

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2022.0046

SUN Chaofeng, SONG Liquan, ZANG Shuying, et al. Effects of soil hydrothermal variations on soil DOC content in permafrost peatlands during autumn freezing period in the Greater Hinggan Mountains[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2022, 44(2):402-414. [孙超峰, 宋立全, 臧淑英, 等. 大兴安岭秋季冻结期土壤水热变化对多年冻土泥炭地可溶性有机碳的影响[J]. 冰川冻土, 2022, 44(2):402-414.]

大兴安岭秋季冻结期土壤水热变化对多年冻土泥炭地可溶性有机碳的影响

孙超峰^{1,2}, 宋立全^{1,2}, 臧淑英^{1,2}, 焦亚青^{1,2}, 鲁博权^{1,2}

(1. 哈尔滨师范大学寒区地理环境监测与空间信息服务黑龙江省重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150025;

2. 黑龙江省寒区生态安全协同创新中心, 黑龙江 哈尔滨 150025)

摘 要: 土壤温度和含水量是影响可溶性有机碳(DOC)变化的重要因素。然而,多年冻土泥炭地土壤DOC变化对秋季冻结期土壤水热变化的响应尚不明确。本研究选取大兴安岭3种多年冻土泥炭地[小叶章泥炭地(CP)、兴安落叶松-泥炭藓泥炭地(LP)、白毛羊胡子苔草泥炭地(EP)]作为研究对象,开展野外原位试验探究秋季冻结期土壤水热变化对多年冻土泥炭地土壤DOC变化的影响。结果表明:秋季冻结期土壤DOC含量表现为EP>CP>LP,平均含量分别为83.99、45.75和43.13 mg·L⁻¹。在秋季冻结前期3种类型多年冻土泥炭地土壤DOC含量均呈波动下降趋势,中、后期CP、LP土壤DOC变化较平缓。在秋季冻结前期,CP整体土壤DOC含量随浅层土壤温度的降低而减少;在后期CP浅层和整体土壤DOC含量随浅层土壤含水量的增加而增加。在秋季冻结中期,LP浅层土壤温度升高和含水量的减少,降低了土壤DOC含量;LP整体土壤DOC的变化随着浅层温度的升高逐渐降低。在秋季冻结后期,EP深层和整体土壤DOC含量随深层含水量增加而增加。在整个秋季冻结期,LP浅层土壤DOC主要受地表温度驱动,深层土壤DOC则主要受深层含水量的影响;整体土壤DOC则受地表温度影响较大。研究表明秋季冻结期多年冻土泥炭地土壤水热变化驱动土壤DOC含量的变化。研究结果为多年冻土区碳循环和“双碳”背景下的碳排放研究提供基础科学数据。

关键词: 大兴安岭; 多年冻土; 泥炭地; 秋季冻结期; 可溶性有机碳(DOC); 土壤水热

中图分类号: P642.14; S153.6*2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2022)02-0402-13

0 引言

北半球多年冻土区深度为3 m的土壤含有约839~1208 Pg有机碳^[1]。由于多年冻土退化,储存在多年冻土中的大量有机碳被释放出来,成为陆地生态系统最大的碳气候反馈^[2-3]。大兴安岭多年冻土区位于欧亚大陆多年冻土带南缘,冻土厚度小、热稳定性差、易受气候变化的影响^[4]。研究发现高纬度冻土与沼泽湿地存在着共生关系^[5],多年冻土的冷生环境为泥炭地的形成和发育提供了良好的基

础。在冷湿的气候环境下,植物凋落物难以被土壤中的微生物分解,从而使有机碳累积,形成泥炭层^[6]。虽然泥炭沼泽仅占陆地面积的3%,但其土壤碳储量却占土壤碳库的15%~30%^[7]。土壤可溶性有机碳(DOC)被认为是泥炭地碳循环中最活跃、最敏感的指标^[8],对土壤化学物质的溶解、吸附等行为均有显著的影响^[9]。DOC是全球碳循环的重要组成部分,它由简单的有机酸和复杂的大分子物质组成^[10-11]。虽然土壤DOC在总有机碳中占比很小

收稿日期: 2021-10-24; 修订日期: 2022-01-10

基金项目: 国家自然科学基金联合基金重点项目(U20A2082);国家自然科学基金面上项目(41971151);黑龙江省自然科学基金创新团队项目(TD2019D002)资助

作者简介: 孙超峰,硕士研究生,主要从事多年冻土碳循环研究. E-mail: 3101014638@qq.com

宋立全,博士后,主要从事冻土碳、氮循环与气候变化研究. E-mail: songliquan116@163.com

孙超峰与宋立全为并列第一作者,具有相同贡献

通信作者: 臧淑英,教授,主要从事冻土碳、氮循环与气候变化研究. E-mail: hsdzsy6311@163.com

(1%~5%)^[12],但它却是养分移动的基本载体因子,其积累和分解直接影响到全球碳平衡^[13-15]。

目前,对土壤DOC已经进行了大量研究,但对于多年冻土泥炭地秋季冻结期DOC变化对土壤水热变化响应的研究相对较少。已有研究发现在秋季冻结期单向冻结阶段,活动层底部的水分会在温度梯度的驱动下向冻结锋面移动,同时热量也会向冻结锋面传输。而在双向冻结阶段,表层土壤冻结,活动层内上下两个冻结锋面之间的融化层温度在0℃或高于0℃,此时融化层中的水分向上下两个冻结锋面传输,热量也在水相变放热的过程中向锋面传输,从而导致土壤含水量及温度发生变化^[16-17]。土壤水分和温度对DOC的影响主要是通过调节土壤微生物的活性以及分解速率,微生物的代谢积累和细胞的裂解死亡来改变土壤DOC的含量^[18-19]。也有研究发现水分的增加会促进土壤团聚体的分散,使本来吸附在土壤表层的有机碳溶出土壤,进而增加土壤DOC的含量^[20]。同时温度上升,也会使有机碳流失增加,温度每上升10℃,有机碳产量大约增加一倍^[21-23]。研究表明温度的升高和冻土退化是泥炭地土壤DOC输出增加的主要动力机制^[14]。当前关于多年冻土泥炭地碳循环对气候变化的响应以及反馈机制仍然不清楚^[24]。

目前,大兴安岭地区碳循环的研究主要集中在不同土地利用方式,不同林型及不同强度人为干扰,土壤有机碳的差异等方面,且多以室内模拟试验为主^[25-27]。针对大兴安岭多年冻土泥炭地秋季冻结期土壤DOC分布特征,土壤温度及含水量如何影响土壤DOC含量变化的野外原位研究还比较缺乏。因此,本研究选取了大兴安岭多年冻土区小叶章泥炭地(CP)、兴安落叶松—泥炭藓泥炭地(LP)、白毛羊胡子苔草泥炭地(EP)作为研究对象,探究在秋季冻结期野外原位土壤DOC含量变化对浅层和深层多年冻土泥炭土壤水热过程变化的响应,揭示该过程中土壤DOC含量变化的影响因素。本研究可为该区探究不同类型多年冻土泥炭地土壤对气候变化响应机制的研究提供参考依据,为多年冻土区泥炭地碳循环研究提供资料支持。

1 研究区概况

本研究地点隶属于黑龙江漠河森林生态系统国家定位观测研究站,位于大兴安岭北部,漠河市北极村(53°17′~53°30′N, 122°6′~122°27′E),该

地区属寒温带大陆性季风气候,夏季受副热带海洋气旋的影响,短暂多雨,冬季受大陆季风和蒙古高压控制,漫长寒冷,春、秋两季受季风交替影响,气候多变。秋季降温剧烈,易发生早霜和冻害现象。年平均气温为-4.9℃,年平均降水量460.8mm左右,全年平均无霜期约为90d,≥10℃的积温为1436~2062℃,每年秋季和春季土壤存在多次冻融交替现象^[28]。研究样地土壤主要为泥炭土,泥炭层厚度45~60cm,典型植被类型主要为草本层以小叶章(*Calamagrostis angustifolia*)、白毛羊胡子苔草(*Eriophorum vaginatum*)为优势种,灌木层有云杉(*Dragon spruce*)、杜香(*Ledum palustre*)、兴安落叶松(*Larix gmelini*)地表有泥炭藓覆盖、白桦(*Betula platyphylla*)、樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)。

在观测研究站的区域内,选择多年冻土泥炭地,沿一定坡度设置CP、LP和EP三种样地。其中,CP样地中广泛分布着小叶章植被;LP样地的主要植被是地面伴有广泛分布的泥炭藓的兴安落叶松—泥炭藓泥炭地;EP样地中广泛分布着塔头,白毛羊胡子苔草为主要植被。并且三种多年冻土泥炭地土壤均为酸性土壤。

2 材料与方法

2.1 样品采集

本研究于2019年9月下旬至11月初,选取大兴安岭多年冻土区CP、LP和EP为研究对象。在生境基本相同的情况下,依据不同泥炭地类型设置3处100m×100m样地,并在每种泥炭地样地内随机设置3块20m×20m样方作为重复,并在样方内按“S”型布设方式选取5个样点采样,每个样方的间隔距离不小于10m。采样过程中,去除土壤表面凋落物和腐殖质,然后用内径5cm的土钻进行土壤样品采集。并根据大兴安岭地区泥炭层平均深度(50cm),把土壤垂直剖面分为两部分,浅层土壤(0~10cm和10~20cm)和深层土壤(20~30cm、30~40cm和40~50cm)。间隔一天作为一个采样周期,共采取21次土壤样品,并按照冻结强度(-5~15℃、-10~10℃、-15~5℃)划分为秋季冻结前期(9月25日—10月7日)、中期(10月10日—10月22日)、后期(10月24日—11月5日)。采集的新鲜土壤剔除可见石块和杂质,按同种泥炭地类型同层次混合均匀后过2mm筛,并置于4℃恒温冰箱中暂时保存,用于DOC待测溶液的提取和测定。

2.2 土壤理化性质测定

土壤 DOC 测定方法:通过称取 10 g 新鲜土壤放置于 250 mL 三角瓶中,再加入 50 mL 蒸馏水,在常温下振荡 30 min 后使用离心机以 $4\,200\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 离心 10 min,提取上清液过 $0.45\text{ }\mu\text{m}$ 滤膜,然后用 Multi N/C 2100 TOC 仪(德国耶拿)测定土壤 DOC 含量^[27]。使用鲜土 20 g 在 $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的烘箱中烘 24 h 后测定土壤含水量。使用便携式温度计(JM-624,今明仪器有限公司,中国天津)测量不同土壤深度土壤温度。

2.3 数据处理

本文数据采用 SPSS 22.0 软件进行统计分析,用 Origin 9 软件进行绘图。采用单因素方差分析法 one-way ANOVA(LSD)分别对浅层和深层土壤温度和含水量以及不同秋季冻结强度 3 种泥炭地土壤 DOC 含量进行差异显著性分析,使用 Pearson 相关分析分析土壤含水量和温度与土壤 DOC 的相关性,采用逐步多元线性回归模型对土壤温度、含水量和 DOC 含量进行分析,确定秋季冻结期土壤 DOC 变化的影响因子。

3 结果分析

3.1 秋季冻结期 3 种多年冻土泥炭地土壤含水量及温度时间变化特征

在秋季冻结过程中 3 种多年冻土泥炭地土壤含水量呈现不同的变化特征。在秋季冻结前期 CP 土壤含水量较高,除个别时间外浅层、深层土壤呈饱和状态,而中期浅层土壤含水量变化幅度较大,含水量最高达 $160.13\%\pm 1.09\%$,最低为 27.1% ,总体呈波动下降趋势。在后期土壤含水量较低,除 26 日外其他时间浅层、深层土壤含水量均未达到饱和状态。在秋季冻结前期,LP 土壤浅层含水量呈波动下降趋势,含水量最高达 $121.82\%\pm 0.22\%$,最低为 $27.31\%\pm 0.02\%$ 。与前期相比,冻结中后期土壤含水量较低,浅层、深层均未达到饱和状态,在 $20\%\sim 85\%$ 之间呈波动变化。在秋季冻结前期和中期,EP 土壤含水量变化幅度较小,浅层和深层土壤含水量均在 $20\%\sim 75\%$ 之间呈波动变化。后期浅层和深层土壤含水量均呈上升趋势(图 1,图 2 和图 3)。

方差分析表明在前期 CP 与 LP、EP 浅层、深层土壤含水量呈显著性差异($P<0.01$),中期 CP 与 LP 浅层、深层土壤含水量呈显著性差异($P<0.05$),CP 与 EP 浅层呈显著性差异($P<0.01$)。后期除 30~

40 cm CP 含水量与 LP、EP 土壤含水量呈显著差异外($P<0.05$),其他土层土壤含水量均不存在显著性差异($P>0.05$)。

在秋季冻结过程中不同泥炭地土壤温度变化趋势不同。在秋季冻结前期,CP 浅层和深层土壤温度均在 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上,并在这一时期达到峰值,峰值温度为 $(3.25\pm 0.05)\text{ }^{\circ}\text{C}$,随着时间的推移浅层和深层土壤温度均呈波动下降趋势,中期浅层与深层土壤温度变化幅度较小,在 $-0.75\sim 1.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间呈波动变化。而在后期深层土壤温度呈上升趋势而浅层土壤则呈逐渐下降变化(图 1,图 2 和图 3)。

在秋季冻结前期,LP 和 EP 土壤温度较高,峰值温度分别为 $(6.25\pm 0.95)\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $(6.05\pm 0.15)\text{ }^{\circ}\text{C}$,随着时间的推移浅层、深层土壤温度均呈波动下降变化,其中浅层土壤温度变化较为剧烈,LP 最大温差为 $5.85\text{ }^{\circ}\text{C}$,EP 最大温差为 $5.8\text{ }^{\circ}\text{C}$,深层温度相对平缓分别在 $0.5\sim 1.25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $0.4\sim 1.15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间呈波动变化。与前期不同,在中期,LP 和 EP 土壤浅层和深层温度变化趋势较一致,均呈先降后升变化,在后期深层土壤温度呈上升趋势而浅层呈逐渐下降变化,浅层与深层土壤温差逐渐增大。

方差分析表明,在秋季冻结前期,CP 15 cm、20 cm 土壤温度与 LP 土壤温度均呈显著性差异($P<0.05$),深层土壤温度与 LP 土壤温度均呈显著性差异($P<0.01$),除 0~15 cm 土层外 CP 土壤温度与 EP 土壤温度均呈显著性差异($P<0.01$)。冻结中期,CP 地表、15 cm、30 cm、35 cm 土壤温度与 LP 土壤温度呈显著性差异($P<0.05$),与 EP 土壤地表、15~35 cm 土壤温度均呈显著性差异($P<0.05$)。后期 3 种泥炭地土壤温度均不存在显著性差异($P>0.05$)。

3.2 秋季冻结期 3 种泥炭地土壤 DOC 的时间变化特征

秋季冻结期 3 种多年冻土泥炭地土壤 DOC 存在不同的变化趋势。在秋季冻结前期,CP 浅层土壤 DOC 含量平均值为 $42.25\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、深层为 $46.50\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,随着时间的推移,浅层与深层土壤 DOC 含量均呈波动下降变化,其中浅层土壤 DOC 含量降低 58.52% 、深层降低 66.02% 。与前期变化相似,在中期浅层与深层土壤 DOC 也呈波动下降变化。而在后期浅层与深层土壤 DOC 均在 $32.00\sim 76.78\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间呈波动变化(图 1,图 2 和图 3)。

在秋季冻结前期,LP 浅层土壤 DOC 含量平均值为 $46.25\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、深层为 $59.45\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,浅层和深

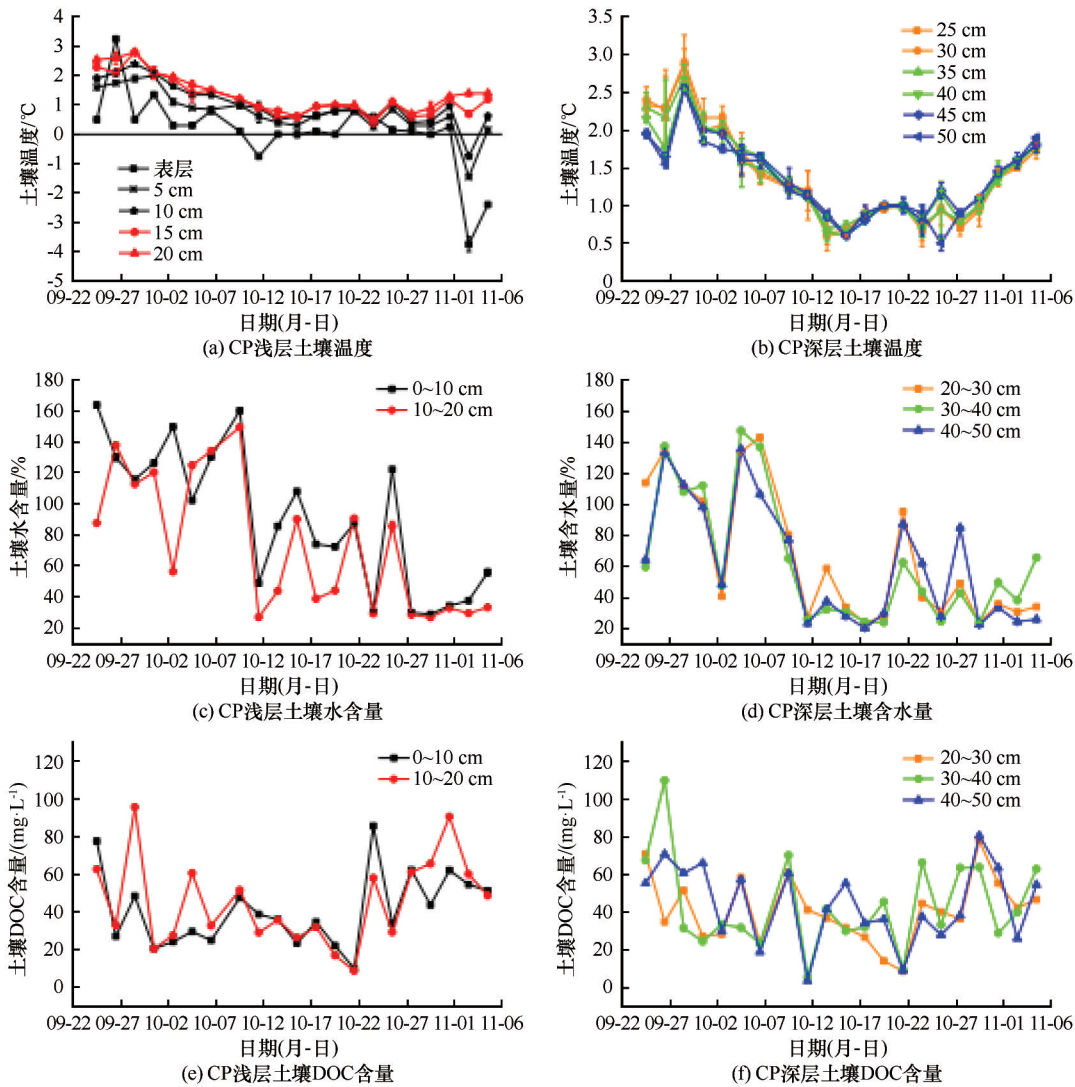


图1 秋季冻结期CP浅层和深层土壤温度、含水量和DOC时间变化特征

Fig. 1 Temporal variation characteristics of soil temperature, soil moisture content and soil DOC content of the shallow and deep soil layer in the CP during the autumn freezing period

层土壤DOC含量均呈波动下降变化,其中浅层土壤DOC含量降低65.80%、深层降低62.98%。在中后期LP浅层与深层土壤DOC含量在6.05~65.74 mg·L⁻¹之间呈波动变化。

在秋季冻结前期,EP浅层土壤DOC含量的平均值为91.66 mg·L⁻¹、深层为84.53 mg·L⁻¹,浅层、深层土壤DOC含量均呈波动下降变化,其中浅层土壤DOC含量降低64.63%、深层降低22.15%,浅层变化幅度大于深层土壤。而在中期浅层、深层土壤DOC变化幅度较大,最大差值为149.76 mg·L⁻¹。与中期变化趋势不同,在后期浅层和深层均在52.39~99.28 mg·L⁻¹之间呈波动变化。

本研究对三种多年冻土泥炭地同一个样地冻结前期、中期和后期的浅层、深层和整体土壤DOC

含量变化的差异性分析,结果表明,在CP浅层土壤中,冻结中期和后期土壤DOC含量差异性显著($P < 0.01$);在CP深层土壤中,冻结前期、中期和后期土壤DOC含量差异性均不显著($P > 0.05$);然而,在CP整层土壤中,冻结中期和后期土壤DOC含量差异性显著($P < 0.05$)。在LP浅层土壤中,冻结前期、中期和后期土壤DOC含量差异性均不显著($P > 0.05$);而在LP深层土壤中,冻结前期和后期土壤DOC含量差异性显著($P < 0.05$);在LP整层土壤中,冻结前期和后期土壤DOC含量差异性显著($P < 0.05$)。在EP冻结前期、中期和后期的浅层、深层和整体土壤DOC含量变化的差异性均不显著($P < 0.05$)。对同一冻结时期三种多年冻土泥炭地土壤DOC含量变化的差异性分析,结果表明,在冻结前期和中期,

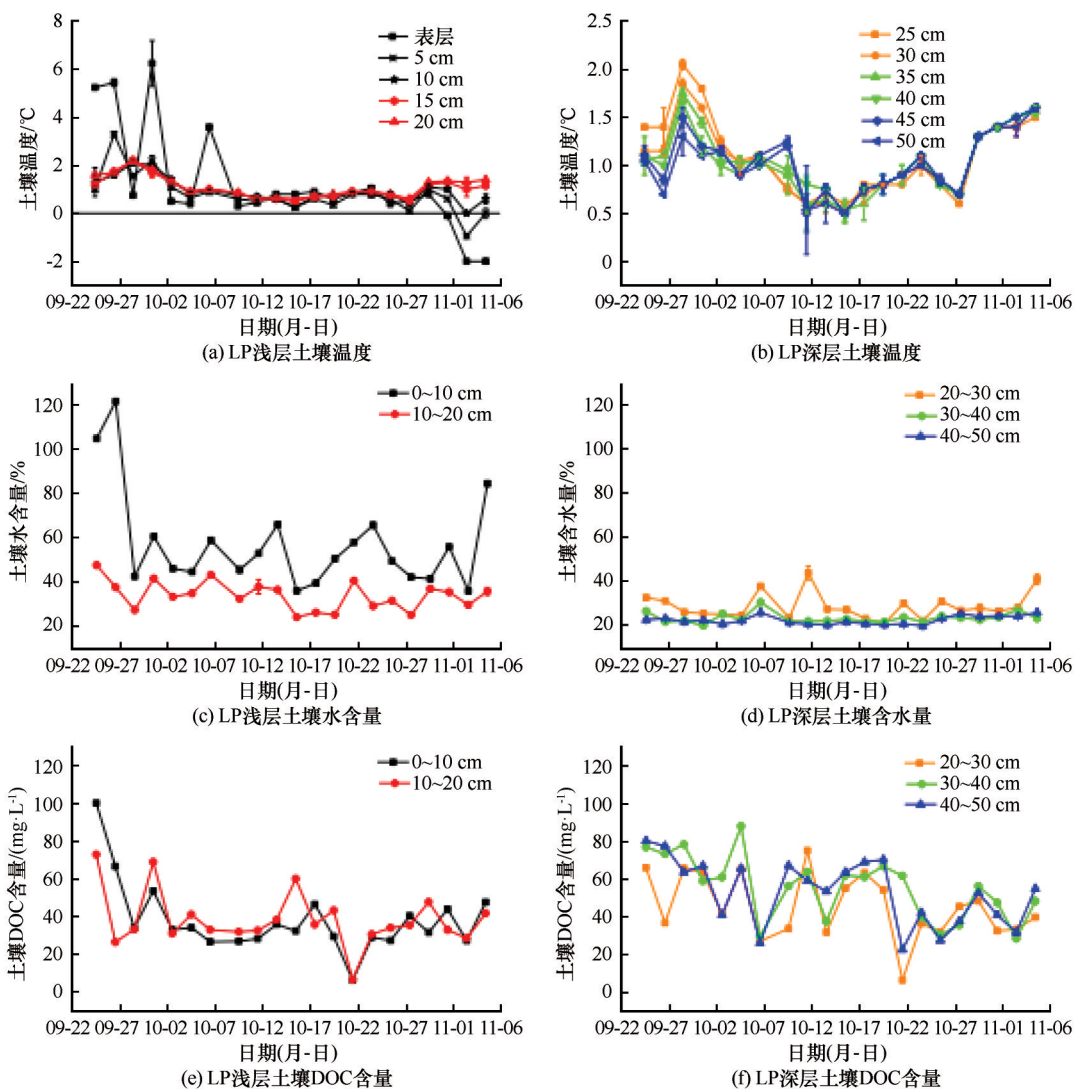


图2 秋季冻结期LP浅层和深层土壤温度、含水量和DOC时间变化特征

Fig. 2 Temporal variation characteristics of soil temperature, soil moisture content and soil DOC content of the shallow and deep soil layer in the LP during the autumn freezing period

CP、LP 浅层、深层土壤 DOC 含量分别与 EP 土壤 DOC 含量存在显著性差异 ($P < 0.05$)。冻结后期 CP 浅层土壤 DOC 含量与 LP 浅层土壤 DOC 含量呈显著性差异 ($P < 0.05$), 并且与 EP 浅层土壤 DOC 含量差异性不显著 ($P > 0.05$)。冻结后期, CP 深层土壤 DOC 含量与 LP 深层土壤 DOC 含量差异性不显著 ($P > 0.05$), CP 深层土壤 DOC 含量与 EP 深层存在显著性差异性 ($P < 0.05$), 而且 LP 浅层、深层土壤 DOC 与 EP 土壤 DOC 含量均存在显著性差异 ($P < 0.05$)。

3.3 秋季冻结期3种泥炭地土壤DOC与环境变量的关系

3种泥炭地土壤 DOC 含量与环境因子的多元线性逐步回归分析结果(图4)表明,在秋季冻结前期 20 cm 土壤温度对 CP 整体土壤 DOC 含量的贡献

率为 52.9%, 后期 0~10 cm 含水量对 CP 浅层和整体土壤 DOC 含量的贡献率分别为 64.1% (浅层), 61% (整体)。秋季冻结后期 20~30 cm 含水量对 EP 深层土壤 DOC 含量的贡献率为 65.2%, 40~50 cm 含水量对整体土壤 DOC 含量的贡献率为 70%。中期 15 cm 土温与 10~20 cm 含水率对 LP 浅层土壤 DOC 的贡献率为 80.8%。5 cm 土壤温度对 LP 整体土壤 DOC 贡献率为 54.1%。在整个秋季冻结期地表温度对 LP 浅层与整体土壤 DOC 含量贡献率分别为 29.7% (浅层)、19.5% (整体), 30~40 cm 土壤含水量对 LP 深层土壤 DOC 含量贡献率为 19.6%。

相关性分析结果(附表1)发现,在秋季冻结后期 CP 浅层土壤 DOC 含量与 0~20 cm 含水量呈显著性负相关 ($P < 0.05$)。在中期 LP 浅层土壤与 5 cm、

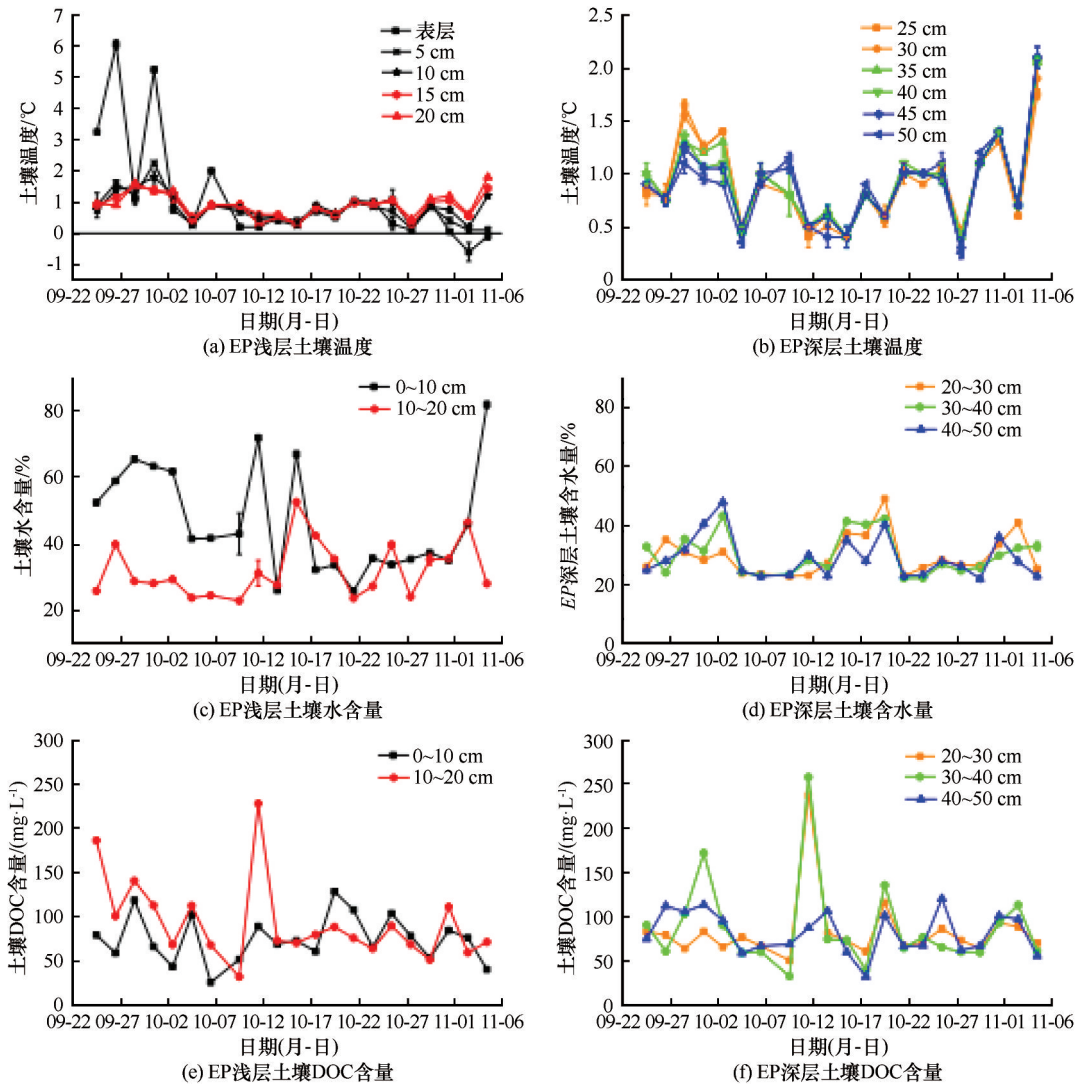


图3 秋季冻结期EP浅层和深层土壤温度、含水量和DOC时间变化特征

Fig. 3 Temporal variation characteristics of soil temperature, soil moisture content and soil DOC content of the shallow and deep soil layer in the EP during the autumn freezing period

15 cm 土温及 10~20 cm 土壤含水量呈显著性负相关 ($P < 0.05$), 前期和后期与土壤温度及含水量均不相关 ($P > 0.05$)。后期 EP 深层土壤 DOC 含量与 20~30 cm, 40~50 cm 土壤含水量呈显著性正相关 ($P < 0.05$), 前期和后期与土壤温度及含水量均不相关 ($P > 0.05$) (附表 2)。

4 讨论

4.1 秋季冻结期 3 种类型多年冻土泥炭地土壤 DOC 含量及变化特征

本研究发现在秋季冻结前期, 3 种冻土泥炭地土壤 DOC 含量均呈波动下降变化, 这与瑞典北部泥炭沼泽、三江平原湿地等地区的研究结果基本相一致, 即随着冻融次数的增加土壤碳含量最终呈下降

变化^[29-31]。引起这一变化的原因可归为以下几点: 首先, 可能是由于秋季冻结前期冻融作用破坏了土壤团聚体结构, 打破了有机质之间的联结, 导致小分子物质的释放^[32-33]; 第二, 秋季冻结前期植物凋落物分解和根的分泌物可能会导致 DOC 的额外输出^[34]; 第三, 随着时间的推移冻融循环次数的增加, 土壤中的微生物适应了这种变化, 死亡的微生物在减少, 没有死亡的微生物不断分解土壤中原有的 DOC, 使 DOC 含量呈下降的变化。秋季冻结前期 LP 和 EP 浅层土壤 DOC 下降幅度大于深层土壤, 深层土壤 DOC 相对稳定, 而在威尔士中部泥炭地的研究也发现深层土壤有机碳相对浅层土壤较稳定^[35]。在秋季冻结前期浅层土壤首先出现晚上冻结, 白天融化的日冻融现象, 而冻融作用通过改变土壤吸附

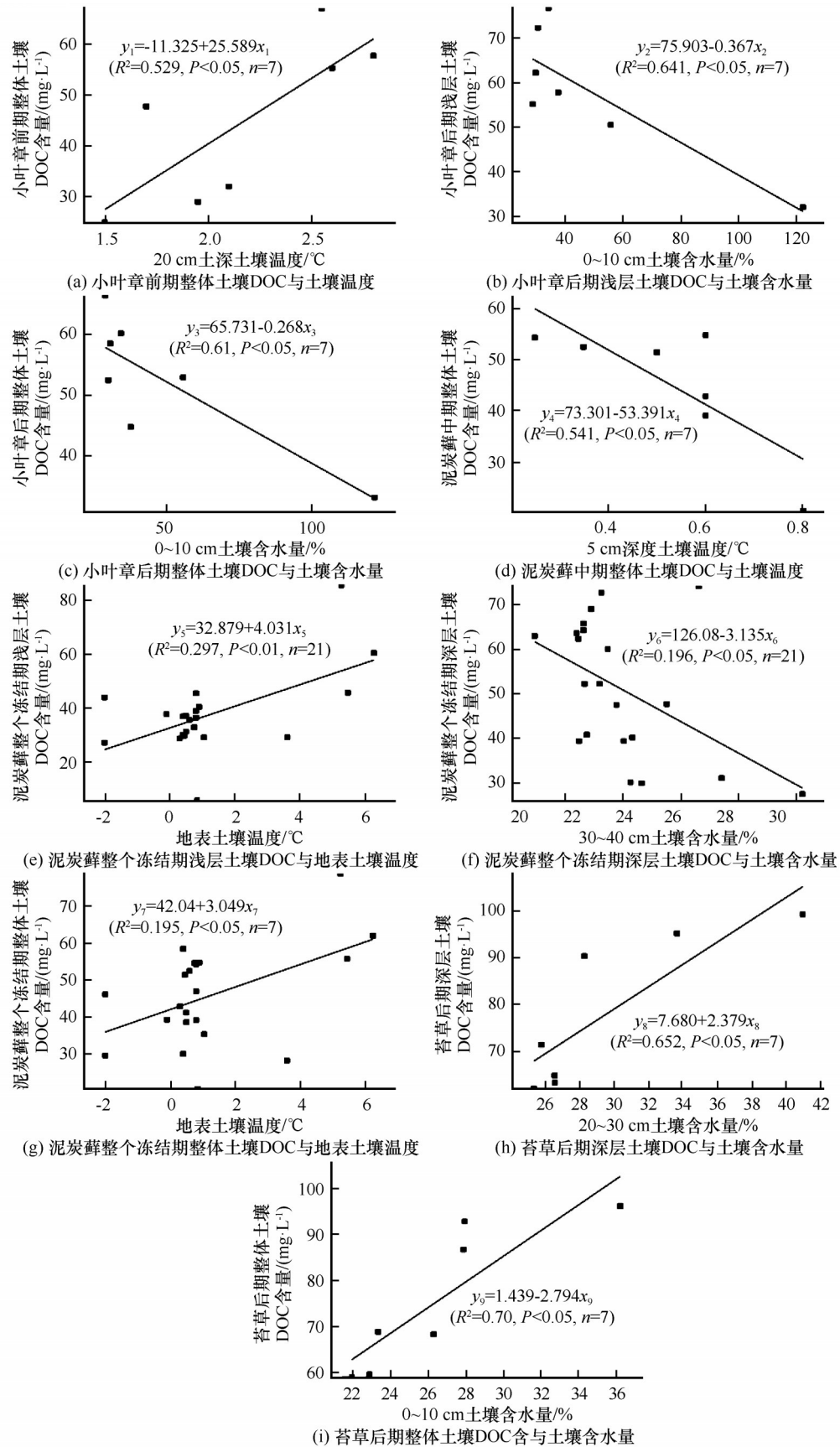


图4 秋季冻结期DOC含量和土壤温度、含水量多元线性逐步回归分析

Fig. 4 Multiple linear stepwise regression analysis of DOC content and soil temperature and moisture content during the freezing period in autumn

能力,破坏土壤结构,从而引起土壤 DOC 含量的变化。本研究在秋季冻结中期,EP 土壤 DOC 含量较高,是因为土壤碳含量较丰富的土壤,土壤结构则相对稳定,EP 土壤可能经过多次冻融作用后,团聚体中的 DOC 逐步释放出来,并在这一时期达到峰值^[36]。而在秋季冻结后期 3 种泥地土壤 DOC 含量均呈波动变化,这与现有对亚北极冻土带冻融状态下的碳动态变化研究结果相似,在适度冻融情况下土壤 DOC 并没有大量的流失^[37-38]。此外,本研究中不同类型泥炭地土壤 DOC 含量不同,具体表现为 EP>CP>LP。引起差异的原因可能是由于不同类型湿地凋落物的数量,根系分泌物和根系周转,微生物群落结构和活性以及微生物残体和代谢产物等存在差异,导致不同泥炭地 DOC 含量不同^[39]。多年冻土泥炭地土壤 DOC 在自然环境下存在动态变化,说明了进行长时间监测的必要性。

4.2 秋季冻结期土壤温度对多年冻土泥炭地土壤 DOC 变化的影响

温度变化对微生物活性,植被凋落物的分解,有机碳的矿化具有重要影响,但其作用形式不尽相同^[40]。本研究发现在秋季冻结过程中,地表温度是 LP 浅层和整体土壤 DOC 动态变化的重要驱动因素,分别解释土壤 DOC 含量 29.7%、19.5%,这与前人的研究结果相似。Zhang 等^[41]研究发现 0~20 cm 土壤 DOC 含量主要受地表温度的影响,20~40 cm 深度的 DOC 含量较稳定与表层土壤温度不相关。娄雪冬等^[42]研究发现地表温度是泥炭地表层土壤 DOC 动态变化重要影响因子, R^2 为 0.486。浅层土壤植物根系分布密集,且土壤碳含量丰富,地表温度的变化通过改变根系分泌以及浅层土壤土壤微生物的周转代谢速率从而对土壤 DOC 含量产生影响^[43-44]。同样,本研究发现在秋季冻结前期 CP 土壤 DOC 则主要受 20 cm 土壤温度影响,并解释了 DOC 含量的 52.9%,随着土壤温度的降低,DOC 含量逐渐减少,这也有可能随着温度变化改变了土壤微生物活性等因素有关。与 CP 不同在秋季冻结中期浅层温度是 LP 浅层及整体土壤 DOC 重要驱动因素,随着温度的升高土壤 DOC 含量逐渐减少。张金波等^[45]研究同样发现湿地土壤 DOC 受浅层温度和冻融循环的影响,温度升高土壤 DOC 呈下降变化。这可能是由于在秋季冻结中期,经过多次冻融循环后土壤 DOC 含量较低。短暂的温度上升,改变了土壤微生物活性导致 DOC 生物降解和矿化量的变化,当

DOC 产生量小于消耗量,会造成土壤 DOC 的逐步减少^[46]。然而 Christ 等^[47]研究发现土壤 DOC 随温度的升高逐渐增加。这说明不同土壤 DOC 在影响因素方面以及动态变化上存在差异性。同时本研究发现在其他时期冻结过程中及土壤深度,CP 土壤 DOC 含量受土壤温度变化的影响较小,可能由于野外条件的复杂性,土壤 DOC 含量和周转不仅受温度的影响,凋落物的质量和数量,植被的生物量,土壤质地均可控制或掩盖温度的效应^[48]。

4.3 秋季冻结期土壤含水量对多年冻土泥炭地土壤 DOC 变化的影响

本研究结果表明,3 种多年冻土泥炭地土壤 DOC 变化受到土壤含水量变化的影响。本研究发现在秋季冻结后期,20~30 cm,40~50 cm 土壤含水量对 EP 深层及整体土壤 DOC 具有促进作用,含水量的升高增加了土壤 DOC 的含量。这一发现与已有的结果较为类似。马素辉等^[49]对黑河上游多年冻土区研究发现土壤含水量变化增加了土壤有机碳密度。Baumann 等^[50]对青藏高原永久冻土区研究表明土壤含水量是土壤有机碳的重要驱动因素,并解释了土壤有机碳 64% 的变异。土壤含水量对土壤 DOC 的影响一般通过影响微生物活性来实现,通过改变土壤微生物种群、土壤酶活性以及物质循环强度,促使土壤 DOC 含量发生相应的变化^[18]。另一方面土壤含水量的变化对土壤团聚体结构产生破坏,包裹在团聚体中的有机碳因此被释放出来,增加土壤 DOC 的含量^[20,51]。本研究中秋季冻结后期随着浅层土壤含水量的变化,CP 浅层、整体土壤 DOC 呈上升趋势。前人在金川泥炭地的研究也有类似发现,季节性淹水的泥炭地中的 DOC 浓度显著高于所有时间淹水的其他地区^[41]。一般来说,在干湿交替变化的条件下,有利于提高微生物活性和加快凋落物分解速率,CP 浅层土壤含水量在冻结后期变化幅度较大时,因此更有利于土壤 DOC 的积累^[52]。在中期随着 LP 浅层土壤含水量的变化,减少了土壤 DOC 的含量,可能是因为土壤浅层含水量的变化影响了微生物活性以及浅层土壤吸附有机碳的能力,因此减少了土壤 DOC 的含量^[53]。在秋季冻结其他阶段 CP,EP 土壤含水量与 DOC 均不相关。可能由于土壤 DOC 受多种因素变化的影响,而在这一时期土壤含水量并不是土壤 DOC 变化的主要驱动因素。该研究表明在秋季冻结过程中不同多年冻土泥炭地土壤 DOC 受土壤含水量影响的程度不

同,而在冻结后期土壤含水量则是控制土壤DOC变化的主要因素。

5 结论

本研究通过原位试验探究秋季冻结期土壤水热变化对多年冻土泥炭地土壤DOC变化的影响,得出以下结论:

(1)在秋季冻结期,3种多年冻土泥炭地土壤DOC含量呈现出EP>CP>LP,且土壤DOC含量平均值分别为 $83.99 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $45.75 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $43.13 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

(2)在秋季冻结期,3种类型多年冻土泥炭地土壤DOC含量均在前期呈波动下降变化;其中浅层土壤DOC下降幅度大于深层,在中期EP土壤波动较大,最大差值为 $149.76 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。CP和LP土壤DOC中、后期变化较平缓。

(3)在秋季冻结期,土壤温度及含水量影响着土壤DOC的变化。在秋季冻结期不同冻结阶段引起土壤DOC变化的主要影响因子存在差异。在冻结前期和中期,土壤温度是影响土壤DOC变化的主要影响因子,而在冻结后期,土壤含水量则是控制土壤DOC变化的主要因素。在整个秋季冻结期,LP浅层土壤DOC主要受地表温度驱动($R^2=0.297$, $P<0.01$),深层土壤DOC则主要受深层含水量的影响($R^2=0.196$, $P<0.05$);整体土壤DOC则受地表温度影响较大($R^2=0.195$, $P<0.05$)。由于秋季冻结期监测数据的缺乏,本研究可为评估多年冻土碳反馈提供重要资料。

参考文献(References):

- [1] Mishra U, Hugelius G, Shelef E, et al. Spatial heterogeneity and environmental predictors of permafrost region soil organic carbon stocks[J]. *Science Advances*, 2021, 7(9): eaaz5236.
- [2] Drake T W, Wickland K P, Spencer R G M, et al. Ancient low-molecular-weight organic acids in permafrost fuel rapid carbon dioxide production upon thaw[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2015, 112(45): 13946-13951.
- [3] Grosse G, Harden J, Turetsky M, et al. Vulnerability of high-latitude soil organic carbon in North America to disturbance[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2011, 116: G00K06.
- [4] Bracho R, Natali S, Pegoraro E, et al. Temperature sensitivity of organic matter decomposition of permafrost-region soils during laboratory incubations[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2016, 97: 1-14.
- [5] Sun Guangyou. Discussion on the symbiotic mechanisms of swamp with permafrost: taking Da-Xiao Hinggan Mountains as examples[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2000, 22(4): 309-316. [孙广友. 试论沼泽与冻土的共生机理——以中国大小兴安岭地区为例[J]. *冰川冻土*, 2000, 22(4): 309-316.]
- [6] Yu Yanmin. Ecological environment of the wetland of Xinganling area and the countermeasures for its protection[J]. *Research of Environmental Sciences*, 1995, 8(6): 12-16. [于砚民. 兴安岭地区湿地生态环境及其保护对策[J]. *环境科学研究*, 1995, 8(6): 12-16.]
- [7] Yu Ran, Kampschreur M J, van Loosdrecht M C M, et al. Mechanisms and specific directionality of autotrophic nitrous oxide and nitric oxide generation during transient anoxia[J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, 44(4): 1313-1319.
- [8] Evans C D, Monteith D T, Cooper D M. Long-term increases in surface water dissolved organic carbon: Observations, possible causes and environmental impacts[J]. *Environmental Pollution*, 2005, 137(1): 55-71.
- [9] Zhao Guangying, Guo Dongnan, Jiang Shan, 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. [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.]
- [10] Thurman E M. Organic geochemistry of natural waters[M]. Dordrecht: Springer Netherlands, 1985.
- [11] Wang Qingkui, Wang Silong, Feng Zongwei, et al. Active soil organic matter and its relationship with soil quality[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(3): 513-519. [王清奎, 汪思龙, 冯宗伟, 等. 土壤活性有机质及其与土壤质量的关系[J]. *生态学报*, 2005, 25(3): 513-519.]
- [12] Linn D M, Doran J W. Aerobic and anaerobic microbial populations in no-till and plowed soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1984, 48(4): 794-799.
- [13] Michalzik B, Matzner E. Dynamics of dissolved organic nitrogen and carbon in a Central European Norway spruce ecosystem[J]. *European Journal of Soil Science*, 1999, 50(4): 579-590.
- [14] Frey K E. Amplified carbon release from vast West Siberian peatlands by 2100[J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(9): L09401.
- [15] McGuire A D, Anderson L G, Christensen T R, et al. Sensitivity of the carbon cycle in the Arctic to climate change[J]. *Ecological Monographs*, 2009, 79(4): 523-555.
- [16] Zhao Lin, Cheng Guodong, Li Shuxun, et al. Freezing and melting process of permafrost active layer near Wudaoliang, Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2000, 45(11): 1205-1211. [赵林, 程国栋, 李述训, 等. 青藏高原五道梁附近多年冻土活动层冻结和融化过程[J]. *科学通报*, 2000, 45(11): 1205-1211.]
- [17] Zhao Qiang, Wu Conglin, Luo Pingan, et al. Variation and influencing factors of soil temperature and moisture during freezing and thawing period in a seasonal freezing agricultural area in Northeast China[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2020, 42(3): 986-995. [赵强, 吴从林, 罗平安, 等. 冻融期东北农田土壤温度和水分变化规律及影响因素分析[J]. *冰川冻土*, 2020, 42(3): 986-995.]
- [18] Liechty H O, Kuuseoks E, Mroz G D. Dissolved organic carbon in northern hardwood stands with differing acidic inputs and temperature regimes[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1995, 24(5): 927-933.
- [19] Yuan Jie, Tian Kun, Xu Junping, et al. Effect of warming and doubling CO₂ on soil DOC of cattail and scirpus communities in

- Dianchi Lake [J]. Journal of Southwest Forestry University, 2016, 36(5): 65-70. [袁杰, 田昆, 许俊萍, 等. 增温与倍增 CO₂ 对滇池香蒲和水葱湿地土壤可溶性碳的影响[J]. 西南林业大学学报, 2016, 36(5): 65-70.]
- [20] Li Zhongpei, Zhang Taolin, Chen Biyun. Dynamics of soluble organic carbon and its relation to mineralization of soil organic carbon [J]. Acta Pedologica Sinica, 2004, 41(4): 544-552. [李忠佩, 张桃林, 陈碧云. 可溶性有机碳的含量动态及其与土壤有机碳矿化的关系[J]. 土壤学报, 2004, 41(4): 544-552.]
- [21] Cole L, Bardgett R D, Ineson P, et al. Relationships between enchytraeid worms (Oligochaeta), climate change, and the release of dissolved organic carbon from blanket peat in northern England [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2002, 34(5): 599-607.
- [22] Moore T R, Paré D, Boutin R. Production of dissolved organic carbon in Canadian forest soils [J]. Ecosystems, 2008, 11(5): 740-751.
- [23] Waddington J M, Tóth K, Bourbonniere R. Dissolved organic carbon export from a cutover and restored peatland [J]. Hydrological Processes, 2008, 22(13): 2215-2224.
- [24] Schädel C, Bader M K F, Schuur E A G, et al. Potential carbon emissions dominated by carbon dioxide from thawed permafrost soils [J]. Nature Climate Change, 2016, 6(10): 950-953.
- [25] Du Hao, Zhang Chengfu, Cheng Yuqi, et al. Change characteristics of dissolved organic carbon (DOC) in natural forests of Greater Khingan Mountains region [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26(6): 46-52. [杜浩, 张成福, 程宇琪, 等. 大兴安岭天然林不同林分溶解有机碳变化特征[J]. 水土保持研究, 2019, 26(6): 46-52.]
- [26] Li Shuyang, Man Xiuling, Wei Hong. Dynamic characteristics of soil active organic carbon in *Betula platyphalla* forest and *Larix gmelinii* forest in Daxing'an Mountains [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2018, 46(12): 64-70. [李书杨, 满秀玲, 魏红. 大兴安岭白桦林和兴安落叶松林土壤活性有机碳动态特征[J]. 东北林业大学学报, 2018, 46(12): 64-70.]
- [27] Lu Boquan, Zang Shuying, Sun Li. 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. [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.]
- [28] Chang Xiaoli, Jin Huijun, He Ruixia, et al. Review of permafrost monitoring in the northern Da Hinggan Mountains, Northeast China [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(1): 93-100. [常晓丽, 金会军, 何瑞霞, 等. 大兴安岭北部多年冻土监测进展[J]. 冰川冻土, 2013, 35(1): 93-100.]
- [29] Zhou Wangming, Wang Jinda, Liu Jingshuang, et al. Effects of freezing and thawing on dissolved organic carbon and nitrogen pool and nitrogen mineralization in typical wetland soils from Sanjiang Plain, Heilongjiang, China [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2008, 24(3): 1-6. [周旺明, 王金达, 刘景双, 等. 冻融对湿地土壤可溶性碳、氮和氮矿化的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2008, 24(3): 1-6.]
- [30] Pokrovsky O S, Karlsson J, Giesler R. Freeze-thaw cycles of Arctic thaw ponds remove colloidal metals and generate low-molecular-weight organic matter [J]. Biogeochemistry, 2018, 137(3): 321-336.
- [31] Han Chenglong, Gu Yanjie, Kong Meng, et al. Responses of soil microorganisms, carbon and nitrogen to freeze-thaw cycles in diverse land-use types [J]. Applied Soil Ecology, 2018, 124: 211-217.
- [32] Xiao Lie, Zhang Yang, Li Peng, et al. Effects of freeze-thaw cycles on aggregate-associated organic carbon and glomalin-related soil protein in natural-succession grassland and Chinese pine forest on the Loess Plateau [J]. Geoderma, 2019, 334: 1-8.
- [33] Li Jing, Wu Huijun, Wu Xueping, et al. Impact of long-term conservation tillage on soil aggregate formation and aggregate organic carbon contents [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2015, 21(2): 378-386. [李景, 吴会军, 武雪萍, 等. 长期保护性耕作提高土壤大团聚体含量及团聚体有机碳的作用[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(2): 378-386.]
- [34] Song Yang, Zou Yuanchun, Wang Guoping, 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.
- [35] Chapman P J, Reynolds B, Wheater H S. The seasonal variation in soil water acid neutralizing capacity in peaty podzols in Mid-Wales [J]. Water, Air, and Soil Pollution, 1995, 85(3): 1089-1094.
- [36] Herrmann A, Witter E. Sources of C and N contributing to the flush in mineralization upon freeze-thaw cycles in soils [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2002, 34(10): 1495-1505.
- [37] Grogan P, Michelsen A, Ambus P, et al. Freeze-thaw regime effects on carbon and nitrogen dynamics in sub-Arctic heath tundra mesocosms [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2004, 36(4): 641-654.
- [38] Hentschel K, Borken W, Zuber T, et al. Effects of soil frost on nitrogen net mineralization, soil solution chemistry and seepage losses in a temperate forest soil [J]. Global Change Biology, 2009, 15(4): 825-836.
- [39] Jiang Lei, Song Yanyu, Song Changchun, et al. Indoor simulation study on carbon and nitrogen contents and enzyme activities of soils in permafrost region in Greater Khingan Mountains [J]. Wetland Science, 2018, 16(3): 294-302. [蒋磊, 宋艳宇, 宋长春, 等. 大兴安岭冻土区泥炭地土壤碳、氮含量和酶活性室内模拟研究[J]. 湿地科学, 2018, 16(3): 294-302.]
- [40] Radke J K, Berry E C. Soil water and solute movement and bulk density changes in repacked soil columns as a result of freezing and thawing under field conditions [J]. Soil Science, 1998, 163(8): 611-624.
- [41] Zhang Tingshuang, Shi Sixue, Zhang Wen, et al. Environmental factors and dissolved organic carbon content in a Jinchuan peatland [J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(3): 160-165.
- [42] Lou Xuedong, Zhai Shengqiang, Kang Bing, et al. Seasonal dynamic characteristics of dissolved organic carbon in Zoige peatland and its impact factors [J]. Research of Environmental Sciences, 2014, 27(2): 157-163. [娄雪冬, 翟生强, 康冰, 等. 若尔盖泥炭地溶解有机碳季节变化特征及其影响因素[J]. 环境科学研究, 2014, 27(2): 157-163.]
- [43] Lange M, Eisenhauer N, Sierra C A, et al. Plant diversity increases soil microbial activity and soil carbon storage [J]. Nature Communications, 2015, 6: 6707.
- [44] Cooper J M, Burton D, Daniell T J, et al. Carbon mineralization kinetics and soil biological characteristics as influenced by

- manure addition in soil incubated at a range of temperatures[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2011, 47(6): 392-399.
- [45] Zhang Jinbo, Song Changchun, Yang Wenyan. Seasonal dynamics of dissolved organic carbon and its impact factors in the *Doyeuxia augustifolia* marsh soil [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2005, 25(10): 1397-1402. [张金波, 宋长春, 杨文燕. 小叶章湿地表土水溶性有机碳季节动态变化及影响因素分析[J]. *环境科学学报*, 2005, 25(10): 1397-1402.]
- [46] Kalbitz K, Schwesig D, Schmerwitz J, et al. Changes in properties of soil-derived dissolved organic matter induced by biodegradation[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2003, 35(8): 1129-1142.
- [47] Christ M J, David M B. Temperature and moisture effects on the production of dissolved organic carbon in a Spodosol[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1996, 28(9): 1191-1199.
- [48] Liu Wei, Wang Shutao. Review of researches on dissolved organic matter in soil and its affecting factors[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2011, 42(4): 997-1002. [刘微, 王树涛. 土壤中溶解性有机物及其影响因素研究进展[J]. *土壤通报*, 2011, 42(4): 997-1002.]
- [49] Ma Suhui, Mu Cuicui, Guo Hong, et al. Distribution features of permafrost organic carbon density on different vegetation types in the upper reaches of Heihe River, Qilian Mountains [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2018, 40(3): 426-433. [马素辉, 牟翠翠, 郭红, 等. 祁连山黑河上游多年冻土区不同植被类型土壤有机碳密度分布特征[J]. *冰川冻土*, 2018, 40(3): 426-433.]
- [50] Baumann F, He Jinsheng, Schmidt K, et al. Pedogenesis, permafrost, and soil moisture as controlling factors for soil nitrogen and carbon contents across the Tibetan Plateau[J]. *Global Change Biology*, 2009, 15(12): 3001-3017.
- [51] Sun Zhigao, Liu Jingshuang. Development in study of wetland litter decomposition and its responses to global change[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(4): 1606-1618. [孙志高, 刘景双. 湿地枯落物分解及其对全球变化的响应[J]. *生态学报*, 2007, 27(4): 1606-1618.]
- [52] Merckx R, Brans K, Smolders E. Decomposition of dissolved organic carbon after soil drying and rewetting as an indicator of metal toxicity in soils [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2001, 33(2): 235-240.
- [53] Yu Xiaofei, Zhang Yuxia, Zhao Hongmei, et al. Freeze-thaw effects on sorption/desorption of dissolved organic carbon in wetland soils [J]. *Chinese Geographical Science*, 2010, 20(3): 209-217.

Effects of soil hydrothermal variations on soil DOC content in permafrost peatlands during autumn freezing period in the Greater Hinggan Mountains

SUN Chaofeng^{1,2}, SONG Liquan^{1,2}, ZANG Shuying^{1,2}, JIAO Yaqing^{1,2}, LU Boquan^{1,2}

(1. Heilongjiang Provincial Key Laboratory of Geographical Environment Monitoring and Spatial Information Services in Cold Regions, Harbin Normal University, Harbin 150025, China; 2. Cooperative Innovation Center for Ecological Security in Cold Regions of Heilongjiang Province, Harbin 150025, China)

Abstract: Soil temperature and moisture content are important factors affecting the change of dissolved organic carbon (DOC). However, the response of soil DOC to soil hydrothermal during the autumn freezing period is not clear. Three types of permafrost peatlands [*Calamagrostis angustifolia* (CP), *Larix gmelini-Sphagnum* swamp (LP) and *Eriophorum vaginatum* (EP) peatland] in the Greater Hinggan Mountains were selected as research objects in the study. Field in situ experiments were carried out to explore the effect of soil hydrothermal variations on soil DOC changes in permafrost peatland during autumn freezing period. The results showed that soil DOC content was in order: EP > CP > LP, with an average of 84.01, 44.42 and 43.19 mg·L⁻¹ respectively during the autumn freezing period. The content of soil DOC in the three types of permafrost peatlands fluctuated and decreased in the early autumn freezing period, while the variations of soil DOC content in CP and LP were gentle in the middle and late autumn freezing period. In the early autumn freezing period, the DOC content in the whole soil layer in CP decreased with the decrease of shallow soil temperature; however, the content of DOC in the shallow and the whole soil layer in CP increased with the increase of soil moisture content in the shallow layer in the late period. In the middle autumn freezing period, the shallow soil temperature increased and soil moisture content decreased in LP, which reduced soil DOC content; the content of DOC in the whole soil layer in LP decreased with the increase of the shallow temperature. In the late autumn freezing period, the content of DOC in the deep and whole soil layer in EP increased with the increase of soil moisture content in the deep soil layer. Besides, throughout the autumn freezing period, the shallow soil DOC content in LP was mainly driven by surface temperature, and deep soil DOC content in LP was mainly affected by soil moisture content in the deep soil layer; the whole soil DOC content was significantly affected by surface temperature. The study indicated that the variations of soil hydrothermal in the permafrost peatlands during autumn freezing period drove the changes of soil DOC content. The results of this study could provide basic scientific data for the study of carbon cycles in permafrost region and carbon emissions under the “double carbon” background.

Key words: Greater Hinggan Mountains; permafrost; peatland; autumn freezing period; dissolved organic carbon (DOC); soil hydrothermal

(责任编辑: 牟翠翠)

附表1 3种泥炭地秋季不同冻结时期浅层土壤DOC含量与温度、含水量相关分析
Attached table 1 Correlation analysis of DOC content of shallow soil with temperature and moisture content at different freezing periods in autumn in three peatlands

样地	CP				LP				EP			
	前期	中期	后期	整体	前期	中期	后期	整体	前期	中期	后期	整体
地表土温	-0.382 (0.398)	-0.448 (0.267)	0.197 (0.672)	-0.007 (0.978)	0.677 (0.095)	0.058 (0.902)	-0.139 (0.765)	0.485* (0.026)	-0.043 (0.926)	-0.108 (0.818)	-0.237 (0.610)	0.097 (0.674)
土温	0.228 (0.622)	0.121 (0.796)	-0.118 (0.801)	0.020 (0.933)	0.113 (0.810)	-0.768* (0.044)	0.237 (0.609)	0.373 (0.096)	-0.092 (0.844)	-0.159 (0.733)	0.022 (0.962)	0.102 (0.659)
5 cm	0.345 (0.448)	0.046 (0.922)	-0.149 (0.750)	0.055 (0.812)	0.129 (0.782)	-0.701 (0.079)	0.372 (0.412)	0.411 (0.064)	-0.119 (0.800)	-0.160 (0.732)	-0.004 (0.993)	0.018 (0.939)
土温	0.579 (0.173)	0.417 (0.351)	-0.327 (0.474)	0.166 (0.471)	-0.037 (0.937)	-0.789* (0.035)	0.353 (0.438)	0.289 (0.203)	0.003 (0.995)	-0.205 (0.659)	-0.067 (0.887)	-0.034 (0.883)
15 cm	0.585 (0.167)	0.167 (0.720)	-0.260 (0.573)	0.260 (0.256)	0.288 (0.530)	-0.7108 (0.074)	0.351 (0.440)	0.363 (0.106)	0.071 (0.880)	-0.481 (0.274)	-0.155 (0.740)	-0.200 (0.384)
20 cm	0.075 (0.873)	0.467 (0.290)	-0.837* (0.019)	-0.114 (0.621)	0.603 (0.152)	-0.504 (0.249)	0.476 (0.280)	0.340 (0.132)	0.182 (0.695)	0.434 (0.330)	-0.487 (0.268)	0.307 (0.176)
含水率	-0.137 (0.770)	0.259 (0.575)	-0.762* (0.047)	-0.045 (0.847)	0.690 (0.086)	-0.774* (0.041)	0.531 (0.220)	0.142 (0.539)	-0.146 (0.756)	-0.017 (0.970)	0.275 (0.551)	0.031 (0.893)
10~20 cm												

注：*代表 $P<0.05$ ，括号内数字为 P 值。

附表2 3种泥炭地秋季不同冻结时期深层土壤DOC含量与温度、含水量相关分析
Attached table 2 Correlation analysis of deep soil DOC content with temperature and moisture content at different freezing periods in autumn in three peatlands

样地	CP				LP				EP			
	前期	中期	后期	整体	前期	中期	后期	整体	前期	中期	后期	整体
土温	0.472 (0.284)	0.011 (0.982)	-0.086 (0.854)	0.256 (0.263)	0.364 (0.423)	-0.337 (0.459)	0.373 (0.410)	0.267 (0.242)	0.539 (0.212)	-0.597 (0.157)	-0.196 (0.674)	-0.160 (0.488)
25 cm	0.547 (0.204)	0.034 (0.943)	-0.042 (0.928)	0.297 (0.191)	0.279 (0.545)	-0.480 (0.276)	0.421 (0.346)	0.171 (0.458)	0.529 (0.222)	-0.580 (0.172)	-0.198 (0.670)	-0.174 (0.452)
土温	0.500 (0.253)	0.161 (0.730)	-0.038 (0.936)	0.302 (0.183)	0.306 (0.506)	-0.512 (0.241)	0.349 (0.442)	0.047 (0.840)	0.552 (0.199)	-0.516 (0.236)	-0.193 (0.679)	-0.179 (0.437)
35 cm	0.150 (0.748)	0.007 (0.987)	-0.161 (0.731)	0.242 (0.291)	0.156 (0.738)	-0.369 (0.415)	0.357 (0.432)	-0.014 (0.951)	0.448 (0.313)	-0.480 (0.276)	-0.204 (0.661)	-0.188 (0.414)
40 cm	0.015 (0.974)	0.073 (0.877)	-0.120 (0.798)	0.252 (0.270)	0.157 (0.737)	-0.422 (0.346)	0.336 (0.461)	-0.071 (0.758)	0.479 (0.277)	-0.489 (0.265)	-0.181 (0.698)	-0.229 (0.317)
45 cm	0.037 (0.937)	0.170 (0.716)	0.201 (0.665)	0.318 (0.160)	-0.166 (0.722)	-0.286 (0.534)	0.401 (0.373)	-0.129 (0.578)	0.507 (0.246)	-0.581 (0.172)	-0.159 (0.733)	-0.265 (0.245)
50 cm	0.302 (0.510)	0.088 (0.851)	-0.348 (0.445)	0.059 (0.801)	-0.550 (0.201)	0.049 (0.917)	0.240 (0.604)	-0.051 (0.826)	0.401 (0.373)	-0.065 (0.890)	0.843* (0.017)	0.095 (0.684)
含水量	0.047 (0.921)	0.215 (0.643)	-0.007 (0.987)	0.089 (0.701)	-0.681 (0.92)	-0.688 (0.088)	-0.628 (0.131)	-0.349 (0.121)	0.379 (0.402)	-0.037 (0.937)	0.371 (0.413)	0.129 (0.577)
20~30 cm	0.281 (0.542)	0.087 (0.853)	-0.132 (0.778)	0.098 (0.671)	-0.575 (0.177)	0.189 (0.684)	0.244 (0.598)	-0.150 (0.517)	0.598 (0.156)	0.340 (0.455)	0.763* (0.046)	0.342 (0.129)
30~40 cm												
40~50 cm												

注：*代表 $P<0.05$ ，括号内数字为 P 值。