DOI: 10.20103/j.stxb.202402050319
芦怡芳, 谢忠雷, 高燕, 张延, 耿学东, 梁爱珍.短期增温与秸秆还田量对东北黑土有机碳组分的协同影响.生态学报,2024,44(21):9805-9814.
Lu Y F, Xie Z L, Gao Y, Zhang Y, Geng X D, Liang A Z.Effects of short-term warming and amounts of residue return on soil organic carbon in black soils of Northeast China.Acta Ecologica Sinica,2024,44(21):9805-9814.

短期增温与秸秆还田量对东北黑土有机碳组分的协同影响

芦怡芳[1,2], 谢忠雷[2], 高 燕[1], 张 延[1], 耿学东[1], 梁爱珍[1,*]
1 中国科学院东北地理与农业生态研究所黑土区农业生态重点实验室,长春 130012
2 吉林大学植物科学学院,长春 130062

摘要:秸秆覆盖还田保护性耕作已成为提升黑土有机碳的有效措施之一。随着全球气候变暖,土壤有机碳(Soil organic carbon, SOC)矿化增加,秸秆覆盖还田是否可以弥补因矿化而损失的有机碳量,对应的合理还田量也成为亟待回答的问题。已有研究表明,与土壤总有机碳相比,有机碳组分可以更好地表征农田管理措施与气候变化协同对土壤有机碳周转及稳定性的影响,对预测气候变暖下东北黑土有机碳的固存有着重要意义。研究基于开顶式气室(Open Top Chamber, OTC)田间原位模拟实验,分析了增温与不同秸秆还田量下 SOC 及其组分的变化,包括土壤活性碳组分,即可溶性有机碳(Dissolved organic carbon, DOC)、微生物量碳(Microbial biomass carbon, MBC)、颗粒态有机碳(Particulate organic carbon, POC),以及土壤稳定性碳组分,即矿物结合碳(Mineral-associated organic carbon, MAOC)。结果表明,单一因素作用下,增温对 SOC 含量无显著影响,但显著降低了 DOC 和 POC 含量,并且显著增加了 MBC 和 MAOC 含量,其中 POC 组分变化量大于 MAOC;秸秆还田量对 SOC 和 MAOC 含量影响不显著,秸秆覆盖还田后 POC 含量降低,但不同还田量之间无显著差异。增温后秸秆的添加对 SOC 含量无显著影响,增加了 MBC 含量,降低了 DOC 含量,增温后 30%秸秆还田量对 MAOC 含量的促进效果最为显著,POC 含量在增温后随着秸秆还田量的增加而增加;增温对不同秸秆还田量下 SOC 的解释度高达 12.8%,同时也是各组分的主要影响因素,并且增温主要是通过影响秸秆还田土壤中 POC 组分,进而改变 SOC 含量,且 POC 变化量对 SOC 变化量解释度达 39.9%。短期环境变化下 SOC 及其组分主要受增温的影响,其中 POC 作为对环境更敏感的组分,对 SOC 的变化影响更大。

关键词:短期增温; 秸秆还田量; 土壤有机碳组分; 颗粒态有机碳

Effects of short-term warming and amounts of residue return on soil organic carbon in black soils of Northeast China

LU Yifang[1,2], XIE Zhonglei[2], GAO Yan[1], ZHANG Yan[1], GENG Xuedong[1], LIANG Aizhen[1,*]
1 *State Key Laboratory of Black Soils Conservation and Utilization, Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun* 130012, *China*
2 *College of Plant Science, Jilin University, Changchun* 130062, *China*

Abstract: Conservation tillage with residue covered has become one of the effective measures to increase organic carbon in black soil. With global warming, the mineralization of soil organic carbon (SOC) increases. Whether residue covered can make up for the amount of organic carbon lost due to mineralization, and the optimal amount of residue return need to be answered. It is well documented that organic carbon fractions, compared to total SOC, can better characterize the effects of agricultural management measures and climate change on SOC turnover and stability. It is of great significance for predicting

基金项目:吉林省科技发展计划项目(20240602008RC);吉林省科技发展计划自然科学基金(YDZJ202101ZYTS011);吉林省重大科技专项(20220302004NC)
收稿日期:2024-02-05; **网络出版日期**:2024-08-16
* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: liangaizhen@ iga.ac.cn

SOC storage in black soil of Northeast China after global warming. Based on the Open Top Chamber (OTC) field in-situ experiment, this study analyzed the changes in SOC and its fractions under warming and amounts of residue returning to the field. The SOC fractions include dissolved organic carbon (DOC), microbial biomass carbon (MBC), particulate organic carbon (POC) and mineral-associated organic carbon (MAOC). The results showed that warming had no significant effect on SOC content, significantly decreased the contents of DOC and POC, and significantly increased the contents of MBC and MAOC, while the change of POC fraction was greater than that of MAOC; The amount of residue returning to the field had no significant effect on SOC and MAOC content, and POC content decreased after residue mulching, but there was no significant difference between amounts of residue return. After warming, the addition of maize residue had no significant effect on SOC content, but increased MBC content and decreased DOC content, MAOC content increased at 30%, and POC content increased with the increase of amounts of residue return. The explanation of SOC by warming was as high as 12.8%, and warming was also the main explanation factor of each fraction. Warming mainly changed SOC content by affecting POC from different amounts of residue return, and explained 39.9% POC variation. Consequently, in the short-term environmental changes SOC and its fractions were mainly affected by warming, and POC, as a more sensitive fraction to the environment, had a greater impact on the change of SOC.

Key Words: short-term warming; residue returning amount; soil organic carbon fractions; particulate organic carbon

土壤是陆地生态系统最大的碳库,其有机碳储量远高于大气和陆地植被,土壤碳收支的微小变化会显著影响大气碳浓度[1]。土壤有机碳(Soil organic carbon, SOC)的累积将在缓解气候变化方面发挥关键作用,同时全球气候变化会反馈影响 SOC 储量[2]。过去 100 多年全球平均气温升高了约 0.49—0.89℃[3],气候变暖加剧 SOC 矿化,导致 SOC 储量下降[4]。秸秆还田是农田 SOC 增加的重要途径,通过地上生物量增加的外源碳输入可以促进 SOC 的固定[5],当然增加的外源碳输入可能会导致原土 SOC 的分解,产生激发效应[6]。因此气候变化下由于秸秆还田而增加的土壤碳输入与由于分解速率增加而增加的碳损失之间的平衡在哪个还田量下达到仍需要探讨[7]。许多研究表明 SOC 对全球变化的响应程度依赖于环境变化[8],但 SOC 的不同组分形成与持续的机制不同,并且对全球变化的响应通常是相反的[9—10],所以测定总 SOC 无法揭示其对外界变化响应的驱动机制。因此,总 SOC 是否可以很好地表征气候变化与农田管理的影响,秸秆还田在气候变化背景下如何影响农田 SOC 的变化,尚需深入系统的研究,这对于更好地预测土壤碳动态及其对气候变化的反馈具有重要意义。

SOC 是由不同分解阶段的有机化合物组成,具有很强的异质性[11]。根据 SOC 稳定性、周转时间以及物理化学保护机制划分的 SOC 组分,可以准确地预测有机碳对外源碳输入的响应[12]。气候变化与农田管理措施如耕作制度、秸秆还田都会影响 SOC 库变化[13—15],特别是土壤活性碳组分,如可溶性有机碳(Dissolved Organic Carbon, DOC)、微生物量碳(Microbial Biomass Carbon, MBC)和颗粒态有机碳(Particulate Organic Carbon, POC)。DOC 和 MBC 属于土壤活性有机碳,是影响土壤肥力的重要因素[16]。此外,DOC 的形成、迁移和转化可以影响土壤微生物群落结构和活性[17],同时对矿物结合有机碳(Mineral-associated Organic Carbon, MAOC)[18]的形成也会产生重要影响。POC 被认为是稳定有机碳的过渡态,主要来源于植物[19],而 MAOC 是与粉粒和粘粒矿物相结合的 SOC 组分,主要由不稳定有机物经微生物转化后形成。与 POC 相比,MAOC 由于与矿物表面结合或大团聚体的吸附作用,更难被微生物利用分解,所以是比较稳定的组分,在土壤中的贮存时间更长[20—21]。与总 SOC 相比,探究 SOC 不同组分的变化更能反映出 SOC 对环境变化、植物输入或微生物转化的响应[22]。

目前的研究主要以增温或秸秆还田单一因素对 SOC 及其组分的影响为主[23],而全球变暖背景下 SOC 不同组分对外源碳输入的响应尚不清楚。东北黑土区作为中国最大的粮食生产基地和商品粮输出基地,长期的不合理耕作和高强度利用导致 SOC 持续下降,严重影响东北黑土区的粮食产能,进而威胁我国的粮食安

全[24]。秸秆还田在东北地区大面积推广应用,但其在全球气候变化背景下的固碳效果还不清晰。SOC 的稳定需要至少数十年的时间并且存在波动性,有研究表明,增温初期对土壤有机碳存在明显的激发作用,但随着增温时间的增加,激发效应会逐渐减缓。因此,研究增温条件下不同秸秆还田量对 SOC 及其组分的影响,可以明晰黑土有机碳对气候变化与外源碳输入的响应,为精确估算增温后土壤固碳潜力提供科学依据,为未来东北黑土区气候变化下农田土壤地力培育提供重要的理论支撑,而对短期增温的研究则是为未来长期增温对土壤有机碳的影响研究奠定基础。

1　材料与方法

1.1　试验区概况

试验地点位于吉林省长春综合农业实验站(44°9′N,125°23′E)。该地区年平均温度 4.4℃,年平均降水量 550 mm,属于典型的温带大陆性季风气候。试验区土壤类型为典型黑土,质地为壤质黏土,pH 为 6.9。试验前研究区土壤基本物理化学性质如表 1 所示。

表 1　土壤初始理化性质(2020 年)

Table 1　Initial physicochemical properties of soil (2020)

含水量 WC	土壤有机碳 SOC (g/kg)	全氮 TN (g/kg)	碳氮比 C/N	可溶性有机碳 DOC/ (mg/kg)	微生物量碳 MBC/ (mg/kg)	铵态氮 NH_4^+-N/ (mg/kg)	硝态氮 NO_3^--N/ (mg/kg)
0.13	11.01	0.89	12.33	39.97	74.68	30.14	10.35

WC:含水量 Water content;SOC:土壤有机碳 Soil organic carbon;TN:全氮 Total nitrogen;C/N:碳氮比 Ratio of C and N;DOC:可溶性有机碳 Dissolved organic carbon;MBC:微生物生物量碳 Microbial biomass carbon

1.2　试验设计

模拟增温试验开始于 2020 年 5 月。采取裂区设计,主区因子包括两个温度处理,每个处理三个重复,随机分配于 6 个开顶式气室(Open Top Chamber, OTC)中,裂区因子包括四个秸秆还田量(0%、30%、60%、100%),共设 24 个小区,每个小区为 70 cm×80 cm。OTC 装置为四面体,其基本结构由铁架和透光塑料布构成,长与宽皆为 3 m,高 2.5 m,顶部收有锥形口,收缩角度为 45°,收口长度 1 m。通过 OTC 田间原位模拟增温,每个 OTC 内部均配有一部温控空调,其位于 OTC 内部约 2 m 高位置,同时安装热探头监控温度并时刻调节温度确保室内外温度差异为:增加约 2℃(Warming)或保持不变(CK)。秸秆还田选用玉米秸秆,100%还田量以大田试验 1.1 t/hm^{2}为标准,采用秸秆覆盖还田方式。降水是按照长春市 1970—2019 共 50 年玉米生长季(5—9 月)每月的降水量为基准对照,换算为各处理每月的总灌水量,分 10 次施入(每 3 d 一次),该试验在田间进行,为了减少自然降水产生的影响,利用 OTC 顶部弧形支架进行遮雨。每年五月中旬玉米播种,播种密度参照大田播种密度(70000 株/hm^2)。在整个实验过程中,氮肥施用量 150 kg/hm^2。除播种外,全年不对土壤进行任何扰动。

1.3　土壤样品采集及处理

于 2021 年 10 月份秋收之前采集土壤样品,在每个样方内用直径为 2.64cm 的取土钻随机选 2 点采集,并将各土层均匀混合成一个样品,采集深度 0—5、5—15 cm 土层土壤,置于可移动实验冰箱内。将样品中石块及可见根挑出并过 2 mm 筛,一部分土壤样品贮存在 4℃条件下,用于 DOC、MBC 的测定,一部分土样风干后用于 SOC、POC 及 MAOC 的测定。

1.4　测定方法

土壤 SOC 利用 FlashEA1112 元素分析仪(ThermoFinnigan, Milan, 意大利)测定,因本研究供试黑土不含碳酸盐,所以总碳即为 SOC。DOC 采用氯化钾 KCL 提取法测定,称取 10 g 鲜土,加入 50 mL 2 mol/L KCL,于 20℃下振荡 60 min,并静止 1 h,上清液过 0.45 μm 滤膜,滤液中的有机碳用 TOC-VCPH(Total Organic carbon Analyzer,SHIMADZU Company)仪器测定。MBC 采用氯仿薰蒸浸提法测定,称取 10 g 鲜土样放入小烧杯中,

每个土样称 2 份(一份用于熏蒸,一份用于未熏蒸),将熏蒸的土壤放入干燥器中熏蒸 24 h 后取出,然后将小烧杯中的土壤转移到 100 mL 的塑料瓶中,加 0.5 mol/L 的 K_2SO_4溶液 30 mL,振荡 30 min,过滤到 50 mL 离心管,滤液中的有机碳用 TOC-VCPH 仪器测定。

POC、MAOC 含量的测定参照 Cambardell 等[25]提出的方法,具体操作步骤为:称取过 2 mm 筛的风干土样 20 g,将其放入塑料瓶中,加入 100 ml 5 g/L 的六偏磷酸钠溶液,充分摇匀后在往复式振荡器上 180 rpm 震荡分散 18 h。将分散后的混合液置于 53μm 筛子上,用去离子水冲洗样品直至流出液清澈为止,在冲洗过程中可用带橡皮头的玻璃棒轻轻擦洗筛网。将筛上和筛下物质分别转移到预先称重的烧杯中,在 45℃下烘干至恒重。将样品研磨过 100 目筛,利用元素分析仪测定其碳含量,计算可得 POC 和 MAOC 含量:

$$POC = SOC_{颗粒态} \times m_{颗粒态} / m$$

$$MAOC = SOC_{矿物结合态} \times m_{矿物结合态} / m$$

式中:$SOC_{颗粒态}$、$SOC_{矿物结合态}$分别表示颗粒态与矿物结合态组分测得的土壤有机碳;$m_{颗粒态}$、$m_{矿物结合态}$分别表示分离后颗粒态与矿物结合态有机碳组分的质量;m 表示分离前的总土壤质量。

1.5 数据处理

实验数据采用 Excel 整理,使用 SPSS 进行双因素方差分析,确定增温和不同秸秆还田量之间 SOC 及其各组分的显著性($P<0.05$)及双因素的交互作用,并通过方差分解分析(variation partition analysis, VPA)确定增温与不同秸秆还田量分别对 SOC 组分的贡献度。

2 结果与分析

2.1 增温对 SOC 及其组分的影响

如图 1 所示,无秸秆还田时,增温对 SOC 含量无显著影响,但两个土层 SOC 含量在增温后均有下降,且增温后较对照降低了 4%—5%。增温显著降低了土壤 DOC 含量,其中表层降低了 24.2%,亚表层土壤降低了 49.6%。增温增加了土壤 MBC 含量,但主要增加了亚表层土壤的 MBC 含量,亚表层土壤增温后 MBC 含量是 CK 的 3 倍。增温显著降低了 POC 含量,与 CK 对比 0—5 cm 土层降低了 45%,5—15 cm 土层降低了 64%。而增温显著增加了 MAOC 含量,0—5 cm 土层增加了 40%,5—15 cm 土层增加了 45%(图 2)。

2.2 秸秆还田量对 SOC 及其组分的影响

未增温时,不同秸秆还田量对 SOC 含量无显著影响(图 1)。不同秸秆还田量对 DOC 含量的影响存在显

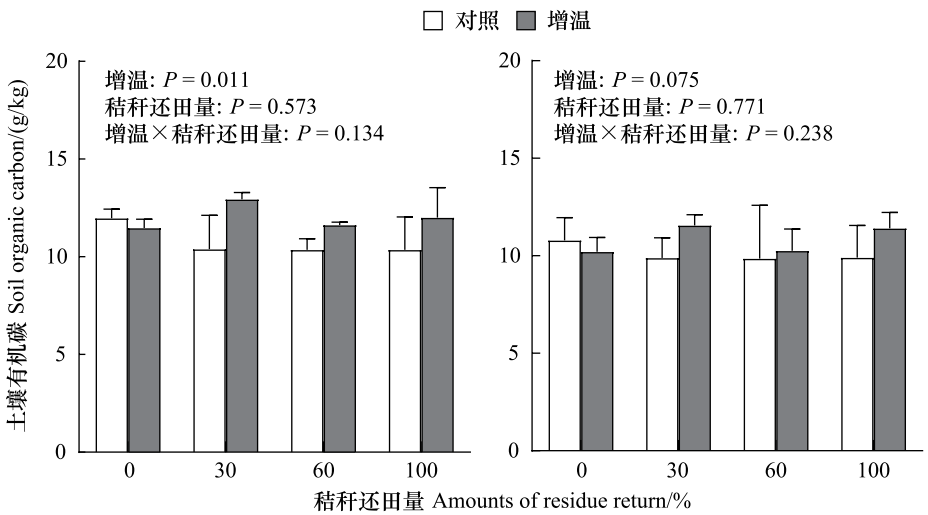

图 1 增温与不同秸秆还田量处理下 SOC 的变化

Fig.1 Changes in SOC under warming and different amounts of residue return treatments

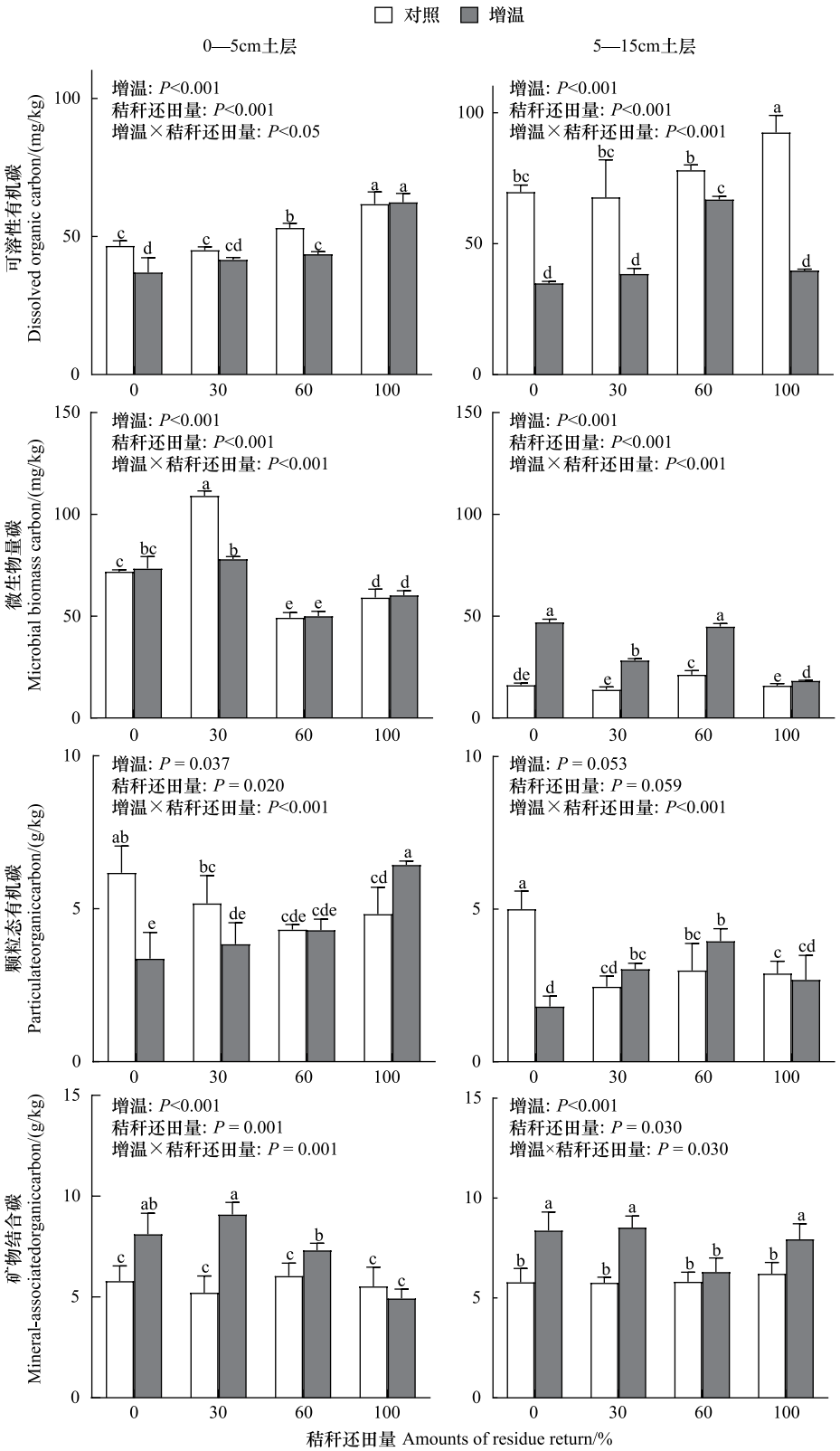

图 2　增温与不同秸秆还田量处理对土壤有机碳各组分的影响

Fig.2　Effects of warming and different amounts of residue return treatments on soil organic carbon fractions

不同小写字母表示差异显著(P<0.05)

著差异。随着秸秆还田量的增加,DOC 含量随之增加,并在 100%秸秆还田量下达到最高;5—15 cm 土层土壤 DOC 含量随秸秆还田量的增加而增加(图 2)。不同秸秆还田量显著影响 MBC 含量。与对照相比,30%还田量下 0—5 cm 土层 MBC 含量显著增加,但 60%与 100%秸秆还田量低于对照,5—15 cm 土层 60%还田量下 MBC 含量显著高于其他还田量处理,并且其他还田量下 MBC 含量无显著差异(图 2)。如图 2 所示,与 SOC 变化一致,秸秆还田降低了 POC 含量,但不同秸秆还田量之间无显著差异。不同秸秆还田量对 MAOC 无显著影响(图 2)。

2.3 增温与秸秆还田互作对 SOC 及其组分的影响

如图 1 所示,增温与秸秆还田量互作对 SOC 含量无显著影响,但可以看出,与不增温相比,增温促进了秸秆还田后土壤 SOC 含量增加,并在 30%处理下 SOC 含量达到最高。如图 2 所示,0—5 cm 土层随着秸秆还田量的增加 DOC 含量也随之增加,但与不增温相比,增温后只有 100%还田量增加了 DOC 含量;5—15 cm 土层 60%还田量处理显著高于其他处理。增温后,随着秸秆还田量的增多,0—5 cm 土层 MBC 含量有所下降,60%、100%显著低于对照与 30%还田量处理;增温后,秸秆覆盖还田同样降低了 5—15 cm 土层 MBC 含量,30%、100%还田量处理 MBC 含量降低更为显著。增温后,随着秸秆还田量的增加,0—5 cm 土层 POC 含量也随之增加,但与未增温各处理相比,增温后 0%无秸秆还田与 30%还田量相对降低了 POC 含量,60%还田量下 POC 含量无显著变化,100%还田量则增加了 POC 含量;5—15 cm 土层增温后除无秸秆还田处理显著降低了 POC 含量,其他各秸秆还田量处理下与未增温时相比无显著差异。增温后随着秸秆还田量的增加,0—5 cm 土层 MAOC 含量随之下降,其中 0%与 30%还田量处理下 MAOC 含量无显著差异,并且除 100%秸秆还田量下增温对 MAOC 含量无显著影响,其余还田量处理下增温都显著增加了 MAOC 含量;5—15 cm 土层 60%还田量下增温对 MAOC 含量无显著影响,而其他秸秆还田量下 MAOC 含量显著增加但无显著差异(图 2)。

VPA 分析表明,增温对不同秸秆还田量下 SOC 及其组分变化的解释度更高,增温对 SOC 的解释度达 12.8%,对 DOC、MBC、POC、MAOC 分别解释了 26.5%、6.8%、1.7%、39.9%(图 3)。增温后不同秸秆还田量下 SOC 的变化量主要由 POC 解释,解释度为 17.6%(图 4)。

3 讨论

3.1 增温对 SOC 组分的影响

气候变暖对 SOC 动态有很大影响,但其影响的方向和大小还不确定[26—27],首先,增温会直接影响 SOC 的分解,因为 SOC 分解在很大程度上依赖温度,变暖可能加快 SOC 的分解[4],其次,温度变化能通过影响植物初级生产、植物根系的生长、形态和生理活性直接影响根系分泌物输入[28],通常情况下,增温可显著促进植物根系分泌过程,从而增加了 SOC 的输入[29]。本研究中,增温降低了 SOC 含量,主要原因是增温加速 SOC 的分解量大于碳输入量。

MBC 和 DOC 是土壤活性有机碳库的重要组成部分,是反映不同处理下 SOC 变化非常敏感的指标。一般地,土壤养分有效性和生物活性随着土壤温度升高而增加[30],因而土壤活性碳含量随着温度升高呈动态变化。本研究中,温度升高降低了 DOC 含量,与马彩霞等[31]在四川高山森林的研究结果一致。土壤温度升高导致微生物种群的增长,使得土壤微生物活性增加,处于活跃的新陈代谢状态[32],而 DOC 主要是以微生物可直接利用的大分子碳为主,所以增温加快了微生物对 DOC 的利用,同时增加 MBC 含量。而亚表层土壤 MBC 的增加比表层土壤更显著,可能是因为增温导致植物根系向下生长从而根系及其分泌物在土壤表层输入减少,继而使表层土壤微生物可利用碳减少[33]。

POC 与 MBC、DOC 都属于 SOC 活性组分,对气候变暖反应敏感[34]。本研究表明,增温显著降低了 POC 含量,与邓旭哲等[35]的研究结果相同。Peplau 等[36]的研究也指出,增温会促进微生物生物量增加,提高微生物的代谢活动,加速土壤 POC 的分解和损失。而 MAOC 含量随着温度升高而增加,可能是气候变暖导致 CO_2 浓度升高,植物根系分泌物被刺激[28],且增温加速了微生物的周转,从而导致微生物残体的增加,增加了与矿

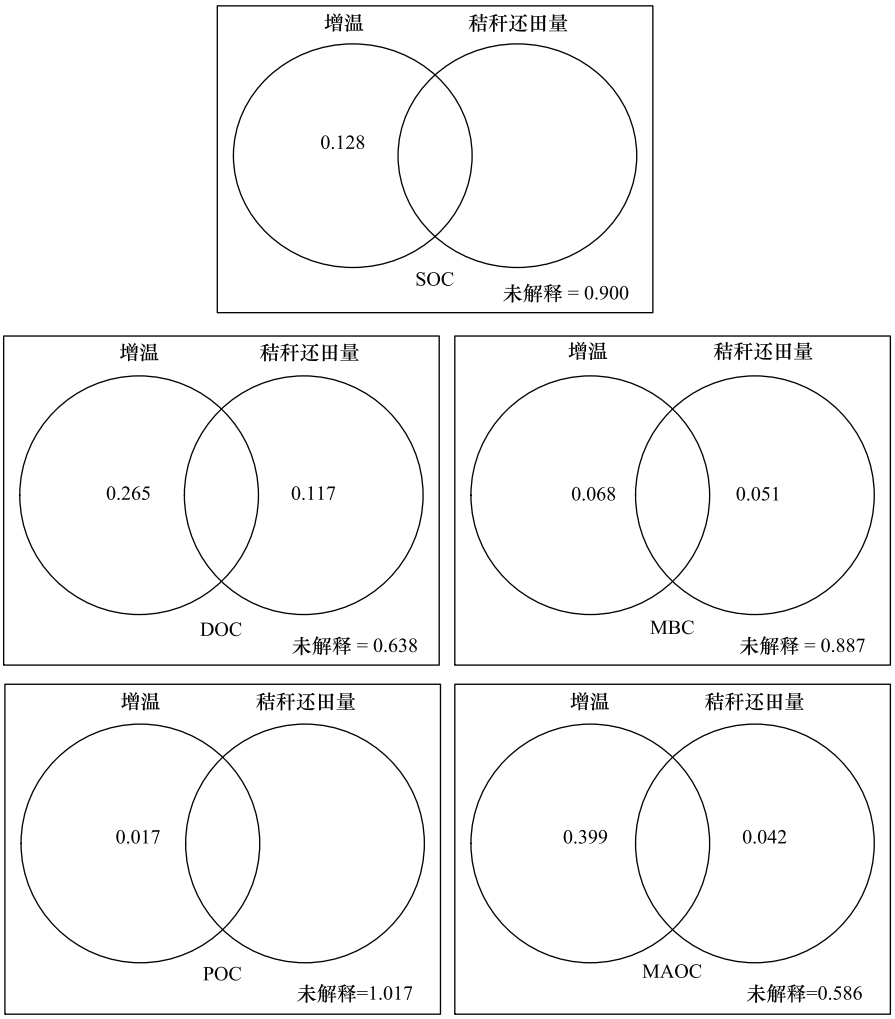

图 3　增温与秸秆还田量对 SOC 组分影响的方差分解分析(VPA)

Fig.3　Variation partition analysis of effects of warming and amounts of residue return on SOC fractions

物结合的碳源[37],短期内可能会提高 MAOC。在本研究中增温造成的 POC 分解量与 MAOC 生成量相抵消,故增温对 SOC 含量无显著影响。

3.2　秸秆还田量对 SOC 组分的影响

秸秆还田是影响 SOC 含量的主要影响因素之一。在本研究中,秸秆覆盖还田降低了 SOC 含量,因为增加的外源碳输入会导致原土 SOC 的分解,产生激发效应[6]。DOC 和 MBC 属于 SOC 活性组分,对外界变化非常敏感,其中 DOC 具有活性高、迁移性强、可被微生物直接利用等特点,微生物对 SOC 的分解以及秸秆的腐解都能增加土壤 DOC 含量[38],MBC 含量也会随可利用物质的增加而增加。本研究中 DOC 的变化主要体现在亚表层土壤上,其含量随着秸秆还田量的增加而增加,而 MBC 则主要聚集在表层土壤中,说明微生物的活跃

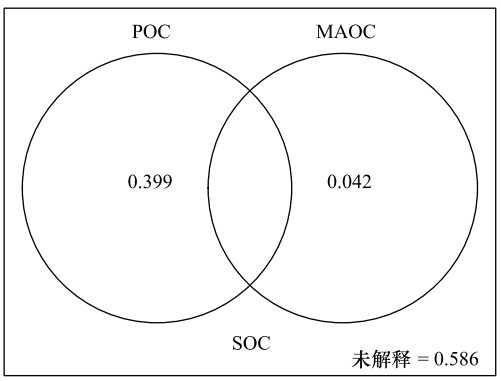

图 4　增温后不同组分变化量对 SOC 变化量影响的方差分解分析(VPA)

Fig.4　Variation partition analysis of effects of different fractions changes on SOC changes after warming

区域在表层土壤,因此表层土壤 DOC 会被微生物利用,从而导致 DOC 含量在亚表层土壤较高,MBC 含量在表层土壤较高。并且在本研究中,MBC 含量在 30%秸秆还田量下含量最高,此研究结果与陈冬林等[39]研究结论基本一致。陈东林等研究发现秸秆还田量对土壤微生物活度的影响在不同耕作方式下表现不同,耕翻条件下以 2/3 还田量处理的土壤微生物活度高,而少免耕条件下 1/3 还田量处理最高,说明土壤微生物的活性受到了秸秆还田量的限制。POC 主要来源于植物,因此秸秆还田也是影响 POC 的主要因素之一,秸秆覆盖还田后,POC 含量有所下降,可能是因为土壤 POC 较敏感,外源碳输入的增加导致土壤微生物活性增大,从而对土壤 POC 分解加速[40]。在本研究中秸秆还田量对 MAOC 含量无显著影响,因为 MAOC 与土壤矿物质的结合后或在微生物处理后被团聚体所保护所以相对稳定[41]。秸秆还田量对 SOC 及其组分的影响主要在于有无秸秆还田,秸秆覆盖还田后各还田量之间无显著差异,且秸秆还田主要是通过增加碳输入导致 POC 组分矿化增加而造成了 SOC 的含量的降低。

3.3 增温与秸秆还田量互作对 SOC 组分的影响

增温促进了秸秆覆盖还田后 SOC 含量增加,说明温度升高促进了秸秆腐解,从而增加土壤碳输入,弥补气候变暖以及激发效应导致的 SOC 分解增加。土壤活性碳组分比较敏感,容易受到外界环境的刺激,本研究中,增温对表层土壤 DOC 是抑制作用,秸秆还田则是促进作用,两个因素相互抵消,在 100%还田量下达到平衡,而增温对亚表层土壤 DOC 含量的抑制作用更大。增温后 MBC 含量在秸秆还田量 60%之后显著下降,与未增温时情况一致,说明秸秆还田量过高反而会抑制微生物的活性[39]。

本研究中随着秸秆还田量的增加,增温使 POC 含量增加、MAOC 含量降低。POC 主要是来源于植物,其含量增加可能是因为温度升高加速了秸秆腐解,POC 输入量增加,同时微生物拥有了足够的碳源,所以 POC 的矿化减少,随之 MBC 含量增加。增温导致的秸秆腐解加速会使外源碳输入增加,从而增加参与 C、N 循环的微生物生物量和酶活性,通过增加的微生物利用与酶代谢使 MAOC 分解增加[42],而 MAOC 的形成需要外源碳更进一步分解为小分子,需要更长的时间,因此短期增温后随着秸秆还田量的增加,MAOC 含量会随之减少。在增温与秸秆还田量的共同作用下,SOC 含量的变化更多由 POC 解释,在环境变化下,POC 相对于 MAOC 更敏感[43],因此在短期增温下 SOC 的变化更依赖于 POC 的变化。并且在本研究中,增温对 SOC 各组分解释度较大,相比之下,秸秆还田量的贡献较小,可能是因为增温直接影响了微生物活性,从而导致 SOC 各组分被微生物利用而产生变化,而秸秆还田量是需要经过微生物分解后才能作为外源碳输入到土壤中,是一个相较之下缓慢的过程,因此增温对 SOC 各组分变化的影响更大。

4 结论

短期增温以及秸秆还田量单一因素对 SOC 含量皆无显著影响。增温导致了 POC 含量的降低与 MAOC 含量的增加,秸秆覆盖还田后,由于外源碳输入的增加使得土壤微生物活性增大,加速了 POC 分解,导致 POC 含量有所下降,但对 MAOC 含量无显著影响。增温与秸秆还田量共同作用导致 MAOC 含量增加。其中,增温处理对 SOC 组分变化影响较大,并且增温后 SOC 的变化主要是由 POC 的变化导致的。短期增温与秸秆还田量协同影响下 SOC 含量并没有发生显著变化,其长期变化机制还需要进一步验证。

参考文献(References):

[1] Stockmann U, Adams M A, Crawford J W, Field D J, Henakaarchchi N, Jenkins M, Minasny B, McBratney A B, de Remy de Courcelles V, Singh K, Wheeler I, Abbott L, Angers D A, Baldock J, Bird M, Brookes P C, Chenu C, Jastrow J D, Lal R, Lehmann J, O'Donnell A G, Parton W J, Whitehead D, Zimmermann M. The knowns, known unknowns and unknowns of sequestration of soil organic carbon. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2013, 164: 80-99.

[2] Bossio D A, Cook-Patton S C, Ellis P W, Fargione J, Sanderman J, Smith P, Wood S, Zomer R J, von Unger M, Emmer I M, Griscom B W. The role of soil carbon in natural climate solutions. Nature Sustainability, 2020, 3(5): 391-398.

[3] Zhou T J. New physical science behind climate change: What does IPCC AR6 tell us? Innovation: Cambridge: Mass, 2021, 2(4): 100173.

[4] Raich J W, Potter C S, Bhagawati D. Interannual variability in global soil respiration, 1980-94. Global Change Biology, 2002, 8(8): 800-812.

[5] Jastrow J D, Miller R M, Owensby C E. Long-term effects of elevated atmospheric CO_2 on below-ground biomass and transformations to soil organic matter in grassland. Plant and Soil, 2000, 224(1): 85-97.

[6] Kuzyakov Y, Friedel J K, Stahr K. Review of mechanisms and quantification of priming effects. Soil Biology and Biochemistry, 2000, 32(11/12): 1485-1498.

[7] Smith P, Fang C M, Dawson J J C, Moncrieff J B. Impact of global warming on soil organic carbon. Advances in Agronomy, 2008, 97: 1-43.

[8] Yue K, Fornara D A, Yang W Q, Peng Y, Peng C H, Liu Z L, Wu F Z. Influence of multiple global change drivers on terrestrial carbon storage: additive effects are common. Ecology Letters, 2017, 20(5): 663-672.

[9] Chen J G, Xiao W J, Zheng C Y, Zhu B. Nitrogen addition has contrasting effects on particulate and mineral-associated soil organic carbon in a subtropical forest. Soil Biology & Biochemistry, 2020, 142: 107708.

[10] De Feudis M, Cardelli V, Massaccesi L, Trumbore S E, Antisari L V, Cocco S, Corti G, Agnelli A. Small altitudinal change and rhizosphere affect the SOM light fractions but not the heavy fraction in European beech forest soil. Catena, 2019, 181: 104091.

[11] Lehmann J, Kleber M. The contentious nature of soil organic matter. Nature, 2015, 528(7580): 60-68.

[12] von Lützow M, Kögel-Knabner I, Ekschmitt K, Flessa H, Guggenberger G, Matzner E, Marschner B. SOM fractionation methods: relevance to functional pools and to stabilization mechanisms. Soil Biology and Biochemistry, 2007, 39(9): 2183-2207.

[13] Zhu L Q, Hu N J, Zhang Z W, Xu J L, Tao B R, Meng Y L. Short-term responses of soil organic carbon and carbon pool management index to different annual straw return rates in a rice-wheat cropping system. Catena, 2015, 135: 283-289.

[14] Haynes R J. Labile organic matter fractions as central components of the quality of agricultural soils: an overview. Advances in Agronomy, 2005, 85: 221-268.

[15] Zhao S C, Li K J, Zhou W, Qiu S J, Huang S W, He P. Changes in soil microbial community, enzyme activities and organic matter fractions under long-term straw return in north-central China. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2016, 216: 82-88.

[16] Qiu Q Y, Wu L F, Ouyang Z, Li B B, Xu Y Y. Different effects of plant-derived dissolved organic matter (DOM) and urea on the priming of soil organic carbon. Environmental Science-Processes & Impacts, 2016, 18(3): 330-341.

[17] Tian J, Fan M S, Guo J H, Marschner P, Li X L, Kuzyakov Y. Effects of land use intensity on dissolved organic carbon properties and microbial community structure. European Journal of Soil Biology, 2012, 52: 67-72.

[18] Sokol N W, Sanderman J, Bradford M A. Pathways of mineral-associated soil organic matter formation: integrating the role of plant carbon source, chemistry, and point of entry. Global Change Biology, 2019, 25(1): 12-24.

[19] Giannetta B, Plaza C, Vischetti C, Cotrufo M F, Zaccone C. Distribution and thermal stability of physically and chemically protected organic matter fractions in soils across different ecosystems. Biology and Fertility of Soils, 2018, 54(5): 671-681.

[20] Song X X, Wang P, Van Zwieten L, Bolan N, Wang H L, Li X M, Cheng K, Yang Y, Wang M L, Liu T X, Li F B. Towards a better understanding of the role of Fe cycling in soil for carbon stabilization and degradation. Carbon Research, 2022, 1(1): 5.

[21] Cotrufo M F, Ranalli M G, Haddix M L, Six J, Lugato E. Soil carbon storage informed by particulate and mineral-associated organic matter. Nature Geoscience, 2019, 12(12): 989-994.

[22] Rocci K S, Lavallee J M, Stewart C E, Cotrufo M F. Soil organic carbon response to global environmental change depends on its distribution between mineral-associated and particulate organic matter: a meta-analysis. The Science of the Total Environment, 2021, 793: 148569.

[23] Qiu Y P, Guo L J, Xu X Y, Zhang L, Zhang K C, Chen M F, Zhao Y X, Burkey K O, Shew H D, Zobel R W, Zhang Y, Hu S J. Warming and elevated ozone induce tradeoffs between fine roots and mycorrhizal fungi and stimulate organic carbon decomposition. Science Advances, 2021, 7(28): eabe9256.

[24] 梁爱珍, 李禄军, 祝惠. 科技创新推进黑土地保护与利用,齐力维护国家粮食安全——用好养好黑土地的对策建议. 中国科学院院刊, 2021, 36(5): 557-564.

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

[26] Crowther T W, Todd-Brown K E O, Rowe C W, Wieder W R, Carey J C, Machmuller M B, Snoek B L, Fang S, Zhou G, Allison S D, Blair J M, Bridgham S D, Burton A J, Carrillo Y, Reich P B, Clark J S, Classen A T, Dijkstra F A, Elberling B, Emmett B A, Estiarte M, Frey S D, Guo J, Harte J, Jiang L, Johnson B R, Kröel-Dulay G, Larsen K S, Laudon H, Lavallee J M, Luo Y, Lupascu M, Ma L N, Marhan S, Michelsen A, Mohan J, Niu S, Pendall E, Peñuelas J, Pfeifer-Meister L, Poll C, Reinsch S, Reynolds L L, Schmidt I K, Sistla S, Sokol N W, Templer P H, Treseder K K, Welker J M, Bradford M A. Quantifying global soil carbon losses in response to warming. Nature, 2016, 540(7631): 104-108.

[27] Mahecha M D, Reichstein M, Carvalhais N, Lasslop G, Lange H, Seneviratne S I, Vargas R, Ammann C, Arain M A, Cescatti A, Janssens I A,

Migliavacca M, Montagnani L, Richardson A D. Global convergence in the temperature sensitivity of respiration at ecosystem level. Science, 2010, 329(5993): 838-840.

[28] Kaiser C, Kilburn M R, Clode P L, Fuchslueger L, Koranda M, Cliff J B, Solaiman Z M, Murphy D V. Exploring the transfer of recent plant photosynthates to soil microbes: mycorrhizal pathway vs direct root exudation. The New Phytologist, 2015, 205(4): 1537-1551.

[29] Xu M H, Peng F, You Q G, Guo J, Tian X F, Xue X, Liu M. Year-round warming and autumnal clipping lead to downward transport of root biomass, carbon and total nitrogen in soil of an alpine meadow. Environmental and Experimental Botany, 2015, 109: 54-62.

[30] 卫云燕, 尹华军, 刘庆, 黎云祥. 气候变暖背景下森林土壤碳循环研究进展. 应用与环境生物学报, 2009, 15(6): 888-894.

[31] 马彩霞, 李洪杰, 郑海峰, 陈亚梅, 杨林, 王利峰, 张健, 刘洋.川西高山林线土壤活性碳、氮对短期增温的响应. 应用生态学报, 2019, 30(3): 718-726.

[32] 丁雪丽, 韩晓增, 乔云发, 李禄军, 李娜, 宋显军. 农田土壤有机碳固存的主要影响因子及其稳定机制. 土壤通报, 2012, 43(3): 737-744.

[33] 马志良, 赵文强. 植物群落向土壤有机碳输入及其对气候变暖的响应研究进展. 生态学杂志, 2020, 39(1): 270-281.

[34] Kögel-Knabner I, Guggenberger G, Kleber M, Kandeler E, Kalbitz K, Scheu S, Eusterhues K, Leinweber P. Organo-mineral associations in temperate soils: integrating biology, mineralogy, and organic matter chemistry. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2008, 171(1): 61-82.

[35] 邓旭哲, 韩晨, 薛利祥, 侯朋福, 薛利红, 杨林章. 增温施肥对稻麦农田土壤有机碳及其活性组分的影响. 环境科学, 2023, 44(3): 1553-1561.

[36] Peplau T, Schroeder J, Gregorich E, Poeplau C. Long-term geothermal warming reduced stocks of carbon but not nitrogen in a subarctic forest soil. Global Change Biology, 2021, 27(20): 5341-5355.

[37] Buckeridge K M, Creamer C, Whitaker J. Deconstructing the microbial necromass continuum to inform soil carbon sequestration. Functional Ecology, 2022, 36(6): 1396-1410.

[38] 李彬彬, 武兰芳. 秸秆还田条件下剖面土壤溶解性有机碳含量及其组分结构的变化. 农业环境科学学报, 2019, 38(7): 1567-1577.

[39] 陈冬林, 易镇邪, 周文新, 屠乃美. 不同土壤耕作方式下秸秆还田量对晚稻土壤养分与微生物的影响. 环境科学学报, 2010, 30(8): 1722-1728.

[40] Ofiti N O E, Zosso C U, Soong J L, Solly E F, Torn M S, Wiesenberg G L B, Schmidt M W I. Warming promotes loss of subsoil carbon through accelerated degradation of plant-derived organic matter. Soil Biology & Biochemistry, 2021, 156: 108185.

[41] Boström B, Comstedt D, Ekblad A. Isotope fractionation and ^{13}C enrichment in soil profiles during the decomposition of soil organic matter. Oecologia, 2007, 153(1): 89-98.

[42] Kotroczó Z, Veres Z, Fekete I, Krakomperger Z, Tóth J A, Lajtha K, Tóthmérész, B. Soil enzyme activity in response to long-term organic matter manipulation. Soil Biology & Biochemistry, 2014, 70: 237-243.

[43] Lugato E, Lavallee J M, Haddix M L, Panagos P, Cotrufo, M F. Different climate sensitivity of particulate and mineral-associated soil organic matter. Nature Geoscience, 2021, 14(5): 295-300.