CO_2浓度增加和秸秆还田对黑土团聚体有机碳的影响

岳娅, 薛海清, 冯茜, 苗欢, 苗淑杰, 乔云发

引用本文:
岳娅, 薛海清, 冯茜, 苗欢, 苗淑杰, 乔云发. CO_2浓度增加和秸秆还田对黑土团聚体有机碳的影响[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(4): 943-950.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.11654/jaes.2022-0793

岳娅, 薛海清, 冯茜, 等. CO_2浓度增加和秸秆还田对黑土团聚体有机碳的影响[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(4): 943-950.
YUE Y, XUE H Q, FENG Q, et al. Effects of atmospheric CO_2 enrichment and straw return on aggregate organic carbon in black soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2023, 42(4): 943-950.

CO_2浓度增加和秸秆还田对黑土团聚体有机碳的影响

岳娅, 薛海清, 冯茜, 苗欢, 苗淑杰*, 乔云发

(南京信息工程大学应用气象学院, 南京 210044)

摘　要: 为研究土壤团聚体有机碳分布对CO_2浓度增加和秸秆还田的响应,本研究以东北黑土区长期CO_2增加定位试验平台为依托,设置4个处理,分别为对照(CK)、增加CO_2浓度达1 259.72 mg·m^{-3}(EC)、秸秆还田(ST)和增加CO_2浓度结合秸秆还田(EC+ST)。结果表明:EC与ST处理对土壤总有机碳含量无显著影响,但EC+ST处理使土壤总有机碳含量提升3.09 g·kg^{-1}(P<0.05)。EC处理下土壤团聚体占比变化无显著影响,但分形维数(D)增加0.06,土壤团聚体稳定性降低。ST与EC+ST处理使>0.5~1 mm大团聚体占比分别提高14.98个百分点与8.20个百分点,此外,ST处理使≤0.053 mm微团聚体占比减少12.88个百分点,水稳性团聚体数量($R_{0.25}$)增加0.14,平均质量直径(d_{MW})增加0.08 mm,D减少0.11(P<0.05),土壤团聚体稳定性增强;EC+ST处理使>1 mm大团聚体占比增加4.07个百分点,d_{MW}增加0.11 mm,土壤团聚体稳定性增加。EC与EC+ST处理较CK处理相比,分别使≤0.053 mm微团聚体土壤有机碳含量提升了0.66 g·kg^{-1}和1.98 g·kg^{-1};ST处理使>1 mm大团聚体土壤有机碳含量提高0.55 g·kg^{-1},>0.25~0.5 mm大团聚体有机碳含量降低1.13 g·kg^{-1};EC+ST处理使>1 mm大团聚体土壤有机碳含量减少3.05 g·kg^{-1}(P<0.05)。EC处理使≤0.053 mm微团聚体有机碳贡献率增加9.14个百分点,而ST处理则使该部分减少10.54个百分点,同时>0.5~1 mm大团聚体有机碳贡献率增加14.35个百分点,EC+ST处理使>1 mm大团聚体和>0.5~1 mm大团聚体有机碳贡献率分别增加3.25个和6.74个百分点,>0.053~0.25 mm微团聚体有机碳贡献率降低5.82个百分点。研究表明,秸秆还田可以弥补CO_2浓度增加导致的土壤总有机碳含量下降与团聚体结构变差的不利结果。虽然秸秆还田时其本身矿化会向大气中释放CO_2,但是在未来大气CO_2浓度增加的背景下,秸秆还田是提高黑土有机碳含量的潜在有效措施,值得在东北黑土区推广,且需要进一步探究其释放到大气中的CO_2对温室效应的影响。

关键词: CO_2浓度;秸秆还田;土壤团聚体;有机碳;贡献率

中图分类号: S153.6　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1672-2043(2023)04-0943-08　　doi:10.11654/jaes.2022-0793

Effects of atmospheric CO_2 enrichment and straw return on aggregate organic carbon in black soil

YUE Ya, XUE Haiqing, FENG Qian, MIAO Huan, MIAO Shujie*, QIAO Yunfa

(School of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: The responses of organic carbon distribution in soil aggregates to CO_2 enrichment and straw return were studied to provide theoretical evidence for the carbon sequestration and mitigation of black soil. Based on the long-term CO_2 enrichment experimental platform located in the black soil region of northeast China, four treatments were set. The treatments were the control (CK), increasing CO_2 concentration to 1 259.72 mg·m^{-3} (EC), straw returning (ST), and increasing CO_2 concentration combined with straw returning (EC+ST). The results showed that the EC and ST treatments had no significant effect on the total soil organic carbon, whereas the EC+ST treatment increased total soil organic carbon by 3.09 g·kg^{-1} (P<0.05). The EC treatment had no significant effect on the proportion of soil aggregates,

收稿日期: 2022-08-05　　**录用日期:** 2022-10-31

作者简介: 岳娅(1998—),女,河南商丘人,硕士研究生,从事土壤有机碳与全球变化研究。E-mail:yue98392@163.com

*__通信作者:__ 苗淑杰　E-mail:sjmiao2015@nuist.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目(42177279);江苏省农业自主创新项目[CX(21)3170]

Project supported: The National Natural Science Foundation of China (42177279); Jiangsu Agriculture Science and Technology Innovation Fund [CX(21)3170]

although the fractal dimension(D) increased by 0.06 and the stability of the soil aggregates decreased. Both the ST and EC + ST treatments increased the proportion of >0.5–1 mm macro-aggregates by 14.98 percentage points and 8.20 percentage points, respectively. In addition, the ST treatment reduced the proportion of ≤0.053 mm micro-aggregates by 12.88 percentage points, increased the number of water-stable aggregates($R_{0.25}$) by 0.14, and the average weight diameter(d_{MW}) was increased by 0.08 mm, furthermore, D decreased by 0.11($P<0.05$), and the stability of soil aggregates was enhanced, whilst the EC+ST treatment increased the proportion of >1 mm macro-aggregates by 4.07 percentage points, and also increased the d_{MW} by 0.11 mm and increased the stability of soil aggregates. Compared with CK, the EC and EC + ST treatments increased the soil organic carbon content of ≤0.053 mm micro-aggregates by 0.66 $g\cdot kg^{-1}$ and 1.98 $g\cdot kg^{-1}$, respectively. In addition, the ST treatment increased the >1 mm macro-aggregate content of soil organic carbon by 0.55 $g\cdot kg^{-1}$, whilst >0.25–0.5 mm macro-aggregates decreased by 1.13 $g\cdot kg^{-1}$. In addition, the EC + ST treatment reduced > 1 mm macro-aggregates by 3.05 $g\cdot kg^{-1}$ ($P<0.05$). EC treatment also increased the contribution of organic carbon of ≤0.053 mm micro-aggregates by 9.14 percentage points, compared to ST treatment, which decreased this by 10.54 percentage points. Furthermore, the organic carbon contribution rate of >0.5–1 mm macro-aggregates was increased by 14.35 percentage points, and the EC+ST treatment increased the organic carbon contribution rate of both >1 mm macro-aggregates and >0.5–1 mm macro-aggregates by 3.25 percentage points and 6.74 percentage points, respectively. Additionally, >0.053–0.25 mm micro-aggregate organic carbon contribution rate was decreased by 5.82 percentage points. Straw returning could compensate for the adverse effects on the decrease of soil total organic carbon content and the deterioration of aggregate structure resulting from an increasing CO_2 concentration. Although the mineralization of straw returning releases CO_2 into the atmosphere, it is still a potentially effective measure for increasing the content of organic carbon in black soil, and therefore should be applied in the black soil region of northeast China. However, the impacts of this CO_2 released into the atmosphere and the greenhouse effect still need to be further studied.

Keywords: CO_2 concentration; straw return; soil aggregate; organic carbon; contribution rate

自工业革命以来，由于人类活动导致的温室气体排放急剧增加，根据IPCC第五次评估报告预测，到21世纪末大气CO_2浓度将会达到1 259.72 $mg\cdot m^{-3}$[1]。CO_2作为影响植物生长的关键环境因子，对植物的生长发育和生理功能都会产生显著影响[2]。CO_2是光合作用的底物，植物通过光合作用将大气中的CO_2固定到植物体内，又通过根系分泌物和凋落物等将一部分光合碳输入到土壤中[3-4]，从而为土壤中的微生物提供碳源和能源。然而有研究表明，大气CO_2浓度升高加快了土壤有机碳（SOC）的分解速率，从而使更多的CO_2被释放到大气中[5]。van Groenigen等[6]结合原位数据分析指出，CO_2浓度升高能使土壤中碳的输入增加19.8%；但是也有些CO_2倍增试验的结果显示，大气CO_2浓度升高后土壤全碳的含量反而有所降低[7]。van Kessel等[8]进行了10 a开放式大气CO_2浓度倍增试验后，提出高浓度CO_2并未使瑞士草地土壤的全碳量有任何改变。可见，土壤碳库对高CO_2浓度的响应存在一定的争议，面对大气CO_2浓度增加的趋势，深入了解SOC的变化规律，将有利于我国提出的“双碳”目标的实现。

秸秆还田是实现黑土区土壤可持续发展的有效途径[9]。秸秆腐解后回归土壤可以提高SOC的输入量，并且输入大量的易分解碳组分有利于抑制土壤原有有机碳的矿化分解，从而有望增加SOC含量[10]。李昌新等[11]通过近20 a的连续定位试验发现，秸秆还田处理比未添加秸秆的对照处理的SOC含量增加了30.8%。高洪军等[12-13]通过田间定位试验发现，玉米秸秆还田能够显著提高黑钙土各粒级团聚体的有机碳含量，尤其对>0.25 mm大团聚体有机碳含量增加的贡献更大，减少了微团聚体有机碳的贡献率。刘恩科等[14]经过16 a对褐潮土进行有机肥和化肥配施的研究也认为，秸秆还田可明显提高各粒级团聚体有机碳含量，尤其是对大团聚体有机碳含量增加的贡献更大。这些结果均表明秸秆还田在提高土壤团聚体稳定性的同时，还能显著提高大团聚体中的有机碳含量[15-16]。但是，面对大气CO_2持续增加的大背景，秸秆还田对土壤团聚体结构和有机碳含量的影响是否会受到影响，目前还未见明确报道。

土壤团聚体是土壤结构的重要组成部分[17]，不仅调节着土壤微环境，而且与SOC储量和周转关系紧密。土壤团聚体通过物理作用保护固持SOC，对土壤养分以及结构稳定性具有决定作用，反之，SOC又是促进土壤团聚体形成的主要胶结物质[18]。因此，SOC含量是评价土壤肥力的重要指标之一。有机碳损失不利于微团聚体凝结成大团聚体，同时还会使团聚体结构稳定性减弱，增加土壤遭受侵蚀的风险[19]。我国东北黑土区作为全球仅有的三大黑土区之一，是地球上最珍贵的土壤资源[20-21]。但是近年来，由于受到人

类掠夺式开发利用的影响，黑土地土层变薄、肥力下降，污染等环境问题突出，这将直接威胁到我国粮食安全[21]。因此急需找到切实可行的措施来提高SOC含量，从而降低黑土区进一步遭受侵蚀的风险。

现有研究主要涉及CO_2浓度增加以及秸秆还田单因素对SOC的影响，而二者交互作用对黑土团聚体有机碳分布的影响鲜有研究，因此，本研究以东北黑土为研究对象，探究大气CO_2浓度增加背景下，秸秆还田对土壤团聚体分布特征及团聚体有机碳含量的影响，以期为稳定黑土有机碳库提供可能的技术措施，并为该地区土壤质量和固碳能力的提升提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验区位于黑龙江省海伦市中国科学院海伦农业生态实验站（47°27′N，126°55′E），地处我国东北黑土区的中心。该地地形较为平坦，海拔高度240 m左右，温带大陆性季风气候，全年四季分明，雨热同期，夏季高温多雨，冬季寒冷干燥，年降水量500~600 mm，其中6—8月的降水量占全年总降水量的近70%，多年平均气温在1.5 ℃左右，≥10 ℃的活动积温为2 600~2 800 ℃，年平均无霜期130 d，年日照时数2 600~2 800 h，年总辐射量466 $kJ\cdot cm^{-2}$。农作物以一年一熟制为主。供试土壤为典型黑土，土壤母质为第四纪黄土状母质，含有40%的黏土、34%的砂土和26%的粉土，试验前耕层土壤（0~20 cm）有机碳含量为29.66 $g\cdot kg^{-1}$，全氮含量为2.08 $g\cdot kg^{-1}$，全磷含量为0.78 $g\cdot kg^{-1}$，全钾含量为21.37 $g\cdot kg^{-1}$，碱解氮含量为203.39 $mg\cdot kg^{-1}$，有效磷含量为29.98 $mg\cdot kg^{-1}$，速效钾含量为122.61 $mg\cdot kg^{-1}$，pH为6.05。

1.2 试验设计

气候变化长期定位试验开始于2012年5月，试验设置4个处理，分别为对照（CK）、增加CO_2浓度达1 259.72 $mg\cdot m^{-3}$（EC）、秸秆还田（ST）、增加CO_2浓度并秸秆还田（EC+ST），每个处理3次重复，随机分布于OTC开顶箱装置内。OTC为八角形，高3 m，内长1.2 m，体积20 m^3。OTC内为田间原位土壤，各小区间用埋深50 cm且高出地表10 cm的PVC板隔开，以阻止小区间土壤和水分的交叉影响（图1）。每个OTC作为一个试验小区，小区平均分为3部分，其中一部分种植作为秸秆材料的玉米（玉米品种为德美亚1号，种植密度为6株$\cdot m^{-2}$，每公顷施肥量为尿素174 kg、过磷酸钙40.2 kg、硫酸钾44.8 kg，生长过程中的水分依赖于自然降水），剩余两部分连作大豆（大豆品种为东升2号，种植密度为27株$\cdot m^{-2}$，每公顷施肥量为尿素63 kg、过磷酸钙24.1 kg、硫酸钾29.8 kg，生长过程中的水分依赖于自然降水）。通过OTC内圈网状管道向内喷射纯CO_2气体，CO_2排气管的高度距作物冠层50 cm左右（根据作物高度随时调整），并且通过30 m深的地下水循环来保持OTC内温度与外界温度一致。根据预设定的CO_2浓度自动调节CO_2气体的释放速度，使作物生育期内CO_2浓度维持在设定水平。秸秆为当年秋季收获的该小区内玉米全量秸秆，采用秸秆粉碎机将秸秆粉碎成3~4 cm长度后施入0~20 cm土壤中，并充分混匀。

图1 试验处理照片

Figure 1 Photo of the experimental treatments

1.3 土壤样品采集与测定

试验第9年（2020年）10月初采集大豆区土壤样品，取样深度为0~20 cm，用采样锹于每个小区取样3份，样品混合后作为一个重复。土样带回实验室，室内阴干，一部分保持从田间采集来的原样用于团聚体分级，另一部分磨碎过0.25 mm筛用于测定SOC含量。采用湿筛法进行水稳性团聚体筛分，将土壤分为5个粒级，分别为>1、>0.5~1、>0.25~0.5、>0.053~0.25 mm和≤0.053 mm；采用高温外加热重铬酸钾氧化-容量法测定SOC含量。

1.4 数据处理与分析

水稳性团聚体数量（$R_{0.25}$）计算公式：

$$R_{0.25}=\frac{M_{r>0.25}}{M}$$

式中：$M_{r>0.25}$为粒径大于0.25 mm大团聚体的质量，g；M为所有团聚体的质量，g。

平均质量直径（d_{MW}）计算公式：

$$d_{MW}=\sum_{i=1}^{n}X_i\times W_i$$

式中：X_i是各粒径下团聚体的平均直径，mm；W_i是与X_i对应的各粒级团聚体的质量百分比。

分形维数（D）计算公式：

$$(3-D)\lg\frac{d_i}{d_{\max}}=\lg\frac{W_{r\leqslant d_i}}{W}$$

式中：d_i为相邻两粒级团聚体的平均直径，mm；$d_{\max}$为最大土粒直径，mm；$W_{r\leqslant d_i}$为粒径小于等于d_i的团聚体的质量，g；W为所有团聚体的质量，g。

各粒级团聚体SOC贡献率=

$$\frac{\text{各粒级团聚体SOC含量}\times\text{各粒级团聚体占比}}{\text{总SOC含量}}\times100\%$$

采用Excel 2016和Origin 2019处理并制图，采用SPSS 23.0进行统计分析，P<0.05表示差异显著。

2 结果与分析

2.1 总SOC含量

CO_2浓度增加和秸秆还田对总SOC含量的影响如图2所示。CK、EC、ST和EC+ST处理中，土壤总SOC含量分别为31.31、31.30、31.37 g·kg^{-1}和34.40 g·kg^{-1}。与CK处理相比，EC处理的总SOC含量有减少趋势，而ST处理有增加趋势，但均未达到显著差异水平，而EC+ST处理使总SOC显著增加了3.09 g·kg^{-1}，且比EC和ST处理分别显著增加3.10 g·kg^{-1}和3.03 g·kg^{-1}（P<0.05）。

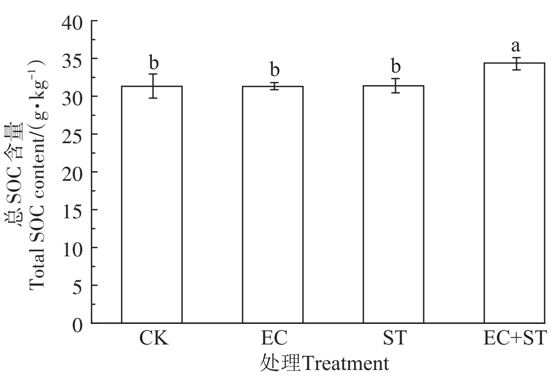
2.2 土壤团聚体粒径分布及其稳定性

CO_2浓度增加和秸秆还田对土壤团聚体分布的影响如图3所示。在团聚体各粒级中，>1 mm大团聚体的含量最少，占比为2.41%~8.33%。在ST处理中，>0.5~1 mm大团聚体的含量最多，占比为27.44%，而CK、EC和EC+ST处理的土壤团聚体以≤0.053 mm微团聚体为最多，分别占总量的41.61%、51.08%和34.84%。

与CK处理相比，CO_2浓度增加情况下EC处理土壤中>0.053 mm各粒级团聚体的占比有减少趋势，而≤0.053 mm微团聚体的占比有增加趋势，但均未有显著差异。与CK处理相比，ST处理土壤中>0.5~1 mm大团聚体的占比显著增加了14.98个百分点，而≤0.053 mm微团聚体的占比显著减少了12.88个百分点（P<0.05），>1 mm大团聚体与>0.053~0.25 mm微团聚体的占比均有减少趋势，>0.25~0.5 mm大团聚体的占比有增加趋势，但均未达到显著差异水平。与CK处理相比，CO_2浓度增加后EC+ST处理增加了大团聚体比例，减少了微团聚体占比，具体表现为>1 mm大团聚体和>0.5~1 mm大团聚体分别显著增加4.07个与8.20个百分点（P<0.05），≤0.5 mm各粒级团聚体均有减少趋势，但未达到显著差异水平。

由表1可以看出，与CK处理相比，EC处理使得土壤D增加0.06，$R_{0.25}$和d_{MW}有减少趋势，但均未达到显著差异水平，ST处理使土壤的$R_{0.25}$显著增加0.14，d_{MW}显著增加0.08 mm，D显著减少0.11（P<0.05），而EC+ST处理使土壤的d_{MW}显著增加了0.11 mm，$R_{0.25}$显著增加了0.12（P<0.05），D有减少趋势但未达到显著差异水平。

$R_{0.25}$表征土壤结构，d_{MW}表征土壤团聚体稳定性，而D表征土壤松散程度。由表1分析得出，与CK处理相比，EC处理使得土壤结构变差，团聚体稳定性下降，松散程度显著下降；ST处理使得土壤结构显著变好，团聚体稳性显著提升，松散程度显著提升；EC+ST



不同小写字母表示处理间差异显著（P<0.05）。下同。
Different lowercase letters indicate significant differences among treatments（P<0.05）. The same below.

图2 总SOC含量

Figure 2 Total SOC content

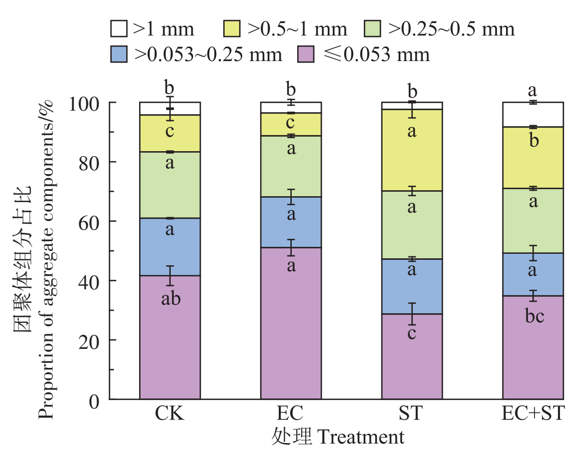


图3 各粒级团聚体组分占比

Figure 3 Distribution of various size aggregates

表1　不同处理土壤团聚体稳定性指标

Table 1　Stability indexes of soil aggregates

处理 Treatment	水稳性团聚体数量($R_{0.25}$) Number of water-stable aggregates	平均质量直径(d_{MW}) Average weight diameter/mm	分形维数(D) Fractal dimension
CK	0.39±0.03b	0.28±0.04b	2.74±0.02ab
EC	0.32±0.01b	0.23±0.01b	2.80±0.01a
ST	0.53±0.05a	0.36±0.03a	2.63±0.04c
EC+ST	0.51±0.01a	0.39±0.01a	2.69±0.01bc
		*P*值 *P*-Value	
CO_2	0.054	0.508	0.009
秸秆	<0.001	<0.001	<0.001
CO_2×秸秆	0.233	0.038	0.993

注：不同小写字母表示处理间存在显著差异(P<0.05)。下同。
Note: Different lowercase letters indicate significant differents among treamtments(P<0.05). The same below.

处理也可以增加>0.25 mm大团聚体数量，显著增加土壤团聚体的稳定性，提升土壤松散程度。同时还可以看出，增加CO_2浓度与秸秆还田的交互作用，不仅可以弥补增加CO_2浓度对土壤团聚体稳定性的负面影响，还可以使其稳定性维持甚至超过单独秸秆还田的水平，说明两因素之间存在正交互关系。

2.3　土壤团聚体SOC及其对总SOC的贡献率

CO_2浓度增加与秸秆还田会对土壤各粒级团聚体SOC含量产生影响(表2)。各处理中，随着团聚体粒径的减小，SOC含量均呈现下降的趋势。与CK处理相比，EC处理土壤中>1 mm大团聚体和>0.5~1 mm大团聚体的SOC含量有增加趋势，>0.25~0.5 mm大团聚体和>0.053~0.25 mm微团聚体的SOC含量有减少趋势，但均未达到显著差异水平，≤0.053 mm微团聚体的SOC含量增加了0.66 g·kg^{-1}。与CK处理相比，ST处理使>1 mm大团聚体的SOC含量增加0.55 g·kg^{-1}，>0.25~0.5 mm大团聚体的SOC含量减少1.13 g·kg^{-1}，同时使得>0.5~1 mm大团聚体和>0.053~0.25 mm微团聚体的SOC含量减少，≤0.053 mm微团聚体SOC增加，而EC+ST处理使得土壤中>1 mm大团聚体SOC含量显著减少了3.05 g·kg^{-1}，≤0.053 mm微团聚体SOC含量显著增加了1.98 g·kg^{-1}(P<0.05)，同时使>0.5~1 mm大团聚体的SOC含量减少，>0.25~0.5 mm大团聚体和>0.053~0.25 mm微团聚体的SOC含量增加，但均未达到显著差异水平。

CO_2浓度增加与秸秆还田会对土壤各粒级团聚体SOC的贡献率产生影响(图4)。ST处理以>0.5~1 mm大团聚体的SOC贡献率最高，而CK处理、EC处理与EC+ST处理中，≤0.053 mm微团聚体的SOC对总SOC的贡献率最高。

与CK处理相比，EC处理使得≤0.053 mm微团聚体的SOC贡献率显著增加9.14个百分点(P<0.05)，而>0.053 mm各粒级团聚体的SOC贡献率均有减少的趋势，但均未有显著差异。与CK处理相比，ST处理使>0.5~1 mm大团聚体的SOC贡献率显著增加14.35个百分点，使≤0.053 mm微团聚体的SOC贡献率显著

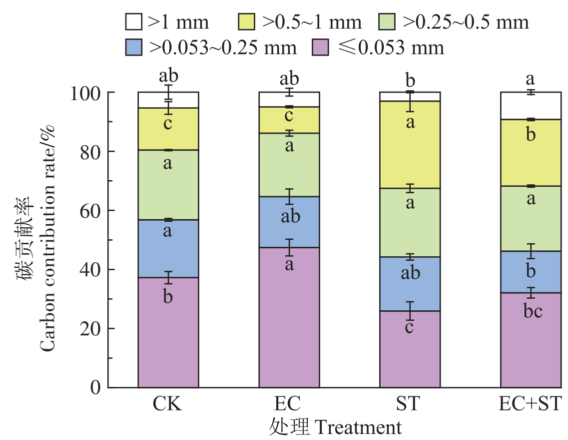


图4　各粒级土壤团聚体的SOC贡献率

Figure 4　Contribution rate of SOC in different size aggregates

表2　不同处理各粒级土壤团聚体SOC含量(g·kg^{-1})

Table 2　Content of SOC in soil aggregates(g·kg^{-1})

处理 Treatment	>1 mm	>0.5~1 mm	>0.25~0.5 mm	>0.053~0.25 mm	≤0.053 mm
CK	37.20±1.33b	33.72±0.19a	31.07±0.26ab	29.79±0.42a	26.37±0.62b
EC	40.48±0.33a	33.78±0.22a	30.35±0.62ab	29.45±0.09a	27.03±0.53b
ST	37.75±0.45b	31.69±0.74b	29.94±0.21b	29.15±0.69a	26.71±0.24b
EC+ST	34.15±0.77c	33.59±1.24ab	31.15±0.57a	30.11±0.03a	28.35±0.34a
			*P*值 *P*-Value		
CO_2	0.783	0.098	0.479	0.318	0.007
秸秆	<0.001	0.114	0.017	0.053	0.169
CO_2×秸秆	0.001	0.065	0.624	0.973	0.033

减少10.54个百分点(P<0.05),同时使得>1 mm大团聚体、>0.25~0.5 mm大团聚体和>0.053~0.25 mm微团聚体的SOC贡献率有减少趋势,但均未达到显著差异水平。而EC+ST处理相较于CK处理,土壤中>1 mm大团聚体和>0.5~1 mm大团聚体的SOC贡献率分别增加了3.25个和6.74个百分点,>0.053~0.25 mm微团聚体的SOC贡献率显著减少5.82个百分点(P<0.05),同时>0.25~0.5 mm大团聚体和≤0.053 mm微团聚体的SOC贡献率均有减少趋势,但都未达显著差异水平。

3 讨论

3.1 SOC对CO_2浓度增加和秸秆还田的响应

CO_2浓度增加背景下,秸秆还田提高了SOC含量。单一CO_2浓度增加或者秸秆还田对全土SOC含量影响不显著[22],而两者交互显著提高了全土SOC含量。其中的原因主要有两个方面:一是大气CO_2浓度升高会刺激土壤呼吸[23],从而削弱土壤SOC的提高[24];二是秸秆还田产生的外源有机碳投入是影响土壤SOC变化的重要因素,这与董林林等[24]的研究结果一致,并且土壤微生物群落对CO_2浓度敏感,有利于r生存策略微生物种类的生存,微生物自身养分的代谢及其对土壤有机物质的更新均有利于提高SOC的含量[25]。另外,CO_2浓度增加与秸秆还田对作物生长发育全过程产生影响,进而使得地上生物量显著提高,作物的凋落物与根系分泌物共同影响SOC含量。然而,单独秸秆还田使土壤团聚体中>0.053~1 mm粒径的各粒级团聚体SOC含量显著减少或有减少趋势,而>1 mm大团聚体与≤0.053 mm微团聚体中SOC含量显著增加,Six等[26]和冯秋苹等[27]的研究也得到了相同的结果,因为秸秆还田后,秸秆作为胶结剂在一定程度上促进了>0.053~1 mm粒径间的各粒级团聚体向>1 mm大团聚体的转化,微团聚体的固碳潜力普遍较低,且易达到碳饱和,因此新进入土壤的SOC主要储存在>1 mm大团聚体中[28]。单独秸秆还田时,总SOC含量没有显著变化,这与前人研究结果存在差异[29],推测是因为在交互处理中,>0.053~1 mm各粒级团聚体SOC对总SOC含量的贡献率高达58.66%(图4),而这部分粒级的团聚体占比显著降低,从而导致总SOC含量无显著变化。也有研究表明[30],玉米秸秆的输入对于SOC含量提升的作用主要发生在还田后的一年,在长期试验过程中,由于秸秆自身较快的分解速率和对土壤原有SOC产生的激发效应,共同导致SOC含量无显著差异。CO_2浓度增加后秸秆还田使得>0.5 mm大团聚体的SOC贡献率显著增加,≤0.5 mm粒级团聚体的SOC贡献率显著减少,这与吴雪里慧等[31]的研究结果一致,主要归因于更多外源碳的输入使得小团聚体受胶结剂影响转变为大团聚体,从而提高了大团聚体的SOC贡献率。单一增加CO_2使得>0.5~1 mm大团聚体和>0.25~0.5 mm大团聚体的SOC贡献率显著减少,而≤0.053 mm微团聚体的SOC贡献率显著增加,这与徐乔等[32]的研究结果一致,这可能与高浓度CO_2下输入土壤的新鲜有机物多,微生物倾向于利用新碳,将大团聚体破碎成小团聚体有关。

3.2 大气CO_2浓度增加和秸秆还田对黑土团聚体分布及稳定性的影响

秸秆还田可以弥补CO_2浓度增加对黑土团聚体结构的不利影响。本研究中CO_2浓度增加使>0.053 mm各粒级团聚体占比减少,而使≤0.053 mm微团聚体的占比增加,从而使得土壤$R_{0.25}$和d_{MW}减少,土壤D显著增加的结果可以支撑这一结论。这一结果与徐乔等[32]研究发现的大气CO_2浓度增加后土壤团聚体由大粒级向小粒级转变,团聚体稳定性降低的结果相一致。可能的原因是CO_2浓度增加使植物根系愈加发达,其穿插作用导致大粒级团聚体破碎分解为小粒级团聚体。秸秆还田后团聚体的变化情况恰好相反,总体表现为>0.25 mm各粒级大团聚体增多,≤0.25 mm各粒级微团聚体减少,土壤的$R_{0.25}$和d_{MW}显著增加,D显著降低,土壤团聚体结构趋于稳定。这与冯秋苹等[27]在东北西部半干旱区长期定位试验的研究结果一致:一方面是秸秆施入土壤,提高了SOC含量,SOC作为主要胶结物质将土壤颗粒和小粒级团聚体胶结成大团聚体,进而促进土壤大团聚体的形成;另一方面秸秆施入过程中,由于压实作用促进了一部分大团聚体的形成。CO_2浓度增加且添加秸秆的处理显著增加了>1 mm大团聚体和>0.5~1 mm大团聚体的比例,≤0.5 mm各粒级微团聚体占比均有下降趋势,增加了土壤的$R_{0.25}$和d_{MW},减少了D,土壤团聚体结构稳定性增强,这与郑凤君等[33]以及Xiao等[34]的研究结果一致。这是由于秸秆还田一方面提高了向土壤中输入的有机物量,因为有机物的含量与土壤稳定性呈正相关关系[35-36],从而使得土壤的团聚体结构性更好。另一方面是在良好的土壤结构前提下,CO_2浓度提升后,微生物群落的活性明显增加[37],从而产生更多的有机胶结物质,有机碳和胶结物质的进一步增加,使得土壤中微团聚体更易于胶结,形成更多的大团聚体。此外,在CO_2浓度增加背景下,秸秆还田不仅弥补了单独

CO_2浓度增加对土壤团聚结构的负面影响,而且二者表现出对土壤团聚体稳定性具有明显的正交互作用。因此,适宜的秸秆还田可以有效改善土壤团聚体结构,提高土壤团聚体的稳定性,并增加SOC含量。

4 结论

单独大气CO_2浓度连续升高以及单独秸秆还田处理9 a后,黑土有机碳含量并未出现明显变化,但二者均对团聚体有机碳分布造成影响,具体表现为高浓度CO_2增加了≤0.053 mm微团聚体有机碳含量及其对总有机碳的贡献率,秸秆还田处理增加了>1 mm大团聚体有机碳含量,同时降低了>0.25~0.5 mm微团聚体中有机碳含量,并使得>0.5~1 mm大团聚体对有机碳的贡献率提高,≤0.053 mm微团聚体的贡献率下降。然而,在增加CO_2浓度背景下秸秆还田显著增加了土壤有机碳含量,并且其主要来源于≤0.053 mm微团聚体有机碳。因此,在未来大气CO_2浓度增加背景下,秸秆还田对土壤固碳有积极意义,值得在东北黑土区推广。

参考文献:

[1] O′NEILLB C, OPPENHEIMER M, WARREN R, et al. IPCC reasons for concern regarding climate change risks[J]. *Nature Climate Change*, 2017, 7(1):28-37.

[2] 杨敏慎, 刘晓雨, 郭辉. 气候变暖和CO_2浓度升高对农作物的影响[J]. 江苏农业学报, 2021, 37(1):246-258. YANG M S, LIU X Y, GUO H. Effects of climate warming and elevated CO_2 concentration on crops[J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2021, 37(1):246-258.

[3] MINAKSHI G, MAHESWARI M, SUSEELENDRA D, et al. Elevated CO_2: plant associated microorganisms and carbon sequestration[J]. *Applied Soil Ecology*, 2015, 95:73-85.

[4] 王艳红, 于镇华, 李彦生, 等. 植物-土壤-微生物间碳流对大气CO_2浓度升高的响应[J]. 土壤与作物, 2018, 7(1):22-30. WANG Y H, YU Z H, LI Y S, et al. Carbon flow in the plant-soil-microbe continuum in response to atmospheric elevated CO_2[J]. *Soils and Crops*, 2018, 7(1):22-30.

[5] HOPKINS F M, FILLEY T R, GLEIXNER G, et al. Increased belowground carbon inputs and warming promote loss of soil organic carbon through complementary microbial responses[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, 76:57-69.

[6] VAN GROENIGEN K J, QI X, OSENBERG C W, et al. Faster decomposition under increased atmospheric CO_2 limits soil carbon storage[J]. *Science*, 2014, 344(6183):508.

[7] LANGLEY J A, MCKINLEY D C, WOLF A A, et al. Priming depletes soil carbon and releases nitrogen in a scrub-oak ecosystem exposed to elevated CO_2[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, 41(1):54-60.

[8] VAN KESSEL C, BOOTS B, DE GRAAFF M A, et al. Total soil C and N sequestration in a grassland following 10 years of free air CO_2 enrichment[J]. *Global Change Biology*, 2006, 12(11):2187-2199.

[9] 房娜娜, 刘凯, 刘国栋, 等. 黑土肥力质量评价的生物指标研究进展[J]. 地质与资源, 2020, 29(6):518-524, 542. FANG N N, LIU K, LIU G D, et al. Research progress on biological indicators of black soil fertility quality evaluation[J]. *Geology and Resources*, 2020, 29(6):518-524, 542.

[10] SMITH P, POWLSON D S. Considering manure and carbon sequestration[J]. *Science*, 2000, 287(5452):428-429.

[11] 李昌新, 黄山, 彭现宪, 等. 南方红壤稻田与旱地土壤有机碳及其组分的特征差异[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(3):606-611. LI C X, HUANG S, PENG X X, et al. Differences in soil organic carbon fractions between paddy field and upland field in red soil region of south China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(3):606-611.

[12] 高洪军, 彭畅, 张秀芝, 等. 秸秆还田量对黑土区土壤及团聚体有机碳变化特征和固碳效率的影响[J]. 中国农业科学, 2020, 53(22):4613-4622. GAO H J, PENG C, ZHANG X Z, et al. Effects of corn straw returning amounts on carbon sequestration efficiency and organic carbon change of soil and aggregate in the black soil area[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53(22):4613-4622.

[13] 高洪军, 彭畅, 张秀芝, 等. 不同秸秆还田模式对黑钙土团聚体特征的影响[J]. 水土保持学报, 2019, 33(1):75-79. GAO H J, PENG C, ZHANG X Z, et al. Effects of different straw returning modes on characteristics of soil aggregates in chernozem soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(1):75-79.

[14] 刘恩科, 赵秉强, 梅旭荣, 等. 不同施肥处理对土壤水稳定性团聚体及有机碳分布的影响[J]. 生态学报, 2010, 30(4):1035-1041. LIU E K, ZHAO B Q, MEI X R, et al. Distribution of water-stable aggregates and organic carbon of arable soils affected by different fertilizer application[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(4):1035-1041.

[15] 陈学文, RICHARD M C, BRIAN K G, 等. 土壤侵蚀日发布系统[J]. 土壤与作物, 2017, 6(4):312-319. CHEN X W, RICHARD M C, BRIAN K G, et al. Introduction of daily erosion project[J]. *Soils and Crops*, 2017, 6(4):312-319.

[16] BRONICK C J, LAL R. Manuring and rotation effects on soil organic carbon concentration for different aggregate size fractions on two soils in northeastern Ohio, USA[J]. *Soil & Tillage Research*, 2004, 81(2):239-252.

[17] SIX J, BOSSUYT H, DEGRYZE S, et al. A history of research on the link between(micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics[J]. *Soil and Tillage Research*, 2004, 79(1):7-31.

[18] SIX J, PAUSTIAN K. Aggregate-associated soil organic matter as an ecosystem property and a mersurement tool[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, 68:4-9.

[19] ZHANG Y, GE N N, LIAO X L, et al. Long-term afforestation accelerated soil organic carbon accumulation but decreased its mineralization loss and temperature sensitivity in the bulk soils and aggregates[J]. *Catena*, 2021, 204:105405.

[20] 孟凡杰, 于晓芳, 高聚林, 等. 黑土地保护性耕作发展的制约瓶颈和突破路径[J]. 农业经济问题, 2020(2):135-142. MENG F J, YU X F, GAO J L, et al. The bottleneck and breakthrough path of the conservation tillage development in black soil of northeast China[J].

Issues in Agricultural Economy, 2020(2):135-142.

[21] 韩晓增, 李娜. 中国东北黑土地研究进展与展望[J]. 地理科学, 2018, 38(7):1032-1041. HAN X Z, LI N. Research progress of black soil in northeast China[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2018, 38(7):1032-1041.

[22] 赵方杰. 洛桑试验站的长期定位试验:简介及体会[J]. 南京农业大学学报, 2012, 35(5):147-153. ZHAO F J. Long-term experiments at Rothamsted experimental station: introduction and experience[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2012, 35(5):147-153.

[23] ANDREW B M, GAINES S J, SIEGWOLF R T W, et al. Diffusive fractionation complicates isotopic partitioning of autotrophic and heterotrophic sources of soil respiration[J]. *Plant, Cell & Environment*, 2010, 33(11):1804-1819.

[24] 董林林, 查金芳, 沈明星, 等. 长期秸秆还田对稻麦轮作区土壤有机碳组分构成的影响[J]. 中国农业科技导报, 2022, 24(3):166-175. DONG L L, ZHA J F, SHEN M X, et al. Effect of long-term straw returning on soil organic carbon fractions composition in rice-wheat rotation ecosystem[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2022, 24(3):166-175.

[25] 刘芙蓉, 王红梅, 张咏梅. 增温和CO_2浓度加倍对川西亚高山针叶林土壤可溶性有机碳、氮的影响[J]. 生态学杂志, 2013, 32(11):2844-2849. LIU F R, WANG H M, ZHANG Y M. Effects of elevated temperature and doubled CO_2 concentration on soil dissolved organic carbon and nitrogen in a subalpine coniferous forest of western Sichuan, southwest China[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2013, 32(11):2844-2849.

[26] SIX J, PAUSTIAN K, ELOT E T, et al. Soil structure and organic matter. Ⅰ. Distribution of aggregate-size classes and aggregate- associated carbon[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, 64(2):681-689.

[27] 冯秋苹, 刘玉涛, 郭勇智, 等. 不同秸秆还田方式对土壤团聚体稳定性及有机碳含量的影响[J/OL]. 吉林农业大学学报:1-13[2022-11-04]. http://kns. cnki. net/kcms/detail/22. 1100. S. 20220526. 1856. 005. html. FENG Q P, LIU Y T, GUO Y Z, et al. Effects of different straw returning to fields methods on the stability of soil aggregates and organic carbon[J/OL]. *Journal of Jilin Agricultural University*:1-13[2022-11-04]. http://kns. cnki. net/kcms/detail/22. 1100. S. 20220526. 1856. 005. html.

[28] 任荣秀, 杜章留, 孙义亨, 等. 华北低丘山地不同土地利用方式下土壤团聚体及其有机碳分布特征[J]. 生态学报, 2020, 40(19):6991-6999. REN R X, DU Z L, SUN Y H, et al. Soil aggregate and its organic carbon distribution characteristics at different land use patterns in hilly areas of north China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(19):6991-6999.

[29] RONG H, DONG T, JIANG L, et al. Responses of soil carbon pool and soil aggregates associated organic carbon to straw and straw-derived biochar addition in a dryland cropping mesocosm system[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2018, 265:576-586.

[30] 徐英德, 汪景宽, 王思引, 等. 玉米残体分解对不同肥力棕壤团聚体组成及有机碳分布的影响[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(7):1029-1037. XU Y D, WANG J K, WANG S Y, et al. Effects of maize residue decomposition on aggregate composition and organic carbon distribution of different fertilities brown soils[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2018, 26(7):1029-1037.

[31] 吴雪里慧, 魏亚伟, 马澜桐, 等. 辽西北半干旱区不同林型土壤团聚体与有机碳的关系[J]. 沈阳农业大学学报, 2020, 51(6):641-648. WU X L H, WEI Y W, MA L T, et al. Relationship between soil aggregates and organic carbon in different forest types in the semi-arid areas of northwestern Liaoning[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2020, 51(6):641-648.

[32] 徐乔, 朱建国, 朱春梧, 等. 大气CO_2浓度升高对水稻土团聚体的分布与有机碳含量的影响[J]. 土壤, 2014, 46(6):989-996. XU Q, ZHU J G, ZHU C W, et al. Effects of elevated CO_2 on soil aggregation and soil organic carbon allocation in a rice paddy field[J]. *Soils*, 2014, 46(6):989-996.

[33] 郑凤君, 王雪, 李生平, 等. 免耕覆盖下土壤水分、团聚体稳定性及其有机碳分布对小麦产量的协同效应[J]. 中国农业科学, 2021, 54(3):596-607. ZHENG F J, WANG X, LI S P, et al. Synergistic effects of soil moisture, aggregate stability and organic carbon distribution on wheat yield under no-tillage practice[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2021, 54(3):596-607.

[34] XIAO Y, ZHOU M, LI Y S, et al. Crop residue return rather than organic manure increases soil aggregate stability under corn-soybean rotation in surface Mollisols[J]. *Agriculture*, 2022, 12(2):265.

[35] 徐子斌, 李雷, 王鸿斌, 等. 不同耕作方式对黑土团聚体及其有机碳分布特征的影响[J/OL]. 吉林农业大学学报:1-9[2022-11-04]. https://doi.org/10.13327/j.jjlau.2021.1767. XU Z B, LI L, WANG H B, et al. Effects of different tillage methods on aggregate and organic carbon distribution in black soil[J/OL]. *Journal of Jilin Agricultural University*: 1-9[2022-11-04]. https://doi. org / 10.13327 / j. jjlau. 2021.1767.

[36] 牛浩, 罗万清, 王晋峰, 等. 冻融对东北黑土风干团聚体与水稳性团聚体组成及稳定性的影响[J]. 土壤通报, 2020, 51(4):841-847. NIU H, LUO W Q, WANG J F, et al. Effects of freeze-thaw on the composition and stability of air-dried and water-stable aggregates of black soil in northeast China[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2020, 51(4):841-847.

[37] 彭新华, 张斌, 赵其国. 土壤有机碳库与土壤结构稳定性关系的研究进展[J]. 土壤学报, 2004, 41(4):618-623. PENG X H, ZHANG B, ZHAO Q G. A review on relationship between soil organic carbon pools and soil structure stability[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(4):618-623.

(责任编辑:李丹)