

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2024.04.006

张博, 刘会敏, 毕鑫宇, 等. 不同含水量及冻结温度对黑土冻融循环过程有机碳矿化的影响[J]. 水土保持学报, 2024, 38(4): 55-62.

ZHANG Bo, LIU Huimin, BI Xinyu, et al. Effects of different moisture content and freezing temperature on organic carbon mineralization during freeze-thaw cycles in black soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(4): 55-62.

不同含水量及冻结温度对黑土冻融循环过程有机碳矿化的影响

张博^{1,2}, 刘会敏³, 毕鑫宇^{1,2}, 高航^{1,2}, 宋媛³, 胡亚鲜³, 栗现文^{1,2}

(1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 3. 西北农林科技大学水土保持科学与工程学院, 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘要: [目的] 冻融过程土壤呼吸在年土壤呼吸总量中占有重要比例, 研究探讨土壤冻融过程中含水量、冻结温度和冻融循环次数对土壤碳矿化动态的影响。[方法] 以黑龙江省嫩江县鹤山农场九三水土实验站黑土为研究对象, 开展室内冻融程度模拟试验, 进行 7 次冻融循环, 设置 100% 田间持水量 (100% WHC)、60% 田间持水量 (60% WHC) 和 30% 田间持水量 (30% WHC) 3 种土壤含水量; 10 °C 恒温处理 (对照)、-5 °C 冻结处理 (轻度冻结) 和 -15 °C 冻结处理 (重度冻结) 3 种环境温度。[结果] 冻融循环次数、含水量和冻结温度对 CO₂ 排放量有显著影响, 影响度分别为 -0.63, 0.21, 0.14。解冻过程显著增加土壤碳矿化量; 轻度冻结时, 前 3 次冻融循环 60% WHC 土壤碳矿化量比 100% WHC 和 30% WHC 分别提高 33.0%, 35.2%, 后 4 次冻融循环差异不明显; 重度冻结时, 前 2 次冻融循环 100% WHC 土壤碳矿化量, 比 60% WHC 和 30% WHC 土壤分别提高 25.2%, 68.0%, 后 5 次冻融循环差异不明显。[结论] 冻融循环次数对土壤 CO₂ 排放量影响最大, 含水量次之, 冻结温度最小。冻融作用增加低含水量土壤的 CO₂ 累积排放量; 降低高含水量土壤的 CO₂ 累积排放量; 而对中等含水量土壤, 轻度冻结增加 CO₂ 累积排放量, 重度冻结降低 CO₂ 累积排放量。一级动力学方程对冻融土壤 CO₂ 排放量的拟合效果较好 ($R^2 > 0.997$), 含水量和冻结温度对有机碳矿化潜力 C_0 值有显著影响。

关键词: 土壤有机碳矿化; 土壤含水量; 冻融循环; 冻结温度; 黑土

中图分类号: S153.6

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242-(2024)04-0055-08

Effects of Different Moisture Content and Freezing Temperature on Organic Carbon Mineralization During Freeze-Thaw Cycles in Black Soil

ZHANG Bo^{1,2}, LIU Huimin³, BI Xinyu^{1,2}, GAO Hang^{1,2}, SONG Yuan³, HU Yaxian³, LI Xianwen^{1,2}

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid Areas of Northwest A&F University, Ministry of Education, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. College of Soil & Water Conservation Science and Technology, Northwest A&F University, State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Agriculture in Loess Plateau, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: [Objective] Soil respiration occupies an important proportion in the annual total soil respiration during freeze-thaw process. The effects of water content, freezing temperature and freeze-thaw cycles on soil carbon mineralization dynamics during soil freeze-thaw process were studied. [Methods] The study focuses on chernozem soil from the Nenjiang County Heshan Farm Jiusan Soil and Water Experimental Station in Heilongjiang Province, China was used as the research object to carry out an indoor freeze-thaw degree simulation test. Seven freeze-thaw cycles were carried out, and three soil moisture content were set 100% field water holding capacity (100% WHC), 60% field water holding capacity (60% WHC), and 30% field water holding capacity (30% WHC). Additionally, three environmental temperatures were used a constant

收稿日期: 2023-12-18

修回日期: 2024-01-08

录用日期: 2024-01-28

网络首发日期 (www.cnki.net): 2024-04-09

资助项目: 国家自然科学基金项目 (52279049); 中国博士后科学基金项目 (2020M673518)

第一作者: 张博 (1999—), 男, 硕士生研究生, 主要从事土壤有机碳矿化研究。E-mail: zhangbomg@nwfau.edu.cn

通信作者: 栗现文 (1985—), 男, 博士, 副教授, 主要从事饱和和非饱和水流及溶质运移、干旱区土壤水盐与农业地学研究。E-mail: lixianwen@nwfau.edu.cn

<http://stbxb.alljournal.com.cn>

10 °C (control), -5 °C (mild freezing) and -15 °C (severe freezing). [Results] The number of freeze-thaw cycles, moisture content and freezing temperature had significant effects on CO₂ emissions and the impact degrees were -0.63, 0.21 and 0.14, respectively. The thawing process notably increased soil carbon mineralization. The soil carbon mineralization of 60% WHC in the first three freeze-thaw cycles increased 33.0% and 35.2%, respectively, compared with 100% WHC and 30% WHC in the last 4 freeze-thaw cycles. In the case of severe freezing, the carbon mineralization of 100% WHC soil in the first 2 freeze-thaw cycles increased by 25.2% and 68.0% respectively, compared with 60% WHC and 30% WHC soil in the last 5 freeze-thaw cycles. [Conclusion] The number of freeze-thaw cycles had the greatest effect on soil CO₂ emission, followed by moisture content, and the least freezing temperature. The freeze-thaw effect increased the cumulative CO₂ emissions of soil with low water content. The cumulative CO₂ emission of soil with high water content was reduced. For soils with medium moisture content, mild freezing increased CO₂ cumulative emissions, while severe freezing decreased them. The first-order kinetic equation fitted the CO₂ emissions from freeze-thaw soil well ($R^2 > 0.997$), both moisture content and freezing temperature significantly influenced the potential for organic carbon mineralization (C_0 value).

Keywords: soil organic carbon mineralization; soil moisture content; freeze-thaw cycles; freezing temperature; black soil

Received: 2023-12-18

Revised: 2024-01-08

Accepted: 2024-01-28

Online(www.cnki.net): 2024-04-09

土壤碳矿化是陆地生态系统碳输出的主要途径,由环境变化引起的微弱改变都可能对生态系统碳平衡产生显著的影响^[1-2]。冻融循环在中高纬度和高海拔地区普遍存在,中高纬度和高海拔地区对气候变化更敏感,并将经历更频繁的冻融循环^[3-4]。冻融作用不仅破坏土壤结构,影响团聚体稳定性^[5-6],而且影响基质有效性和土壤微生物属性^[7]。在土壤冻结期间,微生物细胞裂解,细胞溶质积累,土壤融化后排放可用的细胞代谢物^[8],促进融化期 CO₂ 排放。季节性冻融期土壤 CO₂ 排放量在全年 CO₂ 排放量总量中占重要比例(5%~12%)^[9-10]。

季节性冻融在高纬度、高海拔和一些温带地区普遍存在,北半球大约 55% 的陆地面积发生季节性土壤冻融^[11]。土壤含水量、冻结温度和冻融循环次数是影响季节性冻融土壤碳排放的主要环境因素^[12-14]。有研究^[15]表明,冻融作用下 CO₂ 排放量增加,也有研究^[16]表明,冻融作用下 CO₂ 排放量降低,冻融作用对土壤 CO₂ 排放量的影响可能因含水量和冻结温度的交互作用而变得复杂。对东北黑土区季节性冻融过程中碳排放效应的研究,多集中于整个解冻期内 CO₂ 累积排放量^[16-17],在季节性冻融区由于昼夜温度的变化土壤冻融循环是普遍存在的自然现象^[18-19],白天土壤解冻,CO₂ 排放速率迅速增加^[20],对土壤碳排放产生巨大影响,但“昼融夜冻”过程中的 CO₂ 日排放变化及其对冻融循环的响应如何,还缺乏清晰认识。定量表征土壤含水量、冻结温度和冻融循环次数对冻融

土壤碳排放的贡献也较为困难。本研究通过结构方程模型描述这 3 个因素对土壤碳排放的效应大小。

我国东北黑土区属典型季节性冻融区,降雪量占全年降水总量的 7%~25%,冬季长达 4~5 个月产生的大量积雪,在春季 2~3 周内全部融化,绝大部分黑土由透水性较差的黏土层上部发育,上层滞水现象令土壤含水量显著增大^[18],而高饱和度的土壤在冻融过程中冻胀率较高,潜在贮水能力较弱,导致黑土区极易产生高强度的冻融作用^[21-22]。本文以东北黑龙江省嫩江县鹤山农场黑土为研究对象,通过室内模拟试验,探究含水量、冻融循环和冻结温度等因素影响下的土壤碳矿化动态变化,丰富冻融作用对中纬度黑土地地区的研究,为估算东北平原黑土冻融循环中土壤二氧化碳排放量变化提供一定理论和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究土样取自东北黑龙江省嫩江县鹤山农场九三水土实验站(48°59'13"—49°03'21"N, 125°16'05"—125°21'17"E),为典型季节性冻融区,大陆性季风气候,冬夏温差大,最冷月(1月)气温平均值为-22.5 °C;最热月(7月)气温平均值为 20.8 °C,年平均气温为 1.8 °C,冬季月平均气温最低为-19.04 °C^[23],年平均降水量为 534 mm。该地区海拔高度为 260~360 m,坡度通常为 2%~14%,长度为 500~4 000 m^[24]。实验站以黑土坡耕地为主,砂粒 6.1%,

粉粒 56.92%,黏粒 36.97%,田间有机碳平均含量为 28.5 mg/g,pH 平均为 5.75^[25]。

1.2 试验设计

试验用黑土田间持水量为 32.83% (重量含水量),为对比冻融作用对不同含水量土壤有机碳矿化的影响,设置 3 种土壤含水量,分别为 100% 田间持水量,60% 田间持水量,30% 田间持水量,分别记为:100% WHC,60% WHC,30% WHC。为研究不同冻结温度下的碳排放效应对冻融循环的响应,设置 3 种温度处理:10℃ 恒温处理(对照)、-5℃ 冻结处理(轻度冻结)和-15℃ 冻结处理(重度冻结)。 -5°C 冻结处理和 -15°C 冻结处理分别放在 -5°C 和 -15°C 冰箱并冻结 12 h,后置于温度为 10℃ 的培养箱中融化 12 h,以此为 1 个冻融周期,共设 7 次冻融循环;设置对照组培养温度为 10℃,培养总时长与冻融循环处理相同,各处理 3 个重复。

1.3 试验过程

将土壤中的枯枝落叶和石砾等杂质去除后,经风干、研磨,过 2 mm 筛,并混合均匀后分层填入 100 mL 丁基锂瓶并按层润湿至设定含水量,装填完成后放入 10℃ 培养箱中静置 4 h,使土粒充分均匀润湿。将试验组于 21:00 至翌日 9:00 放入 -5°C 、 -15°C 冰箱中冻结,9:00—21:00 放入 10℃ 恒温恒湿培养箱解冻,冻结 12 h,解冻 12 h,模拟土壤冻融过程,对照组放于 10℃ 恒温恒湿培养箱。

在解冻过程中分为 5 个时段(9:00—10:00,11:30—12:30,14:00—15:00,16:30—17:30,19:00—20:00,记为 T1、T2、T3、T4、T5),采用二氧化碳分析仪测定各时段 CO_2 浓度的初始值和终值,终值和初始值的差值除以丁基锂瓶中土壤干重得到 CO_2 排放速率,将每天测定的 CO_2 排放速率乘以 12 h,连续加和获得 7 天培养期内的累积 CO_2 排放速率。对每个处理多做 1 个样品,在每个时段初和时段末用铁丝(直径 1.2 mm)测解冻深度,计算得到解冻体积,用解冻体积除以总体积得到解冻土壤体积占比。每天 20:00 测完后,参照初始含水量,对瓶子称重,加入蒸馏水补充蒸发的水分。

1.4 数据分析

(1) CO_2 排放速率根据 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ 分析仪测得的 CO_2 浓度值计算得出,计算公式为:

$$F = \frac{V(C_2 - C_1)}{V_m \cdot m} \quad (1)$$

式中: F 为二氧化碳排放速率 $[\mu\text{mol}/(\text{kg} \cdot \text{h})]$; V 为顶空体积(m^3); C_1 、 C_2 分别为单位小时内测得的

空气中 CO_2 初始体积分数与最终体积分数; V_m 为气体摩尔体积(L/mol); m 为培养瓶内土的质量(kg)。

(2) CO_2 日平均排放速率为 5 个时段测定 CO_2 排放速率的平均值,计算公式为:

$$\bar{F} = \frac{1}{5} \sum_{n=1}^5 F_n (n=1,2,\dots,5) \quad (2)$$

式中: $\bar{F}$ 为 CO_2 日平均排放速率 $[\mu\text{mol}/(\text{kg} \cdot \text{h})]$; $F_n (n=1,2,\dots,5)$ 为 T1~T5 各时间段 CO_2 排放速率 $[\mu\text{mol}/(\text{kg} \cdot \text{h})]$ 。

(3) CO_2 单日排放量计算公式为:

$$Q = 12\bar{F} \quad (3)$$

式中: Q 为 CO_2 单日排放量($\mu\text{mol}/\text{kg}$); $\bar{F}$ 为 CO_2 日平均排放速率 $[\mu\text{mol}/(\text{kg} \cdot \text{h})]$; 12 为 9:00—21:00 土壤融化阶段的 12 h。

(4)由于土壤培养时间较短,土壤中有有机碳矿化主要属于活性有机碳分解^[24],用一级动力学方程拟合土壤有机碳矿化累计动态^[26-27]:

$$C_t = C_0 (1 - e^{-kt}) \quad (4)$$

式中: C_t 为土壤培养时间 t 时间累积有机碳矿化累积量($\mu\text{mol}/\text{kg}$); C_0 为土壤有机碳矿化潜力($\mu\text{mol}/\text{kg}$); k 为有机碳矿化速率常数(d^{-1}); t 为天数(d)。

试验数据使用 Excel 2019 软件进行数据汇总和处理,相关统计分析采用 SPSS 27.0 软件,通过 Origin 2022 软件绘图。

1.5 结构方程模型

结构方程建模是一种描述多变量之间线性关系的统计方法^[28]。使用 AMOS 28.0 (IBM Corporation, Meadville, PA) 进行结构方程建模,对模型中的路径系数(效应大小)进行最大似然估计,使用似然比检验的概率值(p)、比较拟合指数(CFI)和均方根误差近似(RMSEA)来评估模型的拟合, $p < 0.05$ 表示数据和模型之间有显著差异,CFI 值接近 1.0, RMSEA 值小于 0.5,表明模型拟合良好。

2 结果与分析

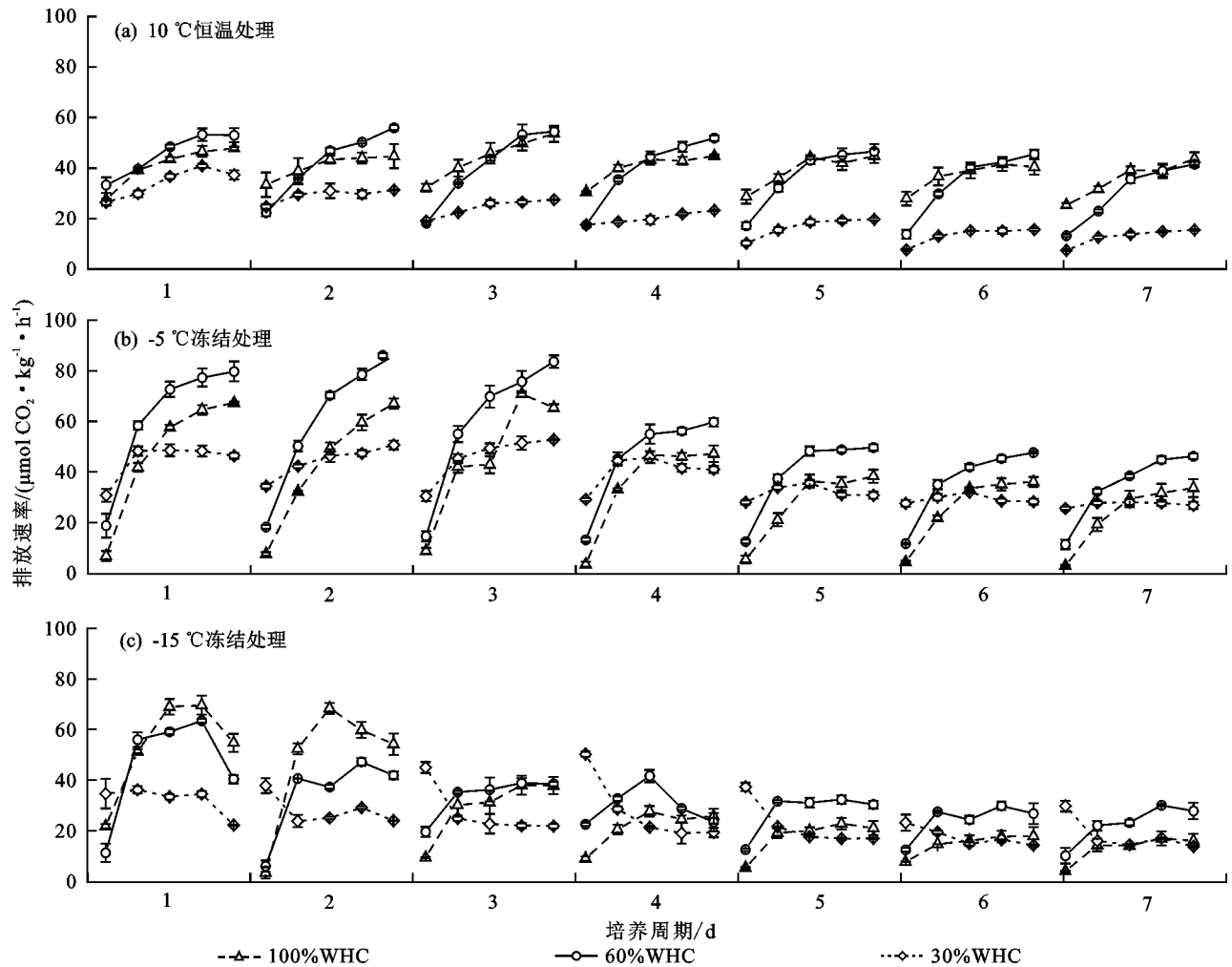
2.1 土壤 CO_2 排放速率日内变化

日内 T1~T5 时段,不同含水量土壤在 3 种处理下 CO_2 排放速率有明显差异(图 1),恒温处理和 -5°C 冻结处理 CO_2 排放速率呈逐渐增加趋势, -15°C 冻结处理下 100% WHC 和 60% WHC 土壤 CO_2 排放速率总体先快速增加后降低,30% WHC 土壤 CO_2 排放速率逐渐降低。随冻融循环次数增加,T1~T5 时段 CO_2 排放速率变化幅度均逐渐减小。日内 100% WHC 和 60% WHC 土壤在 T1 时间段 CO_2 排放速率冻结处理低于恒温处理,后逐渐高于恒温处

理;30%WHC 土壤 T1~T5 时段 CO₂ 排放速率冻结处理均高于恒温处理。

恒温处理下 100%WHC 和 30%WHC 土壤 CO₂ 排放速率在 T1~T5 时段变化范围较小,分别为 29.39~49.69,16.16~24.34 μmol/(kg·h),60%WHC 变化范围最大,为 19.34~49.86 μmol/(kg·h)。-5℃冻结处理时 60%WHC 和 100%WHC 土壤 T1 时间段 CO₂ 排放速率较低,T2 时间段显著增加,后缓慢增加并在 T5 时间段达到最高;30%WHC 土壤 T2 时间段 CO₂ 排放速率小幅增加后上下波动。对比 3 种含水率,T1 时间段末 30%WHC 土壤已完全解冻,30%WHC 在 T1 时间段平均 CO₂ 排放速率最高[29.36 μmol/(kg·h)];T1 时间段末 60%WHC 土壤解冻 90%,60%WHC 土壤在 T1 时间段平均 CO₂ 排放速率次之[14.26 μmol/(kg·h)];T1 时间段末 100%WHC

土壤解冻 83%,100%WHC 在 T1 时间段平均 CO₂ 排放速率最低[5.54 μmol/(kg·h)]。至 T2 时段初,所有土壤已全部解冻,T4~T5 时间段 CO₂ 排放速率 60%WHC 土壤最高,100%WHC 土壤次之,30%WHC 土壤最低(图 1b)。-15℃冻结处理时,T1 时间段末 30%WHC 土壤已完全解冻,30%WHC 土壤 T1 时间段 7 天平均 CO₂ 排放速率最高[36.81 μmol/(kg·h)];T1 时间段末 60%WHC 土壤解冻 68%,60%WHC 在 T1 时间段 7 天平均 CO₂ 排放速率次之[13.43 μmol/(kg·h)];T1 时间段末 100%WHC 土壤解冻 45%,100%WHC 在 T1 时间段 7 天平均 CO₂ 排放速率最低[8.58 μmol/(kg·h)]。至 T2 时段初,所有土壤已全部解冻,T2 时段 100%WHC 和 60%WHC 土壤 CO₂ 排放速率急剧增加,而 30%WHC 除 1 次冻融循环外土壤 CO₂ 排放速率急剧减小(图 1c)。



注:每日数据点对应的时段由左往右依次为 T1、T2、T3、T4、T5。

图 1 CO₂ 排放速率日内变化

Fig. 1 Intra-day variation of CO₂ release rate

2.2 土壤 CO₂ 排放量逐日变化

3 种处理下随着培养周期增加,土壤 CO₂ 日排放量均呈下降趋势(图 2)。冻融处理前期 CO₂ 排放量

较高,后快速下降并趋于稳定,恒温处理 CO₂ 排放量较低并缓慢降低。10℃恒温培养下,100%WHC 和 60%WHC 土壤 CO₂ 排放量相近并显著高于 30%

WHC 土壤(图 2a)。-5℃冻结处理时,100% WHC 和 30% WHC 土壤 CO₂排放量相近并显著低于 60% WHC 土壤(图 2b)。-15℃冻结处理时(图 2c),100% WHC 土壤 CO₂排放量在前 2 次冻融循环周期最高,在后 4 次冻融循环周期降至最低。

在 10℃恒温培养下,100% WHC 和 60% WHC 土壤 CO₂排放量呈缓慢下降趋势,30% WHC 降低较快。7 天培养中,100% WHC 和 60% WHC 的 CO₂排放量相近,均高于 30% WHC,并随培养周期增加,差异越来越明显(图 2a)。冻结温度为 -5℃时,100% WHC 和 60% WHC 前 3 次冻融循环中 CO₂排放量均较高,第 4 次冻融循环 CO₂排放量迅速下降,并随累计冻融循环

周期增加趋于稳定。30% WHC 前 3 次冻融循环中 CO₂排放量也较高并略有增加,第 4 次冻融循环 CO₂排放量开始下降并逐渐趋于稳定。在 7 次冻融循环中 60% WHC 的 CO₂排放量高于 100% WHC 和 30% WHC。前 3 次冻融差异最明显,60% WHC 平均 CO₂排放量比 100% WHC 和 30% WHC 分别高 33.0%, 35.2%(图 2b)。冻结温度为 -15℃时,前 2 次冻融循环中,100% WHC 土壤 CO₂排放量比 60% WHC 和 30% WHC 分别高 25.2%, 68.0%;第 3~4 次冻融循环 3 种含水率土壤均无显著性差异;第 5~7 次冻融循环 60% WHC 土壤 CO₂排放量高于 100% WHC 和 30% WHC,100% WHC 和 30% WHC 无明显差异(图 2c)。

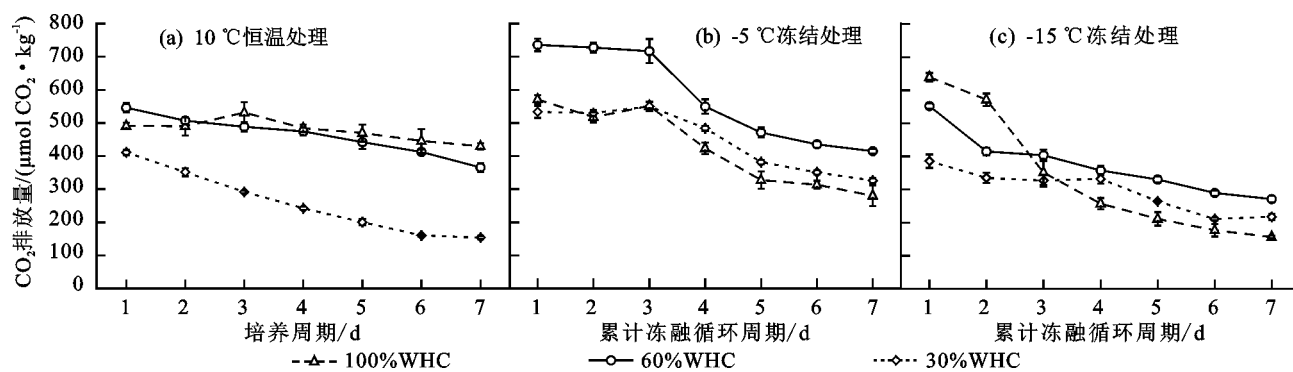


图2 CO₂排放量逐日变化

Fig. 2 Daily variation chart of CO₂ emission

2.3 土壤含水量、冻结温度和冻融循环次数对 CO₂ 排放量的贡献

采用结构方程模型评估土壤含水量、冻结温度和冻融循环次数对土壤 CO₂排放量的影响。 $p < 0.05$, 比较拟合指数(CFI) = 1.000, 均方根误差(RMSEA) = 0.295, 模型效果较好。在冻融作用下土壤 CO₂排放量受冻融循环次数(路径系数 = -0.63)、含水量(路径系数 = 0.21)和冻结温度(路径系数 = 0.14)的直接影响,冻融循环次数对土壤 CO₂排放量影响最大,含水率次之,冻结温度最小,与冻融循环次数呈负相关,与含水量和冻结温度呈正相关(表 1)。

表 1 3 种影响因素的路径系数

Table 1 Path coefficients for three influencing factors

因子	路径系数
冻融循环次数	-0.63*
含水量	0.21*
冻结温度	0.14*

注:路径系数为标准化系数,*表示($p < 0.05$)。

2.4 土壤 CO₂ 累积排放量

随冻结温度降低,100% WHC 土壤 7 天 CO₂ 累积排放量逐渐减少,60% WHC 和 30% WHC 土壤 7

天 CO₂ 累积排放量先增大后减小(图 3)。10℃恒温处理下,100% WHC 和 60% WHC 土壤 7 天 CO₂ 累积排放量相近均显著高于 30% WHC 土壤($p < 0.05$);-5℃冻结处理下,100% WHC 和 30% WHC 土壤 7 天 CO₂ 累积排放量相近均显著低于 30% WHC 土壤($p < 0.05$);-15℃冻结处理下,60% WHC 土壤 7 天 CO₂ 累积排放量显著高于 100% WHC 土壤($p < 0.05$),100% WHC 土壤显著高于 30% WHC 土壤($p < 0.05$)。

10℃恒温处理下,100% WHC 的 CO₂ 累积排放量最高,为 $(3\ 342.66 \pm 122.03) \mu\text{mol/kg}$; 60% WHC 的 CO₂ 累积排放量次之,为 $(3\ 235.40 \pm 85.49) \mu\text{mol/kg}$; 30% WHC 的 CO₂ 累积排放量最低,为 $(1\ 810.57 \pm 19.42) \mu\text{mol/kg}$ (图 3)。-5℃冻结处理下,60% WHC 的 CO₂ 累积排放量最高,为 $(4\ 052.52 \pm 111.98) \mu\text{mol/kg}$; 30% WHC 的 CO₂ 累积排放量次之,为 $(3\ 156.56 \pm 44.22) \mu\text{mol/kg}$; 100% WHC 的 CO₂ 累积排放量最低,为 $(2\ 984.00 \pm 122.03) \mu\text{mol/kg}$ (图 3)。-15℃冻结处理下,60% WHC 的 CO₂ 累积排放量最高,为 $(2\ 618.80 \pm 56.98) \mu\text{mol/kg}$; 100% WHC 次之,为 $(2\ 343.80 \pm 28.14) \mu\text{mol/kg}$;

30% WHC 的 CO₂ 累积排放量最低,为(2 072.33 ± 62.66) μmol/kg(图 3)。

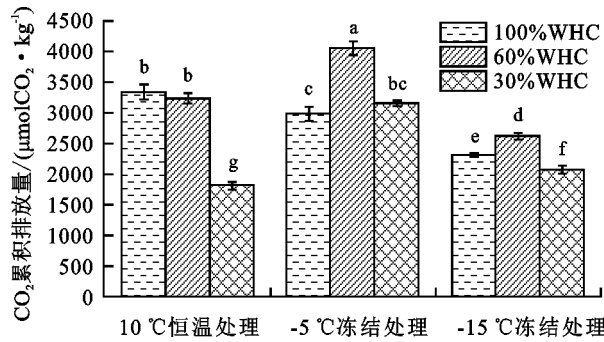


图 3 土壤 CO₂ 累积排放量

Fig. 3 Cumulative release of soil CO₂

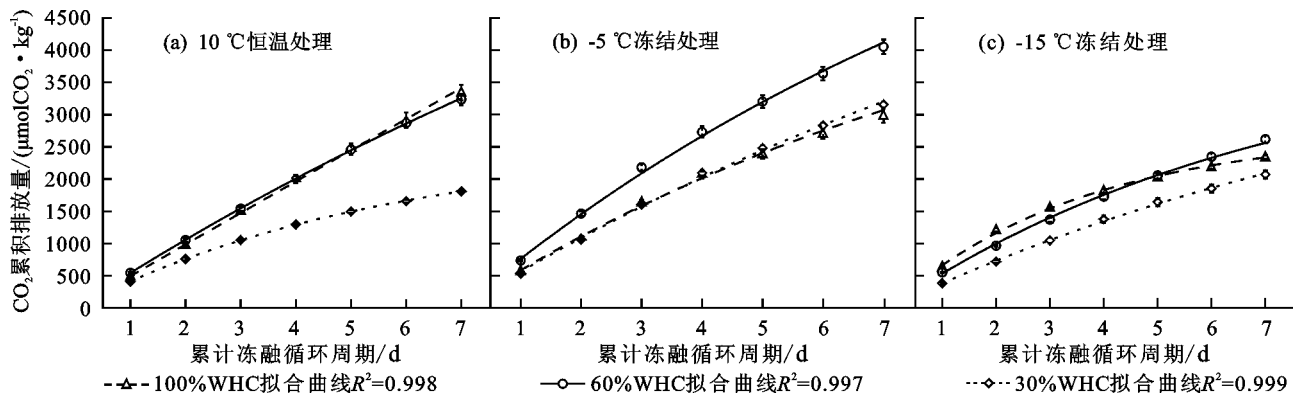


图 4 土壤 CO₂ 累积排放量与一级动力学方程拟合

Fig. 4 Fitting diagram of cumulative release of soil CO₂ and first-order kinetic equation

表 2 土壤碳矿化潜力 C₀ 值和矿化速率常数 k

Table 2 Soil carbon mineralization potential C₀ value and mineralization rate constant

处理	含水量	C ₀ / (mmol · kg ⁻¹)	k / (×10 ⁻³ d ⁻¹)	R ²
10 °C 恒温处理	100% WHC	110.511 ± 13.436	4.48 ± 5.48	0.999
	60% WHC	10.321 ± 0.374	54.10 ± 2.17	0.999
	30% WHC	2.542 ± 0.022	177.56 ± 2.33	0.999
-5 °C 冻结处理	100% WHC	6.039 ± 0.644	101.35 ± 12.86	0.998
	60% WHC	8.740 ± 0.891	90.99 ± 10.98	0.998
	30% WHC	8.033 ± 1.082	72.63 ± 11.73	0.998
-15 °C 冻结处理	100% WHC	2.726 ± 0.066	278.06 ± 12.11	0.998
	60% WHC	4.131 ± 0.316	138.28 ± 13.27	0.997
	30% WHC	4.559 ± 0.290	87.56 ± 6.79	0.999

注:表中数据为平均值 ± 标准差。

3 讨论

冻融循环次数对土壤 CO₂ 排放量影响最大(-0.63),含水量次之(0.21),冻结温度最小(0.14)(表 1)。在冻融循环初期 CO₂ 被大量排放出来^[29],经历多次冻融循环后,土壤 CO₂ 排放量迅速减少(图 2),这可能由于土壤养分在冻融循环初期被大量排放出来,被微生物呼吸利用,进而导致 CO₂ 的排放量陡然增加,随冻融循环次数增加,养分很快被消耗,CO₂

2.5 土壤有机碳矿化拟合

利用一级动力学方程拟合不同处理土壤有机碳矿化累积动态,均达到良好的拟合效果(R² > 0.997)(图 4)。含水量和冻结温度对有机碳矿化潜力 C₀ 值有显著影响。在恒温处理时,含水率越高,土壤有机碳矿化潜力 C₀ 值越大;-5 °C 轻度冻结处理,中等含水率土壤有机碳矿化潜力 C₀ 值最大;-15 °C 重度冻结处理,含水率越低,土壤有机碳矿化潜力 C₀ 值越大,土壤有机碳矿化速率常数 k 变化规律与 C₀ 相反(表 2)。恒温处理土壤 C₀ 值大于冻结处理,恒温土壤可矿化部分未完全发生矿化反应,冻结处理土壤矿化完全程度高于恒温处理土壤(表 2)。

的排放量急剧减少^[30-31],且经历冻融循环的土壤碳矿化程度高于恒温处理土壤(图 4、表 2)。此外,本文仅分析冻融循环次数、含水量和冻结温度对冻融土壤 CO₂ 排放量的影响,未来研究可综合土壤微生物、土壤有机物和土壤质地(砂质土、黏质土、壤土)等因素进一步研究冻融土壤碳排放的主控因素。

冻融作用增加低含水量土壤(30% WHC)的 CO₂ 累积排放量;降低高含水量土壤(100% WHC)的 CO₂ 累积排放量,并随冻结程度加深(-15 °C)更显著(图 3)。前人^[13,32]研究表明,土壤含水量较低时,冻融作用显著增加 CO₂ 累积排放量,本研究也显示低含水量土壤(30% WHC)迅速解冻达到 CO₂ 排放速率峰值,显著高于恒温处理(图 1)。而对于 100% WHC 处理,高含水量时冻融作用或可破碎土壤大孔隙增加小孔隙量,可能封闭土壤孔隙^[33],形成的高厌氧环境降低细菌和真菌丰度^[34],微生物代谢活动减弱^[35-36],产生更少的 CO₂;且因土壤孔隙封闭对气体传输也产生影响,也降低土壤 CO₂ 排放量。此外,在更低的冻结温度条件下(-15 °C),部分微生物进入休眠状态^[32,37],土壤 CO₂ 排放量进一步减少。对于中等含水量土壤(60% WHC),其 CO₂ 排放量显著高于 100% WHC 和 30% WHC 处理,且轻度冻结增加

CO₂累积排放量,重度冻结降低 CO₂累积排放量(图3),可见含水量和冻融温度耦合作用于冻融过程中的土壤 CO₂排放,且作用机制较为复杂,未来研究可以进一步细化降温梯度和含水量梯度,系统揭示冻融过程二者对有机碳矿化影响的拐点阈值。

4 结论

(1)冻融循环次数对黑土 CO₂排放量影响最大,含水率次之,冻结温度最小,贡献度分别为-0.63,0.21,0.14,经历冻融循环后增加土壤的碳矿化程度。

(2)冻融作用增加低含水量土壤(30%WHC)的 CO₂累积排放量;降低高含水量土壤(100%WHC)的 CO₂累积排放量,并随冻结程度加深(-15℃)而显著;而对中等含水量土壤(60%WHC),轻度冻结增加 CO₂累积排放量,重度冻结降低 CO₂累积排放量。

(3)一级动力学方程对冻融土壤 CO₂排放量的拟合效果较好($R^2 > 0.997$),含水量和冻结温度对有机碳矿化潜力 C_0 值有显著影响。未来研究可以进一步细化降温梯度和含水量梯度,系统揭示冻融过程二者对有机碳矿化影响的拐点阈值。

参考文献:

- [1] SCHIMEL D S, HOUSE J I, HIBBARD K A, et al. Recent patterns and mechanisms of carbon exchange by terrestrial ecosystems[J]. *Nature*, 2001, 414: 169-172.
- [2] RAICH J W, POTTER C S, BHAGAWATI D. Interannual variability in global soil respiration, 1980—1994[J]. *Global Change Biology*, 2002, 8(8): 800-812.
- [3] LIU X D, CHEN B D. Climatic warming in the Tibetan Plateau during recent decades[J]. *International Journal of Climatology*, 2000, 20(14): 1729-1742.
- [4] LIU Q, PIAO S L, FU Y H, et al. Climatic warming increases spatial synchrony in spring vegetation phenology across the Northern Hemisphere[J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, 46(3): 1641-1650.
- [5] 王展, 张玉龙, 虞娜, 等. 冻融作用对土壤微团聚体特征及分形维数的影响[J]. *土壤学报*, 2013, 50(1): 83-88.
WANG Z, ZHANG Y L, YU N, et al. Effects of freezing-thawing on characteristics and fractal dimension of soil microaggregates[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50(1): 83-88.
- [6] LI G Y, FAN H M. Effect of freeze-thaw on water stability of aggregates in a black soil of Northeast China[J]. *Pedosphere*, 2014, 24(2): 285-290.
- [7] SONG Y, ZOU Y C, WANG G P, et al. Altered soil carbon and nitrogen cycles due to the freeze-thaw effect: A meta-analysis[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2017, 109: 35-49.
- [8] MIURA M, HILL P W, JONES D L. Impact of a single freeze-thaw and dry-wet event on soil solutes and microbial metabolites[J]. *Applied Soil Ecology*, 2020, 153: e103636.
- [9] SHI X H, ZHANG X P, YANG X M, et al. Contribution of winter soil respiration to annual soil CO₂ emission in a Mollisol under different tillage practices in Northeast China[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2012, 26(2): GB2007.
- [10] SCHINDLBACHER A, JANDL R, SCHINDLBACHER S. Natural variations in snow cover do not affect the annual soil CO₂ efflux from a mid-elevation temperate forest[J]. *Global Change Biology*, 2014, 20(2): 622-632.
- [11] KREYLING J, BEIERKUHNEIN C, PRITSCH K, et al. Recurrent soil freeze-thaw cycles enhance grassland productivity[J]. *The New Phytologist*, 2008, 177(4): 938-945.
- [12] GREEN J K, SENEVIRATNE S I, BERG A M, et al. Large influence of soil moisture on long-term terrestrial carbon uptake[J]. *Nature*, 2019, 565: 476-479.
- [13] BYUN E, REZANEZHAD F, FAIRBAIRN L, et al. Temperature, moisture and freeze-thaw controls on CO₂ production in soil incubations from northern peatlands[J]. *Scientific Reports*, 2021, 11: e23219.
- [14] HUMPHREY V, BERG A, CIAIS P, et al. Soil moisture-atmosphere feedback dominates land carbon uptake variability[J]. *Nature*, 2021, 592: 65-69.
- [15] WU X, LI T, WANG D B, et al. Soil properties mediate the freeze-thaw-related soil N₂O and CO₂ emissions from temperate grasslands[J]. *Catena*, 2020, 195: e104797.
- [16] 陈哲, 韩瑞芸, 杨世琦, 等. 东北季节性冻融农田土壤 CO₂、CH₄、N₂O 通量特征研究[J]. *农业环境科学学报*, 2016, 35(2): 387-395.
CHEN Z, HAN R Y, YANG S Q, et al. Fluxes of CO₂, CH₄ and N₂O from seasonal freeze-thaw arable soils in Northeast China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(2): 387-395.
- [17] WU X W, ZANG S Y, MA D L, et al. Emissions of CO₂, CH₄, and N₂O fluxes from forest soil in permafrost region of Daxing'an Mountains, Northeast China[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, 16(16): e2999.
- [18] 魏星, 陈晓飞, 范昊明, 等. 东北主要旱地耕作土壤冻融环境分析[J]. *水土保持研究*, 2009, 16(1): 39-42.
WEI X, CHEN X F, FAN H M, et al. Freezing-thawing condition of main dryland farming soil areas in Northeast China[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2009, 16(1): 39-42.
- [19] 伍星, 沈珍瑶. 冻融作用对土壤温室气体产生与排放的影响[J]. *生态学杂志*, 2010, 29(7): 1432-1439.

- WU X, SHEN Z Y. Effects of freezing-thawing cycle on greenhouse gases production and emission from soil: A review[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2010, 29(7): 1432-1439.
- [20] 杨世君,高雅玉,柯造成,等.极端干旱区土壤呼吸对储水灌溉和冻融循环的响应[J].*水土保持通报*, 2022, 42(4): 25-32, 65.
- YANG S J, GAO Y Y, KE H C, et al. Response of soil respiration to storage irrigation and freeze-thaw cycles in extremely arid areas[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2022, 42(4): 25-32, 65.
- [21] 刘佳,范昊明,周丽丽,等.冻融循环对黑土容重和孔隙度影响的试验研究[J].*水土保持学报*, 2009, 23(6): 186-189.
- LIU J, FAN H M, ZHOU L L, et al. Study on effects of freeze-thaw cycle on bulk density and porosity of black soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2009, 23(6): 186-189.
- [22] 王一菲,郑粉莉,张加琼,等.冻融作用对典型黑土土壤风蚀的影响[J].*水土保持学报*, 2020, 34(5): 34-41.
- WANG Y F, ZHENG F L, ZHANG J Q, et al. Effects of freeze-thaw on wind erosion in the typical mollisol region[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34(5): 34-41.
- [23] HU Y X, LI X W, LIU H M, et al. Progressively thawed soil layers differed in microbial properties and CO₂ emission rates[J]. *Catena*, 2023, 221: e106791.
- [24] LIU L, ZHANG K L, ZHANG Z D, et al. Identifying soil redistribution patterns by magnetic susceptibility on the black soil farmland in Northeast China[J]. *Catena*, 2015, 129: 103-111.
- [25] HU Y X, LI X W, GUO S L, et al. On-site soil dislocation and localized CNP degradation: The real erosion risk faced by sloped cropland in northeastern China[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2020, 302: e107088.
- [26] PARTON W J, SCHIMEL D S, COLE C V, et al. Analysis of factors controlling soil organic matter levels in great Plains Grasslands[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1987, 51(5): e1173.
- [27] CAMPBELL C A, ZENTNER R P, LIANG B C, et al. Organic C accumulation in soil over 30 years in semiarid southwestern Saskatchewan: Effect of crop rotations and fertilizers[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 2000, 80(1): 179-192.
- [28] BYRNE B M. Structural equation modeling with Mplus: Basic concepts, applications, and programming[M]. New York: Routledge, 2011.
- [29] 朱文煜,李艳红,李发东,等.艾比湖湿地季节性冻融土壤温室气体排放规律研究[J].*北京师范大学学报(自然科学版)*, 2020, 56(4): 549-556.
- ZHU W Y, LI Y H, LI F D, et al. Greenhouse gas emission from seasonal frozen-thawed soil in Ebinur Lake wetland[J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2020, 56(4): 549-556.
- [30] 高德才,白娥,冻融循环期间土壤氧化亚氮排放影响因素[J].*植物生态学报*, 2021, 45(9): 1006-1023.
- GAO D C, BAI E. Influencing factors of soil nitrous oxide emission during freeze-thaw cycles[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2021, 45(9): 1006-1023.
- [31] 鲁博权,臧淑英,孙丽.冻融作用对大兴安岭典型森林土壤活性有机碳和氮矿化的影响[J].*环境科学学报*, 2019, 39(5): 1664-1672.
- LU B Q, ZANG S Y, SUN L. The effects of freezing-thawing process on soil active organic carbon and nitrogen mineralization in Daxing'anling Mountain forests[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019, 39(5): 1664-1672.
- [32] MANZONI S, SCHAEFFER S M, KATUL G, et al. A theoretical analysis of microbial eco-physiological and diffusion limitations to carbon cycling in drying soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, 73: 69-83.
- [33] GÜLLÜ H, KHUDIR A. Effect of freeze-thaw cycles on unconfined compressive strength of fine-grained soil treated with jute fiber, steel fiber and lime[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2014, 106/107: 55-65.
- [34] SONG Y Y, SONG C C, HOU A X, et al. Temperature, soil moisture, and microbial controls on CO₂ and CH₄ emissions from a permafrost peatland[J]. *Environmental Progress and Sustainable Energy*, 2021, 40(5): e13693.
- [35] KECHAVARZI C, DAWSON Q, BARTLETT M, et al. The role of soil moisture, temperature and nutrient amendment on CO₂ efflux from agricultural peat soil microcosms[J]. *Geoderma*, 2010, 154(3/4): 203-210.
- [36] SKOPP J, JAWSON M D, DORAN J W. Steady-state aerobic microbial activity as a function of soil water content[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1990, 54(6): 1619-1625.
- [37] SCHOSTAG M, PRIEMÉ A, JACQUIOD S, et al. Bacterial and protozoan dynamics upon thawing and freezing of an active layer permafrost soil[J]. *The ISME Journal*, 2019, 13: 1345-1359.