

大气温度和 CO₂ 增加对黑土有机碳稳定性的影响

薛海清, 岳娅, 冯茜, 龙杰琦, 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: [目的] 从有机碳分子结构角度来揭示气候变化对黑土有机碳(SOC)稳定性的影响, 阐明未来气候变化对黑土有机碳稳定性以及土壤肥力的影响。[方法] 以中国科学院海伦农业生态试验站长期定位模拟气候变化开顶箱(OTC)试验为平台, 对当前大气温度和 CO₂ 浓度(aTaCO₂), 升温 2 °C 和当前大气 CO₂ 浓度(eTaCO₂), 升温 2 °C 和 CO₂ 浓度增为(700±25) μmol/mol(eTeCO₂) 3 个处理条件下 0—20 cm 黑土耕层土壤的团聚体和密度组分的有机碳含量和红外光谱特征进行分析。[结果] 与 aTaCO₂ 相比, eTaCO₂ 和 eTeCO₂ 均未对全土有机碳含量产生显著影响($p>0.05$), 但是 eTaCO₂ 使<0.053 mm 团聚体和闭蓄态轻组(occluded light fractionation, OF)中 SOC 含量分别增加了 13.45% 和 52.89% ($p<0.05$); eTeCO₂ 处理中游离态轻组(free light fractionation, LF)SOC 含量增加了 46.89% ($p<0.05$)。红外光谱分析结果表明: 与 aTaCO₂ 相比, eTaCO₂ 和 eTeCO₂ 处理均对全土有机碳的分子结构产生了影响, 尤其是 eTeCO₂ 处理除了脂肪族外, 其他官能团特征峰相对强度均受到显著影响($p<0.05$)。eTeCO₂ 处理减弱了全土以及 >0.25 mm 团聚体有机碳的脂肪性, 增加了 0.25~0.053 mm 团聚体中有机碳的官能团(-CH/C=C)比值 ($p<0.05$), 且主成分分析结果表明: 气候变化影响较大的官能团为醇酚、脂肪族、芳香族和多糖。此外, 相比于 aTaCO₂, eTaCO₂ 和 eTeCO₂ 处理使得 LF 和 OF 组分中有机碳的 -CH/C=C 比值升高, 加速了轻组有机碳脂肪化。[结论] 气候变化未对黑土有机碳含量产生影响, 虽然增温和增 CO₂ 对有机碳分子结构组分和比例有不同程度的影响, 但最终黑土有机碳储量保持稳定。在合理利用的前提下, 未来气候变化可能对黑土有机碳库储量的影响不大, 黑土肥力水平仍能维持。

关键词: 气候变化; 有机碳; 团聚体; 黑土; 密度组分; 红外光谱

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2023)03-0366-08

中图分类号: S153.6

文献参数: 薛海清, 岳娅, 冯茜, 等. 大气温度和 CO₂ 增加对黑土有机碳稳定性的影响[J]. 水土保持通报, 2023, 43(3): 366-373. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.20230221.002; Xue Haiqing, Yue Ya, Feng Qian, et al. Effects of elevated temperature and CO₂ enrichment on stability of soil organic carbon storage in mollisols [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(3): 366-373.

Effects of Elevated Temperature and CO₂ Enrichment on Stability of Soil Organic Carbon Storage in Mollisols

Xue Haiqing, Yue Ya, Feng Qian, Long Jieqi, Miao Huan, Miao Shujie, Qiao Yunfa

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

Abstract: [Objective] The effects of climate change on the stability of organic carbon were revealed from the perspective of the molecular structure of organic carbon in order to provide a theoretical basis for clarifying the impact of future climate change on organic carbon stability and soil fertility in mollisols. [Methods] A long-term field experiment dealing with the simulation of climate change through the use of open-top chambers (OTCs) at the Hailun Agroecological Experiment Station of the Chinese Academy of Sciences provided data for this study. We analyzed the organic carbon content and infrared spectral characteristics of various aggregates and density fractions in the 0—20 cm topsoil of black soil under three treatments: ① ambient temperature and CO₂ concentration (aTaCO₂); ② temperature elevated by 2 °C and ambient CO₂ concentration (eTaCO₂); ③ temperature elevated by 2 °C and CO₂ enrichment to (700±25) μmol/mol (eTeCO₂).

收稿日期: 2022-09-19

修回日期: 2022-11-12

资助项目: 2022 年度江苏省碳达峰碳中和科技创新专项资金“农业农村领域重大关键技术攻关‘稻麦轮作生态系统应对气候变化的影响及适应性技术研究’”(BE2022312); 江苏省碳达峰碳中和科技创新专项资金(BK20220017-04); 国家自然科学基金项目(42177279)

第一作者: 薛海清(1996—), 女(汉族), 山西省大同市人, 硕士研究生, 研究方向为气候变化与黑土有机碳稳定性。Email: xhq718418@163.com。

通信作者: 乔云发(1975—), 男(汉族), 黑龙江省讷河市人, 博士, 研究员, 主要从事黑土农田碳氮物质循环研究。Email: qiaoyunfa@163.com。

[Results] Neither eTaCO₂ nor eTeCO₂ significantly affected organic carbon content of the bulk soil compared with aTaCO₂ ($p > 0.05$). However, eTaCO₂ increased soil organic carbon (SOC) contents by 13.45% and 52.89% in the < 0.053 mm size aggregates and occluded light fraction (OF), respectively, ($p < 0.05$). eTeCO₂ increased SOC content by 46.89% in the free light fraction (LF) ($p < 0.05$). Compared with aTaCO₂, both eTaCO₂ and eTeCO₂ treatments significantly influenced the SOC molecular structure of the bulk soil. The relative intensity of other functional groups was significantly affected, except for the aliphatic group ($p < 0.05$). Moreover, eTeCO₂ weakened the aliphatic group of organic carbon in the bulk soil and the > 0.25 mm size aggregate, but increased the $-CH/C=C$ ratio of organic carbon in the 0.25—0.053 mm size aggregates ($p < 0.05$). Alcohols, aliphatic, aromatic, and polysaccharides were the major functional groups affected by climate change. Furthermore, compared with aTaCO₂, eTaCO₂ and eTeCO₂ increased the $-CH/C=C$ ratio in the LF and OF fractions, accelerating lipolysis in light fractions of organic carbon.

[Conclusion] Climate change had no effect on the content of organic carbon in mollisols. Although increased temperature and CO₂ had different effects on the composition and proportion of organic carbon molecular structure, organic carbon storage remained stable in mollisols. Climate change may have little effect on soil organic carbon storage, and the fertility level of the black soil can still be maintained.

Keywords: climate change; organic carbon; aggregates; mollisols; density fractions; infrared spectroscopy

全球土壤有机碳含量约是大气碳含量的 3 倍,土壤有机碳微小变化都会影响 CO₂ 的释放^[1],CO₂ 浓度升高以及引起的气候变暖也会通过对地表植被产生影响,从而间接影响土壤有机碳矿化过程来对土壤有机碳稳定性和更新周转产生作用^[2],而土壤有机碳周转与更新是保证土壤肥力的基础。因此,探究农田土壤有机碳稳定性与周转更新对于土壤肥力提升以及应对气候变化具有重要意义。目前,大气 CO₂ 浓度已经突破 400 $\mu\text{mol/mol}$,据 IPCC 评估报告指出,21 世纪末大气 CO₂ 浓度将达到 700 $\mu\text{mol/mol}$,导致全球气温上升 1.5~2 $^{\circ}\text{C}$ ^[3]。这种外部环境因素的变化对土壤有机碳以及周转更新涉及的碳源/汇效应引起了学术界的高度重视。

气候变化对土壤有机碳影响是一个长期的生态过程,不同气候因子对其的影响具有差异性。有研究表明 CO₂ 浓度升高对土壤有机碳库影响很小或不利于土壤有机碳积累^[4],主要是促进了土壤大团聚体有机碳的周转速率^[5]。Gestel 等^[6]采用 META 分析发现,增温对土壤碳净储量没有产生显著影响。但李晓菡等^[7]研究发现增温会造成土壤有机碳(SOC)损失。而将增温与增 CO₂ 结合进行研究发现,两者的交互作用会促进土壤分解速率的增加,导致土壤有机碳滞留时间减少,加速有机碳周转与更新^[8]。可见,气候变化对土壤有机碳的影响仍存有争议。开顶式气室(OTC)被广泛应用于探究温度和 CO₂ 浓度对植物以及土壤影响的相关研究^[9]。有机碳分子结构(官能团)是影响土壤有机碳功能和稳定的重要内因^[10],能从本质上反映土壤有机碳的稳定和周转更新状况。国内外研究有机碳分子结构多采用傅里叶红外光谱

分析法(FTIR),与传统化学方法相比,此方法高效、快捷、无污染,在研究土壤有机碳分子结构方面具有独特的优势^[11]。张福韬等^[12]采用红外光谱法研究发现长期玉米连作使得 > 2 mm 团聚体和各密度组分脂肪族 $-CH$ 增加,脂肪性增强,黑土有机质稳定性下降。

东北黑土区是世界三大黑土带之一,有机碳含量高,对气候变化响应敏感^[13-14]。目前,有关气候变化对土壤有机碳稳定性的影响的研究已很多,但研究年限较短(1~5 a),而气候变化对土壤有机碳的影响是一个长期的过程,且这些研究多采用盆栽试验,不能完全代表田间土壤有机碳受气候变化的实际影响,需要通过田间原位试验进一步验证^[7,15-16]。从有机碳分子结构角度揭示土壤有机碳稳定性应对气候变化的响应机制鲜有报道。

因此,本研究采用连续 8 a 模拟气候变化的田间原位土壤,利用傅里叶红外光谱法从有机碳分子结构角度探究长期气候变化对黑土有机碳含量以及官能团的影响,旨在阐明未来气候变化对黑土有机碳稳定性以及土壤肥力的影响。

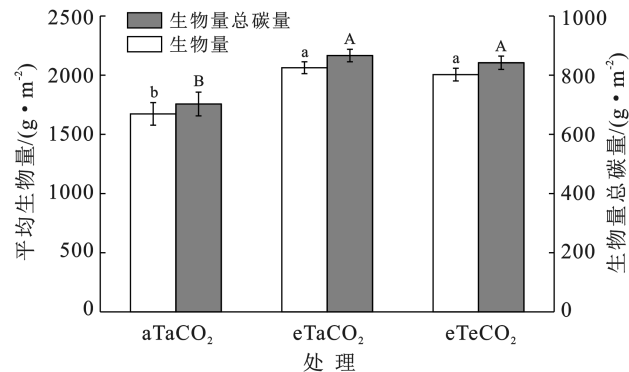
1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验区位于黑龙江省海伦市的中国科学院海伦农业生态试验站(47°26'N,126°38'E),该区处于中国东北黑土区的核心地带,气候为温带大陆性季风气候,冬季寒冷,夏季高温多雨,雨热同期,年平均气温 1.5 $^{\circ}\text{C}$,年均降雨量 550 mm,主要集中于 5—9 月,无霜期 125~135 d。土壤类型为典型黑土。

1.2 试验设计与样品采集

本试验依托中国科学院海伦农业生态试验站长期定位模拟气候变化开顶箱(OTC)试验平台,该平台于 2011 年建立。开顶箱为八角形结构,由不锈钢和 3 mm 厚无色透明玻璃构建,透光率达 80% 以上,高 3 m,直径为 3 m,面积为 20 m²,顶端设有 45° 缩口,缩口长为 1.1 m。CO₂ 气体通过 OTC 内可移动管道喷洒,管道的高度保持在冠层顶端 50 cm 处,喷洒时间为 6:00—18:00。CO₂ 监测系统实时监测调节 CO₂ 浓度,并自动控制温度。温度控制和增加 CO₂ 的详细方法参照 Qiao Yunfa 等^[17]。该试验为田间原位小区试验,设置当前大气温度和 CO₂ 浓度 400 μmol/mol(aTaCO₂),大气增温 2 °C 和大气 CO₂ 浓度 400 μmol/mol(eTaCO₂),大气增温 2 °C 和 CO₂ 浓度增加到(700±25) μmol/mol(eTeCO₂) 3 个处理,每个处理 3 次重复,共 9 个 OTC。OTC 内连作玉米,供试玉米品种为德美亚 1 号,每年 5 月 3 日播种,种植密度为 6.0 株/m²,施肥量为氮(N):17.4 g/m²,磷(P):4.02 g/m²,钾(K):4.48 g/m²,肥料种类为尿素、磷酸二氢钙、硫酸钾化肥。田间管理参照当地农业生产。9 月 30 日收获,地上部分移除,根茬粉碎翻耕还田,根茬碳输入量为 65 g/m²。于 2019 年 10 月 6 日采用 S 型 5 点采样法,采集 0—20 cm 耕层土壤。2011—2019 年年均生物量、生物量总碳量见图 1。



注:①不同小写字母表示处理间生物量差异显著水平,不同大写字母表示处理间生物量总碳量差异显著水平($p < 0.05$); ②aTaCO₂, eTaCO₂, eTeCO₂ 3 个处理条件分别表示当前大气温度和 CO₂ 浓度,增温 2 °C 和当前大气 CO₂ 浓度,增温 2 °C 和 CO₂ 浓度增为(700±25) μmol/mol。下同。

图 1 2011—2019 年年均生物量以及生物量总碳量

Fig. 1 Average biomass and total carbon of biomass from 2011 to 2019

1.3 试验方法与测定项目

(1) 团聚体分组。采用湿筛法分离不同粒级的团聚体^[18],选取 0.25 mm 和 0.053 mm 孔径的套筛,称取 50.00 g 风干土样放入三角瓶中,沿杯壁滴入适量的蒸馏水将土样糊化 5 min,之后将糊化过的土样放入

2 mm 的筛子上,保证筛子的最上缘在最低位置时仍距水面 1 cm,振幅为 4 cm,速度 20 次/min,筛分 5 min。筛分后得到 >0.25, 0.25~0.053, <0.053 mm 3 个粒级的团聚体。将得到的 3 个粒级的土样转移至称重的烧杯中,在烘箱中恒温 65 °C 烘干称重后保存。

(2) 密度分组。参照 Golchin 等^[19],称取过 0.25 mm 孔筛的风干土样 10.000 g 置于 100 ml 离心管中,加入 50 ml 碘化钠($d = 1.7 \text{ g/cm}^3$)溶液,用手反复翻转 5 次,以 3 500 r/min 离心 15 min,然后将上层溶液吸出后用 0.45 μm 滤膜过滤,用 0.01 mol/L CaCl₂ 溶液和蒸馏水反复洗涤 3~5 次,转移至已称重的烧杯中,最后烘干称重,这一组分为游离态轻组(LF);向离心管里继续加 50 ml 碘化钠溶液,超声破碎 15 min (40 Hz, 100 W),离心、过滤洗涤同上,转移至塑料烧杯中,最后烘干称重,这一组为闭蓄态轻组(OF);离心管内加 50 ml 蒸馏水,振荡 20 min,4 000 r/min 离心 20 min,重复操作 3 次,管内沉淀用 95% 乙醇反复洗涤至无色,放入鼓风干燥箱低于 40 °C 烘干后称重,这一组分为矿质态组(MF)。

(3) 有机碳含量和有机碳红外光谱测定。使用元素分析仪(Vario EL III)和傅里叶红外光谱仪(Nicolet-6 700 型)分别测定全土、不同粒级的团聚体以及密度组分有机碳含量和红外光谱特征^[12]。

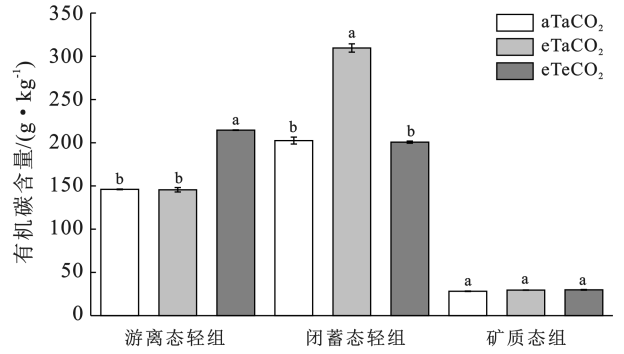
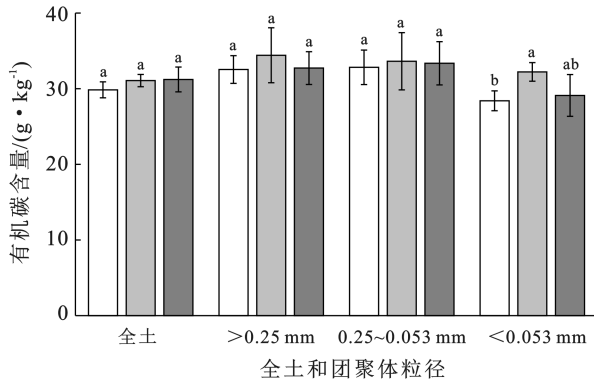
1.4 数据分析

使用 Excel 2010 整理数据,然后利用 SPSS 21.0 进行单因素统计分析,置信度为 95%,显著性水平为 $p < 0.05$ 。采用 Ommic Version 8.0 对红外光谱图像进行光滑和基线校准,并计算相对峰面积,对土壤红外光谱数据进行主成分分析(PCA)得到不同处理间土壤有机碳分子结构差异,并通过因子载荷图对处理间差异贡献较大的土壤有机碳分子结构进行分析。处理后的数据使用 Origin 8.0 作图。

2 结果与分析

2.1 全土和团聚体以及各密度组分的有机碳含量

与对照(aTaCO₂)相比,8 a 增温和增 CO₂ 使全土有机碳含量有增加的趋势,但未达到差异显著水平($p > 0.05$,图 2),表明气候变化对土壤有机碳的影响是一个长期且缓慢的过程。从团聚体中碳分布的情况来看,>0.053 mm 粒级团聚体中有机碳含量没有受到显著影响,而在 <0.053 mm 团聚体中,eTaCO₂ 处理有机碳含量比 aTaCO₂ 处理增加了 13.45% ($p < 0.05$)。土壤有机碳密度分组中,eTaCO₂ 处理使得闭蓄态组分有机碳增加 52.89%,eTeCO₂ 处理使轻组分有机碳增加了 46.89% ($p < 0.05$),3 个处理的矿质态组分有机碳含量无显著变化。



注:全土、同一粒度团聚体以及同一密度组分不同处理之间采用单因素方差分析,不同小写字母表示处理间差异显著水平($p < 0.05$)。下同。

图2 全土和不同粒度团聚体以及各密度组分有机碳含量

Fig.2 Carbon content in bulk soil and all aggregates and density fractions

2.2 增温和增 CO₂ 对黑土有机碳红外光谱特征的影响

大气温度和 CO₂ 浓度升高条件下,全土、不同粒度团聚体以及密度组分有机碳的红外光谱特征峰主要集中在 3 440, 2 960, 2 920, 1 635, 1 390, 1 040 cm⁻¹。依据红外光谱吸收峰归属,波数 3 440 cm⁻¹为缔合醇酚-OH 伸缩震动;波数 2 960, 2 920 cm⁻¹代表脂肪族 C-H 伸缩震动;波数 1 635 cm⁻¹代表芳香族 C=C 伸缩震动,主要来源于

酰胺;波数 1 390 cm⁻¹代表甲基伸缩震动;波数 1 042 cm⁻¹代表碳水化合物或者多糖结构中的 C-O 伸缩震动。本研究选取 3 440, (2 960 + 2 920), 1 635, 1 390, 1 042 cm⁻¹处的峰面积分别代表醇酚、脂肪族、芳香族、甲基和亚甲基、多糖。本研究黑土有机碳中醇酚和多糖含量最高,脂肪族和芳香族次之,甲基和亚甲基最少(图 3)。比较而言,增温和增 CO₂ 并未引起有机碳官能团种类变化,但其各官能团特征峰发生了变化。

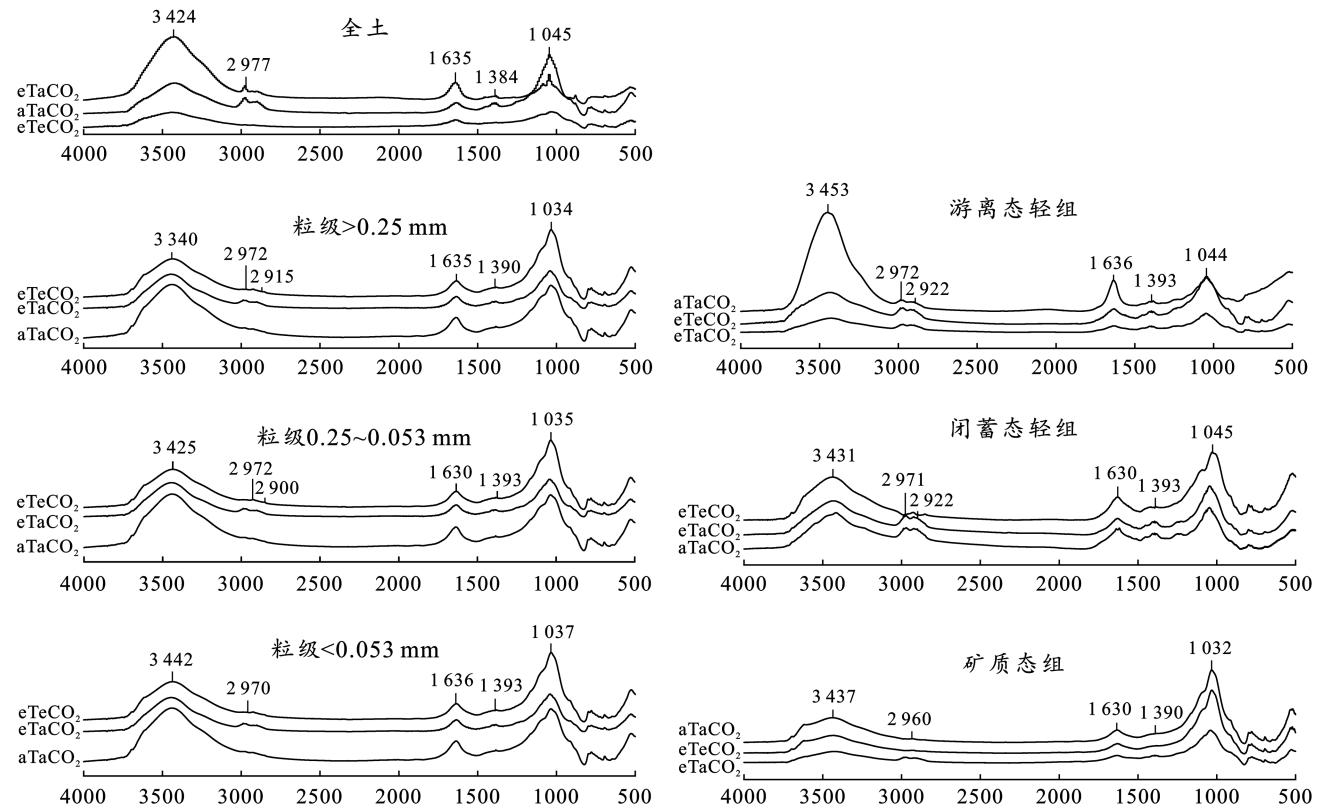


图3 全土、不同粒度团聚体以及密度组分的红外光谱图

Fig. 3 FTIR spectra of organic matter in bulk soil and all aggregates and each density fractions

2.3 增温和增 CO₂ 对土壤有机碳特征峰相对强度的影响

2.3.1 全土和团聚体中有机碳特征峰相对强度 特征峰相对强度是指某一特征峰的面积占总峰面积的比例,反映该特征峰所对应的官能团占总官能团的比例。 $-\text{CH}/\text{C}=\text{C}$ 能够表示有机碳稳定性,比值越高,有机碳活性组分含量越高,有机碳越不稳定。长期增温和增 CO₂ 使全土有机碳相对峰强度发生变化(表 1)。与 aTaCO₂ 相比,eTaCO₂ 处理全土有机碳中醇酚-OH 的相对峰强度降低了 49.10%;脂肪族-CH,芳香族 C=C,甲基-CH₃,多糖 C-O 相对峰强度分别增加了 120.57%,56.08%,593.33%和 100.2%;羧基 C=O 相对峰强度未受显著影响。eTeCO₂ 处理全土有机碳中醇酚的相对峰强度降低了 34.37%,羧基 C=O,芳香族 C=C,甲基-CH₃,多糖 C-O 相对峰强度分别增加了 116.13%,163.49%,574.44%和 80.72%,而 CH/C=C 比值降低了 86.47%($p < 0.05$)。

如表 1 所示,各粒级团聚体有机碳的醇酚-OH 和多糖 C-O 相对峰强度相对较高,而羧基 C=O,芳

香族 C=C 等稳定成分较低。在 >0.25 mm 粒级大团聚体中,与 aTaCO₂ 相比,eTaCO₂ 处理的醇酚-OH 和多糖 C-O 无显著变化,脂肪族-CH 相对峰强度降低 40.10%,羧基 C=O,芳香族 C=C,甲基-CH₃ 相对峰强度显著增加($p < 0.05$),增幅分别为 61.54%,44.07%和 69.72%, $-\text{CH}/\text{C}=\text{C}$ 比值显著降低了 61.78%($p < 0.05$);eTeCO₂ 处理醇酚-OH 和多糖 C-O 相对峰强度分别降低了 24.78%和 30.86%, $-\text{CH}/\text{C}=\text{C}$ 比值显著降低 56.05%($p < 0.05$),说明脂肪化程度降低。

在 0.25~0.053 mm 团聚体中,与 aTaCO₂ 相比,eTaCO₂ 处理特征峰强度无显著差异,eTeCO₂ 处理的醇酚-OH 和脂肪族-CH 特征峰相对强度显著分别增加了 47.45%和 90.63%($p < 0.05$),而其他官能团相对峰强度均显著降低($p < 0.05$),其中芳香族 C=C 降低了 43.78%, $-\text{CH}/\text{C}=\text{C}$ 比值显著增加($p < 0.05$),脂肪化程度提高; <0.053 mm 团聚体中,eTaCO₂ 和 eTeCO₂ 处理仅降低了醇酚-OH 的特征峰相对强度,说明这一粒级土壤团聚体中醇酚减少了。

表 1 全土及不同粒级团聚体特征峰相对强度

Table 1 Relative intensity of characteristic peak in all aggregates and bulk soil

%(平均值±标准差)

全土或团聚体粒径/mm	处理	缔合醇酚-OH 3 440 cm ⁻¹	脂肪族-CH (2 960+2 920) cm ⁻¹	羧基 C=O 1 720 cm ⁻¹	芳香族 C=C 1 635 cm ⁻¹	甲基-CH ₃ 1 390 cm ⁻¹	多糖 C-O 1 040 cm ⁻¹	$-\text{CH}/\text{C}=\text{C}$
全土	aTaCO ₂	69.53±6.21 ^a	5.93±1.02 ^b	0.31±0.05 ^b	3.78±0.81 ^c	0.9±0.28 ^b	19.55±6.09 ^b	1.7±0.63 ^a
	eTaCO ₂	35.39±1.40 ^c	13.08±1.90 ^a	0.26±0.04 ^b	5.9±0.54 ^b	6.24±0.56 ^a	39.14±1.13 ^a	2.26±0.41 ^a
	eTeCO ₂	45.63±2.79 ^b	2.33±1.04 ^b	0.67±0.02 ^a	9.96±31 ^a	6.07±0.66 ^a	35.33±0.77 ^a	0.23±0.1 ^b
>0.25	aTaCO ₂	55.61±9.42 ^a	7.68±1.59 ^a	0.26±0.05 ^b	5.31±1.05 ^b	3.27±1.23 ^b	27.87±8.69 ^b	1.57±0.61 ^a
	eTaCO ₂	44.67±1.48 ^a	4.6±0.22 ^b	0.42±0.03 ^a	7.65±0.04 ^a	5.55±0.24 ^a	37.11±1.49 ^b	0.6±0.03 ^b
	eTeCO ₂	35.5±2.15 ^b	5.31±0.38 ^a	0.38±0.00 ^a	7.67±0.17 ^a	6.00±0.51 ^a	45.13±1.38 ^a	0.69±0.03 ^b
0.25—0.053	aTaCO ₂	33.6±0.63 ^b	6.62±0.13 ^b	0.44±0.01 ^a	8.2±0.5 ^a	6.55±0.39 ^a	44.6±0.14 ^a	0.81±0.07 ^b
	eTaCO ₂	31.74±0.42 ^b	5.37±0.32 ^b	0.43±0.01 ^a	8.67±0.25 ^a	6.78±0.1 ^a	47.01±0.45 ^a	0.62±0.05 ^b
	eTeCO ₂	49.61±2.96 ^a	12.62±1.34 ^a	0.19±0.03 ^b	4.61±0.39 ^b	4.74±0.61 ^b	28.23±2.38 ^b	2.76±0.28 ^a
<0.053	aTaCO ₂	37.84±2.67 ^a	5.39±0.41 ^a	0.39±0.03 ^a	7.88±0.36 ^a	5.9±0.39 ^a	42.59±2.08 ^a	0.69±0.08 ^a
	eTaCO ₂	29.53±1.8 ^b	6.63±1.22 ^a	0.40±0.03 ^a	8.36±0.6 ^a	7.16±0.5 ^a	47.92±1.89 ^a	0.81±0.2 ^a
	eTeCO ₂	29.16±0.15 ^b	5.38±0.2 ^a	0.48±0.06 ^a	9.56±0.81 ^a	7.79±0.56 ^a	47.62±1.08 ^a	0.57±0.07 ^a

注:全土、同一粒级不同处理之间采用单因素方差分析,不同小写字母表示处理间差异显著水平($p < 0.05$)。

2.3.2 不同密度组分中有机碳特征峰相对强度 不同密度组分有机碳红外特征峰相对强度见表 2。各密度组分中醇酚-OH 和多糖 C-O 所占比例最多,分别为 30.17%~57.80%和 22.75%~50.98%,羧基 C=O 比例最少。在 LF 组分中,与 aTaCO₂ 相比,eTaCO₂ 处理的醇酚-OH 相对峰强度增加了 31.07%,甲基-CH₃ 和多糖 C-O 分别降低了 47.72%和 23.98%, $-\text{CH}/\text{C}=\text{C}$ 比值无显著变化;eTeCO₂ 仅使醇酚-OH 相对峰强度显著降低了

14.72%, $-\text{CH}/\text{C}=\text{C}$ 比值显著增加了 75.31%($p < 0.05$)。在 OF 组分中,eTaCO₂ 和 eTeCO₂ 处理的脂肪族-OH 相对峰强度分别增加了 295.40%和 158.31%,但 eTaCO₂ 处理的多糖 C-O 相对峰强度降低了 24.61%, $-\text{CH}/\text{C}=\text{C}$ 比值显著增加了 380.28%;eTeCO₂ 处理的 $-\text{CH}/\text{C}=\text{C}$ 比值增加了 192.68%($p < 0.05$),表明气候变化后轻组有机碳稳定性减弱。eTaCO₂ 和 eTeCO₂ 处理的 MF 组分中各特征峰相对强度没有显著变化。

表 2 各密度组分特征峰相对强度

Table 2 Relative intensity of characteristic peak in all density fractions

%(平均值±标准差)

密度组分	处理	缩合醇酚—OH 3 440 cm ⁻¹	脂肪族—CH (2 960+2 920) cm ⁻¹	羰基 C=O 1 720 cm ⁻¹	芳香族 C=C 1 635 cm ⁻¹	甲基—CH ₃ 1 390 cm ⁻¹	多糖 C—O 1 040 cm ⁻¹	—CH/C=C
游离态轻组	aTaCO ₂	44.16±4.46 ^b	7.32±2.04 ^a	0.44±0.02 ^a	9.13±0.14 ^a	5.67±0.65 ^a	33.28±2.60 ^a	0.81±0.24 ^b
	eTaCO ₂	57.8±2.34 ^a	7.98±2.67 ^a	0.23±0.11 ^a	6.93±1.43 ^a	4.31±0.12 ^b	22.75±1.10 ^b	1.29±0.65 ^{ab}
	eTeCO ₂	37.66±0.83 ^c	11.37±0.95 ^a	0.38±0.05 ^a	8.1±0.46 ^a	6.4±0.13 ^a	36.09±0.74 ^a	1.42±0.20 ^a
闭蓄态轻组	aTaCO ₂	36.03±1.08 ^a	4.35±0.55 ^b	0.46±0.01 ^a	10.72±0.09 ^a	6.59±0.24 ^a	41.85±0.31 ^a	0.41±0.05 ^b
	eTaCO ₂	34.14±2.00 ^a	17.2±2.43 ^a	0.42±0.07 ^a	9.11±0.90 ^a	7.58±0.26 ^a	31.55±0.53 ^b	1.97±0.44 ^a
	eTeCO ₂	34.64±2.17 ^a	11.28±3.41 ^a	0.42±0.05 ^a	9.93±0.96 ^a	7.26±0.66 ^a	37.06±2.42 ^a	1.2±0.41 ^a
矿质态组	aTaCO ₂	33.61±4.41 ^a	2.75±1.94 ^a	0.37±0.01 ^b	8.12±0.26 ^a	5.46±0.47 ^a	49.23±1.80 ^a	0.35±0.25 ^a
	eTaCO ₂	31.03±0.87 ^a	3.79±0.40 ^a	0.41±0.01 ^a	8.5±0.19 ^a	6.35±0.17 ^a	49.92±0.55 ^a	0.45±0.05 ^a
	eTeCO ₂	30.17±0.64 ^a	3.5±0.45 ^a	0.4±0.00 ^a	8.48±0.05 ^a	6.47±0.05 ^a	50.98±0.95 ^a	0.41±0.05 ^a

注:同一密度组分的不同处理之间采用单因素方差分析,不同小写字母表示处理间差异显著水平($p < 0.05$)。

2.4 主成分分析

2.4.1 全土和团聚体中有机碳红外光谱主成分分析

将全土和各粒级团聚体土壤有机碳红外光谱特征进行聚类分析(图 4)。依据总贡献率 $> 80\%$,选择 2 个主成分,载荷绝对值 > 0.5 表示主成分相关性大。PC₁ 累计贡献率为 68.25%,PC₂ 累计贡献率为 26.50%。

从图 4a 中可以看出,aTaCO₂, eTaCO₂, eTeCO₂ 处理的全土, > 0.25 mm 和 0.25~0.053 mm 团聚体聚合度较小,这表明增温和 CO₂ 浓度升高后全土, > 0.25 mm 和 0.25~0.053 mm 粒级团聚体中的有机碳化学结构具有明显的差异。由因子载荷图 4b 可知,主要变化的官能团有醇酚、脂肪族、甲基和多糖。

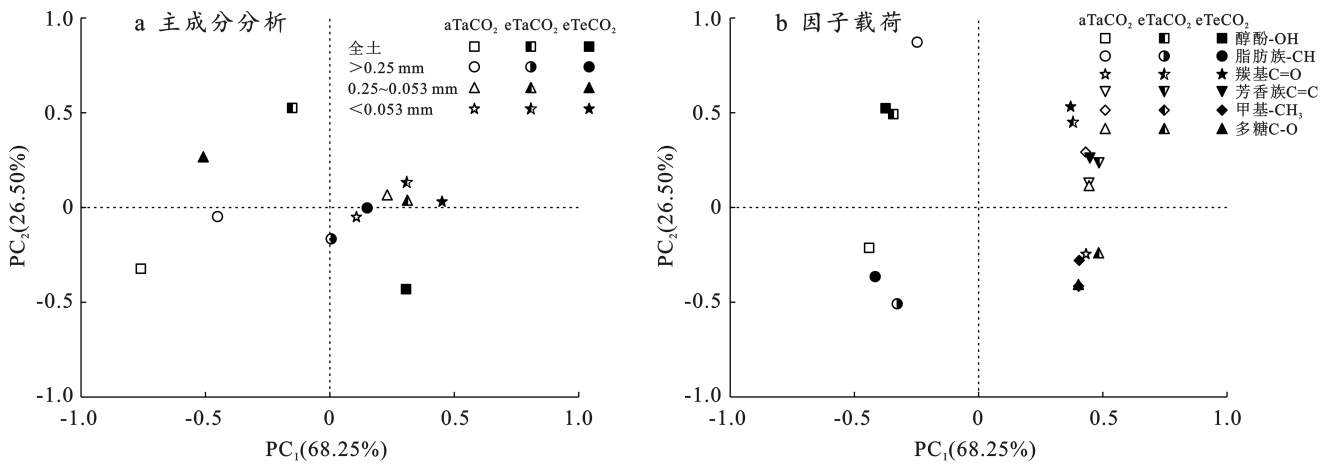


图 4 全土以及不同粒级团聚体有机碳红外特征峰主成分分析(a)和因子载荷(b)

Fig. 4 Principal component analysis (a) and loading factors (b) of infrared characteristic peak in SOC in aggregates and bulk soil

2.4.2 各密度组分有机碳红外光谱主成分分析 图 5 为密度组分中有机碳红外光谱特征的聚类分析,轻组和重组有机碳红外光谱特征受气候变化影响较小,而气候变化背景下游离态轻组 OF 有机碳分子结构与 aTaCO₂ 处理差异达 31.30%,但是两个气候变化处理间差异不明显(图 5a)。由因子载荷图 5b 可知,醇酚、脂肪族、羰基和多糖等官能团在不同处理和组分之间变化明显。

3 讨论

3.1 增温对土壤有机碳含量和稳定性的影响

连续 8 a 增温,黑土有机碳含量有增加趋势,但未达到差异显著水平。李佳珍等^[20]连续 5 a 增温

2 °C,发现土壤有机碳无明显变化。可见,大气温度升高对 SOC 的影响是一个长期而缓慢的过程。本研究发现,增温后仅 < 0.053 mm 团聚体和 OF 密度组分有机碳含量显著增加。这是因为在东北地区,玉米生长季增温并未超过玉米生长的极限温度,因此促进玉米生物量积累,从而增加了向土壤中输入的碳^[21],促进 OF 组分有机碳积累。

增温虽然影响了土壤有机碳各官能团的相对峰强度,但是对其稳定性未产生显著影响。8 a 连续增温后黑土各组分有机碳的化学结构主要由醇酚、脂肪族化合物、芳香族化合物、甲基及多糖化合物等组成,说明增温并未改变黑土有机碳的分子结构。尽管增温提高了脂肪族、甲基和多糖族有机碳特征峰相对强

度,降低了酚醇族有机碳特征峰相对强度,但是 $-\text{CH}/\text{C}=\text{C}$ 比值有增加趋势但不显著,这表明增温可能使土壤有机碳稳定性降低,这支撑了上述有机碳受增温影响的结果。

在团聚体中,增温后 >0.25 mm 团聚体脂肪族 $-\text{CH}$ 相对峰强度减少,羰基 $\text{C}=\text{O}$,芳香族 $\text{C}=\text{C}$ 和甲基 $-\text{CH}_3$ 的相对峰强度显著增加,导致 $-\text{CH}/\text{C}=\text{C}$

比值显著降低,结构趋于芳香化。这可能是由于大团聚体的物理保护作用,降低了土壤中新鲜有机物质的分解^[22]。此外,增温使 <0.25 mm 团聚体官能团相对峰强度无显著变化。这归因于团聚体主要由有机-矿质复合体组成,并以化学保护(腐殖质)为主,是分解程度较高的组分^[23],单独增温对其有机碳的官能团影响甚小。

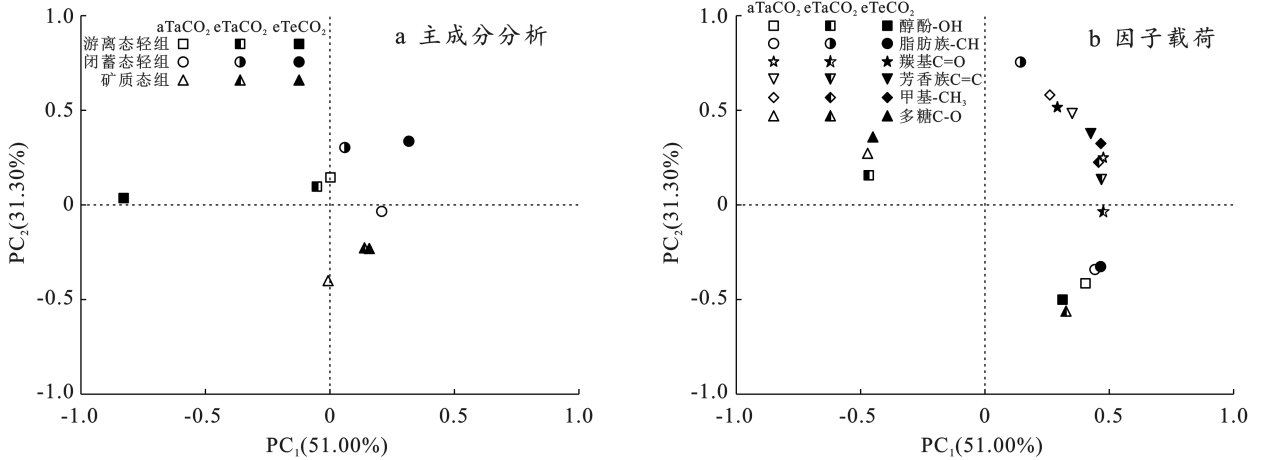


图 5 密度组分有机碳红外光谱特征峰主成分分析(a)和因子载荷(b)

Fig. 5 Principal component analysis (a) and loading factors (b) of infrared characteristic peak in SOC in all density fractions

进一步对土壤有机碳密度组分官能团研究发现,增温仅使 OF 组分脂肪族 $-\text{CH}$ 相对峰度增加,多糖 $\text{C}-\text{O}$ 的相对峰强度减少, $-\text{CH}/\text{C}=\text{C}$ 比值增加,这表明其脂肪化增强,结构稳定性有所降低,可能是更多新鲜有机碳补充的结果^[21],这与增温仅增加 OF 组分有机碳含量即活性组分的增加一致。整体来看,增温对单一团聚体或密度组分有机碳分子结构相对峰强度产生影响,并未达到影响全土有机碳稳定性的强度。

3.2 增温且增 CO_2 对土壤有机碳含量和稳定性的影响

本研究表明增温且增 CO_2 在保障土壤有机碳含量稳定的前提下能够促进可利用碳的分解。增温且增 CO_2 背景下,全土以及各粒级团聚体有机碳含量无显著变化,这与冯倩等^[24]研究 CO_2 浓度升高对玉米有机碳含量的影响结果一致。这可能与 CO_2 浓度增加对土壤碳库的影响是间接作用的结果有关^[4]。另外, CO_2 浓度增加促进光合碳向根系分配,但 CO_2 浓度升高也加速微生物代谢速率^[25],结合上述增温对有机碳的影响,使得土壤碳处于基本持平的动态发展过程。

在密度组分中,同时增温和增 CO_2 使 LF 组分 SOC 含量显著增加。LF 组分属于土壤活性碳库,同时增温和增 CO_2 地上生物量增加,植物残茬输入 LF 组分也增加,这与房蕊^[25]研究结果相似。可见,增

温且增 CO_2 对玉米田土壤有机碳的输入是有增加趋势的。

从有机碳分子结构层面来看,eTe CO_2 处理使全土和 >0.25 mm 粒级团聚体的有机碳结构趋于芳香化,稳定性增强。温度和 CO_2 浓度的升高对土壤微生物活性产生累加效应,使得微生物的活性增加,加快了活性碳库的分解^[26-27],从而增加芳香族碳的比例,有利于土壤有机碳结构稳定。密度组分中,eTe CO_2 处理使 LF 组的 $-\text{CH}/\text{C}=\text{C}$ 比值显著增加,有机碳结构活性增强,稳定性降低。这可能是因为 CO_2 升高使植物根系生物量增加^[26],根系脱落物和分泌物富含的糖类、氨基酸等活性有机碳增加并优先进入轻组。同时, CO_2 升高提高了微生物的丰度与活性^[4],促进了活性有机碳物质分解。最终导致增温且增 CO_2 促进土壤有机碳增加的同时,加速了土壤中的轻组活性可利用碳的分解,保持了总碳含量的平衡,这将有利于提升土壤肥力。

4 结论

黑土团聚体和密度组分有机碳含量和官能团结构适应气候变化的结果表明,大气增温主要影响了土壤中大团聚体(>0.25 mm)和轻组(LF 和 OF 组分)中有机碳官能团红外光谱特征相对峰强度,但是并未改变全土有机碳含量和稳定性。增温且增 CO_2 在保

持了黑土有机碳含量稳定的前提下,加快了可利用态有机碳的周转,这有利于土壤有机碳库的更新和维持土壤肥力水平。因此,从本研究可以推测未来气候变化对土壤生产力可能未必是一件坏事。下一步将深入研究气候变化条件下微生物与有机碳分子结构的关系以及气候变化对黑土 CO₂ 排放影响。

[参 考 文 献]

- [1] Batjes N H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world [J]. *European Journal of Soil Science*, 2014, 65 (1):10-21.
- [2] 张仲胜,李敏,宋晓林,等.气候变化对土壤有机碳库分子结构特征与稳定性影响研究进展[J].*土壤学报*,2018,55 (2):273-282.
- [3] 梁媚聪,秦圆圆,樊星,等.IPCC第六次评估报告第三工作组报告主要结论解读及对策建议[J].*环境保护*,2022, 50(13):72-76.
- [4] Yue Kai, Fornara D A, Yang Wanqin, et al. Influence of multiple global change drivers on terrestrial carbon storage: Additive effects are common [J]. *Ecology Letters*, 2017, 20(5):663-672.
- [5] Kuzyakov Y, Horwath W R, Dorodnikov M, et al. Review and synthesis of the effects of elevated atmospheric CO₂ on soil processes: No changes in pools, but increased fluxes and accelerated cycles [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2019, 128:66-78.
- [6] Van Gestel N, Shi Zheng, van Groenigen K J, et al. Predicting soil carbon loss with warming [J]. *Nature*, 2018, 554(7693):E4-E5.
- [7] 李晓菡,邹俊亮,武菊英,等.土壤呼吸和有机碳对增温的响应及其影响因素分析[J].*地球与环境*,2022, 50(4): 471-480.
- [8] Hopkins Francesca M, Torn Margaret S, Trumbore Susan E. Warming accelerates decomposition of decades-old carbon in forest soils [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2012, 109 (26):E1753-E1761.
- [9] 马婷,李如楠,王斌,等.双季稻不同生育期净同化速率对大气 CO₂ 浓度和温度升高的响应[J].*应用生态学报*, 2020, 31(3):872-882.
- [10] 石含之,赵沛华,黄永东,等.秸秆还田对土壤有机碳结构的影响[J].*生态环境学报*,2020,29(3):536-542.
- [11] Breure T S, Prout J M, Haefele S M, et al. Comparing the effect of different sample conditions and spectral libraries on the prediction accuracy of soil properties from near-and mid-infrared spectra at the field-scale [J]. *Soil and Tillage Research*, 2022, 215:105196.
- [12] 张福韬,乔云发,苗淑杰,等.长期玉米连作下黑土各组分有机质化学结构特征[J].*中国农业科学*,2016,49 (10):1913-1924.
- [13] 龙杰琦,姚婷,苗淑杰,等.生物炭对侵蚀黑土团聚体的影响[J].*水土保持通报*,2021,41(3):76-80.
- [14] 张兴义,刘晓冰.中国黑土研究的热点问题及水土流失防治对策[J].*水土保持通报*,2020,40(4):340-344.
- [15] 赵河聚,岳艳鹏,贾晓红,等.模拟增温对高寒沙区生物土壤结皮—土壤系统呼吸的影响[J].*植物生态学报*, 2020, 44(9):916-925.
- [16] 魏哈梅,郑粉莉,赵苗苗,等.CO₂ 浓度升高、增温和冬小麦生长对土壤酶活性的影响[J].*应用生态学报*, 2022, 33(11):2971-2978.
- [17] Qiao Yunfa, Miao Shujie, Li Qi, et al. Elevated CO₂ and temperature increase grain oil concentration but their impacts on grain yield differ between soybean and maize grown in a temperate region [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 666:405-413.
- [18] Wick A F, Ingram L J, Stahl P D. Aggregate and organic matter dynamics in reclaimed soils as indicated by stable carbon isotopes [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41(2):201-209.
- [19] Golchin A, Oades J M, Skjemstad J O, et al. Study of free and occluded particulate organic matter in soils by solid state ¹³C CP/MAS NMR spectroscopy and scanning electron microscopy [J]. *Soil Research*, 1994, 32(2):285.
- [20] 李佳珍,董文旭,陈拓,等.增温施肥对农田土壤有机碳和全氮含量及 δ¹³C、δ¹⁵N 值的影响[J].*中国生态农业学报(中英文)*,2022,30(5):842-850.
- [21] 刘东尧,闫振华,陈艺博,等.增温对玉米茎秆生长发育、抗倒性和产量的影响[J].*中国农业科学*,2021,54(17): 3609-3622.
- [22] 张艳,刘彦伶,李渝,等.喀斯特石漠化地区土地利用方式对土壤团聚体稳定性及其有机碳分布特征的影响[J].*土壤通报*,2021,52(6):1308-1315.
- [23] 胡丹丹,李浩,宋惠洁,等.长期施肥条件下红壤有机碳化学结构与团聚体稳定性的关系[J].*土壤通报*,2022, 53(1):152-159.
- [24] 冯倩.大气 CO₂ 浓度升高对旱作玉米农田土壤碳氮组分及根系的影响[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2019.
- [25] 房蕊.大气 CO₂ 浓度和温度升高对玉米光合碳分配及根际细菌群落的影响[D].黑龙江 哈尔滨:中国科学院大学(中国科学院东北地理与农业生态研究所),2020.
- [26] Cardon Z G, Hungate B A, Cambardella C A, et al. Contrasting effects of elevated CO₂ on old and new soil carbon pools [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2001, 33(3):365-373.
- [27] Huang Ruilin, Zhang Zhenyi, Xiao Xian, et al. Structural changes of soil organic matter and the linkage to rhizosphere bacterial communities with biochar amendment in manure fertilized soils [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 692:333-343.