秸秆及其炭化还田对北方稻田土壤团聚体形成及其固碳、供养能力的促进作用与机制

顾闻琦, 孙媛媛, 吴迪, 孙雯, 王欣, 刘子凡, 王文佳, 张伟明, 陈温福

引用本文:
顾闻琦, 孙媛媛, 吴迪, 等. 秸秆及其炭化还田对北方稻田土壤团聚体形成及其固碳、供养能力的促进作用与机制[J]. 农业环境科学学报, 2025, 44(12): 3138-3149.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.11654/jaes.2024-1156

顾闻琦, 孙媛媛, 吴迪, 等. 秸秆及其炭化还田对北方稻田土壤团聚体形成及其固碳、供养能力的促进作用与机制[J]. 农业环境科学学报, 2025, 44(12): 3138-3149.

GU W Q, SUN Y Y, WU D, et al. Effects and mechanisms of straw and its carbonization incorporation on paddy soil aggregate formation, carbon sequestration and nutrient supply capacity in northeast China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2025, 44(12): 3138-3149.

开放科学 OSID

秸秆及其炭化还田对北方稻田土壤团聚体形成及其固碳、供养能力的促进作用与机制

顾闻琦, 孙媛媛, 吴迪, 孙雯, 王欣, 刘子凡, 王文佳, 张伟明*, 陈温福*

(沈阳农业大学农学院, 辽宁省生物炭工程技术研究中心, 沈阳 110866)

摘　要: 为明确秸秆及其炭化还田对北方稻田土壤团聚体形成、稳定性及其固碳、供养能力的影响,采用大田长期定位试验方法,设置常规施肥(CF)、秸秆还田(RS)、秸秆炭化还田[生物炭(RB)、炭基肥(BF)]处理,研究土壤团聚体分布、稳定性及其养分、有机碳组分和碳转化相关酶活性等的变化,明确秸秆及其炭化还田对土壤团聚体固碳、供养能力的影响,揭示其调控团聚体形成及稳定性的主要因子及路径。结果表明:秸秆及其炭化还田可显著提高土壤大团聚体(>0.25 mm)含量,RB、RS、BF处理分别比CF提高40.83%、37.78%和24.97%,并显著提升土壤团聚体稳定性,大团聚体中分子间缔合羟基、甲基、醚键吸收峰强度增加,促进了大团聚体形成和稳定。同时,秸秆及其炭化还田可提高土壤及团聚体中有机碳(SOC)含量并改变其组分,协同提升土壤活性有机碳[颗粒有机碳(POC)、轻组有机碳(LFOC)]和惰性有机碳[矿物结合态碳(MAOC)、重组有机碳(HFOC)],其中RS处理对POC具有显著促进作用,而RB处理对提高LFOC、HFOC、MAOC的作用更强。此外,RB处理对纤维二糖水解酶(S-C1)、多酚氧化酶(S-PPO)、过氧化物酶(S-POD),BF处理对S-C1、S-POD及RS处理对S-PPO在土壤及大团聚体中的协同提高,促进了土壤固碳及碳转化。秸秆及其炭化还田对土壤及团聚体中氮、磷、钾含量也表现出一定促进作用,其中大团聚体是养分的主要载体。进一步分析表明,LFOC、S-PPO是造成团聚体不同粒级间差异的主要因子,而SOC、HFOC、S-PPO、S-C1、全钾(TK)是不同处理间产生差异的主要因子。MAOC、HFOC可直接驱动土壤大团聚体形成,而土壤养分、土壤酶及不同有机碳组分可通过直接和间接途径提升土壤团聚体稳定性。研究表明,秸秆及其炭化还田可通过调控养分、SOC及其组分,以及碳转化相关酶活性提高北方稻田土壤团聚体固碳、供养能力,促进大团聚体形成和团聚体稳定性提高。

关键词: 秸秆还田;生物炭;土壤团聚体;有机碳组分;土壤肥力

中图分类号: S152　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1672-2043(2025)12-3138-12　　doi:10.11654/jaes.2024-1156

Effects and mechanisms of straw and its carbonization incorporation on paddy soil aggregate formation, carbon sequestration and nutrient supply capacity in northeast China

GU Wenqi, SUN Yuanyuan, WU Di, SUN Wen, WANG Xin, LIU Zifan, WANG Wenjia, ZHANG Weiming*, CHEN Wenfu*

(Liaoning Biochar Engineering & Technology Research Center, Agronomy College, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China)

Abstract: To investigate the impacts of straw incorporation and its carbonization on paddy soil aggregate formation, stability, carbon sequestration, and nutrient-supplying capacity in northeast China, we established a long-term field experiment comparing chemical fertilizer(CF), rice straw(RS), rice straw biochar(RB), and biochar-based fertilizer(BF) treatments. We examined aggregate distribution and stability, nutrient content, organic carbon fractions, and carbon conversion-related enzyme activities. The results revealed that straw

收稿日期: 2024-12-28　　**录用日期:** 2025-02-28

作者简介: 顾闻琦(1997—),女,辽宁沈阳人,博士研究生,从事生物炭与土壤改良、作物高产等应用基础研究。E-mail:312122359@qq.com

***通信作者:** 张伟明　E-mail:biochar_zwm@syau.edu.cn; 陈温福　E-mail:wfchen5512@126.com

基金项目: 黑土地保护与利用科技创新工程专项(XDA28090300);国家重点研发计划项目(2023YFD1501200);稻田生物炭基培肥产品的研制与施用技术项目(2016YFD0300904-4);院士专项基金项目

Project supported: Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences (XDA28090300); National Key Research and Development Program of China (2023YFD1501200); Biochar-based Fertilizer Development and Application Technology for Soil Fertility Improvement in Rice (2016YFD0300904-4); Special Fund for Academicians

incorporation and its carbonization significantly enhanced macroaggregate formation, with RB, RS, and BF treatments increasing macroaggregates by 40.83%, 37.78%, and 24.97%, respectively, compared to CF, while substantially improving aggregate stability. Notably, the intensity of —OH, —CH_3, and C—O—C absorption peaks in macroaggregates increased, facilitating macroaggregate formation and stabilization. Meanwhile, the treatments enhanced soil organic carbon (SOC) content and altered its fractions, synergistically increasing both soil reactive organic carbon (particulate organic carbon (POC), light fraction organic carbon (LFOC)) and inert organic carbon (mineral-associated carbon (MAOC), heavy fraction organic carbon (HFOC)). RS treatment exhibited significant enhancement of POC, whereas RB demonstrated superior performance in elevating LFOC, HFOC, and MAOC compared to other treatments. Additionally, Synergistic enhancement of β-1, 4-glucanase (S-C1), polyphenol oxidase (S-PPO) and peroxidase (S-POD) by RB, S-C1 and S-POD by BF, and S-PPO by RS in soil and macroaggregates, facilitating soil carbon sequestration and transformation. The treatments also demonstrated positive effects on nitrogen, phosphorus, and potassium content, with macroaggregates serving as primary nutrient repositories. Further analysis showed that LFOC and S-PPO emerged as primary factors influencing soil aggregate size distribution, while treatment differences were predominantly driven by SOC, HFOC, S-PPO, S-C1, and total potassium (TK). MAOC and HFOC could directly drive soil macroaggregate formation. Whereas, soil nutrients, soil enzymes, and different carbon fractions could improve soil aggregate stability through direct and indirect pathways. Research indicates that straw and its carbonization incorporation can enhance soil carbon sequestration and nutrient supply capacities in northern paddy soils by regulating soil nutrients, SOC and its fractions, and carbon transformation-related enzyme activities. This promotes macroaggregate formation and improves aggregate stability.

Keywords: straw incorporation; biochar; soil aggregates; organic carbon fractions; soil fertility

水稻是全球重要的粮食作物,在保障人类粮食安全方面发挥了重要作用[1-2]。长期以来,为了追求产量目标,种植者常采用高强度的“掠夺”式耕种方式,通过投入大量农药、化肥等化学品来提高产量,而忽视了对土壤的有益补充,导致土壤肥力和作物生产力持续下降。与此同时,伴随大量粮食产出,秸秆产出量也大幅攀升,秸秆没有有效归还土壤,尤其在我国北方一些地区表现得尤为突出[1-3]。秸秆资源化还田利用,对减少环境污染、提升土壤肥力及促进农业废弃物循环利用具有重要意义[4-5]。秸秆及其炭化还田,是秸秆还田利用的重要方式,在避免秸秆焚烧带来污染的同时,可通过改良土壤结构、增加土壤有机碳、提高土壤养分及其有效性等途径提升土壤肥力[4-6]。

土壤团聚体形成、分布及稳定性,对提高土壤通气及透水性、改良根系生长环境、促进养分循环等具有决定性影响[7],而土壤有机碳是团聚体形成的重要胶结物质,同时土壤团聚体形成及周转又可有效储存和保护有机碳[8],因此土壤团聚体的固碳、供养能力,在保持和提升土壤肥力方面扮演着重要角色。前人研究表明,秸秆还田可提高土壤大团聚体及有机碳含量,且利于增强耕层土壤有机碳的稳定性[9]。长期秸秆还田可通过增加土壤颗粒有机碳含量来提高黑土和棕壤团聚体的稳定性[10]。同时,秸秆含有氮、磷、钾等养分,可通过土壤微生物的分解作用释放一定养分,与秸秆腐解程度密切相关[11-12]。土壤养分增加利于促进作物根系生长并提高微生物活性,产生更多代谢胶结物质,促进土壤团聚体形成[7]。生物炭施用可有效促进水稳性大团聚体形成,提高团聚体稳定性,且能调控土壤有机碳库[13]。研究表明,生物炭有利于团聚体活性有机碳含量的提高[14]。长期生物炭还田,可增加土壤和团聚体中有机碳、重组有机碳含量,通过形成更多的有机矿物复合物提高团聚体稳定性[15]。同时,生物炭含有氮、磷、钾等多种营养元素,且具有较强的吸附能力,可在提高土壤养分的同时减少养分淋失,提高土壤肥力[6,16]。生物炭对土壤有机碳和养分的提升起重要作用,利于土壤团聚体的形成和稳定性提高[7,15]。

秸秆和生物炭,因其在结构、性质和功能等方面存在差异,特别是在北方寒冷气候条件下,长期秸秆和生物炭还田对稻田土壤团聚体的形成、稳定性及其固碳、供养能力的影响仍不清楚。因此,本研究通过大田长期定位试验(已开展7 a),测定分析秸秆及其炭化还田对土壤团聚体分布、稳定性以及养分含量、有机碳组分、酶活性等的影响,旨在揭示秸秆及其炭化还田在调控土壤团聚体形成,促进土壤碳固存、养分和肥力提升中的重要作用,为有效利用秸秆资源,持续提升土壤和作物生产力,促进水稻生产可持续发展提供理论基础和依据。

1 材料与方法

1.1 试验概况

本研究依托大田长期定位试验,地点位于辽宁省沈阳市辽中区院士水稻实验站(41°12′N,122°23′E)。该地为北温带半湿润季风型大陆性气候区,年

平均气温8.0 ℃，总降水量640 mm，水稻种植为单季稻，一年一熟制。试验始于2017年，本研究样本取自2023年。供试土壤为水稻土，其基础理化特性为土壤容重1.38 g·cm^{-3}，pH 6.05，土壤有机质11.56 g·kg^{-1}，全氮（TN）0.91 g·kg^{-1}，全磷（TP）0.46 g·kg^{-1}，全钾（TK）20.93 g·kg^{-1}。生物炭的制备原材料为水稻秸秆，制炭温度为450~550 ℃，粒径为1.5~2 mm，其主要理化特性为pH 9.37，全碳（TC）478.47 g·kg^{-1}，TN 11.34 g·kg^{-1}，TP 1.80 g·kg^{-1}，TK 13.52 g·kg^{-1}，C/N 42.19。秸秆性质为TC 357.82 g·kg^{-1}，TN 12.41 g·kg^{-1}，TP 1.60 g·kg^{-1}，TK 7.78 g·kg^{-1}。

1.2 试验设计

采用随机区组试验设计，设置4个处理：（1）以常规施肥作为对照，不施秸秆、生物炭，设为CF。（2）秸秆还田处理，施用量为7.5 t·hm^{-2}·a^{-1}，设为RS。（3）秸秆炭化还田处理，生物炭施用量为2.5 t·hm^{-2}·a^{-1}，设为RB；（4）生物炭基肥处理，施用量为0.75 t·hm^{-2}·a^{-1}，设为BF。各处理投入的化学养分量一致：N 225 kg·hm^{-2}、P_2O_5 120 kg·hm^{-2}、K_2O 150 kg·hm^{-2}。RS处理的还田量为当地水稻秸秆的年平均产量，RB处理的还田量按秸秆制备成生物炭的平均转化效率（3∶1）计算，BF处理的施用量为炭基肥生产公司的推荐用量，以基肥形式一次施入。根据试验方案，称取相应的秸秆、生物炭及炭基肥，均匀铺撒于相应的试验小区内，并使用旋耕机将试验材料旋入0~20 cm耕层土壤内。每个小区面积为100 m^2，每个处理重复3次。每个小区进水和排水口独立设计，小区间互不影响、干扰。其他栽培管理措施，如水分管理、病虫害防治等条件一致。

1.3 测定方法

于水稻种植前采集0~20 cm原状土壤，放置在坚固的盒子中，以保障在运输过程中土壤结构不被损坏。将土壤样本分为两部分，一部分用于土壤各项指标测定，另一部分用于土壤团聚体筛分。采用湿筛法分离土壤团聚体[17]，分为4个粒级：>2、2~0.25、0.25~0.053 mm和<0.053 mm。将收集的各粒级团聚体于40 ℃烘干至质量恒定，妥善保存供后续测定。根据公式（1）计算各粒级土壤团聚体百分比（W_i）。采用平均质量直径（*MWD*）、几何平均直径（*GMD*）和水稳性大团聚体含量（$R_{0.25}$）确定土壤团聚体稳定性[18-19]，根据公式（2）~公式（4）计算得出。

$$W_i = \frac{M_i}{M_T} \times 100\% \tag{1}$$

$$MWD = \sum_{i=1}^{n} W_i \times \bar{X}_i \tag{2}$$

$$GMD = \exp\left(\frac{\sum_{i=1}^{n} W_i \times \ln \bar{X}_i}{\sum_{i=1}^{n} W_i}\right) \tag{3}$$

$$R_{0.25} = 1 - \frac{M_{X<0.25}}{M_T} \tag{4}$$

式中：M_i代表不同粒级（i）团聚体的质量，g；M_T代表用于团聚体筛分的土壤总质量，g；$\bar{X}_i$为各粒级团聚体的平均直径，mm；$M_{X<0.25}$表示<0.25 mm团聚体的质量，g。

采用傅里叶红外光谱（FTIR）法测定土壤表面化学特性。按照土壤样品与溴化钾质量比1∶100的比例制样，样品研磨压片后，采用红外光谱仪（Tensor 27，Bruker，德国）测定，土壤特征吸收峰波数范围参照文献[20]。

土壤颗粒有机碳（POC）和矿物结合态有机碳（MAOC）采用六偏磷酸钠分散法测定[21]；土壤轻、重组有机碳（LFOC、HFOC）采用密度浮选法测定[22]。土壤有机碳（SOC）、TN采用元素分析仪（Vario MACRO Cube，Elementar，德国）测定，土壤中TP和TK分别采用氢氧化钠熔融-钼锑抗比色法和氢氧化钠熔融-火焰光度法测定[23]。土壤纤维二糖水解酶（S-C1）、β-木糖苷酶（S-XYS）、多酚氧化酶（S-PPO）、过氧化物酶（S-POD）采用试剂盒（Beijing Solarbio Science & Technology Co.，Ltd.），利用可见分光光度法测定。

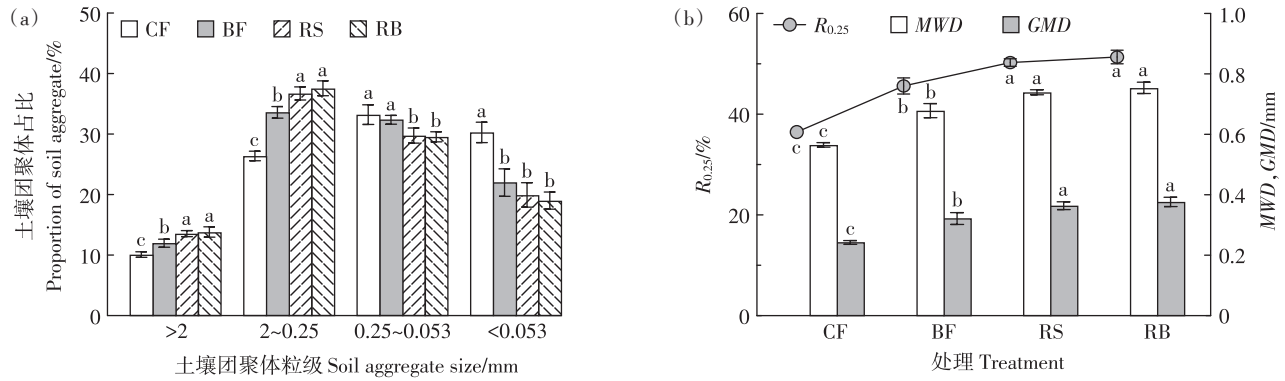
1.4 统计分析

采用SPSS 18.0进行统计学分析。采用单因素方差分析和Duncan多重比较分析描述差异显著性，$P<0.05$表示差异显著。采用Pearson相关性分析检验不同指标间的相关性。采用R 4.4.2进行偏最小二乘路径建模（PLS-PM）分析。采用GraphPad Prism 9.0绘图。

2 结果与分析

2.1 土壤团聚体分布及稳定性

土壤团聚体分布（图1a）表现：>2 mm粒级，BF、RS、RB处理分别比CF提高了18.66%、34.23%、36.93%。BF、RS、RB处理下土壤团聚体的优势粒级均为2~0.25 mm，分别比CF提高了27.38%、39.13%、42.34%。土壤大团聚体含量的提高使<0.25 mm粒级团聚体含量降低，在0.25~0.053 mm及<0.053 mm粒级中均呈现CF>BF>RS>RB。对土壤团聚体稳定性分析表明（图1b），与CF处理相比，秸秆及其炭化还田均提高了$R_{0.25}$。*MWD*表现为BF、RS、RB处理分别比CF提高了20.06%、



图中不同小写字母表示处理间差异显著(P<0.05)。下同。

Different lowercase letters in the figure indicate significant differences (P<0.05) among treatments. The same below.

图1 土壤团聚体分布及稳定性

Figure 1 Soil aggregate distribution and stability

30.91%、33.40%。*GMD*也呈现相同趋势,表现为RB>RS>BF>CF。

FTIR结果表明(图2),各处理在全土及土壤团聚体中红外光谱图形态基本一致,特征吸收峰所在位置大致相同,分子间缔合羟基(—OH)在3 430 cm^{-1}处有特征吸收峰,甲基(—CH_3)在2 828 cm^{-1}处有特征吸收峰,苯环C═C双键在1 598、1 627 cm^{-1}处有特征吸收峰,亚甲基(—CH_2)在1 358 cm^{-1}处有特征吸收峰,醚键(C—O—C)的伸缩振动在1 037、1 079 cm^{-1}处有特征吸收峰。特征吸收峰强度存在的差异主要表现在:>2 mm粒级,与CF相比,BF、RS、RB分子间—OH、—CH_3、C—O—C的吸收峰强度提高;2~0.25 mm粒级,RS、RB处理提高了分子间—OH吸收峰强度,BF、RS、RB处理均提高了—CH_3、C—O—C的吸收峰强度。RB处理对增强土壤大团聚体中官能团吸收强度的影响较大,RS处理则在0.25~0.053 mm粒级中对官能团吸收峰强度有更明显的提高作用。

2.2 土壤养分含量

如图3a所示,土壤中TN表现为BF、RS、RB处理分别比CF提高了16.49%、37.63%、32.97%。土壤团聚体中,各处理TN最大值均存在于大团聚体(>0.25 mm)中,其中RS、BF处理>2 mm粒级的TN最高,分别为1.21、1.00 g·kg^{-1},而RB处理在2~0.25 mm粒级中TN含量达到1.55 g·kg^{-1}。与CF相比,RS处理显著提高土壤中TP(图3b)。>2 mm粒级,TP表现为RS、RB处理分别比CF提高了8.59%、9.53%,2~0.25 mm粒级,RS、RB处理分别比CF提高了13.67%、16.08%。BF、RS、RB处理均提高了0.25~0.053 mm粒级中的TP,仅RB处理显著提高了<0.053 mm粒级中的TP。与CF相比,RS、RB处理均显著提高全土及大团聚体中TK含量,BF处理则表现出增加趋势(图3c)。上述结果说明,秸秆及其炭化还田均可促进土壤及团聚体中氮、磷、钾含量的提高,且大团聚体是养分的主要存储场所。

2.3 土壤酶活性

土壤碳转化相关酶活性的表现见图4。与CF相比,BF处理显著提高了土壤中S-C1、S-POD活性,RS处理显著提高了S-XYS、S-PPO活性,RB处理显著提高了S-C1、S-PPO、S-POD活性。在土壤团聚体中,RS处理显著提高了2~0.25 mm粒级S-XYS活性。RB、RS、BF处理均显著提高了>0.25 mm粒级S-C1活性,并表现为RS>RB>BF>CF。RS、RB处理显著提高了>0.25 mm粒级S-PPO活性。BF、RB处理显著提高了>0.053 mm粒级S-POD活性,RS处理则显著提高了2~0.25 mm及0.25~0.053 mm粒级S-POD活性。秸秆还田可同时提高土壤及大团聚体中S-XYS、S-PPO活性,而秸秆炭化还田对提高土壤和团聚体中S-C1、S-PPO、S-POD活性具有较强促进作用。

2.4 土壤及团聚体中SOC及其组分

秸秆及其炭化还田均对提高土壤及团聚体中SOC具有积极作用(图5)。土壤中SOC含量BF、RS、RB处理分别比CF提高了1.30、2.34、4.99 g·kg^{-1}。各处理SOC最大值均存在于土壤大团聚体中。与CF相比,RS、RB处理均提高团聚体各粒级的SOC,且RB处理更显著。

RS处理对土壤中POC含量的提高优于其他处理(图6a),且比CF提高1.88 g·kg^{-1}。>2 mm粒级,POC含量呈现RB>RS>BF>CF。2~0.25 mm粒级,BF、RS、RB处理的POC含量分别比CF提高了40.80%、61.99%、47.77%。RB处理显著提高了<0.25 mm粒级

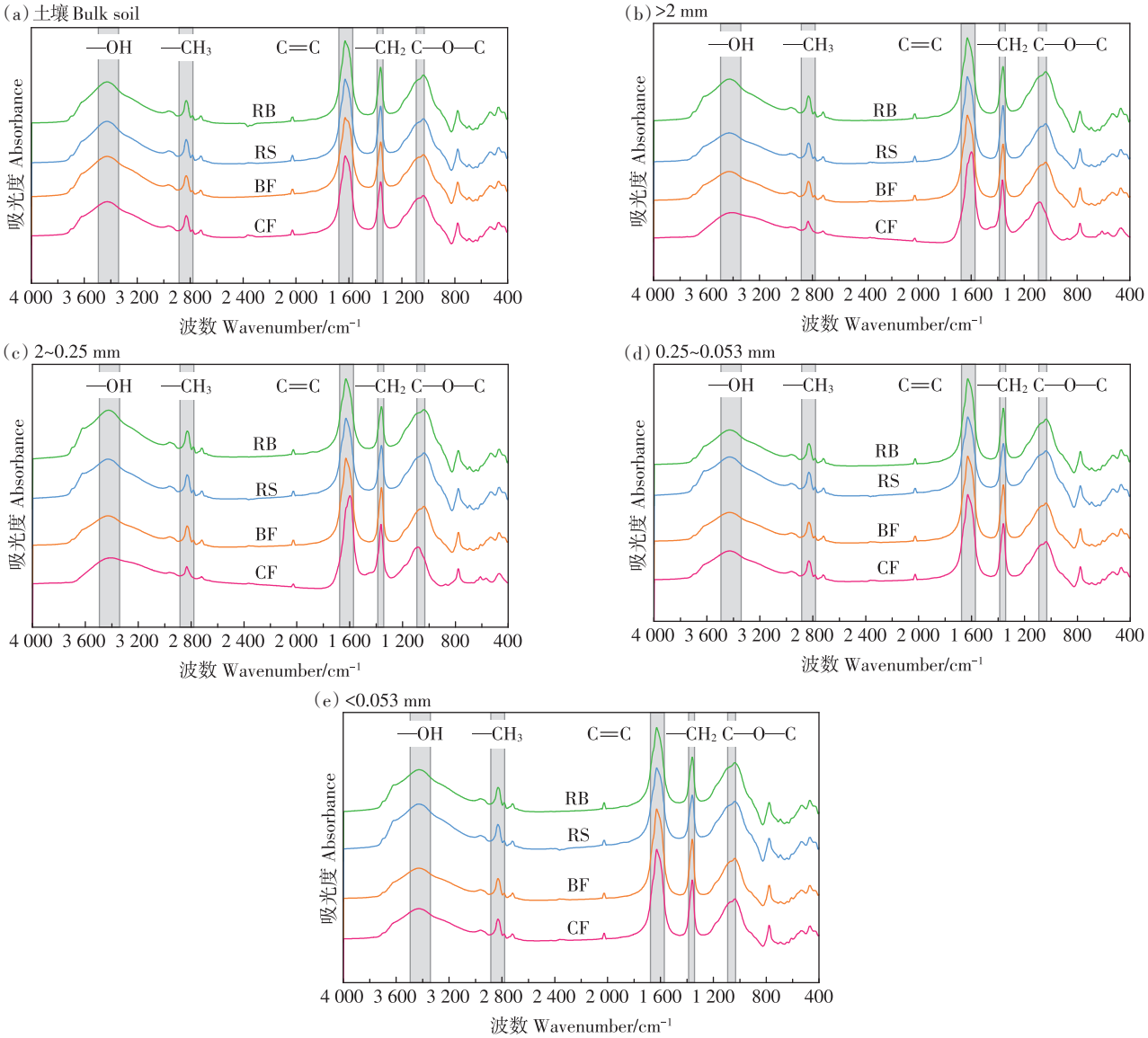


图2 土壤及团聚体中的官能团

Figure 2 Functional groups in bulk soil and soil aggregate

的POC，且POC含量高于其他处理。秸秆及其炭化还田均显著提高了土壤及团聚体中MAOC含量（图6b），且RB处理更显著。以上结果说明秸秆与生物炭施用可为POC提供保护，同时因MAOC含量的提高，使SOC的稳定性提升。

BF、RS处理下土壤LFOC含量呈现增加趋势，但与CF无显著差异（图7a）。而RB处理则比CF显著提高了45.31%，且在团聚体中，仅RB处理显著提高>2 mm粒级LFOC含量，高于CF 0.92 g·kg^{-1}，BF处理呈现增加趋势。秸秆及其炭化还田显著提高土壤HFOC含量（图7b），BF、RS、RB处理分别比CF提高了14.03%、23.49%、59.68%，同时也提高了团聚体中HFOC含量，并表现为RB>RS>BF。

土壤有机碳组分在SOC中的占比可进一步反映土壤碳组分的变化（表1）。土壤中RS处理显著提高了POC/SOC，降低了MAOC/SOC、LFOC/SOC。>2 mm粒级，RS、RB处理显著提高了POC/SOC，而MAOC/SOC、LFOC/SOC、HFOC/SOC均显著降低，BF处理显著降低了LFOC/SOC；2~0.25 mm粒级BF、RS、RB处理提高了POC/SOC、HFOC/SOC。0.25~0.053 mm粒级，BF、RS处理显著降低了POC/SOC、HFOC/SOC，RB处理显著提高了POC/SOC。<0.053 mm粒级，BF、RS、RB处理均显著提高了POC/SOC，此外RB处理显著提高了MAOC/SOC、HFOC/SOC。

2.5 相关分析

通过偏最小二乘法判别分析（PLSDA）筛选出

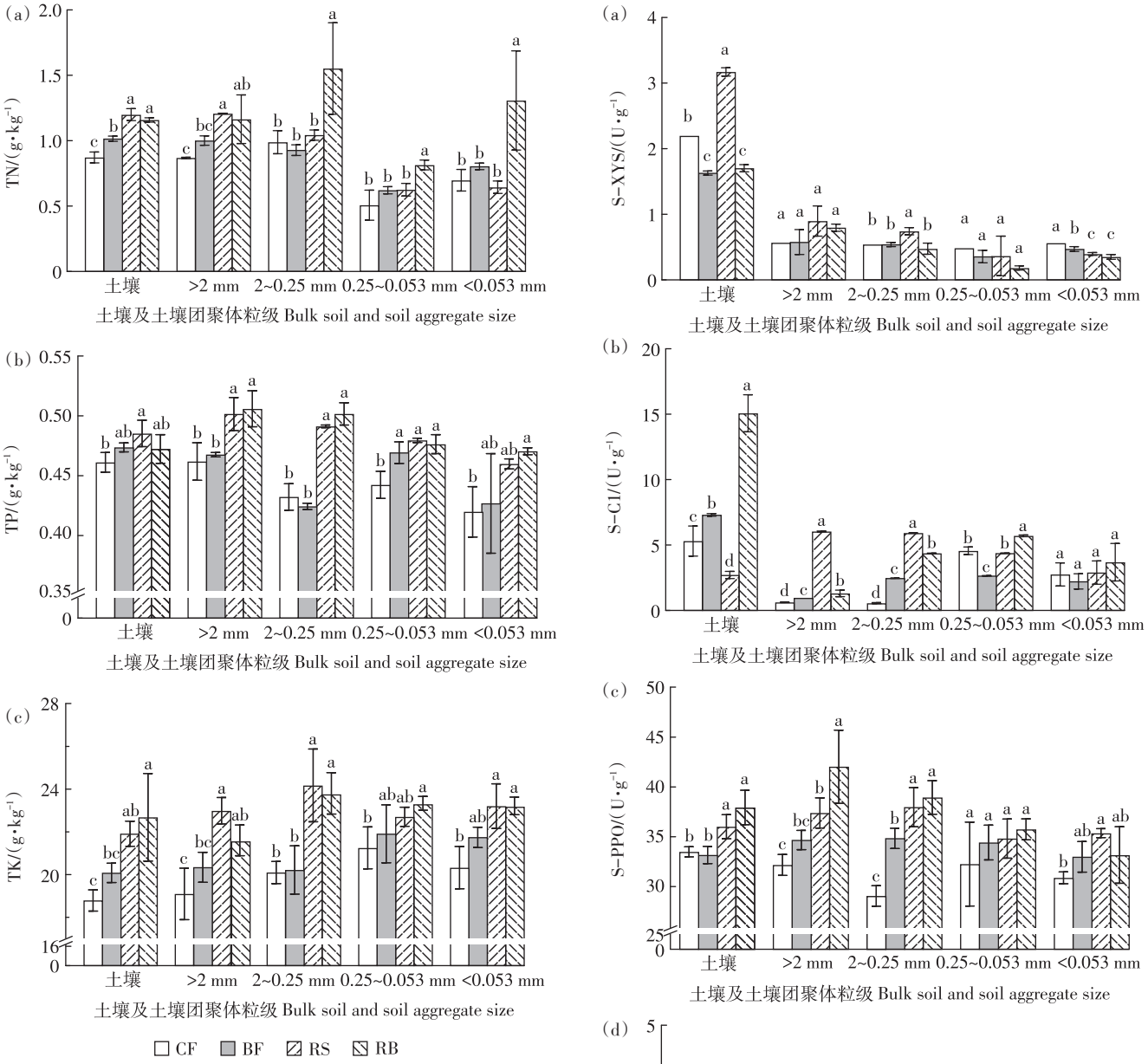


图3 土壤及团聚体中全量TN、TP、TK含量

Figure 3 TN, TP and TK in bulk soil and soil aggregate

VIP>1的主要因子(图8),结果表明造成土壤团聚体各粒级差异的主要因子为LFOC、S-PPO。造成处理间产生差异的主要因子为S-PPO、S-C1、TK、SOC、HFOC。

如图9所示,将土壤团聚体各粒级含量与各因子进行相关性分析发现,>2 mm粒级团聚体含量与SOC、POC、MAOC、HFOC、POC/SOC、TN、TP、TK、S-PPO呈显著正相关。2~0.25 mm粒级团聚体含量与SOC、POC、MAOC、HFOC、POC/SOC、HFOC/SOC、TP、S-C1、S-PPO、S-POD呈显著正相关。<0.053 mm粒级含量与S-XYS显著正相关。

图4 土壤及团聚体中土壤酶活性

Figure 4 Soil enzyme activities in bulk soil and soil aggregate

土壤惰性有机碳(MAOC、HFOC)可直接驱动土壤大团聚体(>0.25 mm)形成。土壤养分对促进>2

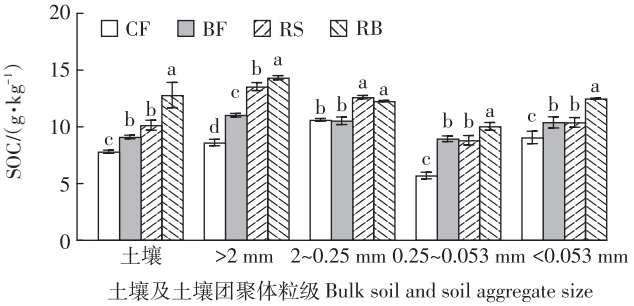


图5 土壤及团聚体中SOC

Figure 5 SOC in bulk soil and soil aggregate

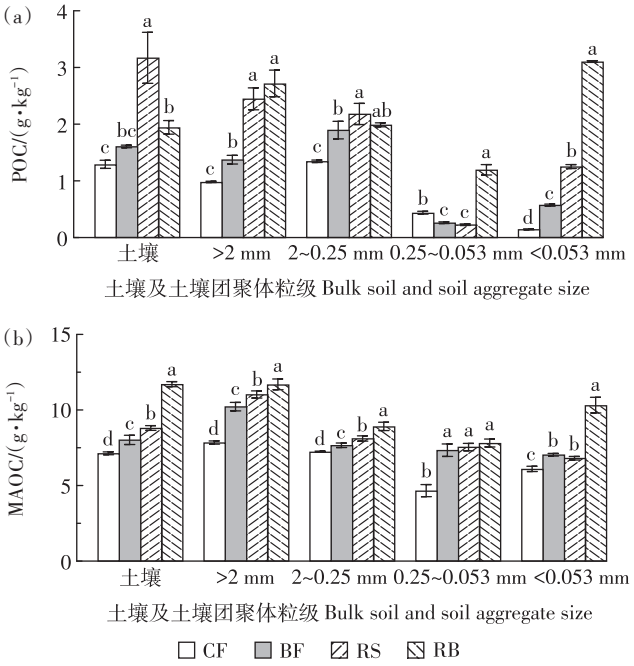


图6 土壤及团聚体中POC和MAOC

Figure 6 POC and MAOC in bulk soil and soil aggregate

mm团聚体形成具有显著的直接作用，土壤酶可通过影响土壤养分和惰性有机碳间接促进>2 mm团聚体形成（图10a）；在2~0.25 mm团聚体形成过程中（图10b），土壤酶也表现出显著的间接作用。土壤全量养分、土壤酶及土壤惰性有机碳均对土壤团聚体稳定性的提高具有直接促进作用。此外，土壤活性有机碳产生的间接作用也是驱动土壤团聚体稳定性提高的重要途径（图10c）。

3 讨论

3.1 秸秆及其炭化还田对土壤团聚体分布及稳定性的影响

本研究表明，秸秆及其炭化还田均可提高土壤大团聚体含量，并提高团聚体稳定性，这与前人研究结果一致[9-10,13-15]。秸秆因富含有机质及多种养分，在还

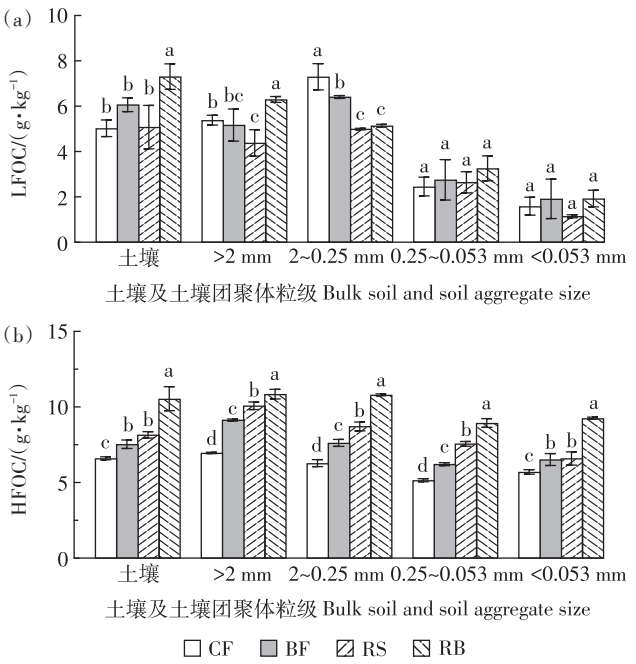


图7 土壤及团聚体中LFOC和HFOC

Figure 7 LFOC and HFOC in bulk soil and soil aggregate

田后可为土壤微生物提供更多食物来源，提高微生物活性，促进微生物代谢产生多糖等黏性物质，利于团聚体形成；其次，秸秆分解产生的有机物在微生物作用下形成腐殖质，其作为重要胶结物质可促进团聚体形成；此外，秸秆分解产物可与土壤矿物颗粒形成有机-无机复合体，进一步提高土壤团聚体稳定性[24-26]。秸秆炭化还田（RB、BF）促进土壤团聚体形成的主要途径：（1）生物炭可增加土壤有机质，促进土壤团聚体形成；（2）生物炭作为桥梁，促进土壤颗粒与矿物、有机碳和微生物互作，形成大团聚体；（3）生物炭的多微孔结构，为土壤微生物生长和繁殖提供庇护所，促进微生物分泌形成更多“黏合剂”，进而形成大团聚体。同时，生物炭的稳定结构，使其能够长期存留于土壤中，提高土壤团聚体稳定性[16,26-27]。

本研究通过FTIR测定，进一步揭示了土壤及各粒级团聚体的化学特征。其中，RS、RB处理均可明显观察到大团聚体中分子间缔合—OH、—CH_3和C—O—C吸收峰强度的提高，BF处理也表现出增加趋势。因分子间缔合—OH、—CH_3和C—O—C存在于有机物质表面[20,28]，而秸秆、生物炭及炭基肥输入均可提高土壤有机物及多糖类物质等[11,29-30]，从而导致—OH、—CH_3和C—O—C吸收峰强度提高。同时，这些官能团因其性质较为活跃，可与土壤矿物相互作用形成稳定的土壤团聚体，进而促进SOC固存[20]。

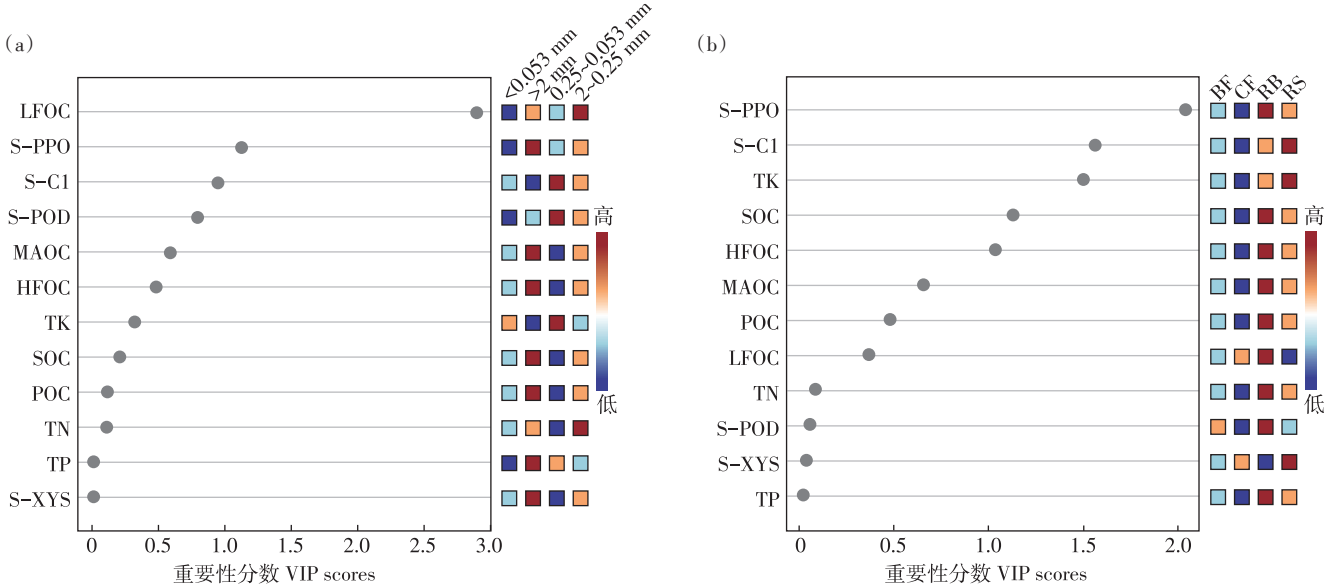
表1 土壤及团聚体中各组分有机碳占比

Table 1 Proportion of organic carbon fractions to organic carbon in bulk soil and soil aggregate

土壤及土壤团聚体粒级 Bulk soil and soil aggregate size	处理 Treatment	(POC/SOC)/%	(MAOC/SOC)/%	(LFOC/SOC)/%	(HFOC/SOC)/%
土壤 Bulk soil	CF	16.53±0.91b	91.32±1.17a	64.35±4.67a	84.51±1.30a
	BF	17.64±0.27b	88.09±3.35ab	66.58±3.32a	82.65±3.07a
	RS	31.25±4.43a	86.79±1.50b	50.05±9.44b	80.34±2.13a
	RB	15.19±0.93b	91.44±1.28a	57.06±4.41ab	82.35±6.21a
>2 mm	CF	11.40±0.15b	91.08±1.25a	62.46±2.53a	80.77±0.47a
	BF	12.46±0.70b	92.65±2.52a	46.83±6.41b	82.79±0.64a
	RS	18.06±1.43a	81.37±1.75b	32.34±4.30c	74.38±1.89b
	RB	18.97±1.63a	81.56±2.48b	43.95±0.91b	75.68±2.23b
2~0.25 mm	CF	12.69±0.20b	68.18±0.34b	68.75±5.44a	59.19±2.15c
	BF	18.00±1.48a	72.80±1.44a	60.84±0.60b	72.35±2.19b
	RS	17.29±1.48a	64.34±1.36c	39.60±0.26c	69.07±2.31b
	RB	16.21±0.28a	72.63±2.23a	41.87±0.52c	87.97±0.53a
0.25~0.053 mm	CF	7.67±0.44b	81.58±6.98a	42.97±7.17a	90.09±1.70a
	BF	2.93±0.17c	81.98±4.63a	30.75±9.93a	69.38±1.08c
	RS	2.59±0.16c	85.58±2.77a	29.99±5.32a	85.72±1.75b
	RB	11.92±0.91a	77.76±2.58a	32.44±5.47a	88.99±2.86ab
<0.053 mm	CF	1.62±0.10d	67.28±1.90b	17.53±4.39a	62.92±1.61b
	BF	5.51±0.18c	67.64±0.83b	18.42±8.33a	62.68±3.82b
	RS	12.04±0.33b	65.53±1.15b	11.02±0.61a	63.37±4.22b
	RB	24.85±0.13a	82.59±4.13a	15.44±2.94a	74.08±0.52a

注:表中不同小写字母表示处理间差异显著(P<0.05)。

Note: Different lowercase letters in the table indicate significant differences among treatments (P<0.05).



横轴表示投影中的变量重要性(VIP)。右侧的彩色框表示所研究的每组中对应因子的相对含量。

Horizontal axis represents the variable importance in projection (VIP). The colored boxes on the right indicate the relative content of the corresponding factors in each group under study.

图8 偏最小二乘法判别分析

Figure 8 Partial least squares discriminant analysis

3.2 秸秆及其炭化还田对土壤团聚体固碳、供养能力的影响

秸秆及其炭化还田可提高土壤氮、磷、钾含量,在团聚体中也表现出一定的促进作用。秸秆富含营养物质和有机质,微生物分解作用可提高土壤养分[11]。同时,秸秆腐解产物可为土壤养分提供更多吸附位

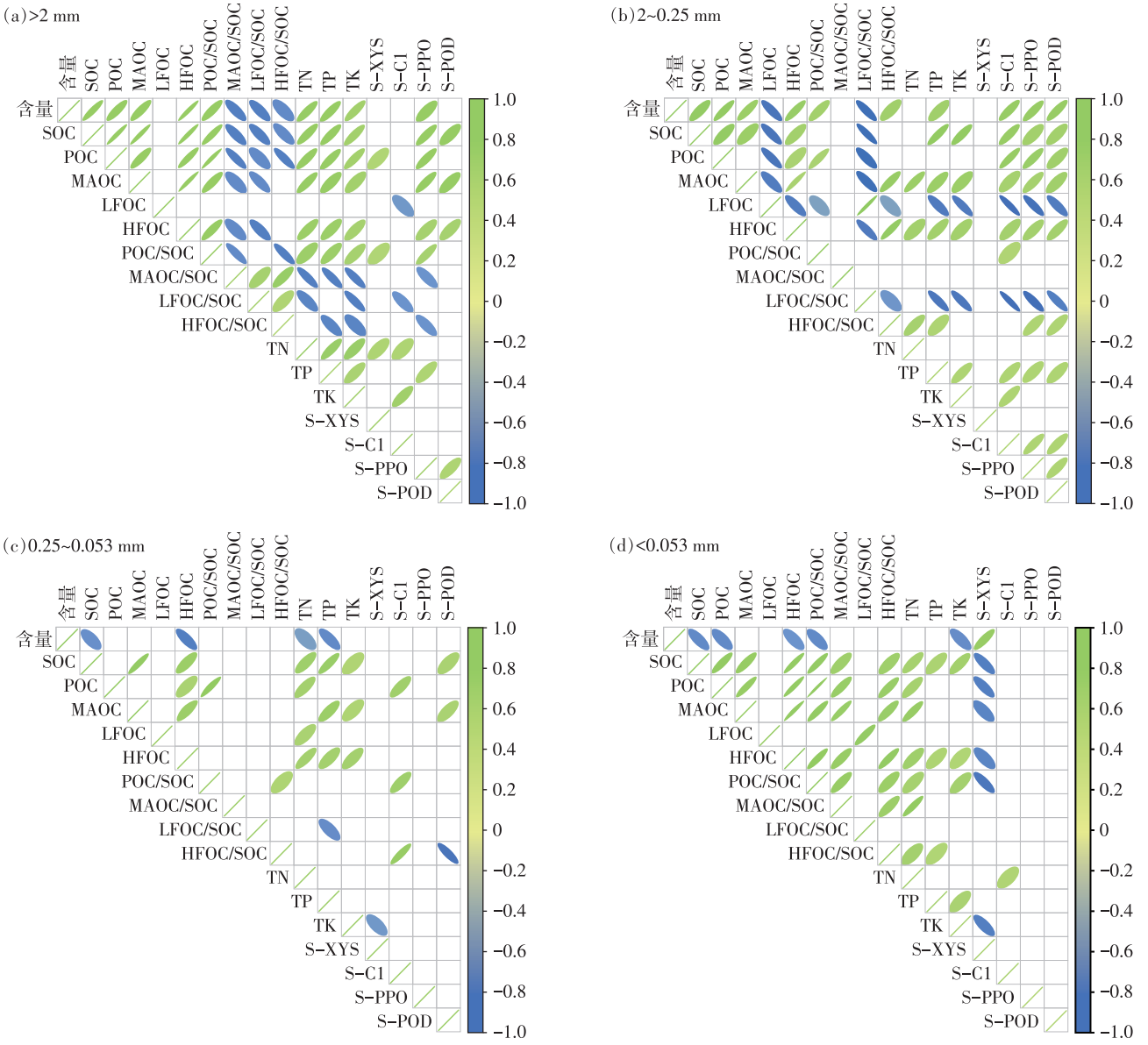


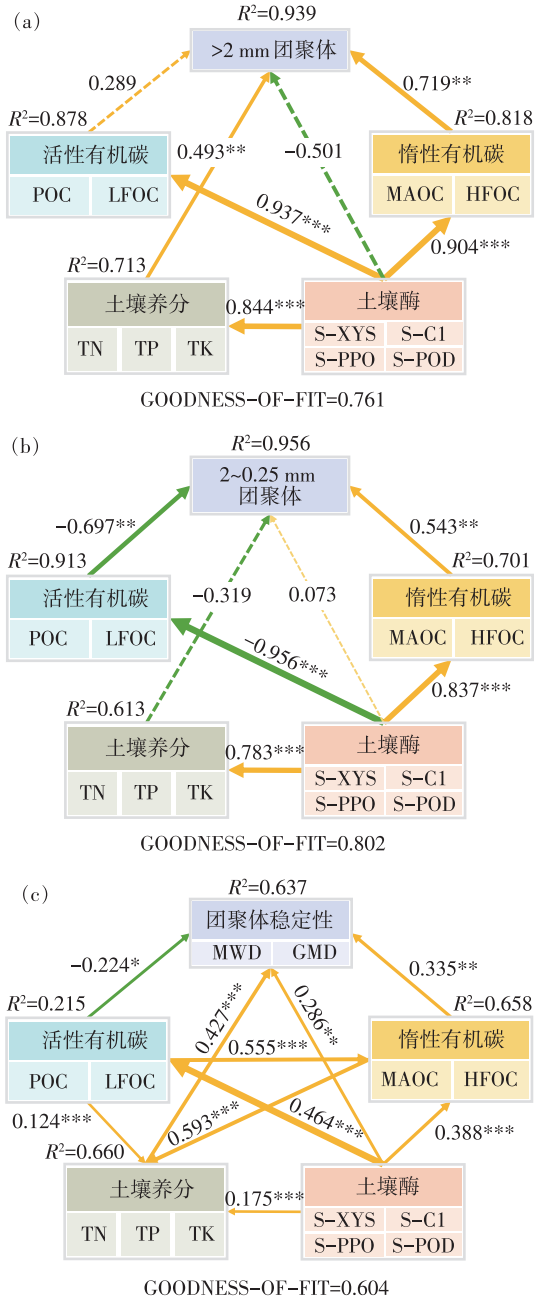
图9 相关分析

Figure 9 Correlation analysis

点，减少养分淋失[12]，进而提高土壤养分含量。而秸秆炭化还田（RB、BF），因生物炭具有比表面积大、吸附力强等独特结构及理化特性，可吸持土壤养分，减少养分淋失，从而增加土壤养分，为作物生长提供适时养分供应[16]。同时，生物炭的多孔结构及其所含养分可为微生物提供营养物质及适宜的“栖息地”，促进土壤养分转化，提高土壤养分含量[31]。在不同粒级团聚体中，养分多集中于大团聚体，这与何家帅等[32]的研究结果一致，表明大团聚体是土壤养分的主要存储场所。

秸秆及其炭化还田的增养作用，更利于激发土壤微生物，提高碳转化等相关酶活性。本研究表明，RS处理可提高土壤和2~0.25 mm团聚体的S-XYS活性，这与秸秆富含木质素等有机物质，可增加S-XYS底物有关[33]。而RS处理可提高土壤和团聚体中S-PPO活性，这可能与秸秆能提高土壤有机质含量有关[34]。RB、BF处理可显著提高土壤及大团聚体中S-C1、S-POD活性，这可能是由于生物炭可激发土壤微生物活性，且充当酶的电子穿梭体，进而影响了土壤酶活性[35-36]。但RB、BF处理降低了S-XYS活性，这可能与生物炭对酶活性位点的掩蔽作用有关[37]。

碳转化相关酶活性变化进一步影响SOC及其组分变化。本研究结果表明，秸秆及其炭化还田可提高土壤及团聚体中SOC，且RB处理更显著，这是由生物炭富碳特性决定的[6]。此外，各处理在大团聚体中含



黄色和绿色箭头分别表示正相关和负相关。虚线表示效果不显著。箭头上的数字表示标准化路径系数。R^2表示解释的方差比例。通过拟合优度统计量评估模型。*、**和***分别表示P<0.1、P<0.05和P<0.01的显著性水平。

Yellow and green arrows indicate positive and negative effects, respectively. The dashed lines indicate that the effect is not significant. The numbers on the arrows represent standardized path coefficients. R^2 indicates the proportion of variance explained. Models were assessed by goodness of fit statistics. *, ** and *** indicate significance at the P<0.1, P<0.05 and P<0.01 levels, respectively.

图10 偏最小二乘路径建模分析

Figure 10 Partial least squares path modeling

有更高的SOC，这与土壤团聚体对SOC的保护机制有关[7-8]，而RB处理在团聚体中的SOC多高于RS处理，其原因在于生物炭改变各粒级团聚体的孔隙结构，进而潜在增强了SOC固存[38]。秸秆及其炭化还田亦可提高土壤POC，且表现为RS处理优于RB处理。相比于生物炭的稳定结构，秸秆更易被微生物分解，秸秆还田后不仅直接增加POC形成的植物源，且间接增加POC形成的微生物源[11,39]。而RB、BF处理中，因生物炭可与土壤颗粒结合形成稳定的有机-无机复合体，通过调控土壤碳循环，促进有机质积累与转化进而形成POC[40]。LFOC是土壤中易腐解的活性有机碳[41]，RB处理可显著提高LFOC，因为生物炭密度较轻，从其表面脱落的炭“碎片”会存于轻组分中，这可能是LFOC提高的重要因素[25,27]。此外，生物炭也可以保护部分LFOC免受微生物的分解[15]。MAOC、HFOC作为稳定的SOC组分，一般以有机矿物复合体形式存在[15,39]，秸秆及其炭化还田可提高土壤及大团聚体中MAOC、HFOC，促进土壤碳库稳定性提升。RS处理在提高土壤有机质和有机-无机复合体、激发土壤微生物、改良土壤结构等方面的作用[9,32,42]，有效促进了MAOC、HFOC的增加。秸秆炭化还田（RB、BF），由于生物炭具有高碳含量及化学稳定性，对有机碳具有保护作用，其多孔结构、较大比表面积和丰富含氧活性基团利于与土壤矿物互作，形成稳定的MAOC、HFOC[15,41,43]。而RB处理的HFOC、MAOC高于RS处理，这与生物炭自身的稳定结构有关，其含有的碳大部分为惰性碳，提高了稳定性[44]。

相关分析进一步表明，土壤大团聚体含量与其养分、SOC及其组分、碳转化相关酶呈显著正相关。S-PPO、S-C1、TK、SOC、HFOC是造成不同处理间差异的主要因子，而不同粒级团聚体的差异主要与LFOC、S-PPO有关。惰性有机碳（MAOC、HFOC）可直接驱动土壤大团聚体（>0.25 mm）形成，而对于>2 mm大团聚体，土壤酶具有显著间接促进作用，土壤养分则具有直接促进作用。土壤养分、土壤酶及惰性有机碳均可通过直接、间接路径提高土壤团聚体稳定性。长期秸秆及其炭化还田，可通过提升土壤养分水平、提高碳转化相关酶活性和SOC及其组分含量，有效促进大团聚体形成并增强团聚体稳定性，大团聚体作为土壤碳和养分存储的核心载体，在其形成过程中也会对SOC和养分提供一定保护，这种协同作用机制对改良土壤结构，促进土壤增养固碳培肥，持续提升土壤与作物生产力具有重要意义。

4 结论

（1）秸秆及其炭化还田可提高土壤大团聚体含量

和团聚体稳定性，且生物炭处理作用更显著。秸秆及其炭化还田可增强大团聚体分子间缔合—OH、—CH_3和C—O—C的吸收峰强度，促进土壤稳定性提升。

（2）秸秆及其炭化还田可提高土壤及团聚体SOC，增加活性和惰性有机碳含量，促进土壤固碳和碳库稳定性提升。其中，RS处理可显著提升土壤中POC，而RB处理对团聚体中POC的保护作用更显著，同时，RB处理可协同增加土壤LFOC、MAOC、HFOC，碳固存能力更强。此外，秸秆及其炭化还田可促进土壤养分和大团聚体中S-C1、S-PPO、S-POD酶活性提升，对提高土壤养分、促进碳周转具有积极作用。

（3）LFOC、S-PPO是造成团聚体不同粒级间差异的主要因子，而SOC、HFOC、S-PPO、S-C1、TK是不同处理间产生差异的主要因子。惰性有机碳（MAOC、HFOC）直接驱动土壤大团聚体形成，土壤养分、土壤酶及各组分有机碳通过直接和间接途径提升土壤团聚体稳定性。

参考文献：

[1]HARUN S N, HANAFIAH M M, NOOR N M. Rice straw utilisation for bioenergy production: a brief overview[J]. *Energies*, 2022, 15(15): 5542.

[2] GOODMAN B A. Utilization of waste straw and husks from rice production: a review[J]. *Journal of Bioresources and Bioproducts*, 2020, 5(3): 143-162.

[3] LIU E K, YAN C R, MEI X R, et al. Long-term effect of chemical fertilizer, straw, and manure on soil chemical and biological properties in northwest China[J]. *Geoderma*, 2010, 158(3/4): 173-180.

[4] 张明伟, 杨恒山, 郜继承, 等. 秸秆还田与浅埋滴灌对玉米耕层土壤水稳性团聚体及其碳含量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(5): 999-1008. ZHANG M W, YANG H S, TAI J C, et al. Effects of straw return and shallow drip irrigation on topsoil water-stable aggregates and carbon content in maize field[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41(5): 999-1008.

[5] GUO L J, ZHAO J. Effect of burning straw in rural areas on ecological environment quality[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2021, 14(14): 1357.

[6] 陈温福, 张伟明, 孟军. 生物炭与农业环境研究回顾与展望[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(5): 821-828. CHEN W F, ZHANG W M, MENG J. Biochar and agro-ecological environment: review and prospect[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(5): 821-828.

[7] 刘亚龙, 王萍, 汪景宽. 土壤团聚体的形成和稳定机制：研究进展与展望[J]. 土壤学报, 2023, 60(3): 627-643. LIU Y L, WANG P, WANG J K. Formation and stability mechanism of soil aggregates: progress and prospect[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2023, 60(3): 627-643.

[8] ZHENG H, WANG X, LUO X X, et al. Biochar-induced negative carbon mineralization priming effects in a coastal wetland soil: roles of soil aggregation and microbial modulation[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 610: 951-960.

[9] 孙云云, 窦金刚, 刘方明, 等. 秸秆还田方式对盐碱旱田土壤团聚体有机碳组分的影响[J]. 生态学杂志, 2025, 44(4): 1144-1151. SUN Y Y, DOU J G, LIU F M, et al. Effects of straw return methods on organic carbon fractions in soil aggregates of saline-alkaline dryland [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2025, 44(4): 1144-1151.

[10] 李天娇, 张乃于, 申文艳, 等. 长期施肥对黑土和棕壤团聚体稳定性的影响及驱动因素[J]. 中国农业科学, 2024, 57(19): 3835-3847. LI T J, ZHANG N Y, SHEN W Y, et al. Effects of long-term fertilization on soil aggregate stability and its driving factors in black soil and brown soil[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2024, 57(19): 3835-3847.

[11] SU Y, LÜ J L, YU M, et al. Long-term decomposed straw return positively affects the soil microbial community[J]. *Journal of Applied Microbiology*, 2020, 128(1): 138-150.

[12] 代文才, 高明, 兰木羚, 等. 不同作物秸秆在旱地和水田中的腐解特性及养分释放规律[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(2): 188-199. DAI W C, GAO M, LAN M L, et al. Nutrient release patterns and decomposition characteristics of different crop straws in drylands and paddy fields[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2017, 25(2): 188-199.

[13] 湛凯翔, 龙健, 李娟, 等. 施用有机物料对黄壤团聚体稳定性及有机碳含量的影响[J]. 土壤通报, 2024, 55(5): 1282-1291. ZHAN K X, LONG J, LI J, et al. Effects of applying organic materials on aggregate stability and organic carbon in yellow soil[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2024, 55(5): 1282-1291.

[14] 张琪, 刘彦波, 丁金鹏, 等. 炭基牛粪有机肥对盐渍化水稻土水稳性团聚体组成和有机碳分布的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2025, 42(5): 1237-1246. ZHANG Q, LIU Y B, DING J P, et al. Effects of carbon-based cow manure organic fertilizer on water-stable aggregate composition and organic carbon distribution in salinized paddy soil[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2025, 42(5): 1237-1246.

[15] SUN Q, MENG J, SARKAR B, et al. Long-term influence of maize stover and its derived biochar on soil structure and organo-mineral complexes in northeast China[J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2020, 27(22): 28374-28383.

[16] WU P, ATA-UL-KARIM S T, SINGH B P, et al. A scientometric review of biochar research in the past 20 years (1998—2018) [J]. *Biochar*, 2019, 1(1): 23-43.

[17] ELLIOTT E T. Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1986, 50(3): 627-633.

[18] MAZURAK A P. Effect of gaseous phase on water-stable synthetic aggregates[J]. *Soil Science*, 1950, 69(2): 135-148.

[19] VAN BAVEL C H M. Mean weight-diameter of soil aggregates as a statistical index of aggregation[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1950, 14(C): 20-23.

[20] 张明洋. 基于傅里叶红外光谱技术研究土壤中典型官能团/基团的分布特征[D]. 杨凌：西北农林科技大学, 2022: 31-38. ZHANG

M Y. Study on the distribution characteristics of typical functional groups / groups in soil based on Fourier infrared spectroscopy[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2022: 31-38.

[21] CAMBARDELLA C A, ELLIOTT E T. Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, 56(3): 777-783.

[22] 傅积平, 张敬森, 熊毅. 太湖地区水稻土复合胶体的特性[J]. 土壤学报, 1983, (2): 112-128+215. FU J P, ZHANG J S, XIONG Y. The properties of colloidal complexes of paddy soils in Taihu lake region[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1983, 20(2): 112-128.

[23] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 25-114. BAO S D. Soil and agro-chemistry analysis[M]. 3rd Edition. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 25-114.

[24] HUANG R, LAN M L, LIU J, et al. Soil aggregate and organic carbon distribution at dry land soil and paddy soil: the role of different straws returning[J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2017, 24(36): 27942-27952.

[25] LI F Q, QIU P F, SHEN B, et al. Soil aggregate size modifies the impacts of fertilization on microbial communities[J]. *Geoderma*, 2019, 343: 205-214.

[26] GU W Q, WANG Y N, SUN Y Y, et al. Assessing the formation and stability of paddy soil aggregate driven by organic carbon and Fe/Al oxides in rice straw cyclic utilization strategies: Insight from a six-year field trial[J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 951: 175607.

[27] GU W Q, ZHANG W M, XIU L Q, et al. Soil aggregate variation in two contrasting rice straw recycling systems for paddy soil amendment over two years[J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2023, 69(14): 3044-3059.

[28] THULLNER M, REGNIER P. Microbial controls on the biogeochemical dynamics in the subsurface[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2019, 85(1): 265-302.

[29] SUN Q, MENG J, LAN Y, et al. Long-term effects of biochar amendment on soil aggregate stability and biological binding agents in brown earth[J]. *CATENA*, 2021, 205: 105460.

[30] 石丽红, 李超, 唐海明, 等. 长期不同施肥措施对双季稻田土壤活性有机碳组分和水解酶活性的影响[J]. 应用生态学报, 2021, 32(3): 921-930. SHI L H, LI C, TANG H M, et al. Effects of long-term fertilizer management on soil labile organic carbon fractions and hydrolytic enzyme activity under a double-cropping rice system of southern China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(3): 921-930.

[31] SINGH H, NORTHUP B K, RICE C W, et al. Biochar applications influence soil physical and chemical properties, microbial diversity, and crop productivity: a meta-analysis[J]. *Biochar*, 2022, 4(1): 8.

[32] 何家帅, 李新美, 魏跃鹏, 等. 长期深耕秸秆还田配施生物炭对砂姜黑土团聚体及小麦-玉米产量的影响[J]. 农业工程学报, 2024, 40(7): 161-171. HE J S, LI X M, WEI Y P, et al. Effects of long-term deep tillage and straw return with biochar addition to lime concretion black soil on the aggregates and wheat-maize yield[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2024, 40(7): 161-171.

[33] NANMORI T, WATANABE T, SHINKE R, et al. Purification and properties of thermostable xylanase and beta-xylosidase produced by a newly isolated *Bacillus* stearothermophilus strain[J]. *Journal of Bacteriology*, 1990, 172(12): 6669-6672.

[34] 杨招弟, 蔡立群, 张仁陟, 等. 不同耕作方式对旱地土壤酶活性的影响[J]. 土壤通报, 2008, 39(3): 514-517. YANG Z D, CAI L Q, ZHANG R Z, et al. Soil enzymatic activities under different tillages practricess in dryland[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2008, 39(3): 514-517.

[35] PALANSOORIYA K N, WONG J T F, HASHIMOTO Y, et al. Response of microbial communities to biochar-amended soils: a critical review[J]. *Biochar*, 2019, 1(1): 3-22.

[36] GOROVTSOV A V, MINKINA T M, MANDZHIEVA S S, et al. The mechanisms of biochar interactions with microorganisms in soil[J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2020, 42(8): 2495-2518.

[37] JINDO K, SÁNCHEZ-MONEDERO M A, HERNÁNDEZ T, et al. Biochar influences the microbial community structure during manure composting with agricultural wastes[J]. *Science of the Total Environment*, 2012, 416: 476-481.

[38] LIU J J, LU S G. Amendment of different biochars changed pore characteristics and permeability of Ultisol macroaggregates identified by X-ray computed tomography (CT) [J]. *Geoderma*, 2023, 434: 116470.

[39] 张睿博, 汪金松, 王全成, 等. 土壤颗粒态有机碳与矿物结合态有机碳对气候变暖响应的研究进展[J]. 地理科学进展, 2023, 42(12): 2471-2484. ZHANG R B, WANG J S, WANG Q C, et al. Responses of soil particulate and mineral-associated organic carbon to climate warming: a review[J]. *Progress in Geography*, 2023, 42(12): 2471-2484.

[40] 高梦雨, 江彤, 韩晓日, 等. 施用炭基肥及生物炭对棕壤有机碳组分的影响[J]. 中国农业科学, 2018, 51(11): 2126-2135. GAO M Y, JIANG T, HAN X R, et al. Effects of applying biochar-based fertilizer and biochar on organic carbon fractions and contents of brown soil[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(11): 2126-2135.

[41] WHALEN J K, BOTTOMLEY P J, MYROLD D D. Carbon and nitrogen mineralization from light- and heavy-fraction additions to soil[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32(10): 1345-1352.

[42] GUAN S, LIU S J, LIU R Y, et al. Soil organic carbon associated with aggregate-size and density fractions in a Mollisol amended with charred and uncharred maize straw[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2019, 18(7): 1496-1507.

[43] 冯晓娟, 戴国华, 刘婷, 等. 从生物地球化学视角理解土壤碳封存的机制和潜在途径[J]. 中国科学: 地球科学, 2024, 54(11): 3421-3432. FENG X J, DAI G H, LIU T, et al. Understanding the mechanisms and potential pathways of soil carbon sequestration from the biogeochemistry perspective[J]. *Scientia Sinica* (*Terrae*), 2024, 54(11): 3421-3432.

[44] ZHANG J J, CAI H G, ZHANG C, et al. First characterization of humic-like substances isolated from maize straw biochar[J]. *Fresenius Environmental Bulletin*, 2015, 24: 1815-1821.

(责任编辑: 潘淑君)