

稻秆及稻秆生物炭添加对稻田红壤有机碳组分及 CH_4 和 CO_2 累积排放量的影响

廖添怀, 李欢, 王艳玲

引用本文:

廖添怀, 李欢, 王艳玲. 稻秆及稻秆生物炭添加对稻田红壤有机碳组分及 CH_4 和 CO_2 累积排放量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(7): 1598–1609.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-1381>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

添加生物炭对海南燥红壤 N_2O 和 CO_2 排放的影响

刘丽君, 朱启林, 李凯凯, 李淼, 孟磊, 伍延正, 汤水荣, 何秋香

农业环境科学学报. 2021, 40(9): 2049–2056 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0187>

巢湖圩区再生稻田甲烷及氧化亚氮的排放规律研究

王天宇, 樊迪, 宋开付, 张广斌, 徐华, 马静

农业环境科学学报. 2021, 40(8): 1829–1838 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0181>

花生壳生物炭对潮土和红壤理化性质和温室气体排放的影响

方明, 任天志, 赖欣, 王知文, 宋婷婷, 李洁, 张贵龙

农业环境科学学报. 2018, 37(6): 1300–1310 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1700>

添加不同类型秸秆对土壤 CO_2 排放和化学性质的影响

李欢, 赵平, 陈林康, 李连华, 向蕊, 龙光强

农业环境科学学报. 2022, 41(4): 909–918 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-1007>

有机无机肥配施对苹果园温室气体排放的影响

马艳婷, 赵志远, 冯天宇, SOMPOUVISSETThongsouk, 孔旭, 翟丙年, 赵政阳

农业环境科学学报. 2021, 40(9): 2039–2048 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1477>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

廖添怀, 李欢, 王艳玲. 稻秆及稻秆生物炭添加对稻田红壤有机碳组分及CH₄和CO₂累积排放量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(7): 1598–1609.

LIAO T H, LI H, WANG Y L. Effects of addition of rice straw and rice straw biochar on soil organic carbon fractions and cumulative emissions of CH₄ and CO₂ in reddish paddy soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41(7): 1598–1609.



开放科学 OSID

稻秆及稻秆生物炭添加对稻田红壤有机碳组分及CH₄和CO₂累积排放量的影响

廖添怀, 李欢, 王艳玲*

(南京信息工程大学应用气象学院, 南京 210044)

摘要:为明确稻秆生物炭添加对稻田红壤有机碳组分及CH₄和CO₂累积排放量的影响过程与机制,本研究以稻田红壤为对象,通过室内培养试验,按土壤质量的1%等碳添加量设置对照(CK)、稻秆(RS)及300、400℃和500℃下制备的稻秆生物炭(RSB300、RSB400、RSB500)5个处理,对比分析了稻秆及稻秆生物炭添加0、30 d与120 d时,稻田红壤中可溶性有机碳(DOC)、总有机碳(TOC)、游离态粗颗粒有机碳(fcPOC)、游离态细颗粒有机碳(ffPOC)、闭蓄态颗粒有机碳(oPOC)、游离态矿物结合态有机碳(fMOC)及闭蓄态矿物结合态有机碳(oMOC)的变化差异,并探讨了稻田红壤CH₄和CO₂累积排放量与各有机碳组分含量的相关关系。结果表明:稻秆生物炭添加后稻田红壤中DOC、TOC、fcPOC、ffPOC、oPOC和fMOC含量均显著增加;其中,oPOC与oMOC含量随着培养时间的增加而显著增加,但fcPOC与fMOC含量则显著降低($P<0.05$)。与CK处理相比,RS处理的稻田红壤中CH₄和CO₂的累积排放量均显著且持续增加;RSB各处理的稻田红壤中CO₂的累积排放量显著降低;只有RSB300和RSB400处理的稻田红壤中CH₄的累积排放量显著增加,且在培养120 d时分别增加了188.5%和32.7%($P<0.05$)。相关性分析表明,添加稻秆及稻秆生物炭的稻田红壤中CH₄和CO₂累积排放量虽与DOC、ffPOC和fcPOC含量均呈极显著正相关关系,但其中DOC和fcPOC含量起主导作用($P<0.01$)。研究表明,添加稻秆生物炭可以有效提高稻田红壤中各有机碳组分的含量与稳定性,且500℃热解制备的稻秆生物炭添加对稻田红壤中CH₄、CO₂累积排放量抑制效果最好。

关键词:稻秆生物炭;稻田红壤;颗粒态有机碳;矿物结合态有机碳;可溶性有机碳;温室气体

中图分类号:S153.6 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2022)07-1598-12 **doi:**10.11654/jaes.2021-1381

Effects of addition of rice straw and rice straw biochar on soil organic carbon fractions and cumulative emissions of CH₄ and CO₂ in reddish paddy soil

LIAO Tianhuai, LI Huan, WANG Yanling*

(College of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Sciences and Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: Clarifying the influence of rice straw biochar addition on soil organic carbon fractions and cumulative emissions of CH₄ and CO₂ and the associated underlying mechanisms could provide scientific basis for carbon sequestration and mitigation of CH₄ and CO₂ emissions in reddish paddy soil. In this study, a reddish paddy soil was used in an indoor incubation experiment with five soil amendment treatments: control (CK), rice straw (RS), and rice straw biochar prepared at 300, 400 °C, and 500 °C (RSB300, RSB400, RSB500, respectively). These soil amendments were applied at the rate equivalent to 1% carbon addition to soil, based on soil weight. Differences in soil dissolved organic carbon (DOC), total organic carbon (TOC), free coarse particulate organic carbon (fcPOC), free fine particulate organic carbon (ffPOC), occluded particulate organic carbon (oPOC), free mineral-associated organic carbon (fMOC), and occluded mineral-associated

收稿日期:2021-11-29 录用日期:2022-02-28

作者简介:廖添怀(1997—),男,四川德阳人,硕士研究生,从事土壤碳循环研究。E-mail:liaotianhuai@126.com

*通信作者:王艳玲 E-mail:ylwang@nuist.edu.cn

基金项目:国家自然科学基金项目(42077087)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(42077087)

organic carbon (oMOC) were analyzed after 0, 30 d, and 120 d of incubation. Correlations between cumulative emissions of CH₄ and CO₂ and various soil organic carbon fractions were also discussed. The results showed that DOC, TOC, fCPOC, fFPOC, oPOC, and fMOC contents were significantly increased in reddish paddy soil after rice straw biochar addition. With the increase in incubation time, oPOC and oMOC contents significantly increased, but fCPOC and fMOC contents significantly decreased. Compared with the CK treatment group, cumulative emissions of CH₄ and CO₂ in reddish paddy soil in the RS treatment group significantly and continuously increased. However, cumulative emissions of CO₂ in reddish paddy soil in the RSB500 treatment group significantly decreased. In contrast, it increased in RSB300 and RSB400 treatment groups, with cumulative emission of CH₄ in these treatment groups after 120 d of incubation increasing by 188.5% and 32.7%, respectively. Correlation analysis showed that cumulative emissions of CH₄ and CO₂ were significantly positively correlated with DOC, fFPOC, and fCPOC contents in reddish paddy soil after RS and RSB additions, but were mainly influenced by DOC and fCPOC ($P < 0.01$). Therefore, the addition of rice straw biochar can effectively improve the quantity and stability of soil organic carbon fractions in reddish paddy soil. Addition of rice straw biochar with pyrolysis at 500 °C exhibited the most remarkable inhibitory effect on cumulative emissions of CH₄ and CO₂ in this soil.

Keywords: rice straw biochar; reddish paddy soil; particulate organic carbon; mineral-associated organic carbon; dissolved organic carbon; greenhouse gases

生物炭(Biochar)因具有丰富的表面官能团、发达的孔隙结构和巨大的比表面积等特性,而被广泛用于土壤改良^[1]、污染物降解^[2]、土壤固碳减排^[3]等领域。有研究发现,添加生物炭可以显著降低土壤微生物活性、抑制土壤有机碳周转、增加土壤有机碳储量^[4-6]。制备过程中的热解温度越高,生物炭的比表面积与稳定性就越高,表面含氧官能团数量就越少^[7],并且生物炭的pH值也将随着热解温度升高而升高^[7]。有研究发现,200~400 °C的热解温度下秸秆中纤维素、半纤维素及木质素发生热分解,而在500 °C的热解温度下秸秆进入碳化过程,秸秆炭的芳香度与稳定性提高^[8]。不同热解温度制备的生物炭理化性质的改变将显著影响其环境功能的表达,其施用到土壤后,将对土壤有机碳库的组成、稳定性及土壤性质产生不同的影响^[9]。

土壤有机碳库是地球系统碳循环中重要的有机碳库,有效调控土壤有机碳库中颗粒态有机碳(POC)与矿物结合态有机碳(MOC)的形成与损失将有利于土壤固碳及缓解温室效应^[10]。POC是土壤有机碳库中较为活跃的组分,是评价土壤有机碳库动态变化的重要指标^[11]。其中,游离态颗粒有机碳存在于微团聚体外,主要来源于动植物残体,在土壤中被分解;而闭蓄态颗粒有机碳则封存于微团聚体内部,受微团聚体的物理保护且稳定性相对较高。POC因其理化性质及其在土壤中空间位置的不同而具有不同的有机碳储存与保护能力,是土壤有机碳库中较易调控的有机碳组分^[12-13]。MOC是通过化学键合作用与土壤矿物紧密结合、不易被分解、稳定性高的有机碳组分^[14-15],根据其在团聚体的内外空间位置,可将其分

为游离态和闭蓄态矿物结合态有机碳。有研究发现生物炭还田能显著提高稻田土壤中POC含量^[16-18],且提升效果显著优于投入等量碳或等量氮、磷、钾养分^[19],但对MOC的影响仍不明确。稻田是重要的CH₄和CO₂人为排放源,有研究证实施用稻秆生物炭可以显著抑制稻田CH₄的排放,但对CO₂的累积排放量则无显著影响^[20-21];也有研究发现稻秆生物炭添加后的稻田CO₂累积排放量显著提高了20.7%,而CH₄的累积排放量却无显著变化^[22-23]。可见,稻秆生物炭还田虽然可以有效干预稻田CH₄及CO₂的排放,但结果仍存在争议。因此,稻秆生物炭还田对稻田土壤有机碳库组成及CH₄、CO₂等温室气体排放的影响过程与机制仍需深入探讨。

此外,土壤酸碱性(pH)与氧化还原电位(Eh)也是影响稻秆生物炭发挥固碳减排功效的重要因子^[24-25]。土壤呈中性(pH=6.5~7.5)、Eh较低(低于-150 mV)且含有充足的可溶性有机碳(DOC)是稻田CH₄排放的必要条件^[26],而稳定性低的土壤有机碳含量的增加对CO₂排放也具有促进作用^[27]。有研究证实生物炭的投入显著改变了土壤的pH和Eh值,进而影响土壤的碳库组成及温室气体排放^[28]。不同热解温度制备的生物炭pH差异明显^[7],其DOC含量变化也较大^[29]。可见,生物炭的热解温度也是决定其对土壤有机碳库组成及CH₄和CO₂排放影响的重要因子。因此,本文以江西典型的稻田红壤为研究对象,通过120 d的培养实验,分析了等碳量添加稻秆及300、400、500 °C下热解制备的稻秆生物炭0、30 d与120 d后,稻田红壤中DOC、POC、MOC含量及CH₄和CO₂累积排放量的动态变化及差异,探讨了稻田红壤中各

有机碳组分含量与 CH_4 、 CO_2 累积排放量间的相关关系。研究结果可以为稻秆生物炭的还田利用、稻田红壤有机碳库管理及温室气体减排提供科学依据与数据参考。

1 材料与方法

1.1 样品采集与制备

供试稻田红壤样品采自江西省鹰潭市余江县刘家站垦殖三分场的孙家小流域($28^{\circ}13.7' \sim 28^{\circ}14.1' \text{N}$, $116^{\circ}54.2' \sim 116^{\circ}54.5' \text{E}$)。稻田是该小流域内主要利用方式之一,且以种植双季稻为主,早稻生育期一般为4月上旬至7月中旬,晚稻生育期一般为7月中旬至11月中旬,冬季闲田。经调查,当地农民集中在4—7月水稻生长季进行施肥管理,主要施用复合肥(N 、 P_2O_5 、 K_2O 的比例为15:15:15),施肥量为 $1.5 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,后根据作物生长发育需求追施尿素(含氮量46%) $0.5 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和钾肥(含 K_2O 量60%) $0.075 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ [30]。成土母质主要为第四纪红黏土。在该小流域内选择一处地势平坦的水稻田块,按“S”形采集水耕表层(0~20 cm) 10~15个样点的土壤样品,混合均匀后,带回室内风干,挑出肉眼可见的石砾及动植物残体后,磨细过2 mm筛,保存备用。供试土壤的总碳(TC)含量为 $10.8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,总氮(TN)含量为 $1.4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,碳氮比(C/N)为7.7,pH为5.19,Eh为104 mV。

1.2 培养实验设计

称取4份过2 mm筛的风干土壤样品100.0 g置于650 mL圆柱形培养瓶底部,以土样质量的1%为碳投入量,分别加入等碳量的过60目筛的烘干稻秆(RS)及300、400、500 $^{\circ}\text{C}$ 下制备的生物炭(RSB300、RSB400、RSB500),与土壤样品混合均匀后,采用称质量的方法将土壤含水量调至田间最大持水量的

60%,塞紧塞子后放于(25 ± 1) $^{\circ}\text{C}$ 恒温培养箱中预培养3 d,用喷壶向培养瓶中加入100 mL去离子水使土壤完全淹水,继续密封培养。实验同时设置对照处理(CK),每个处理重复9次。分别在培养的第1、3、5、7、14、21、28、……(此后每隔7 d直至第120天)天上午9:00—10:00间取出培养箱中用于第120天采样的培养瓶,打开瓶塞气孔后立刻接入LGR(UGGA,美国)通气管,测定培养瓶内的 CO_2 和 CH_4 浓度,测定结束后打开瓶塞,让培养瓶在空气中平衡20 min后塞紧瓶塞并关闭瓶塞气孔,放入培养箱中继续培养。在培养的第0、30天与120天时采集培养瓶内上覆水测定DOC的含量,同时采集土壤样品进行土壤pH、Eh、总有机碳(TOC)及各有机碳组分的测定。培养实验所用的稻秆生物炭购买于立泽环保科技有限公司,原料为产自镇江的籼稻秸秆。原料粉碎后投入炭化炉,分别缓慢升温至300、400 $^{\circ}\text{C}$ 和500 $^{\circ}\text{C}$,在少氧条件下裂解炭化2 h,经冷却器冷却至25 $^{\circ}\text{C}$ 后即分别得到RSB300、RSB400和RSB500。

1.3 土壤有机碳分组

土壤有机碳分组流程图见图1,具体操作步骤为:称取20.00 g过2 mm筛的风干土壤样品放入接有收集底盘的0.25 mm筛的筛面上,加入去离子水,以水淹过顶层筛面土壤样品1 cm为标准,浸润10 min后,加入30颗直径为4 mm的玻璃球,180 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 密封振荡5 min后,用去离子水冲洗筛子中的土壤样品至水流澄清,再将筛面上的土壤样品用去离子水冲洗到已知质量的铝盒中,放入60 $^{\circ}\text{C}$ 烘箱中烘干至恒质量后称质量,即得到0.25~2 mm游离态粗颗粒有机碳(fcPOC)。将过0.25 mm筛的土壤样品冲洗过0.053 mm筛至水流清澈且不含细土颗粒,分别将留在筛上的土壤颗粒和过筛部分转移至铝盒后烘干称质量,得

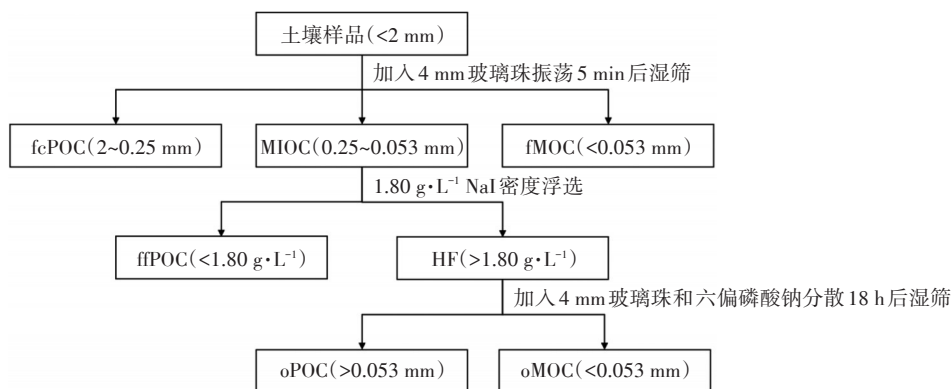


图1 土壤有机碳分组流程图

Figure 1 Flow chart of soil organic carbon fractionation procedure

到0.25~0.053 mm微团聚体有机碳(MIOC)及<0.053 mm游离态矿物结合态有机碳(fMOC)。再称取5.00 g MIOC加入50 mL离心管中,加入30 mL相对密度为1.80 g·cm⁻³碘化钠(NaI)溶液,在平行式往复振荡机上180 r·min⁻¹振荡30 min后,静置20 min并3 500 r·min⁻¹离心30 min,将离心管中上层液体过0.45 μm滤膜,并用去离子水反复冲洗滤纸直至无NaI残留,将留在滤纸上轻组组分(LF)置于60 ℃烘箱内烘48 h至恒质量,即得到游离态细颗粒有机碳(ffPOC);再将残留在离心管中的重组组分(HF)用去离子水清洗2~3次后,加入20颗直径为4 mm的玻璃珠和30 mL 5.0 g·L⁻¹六偏磷酸钠溶液,放在平行式往复振荡器上240 r·min⁻¹振荡18 h后,用细水流冲洗样品过0.053 mm筛至水流清澈且不含细土颗粒,将留在筛上的土壤颗粒和过筛部分烘干,分别得到微团聚体内部的闭蓄态颗粒态有机碳(oPOC)和微团聚体内部的闭蓄态矿物结合态有机碳(oMOC)。

1.4 土壤基本理化性质测定

土壤pH、Eh采用电位法测定,即用1.0 mol·L⁻¹ KCl溶液进行浸泡,液土比为2.5:1;稻秆生物炭pH采用电位法测定,用去离子水进行浸泡,液炭比为25:1;上覆水中的DOC含量采用TOC分析仪(TOC-L CPH CN 200,日本岛津)测定;土壤总碳、各组分土壤有机碳、稻秆生物炭总碳(TC)、总氮(TN)使用碳氮元素分析仪(Vario EL cube, Elementar, 德国)测定。

1.5 结果计算

(1)某一组分有机碳所占比例=组分有机碳含量(g·kg⁻¹)×该组分有机碳的质量百分比(%) / 各组分有机碳量的加和(g·kg⁻¹)×100%

(2)土壤CO₂和CH₄排放量的计算公式为:

$$F = \frac{(P - P_0) \times V \times M}{V_0 \times m \times 1\,000} \quad (1)$$

式中:F为CO₂或CH₄的排放量,以CO₂和CH₄中C的质量表示,mg·kg⁻¹;P为LGR测得培养瓶内CO₂或CH₄的浓度,mmol·L⁻¹;P₀为测定环境中空气中CO₂或CH₄

的浓度,mmol·L⁻¹;V为培养瓶中空气体积,采用称纯水质量的方法测得培养瓶中除培养土和上覆水外空气体积为480.0 mL;M为C的摩尔质量,12 g·mol⁻¹;m为风干土质量或风干土与添加物的总质量,g;V₀为气体的标准摩尔体积,22.4 L·mol⁻¹。

(3)土壤CO₂和CH₄累积排放量计算公式为:

$$CM_n = \sum_{i=1}^n F_i \quad (2)$$

式中:i为测量次数,i=1、3、5、7、14、21、28、……、120;CM_n为前n次测量所得CO₂和CH₄累积排放量,mg·kg⁻¹;F_i为第i次测量所得CO₂和CH₄排放量,mg·kg⁻¹。

1.6 数据处理

使用Excel 2019软件对数据进行整理与计算;利用SPSS 19.0软件分析各土壤有机碳含量与占比和CH₄、CO₂累积排放量的处理间差异(LSD, P<0.05),并对各土壤有机碳含量与CH₄、CO₂累积排放量进行Pearson相关分析;采用Origin 2021软件绘图;以各处理中CH₄、CO₂累积排放量为响应变量,以各组分土壤有机碳含量与pH和Eh为解释变量进行冗余分析,采用R软件中vegan程序包完成分析制图。

2 结果与分析

2.1 稻秆及稻秆生物炭添加对稻田红壤DOC及TOC的影响

稻秆及稻秆生物炭的总碳、总氮、C/N、pH及过0.053 mm筛的组分质量占比见表1。与CK相比,RS处理可以显著增加稻田红壤上覆水中DOC含量,且随培养时间增加呈现先显著增加后显著降低趋势(P<0.05);RSB各处理培养0 d时稻田红壤上覆水中DOC含量提高了54.5%~84.7%,30 d时降低了37.5%~47.2%,而120 d时则增加了31.4%~86.2%,其中,仅在培养120 d时RSB300处理的上覆水中DOC含量显著高于RSB400与RSB500处理(P<0.05,图2)。随着培养时间增加,RS处理的DOC含量变化幅度较大,而RSB各处理的DOC含量变化幅度较小,仅

表1 稻秆及稻秆生物炭的总碳、总氮、C/N、pH及过0.053 mm筛的组分质量占比

Table 1 The total carbon, total nitrogen, C/N, pH and the proportion of mass passing through 0.053 mm sieve of rice straw and rice straw biochar

样品 Sample	总碳 Total carbon/(g·kg ⁻¹)	总氮 Total nitrogen/(g·kg ⁻¹)	pH	C/N	过0.053 mm筛的组分质量占比 Proportion of mass passing through 0.053 mm sieve/%
稻秆(RS)	440.8±1.0	8.3±0.1	—	53.0	19.0±0.3
300 ℃生物炭(RSB300)	398.7±11.3	6.4±0.1	8.58	61.5	34.8±0.7
400 ℃生物炭(RSB400)	276.7±9.8	4.7±0.2	8.74	58.4	33.3±1.0
500 ℃生物炭(RSB500)	378.8±3.7	6.5±<0.1	9.34	57.8	32.0±0.9

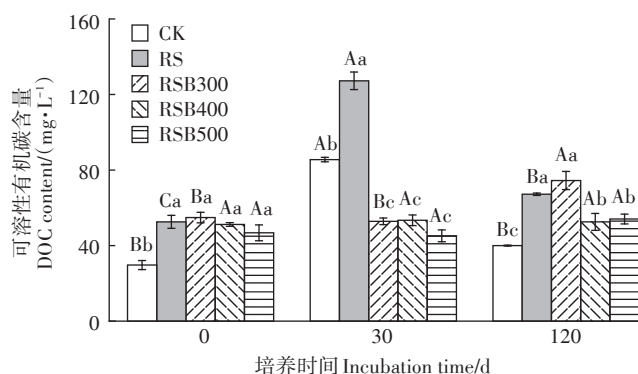
RSB300处理在120 d时的DOC含量较0 d与30 d时的DOC含量显著提高($P<0.05$,图2)。

与CK处理相比,RS与RSB各处理可以显著提高稻田红壤TOC含量;但随着培养时间增加,RS处理中TOC含量显著降低($P<0.05$),而其他处理则无显著变化(表2)。由表2可以看出,本研究分组后的各组分有机碳的加和总有机碳量(ΣTOC)与未分组前土壤实测TOC的比值(即 $\Sigma\text{TOC}/\text{TOC}$)为96.5%~102.1%,表明分组后的有机碳回收率高, ΣTOC 也可用来表征供试土壤的总有机碳变化。

2.2 稻秆及稻秆生物炭添加对稻田红壤有机碳组分的影响

2.2.1 颗粒态有机碳(POC)

与CK相比,培养0 d与30 d时,RS与RSB各处理



相同大写字母表示不同培养时间的相同处理间差异不显著,相同小写字母表示相同培养时间下不同处理间差异不显著($P>0.05$)。下同
Same capital letter means no significant difference in same treatment at different incubation time, same lowercase letter means no significant difference between different treatments at the same incubation time ($P>0.05$). The same below

图2 稻秆及稻秆生物炭添加对稻田红壤上覆水中可溶性有机碳含量的影响

Figure 2 Influences of rice straw and rice straw biochar addition on the dissolved organic carbon content in the overlying water of reddish paddy soil

的稻田红壤中游离态粗颗粒有机碳(fcPOC)含量分别提高了30.9%~42.6%和38.9%~51.8%,而 $\text{fcPOC}/\Sigma\text{TOC}$ 却分别降低了21.2%~28.3%和17.0%~23.4%;培养120 d时仅RS处理的 fcPOC 含量显著提高,RSB各处理的 $\text{fcPOC}/\Sigma\text{TOC}$ 均显著降低($P<0.05$,图3)。随着培养时间增加,各处理的 fcPOC 含量均显著降低,且除RS处理外其他处理的 $\text{fcPOC}/\Sigma\text{TOC}$ 也显著降低($P<0.05$,图3)。

与CK处理相比,RS与RSB各处理的稻田红壤中游离态细颗粒有机碳(ffPOC)含量与 $\text{ffPOC}/\Sigma\text{TOC}$ 均显著增加,且在培养0 d与30 d时RS处理下稻田红壤中 $\text{ffPOC}/\Sigma\text{TOC}$ 提高幅度更大,而培养120 d时RSB各处理下稻田红壤的 $\text{ffPOC}/\Sigma\text{TOC}$ 提高幅度更大($P<0.05$,图4)。随着培养时间的增加,RSB各处理的稻田红壤中 ffPOC 含量显著降低($P<0.05$),所有处理的稻田红壤中 $\text{ffPOC}/\Sigma\text{TOC}$ 均显著降低($P<0.05$,图4)。

与CK处理相比,RS与RSB各处理的稻田红壤中闭蓄态颗粒有机碳(oPOC)含量分别增加了80.6%~93.7%与76.4%~137.0%,但RS与RSB各处理间无显著差异($P>0.05$);在培养0 d与30 d时,RS与RSB各处理的稻田红壤中 $\text{oPOC}/\Sigma\text{TOC}$ 无显著变化,而培养120 d时RS处理的稻田红壤中 $\text{oPOC}/\Sigma\text{TOC}$ 增加了28.64%($P<0.05$,图5)。随着培养时间增加,所有处理的稻田红壤中 oPOC 含量及 $\text{oPOC}/\Sigma\text{TOC}$ 均显著增加($P<0.05$,图5)。

2.2.2 矿物结合态有机碳(MOC)

与CK处理相比,RS与RSB各处理的稻田红壤中游离态矿物结合态有机碳(fMOC)含量分别增加了20.0%~31.1%和66.3%~95.6%,但RSB各处理间无显著差异($P<0.05$);在培养0 d和30 d时RS处理的稻田红壤中 $\text{fMOC}/\Sigma\text{TOC}$ 显著降低,而在整个培养期中RSB各处理的稻田红壤中 $\text{fMOC}/\Sigma\text{TOC}$ 均无显著变化

表2 稻秆与稻秆生物炭添加对稻田红壤总有机碳的影响

Table 2 Effects of rice straw and rice straw biochar additions on the total organic carbon of reddish paddy soil

处理 Treatment	0 d			30 d			120 d		
	$\Sigma\text{TOC}/(\text{g}\cdot\text{kg}^{-1})$	$\text{TOC}/(\text{g}\cdot\text{kg}^{-1})$	$\Sigma\text{TOC}/\text{TOC}$	$\Sigma\text{TOC}/(\text{g}\cdot\text{kg}^{-1})$	$\text{TOC}/(\text{g}\cdot\text{kg}^{-1})$	$\Sigma\text{TOC}/\text{TOC}$	$\Sigma\text{TOC}/(\text{g}\cdot\text{kg}^{-1})$	$\text{TOC}/(\text{g}\cdot\text{kg}^{-1})$	$\Sigma\text{TOC}/\text{TOC}$
CK	10.4±0.1	10.7±0.1Ab	0.978	10.5±0.1	10.3±0.1Ac	1.013	10.1±0.2	10.0±0.1Ad	1.010
RS	20.0±0.1	20.3±0.3Aa	0.986	17.0±0.2	17.1±0.6Bb	0.998	14.5±0.5	14.4±0.4Cc	1.008
RSB300	20.7±0.2	20.3±0.1Aa	1.019	19.4±0.2	19.0±0.4Aa	1.021	18.6±0.2	18.9±0.2Aab	0.980
RSB400	20.2±0.2	20.2±0.7Aa	0.995	18.9±0.2	18.9±0.4Aa	1.002	17.7±0.6	18.4±0.5Ab	0.965
RSB500	20.6±0.3	20.5±0.3Aa	1.006	19.6±0.3	20.0±0.3Aa	0.983	19.5±0.2	19.8±0.1Aa	0.984

注: ΣTOC 为各组分有机碳量的加和值。相同大写字母表示不同培养时间的相同处理间差异不显著,相同小写字母表示相同培养时间下不同处理间差异不显著($P>0.05$)。下同。

Note: ΣTOC is the sum value of various fractional organic carbon. Same capital letter means no significant difference in same treatment at different incubation time, same lowercase letter means no significant difference between different treatments at the same incubation time ($P>0.05$). The same below.

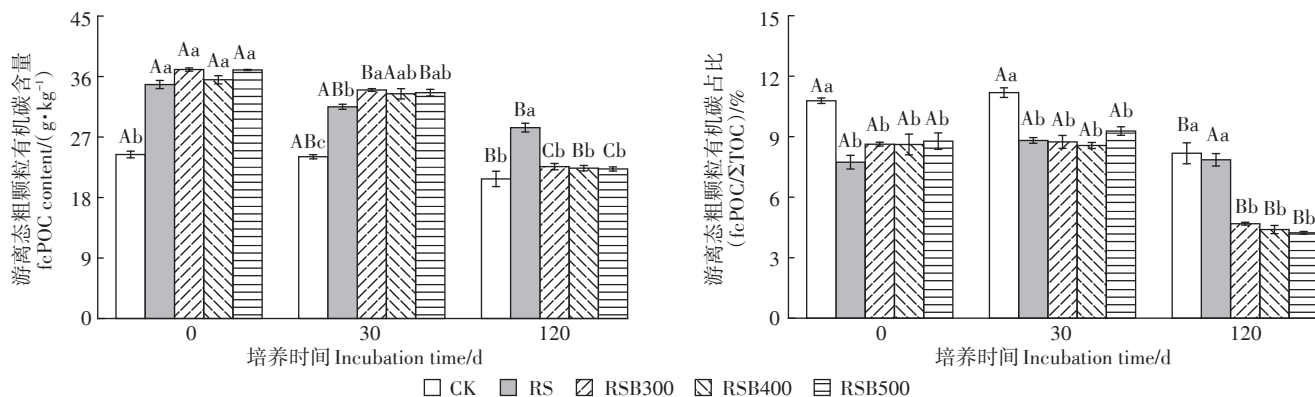


图3 稻秆及稻秆生物炭添加对稻田红壤中游离态粗颗粒有机碳的影响

Figure 3 Influences of rice straw and rice straw biochar addition on the free coarse particulate organic carbon (fcPOC) in reddish paddy soil

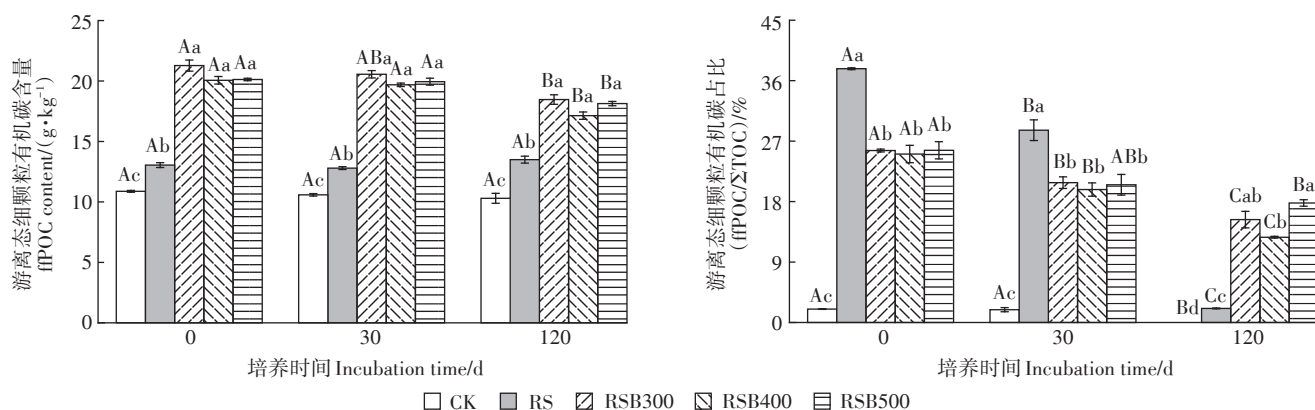


图4 稻秆及稻秆生物炭添加对稻田红壤游离态细颗粒有机碳的影响

Figure 4 Influences of rice straw and rice straw biochar addition on the free fine particulate organic carbon (ffPOC) in reddish paddy soil

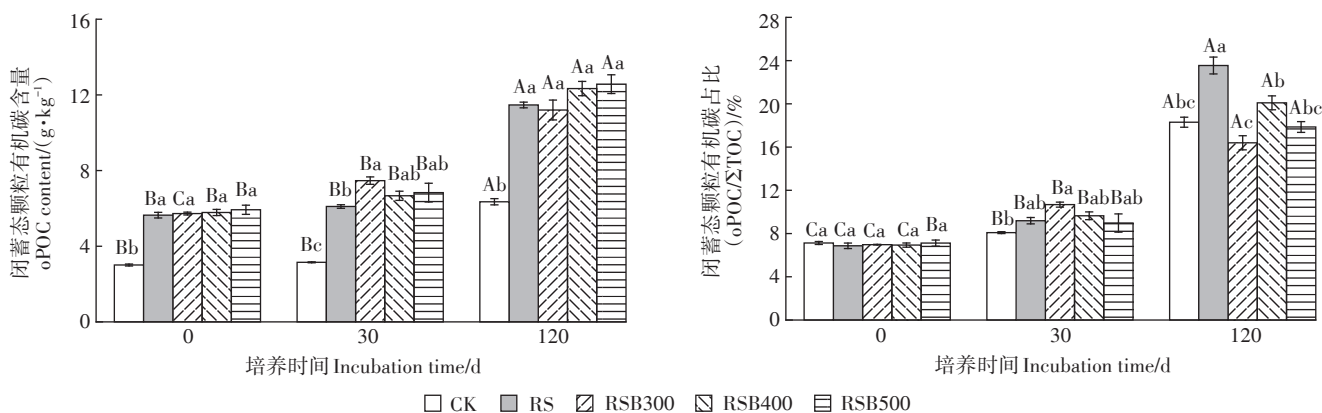


图5 稻秆及稻秆生物炭添加对稻田红壤闭蓄态颗粒有机碳的影响

Figure 5 Influences of rice straw and rice straw biochar addition on the occluded particulate organic carbon (oPOC) in reddish paddy soil

($P>0.05$,图6)。随着培养时间增加,RSB各处理的稻田红壤中fMOC含量减少了9.1%~10.1%;除RSB300处理外,各处理的稻田红壤中fMOC/ΣTOC在培养0~120 d期间均显著增加($P<0.05$,图6)。

与CK处理相比,仅在培养120 d时RS与RSB各处理的稻田红壤中闭蓄态矿物结合态有机碳(oMOC)

含量显著提高($P<0.05$);RSB各处理的稻田红壤中oMOC/ΣTOC降低了38.6%~51.5%,而RS处理的稻田红壤中oMOC/ΣTOC仅在培养0 d与30 d时显著降低($P<0.05$,图7)。随着培养时间增加,RS与RSB各处理的稻田红壤中oMOC含量分别增加了20.0%和9.5%~16.9%($P<0.05$);培养0~30 d期间RS处理的稻

田红壤中 $\text{oMOC}/\Sigma\text{TOC}$ 增加了 13.7%, 而培养 30~120 d 期间 CK 与 RSB 各处理的稻田红壤中 $\text{oMOC}/\Sigma\text{TOC}$ 分别减少了 31.9% 和 18.1%~20.0% ($P<0.05$, 图 7)。

2.3 稻秆生物炭添加对稻田红壤 CH_4 与 CO_2 累积排放量的影响

稻秆添加可以显著且持续增加稻田红壤中 CH_4 与 CO_2 的累积排放量, 与 CK 处理相比, 培养 30 d 时, RS 处理的稻田红壤 CH_4 与 CO_2 累积排放量增加了 3 459.4 倍和 5.8 倍, 而 120 d 时的累积排放量比 30 d 时增加了 109.0% 与 36.3% ($P<0.05$, 表 3)。与 CK 处理相比, 培养 30 d 时, RSB 各处理的稻田红壤 CO_2 累积排放量降低了 28.5%~33.7%, 但 RSB300 和 RSB400 处理的 CH_4 累积排放量分别提高了 188.5% 和 32.7% ($P<0.05$, 表 3); 培养至 120 d 时稻田红壤中 CO_2 的累积排放量降低了 16.3%~16.6%, 而 RSB300 与 RSB400 处理的 CH_4 的累积排放量分别提高了 218.0% 和 84.7% ($P<0.05$, 表 3)。由表 3 可以看出, RS 与 RSB 处理的稻

田红壤中 CH_4 与 CO_2 的排放主要集中在 0~30 d。

2.4 稻田红壤 CH_4 与 CO_2 累积排放量的影响因子分析

相关分析表明(表 4), 稻秆及其生物炭添加后稻田红壤 CH_4 与 CO_2 累积排放量间呈极显著正相关关系 ($P<0.01$)。培养 30 d 时, 稻田红壤 CH_4 和 CO_2 的累积排放量只与 DOC 和 fPOC 含量呈极显著正相关关系 ($P<0.01$); 培养 120 d 时, 稻田红壤 CH_4 和 CO_2 的累积排放量与 fcPOC 含量呈极显著正相关关系 ($P<0.01$), CO_2 的累积排放量与 fPOC 含量呈显著负相关关系 ($P<0.05$)。在整个培养期内, 稻田红壤 TOC 与 fPOC 、 oPOC 、 fMOC 间均呈显著正相关关系, 而 oPOC 含量与 fPOC 、 fMOC 也呈显著正相关关系 ($P<0.05$)。

冗余分析第一和第二排序轴解释了总变量的 85.90% (图 8)。结果显示, 稻秆及稻秆生物炭添加后稻田上覆水中的 DOC 含量是促进稻田红壤 CH_4 和 CO_2 排放的主要控制因素 ($P<0.001$), 而 fcPOC 则是抑制稻田红壤 CO_2 排放的主要控制因素 ($P<0.01$)。

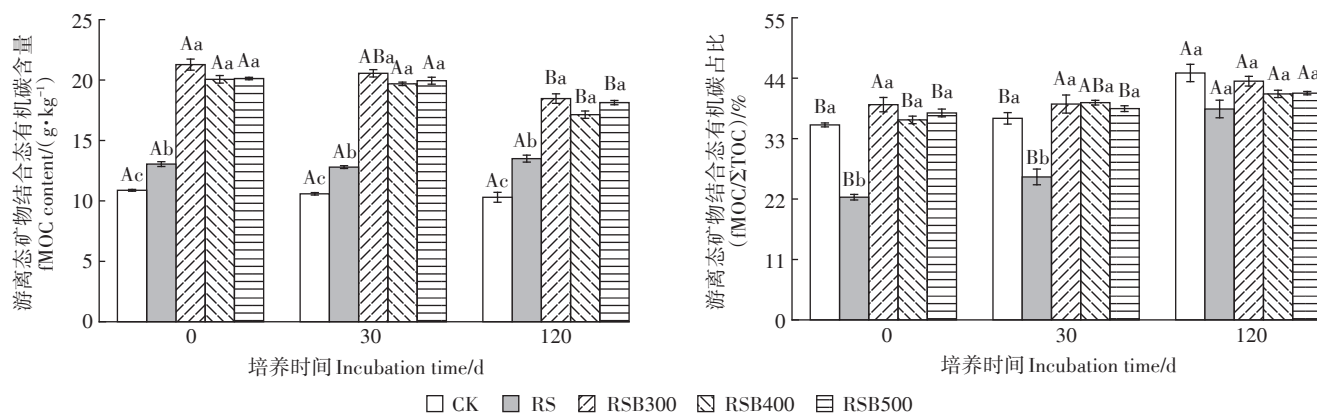


图 6 稻秆及稻秆生物炭添加对稻田红壤游离态矿物结合态有机碳的影响

Figure 6 Influences of rice straw and rice straw biochar addition on the free mineral-associated organic carbon (fMOC) in reddish paddy soil

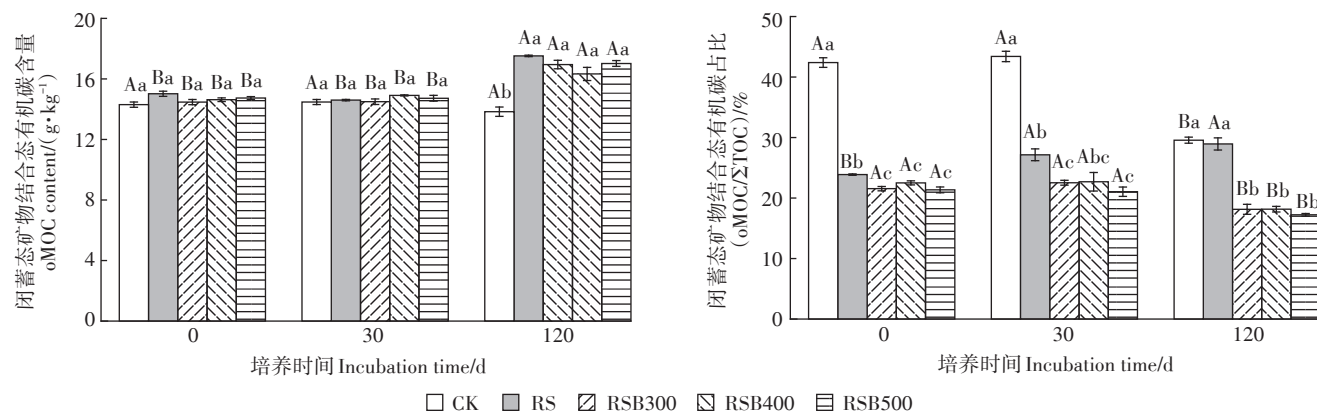


图 7 稻秆及稻秆生物炭添加对稻田红壤闭蓄态矿物结合态有机碳的影响

Figure 7 Influences of rice straw and rice straw biochar addition on the occluded mineral-associated organic carbon (oMOC) in reddish paddy soil

3 讨论

土壤 TOC 含量是各有机碳组分动态平衡的结

果,土壤 TOC 含量越高,越有利于土壤生产力的提升与温室效应缓解^[34]。与 RS 处理相比,RSB 各处理对稻田红壤 TOC 的增加效果显著(表 2)。这主要是因

表 3 稻秆及稻秆生物炭添加后稻田红壤 CH₄与 CO₂累积排放量的变化Table 3 Changes of the cumulative emissions of CH₄ and CO₂ in reddish paddy soil after the additions of rice straw and rice straw biochar

处理 Treatment	0~30 d		0~120 d		0~30 d/0~120 d	
	CH ₄ /(μg·kg ⁻¹)	CO ₂ /(mg·kg ⁻¹)	CH ₄ /(μg·kg ⁻¹)	CO ₂ /(mg·kg ⁻¹)	CH ₄ /%	CO ₂ /%
CK	12.3±0.3 Bb(c)	8.7±0.4 Bb(a)	17.3±0.3 Ab(c)	12.4±0.6 Ab(a)	71.1	70.3
RS	42 608.0±525.6 Ba	59.2±3.6 Ba	89 050.4±384.8 Aa	80.7±4.9 Aa	47.8	73.4
RSB300	35.5±0.8 Bb(a)	5.8±0.0 Bb(b)	55.0±2.6 Ab(a)	10.4±0.1 Ab(b)	64.5	55.7
RSB400	16.3±0.6 Bb(b)	6.1±0.0 Bb(b)	32.0±1.5 Ab(b)	10.4±0.1 Ab(b)	51.1	59.0
RSB500	12.7±0.2 Bb(c)	6.3±0.1 Bb(b)	18.7±0.2 Ab(c)	10.4±0.1 Ab(b)	67.7	60.3

注:括号中的不同小写字母表示 CK、RSB300、RSB400 及 RSB500 处理间差异显著。

Note: Different lowercase letters in bracket indicate significant differences among CK, RSB300, RSB400, and RSB500 treatment.

表 4 稻田红壤各组分有机碳含量与 CH₄和 CO₂累积排放量间的相关系数Table 4 Correlation coefficients between various organic carbon contents and the accumulative emission amounts of CH₄ and CO₂ in reddish paddy soil

培养时间 Incubation time/d	指标 Index	CH ₄	CO ₂	DOC	TOC	fcPOC	ffPOC	oPOC	fMOC	oMOC
0	CH ₄	1								
	CO ₂		1							
	DOC			1						
	TOC			0.800**	1					
	fcPOC			0.795**	0.967**	1				
	ffPOC			0.756**	0.788**	0.730**	1			
	oPOC			0.840**	0.965**	0.938**	0.784**	1		
	fMOC			0.567*	0.724**	0.798**	0.3039	0.727**	1	
	oMOC			0.373	0.465	0.388	0.577*	0.476	0.036	1
30	CH ₄	1								
	CO ₂	0.993**	1							
	DOC	0.878**	0.883**	1						
	TOC	0.003	-0.036	-0.448	1					
	fcPOC	0.023	-0.024	-0.415	0.977**	1				
	ffPOC	0.708**	0.693**	0.363	0.623*	0.603*	1			
	oPOC	0.016	-0.036	-0.414	0.918**	0.921**	0.570*	1		
	fMOC	-0.468	-0.506	-0.799**	0.849**	0.844**	0.172	0.832**	1	
	oMOC	-0.058	-0.078	-0.170	0.274	0.298	0.046	0.298	0.232	1
120	CH ₄	1								
	CO ₂	0.992**	1							
	DOC	0.362	0.3452	1						
	TOC	-0.255	-0.281	0.481	1					
	fcPOC	0.888**	0.851**	0.526*	-0.022	1				
	ffPOC	-0.500	-0.517*	0.395	0.945**	-0.257	1			
	oPOC	0.144	0.112	0.526*	0.863**	0.306	0.693**	1		
	fMOC	-0.313	-0.327	0.494	0.975**	-0.102	0.955**	0.798**	1	
	oMOC	0.421	0.395	0.720**	0.683**	0.503	0.520*	0.849**	0.646**	1

注:*0.05 水平显著相关;**0.01 水平显著相关。

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

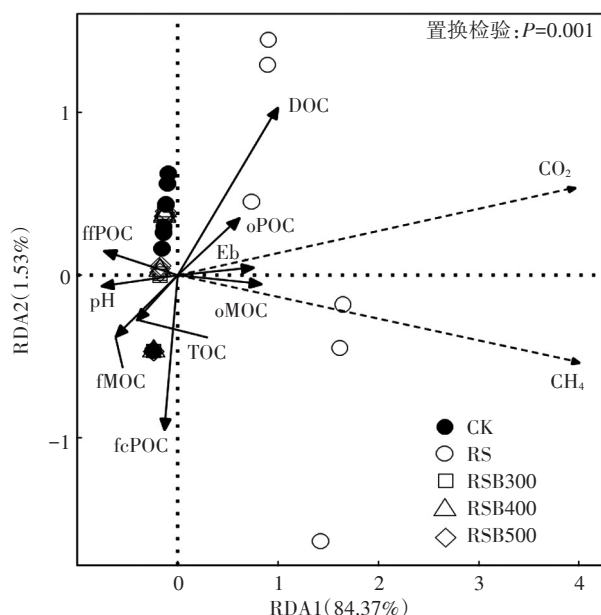


图8 稻田红壤 CH_4 和 CO_2 累积排放量影响因子的冗余分析
Figure 8 Redundancy analysis of influencing factors of CH_4 and CO_2 cumulative emissions in reddish paddy soil

为生物炭在碳化过程中将稻秆中不稳定的脂肪族化合物转化为较稳定的芳香碳^[35],热解温度越高生物炭中稳定性有机碳的比例也越高,在土壤中越不易被分解^[36];而具有多孔结构的生物炭可以吸附土壤有机碳并形成稳定的复合体,进而增加土壤有机碳的固存^[37]。

RSB各处理可以显著增加稻田红壤中POC的含量与存在比例(图3~图5),这与胡坤等^[38]与DAI等^[39]的研究结果一致,即生物炭添加可显著增加土壤中POC含量,有效防止土壤酸化、提高土壤肥力。本研究中,RSB各处理的稻田红壤中fcPOC含量及其占比均随着培养时间的增加而显著降低(图3),这与张艺等^[40]的研究结果相同,其推测稻秆生物炭颗粒与fcPOC官能团间的吸附作用可以在短期内显著提高fcPOC的含量^[41],但随着培养时间增加,fcPOC分解,与之吸附的生物炭颗粒进入其他组分,导致fcPOC含量与fcPOC/ ΣTOC 显著降低(图3)。丛萍^[42]研究发现,细小秸秆的添加显著提高了土壤真菌含量,而真菌能够促进土壤团聚作用^[43],这种团聚保护作用减缓了fcPOC分解,加上稻秆这种新鲜有机质的胶结作用提高了fcPOC数量,因此稻田红壤中fcPOC含量显著增加(图3)。ffPOC与fcPOC的区别在于颗粒大小,且本研究中,添加的稻秆与稻秆生物炭均过60目筛使得RSB各处理和RS处理的ffPOC含量与ffPOC/ ΣTOC 均显著高于CK处理(图4)。oPOC存在于微团聚体内

部,被微团聚体保护不易受微生物分解,是稳定性相对较高的POC^[44],这是本研究中oPOC/ ΣTOC 随培养时间增加而升高的基础;另外,根据团聚体等级模型^[45],细小稻秆及其生物炭可以被土壤颗粒通过吸附、配位和阴阳离子交换作用与土壤矿物胶结形成新的团聚体,进而导致稻田红壤中oPOC含量及oPOC/ ΣTOC 的增加(图5)。在培养0~120 d,稻田红壤中oPOC含量与TOC含量均呈极显著正相关关系(表4),王朔林等^[46]也发现外源有机质投入将显著增加oPOC含量,且oPOC含量与TOC含量具有极显著正相关关系。

稻秆及稻秆生物炭加入土壤后,其中小于0.053 mm的有机碳颗粒在有机碳分组中通常被认为是fMOC,因而RSB各处理的稻田红壤中fMOC含量显著增加(图6);封存于微团聚体内部的oMOC含量在培养0~30 d并无显著变化,在培养120 d时与其他有机碳组分才具有显著相关关系(表4),这印证了oMOC是稻田红壤中周转最慢的有机碳组分,与刘中良等^[47]的观点相同。外源有机碳的输入能促进微团聚体的形成^[48-49],该过程中fMOC组分中部分有机碳与微团聚体结合形成oMOC,进而在一定程度上提高了oMOC含量并降低了fMOC含量。而高梦雨等^[10]发现生物炭添加对土壤oMOC含量影响较小,这可能与生物炭施用前的造粒有关,造粒过程中微小粒径生物炭的减少可能是影响oMOC含量变化的关键。总体来看,稻秆及稻秆生物炭添加后稻田红壤中POC的变化幅度大于MOC(图3~图7),而有机碳大部分储存在MOC中,因而MOC在土壤中是具有主要碳储存功能的有机碳组分,这与王玲莉等^[50]的研究结果一致。

添加稻秆与稻秆生物炭后,稻田红壤 CH_4 和 CO_2 的排放主要集中在培养0~30 d(表3),这与李有兵等^[51]的研究结果一致。土壤 CH_4 和 CO_2 的排放主要受到土壤有机碳活性和微生物群落丰度的影响,土壤有机碳含量越高,有机碳活性就越高,有机碳稳定性则会下降,更易被微生物分解^[52-53]。稻秆添加可以显著提高稻田红壤中新鲜有机碳含量,稻秆有机碳的迅速分解及其激发作用又显著促进了 CH_4 和 CO_2 的排放。生物炭的物理结构和化学组成是其对土壤有机碳矿化产生影响的根本原因^[54]。生物炭的孔隙度随制备温度的升高而显著增大^[55],其多孔结构对有机碳进行吸附从而抑制了微生物的降解作用^[54];生物炭添加能够促进土壤中稳定态有机无机复合体的形成,封存部分有机碳从而减少矿化^[56];此外,生物炭自身含有的

二噁英、呋喃和多环芳烃等有机物污染物可能对微生物产生毒害,进而抑制了有机碳矿化^[57]。因此,相对于添加稻秆,添加稻秆生物炭显著抑制了稻田红壤CH₄和CO₂的排放(表3)。此外,充足的DOC含量也是影响稻田CH₄排放的关键因素^[58-59]。本研究发现,稻田红壤中CH₄和CO₂累积排放量与DOC、fPOC和fcPOC含量显著相关(表4),且DOC是促进稻田红壤CH₄和CO₂排放的主要控制因素(图8),说明CH₄和CO₂的排放主要与活性有机碳有关,这与张黛静等^[60]和王瑞^[61]的研究结果一致。另外,稻秆生物炭呈碱性,添加后可在一定程度上中和稻田红壤的酸度,增加产甲烷微生物的丰度,从而促进稻田红壤的CH₄排放,但生物炭中的有机污染物也可能抑制产甲烷微生物的活性;同时,低温热解的稻秆生物炭比高温热解的稻秆生物炭对稻田红壤DOC的增加作用更显著(图2),这为产甲烷微生物提供了更充足的碳源,进而显著促进了稻田红壤的CH₄排放(表3)。冗余分析显示fcPOC是抑制稻田红壤CO₂排放的主要控制因素($P<0.01$,图8),这与WASEEM等^[27]发现土壤活性有机碳能提高土壤CO₂排放的结果不同,可能是因为fcPOC与稻秆生物炭颗粒在互相吸附过程中提高了自身的稳定性,使得fcPOC与传统认知土壤活性有机碳性质有所不同。

4 结论

(1)稻秆生物炭添加可以显著增加稻田红壤有机碳总量及各有机碳组分含量,且随着添加时间的延长,稻田红壤中游离态粗颗粒有机碳与游离态矿物结合态有机碳含量显著降低,而闭蓄态的颗粒有机碳与矿物结合态有机碳含量均显著增加。

(2)稻秆生物炭添加可以显著抑制稻田红壤中CH₄和CO₂排放,且以500℃热解制备的稻秆生物炭添加效果最好。

(3)相关分析表明,游离态颗粒有机碳与可溶性有机碳是影响稻田红壤中CH₄与CO₂排放的主导因素。

参考文献:

- [1] ANTONANGELO J A, SUN X, ZHANG H L. The roles of co-composted biochar (COMBI) in improving soil quality, crop productivity, and toxic metal amelioration[J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 277: 111443.
- [2] LU L, YU W T, WANG Y F, et al. Application of biochar-based materials in environmental remediation: From multi-level structures to specific devices[J]. *Biochar*, 2020, 2(1): 1-31.
- [3] KANG W, SEO C, CHEONG Y H, et al. Effect of barley straw biochar application on greenhouse gas emissions from upland soil for Chinese cabbage cultivation in short-term laboratory experiments[J]. *Journal of Mountain Science*, 2016, 13(4): 693-702.
- [4] HAN L F, KE S, YAN Y, et al. Biochar's stability and effect on the content, composition and turnover of soil organic carbon[J]. *Geoderma*, 2020, 364: 114184.
- [5] 黎嘉成, 高明, 田冬, 等. 秸秆及生物炭还田对土壤有机碳及其活性组分的影响[J]. 草业学报, 2018, 27(5): 39-50. LI J C, GAO M, TIAN D, et al. Effects of straw and biochar on soil organic carbon and its active components[J]. *Acta Prataculurae Sinica*, 2018, 27(5): 39-50.
- [6] 肖建南. 生物炭对宁夏引黄灌区土壤有机碳组分及微生物群落结构的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2017: 14-15. XIAO J N. Effect of biochar on soil organic carbon fractions and microbial community structure in Ningxia irrigation region[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2017: 14-15.
- [7] 周强, 代宽, 余浪, 等. 热解温度和时间对生物炭pH值的影响[J]. 地球环境学报, 2015, 6(3): 195-200. ZHOU Q, DAI K, YU L, et al. Effects of pyrolysis temperature, time and biochar mass ratio on pH value determination for four biochar solutions[J]. *Journal of Earth Environment*, 2015, 6(3): 195-200.
- [8] 林珈羽, 张越, 刘沅, 等. 不同原料和炭化温度下制备的生物炭结构及性质[J]. 环境工程学报, 2016, 10(6): 3200-3206. LIN J Y, ZHANG Y, LIU Y, et al. Structure and properties of biochar under different materials and carbonization temperatures[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2016, 10(6): 3200-3206.
- [9] ZHAO S X, TA N, LI Z H, et al. Varying pyrolysis temperature impacts application effects of biochar on soil labile organic carbon and humic fractions[J]. *Applied Soil Ecology*, 2018, 123: 484-493.
- [10] ROCCI K S, LAVALLEE J M, STEWART C E, et al. Soil organic carbon response to global environmental change depends on its distribution between mineral-associated and particulate organic matter: A meta-analysis[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 793: 148569.
- [11] MANU V, WHITBREAD A, BLAIR N, et al. Carbon status and structural stability of soil from different land use systems in the Kingdom of Tonga[J]. *Soil and Management*, 2014, 30(4): 517-523.
- [12] 范钊, 高绘文, 吴建富, 等. 红壤性水稻土有机碳及其物理、化学组分对施肥措施的响应[J]. 江西农业大学学报, 2021, 43(1): 214-222. FAN Z, GAO H W, WU J F, et al. The response of organic carbon and its physical and chemical components to fertilization in red paddy soil[J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2021, 43(1): 214-222.
- [13] 李景, 吴会军, 武雪萍, 等. 长期免耕和深松提高了土壤团聚体颗粒态有机碳及全氮含量[J]. 中国农业科学, 2021, 54(2): 334-344. LI J, WU H J, WU X P, et al. Long-term conservation tillage enhanced organic carbon and nitrogen contents of particulate organic matter in soil aggregates[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2021, 54(2): 334-344.
- [14] 王莹莹, 肖谋良, 张昀, 等. 水稻光合碳在植株-土壤系统中分配与稳定对施磷的响应[J]. 环境科学, 2019, 40(4): 1957-1964. WANG Y Y, XIAO M L, ZHANG Y, et al. Allocation and stabilization re-

- sponses of rice photosynthetic carbon in the plant-soil system to phosphorus application[J]. *Environmental Science* 2019, 40 (4) : 1957-1964.
- [15] COTRUFO M F, RANALLI M G, HADDIX M L, et al. Soil carbon storage informed by particulate and mineral-associated organic matter[J]. *Nature Geoscience*, 2019, 12(12) : 989-994.
- [16] MEHMOOD I, QIAO L, CHEN H, et al. Biochar addition leads to more soil organic carbon sequestration under a maize-rice cropping system than continuous flooded rice[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2020, 298 : 106965.
- [17] YANG X, WANG D, LAN Y, et al. Labile organic carbon fractions and carbon pool management index in a 3-year field study with biochar amendment[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2019, 18 : 1569-1578.
- [18] 韩玮, 申双和, 谢祖彬, 等. 生物炭及秸秆对水稻土各密度组分有机碳及微生物的影响[J]. *生态学报*, 2016, 36(18) : 5838-5846. HAN W, SHEN S H, XIE Z B, et al. Effects of biochar and straw on both the organic carbon in different density fractions and the microbial biomass in paddy soil[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(18) : 5838-5846.
- [19] 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.
- [20] NAN Q, WANG C, WANG H, et al. Mitigating methane emission via annual biochar amendment pyrolyzed with rice straw from the same paddy field[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 746 : 141351.
- [21] 王欣欣. 生物炭施用对稻田温室气体排放的影响研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2013: 18-37. WANG X X. Studies on the effect of biochar application on paddy greenhouse gas emissions[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2013: 18-37.
- [22] 刘玉学, 王耀锋, 吕豪豪, 等. 生物质炭化还田对稻田温室气体排放及土壤理化性质的影响[J]. *应用生态学报*, 2013, 24(8) : 2166-2172. LIU Y X, WANG Y F, LÜ H H, et al. Effects of biochar application on greenhouse gas emission from paddy soil and its physical and chemical properties[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(8) : 2166-2172.
- [23] 涂保华, 胡茜, 张艺, 等. 基于不同类型秸秆制备的生物炭对稻田土壤温室气体排放的影响[J]. *江苏农业学报*, 2019, 35(6) : 1374-1380. TU B H, HU Q, ZHANG Y, et al. Effects of biochar based on different types of straw on greenhouse gas emission from paddy soil[J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2019, 35(6) : 1374-1380.
- [24] 张梦阳, 夏浩, 吕波, 等. 短期生物炭添加对不同类型土壤细菌和氨氧化微生物的影响[J]. *中国农业科学*, 2019, 52(7) : 1260-1271. ZHANG M Y, XIAO H, LÜ B, et al. Short-term effect of biochar amendments on total bacteria and ammonia oxidizers communities in different type soils[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(7) : 1260-1271.
- [25] 韩光明. 生物炭对不同类型土壤理化性质和微生物多样性的影响[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2013: 135-141. HAN G M. Effect of biochar on soil physicochemical property and microbial diversity in different soil types[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2013: 135-141.
- [26] CAI F, FENG Z J, ZHU L Z. Effects of biochar on CH₄ emission with straw application on paddy soil[J]. *Journal of Soils & Sediments*, 2018, 18 : 599-609.
- [27] WASEEM H, SAFDAR B, NIAZ A, et al. Labile organic carbon fractions, regulator of CO₂ emission: Effect of plant residues and water regimes[J]. *Clean - Soil, Air, Water*, 2016, 44(10) : 1358-1367.
- [28] 蒋梦蝶, 何志龙, 孙赞, 等. 尿素和生物质炭对茶园土壤 pH 值及 CO₂ 和 CH₄ 排放的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2018, 37(1) : 196-204. JIANG M D, HE Z L, SUN Y, et al. The effect of wheat-straw derived biochar on the soil pH and emissions of CO₂ and CH₄ from tea garden soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(1) : 196-204.
- [29] 王瑞, 刘玉学, 高诚祥, 等. 蛭石改性水稻秸秆生物炭在土壤中的短期降解[J]. *农业环境科学学报*, 2021, 40(9) : 1954-1962. WANG R, LIU Y X, GAO C X, et al. Short-term degradation of vermiculite modified rice straw biochar in soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(9) : 1954-1962.
- [30] 殷丹. 水稻秸秆/根系添加对红壤性水稻土有机碳组成的影响[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2020: 10-12. YIN D. Effect of rice straw/root additions on the composition of soil organic carbon in red paddy soils[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2020: 10-12.
- [31] O' BRIEN S L, JASTROW J D. Physical and chemical protection in hierarchical soil aggregates regulates soil carbon and nitrogen recovery in restored perennial grasslands[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2013, 61 : 1-13.
- [32] STEWART C E, PLANTE A F, PAUSTIAN K, et al. Soil carbon saturation: Linking concept and measurable carbon pools[J]. *Soil Science Society of American Journal*, 2008, 72 : 379-392.
- [33] STEWART C E, PAUSTIAN K, CONANT R T, et al. Soil carbon saturation: Implications for measurable carbon pool dynamics in long-term incubations[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41 : 357-366.
- [34] JI Q, ZHAO S X, LI Z H, et al. Effects of biochar-straw on soil aggregation, organic carbon distribution, and wheat growth[J]. *Agronomy Journal*, 2016, 108 : 2129-2136.
- [35] 柯跃进, 胡学玉, 易卿, 等. 水稻秸秆生物炭对耕地土壤有机碳及其 CO₂ 排放的影响[J]. *环境科学*, 2014, 35(1) : 93-99. KE Y J, HU X Y, YI Q, et al. Impacts of rice straw biochar on organic carbon and CO₂ release in arable soil[J]. *Environmental Science*, 2014, 35(1) : 93-99.
- [36] AHMAD M, LEE S S, DOU X, et al. Effects of pyrolysis temperature on soybean stover- and peanut shell-derived biochar properties and TCE adsorption in water[J]. *Bioresource Technology*, 2012, 118 : 536-544.
- [37] 高尚志, 刘日月, 窦森, 等. 不同施量生物炭对土壤团聚体及其密度组分中有机碳含量的影响[J/OL]. *吉林农业大学学报*: 1-12 (2020-09-02). <https://doi.org/10.13327/j.jjlau.2020.5638>. GAO S Z, LIU R Y, DOU S, et al. Effect of different dosage of biochar application on organic carbon contents associated with soil aggregates and its density fractionation[J]. *Journal of Jilin Agricultural University*: 1-12 (2020-09-02). <https://doi.org/10.13327/j.jjlau.2020.5638>.

- [38] 胡坤, 张红雪, 郭力铭, 等. 烟秆炭基肥对薏苡土壤有机碳组分及微生物群落结构和丰度的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2021, 29(9): 1592–1603. HU K, ZHANG H X, GUO L M, et al. Effects of the application rate of non-hazardous composted sewage sludge on soil active organic carbon fractions of sandy fluvo-aquic soil [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2021, 29(9): 1592–1603.
- [39] DAI H C, ZHAO Y Q, CUI Y X, et al. Effects and causes of different organic materials amendment on soil organic carbon in North China Plain[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(Suppl 2): 103–110.
- [40] 张艺, 尹力初, 戴齐. 后续施肥措施改变对红壤性水稻土团聚体有机碳组分的影响[J]. 水土保持学报, 2016, 30(6): 278–283, 324. ZHANG Y, YIN L C, DAI Q. Effects of following-up fertilization reforming on the fraction of aggregate-associate organic carbon in red soil paddy soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 30(6): 278–283, 324.
- [41] TAN Z X, ZOU J H, ZHANG L M, et al. Morphology, pore size distribution, and nutrient characteristics in biochars under different pyrolysis temperatures and atmospheres[J]. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 2017, 20(2): 1036–1049.
- [42] 丛萍. 秸秆高量还田下东北黑土亚耕层的培肥效应与机制[D]. 北京: 中国农业科学院, 2019. CONG P. Fertilization Effect and mechanism of subsoil under high dosage straw returning in blank soil of northeast of China[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2019.
- [43] FILIALUNA O, CRIPPS C. Evidence that pyrophilous fungi aggregate soil after forest fire[J]. *Forest Ecology and Management*, 2021, 498: 119579.
- [44] SIX J. A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics[J]. *Soil & Tillage Research*, 2004, 79(1): 7–31.
- [45] TISDALL J M, OADES J. Organic matter and water-stable aggregates in soils[J]. *Journal of Soil Science*, 1982, 33(2): 141–163.
- [46] 王朔林, 王改兰, 赵旭, 等. 长期施肥对栗褐土有机碳含量及其组分的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(1): 104–111. WANG S L, WANG G L, ZHAO X, et al. Effect of long-term fertilization on organic carbon fractions and contents of cinnamon soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015, 21(1): 104–111.
- [47] 刘中良, 宇万太. 土壤团聚体中有机碳研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(2): 447–455. LIU Z L, YU W T. Review of researches on soil aggregate and soil organic carbon[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2011, 19(2): 447–455.
- [48] 张敬业, 张文菊, 徐明岗, 等. 长期施肥下红壤有机碳及其颗粒组分对不同施肥模式的响应[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(4): 868–875. ZHANG J Y, ZHANG W J, XU M G, et al. Response of soil organic carbon and its particle-size fractions to different long-term fertilizations in red soil of China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2012, 18(4): 868–875.
- [49] WANG X J, CHEN G H, ZHANG R D. Temperature sensitivity of simulated soils with biochars produced at different temperatures[J]. *Soil Research*, 2019, 57(3): 294–300.
- [50] 王玲莉, 韩晓日, 杨劲峰, 等. 长期施肥对棕壤有机碳组分的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(1): 79–83. WANG L L, HAN X R, YANG J F, et al. Effect of long-term fertilization on organic carbon fractions in a brown soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2008, 14(1): 79–83.
- [51] 李有兵, 把余玲, 李硕, 等. 作物残体与其生物炭配施对土壤有机碳及其自身矿化率的提升[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(4): 943–950. LI Y B, BA Y L, LI S, et al. Combined addition of crop residues and their biochar increase soil organic C content and mineralization rate[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2015, 21(4): 943–950.
- [52] XU K, MENG L, CHEN J D, et al. Effects of wheat-straw returning into paddy soil on dissolved organic carbon contents and rice grain yield [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(2): 430–436.
- [53] 于海洋, 张广斌, 马静, 等. 稻田CH₄和N₂O排放对大气CO₂浓度升高响应的研究进展[J]. 土壤, 2021, 53(3): 458–467. YU H Y, ZHANG G B, MA J, et al. Response of CH₄ and N₂O emissions to elevated atmospheric CO₂ concentration from rice fields: A review[J]. *Soils*, 2021, 53(3): 458–467.
- [54] 吴伟祥, 孙雪, 董达, 等. 生物质炭土壤环境效应[M]. 北京: 科学出版社, 2015: 90–145. WU W X, SUN X, DONG D, et al. Environment effects of biochar in soil[M]. Beijing: China Science Press, 2015: 90–145.
- [55] 高凯芳, 简敏菲, 余厚平, 等. 裂解温度对稻秆与稻壳制备生物炭表面官能团的影响[J]. 环境化学, 2016, 35(8): 1663–1669. GAO K F, JIAN M F, YU H P, et al. Effects of pyrolysis temperatures on the biochars and its surface functional groups made from rice straw and rice husk[J]. *Environmental Chemistry*, 2016, 35(8): 1663–1669.
- [56] ZIMMERMAN R D, MURILLO-SÁNCHEZ C E, THOMAS R J, et al. MATPOWER: Steady-state operations, planning, and analysis tools for power systems research and education[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2011, 26(1): 12–19.
- [57] SPOKAS K. Review of the stability of biochar in soils: Predictability of O:C molar ratios[J]. *Carbon Management*, 2010, 1(2): 289–303.
- [58] WANG C, WANG W Q, SARDANS J, et al. Effect of simulated acid rain on CO₂, CH₄ and N₂O fluxes and rice productivity in a subtropical Chinese paddy field[J]. *Environmental pollution*, 2018, 243: 1196–1205.
- [59] LEROY F, GOGO S, GUIMBAUD C, et al. Vegetation composition controls temperature sensitivity of CO₂ and CH₄ emissions and DOC concentration in peatlands[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2017, 107: 164–167.
- [60] 张黛静, 宗洁静, 马建辉, 等. 小麦-玉米周年耕作方式与增施有机肥对夏玉米土壤有机碳库及温室气体排放的影响[J]. 生态环境学报, 2019, 28(10): 1927–1935. ZHANG D J, ZONG J J, MA J H, et al. Effects of wheat-maize rotation system tillage method and enhanced organic fertilizer on soil organic carbon pool and greenhouse gas emission in maize soil[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2019, 28(10): 1927–1935.
- [61] 王瑞. 秸秆添加对土壤温室气体排放和溶解性有机碳DOC组分的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2018: 29–33. WANG R. The effect of straw incorporation on greenhouse gases emission and change of dissolved organic carbon (DOC) component[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2018: 29–33.

(责任编辑: 宋潇)