

秸秆还田对麦玉系统土壤有机碳稳定性的影响

王学霞, 张磊, 梁丽娜, 宋宁宁, 刘东生, 王甲辰

引用本文:

王学霞, 张磊, 梁丽娜, 等. 秸秆还田对麦玉系统土壤有机碳稳定性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(8): 1774–1782.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0010>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

黑土活性有机碳库与土壤酶活性对玉米秸秆还田的响应

贺美, 王立刚, 王迎春, 朱平, 李强, 沈欣

农业环境科学学报. 2018, 37(9): 1942–1951 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1725>

小麦-水稻秸秆还田对土壤有机质组成及不同形态氮含量的影响

张雅洁, 陈晨, 陈曦, 常江, 章力干, 郜红建

农业环境科学学报. 2015, 34(11): 2155–2161 <https://doi.org/10.11654/jaes.2015.11.017>

秸秆还田土壤溶解性有机碳的官能团特征及其与CO₂排放的关系

李彬彬, 武兰芳, 许艳艳, 秦越

农业环境科学学报. 2017, 36(12): 2535–2543 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-0747>

玉米秸秆不同还田方式对黑土有机碳组成和结构特征的影响

董珊珊, 窦森

农业环境科学学报. 2017, 36(2): 322–328 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-1131>

秸秆和秸秆炭对黑土肥力及氮素矿化过程的影响

朱兴娟, 李桂花, 涂书新, 杨俊诚, 郭康莉, 冀拯宇, 刘晓, 张建峰, 姜慧敏

农业环境科学学报. 2018, 37(12): 2785–2792 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0165>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

王学霞, 张磊, 梁丽娜, 等. 秸秆还田对麦玉系统土壤有机碳稳定性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(8): 1774–1782.

WANG Xue-xia, ZHANG Lei, LIANG Li-na, et al. Effects of straw returning on the stability of soil organic carbon in wheat-maize rotation systems[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(8): 1774–1782.



开放科学 OSID

秸秆还田对麦玉系统土壤有机碳稳定性的影响

王学霞¹, 张磊², 梁丽娜¹, 宋宁宁³, 刘东生¹, 王甲辰^{1*}

(1.北京市农林科学院植物营养与资源研究所, 北京 100097; 2.河北农业大学资源与环境科学学院, 河北 保定 071000; 3.青岛农业大学资源与环境学院, 山东 青岛 266109)

摘要:为揭示不同秸秆还田量对华北小麦-玉米轮作系统土壤有机碳官能团结构及稳定性的影响,研究了秸秆还田5 a后土壤有机碳官能团结构、团聚体组成及有机碳含量、活性有机碳含量、土壤铁离子的变化。田间实验设置4个处理:秸秆不还田作为对照(CK)、秸秆1/3还田(S1)、秸秆2/3还田(S2)、秸秆全部还田(S3)。采用常规方法测定土壤理化性质、粒径、铁离子及土壤微生物量碳含量,¹³C核磁共振波谱技术(NMR)检测分析土壤有机碳官能团结构。结果表明:秸秆还田5 a后,土壤总有机碳(TOC)、>2 mm与2.00~0.25 mm团聚体有机碳、可溶性有机碳(DOC)、易氧化态碳(EOC)和微生物量碳(MBC)含量,均随还田量增加而逐渐增加,且不同处理增加量不同,与CK相比,S3处理显著增加了这些有机碳的含量($P<0.05$)。各处理土壤有机碳以烷基碳与烷氧基碳为主,其次是芳香碳与羧基碳,秸秆还田增加了烷氧基碳、羧基碳(易分解碳组分)含量,降低了烷基碳和芳香碳(难分解碳组分)含量,与CK相比,S3处理显著增加烷氧基碳含量($P<0.05$)而显著降低了芳香碳含量($P<0.05$)。与CK相比,S2、S3处理也显著降低了有机碳的芳香度、疏水碳/亲水碳、烷基碳/烷氧基碳比值($P<0.05$),而对脂族碳/芳香碳影响不明显。与CK相比,S3处理显著增加了>2.00 mm团聚体组分,增加了2.00~0.25 mm组分,而降低了0.25~0.053 mm组分和显著降低了<0.053 mm组分($P<0.05$)。秸秆还田对土壤游离铁、活性铁、螯合铁含量的影响不明显。有机碳官能团组成与土壤因子间的冗余分析表明土壤TOC、MBC含量、团聚体组分、铁离子的改变是导致不同处理间有机碳官能团结构存在差异的重要原因。综上所述,由于短期秸秆还田增加了活性有机碳含量、易分解有机碳组分,减少了难分解有机碳组分,降低了微团聚体物理保护作用,改变了微生物活性和铁离子络合作用,在一定程度上降低了土壤有机碳稳定性,可能导致麦玉复种系统土壤碳排放水平的增加。

关键词:秸秆还田;有机碳官能团;小麦-玉米轮作;有机碳稳定性

中图分类号:S153.6;S512.1 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2020)08-1774-09 doi:10.11654/jaes.2020-0010

Effects of straw returning on the stability of soil organic carbon in wheat-maize rotation systems

WANG Xue-xia¹, ZHANG Lei², LIANG Li-na¹, SONG Ning-ning³, LIU Dong-sheng¹, WANG Jia-chen^{1*}

(1. Institute of Plant Nutrition and Resources, Beijing Agricultural Forestry Academy Sciences, Beijing 100097, China; 2. College of Resource and Environmental Sciences, Hebei Agricultural University, Baoding 071000, China; 3. School of Resources and Environment, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, China)

Abstract: To explore the effects of different amounts of straw returning on the molecular composition and stability of soil organic carbon (SOC) in wheat-maize systems of North China, the functional group structure of SOC, proportions of aggregates and their organic carbon contents, active organic carbon contents, and iron ion contents were studied by a field experiment after 5 years of straw return. The field experiment included four treatments, namely no straw returning (CK), 1/3 straw returning (S1), 2/3 straw returning (S2), and total straw returning (S3), which were investigated in 2013. The soil physical and chemical properties, particle size, iron ion content, and microbial

收稿日期:2020-01-03 录用日期:2020-04-30

作者简介:王学霞(1982—),女,山东淄博人,博士,助理研究员,主要从事土壤生态研究。E-mail:wxx0427@163.com

*通信作者:王甲辰 E-mail:13021121195@163.com

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFD0200602,2018YFD0200603);北京市农林科学院创新计划项目(KJCX20200419)

Project supported: National Key R&D Program of China(2016YFD0200602,2018YFD0200603); Innovation Plan of Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences(KJCX20200419)

biomass carbon (MBC) content were determined by conventional methods, and the functional group structure of SOC was analyzed by ^{13}C nuclear magnetic resonance. Our results indicated that the total organic carbon (TOC) content, organic carbon content of >2.00 mm and $2.00\sim 0.25$ mm aggregates, dissolved organic carbon content, easily oxidizable carbon content, and MBC content were increased gradually following the pattern of $\text{S3} > \text{S2} > \text{S1} > \text{CK}$, and different increases were found in different treatments. Compared with those of CK, the organic carbon contents were significantly increased by S3 ($P < 0.05$). The functional groups of SOC in all the treatments were mainly alkyl carbon (alkyl-C) and alkoxy carbon (O-alkyl-C), followed by aromatic carbon (aromatic-C) and carbonyl carbon (carbonyl-C). O-alkyl-C and carbonyl-C (labile carbon component) showed an increasing trend with the increasing amount of straw returning; however, alkyl-C and aromatic-C (recalcitrant carbon component) showed different patterns. Compared with those of CK, the O-alkyl-C and alkyl-C contents were significantly increased ($P < 0.05$) and significantly decreased ($P < 0.05$) by S3, respectively. Compared with those of CK, the aromaticity, hydrophobic/hydrophilic C, and alkyl-C/O-alkyl-C were significantly decreased ($P < 0.05$) by S2 and S3; however, the value of aliphatic/aromatic-C was not significantly affected by returning straw. Compared with those of CK, the components of >2.00 mm and $2.00\sim 0.25$ mm were significantly increased ($P < 0.05$) and increased by S3, respectively. However, the components of $0.25\sim 0.053$ mm and <0.053 mm were decreased and significantly decreased ($P < 0.05$) by S3, respectively. The contents of free iron, active iron, and chelated iron were not significantly influenced by straw returning. The relationship between the functional group structure of SOC and environmental factors determined by redundancy analysis showed that the changes in TOC, MBC content, aggregate composition, and iron ion content were important factors for revealing the differences in the SOC molecular structure among different treatments. In summary, the contents of active organic carbon, labile carbon, and the relatively simple molecular structure of SOC were increased, the recalcitrant carbon component and physical protection of microaggregates were decreased, and the microbial activity and iron ion complexation were changed by straw returning. This is not beneficial to the stability of SOC and may lead to the increase in the soil carbon emission level under wheat-maize cropping systems.

Keywords: straw returning; functional group; wheat-maize rotation; soil organic carbon stability

土壤有机碳 (Total organic carbon, TOC) 作为土壤质量的重要评价指标,其含量、组成、结构和稳定性直接或间接影响土壤生态系统的功能^[1]。土壤有机碳储存特别是稳定有机碳库的变化,将对大气 CO_2 浓度产生重大影响^[2]。提高土壤中有机碳的稳定性被认为是在全球气候变化背景下减轻 CO_2 排放的有效方式之一^[3-4]。秸秆还田通过增加土壤外源有机物的输入,不仅影响农田土壤理化性质及过程^[5-6]、改善土壤生物(微生物、土壤动物)群落结构和活性^[7],还改变有机碳组成与分子结构^[8-9],进而影响土壤有机碳的分解速率和稳定性^[10],最终导致农田土壤有机碳储量变化。国内外不少学者从不同时空尺度的试验^[11]及利用 Meta 分析^[8,12]等方式探讨了秸秆还田方式、还田量、还田时间对土壤总有机碳、活性有机碳^[13]、团聚体有机碳^[14]的影响,均证实秸秆还田是增加农田土壤有机碳的有效途径之一^[15-17],但关于秸秆还田对土壤有机碳稳定性影响的报道还比较少。因此,了解土壤有机碳稳定性对秸秆还田响应对维持农田土壤碳库有重要的意义。

前人研究表明土壤有机碳性质特征是决定有机碳的降解速率与稳定性的关键因素^[13-14,18-19]。首先,土壤有机碳的降解速率与其自身分子结构(有机碳化

学性质)密切相关,如烷基碳、芳香性碳等含碳官能团的含量^[1,18]。不同官能团结构对微生物、酶催化分解的抗性不同,其在环境中的持留时间存在极大差异^[1,20],因此,有机碳官能团结构特征在某种程度上可以解释土壤碳库稳定性^[18,20]。国内外不少学者认为土壤有机碳的官能团组成及其稳定性与外源进入土壤的有机物质数量和质量(化学结构)密切相关^[18,20]。秸秆还田过程中外源有机质不断被分解,秸秆中的烷基碳(易降解组分)会快速分解进入土壤中,而芳香碳和烷基碳(难降解组分)会选择性地保留,最终影响土壤有机碳的化学结构^[20-21],当前应用 ^{13}C 核磁共振技术研究秸秆还田对有机碳结构影响还比较少。其次,有机碳的稳定性与土壤各有机碳组分含量密切相关。土壤中可溶性有机碳 (Dissolved organic carbon, DOC)、易氧化态碳 (Easily oxidizable carbon, EOC) 和微生物量碳 (Microbial biomass carbon, MBC) 等活性碳组分(易降解组成)对土壤微环境的变化敏感,明显受秸秆还田、施肥等农业管理措施的影响^[22]。随着秸秆碳在土壤中的转化及其在土壤不同碳库中的分配,必将引起土壤各有机碳组分含量发生变化,进而改变土壤中有机碳的矿化及分解进程,最终影响到有机碳的稳定性^[21-22]。因此,明晰秸秆还田对土壤有机碳官

能团结构特征与有机碳各组分的影响,有助于揭示秸秆还田对土壤有机碳稳定性的影响及其增碳的作用机制。

前人研究证实土壤有机碳稳定性也受土壤团聚体的物理保护作用、土壤高价阳离子的结合作用及土壤微生物的生态稳定作用等物理、化学、生物综合作用的影响^[18,23]。Wang等^[14]和王峻等^[24]研究证实秸秆还田能促进土壤大团聚体的形成,同时增加了大团聚体、中团聚体中有机碳的含量,说明秸秆还田一定程度上强化了团聚体对土壤有机碳的物理保护作用,有助于提高土壤有机碳稳定性。Xue等^[25]研究证实秸秆还田可能通过影响土壤铁形态的变化而导致有机碳的稳定性变化;Chen等^[7]研究表明,秸秆还田通过改变土壤微生物群落结构及活性,从而影响土壤有机碳的分解速率和稳定性。

在小麦-玉米轮作系统中,关于秸秆还田时间、还田量对土壤不同形态有机碳含量和质量变化及土壤理化性质、微生物等因素对土壤有机碳影响方面已作了大量报道^[13,23-26],而对农田土壤有机碳官能团结构方面的研究,主要侧重短期秸秆还田及秸秆与生物炭配施对烷基碳、烷氧碳、芳香碳和羧基碳等有机碳官能团影响,且没有得出一致性结论^[23,27-28],同时关于秸秆还田影响土壤有机碳稳定性的综合作用机制也鲜有报道。因此,秸秆还田对小麦-玉米轮作系统土壤有机碳官能团结构特征及有机碳稳定性的影响研究还亟需深入。

本研究分析短期(5 a)不同还田量对小麦-玉米轮作系统土壤有机碳官能团结构特征、活性有机碳、团聚体组成及其有机碳含量与铁离子特征的影响,以全面了解小麦、玉米秸秆还田后土壤有机碳官能团结构及有机碳组分的变化,阐明秸秆还田对土壤有机碳稳定性的影响程度及其作用机制,以期科学解释秸秆还田对土壤有机碳库的影响提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验点概况

青岛农业大学试验站(位于山东平度市蓼兰镇,36°67′09″N,119°88′41″E)属于温带半湿润大陆性气候,年平均气温11.9℃,年平均降雨量680 mm,是典型的冬小麦-夏玉米一年两熟区。试验开始前耕层(0~20 cm)土壤含有机质14.22 g·kg⁻¹、全氮1.28 g·kg⁻¹、速效磷8.99 mg·kg⁻¹、速效钾82.26 mg·kg⁻¹、硝态氮10.54 mg·kg⁻¹、铵态氮4.21 mg·kg⁻¹,pH 8.02。

1.2 试验设计

还田秸秆制备:小麦、玉米收获后,用小型粉碎机将秸秆粉碎为<2.00 cm的粉末,小麦、玉米秸秆的含水率(SM)分别为10.11%~10.96%和11.42%~11.98%,总有机碳含量分别为45.21%~47.96%和41.2%~46.78%。试验始于2013年10月,试验设4个处理,分别为:(1)秸秆不还田(CK),小麦、玉米收获后,人工移除秸秆及根系;(2)秸秆1/3还田(S1),小麦、玉米秸秆总量的1/3还田;(3)秸秆2/3还田(S2),小麦、玉米秸秆总量的2/3还田;(4)秸秆全量还田,小麦、玉米秸秆所有均还田(S3)。每个处理设4个重复,共16个小区,小区面积为6 m×8 m=48 m²,每个小区之间有宽1 m的隔离带。

本区种植制度为小麦-玉米轮作,每年10月中旬种植冬小麦,6月上旬收获小麦,6月中上旬种植玉米,10月上旬收获玉米。小麦、玉米均统一种植,并统一水肥管理。肥料的使用量为优化的经济施肥量,其中小麦季氮、磷、钾肥用量折合成纯养分N-P₂O₅-K₂O:206-127-139 kg·hm⁻²,N肥1/2作为基肥,1/2在拔节期追施,磷肥和钾肥全部作为基肥。玉米季氮、磷、钾肥用量折合成纯养分N-P₂O₅-K₂O:236-105-194 kg·hm⁻²,全部作底肥。耕作方式为冬小麦季旋耕(10~13 cm),夏玉米季免耕,还田秸秆均为上季作物粉碎残体,其他田间管理措施均保持一致。

1.3 样品采集

2018年10月玉米(秸秆还田第5 a)收获时,采用“S”型采样法,在每个小区内选择6个重复,利用挖剖面取样法在各样点采集0~30 cm未扰动的原状土样,用塑料保鲜盒带回实验室。土壤去除植物根系、碎屑等杂物,一部分风干用于检测土壤团聚体组成、土壤有机碳含量、土壤有机碳官能团结构分析;另一部分过2 mm土壤筛,储藏于4℃冰箱中用于测定土壤微生物量碳含量。

1.4 样品分析

采用烘干法测定土壤含水量;采用重铬酸钾加热滴定法测定TOC含量;采用去离子水浸提法测定DOC含量;采用高锰酸钾氧化法测定EOC含量;采用氯仿熏蒸-K₂SO₄浸提法测定MBC含量^[29]。采用湿筛法分离出>2.00、2.00~0.25、0.25~0.053、<0.053 mm 4个粒径的团聚体,分别称为大团聚体、中团聚体、微团聚体、粉+黏团聚体,烘干称质量,计算各级团聚体的质量百分比^[30]。分离后的团聚体经风干,用于测定各团聚体组分中有机碳含量。土壤游离铁、络合态铁、

活性铁检测分别采用连二亚硫酸钠还原法、焦硫酸钠法和草酸法处理土壤样品,然后用原子吸收光谱(Pi-nAAcle 500,PerkinElmer,美国)进行测定。

土壤有机碳官能团结构采用 ^{13}C 核磁共振波谱技术(NMR)分析。进行核磁共振波谱分析前,先对土壤样品进行HF预处理除去金属离子干扰,以提高仪器分析结果的精确度,具体参照孙慧敏等^[31]的方法。样品测试采用核磁共振仪(Varian Infinity Plus 300 MHz,Varia公司,美国)、固态 ^{13}C -交叉极化魔角旋转技术。测定参数: ^1H 共振频率为299.835 636 MHz, ^{13}C 共振频率为75.400 04 MHz,转速9.0 kHz,接触时间为1.0 ms,循环延迟时间为4.0 s。土壤有机碳化学结构波谱大多划分为四大官能区:(1)烷基碳(Alkyl C,0~50 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$);(2)烷氧基碳(O-alkyl C,50~110 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$);(3)芳香碳(Aromatic-C,110~165 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$);(4)羰基碳(Carbonyl-C,165~190 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)。其中,烷基碳+芳香碳=疏水碳,烷氧基碳+羰基碳=亲水碳,烷氧基碳+烷基碳=脂族碳,芳香度=芳香碳/总和,疏水性=(芳香碳+烷基碳)/(烷氧基碳+羰基碳)。

1.5 数据分析

采用SPSS 22.0统计分析软件进行各项指标之间的差异性分析,显著性检验采用LSD法($\alpha=0.05$)。文中数据均为平均数±标准误,用Origin 9.0作图。采用Canoco 5.0软件对土壤因子与土壤有机碳官能团组分进行冗余分析(Redundancy analysis, RDA),用蒙特卡罗检验(Monte Carlo)分析RDA结果中土壤因子的影响是否达到显著水平^[32]。

2 结果与分析

2.1 秸秆还田对土壤团聚体组成的影响

土壤团聚体组成随还田量的变化如表1所示。大团聚体(>2.00 mm)、中团聚体(2.00~0.25 mm)组分表现出随着秸秆还田量增加逐渐增加,其中与CK相比,S3处理>2 mm组分显著增加($P<0.05$);微团聚体(0.25~0.053 mm)和粉+黏团聚体(<0.053 mm)组分却

表1 不同处理土壤团聚体组成变化(%)

Table 1 Changes of soil aggregate composition in different treatments(%)

处理 Treatments	>2.00 mm	2.00~0.25 mm	0.25~0.053 mm	<0.053 mm
CK	6.23±0.55b	58.14±1.55a	18.61±1.02a	17.02±0.92a
S1	6.88±0.44ab	59.85±1.67a	17.94±0.91a	15.33±1.15ab
S2	7.79±0.40a	60.33±1.07a	17.17±0.48a	14.71±1.24ab
S3	8.14±0.58a	61.92±1.04a	16.71±0.74a	13.24±0.37b

注:同列小写字母不同表示不同处理之间差异显著性($P<0.05$)。下同。

Note: Lowercase of the same column indicates the difference significance among treatments at 0.05 level. The same below.

随着秸秆还田量增加呈逐渐降低趋势,与CK相比,S3处理<0.053 mm组分显著降低($P<0.05$)。可见,随秸秆还田量增加大团聚体与中团聚体组分有增加而微团聚体与粉+黏团聚体组分有降低的趋势。

2.2 秸秆还田对土壤有机碳含量的影响

不同秸秆还田处理下,土壤总有机碳与团聚体有机碳含量的变化如表2所示。随着秸秆还田量增加,土壤总有机碳(TOC)含量逐渐增加,与CK相比,S3处理增加了39.45%,差异显著($P<0.05$)。>2.00 mm与2.00~0.25 mm团聚体有机碳含量与TOC含量趋势一致,与CK相比,S3处理分别增加了34.63%和35.19%,差异显著($P<0.05$)。秸秆还田量对0.25~0.053 mm和<0.053 mm团聚体有机碳含量影响不明显。可见,随着秸秆还田量增加,土壤TOC、大团聚体与中团聚体有机碳含量呈现逐渐增加趋势。

不同秸秆还田处理土壤活性有机碳含量的变化如图1所示。与TOC的变化趋势相同,不同秸秆还田处理下,土壤DOC、MBC和EOC含量均增加,呈现为S3>S2>S1>CK。土壤DOC(图1A),与CK相比,S3、S2处理其含量分别增加了61.27%和42.38%,差异达到显著水平($P<0.05$);不同还田量下,S3处理DOC含量最高,与S1相比,增加了32.71%,差异显著($P<0.05$)。土壤EOC(图1B),与CK相比,S3、S2处理其含量分别增加

表2 不同处理土壤总有机碳和团聚体有机碳含量($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)

Table 2 The soil organic carbon content of total and aggregates in different treatments($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)

处理 Treatments	总有机碳 Total organic carbon	团聚体有机碳 Aggregate organic carbon			
		>2.00 mm	2.00~0.25 mm	0.25~0.053 mm	<0.053 mm
CK	9.86±0.58b	12.04±0.74b	11.48±0.48c	10.30±0.59a	10.03±0.47a
S1	11.31±1.08ab	13.15±0.51ab	12.37±0.37bc	11.45±0.41a	9.75±0.66a
S2	13.21±1.11ab	14.89±0.56ab	14.01±0.64ab	12.60±0.73a	9.92±0.53a
S3	13.75±1.02a	16.21±0.69a	15.52±0.75a	12.19±0.61a	9.56±0.68a

了47.36%和31.72%,差异显著($P<0.05$);不同还田量下,S3处理EOC含量最高,与S1相比,增加了38.12%,差异显著($P<0.05$)。土壤MBC(图1C),与CK相比,S2、S3处理MBC含量分别增加了29.05%和36.67%,增加显著($P<0.05$),且不同还田量处理间差异不显著。

2.3 秸秆还田对土壤有机碳官能团结构的影响

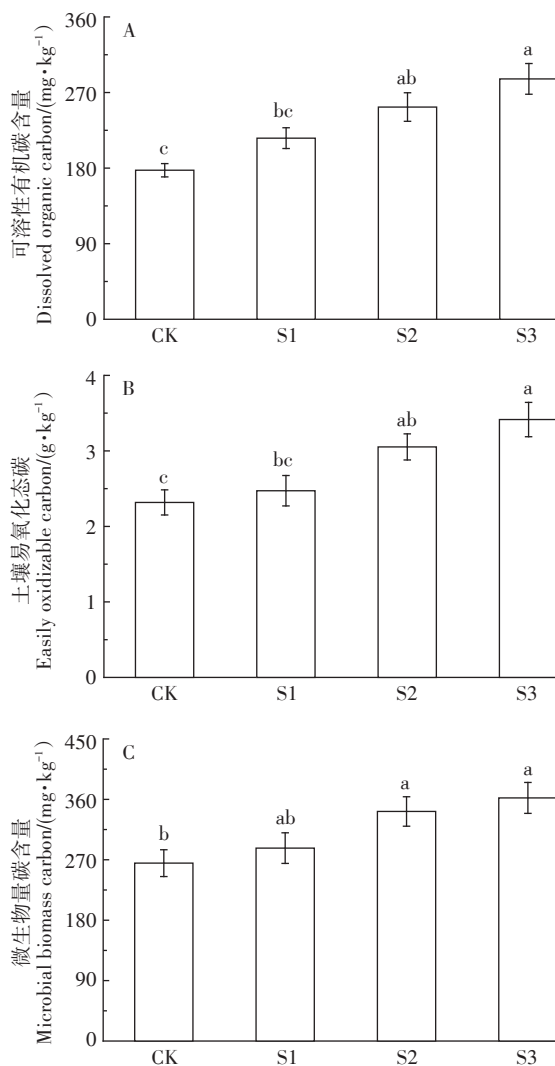
不同秸秆还田处理土壤有机碳官能团均以烷基碳(Alkyl-C)与烷氧基碳(O-Alkyl-C)为主,其次是芳香碳(Aromatic-C)与羰基碳(Carbonyl-C)(图2A)。随还田量增加,土壤烷氧基碳相对含量有逐渐增加趋势,与CK相比,S3处理其含量增加了4.76%,差异显

著($P<0.05$)。与CK相比,S3处理羰基碳、烷基碳相对含量分别增加和降低了19.58%和4.76%,差异不显著。随着还田量增加,土壤芳香碳相对含量有逐渐降低趋势,与CK相比,S2、S3处理其含量分别降低了20.01%和18.53%,差异均达到显著水平($P<0.05$)。可见,秸秆还田增加了烷氧基碳、羰基碳(易降解组分)含量而降低了烷基碳和芳香碳(难降解组分)含量。

土壤有机碳各官能团比值变化如图2B所示。随着秸秆还田量增加,芳香度与疏水碳/亲水碳的比值逐渐降低。与CK相比,S2、S3处理显著降低了芳香度、疏水碳/亲水碳、烷基碳/烷氧基碳的比值($P<0.05$),增加了脂族碳/芳香碳的比值,但差异不显著。因此,秸秆还田降低了芳香度、疏水碳/亲水碳、烷基碳/烷氧基碳比值,而增加了脂族碳/芳香碳比值。

2.4 秸秆还田对土壤铁形态的影响

土壤中3种形态铁离子含量呈现为游离铁(Free iron)>活性铁(Active iron)>螯合铁(Chelated iron)(图3)。3种形态铁离子均随着秸秆还田量增加而逐渐增加,但差异不显著。



小写字母不同表示处理之间差异显著($P<0.05$)。下同
Lowercase indicates the difference significance among treatments at 0.05 level. The same below

图1 不同处理土壤活性碳组分DOC,EOC和MBC含量

Figure 1 Fractions of soil active carbon components DOC, EOC and MBC in different treatments

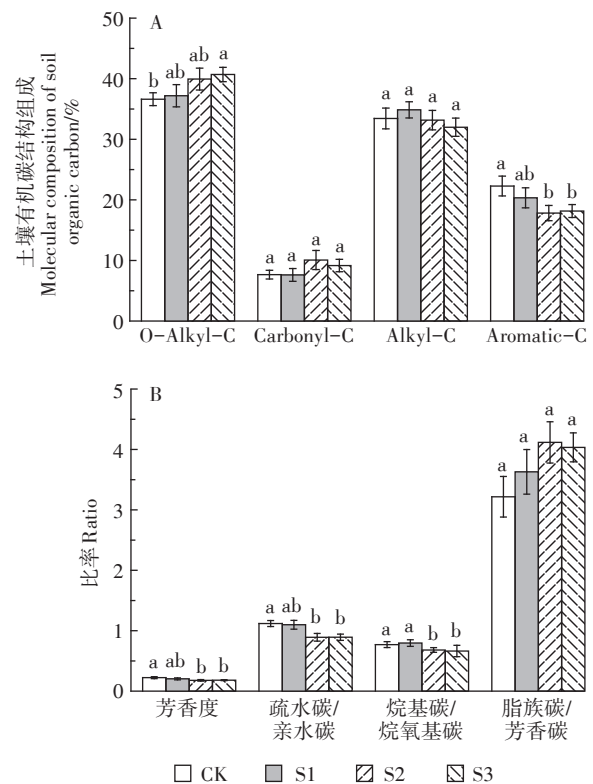


图2 不同处理土壤有机碳官能团相对含量与比率

Figure 2 Functional groups compositions and ratio of soil organic carbon in different treatments

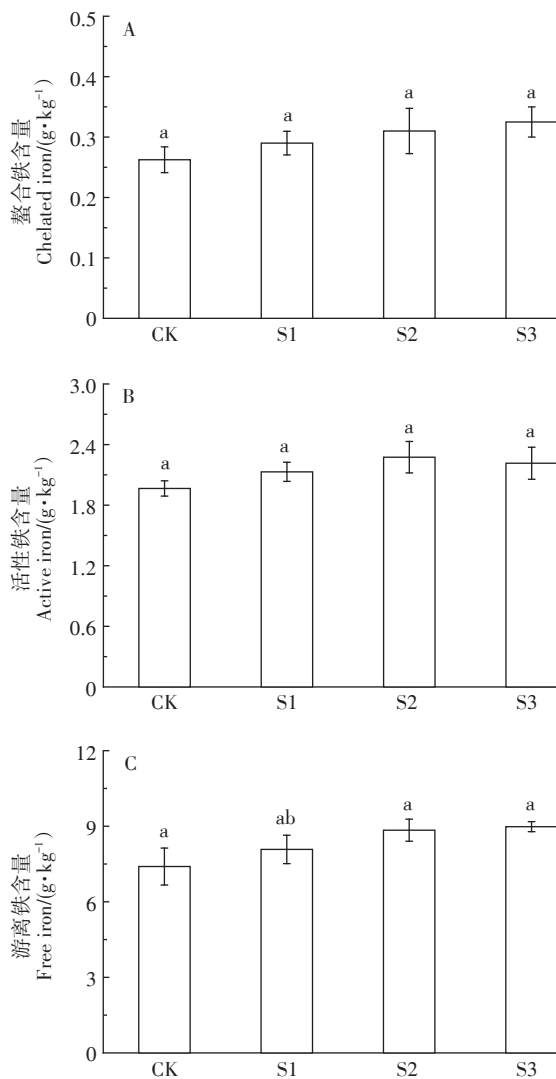


图3 不同处理下土壤铁形态变化

Figure 3 Changes of soil iron in different treatments

2.5 有机碳官能团结构影响因素分析

冗余分析(图4)表明,10个环境变量解释了43.2%的有机碳官能团组成的变化,其中第一轴和第二轴的解释率为35.4%和7.8%。蒙特卡罗检验结果表明,土壤TOC($F=19.7, P<0.01$)、MBC($F=8.4, P<0.05$)含量、 >2.00 mm团聚体($F=7.9, P<0.05$)对有机碳官能团结构的影响达到显著水平。因此,TOC、MBC含量、团聚体组成及铁离子含量改变是导致不同处理间土壤有机碳官能团结构存在差异的主要原因。

3 讨论

3.1 不同秸秆还田对土壤有机碳的影响

国内外大量研究均证实小麦、玉米、水稻等秸秆还田能显著增加土壤中总有机碳的含量^[15-16,28],这与

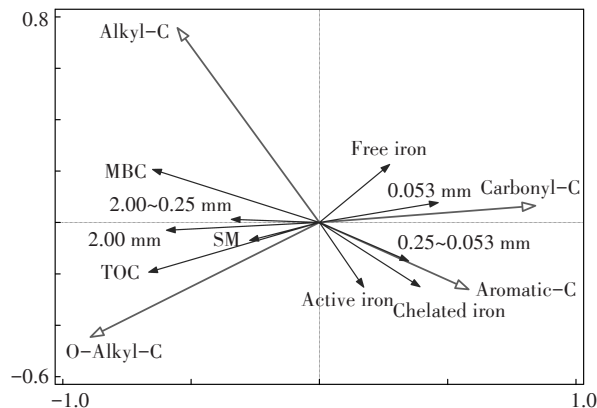


图4 土壤特征与有机碳组分的冗余分析

Figure 4 The RDA analysis between soil properties and proportions of soil organic carbon

本文的研究结果一致。小麦-玉米秸秆还田导致轮作系统中土壤总有机碳含量增加的原因如下:(1)秸秆本身是一种碳源,大量秸秆还田后,增加了土壤有机质输入量,导致土壤可利用的有机碳资源迅速增加,改善土壤中微生物群落结构,促进了土壤微生物的生长,提高土壤的生物活性^[6,17,27],提升秸秆降解和秸秆有机碳转化为土壤有机碳的能力^[33],直接提高土壤总有机碳含量。(2)秸秆还田通过改变土壤物理结构,改善土壤团聚体结构^[24],促进土壤大团聚体形成,增加大团聚体有机碳含量,加速土壤有机碳积累^[15,19]。(3)秸秆的降解过程释放出大量的营养元素,促进了作物根系的生长发育,从而增加了作物根系分泌物,增加了土壤有机碳含量^[34]。此外,秸秆对土壤总有机碳的影响还受还田量和还田时间的影响^[23-24]。前人研究表明,短期内随着秸秆还田量与还田年限的增加,土壤有机碳含量持续增加^[35]。本研究也证实随着还田量的增加,土壤有机碳含量逐渐增加,截止到秸秆还田第5 a,土壤有机碳含量为 $13.75 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,在华北农田耕层土壤有机碳变化范围内^[35],同时土壤有机碳含量也受到土壤质地和结构的影响^[17]。

国内外报道也证明秸秆还田改变土壤有机碳不同组分含量^[13-14,22]。本研究发现秸秆还田增加了土壤中DOC、EOC和MBC 3种活性碳含量,这与李新华等^[22]的研究结果基本一致。究其原因是秸秆还田为微生物生长与繁殖提供充足碳源和庇护所,增强微生物的活性,进而促进秸秆有机物质以及秸秆腐解,增加了活性碳组分的主要来源,因此提高了土壤中活性碳组分(易降解)含量。本研究发现秸秆还田增加了土壤 >2.00 mm团聚体和 $2.00\sim0.25$ mm团聚体中有机碳含量,且大团聚体有机碳含量最高,这与Six等^[36]

研究结果一致,这可能是通过有机物或有机质的胶合作用将土壤颗粒团聚在一起形成大团聚体,由此,大团聚体颗粒赋存的有机碳最多。此外,由于 $>2\text{ mm}$ 大团聚体组分少,而 $2.00\sim0.25\text{ mm}$ 团聚体组分最多,因此,秸秆还田新积累的碳大部分也赋存于中团聚体内^[24]。

3.2 不同秸秆还田对土壤有机碳稳定性的影响

烷基碳与芳香碳用来表征难被微生物利用的碳化合物,是难以降解的较稳定有机碳组分^[37]。烷氧基碳和羰基碳表示易被微生物代谢利用的易分解有机碳、不稳定有机碳^[26]。本文中土壤有机碳以烷氧基碳和烷基碳为主,随着秸秆还田量增加,易分解的烷氧基碳与羰基碳的组分增加,而难降解的烷基碳与芳香碳组分降低,这与Chen等^[23]和Kubar等^[38]研究中水稻秸秆还田的结果类似,究其原因是在秸秆中含有大量半纤维素、纤维素、聚合和非聚合的碳水化合物等易分解的碳组分。这表明5 a秸秆还田可能会增加土壤中易分解的碳含量,促进小麦-玉米轮作系统土壤碳排放,尤其以秸秆全量还田处理更为明显。

烷基碳/烷氧基碳比值是评价土壤有机碳分解程度的敏感指标,可用来反映秸秆腐质烷基化程度的高低和土壤有机碳的稳定性^[26]。脂族碳/芳香碳比值反映有机碳分子结构的复杂程度,比值越大,表明该有机碳分子结构越简单^[20,37]。秸秆还田明显降低了烷基碳/烷氧基碳比值,且随还田量增加而降低,对脂族碳/芳香碳比值的影响不明显,这与Kubar等^[38]和Xue等^[39]的研究结果几乎一致,表明秸秆还田5 a促使土壤中低烷基化的有机碳组分累积,增加了土壤有机碳不稳定性,同时发现土壤有机碳稳定性受小麦、玉米秸秆还田量的负向调控。

芳香度值反映土壤有机碳的稳定性,通常值越大有机碳稳定性越好。随还田量增加,芳香度值逐渐降低,这与Kubar等^[38]和Xue等^[39]的结果一致,表明秸秆还田可能暂时降低了土壤有机碳的稳定性。疏水碳/亲水碳比值反映土壤有机碳和团聚体结构的稳定性,其比值越大说明由团聚体作用引发的有机碳稳定性越高^[40]。有研究发现,短期秸秆还田降低水稻土有机碳的疏水性,增加有机碳的矿化程度^[39]。本研究显示,秸秆还田5 a后疏水碳/亲水碳比值显著下降,随着还田量增加,该比值明显降低,这表明有机碳稳定性随还田量增加而降低。其原因可能是秸秆还田导致土壤中大团聚体增加,更利于活性较强的低分子有机碳累积^[41],短期内秸秆还田量越高,不稳定低分子

有机碳累积越高。

3.3 不同秸秆还田下土壤有机碳稳定性的影响因素

土壤团聚体是土壤有机碳形成和转化的重要载体^[18-19],有机碳稳定性受到团聚体的物理保护作用^[42-43]。这是由于土壤中的团聚体将土壤有机碳储存在其内部,隔离氧气、水分和微生物与酶的分解作用,形成天然的物理保护屏障^[4,36]。本研究发现大团聚体、中团聚体与烷氧基碳和羰基碳相对含量间呈现正相关关系,而微团聚体、粉+黏团聚体与芳香碳和烷基碳相对含量之间呈现正相关关系(图4),这与前人的研究结果基本一致:土壤粒径越大,有机碳中烷氧基碳所占比率越高;土壤粒径越小,烷氧基碳所占比率越低;随着粒径的减小,烷基碳和芳香碳相对含量逐渐增加^[26,39,41]。这是由于粉粒和黏粒形成较为密集的物理结构及与土壤中的矿物离子结合形成胶状有机物抵抗土壤有机碳降解,增强了有机碳结构稳定性^[18,23]。秸秆还田5 a后土壤大团聚体比率增加,微团聚体和粉+黏团聚体比率降低,由此,短期秸秆还田可能降低了土壤团聚体的物理保护作用,不利于维持小麦-玉米轮作系统中土壤有机碳稳定性。

土壤有机碳稳定性还受到土壤高价阳离子络合作用的影响^[19,25],这是由于高价阳离子与有机碳间通过络合反应形成复杂的官能团,降低了有机碳的降解^[42]。本研究显示土壤游离铁、活性铁、螯合铁与芳香碳、烷基碳相对含量之间呈现正相关关系(图4),表明土壤中铁离子变化对土壤有机碳稳定性具有积极作用,这与前人的研究结果^[26,39]一致。究其原因可能是土壤中游离铁、螯合铁、活性铁等非晶质氧化物的巨大比表面积增加了对可溶性有机碳的吸附能力,或者通过螯合作用形成了难以分解的物质,提高了土壤有机碳的稳定性。秸秆还田在一定程度上可能通过影响土壤铁离子形态而导致有机碳的稳定性变化。

土壤微生物与土壤有机质化学性质间的相互作用控制着土壤的碳循环过程^[43]。微生物通过参与团聚体内的有机碳、矿物结合态碳及稳定性碳的分解,而影响有机碳的稳定性^[18,44]。本文中RDA分析显示MBC与烷氧基碳、羰基碳相对含量间呈现正相关关系,这是由于秸秆还田通过增加微生物食物供给及改善微生物的生境条件,提高了其活性(MBC含量)^[17,27],从而促进秸秆有机碳分解,加速了不稳定性有机碳的形成。此外,MBC作为活性有机碳的组成部分,秸秆还田促使其含量增加,对不稳定性有机碳含量作出一定贡献。因此,土壤MBC含量变化也是

不同量秸秆还田处理土壤有机碳结构稳定性存在差异的重要原因之一。

4 结论

(1)随秸秆还田量增加,小麦-玉米轮作系统中土壤 TOC、>2.00 mm 与 2.00~0.25 mm 团聚体有机碳含量及土壤 DOC、MBC 和 EOC 含量逐渐增加,与对照相比,全量还田显著增加这些有机碳含量。

(2)秸秆还田增加了烷氧基碳和羰基碳(易降解有机碳)相对含量,降低了烷基碳和芳香碳(难降解有机碳)相对含量。随秸秆还田量增加,烷氧基碳相对含量有逐渐增加趋势,而芳香碳含量则呈现相反趋势。秸秆还田降低了有机碳的芳香度、疏水碳/亲水碳、烷基碳/烷氧基碳比值,对脂族碳/芳香碳比值影响不明显。

(3)秸秆还田增加了大、中团聚体比例,减少微团聚体和粉+黏团聚体比例,与对照相比,全量还田显著增加了大团聚体比率,显著降低了粉+黏团聚体比率。

综合分析表明,秸秆还田增加了易降解有机碳组分,减少了难降解有机碳组分,降低了微团聚体物理保护作用,因而,短期秸秆还田降低了麦玉轮作系统土壤有机碳稳定性。

参考文献:

- [1] Schmidt M W, Torn M S, Abiven S, et al. Persistence of soil organic matter as an ecosystem property[J]. *Nature*, 2011, 478(7367):49-56.
- [2] Bond-Lamberty B, Thomson A. Temperature-associated increases in the global soil respiration record[J]. *Nature*, 2010, 464(7288):579-582.
- [3] Heimann M, Reichstein M. Terrestrial ecosystem carbon dynamics and climate feedbacks[J]. *Nature*, 2008, 451(7176):289-292.
- [4] Six J, Paustian K. Aggregate-associated soil organic matter as an ecosystem property and a measurement tool[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, 68:4-9.
- [5] 李荣,侯贤清,吴鹏年,等. 秸秆还田配施氮肥对土壤性状与水分利用效率的影响[J]. *农业机械学报*, 2019, 50(8):289-298.
LI Rong, HOU Xian-qing, WU Peng-nian, et al. Effect of straw returning with nitrogen application on soil properties and water use efficiency [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(8):289-298.
- [6] Zhang P, Chen X L, Wei T, et al. Effects of straw incorporation on the soil nutrient contents, enzyme activities, and crop yield in a semiarid region of China[J]. *Soil & Tillage Research*, 2016, 160:65-72.
- [7] Chen Y, Xin L, Liu J, et al. Changes in bacterial community of soil induced by long-term straw returning[J]. *Scientia Agricola*, 2017, 74(5):349-356.
- [8] 吴其聪,张丛志,张佳宝,等. 不同施肥及秸秆还田对潮土有机质及其组分的影响[J]. *土壤*, 2015, 47(6):1034-1039.
WU Qi-cong, ZHANG Cong-zhi, ZHANG Jia-bao, et al. Effects of different fertilization and returning straw to soil on organic matter and its components in fluvo-aquic soil[J]. *Soil*, 2015, 47(6):1034-1039.
- [9] 何振超,苏瑶,喻曼,等. 秸秆碳对不同施肥水平低肥力土壤碳组分的影响[J]. *农业资源与环境学报*, 2019, 36(3):304-312.
HE Zhen-chao, SU Yao, YU Man, et al. Effects of straw-derived carbon on carbon components of low fertility soil at different nitrogen application rates[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2019, 36(3):304-312.
- [10] Benbi D K, Toor A S, Kumar S. Management of organic amendments in rice-wheat cropping system determines the pool where carbon is sequestered[J]. *Plant and Soil*, 2012, 360(1/2):145-162.
- [11] Powlson D S, Riche A B, Coleman K, et al. Carbon sequestration in European soils through straw incorporation: Limitations and alternatives[J]. *Waste Management*, 2008, 28(4):741-746.
- [12] Zhao X, Zhang R, Xue J F, et al. Management-induced changes to soil organic carbon in China: A meta-analysis[J]. *Advances in Agronomy*, 2015, 134:1-50.
- [13] 杨艳华,苏瑶,何振超,等. 还田秸秆碳在土壤中的转化分配及对土壤有机碳库影响的研究进展[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(2):668-676.
YANG Yan-hua, SU Yao, HE Zhen-chao, et al. Transformation and distribution of straw-derived carbon in soil and the effects on soil organic carbon pool: A review[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(2):668-676.
- [14] Wang Z, Wang Z, Ma L J, et al. Combined effects of nitrogen fertilizer and straw application on aggregate distribution and aggregate-associated organic carbon stability in an alkaline sandy loam soil[J]. *European Journal of Soil Science*, 2018, 69(6):1105-1116.
- [15] Ranaivosoa L, Naudin K, Ripoche A, et al. Agro-ecological functions of crop residues under conservation agriculture: A review[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2017, 37(4):1-17.
- [16] Jin V L, Schmer M R, Stewart C E, et al. Long-term no-till and stover retention each decrease the global warming potential of irrigated continuous corn[J]. *Global Change Biology*, 2017, 23:2848-2862.
- [17] 高燕,张延,郭亚飞,等. 不同秸秆还田模式对土壤有机碳周转的影响[J]. *土壤与作物*, 2019, 8(1):93-101.
GAO Yan, ZHANG Yan, GUO Ya-fei, et al. Effect of residue return patterns on soil organic carbon turnover: A review[J]. *Soils and Crops*, 2019, 8(1):93-101.
- [18] 徐嘉晖,孙颖,高雷,等. 土壤有机碳稳定性影响因素的研究进展[J]. *中国生态农业报*, 2018, 26(2):222-230.
XU Jia-hui, SUN Ying, GAO Lei, et al. A review on influencing factors of soil organic carbon stability[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2018, 26(2):222-230.
- [19] Karami A M, Homae S, Afzalnia H, et al. Organic resource management: Impacts on soil aggregate stability and other soil physico-chemical properties[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2012, 148:

- 22–28.
- [20] 李娜, 盛明, 尤孟阳, 等. 应用¹³C核磁共振技术研究土壤有机质化学结构进展[J]. 土壤学报, 2019, 56(4): 796–812.
- LI Na, SHENG Ming, YOU Meng-yang, et al. Advancement in research on application of ¹³C NMR techniques to exploration of chemical structure of soil organic matter[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56(4): 796–812.
- [21] Liu C, Lu M, Cui J, et al. Effects of straw carbon input on carbon dynamics in agricultural soils: A meta-analysis[J]. *Global Change Biology*, 2014, 20(5): 1366–1381.
- [22] 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 Xin-hua, GUO Hong-hai, ZHU Zhen-lin, 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.
- [23] Chen X, Xu Y J, Gao H J, et al. Biochemical stabilization of soil organic matter in straw-amended, anaerobic and aerobic soils[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 625: 1065–1073.
- [24] 王峻, 薛永, 潘剑君, 等. 耕作和秸秆还田对土壤团聚体有机碳及其作物产量的影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32(5): 121–127.
- WANG Jun, XUE Yong, PAN Jian-jun, et al. Effects of tillage and straw incorporation on sequestration of organic carbon and crop yields [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(5): 121–127.
- [25] Xue B, Huang L, Huang Y, et al. Effects of organic carbon and iron oxides on soil aggregate stability under different tillage systems in a rice–rape cropping system[J]. *Catena*, 2019, 177: 1–12.
- [26] Kögel K I. The macromolecular organic composition of plant and microbial residues as inputs to soil organic matter[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2002, 34(2): 139–162.
- [27] Rong Q L, Ruo-Nan L I, Huang S W, et al. Soil microbial characteristics and yield response to partial substitution of chemical fertilizer with organic amendments in greenhouse vegetable production[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2018, 17(6): 1432–1444.
- [28] Zhang J, Wei Y, Liu J, et al. Effects of maize straw and its biochar application on organic and humic carbon in water-stable aggregates of a Mollisol in Northeast China: A five-year field experiment[J]. *Soil and Tillage Research*, 2019, 190: 1–9.
- [29] Vance E D, Brookes P C, Jenkinson D S. An extraction method for measuring soil microbial biomass carbon[J]. *Soil Biology Biochemistry*, 1987, 19: 703–704.
- [30] Cambardella C A, Elliott E T. Carbon and nitrogen distribution in aggregates from cultivated and native grassland soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1993, 57(4): 1071–1076.
- [31] 孙慧敏, 姜姜, 崔莉娜, 等. 互花米草入侵对漳江口红树林湿地土壤有机碳官能团特征的影响[J]. 植物生态学报, 2018, 42(7): 774–784.
- SUN Hui-min, JIANG Jiang, CUI Li-na, et al. Effects of *Spartina alterniflora* invasion on soil organic carbon composition of mangrove wetland in Zhangjiang River Estuary[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2018, 42(7): 774–784.
- [32] 赖江山. 生态学多元数据排序分析软件 Canoco 5 介绍[J]. 生物多样性, 2013, 21(6): 765–768.
- LAI Jiang-shan. Canoco 5: A new version of an ecological multivariate data ordination program[J]. *Biodiversity Science*, 2013, 21(6): 765–768.
- [33] Barré P, Quénéa K, Alix V, et al. Microbial and plant-derived compounds both contribute to persistent soil organic carbon in temperate soils[J]. *Biogeochemistry*, 2018, 140(1): 81–92.
- [34] Turmel M S, Speratti A, Baudron F, et al. Crop residue management and soil health: A systems analysis[J]. *Agriculture Systems*, 2015, 134: 6–16.
- [35] Stewart C E, Paustian K, Conant R T, et al. Soil carbon saturation: evaluation and corroboration by long-term incubations[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, 40: 1741–1750.
- [36] Six J, Conant R T, Paul E A, et al. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils[J]. *Plant and Soil*, 2002, 241(2): 155–176.
- [37] Skjemstad J O, Frost R L, Barron P F. Structural units in humic acids from southeastern Queensland soils as determined by ¹³C-NMR spectroscopy[J]. *Australian Journal of Soil Research*, 1983, 21(4): 539–547.
- [38] Kubar K A, Huang L, Lu J, et al. Long-term tillage and straw returning effects on organic C fractions and chemical composition of SOC in rice–rape cropping system[J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2019, 65(1): 125–137.
- [39] Xue B, Huang L, Huang Y N, et al. Straw management influences the stabilization of organic carbon by Fe (oxyhydr) oxides in soil aggregates[J]. *Geoderma*, 2020, 358: 113987.
- [40] Wagai R, Kishimoto M, Ayaka W, et al. Linking temperature sensitivity of soil organic matter decomposition to its molecular structure, accessibility, and microbial physiology[J]. *Global Change Biology*, 2013, 19(4): 1114–1125.
- [41] Puget P C, Chenu C, Balesdent J. Total and young organic matter distributions in aggregates of silty cultivated soils[J]. *European Journal of Soil Science*, 2005, 46(3): 449–459.
- [42] Bhattacharyya R, Pandey S C, Bisht J K, et al. Tillage and irrigation effects on soil aggregation and carbon pools in the Indian Sub-Himalayas[J]. *Agronomy Journal*, 2013, 105(1): 101–112.
- [43] Sánchez-de L, Yaniria, Lugo-Pérez, Javier D H, et al. Aggregate formation and carbon sequestration by earthworms in soil from a temperate forest exposed to elevated atmospheric CO₂: A microcosm experiment[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, 68: 223–230.
- [44] 张仲胜, 李敏, 宋晓林, 等. 气候变化对土壤有机碳库分子结构特征与稳定性影响研究进展[J]. 土壤学报, 2018, 55(2): 273–282.
- ZHANG Zhong-sheng, LI Min, SONG Xiao-lin, et al. Effects of climate change on molecular structure and stability of soil carbon pools: A general review[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, 55(2): 273–282.