菌降解的代谢产物,易与大分子蛋白结合^[35]。 F_{max} 值结果表明,0~40 cm 土层的 C1 组分相对含量表现为 FM>FG>CK;表明秸秆翻埋还田更有助于土壤中营养物质含量增加和形成更高分子量的有机物。

4 结 论

(1)与秸秆不还田相比,不同秸秆还田方式显著提高了表层(0~10 cm 和 10~20 cm)SOC 含量(13.05%~29.54%)和土壤 WSOC 含量(22.45%~38.42%),均表现为秸秆翻埋还田>秸秆覆盖还田>秸秆不还田,同时提升了 WSOC/SOC(0.05~0.13 个百分点)。覆盖还田处理 30~40 cm 土层 SOC 含量下降 7.67%。

(2)三维荧光图谱显示,秸秆不还田处理土壤 WSOC 以荧光效率高、分子量小的溶解性微生物代谢产物(IV)和类色氨酸蛋白质物质(II)为主;秸秆翻埋还田和覆盖还田处理以类腐殖酸类物质(V)为主,腐殖化程度较高,结构较为复杂。与秸秆不还田相比,秸秆翻埋还田和覆盖还田使类腐殖酸类物质(V)和富里酸类物质(III)的积分百分比分别增加 12.18%~27.39%、11.98%~30.72%和 3.96%~5.73%、2.99%~5.40%。

(3)秸秆翻埋还田和覆盖还田处理的土壤 WSOC 以 C1 组分为主,秸秆不还田处理以 C2 组分为主。 F_{max} 值结果表明,0~40 cm 土层的 C1 组分相对含量表现为秸秆翻埋还田>秸秆覆盖还田>秸秆

不还田,表明秸秆翻埋还田更有助于土壤中营养物质含量增加和形成更高分子量的有机物。

综上,不同秸秆还田方式均可提升土壤有机碳和水溶性有机碳含量,同时增加腐殖化程度和加强土壤的供肥能力,翻埋还田处理提升作用更为明显。此外,荧光光谱技术在鉴定土壤有机碳组分结构方面具有一定的灵敏性,可用于农田土壤有机碳组分变化的表达。

参考文献:

- [1] 魏丹, 匡恩俊, 迟凤琴, 等. 东北黑土资源现状与保护策略[J]. 黑龙江农业科学, 2016, (1): 158-161.
WEI D, KUANG E J, CHI F Q, et al. Status and protection strategy of black soil resources in Northeast of China [J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2016, (1): 158-161.
- [2] 何翠翠, 王立刚, 王迎春, 等. 长期施肥下黑土活性有机质和碳库管理指数研究[J]. 土壤学报, 2015, 52(1): 194-202.
HE C C, WANG L G, WANG Y C, et al. Effect of long-term fertilization on labile organic matter in and carbon pool management index of black soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2015, 52(1): 194-202.
- [3] 魏丹, 蔡姗姗, 李艳, 等. 黑土水溶性有机碳对有机物料还田的响应[J]. 中国农业科学, 2020, 53(6): 1180-1188.
WEI D, CAI S S, LI Y, et al. Response of water-soluble organic carbon in black soil to the return of organic materials to the field[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2020, 53(6): 1180-1188.
- [4] 任卫东, 贾莉洁, 王莲蓬, 等. 长期施肥对小麦、玉米根际和非根际土壤微生物量碳及水溶性有机碳含量的影响[J]. 西北农业学报, 2011, 20(12): 145-151.
REN W D, JIA L J, WANG L L, et al. Seasonal dynamics of soil microbial biomass carbon and water soluble organic carbon in bulk and rhizospheric soils under long-term fertilization regimes in loess soil[J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2011, 20(12): 145-151.
- [5] 高淑青, 王莉, 曹志远, 等. 添加玉米秸秆条件下土壤有机碳含量对温度变化的响应[J]. 湖北农业科学, 2016, 55(7): 1659-1662, 1666.
GAO S Q, WANG L, CAO Z Y, et al. Response of soil organic carbon contents after corn stalk application to different incubation temperatures[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2016, 55(7): 1659-1662, 1666.
- [6] 韩晓增, 李娜. 中国东北黑土地研究进展与展望[J]. 地理科学, 2018, 38(7): 1032-1041.
HAN X Z, LI N. Research progress of black soil in Northeast China [J]. Scientia Geographica Sinica, 2018, 38(7): 1032-1041.
- [7] 窦森. 土壤有机质[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 32-34.
DOU S. Soil organic matter[M]. Beijing: Science Press, 2010: 32-34.
- [8] 范春辉, 张颖超, 贺磊, 等. 秸秆还田对旱田黄土可溶性有机质三维荧光光谱的影响[J]. 光谱学与光谱分析, 2013, 33(7): 1820-1823.
FAN C H, ZHANG Y C, HE L, et al. Effect of straw returning on three-dimensional fluorescence spectra of soluble organic matter in dryland loess[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2013, 33(7): 1820-1823.
- [9] 李明堂, 王继红, 赵兴敏, 等. 长期施氮肥对黑土水溶性有机物三维荧光特性的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28(3): 143-148.
LI M T, WANG J H, ZHAO X M, et al. Effect of long-term nitrogen application on three-dimensional fluorescence characteristics of water extractable organic matter in black soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014, 28(3): 143-148.
- [10] 李婧, 迟凤琴, 魏丹, 等. 不同有机物料还田对黑土活性有机碳组分含量的影响[J]. 大豆科学, 2016, 35(6): 975-980.
LI J, CHI F Q, WEI D, et al. Effects of different organic materials returning to field on the content of active organic carbon in black soil [J]. Soybean Science, 2016, 35(6): 975-980.
- [11] 匡恩俊, 迟凤琴, 张久明, 等. 基于荧光光谱分析秸秆深埋还田黑土剖面 DOC 组分结构变化特征[J]. 光谱学与光谱分析, 2022, 42(10): 3243-3248.
KUANG E J, CHI F Q, ZHANG J M, et al. Analysis of DOC component structure of black soil profile with straw deeply buried and based on fluorescence spectrum[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2022, 42(10): 3243-3248.
- [12] 王玉涛, 石辉, 刘雄飞, 等. 黄土丘陵区不同植被下土壤可溶性有机物的荧光特征研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(1): 171-179.
WANG Y T, SHI H, LIU X F, et al. Spectrofluorometric characterization of soil dissolved organic matter under different vegetation in Loess Hilly Region[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2016, 22(1): 171-179.
- [13] 石坤, 夏昕, 关强, 等. 基于荧光分析的不同有机碳水平水稻土添加外源有机物培养对 DOC 的影响[J]. 水土保持学报, 2016, 30(3): 227-233.
SHI K, XIA X, GUAN Q, et al. Changes of dissolved organic carbon in paddy soils with different levels of carbon amended with exogenous organic matter based on fluorescence spectrum analysis[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(3): 227-233.
- [14] 梁尧, 蔡红光, 杨丽, 等. 玉米秸秆覆盖与深翻两种还田方式对黑土有机碳固持的影响[J]. 农业工程学报, 2021, 37(1): 133-140.
LIANG Y, CAI H G, YANG L, et al. Effects of corn straw mulching and deep tillage on organic carbon fixation in black soil[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(1): 133-140.
- [15] 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.
- [16] 张瑞, 张贵龙, 姬艳艳, 等. 不同施肥措施对土壤活性有机碳的影响[J]. 环境科学, 2013, 34(1): 277-282.
ZHANG R, ZHANG G L, JI Y Y, et al. Effects of different fertilization treatments on soil labile organic carbon [J]. Environmental Science, 2013, 34(1): 277-282.
- [17] 张蛟, 崔士友, 陈澎军, 等. 沿海滩涂水稻种植对土壤微生物量碳和水溶性有机碳的影响[J]. 江苏农业科学, 2022, 50(17): 222-228.
ZHANG J, CUI S Y, CHEN P J, et al. Effects of rice planting on soil microbial biomass carbon and water-soluble organic carbon in coastal mudflat[J]. Jiangsu Agricultural Science, 2022, 50(17): 222-228.
- [18] SHARMA S, SINGH P. Tillage intensity and straw retention impacts on soil organic carbon, phosphorus and biological pools in soil aggregates under rice-wheat cropping system in Punjab, north-western India[J]. European Journal of Agronomy, 2023, 149: 126913.

- [19] 李涵, 张鹏, 贾志宽, 等. 渭北旱塬区秸秆覆盖还田对土壤团聚体特征的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2012, 30(2): 27-33.
LI H, ZHANG P, JIA Z K, et al. Effects of straw mulching treatment on characteristics of soil aggregates in Weibei dryland [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2012, 30(2): 27-33.
- [20] 杨敏芳, 朱利群, 韩新忠, 等. 不同土壤耕作措施与秸秆还田对稻麦两熟制农田土壤活性有机碳组分的短期影响[J]. 应用生态学报, 2013, 24(5): 1387-1393.
YANG M F, ZHU L Q, HAN X Z, et al. Short term effects of different soil tillage and straw returning on soil active organic carbon in the two cropping system of rice and wheat [J]. *Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(5): 1387-1393.
- [21] 李玉梅, 王根林, 李承阳, 等. 不同耕法下秸秆还田对土壤WSOC荧光特性的影响[J]. 光谱学与光谱分析, 2020, 40(4): 1232-1237.
LI Y M, WANG G L, LI C Y, et al. Effects of straw returning on soil WSOC fluorescence characteristics with different tillage methods [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2020, 40(4): 1232-1237.
- [22] 刘晖, 吴红艳, 冯建, 等. 秸秆还田量对半干旱区褐土团聚体稳定性及有机碳组分的影响[J]. 江苏农业科学, 2024, 52(1): 219-225.
LIU H, WU H Y, FENG J, et al. The effect of straw return on the stability and organic carbon composition of cinnamon soil aggregates in semi-arid areas [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2024, 52(1): 219-225.
- [23] 赵宇航, 殷浩凯, 胡雪纯, 等. 长期秸秆还田褐土有机碳矿化特征及其驱动力[J]. 环境科学, 2024, 45(4): 2353-2362.
ZHAO Y H, YIN H K, HU X C, et al. Characteristics and driving forces of organic carbon mineralization in long-term straw returning brown soil [J]. *Environmental Science*, 2024, 45(4): 2353-2362.
- [24] 陈曦. 秸秆还田对土壤有机质元素组成及化学结构的影响[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2016.
CHEN X. The effect of returning straw to the field on the composition and chemical structure of soil organic matter elements [D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2016.
- [25] 黄磊, 张然, 陈雅丽, 等. 氮肥施用和秸秆还田对东北地区褐土稳定性有机碳的影响[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(3): 581-589.
HUANG L, ZHANG R, CHEN Y L, et al. The effect of nitrogen fertilizer application and straw return on stable organic carbon of cinnamon soil in Northeast China [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2024, 43(3): 581-589.
- [26] 闫雨东, 窦森, 张博岩, 等. 不同比例猪粪混合玉米秸秆还田对黑土腐殖质组成及胡敏酸结构特征的影响[J]. 吉林农业大学学报, 2022, 44(6): 733-741.
YAN Y D, DOU S, ZHANG B Y, et al. Effects of different proportions of pig manure mixed with corn straw returning to the field on humus composition and humic acid structural characteristics in black soil [J]. *Journal of Jilin Agricultural University*, 2022, 44(6): 733-741.
- [27] 石含之, 赵沛华, 黄永东, 等. 秸秆还田对土壤有机碳结构的影响[J]. 生态环境学报, 2020, 29(3): 536-542.
SHI H Z, ZHAO P H, HUANG Y D, et al. Effect of straw mulching on soil organic carbon structure [J]. *Ecology and Environment Sciences*, 2020, 29(3): 536-542.
- [28] 张丽华, 徐晨, 闫伟平, 等. 半干旱区地表覆盖方式对土壤水温效应及玉米产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2023, 41(2): 179-192.
ZHANG L H, XU C, YAN W P, et al. Effects of surface mulching on soil water and temperature efficiency and maize yield in semi-arid area [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2023, 41(2): 179-192.
- [29] 代红翠, 陈源泉, 赵影星, 等. 不同有机物料还田对华北农田土壤固碳的影响及原因分析[J]. 农业工程学报, 2016, 32(S2): 103-110.
DAI H C, CHEN Y Q, ZHAO Y X, et al. Analysis of the effects and causes of different organic materials returning to farmland on soil carbon sequestration in North China [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(S2): 103-110.
- [30] 王盛勇. 贫营养条件下微生物代谢产物和生物多样性的研究[D]. 天津: 天津大学, 2009.
WANG S Y. Studies on microbial metabolites and biodiversity under poor nutrition conditions [D]. Tianjin: Tianjin University, 2009.
- [31] 菅园园, 孔范龙, 郝敏, 等. 胶州湾滨海湿地土壤溶解性有机质的三维荧光特性[J]. 应用生态学报, 2016, 27(12): 3871-3881.
ZI Y Y, KONG F L, XI M, et al. Three dimensional fluorescent characteristics of soil dissolved organic matter (DOM) in Jiaozhou Bay coastal wetlands, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(12): 3871-3881.
- [32] 李响, 魏鸿杰, 王侃, 等. 溶解性有机物(DOM)与区域土地利用的关系: 基于三维荧光-平行因子分析(EEM-PARAFAC) [J]. 环境科学, 2019, 40(4): 1751-1759.
LI Y, WEI H J, WANG K, et al. Analysis of the relationship between dissolved organic matter (DOM) and watershed land-use based on three-dimensional fluorescence-parallel factor (EEM-PARAFAC) analysis [J]. *Environmental Science*, 2019, 40(4): 1751-1759.
- [33] YAN L, ZHANG J, ZHAO X, et al. Effect of long-term application of corn stalks and inorganic fertilizers on fluorescence characteristics of water extractable organic matter in a meadow black soil of northeast China [J]. *Toxicological & Environmental Chemistry*, 2016, 98(5/6): 541-550.
- [34] 李亚男, 武俊男, 高强, 等. 不同种植年限苏打盐碱型水稻土水溶性有机物三维荧光光谱特征分析[J]. 华南农业大学学报, 2017, 38(1): 44-49.
LI Y N, WU J N, GAO Q, et al. Three-dimensional fluorescence spectral characteristics of water extractable organic matter in soda saline-alkaline paddy soil with different planting years of rice [J]. *Journal of South China Agricultural University*, 2017, 38(1): 44-49.
- [35] 柳夏艳, 曹浩轩, 缪闯和, 等. 长期施用堆肥处理下潮土剖面水溶性有机物的三维荧光光谱研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2023, 43(3): 674-684.
LIU X Y, CAO H X, MIAO C H, et al. Three-dimensional fluorescence spectra of dissolved organic matter in fluvo-aquic soil profile under long-term composting treatment [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2023, 43(3): 674-684.