

不同冻结温度黑土渐次解冻过程有机碳矿化特征及影响因素

刘会敏¹,宋媛¹,栗现文²,胡亚鲜^{1*} (1.西北农林科技大学水土保持研究所,黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室,杨凌 712100; 2.西北农林科技大学水利与建筑工程学院,杨凌 712100)

摘要: 将粒径<2mm的黑土填充土柱后,湿润至田间持水量(41%),分别在-10℃、-15℃和-20℃冷冻12h,于10℃解冻。为捕捉土壤水盐养分在土柱由外而内冻结过程中的再分布特征,在土柱渐次解冻过程中从外到内逐层剥离成六层(T1~T6),并进行指标测定。结果表明:1)土柱最外层T1的含水率最高达48.9%~61.9%,而内核T6最干燥仅为29.3%~35%,其中-20℃冻结土柱在解冻后外层的水分富集程度最显著。电导率(EC)则表现为外层T1和内层T6偏高(53.9~66.4μS/cm和55.0~64.0μS/cm),而中间层T3偏低(53~56.5μS/cm),且-10℃冻结后各渐次解冻土层间的EC差异最显著。2)可溶性有机碳(DOC)由外层T1向内层T6逐渐降低,而微生物生物量碳(SMBC)则由外层向内层呈现增多趋势,且冻结温度越低,DOC和SMBC在各解冻土层间的差异越明显。3)CO₂释放速率表现为外层T1和内层T6较高(34~40.7μg/g和33.5~63μg/g),而中间层T4较低(23.7~25.0μg/g),且-10℃冻结后各渐次解冻土层释放的CO₂显著少于-20℃冻结温度。4)各解冻土层SMBC与DOC线性负相关,但与CO₂释放速率线性正相关,说明冻结过程死亡微生物残体释放的可溶性物质,可促进存活微生物在土壤解冻后的呼吸过程。本研究通过逐层剥离方法可有效捕捉土壤冻融过程两极化分布对碳矿化的影响,而不同冻结温度则加剧了渐次解冻土层间的异质性,突破了仅基于全冻全融过程的传统研究方法对土壤冻融环境效应认识的片面性。

关键词: 冻融; 温度; 水盐; 微生物; CO₂排放

中图分类号: X142 文献标识码: A 文章编号: 1080-6923(2023)03-1288-10

Influences of freezing temperature on the inter-layer variations of mollisol organic carbon mineralization over progressive thawing. LIU Hui-min¹, SONG Yuan¹, LI Xian-wen², HU Ya-xian^{1*}, (1.State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2.College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, 712100, China). *China Environmental Science*, 2023,43(3): 1288~1297

Abstract: The process of soil freezing and thawing, due to the severe changes of temperature and the two-phase transformation of ice and water, can profoundly reorganize the spatial distribution pattern of water, salt, nutrients and microorganisms within the soil matrix. The freezing temperature determines the structure and migration rate of the freezing front, which consequently affects the migration and diffusion efficiency of water, salt and nutrients and hence perturbs soil organic carbon mineralization. In this study, a mollisol (particle size < 2mm) was re-filled into soil columns, rewetted to field capacity (41%), respectively frozen at -10℃, -15℃ and -20℃ for 12h, and then thawed at 10℃. Individual soil columns were gradually peeled from the outside to the inner core into six layers (T1~T6) while progressively thawing, to capture the redistribution patterns of soil water, salt and nutrients during freeze-thaw. The results show that: 1) The outmost layer T1 had the highest water content (48.9%~61.9%), but the inner core T6 was drier with the lowest water content (29.3%~35%), and such polarized distributions of moisture were most significant in the soil columns frozen at -20℃. On the contrary, the electrical conductivity (EC) was higher in the outer layer T1 and inner layer T6 (53.9~66.4μS/cm and 55.0~64.0μS/cm), but lowest in the middle layer T3 (53~56.5μS/cm). The difference of EC among the soil layers was most significant for the soil column frozen at -10℃. 2) The dissolved organic carbon (DOC) gradually decreased, but the soil microbial biomass carbon (SMBC) increased, from the outer layer T1 to the inner core T6. Such patterns were more pronounced when the soil columns experienced lower freezing temperature. 3) The CO₂ emission rate was higher in the outer layer T1 and inner core T6 (34~40.7μg/g and 33.5~63μg/g), but lower in the middle layer T4 (23.7~25.0μg/g). The soil columns after frozen at -10℃ released significantly less CO₂ than those frozen at -20℃. 4) The SMBC was negatively linearly correlated with DOC, but positively linearly correlated with CO₂ emission rate, suggesting that freezing can neutralize microbes, and the thus released dissolved nutrients can promote the survived microbes to respire during thawing. Our findings show that, peeling off the progressively thawed soil layers from the frozen core can effectively capture the polarized distribution of biophysicochemical properties and the potential

收稿日期: 2022-07-07

基金项目: 中国科学院“西部之光”人才培养计划“西部青年学者”项目(XAB2020YN03);中国博士后科学基金(2020M673518);中央高校基本科研业务费专项资金资助(2452020338)

* 责任作者, 副研究员, huyaxian@nwafu.edu.cn

impacts on carbon mineralization. Different freezing temperatures regulated the inter-layer heterogeneity over progressive thawing, further pointing to the limitation and thus partial understanding of freeze-thaw impacts on soil carbon mineralization if merely based on conventional investigations after complete thawing.

Key words: freeze-thaw; temperature; water-salt; soil microbes; CO₂ emissions

我国约有 13.4% 地区可发生冻融侵蚀,且绝大部分集中在东北、西北和青藏高原地区^[1]。东北黑土区是中国主要的产粮区之一^[2],但每年因水土流失导致粮食产能损失达 $1.00 \times 10^7 \text{ t}$ ^[3]。除夏季暴雨外,冬春季冻融侵蚀也可导致大量的水土流失^[4-6]。不仅如此,冻融作用还可激发微生物呼吸,使得冻融期 CO₂ 排放量占每年的 5%~12%^[7]。因此,揭示冻融过程土壤理化生变化对有机碳矿化的作用机理对定量评估东北黑土区土壤碳收支具有重大意义。

土壤冻融过程中剧烈的温度变化可重塑土体内的水盐养分和微生物空间分布格局,而不同冻结温度决定冻结锋在土体内的迁移速率,进而影响水盐养分在土体内的迁移扩散效率以及有机碳矿化特征^[8]。主要表现为土壤水在冻结过程中由暖端向冷端冰锋处聚集^[9],同时可溶性物质在冰晶纯化效应下从冻结峰面排出至未冻结土层,或者富集于土壤颗粒间的未冻水中^[10],在土体内部形成新的土壤水分和可溶物质空间分布格局^[11]。同时,冻胀作用可直接杀灭微生物^[12],破坏土壤团聚体^[13-14],释放可溶性有机物供存活微生物利用^[15],或裂解释放出小分子糖和氨基酸等,进而影响冻融过程中土壤微生物区系变化^[16]和呼吸特征^[17]。而冻结温度的变化会影响土壤冻结锋的结构^[18],改变土壤冻结锋的迁移速率,进而调控土壤水和可溶物质的扩散路径及效率^[19]。微生物的死亡与团聚体破坏程度也均受冻结温度和速度的影响^[20]。然而,目前研究多基于冻融过程中土壤微生物群落的整体响应^[21],而土壤微生物的碳分解效率如何适应不同冻结温度引起的土壤基质中水、盐和养分的空间再分布,亟需系统研究。

东北黑土区冻融期水土流失的特殊性在于上下土层解冻时间不均一,上层土壤解冻后,下层未解冻土层可形成不透水层,这不仅可增强融雪径流,还可促使上下土层分离,加剧泥沙在坡面尺度的空间分布异质性^[22]。传统方法仅对比全冻全融前后土壤特性的改变,无法准确揭示东北黑土区上下土层先后解冻过程中的水土流失风险及环境效应,须辨明

渐次解冻过程中各分离土层的理化生特性。因此,本实验通过逐层剥离土柱模拟渐次解冻引起的土层分离,对比分析不同温度冻结后,各渐次解冻土层土壤水分、可溶性物质、微生物生物量碳和 CO₂ 释放速率,明确冻结温度对渐次解冻过程中水-盐-养分在各土层分布特征的影响,进而揭示各渐次解冻土层微生物与 CO₂ 释放对不同冻结温度的异质性响应机理。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

选取黑龙江省嫩江县鹤北小流域典型长缓坡农耕地作为研究对象(48°43'N, 124°56'E),研究区所在流域面积为 2.8 km², 坡长一般 800~1500 m, 坡度范围为 1~5°。土壤类型为黑土, 表土土壤有机碳含量为 25 mg/g, 平均 pH 值为 5.75 左右。该区属大陆性季风气候, 年平均气温为 1.8°C, 月平均最高气温为 7 月份的 23.5°C, 最低为 1 月份的 -25.4°C。同时 3~4 月迅速回暖, 温度每天增高 0.3~0.55°C, 昼夜温差较大, 最多可相差 17°C。气温的持续上升导致积雪迅速融化, 在 4 月中旬产生强烈的融雪侵蚀。

1.2 土壤采集与样品处理

采集坡耕地弱侵蚀区表层土壤, 风干后过筛, 得到 <2 mm 粒径的土样。取 1300 g 土样装入容器中, 形成直径和高度约为 12 cm 的类球形土柱, 一方面可代表融雪过程中扰动的冻土融化层(10~15 cm), 同时也便于土柱从表层到内核均匀冻结和融化。土壤分层填入容器并润湿, 每层填充 100 g 干土, 润湿时进行称重, 直至土壤达到 41% 的田间持水量。土柱回填完成后, 放入 10°C 培养箱中静置 4 h, 使土粒充分均匀润湿, 后分别置于 -10°C、-15°C 和 -20°C 温度(FCD-268SEA, 中国海尔)冷冻 12 h, 实现从土柱四周到土核的自外向内单向冻结。而后置于 10°C 恒温箱(HWS-150, 中国普朗特)内解冻。预实验已在内外不同土层埋设线状温度探头实时追踪各土层温度变化, 确保由外至内单向冻结过程的可

行性和有效性。

为模拟渐次解冻导致的土层分离,将解冻土柱从外到内逐层剥离,通过从冻结土柱上逐层刮取融化的松软土壤,获取六个重量约为300g的土层:T1、T2、T3、T4、T5和T6。同时T1~T5层的剥离土层厚度分别为0.35cm,0.41cm,0.48cm,0.5cm和0.86cm,余下类球形土核T6的半径为3.4cm。

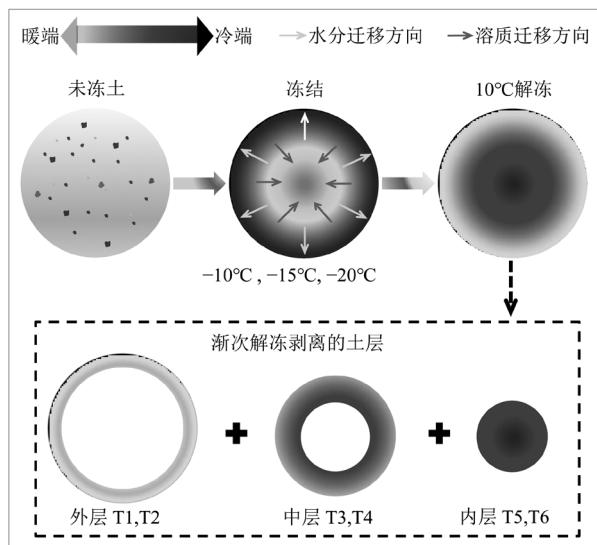


图1 试验设计示意

Fig.1 Schematic diagram of experimental design

考虑到三个冻结温度下所形成的土柱冻结程度不同,为使每层土壤重量相近,具有较好的可比性,三个冻结温度下的T1~T6各土层的剥离时间间隔分别为:-10℃,55min、30min、30min,后三层未完全冻结,均匀分为3组;-15℃,90min、40min、45min、45min、40min、50min;-20℃,120min、40min、40min、40min、40min、50min。

将各渐次解冻分离土层土样分为三组:第一组放置在10℃恒温箱中培养7d,对比测定不同土层CO₂呼吸速率差异;第二组保持湿润,进行含水率及土壤微生物生物量碳测定;第三组风干后,用于测定pH值、电导率(EC)、可溶性有机碳(DOC)。同时,对未经冻融土壤和全冻全融土壤的上述理化生特性进行测定,作为对照组。每种处理重复3次。

1.3 指标测定

各土样电导率EC使用电导率仪(DDSJ-308F,中国上海)测定,pH值使用pH计(DELTA-320,中国上海)测定。另取10g湿土于50mL离心管中,加入蒸

馏水40mL,震荡2h,离心10min(6000r/min)后,用0.45μm滤膜过滤,滤液中的DOC含量用总有机碳分析仪(TOC-VCPH,岛津,日本京都)测定。通过土样烘干前后的质量差,计算土壤质量含水率。

将六个土层的湿润土样分别装进100mL丁基锂瓶中,在10℃下培养7d。每天在固定时间段,用CO₂/H₂O分析仪(LI-850,Licor,USA)在60min内测量5次CO₂浓度。对五个CO₂浓度及其测定时间点进行回归分析,除以丁基锂瓶中土壤干重得到CO₂排放速率。将每天测定的CO₂排放速率乘以24h,连续加和获得7d培养期内的累积CO₂排放速率。

采用底物诱导呼吸法测定不同解冻阶段各土样的微生物生物量碳(SMBC),具体方法如下:称取相当于25g烘干土重的湿润土壤,按照每克干土加入6mg葡萄糖与1.5mg滑石粉混合物的比例,与土壤充分混匀后,装进100mL丁基锂瓶中,分5次测定1.5h内的CO₂释放速率。按照每μg CO₂-C/(g·h)呼吸速率相当于1/15μg/g的微生物生物量碳进行换算,得到各层土样总微生物生物量碳^[23]。

1.4 数据处理

试验数据均采用Excel软件计算分析,绘图采用Origin完成,采用SPSS25进行(ANOVA)单因素方差分析($P<0.05$),并用LSD多重比较检验方法进行均值比较。

2 结果

2.1 水分、电导率和pH值在各渐次解冻土层的分布特征

三种冻结温度下,渐次解冻土层均表现为最外层T1的土壤含水率最高,达48.9%~61.9%,显著高于冻结前41%的初始含水率(图2a,2b,2c),而内层土壤含水率急剧下降,至最内层T6含水率仅为29.3%~35%(图2a,2b,2c)。冻结温度越低,土壤水在内外土层间的异质性越强烈:-20℃冻结土柱各渐次解冻土层间的水分变化最显著,从T1层的59.3%降低到T6层的29.3%(图2c),而-10℃冻结土柱各层间的水分变化最小,从T1层的48.9%降低到T6层的35%(图2a)。

不同土层间,EC值在T1层最大(53.9~66.4μS/cm),在中间层T3最低(53~56.5μS/cm),

(图 2d,2e,2f).不同冻结温度下,-10℃冻结土柱各渐次解冻土层间的 EC 值(54.2~66.4μS/cm)整体大于-15℃ 和 -20℃ 冻结土柱(分别为 48.5~56.7μS/cm 和 53.4~57.4μS/cm).同时-10℃下,各渐次解冻土层间的 EC 变化最显著(图 2d),从 T1 的 66.4μS/cm 降低到 T5 的 54.2μS/cm.而-20℃冻结土柱各土层间的 EC 变化最小(图 2f),仅在 53.4~57μS/cm 波动.

各渐次解冻土层间 pH 值变化不明显(图 2g,2h,2i),仅-15℃冻结土柱各土层间的 pH 值变化呈显著差异,从 T1 的 6.22 增加到 T2 的 6.36(图 2h),随后降低到 T6 的 6.21.而-20℃冻结土柱各土层间的 pH 值变化最小,在 6.19 到 6.25 之间波动(图 2i).同时-15℃ 和 -20℃ 冻结土柱的 pH 值(分别为 6.15~6.36 和 6.19~6.25)整体大于-10℃冻结土柱的 pH 值(6.07~6.14).

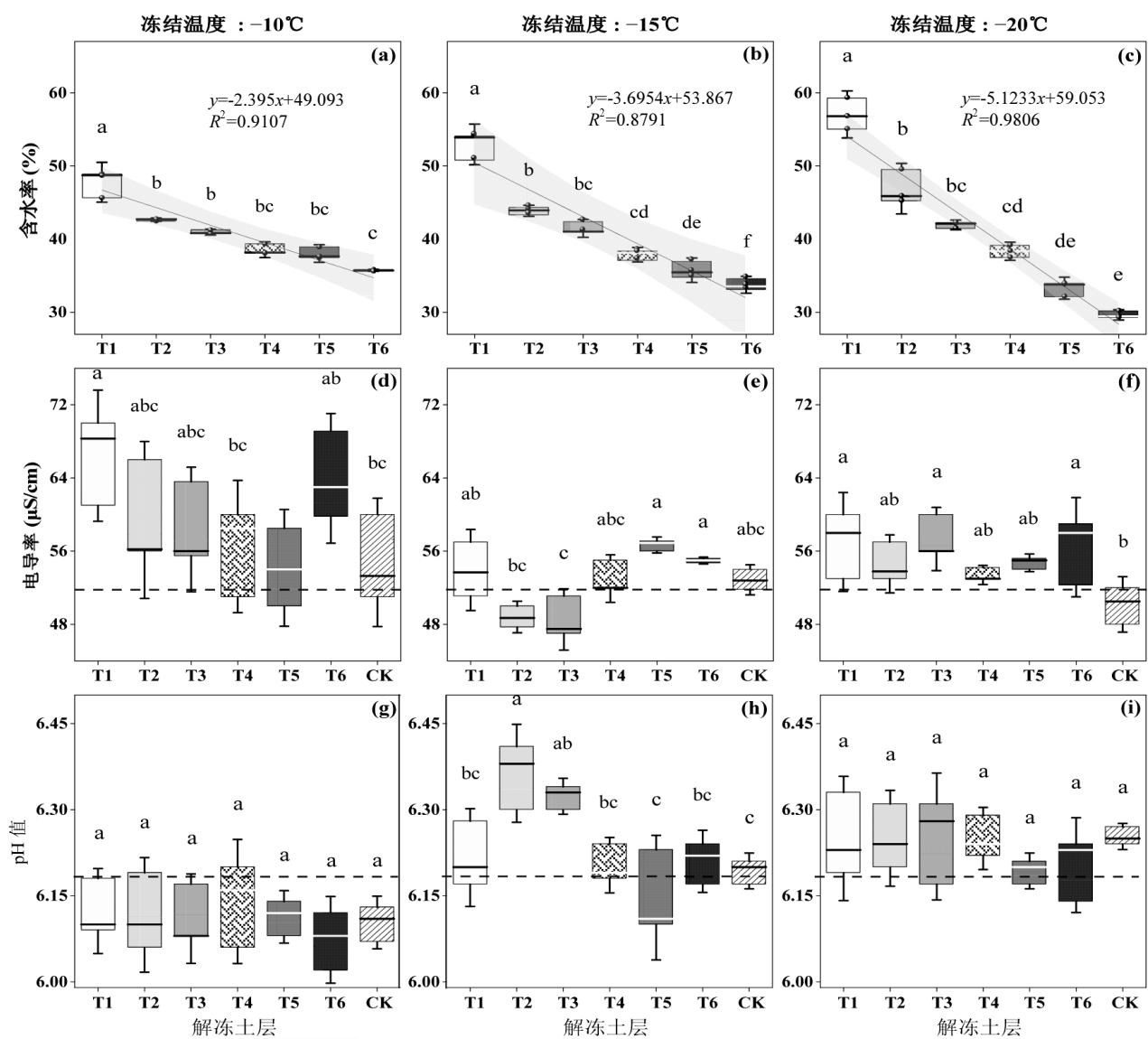


图 2 不同冻结温度下渐次解冻土层的含率、EC 和 pH 值分布

Fig.2 Variations distributions of soil water content, electrical conductivity and pH among the six soil layers thawed from soil columns under different freezing temperatures

虚线表示未冻结土柱的含水率、EC 和 pH, CK 为全冻全融土柱的含水率、EC 和 pH;T1~T6 表示土柱由外至内剥离的六个土层;不同字母表示各指标在 6 个土层间的显著性差异($P<0.5$)

2.2 土壤可溶性碳、微生物生物量碳在各渐次解

冻土层的分布规律

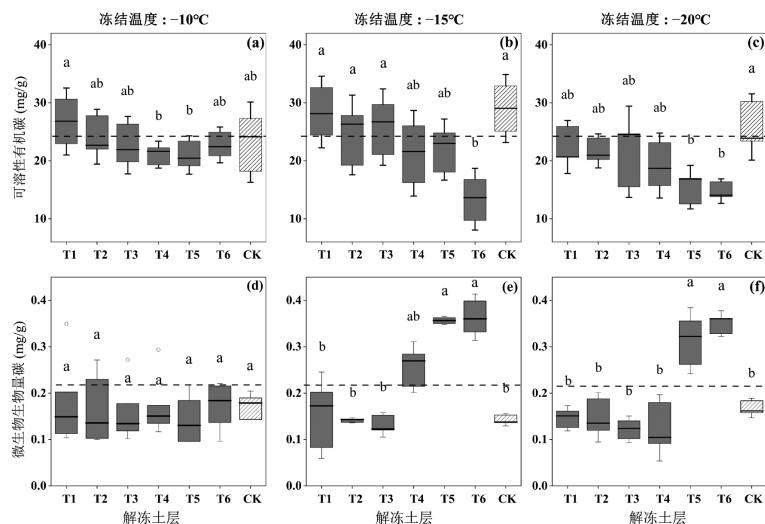


图3 不同冻结温度下渐次解冻土层DOC和微生物生物量分布

Fig.3 Variations distributions of soluble organic carbon and microbial biomass carbon among the six soil layers thawed from soil columns under different freezing temperatures

虚线表示未冻结土柱的DOC和微生物生物量,CK为全冻全融土柱的DOC和微生物生物量;T1~T6表示土柱由外至内剥离的六个土层;不同字母表示各指标在6个土层间的显著性差异($P<0.05$)

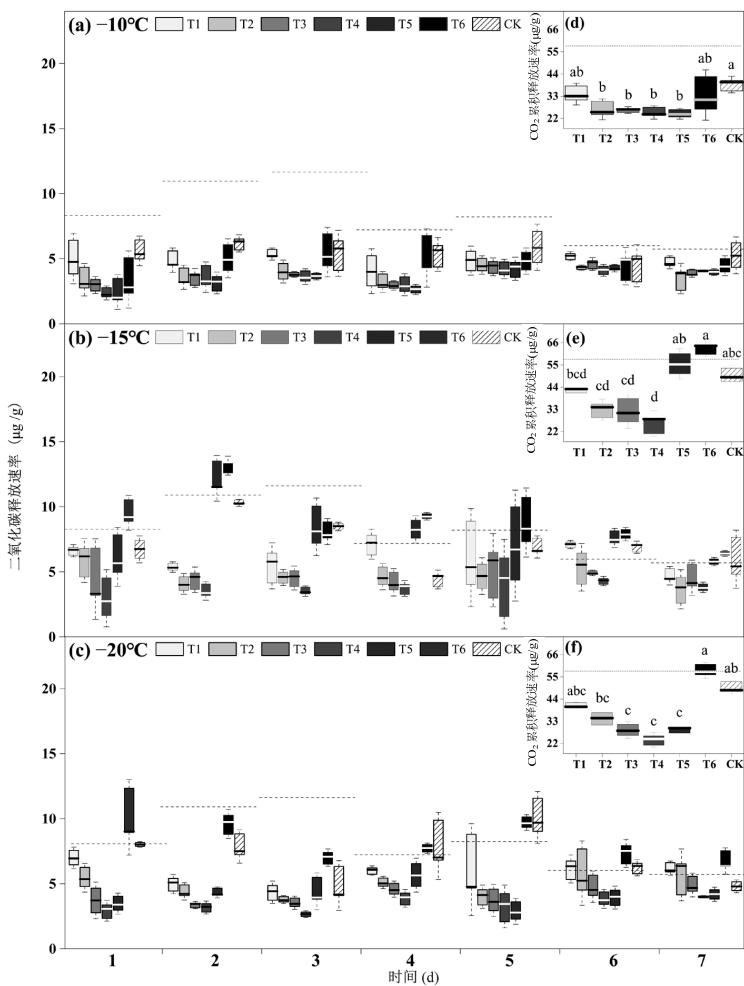
图4 不同冻结温度下渐次解冻土层CO₂释放速率及7d累积CO₂释放量

Fig.4 Temporal variations of CO₂ emission rate of six melt layers and their 7-days cumulative CO₂ rates after frozen at different temperatures
虚线表示未冻结土柱的CO₂释放速率,CK为全冻全融土柱的CO₂释放速率;T1~T6表示土柱由外至内剥离的六个土层;不同字母表示累积CO₂释放量在6个土层间的显著性差异($P<0.05$)

不同冻结温度下,DOC 从外层 T1 的 20.6~28.48mg/L 变化至内层 T6 的 16.4~22.7mg/L(图 3a,3b,3c),整体表现为下降趋势。而-15℃冻结土柱各层间 DOC 的差异最显著,从 T1 的 28.4mg/L 降低至 T6 的 13.4mg/L(图 3b),-10℃冻结土柱各层间 DOC 的变化最小,仅在 20.9~26.8mg/L 间波动(图 3a)。同时,微生物生物量碳变化趋势则相反,从 T1 的 0.14~0.17mg/g 增加到 T6 的 0.17~0.36mg/g(图 3d,3e,3f)。其中,-15℃冻结土柱各层间微生物生物量的差异最显著,从 T1 的 0.15mg/g 增加到 T6 的 0.36mg/g(图 3e)。而-10℃冻结土柱各层间微生物生物量的差异最小,在 0.14~0.17mg/g 波动(图 3d)。

2.3 各渐次解冻土层的 CO₂ 释放速率

三个冻结温度下,各渐次解冻土层的二氧化碳排放速率随着培养时间的延长而下降(图 4a,4b,4c)。不同土层间,二氧化碳排放速率外层 T1 较高(7d 累积 CO₂ 释放速率为 34~40.7μg/g),中间层 T4 最低(7d 累积 CO₂ 释放速率为 23.7~25.0μg/g),而最内层 T6

最高(7d 累积 CO₂ 释放速率为 33.5~63μg/g)(图 4d,4e,4f)。不同冻结温度下,-15℃冻结土柱累积 CO₂ 释放速率变化最为显著,从 T1 的 42.4μg/g 增加到 T6 的 63μg/g(图 4e),而-10℃冻结土柱累积 CO₂ 释放速率仅在 24.3~34μg/g 之间波动,且整体小于-15℃和-20℃冻结土柱的累积 CO₂ 释放速率(分别为 28.6~64.4μg/g 和 21.2~57.4μg/g)(图 4d,图 4e,图 4f)。

2.4 不同冻结温度下渐次解冻土层理化指标的相关性分析

微生物生物量碳与 DOC 呈线性负相关关系(图 5a,5b,5c),但与 CO₂ 释放速率呈线性正相关关系(图 5d,5e,5f)。其中,-20℃冻结土柱各层间微生物生物量碳与 DOC 的负相关性最强(图 5c),R² 为 0.46。同时-15℃冻结土柱各层间微生物生物量碳与 CO₂ 释放速率相关性最强(图 5e),R² 为 0.489。而-10℃冻结土柱的 DOC 和微生物生物量碳在土层间变化较小(图 5a),且与 CO₂ 释放速率的相关性最弱(图 5d)。

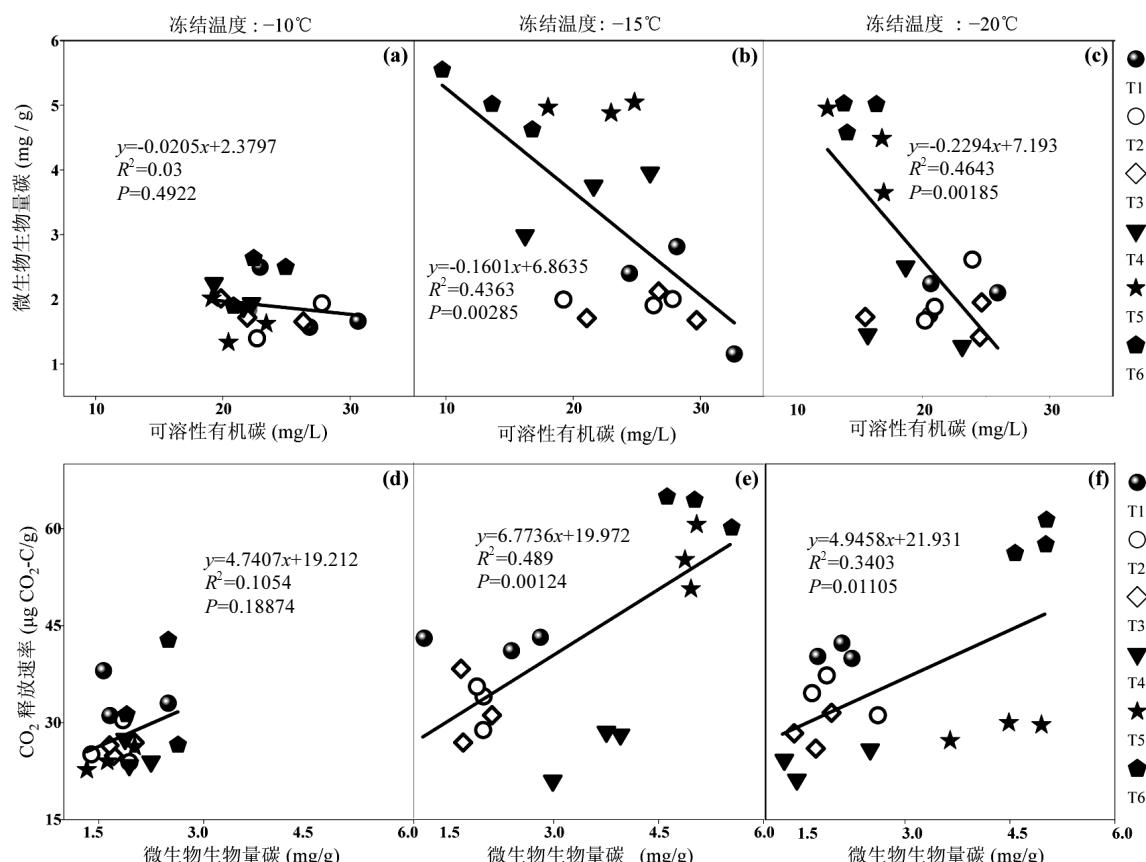


图 5 不同冻结温度下渐次解冻土层的 DOC 与微生物生物量、微生物生物量与 CO₂ 释放速率之间的线性回归分析

Fig.5 Linear regression analysis between the DOC and microbial biomass, microbial biomass and CO₂ emission rate of six thawed soil layers after frozen at different temperatures

3 讨论

3.1 不同冻结温度对渐次解冻土层水、盐、养分分布的影响

不同冻结温度下,6个渐次解冻土层的含水率、EC和DOC均存在显著差异(图2,图3),说明分层剥离解冻土壤可有效捕捉冻融作用下土壤水分和溶质在土体内的非均匀分布特征。冻结初期,土柱外层温度急剧降低,迅速结冰,水势降低,吸引土柱内层自由水和溶质向外层迁移^[24],致使逐层剥离后最外层T1的含水率是初始含水率的1.2~1.5倍(图2a,2b,2c)。随水分对流作用而被迁移至外层的盐分也被快速冻结于外层,使得EC在T1出现第一个峰值(图2d,2e,2f);同时,随着土柱冻结层加深,土壤水冻结成冰的相变过程放出热量^[25],内部土层冻结速率逐渐降低,土柱次外层土

壤通过冰晶纯化效应向内层排盐过程进行的比较充分^[26],导致次外层T2和T3的盐分向土核迁移,在T6出现EC的第二个峰值(图2d,2e,2f)。然而,DOC却只在土柱表层T1有较为明显的富集(图3d,3e,3f),可能由以下原因导致:1)表层T1富集大量水分,在冻结过程中冰晶生长变化过程较为剧烈,致使大分子氢键破裂成为更多的小分子有机养分^[27];2)在低温和冻胀作用下,表层T1内的微生物裂解死亡相对较多,致使其微生物生物量碳降低(图3),但同时致使其解冻后释放了更多的可溶性营养物质^[17]。此外,笔者前期研究还表明,微生物群落组成和多样性在不同渐次解冻土层间存在显著差异,且最外层土壤的微生物群落结构共发生网络复杂程度明显高于内层土壤,说明各土层渐次冻融过程对微生物不同群落的存亡具有一定的选择性^[28]。

表1 -10℃、-15℃和-20℃三种冻结温度下6个渐次解冻土层中水分、EC和DOC占比(%)

Table 1 Proportional distributions of water, EC and DOC among the six progressively thawed layers after frozen at -10℃, -15℃ and -20℃(%)

指标	冻结温度(℃)	T1	T2	T3	T4	T5	T6
土壤 占比	-10	0.16±0.00Ac	0.16±0.00Abc	0.17±0.00Aab	0.17±0.00Aab	0.17±0.00Aab	0.17±0.00Aa
	-15	0.15±0.00Ab	0.17±0.00Aab	0.16±0.00Aab	0.17±0.00Aa	0.18±0.00ABa	0.17±0.00Ba
	-20	0.15±0.00Ad	0.16±0.00Acd	0.17±0.00Abc	0.17±0.00Abc	0.17±0.00Bab	0.18±0.00Ba
水分 占比	-10	0.19±0.01Aa	0.17±0.00Ab	0.17±0.00Ab	0.16±0.00Abc	0.16±0.00Abc	0.15±0.00Ac
	-15	0.20±0.01ABA	0.18±0.00ABb	0.17±0.00Abc	0.16±0.00Ac	0.16±0.01Ac	0.14±0.00Bd
	-20	0.21±0.01Ba	0.18±0.01Bb	0.17±0.00Bbc	0.16±0.00Ac	0.14±0.00Bd	0.13±0.00Cd
DOC 占比	-10	0.18±0.03Aa	0.17±0.02Aa	0.17±0.02Aa	0.16±0.01Aa	0.15±0.01Aa	0.17±0.02Aa
	-15	0.19±0.02Aa	0.18±0.00Aa	0.19±0.01Aa	0.16±0.02Aab	0.17±0.01ABA	0.10±0.01Bb
	-20	0.18±0.01Aa	0.18±0.01Aa	0.19±0.03Aa	0.17±0.01Aa	0.14±0.01Ba	0.14±0.03Ba

注:表中数据为平均值±标准差;不同小写字母表示同一冻结温度下不同土层间的差异显著;不同大写字母表示同一土层在不同冻结温度下的差异显著($P<0.05$)。

不同冻结温度下,水分、盐分和养分在土柱内部的空间重分布过程存在差异(表1)。本研究发现,随着冻结温度的降低,水分向表层的集聚程度更加显著,致使解冻后-20℃冻结的土柱T1层含水率是-10℃冻结土柱T1层含水率的1.44倍(图2)。本研究中土壤含水率迁移量随冻结温度降低而增加的趋势与Hou^[29]松嫩平原黑土的表现不同。该研究认为随着土壤冻结温度的降低,土壤冻结程度增加,孔隙结构被冻结冰晶堵塞,土壤水分迁移量减少。两个研究结果的差异可能是因为Hou等^[29]中的初始含水率较低仅为(23.43%),而本研究则将土壤润湿至田间持水量(41%)。徐爽^[30]认为当初始含水率越大时,随

着冻结温度的降低,水分向冷端的迁移量增大。然而,EC的迁移量随着冻结温度的降低而减少,-10℃冻结土柱各渐次解冻土层间的EC变化最显著(图2f),而-20℃冻结土柱各土层间的EC波动不大。这可能是因为低温快速冻结阻碍了盐分沿土壤颗粒间的未冻水通道向冻结前沿(土表)迁移,削弱了盐分的在冻结土柱中的空间分异^[31]。Hou等^[32]也发现随着冻结温度的降低,土壤的总盐分迁移量减少。

本研究仅通过一次单向冻融过程观测到水分、盐分和养分在渐次解冻土层间的空间分布异质性,未来工作应多围绕不同初始含水率、初始盐分含量、冻结/融化温度、冻结时长及次数等多

情境下典型冻融土壤的水盐运移和养分分布及关键过程开展系统研究。

3.2 不同冻结温度下水盐养分的异质性对渐次解冻土层有机碳矿化的影响

在 7d 恒温恒湿培养过程中,各渐次解冻土层 CO_2 释放速率均随着培养天数的增加而下降,且在六个土层之间存在显著差异(图 4a,4b,4c),这表明冻融过程中的水盐养分在不同土层间的异质性分布可直接影响各层有机碳矿化。土壤呼吸作用主要受 DOC 浓度变化的驱动^[33],当易分解的 DOC 随着时间的推移不断消耗^[8],致使各渐次解冻土层 CO_2 排放速率随培养时间的延长而下降(图 4a,4b,4c)。

各土层微生物生物量碳与 DOC 呈线性负相关(图 5a,5b,5c),而与 CO_2 释放速率呈线性正相关(图 5d,5e,5f),且相关性均随冻结温度的降低而增强。这表明冻结过程致使微生物死亡,释放养分物质,增加土壤可溶性有机碳,促进解冻后土壤存活微生物的 CO_2 释放^[34],而存活生物的生物量碳是影响该层解冻后 CO_2 释放量的决定性因素(图 3,图 5)。如,对于最外层 T1 和最内层 T6 而言,最外层 T1 的含水率和 DOC 相对较高(图 2,图 3),但解冻后的微生物生物量碳和 CO_2 释放速率却低于内层 T6(图 3,图 4),说明各渐次解冻土层 CO_2 释放速率受水分含量和 DOC 的影响小于微生物生物量碳。

对于不同冻结温度而言,−10℃冻结温度下,土壤水分迁移量和冰晶生长膨胀速度相对缓慢^[35],土壤微生物群落仍具有较好的适应性^[36],微生物生物量碳与 DOC 的层间差异相对较小(图 3);但随着冻结温度的降低,冻结作用会对微生物细胞造成更大的损害或导致细胞死亡^[15],可为解冻期间存活的微生物提供更多的营养源(DOC),致使−20℃冻结土柱的 DOC 和解冻后的累积 CO_2 释放速率显著高于−10℃的冻结土柱(图 3,图 4)。刘淑霞等^[37]通过室内模拟试验发现随着冻结温度的降低,农田土壤微生物生物量碳逐渐降低,但 DOC 的含量分别是恒温培养的 1.92 倍和 2.54 倍。此外,随着冻结温度的降低,大团聚体的破碎程度也愈显剧烈^[38],团聚体破碎释放出的活性有机碳也更多^[39],对存活下来微生物的激活作用也越强^[40],也可能是低温冻结后解冻土 CO_2 排放速率增加的原因之一。该结果与 Wei 等^[41]在韩国落叶松林的观察相似,冻结温度越低,融化期土壤呼吸

速率越高。

渐次解冻过程中水–盐–养分在土柱内外土层异质性分布对田间上下层土壤渐次冻融过程和坡面尺度有机碳矿化具有重要启示意义。春季升温期,坡地表层受热后,优先解冻,而下层仍处冻结状态,形成不透水层,致使含水量高且粘聚力低的表层土壤极易被融水侵蚀剥离并迁移至下坡位^[42],而下层土壤相对干燥,且解冻较慢,则更易被留置于原坡位。因此,冻融过程导致水–盐–养分在上下土层间发生再分布,而不同土层的渐次解冻和侵蚀剥离迁移过程则可进一步加剧坡面尺度土壤微生物和 CO_2 排放的空间异质性。后续研究应持续关注不同微生物类型(如细菌、真菌),和不同微生物群落,在各渐次解冻土层的存亡以及生长与呼吸策略差异,进一步阐明渐次冻融过程对土壤有机碳分布及矿化分解的影响,以深入解析季节性冻融期温室气体排放过程及关键因素。

4 结论

4.1 渐次解冻剥离后,土柱最外层的含水率最高,而内核最干燥,其中−20℃冻结土柱外层的水分富集程度最显著。

4.2 DOC 由外层向内层逐渐降低,而 SMBC 则由外层向内层呈现增多趋势,且冻结温度越低,DOC 和 SMBC 在各解冻土层间的差异越明显。

4.3 解冻土壤 CO_2 释放速率表现为外层 T1 和内层 T6 较高,且−10℃冻结温度下各土层释放的 CO_2 显著少于−20℃冻结温度。

4.4 各解冻土层 DOC 与 SMBC 的线性负相关关系表明因冻结而死亡的微生物残体可有效补给土壤可溶性有机碳,而各土层的微生物生物量碳差异对 CO_2 释放速率起决定性作用。

参考文献:

- [1] 范昊明,张瑞芳,周丽丽,等.气候变化对东北黑土冻融作用与冻融侵蚀发生的影响分析 [J]. 干旱区资源与环境, 2009,23(6):48–53.
Fan H M, Zhang R F, Zhou L L, et al. Impact of climate change on freeze–thaw function and freeze–thaw erosion in black soil region of Northeast China [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2009,23(6):48–53.
- [2] 刘宝元,阎百兴,沈波,等.东北黑土区农地水土流失现状与综合治理对策 [J]. 中国水土保持科学, 2008,6(1):1–8.
Liu B Y, Yan B X, S B, et al. Current status and comprehensive

- control strategies of soil erosion for cultivated land in the Northeastern black soil area of China [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2008,6(1):1-8.
- [3] 刘兴土, 阎百兴. 东北黑土区水土流失与粮食安全 [J]. *中国水土保持*, 2009,(1):17-19.
- [4] Liu B, Fan H, Han W, et al. Linking soil water retention capacity to pore structure characteristics based on X-ray computed tomography: Chinese Mollisol under freeze-thaw effect [J]. *Geoderma*, 2021,401: 115170.
- [5] Chen S, Burras C L, Zhang X. Soil aggregate response to three freeze-thaw methods in a Northeastern China Mollisol [J]. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2019,28(5):3635-3645.
- [6] Wang L, Zuo X, Zheng F, et al. The effects of freeze-thaw cycles at different initial soil water contents on soil erodibility in Chinese Mollisol region [J]. *Catena*, 2020,193:104615.
- [7] 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.
- [8] Gao D, Liu Z, Bai E. Effects of in situ freeze-thaw cycles on winter soil respiration in mid-temperate plantation forests [J]. *Science of The Total Environment*, 2021,793:148567.
- [9] Qin Y, Bai Y, Chen G, et al. The effects of soil freeze-thaw processes on water and salt migrations in the western Songnen Plain, China [J]. *Scientific Reports*, 2021,11(1):1-12.
- [10] Zhang J, Lai Y, Li J, et al. Study on the influence of hydro-thermal-salt-mechanical interaction in saturated frozen sulfate saline soil based on crystallization kinetics [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020,146:118868.
- [11] Huang H, Chen C, Mo X, et al. Mechanisms of salt rejection at the ice-liquid interface during the freezing of pore fluids in the seasonal frozen soil area [J]. *China Geology*, 2021,4(3):449-457.
- [12] 孙嘉鸿, 郭彤, 董彦民, 等. 冻融循环对金川泥炭沼泽土壤微生物量及群落结构的影响 [J]. *生态学报*, 2022,42(7):2763-2773.
Sun H J, Guo T, Dong Y M, et al. Effect of freezing and thawing on soil microbial biomass and community structure in Jinchuan peatlands [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022,42(7):2763-2773.
- [13] Ma Q, Zhang K, Jabro J D, et al. Freeze-thaw cycles effects on soil physical properties under different degraded conditions in Northeast China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2019,78(10):1-12.
- [14] Rooney E C, Bailey V L, Patel K F, et al. Soil pore network response to freeze-thaw cycles in permafrost aggregates [J]. *Geoderma*, 2022, 411:115674.
- [15] Sorensen P O, Templer P H, Finzi A C. Contrasting effects of winter snowpack and soil frost on growing season microbial biomass and enzyme activity in two mixed-hardwood forests [J]. *Biogeochemistry*, 2016,128(1/2):141-154.
- [16] 阳祥, 黄晓婷, 王纯, 等. 典型稻田土壤真菌群落结构及多样性对比 [J]. *中国环境科学*, 2020,40(10):4549-4556.
Yang X, Huang X T, Wang C, et al. Comparison of fungal community structure and diversity in typical paddy fields. [J]. *China Environmental Science*, 2020,40(10):4549-4556.
- [17] King A E, Rezanezhad F, Wagner-Riddle C. Evidence for microbial rather than aggregate origin of substrates fueling freeze-thaw induced N₂O emissions [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2021,160:108352.
- [18] Watanabe K, Mizoguchi M. Amount of unfrozen water in frozen porous media saturated with solution [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2002,34(2):103-110.
- [19] Bing H, He P, Zhang Y. Cyclic freeze-thaw as a mechanism for water and salt migration in soil [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 74(1):675-681.
- [20] Zhang J, Hong J, Wei D, et al. Severe freezing increases soil respiration during the thawing period: A meta-analysis [J]. *European Journal of Soil Science*, 2022,73(1):e13161
- [21] Ren J, Song C, Hou A, et al. Shifts in soil bacterial and archaeal communities during freeze-thaw cycles in a seasonal frozen marsh, Northeast China [J]. *Science of The Total Environment*, 2018,625: 782-791.
- [22] 张科利, 刘宏远. 东北黑土区冻融侵蚀研究进展与展望 [J]. *中国水土保持科学*, 2018,16(1):17-24.
Zhang K L, Liu H Y. Research progresses and prospects on freeze-thaw erosion in the black soil region of Northeast China [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2018,16(1):17-24.
- [23] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法 [M]. 中国农业科技出版社, 2000.
Lu R K. Soil Agricultural chemical analysis methods [M]. China Agricultural Science and Technology Press, 2000.
- [24] Huiyu J, Wenjiang Z, Yi Y, et al. The impacts of soil freeze/thaw dynamics on soil water transfer and spring phenology in the Tibetan Plateau [J]. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 2018,50(1): e1439155.
- [25] 吴刚, 邝慧, 卜东升. 盐渍土与盐溶液冻结温度关系的试验研究 [J]. *冰川冻土*, 2019,41(3):615-628.
Wu G, Bing H, Bu D S. Experimental study on the relationship between saline soil and salt solution freezing temperature [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2019,41(3):615-628.
- [26] Wan X, Gong F, Qu M, et al. Experimental study of the salt transfer in a cold sodium sulfate soil [J]. *Ksce Journal of Civil Engineering*, 2019,23(4):1573-1585.
- [27] Wu H, Xu X, Cheng W, et al. Antecedent soil moisture prior to freezing can affect quantity, composition and stability of soil dissolved organic matter during thaw [J]. *Scientific Reports*, 2017,7(1):6312-6380.
- [28] Hu Y, Li X, Liu H, et al. Progressively thawed soil layers differed in microbial properties and CO₂ emission rates [J]. *Catena*, 2023,221: 106791.
- [29] Hou R, Li T, Fu Q, et al. Characteristics of water-heat variation and the transfer relationship in sandy loam under different conditions [J]. *Geoderma*, 2019,340:259-268.
- [30] 徐爽, 郭颖, 单炜. 冻融过程中重塑土水盐迁移的试验研究 [J]. *科学技术与工程*, 2017,17(30):285-290.
Xu S, Guo Y, Shan W. Experimental study on migration and salinity of remolded soil during freezing and thawing [J]. *Science Technology and Engineering*, 2017,17(30):285-290.
- [31] Tang R, Zhou G, Jiao W, et al. Theoretical model of hydraulic conductivity for frozen saline/non-saline soil based on freezing characteristic curve [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2019, 165:102794.

- [32] Hou R, Li T, Fu Q, et al. Research on the distribution of soil water, heat, salt and their response mechanisms under freezing conditions [J]. *Soil and Tillage Research*, 2020,196:104486.
- [33] Haei M, Rousk J, Ilstedt U, et al. Effects of soil frost on growth, composition and respiration of the soil microbial decomposer community [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011,43(10):2069–2077.
- [34] Watanabe T, Tateno R, Imada S, et al. The effect of a freeze–thaw cycle on dissolved nitrogen dynamics and its relation to dissolved organic matter and soil microbial biomass in the soil of a northern hardwood forest [J]. *Biogeochemistry*, 2019,142(3):319–338.
- [35] Liu F, Jiao X, Wang S, et al. Heat, water and vapor coupled migration in loess under uniaxial freezing condition [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2022,198:103550.
- [36] Foster A, Jones D L, Cooper E J, et al. Freeze–thaw cycles have minimal effect on the mineralisation of low molecular weight, dissolved organic carbon in Arctic soils [J]. *Polar Biology*, 2016,39(12):2387–2401.
- [37] 刘淑霞,王宇,赵兰坡,等.冻融作用下黑土有机碳数量变化的研究[J].农业环境科学学报,2008,(3):984–990.
Liu S X, Wang Y, Zhao L B, et al. Effect of freezing and thawing on the content of organic carbon of black soil [J]. *Journal of Agro-*
- Environment Science
- [38] 王旭,李斐,赵世翔.冻融交替对土壤 CO₂ 排放影响的研究进展 [J]. *土壤通报*, 2022,53(3):728–737.
- Wang X, Li F, Zhao S X. Freeze–thaw regime effects on soil CO₂ emission: A review [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2022,53(3):728–737.
- [39] Oztas T, Fayetorbay F. Effect of freezing and thawing processes on soil aggregate stability [J]. *Catena*, 2003,52(1):1–8.
- [40] 赵光影,郭冬楠,江姗,等.冻融作用对小兴安岭典型湿地土壤活性有机碳的影响 [J]. *生态学报*, 2017,37(16):5411–5417.
Zhao G Y, Guo D N, Jiang S, et al. Effects of freezing and thawing on soil active organic carbon in the Xiaoxing'an Mountain wetlands [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017,37(16):5411–5417.
- [41] Wei W, You W, Zhang H, et al. Soil respiration during freeze–thaw cycles in a temperate Korean Larch (*Larix olgensis herryi*) plantation [J]. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2016,31(8):742–749.
- [42] Wei X, Huang C, Wei N, et al. The impact of freeze–thaw cycles and soil moisture content at freezing on runoff and soil loss [J]. *Land Degradation and Development*, 2019,30(5):515–523.

作者简介: 刘会敏(1997–),女,河南周口人,西北农林科技大学硕士研究生,主要从事冻融对碳排放影响方面的研究。