

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2022.0045

JIAO Yaqing, SONG Liqun, ZANG Shuying, et al. Response of inorganic nitrogen dynamics to autumn freeze-thaw in permafrost peatlands of the Greater Hignnan Mountains[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2022, 44(2):387-401. [焦亚青, 宋立全, 臧淑英, 等. 大兴安岭多年冻土泥炭地无机氮动态对秋季冻融的响应[J]. 冰川冻土, 2022, 44(2):387-401.]

大兴安岭多年冻土泥炭地无机氮动态 对秋季冻融的响应

焦亚青^{1,2}, 宋立全^{1,2}, 臧淑英^{1,2}, 孙超峰^{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: 大兴安岭多年冻土泥炭地是对全球变暖响应敏感的地区之一。在全球变暖、多年冻土退化背景下,为了探明秋季冻融对多年冻土泥炭地无机氮时空变化的影响,本研究于2019年9—11月以大兴安岭三种多年冻土泥炭地为研究对象进行野外原位实验,分析了秋季冻融前、中和后期多年冻土泥炭地浅层和深层土壤无机氮的时空变化特征以及浅层和深层土壤含水量和温度的变化规律,建立了土壤无机氮含量与土壤温度和含水量间的多元线性回归模型。研究表明:多年冻土小叶章泥炭地(XY)、兴安落叶松-泥炭藓泥炭地(XA)和白毛羊胡子苔草泥炭地(BM)的土壤铵态氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)含量变化范围:(1.00 ± 0.00)~(20.60 ± 0.20) $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,硝态氮($\text{NO}_3^-\text{-N}$)含量的变化范围:(0.02 ± 0.01)~(14.64 ± 1.11) $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,且无机氮以土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 为主;秋季冻融后期无机氮含量明显高于前期。尽管水热交互作用对该时期无机氮没有显著影响,但是在不同冻融阶段,无机氮对环境因子的响应程度存在差异:在秋季冻融前、中和后期浅层无机氮动态分别与浅层温度和含水量的变化相关,但在整个秋季冻融期间BM浅层无机氮含量仅对10~20 cm含水量存在响应($R^2=0.344, P<0.01$)。研究表明,秋季冻融期内,多年冻土泥炭地无机氮发生初步累积,且浅层环境因子对无机氮响应程度最大。本研究可补充大兴安岭多年冻土泥炭地秋季冻融对土壤无机氮影响研究的相关数据,并为多年冻土泥炭地响应全球变暖的温室气体释放的研究提供基础数据支撑。

关键词: 多年冻土泥炭地; 无机氮; 秋季冻融; 温度; 含水量; 大兴安岭

中图分类号: P642.14; S153.6*1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2022)02-0387-15

0 引言

国际冻土协会将多年冻土定义为温度在 $0\text{ }^\circ\text{C}$ 或低于 $0\text{ }^\circ\text{C}$ 至少连续存在两年的岩土层^[1]。在高纬度地区,沼泽湿地和冻土通常共生^[2]。多年冻土土壤有机氮经过矿化作用转换为铵态氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)和硝态氮($\text{NO}_3^-\text{-N}$),通过硝化和反硝化作用产生温室气体氧化亚氮(N_2O)逸散到大气中,从而对湿地生态系统和全球气候变化产生影响^[3]。高纬度多年冻土

泥炭地土壤氮素储量约 $40\sim 60\text{ Pg}^{[4]}$,在气候变暖的背景下,冻土退化、冻融循环过程的改变影响了土壤氮素的矿化过程^[5],提高了冻土泥炭地 N_2O 排放潜能^[6],从而加剧全球变暖。

冻融作用是土壤由于气温变化而反复冻结融化产生的^[7],是土壤水分和热量动态变化的表现形式^[8]。冻融过程直接改变了土壤的温度^[9]、水分迁移^[10]、微生物活性^[11],从而加速有效氮素以气体形式或淋溶形式释放^[12]。此过程主要发生在植物非

收稿日期: 2021-10-24; 修订日期: 2022-01-07

基金项目: 国家自然科学基金联合基金项目(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: 焦亚青,硕士研究生,主要从事多年冻土氮循环研究. E-mail: 623755281@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

焦亚青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

生长的春季和秋季^[13-14]。春季和秋季气温仍较低,一般认为气温较低时有机质分解较弱,然而,研究发现秋季土壤氮矿化仍非常强烈^[15];秋季土壤微生物活性和营养物质含量发生变化^[16],导致氮矿化过程不断累积。此外,冻融作用在非生长季产生的影响可能延续到冻融后期^[17],秋季氮矿化的累积会导致春季冻融期无机氮的释放和 N_2O 排放潜能。

目前关于无机氮影响因素的研究主要集中在温度、水分、土壤理化性质、微生物、植被类型等方面^[18-22],虽然获得了不少研究成果,但在不同自然生态系统中研究结果还存在较大差异,主要归结于土壤温度和水分。在冻融条件下频繁的水热交替会影响土壤微生物活性,改变土壤团聚体结构和土壤无机氮固持^[23]。有研究发现,在一定模拟条件下,土壤水分和温度与土壤氮矿化之间存在线性相关^[24];但也有研究发现土壤氮矿化与温度之间并没有直接关系^[25]。国内外在不同土地类型(湿地^[26]、草地^[27]、田地^[28]、水稻^[29])、不同坡面^[30]、不同纬度^[31-32]等条件下通过室内模拟和原位培养的方法已经开展了无机氮变化影响因子的研究。其中,室内模拟实验容易改变土壤温度和水分条件,可得到土壤无机氮变化规律,但是由于研究方法和冻融格局的差异,得到的结果也不一致^[33]。与室内模拟冻融实验相比,野外原位实验弥补了温度、水分极端变化的缺陷,很大程度上还原了无机氮在自然条件下的变化规律,但目前野外原位监测研究仍非常少见,导致秋季冻融对土壤无机氮变化的影响尚不明确。我国关于冻融条件下无机氮的研究主要集中在森林^[34]、农田^[35]、山地^[31]、湿地^[36]等生态系统,但在多年冻土泥炭地研究较少。因此,在气候变暖、多年冻土退化背景下,深入探讨秋季冻融对多年冻土泥炭地无机氮影响的研究是必要且紧迫的。

大兴安岭多年冻土泥炭地位于欧亚大陆多年冻土区的南缘,由于纬度高,并伴随着昼夜温差大的气候特点,是全球变暖响应敏感的地区之一,该区多年冻土泥炭地具有湿冷、滞水、厚度浅、稳定性较差等特点^[37]。近年来,由于全球变暖,该区冻土退化、水位下降,群落结构发生变化,从而导致生产力发生变化,必然会对土壤无机氮的时空变化产生影响。目前关于大兴安岭冻土区的研究主要集中在不同植被类型^[38]土壤碳氮矿化^[39]、微量元素^[40]的分布、温室气体排放^[41]等方面。然而,在野外原位探究多年冻土泥炭地无机氮对秋季冻融的响应方

面的研究很是缺乏。因此,本研究以大兴安岭三种多年冻土泥炭地为研究对象,旨在探明秋季冻融期间土壤温度和含水量变化对浅层和深层多年冻土泥炭土壤无机氮动态的影响,也为进一步探究该过程中温室气体(N_2O)排放对全球变暖响应的研究提供基础数据。

1 研究区概况

本研究区位于大兴安岭北部的黑龙江省漠河森林生态系统国家定位研究站(53°28' N, 122°21' E)。本区为寒温带大陆性季风气候,区域气候有显著性差异:冬季受大陆气团控制,寒冷而漫长(约占7个月之久),夏季受海洋气团影响,湿热短促,降水集中。年均气温为-4.5℃,其中1月最冷,平均温度为-29.1℃;7月最热,平均温度为18.2℃。年平均降水量460.8 mm,且主要集中在7、8月份。日照时间较长,其中夏天昼长夜短,白昼可达18小时以上;春季降水少,风多且干旱,易发生森林火灾;秋季温度急剧下降,常有初霜和冻害发生。平均无霜期85~90 d。

本区地形以低山丘陵为主,坡度平缓,河流沟谷湿地分布着多年冻土。土壤类型为棕色针叶林土、泥炭沼泽土和草甸土,泥炭层厚度45~60 cm,其中0~10 cm土壤全氮含量为14.8 mg·g⁻¹, pH为4.7。该区泥炭地植被类型以兴安落叶松-泥炭藓(*Larix gmelinii Sphagnum*)群落为主。高层灌木有兴安落叶松(*Larix gmelini*)、樟子松(*Pinus sylvestris var. mongolica*)、白桦(*Betula platyphylla*);矮层灌木有杜香(*Ledum palustre*)、杜鹃(*Rhododendron simsii*)、云杉(*Dragon spruce*)等;草本层有小叶章(*Calamagrostis angustifolia*)、白毛羊胡子草(*Eriophorum vaginatum*)等形成的“塔头”。

2 方法与数据

通过对研究区秋季冻融期大气、土壤温度的连续观测,将研究区最低气温开始位于0℃以下(研究区9月中下旬)至最高气温位于0℃以下并持续3~5天的(研究区11月上旬)这段时间作为本研究的秋季冻融期^[42-43]。其中9月25日—10月7日为秋季冻融前期,该地区的大气和土壤温度均呈下降趋势。10月10日—10月22日为秋季冻融中期,日最低气温降至0℃,截至10月24日—11月5日为秋季冻融后期,日最高气温和地表温度均低于0℃,且持续数天。根据大兴安岭多年冻土泥炭层土壤平均深度,

把土壤垂直剖面分为两部分:0~20 cm 为浅层泥炭土;20~50 cm 为深层泥炭土。

2.1 样品采集

本研究在大兴安岭多年冻土泥炭地,沿一定坡度设置三种典型的泥炭地为研究对象,分别设置3个100 m×100 m 样地,在每种泥炭地样地内随机设置3个20 m×20 m 样方作为重复,于2019年9月25日—11月5日,采样周期为间隔1天,采样时间均固定在北京时间09:00—11:00,分别采集浅层和深层多年冻土泥炭土壤,土壤样品的测定值作为该天土壤要素的平均值。

每次采样时,去除样地表面的凋落物和腐殖质后,用内径5 cm 的土钻分层采集0~10、10~20、20~30、30~40和40~50 cm 深度的土壤,剔除杂草和石砾后过2 mm 孔径筛,同种样地同层均匀混合,用于多年冻土泥炭地土壤无机氮和含水量的测定。用便携式温度计(JM-624,中国天津今明仪器有限公司)重复3次测量0~50 cm 土层深度的土壤温度(间隔为5 cm)以及采样地实时大气温度。

2.2 样品处理

将新鲜土样置于已称铝盒中,用烘干法(105 ℃,24 h)测定不同土层土壤含水量。称取10 g 新鲜土样于250 mL 三角瓶内,加入100 mL 氯化钾(1 mol·L⁻¹),摇床常温振荡1 h 后静置30 min,离心10 min 后用0.45 μm 定性滤纸过滤,移滤液40 mL 于50 mL 的离心管中保存待测。过滤的土壤溶液尽快在24 h 之内分析,如不能达到要求则冷藏保存。三种多年冻土泥炭地土壤NH₄⁺-N 和NO₃⁻-N 含量用连续流动分析仪(SKALAR San++, 荷兰)测定。

2.3 数据处理

应用Excel 2010 对初始数据进行整理,Origin 9.0 软件进行绘图。应用SPSS 22.0 数据处理软件,用单因素方差分析(LSD)方法,比较三种多年冻土泥炭地类型在秋季冻融期中土壤温度、含水量、NH₄⁺-N 和NO₃⁻-N 含量的差异。用Pearson 相关分析检验环境变量与土壤NH₄⁺-N 和NO₃⁻-N 含量的相关关系(当P<0.05 为显著)。采用多元线性逐步回归的方法揭示多年冻土泥炭土壤无机氮对温度和含水量的响应程度。

3 结果

3.1 秋季冻融期土壤温度、含水量变化规律

在秋季冻融前期和中期,XY 分别与XA、BM 在

15 cm、30 cm 和35 cm 土壤温度呈现差异显著(P<0.05),在秋季冻融后期差异均不显著(P>0.05)(附表1)。土壤总体均温大致呈现出XY 最大,BM 最小的趋势。如图1所示,3种冻土泥炭地浅层土壤温度在秋季冻融后期波动幅度较大,与秋季冻融前期相比降低幅度分别为79%、68%和52%;深层土壤温度先降后升呈波动变化。其中XY 在整个秋季冻融时期深层土壤温度大于浅层,而XA 和BM 仅在秋季冻融中期和后期与之变化一致,秋季冻融前期浅层土壤温度大于深层。

图2表明,在整个秋季冻融时期,3种冻土泥炭地浅层含水量均大于深层,其中XY 平均整体含水量最大,BM 最小;且在秋季冻融前期和中期XY 分别与XA、BM 在0~20 cm 土壤含水量呈现出显著差异水平(P<0.05)(附表1)。3种冻土泥炭地在秋季冻融前、中和后期土壤含水量均呈现波动下降趋势,其中XY 降幅最大(63.8%),BM 降幅最小(7.3%)。

3.2 秋季冻融期多年冻土泥炭地土壤NH₄⁺-N、NO₃⁻-N 含量变化规律

图3可以看出,XA 与BM 土壤NH₄⁺-N 变化趋势基本一致,即秋季冻融后期NH₄⁺-N 平均含量均大于前期,其中BM 土壤NH₄⁺-N 增加幅度最大(26.5%)。XY 浅层土壤NH₄⁺-N 在整个秋季冻融期中呈波动变化,秋季冻融中期出现最大值为(20.60±0.20) mg·kg⁻¹。在整个秋季冻融期,XY 和XA 浅层NH₄⁺-N 均大于深层,且不同冻土泥炭地的浅层、深层NH₄⁺-N 在对应土层间均不存在显著差异(P>0.05)(附表2)。NH₄⁺-N 总体变化趋势为:BM>XY>XA。

如图4所示,3种冻土泥炭地NO₃⁻-N 变化趋势各不相同,总体上:XY>XA>BM。其中BM 土壤NO₃⁻-N 在秋季冻融后期明显上升,上升幅度为107.4%,XA 则在秋季冻融中期逐渐降低之后升高,出现最小值为(0.02±0.01) mg·kg⁻¹。在秋季冻融前期,XY 深层土壤NO₃⁻-N 分别与XA 和BM 在对应土层间存在显著差异(P<0.05),其中XY 深层土壤NO₃⁻-N 在秋季冻融中期达到最高值(14.64±1.11) mg·kg⁻¹而后下降。

3.3 3种冻土泥炭地NH₄⁺-N、NO₃⁻-N 含量与环境变量之间的关系

在整个秋季冻融时期,BM 浅层(10~20 cm)、深层(20~30 cm)含水量分别与浅层、深层NH₄⁺-N 存在相关关系(P<0.05)(附表3),可解释浅层NH₄⁺-N 释

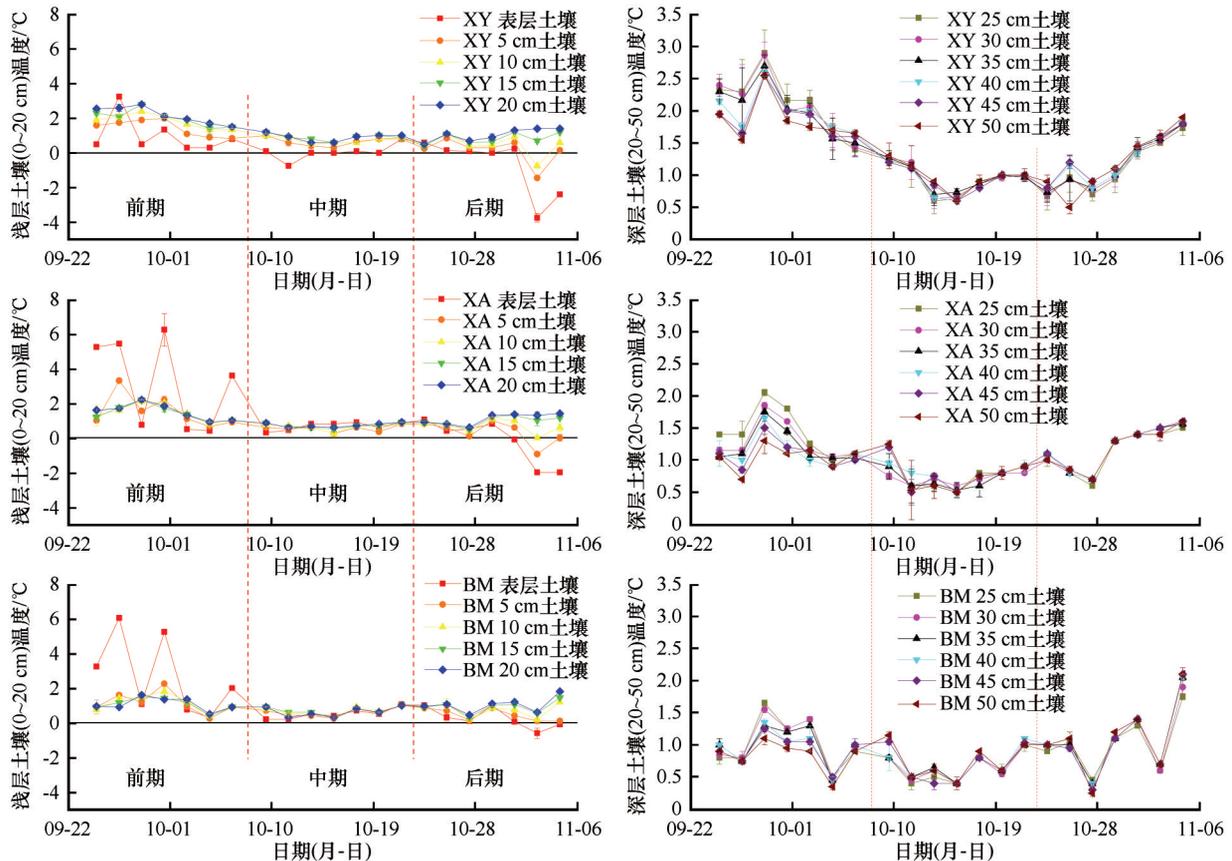


图1 秋季冻融期3种泥炭地浅层、深层土壤温度变化(XY:小叶章泥炭地;XA:兴安落叶松-泥炭藓泥炭地;BM:白毛羊胡子苔草泥炭地)

Fig. 1 Variations of soil temperature in shallow and deep layers of three permafrost peatlands during the autumn freeze-thaw period(XY: *Calamagrostis angustifolia* peatland; XA: *Larix gmelina*-*Sphagnum* peatland; BM: *Eriophorum vaginatum* peatland)

放的30.1%和19.4%(表1)。XA浅层(10~20 cm)含水量与浅层 NO_3^- -N存在显著正相关关系($P < 0.05$),可解释浅层 NO_3^- -N释放的17%。XY环境因子与无机氮之间不存在回归关系。

表2可知,在秋季冻融前期,XY样地0 cm土壤温度分别与浅层和整体 NH_4^+ -N之间存在显著正相关关系($P < 0.05$)(附表4),可解释无机氮释放的50.5%和66.4%。XA样地0 cm土壤温度与浅层 NH_4^+ -N和 NO_3^- -N间存在相关关系,无机氮释放分别为68.5%和50.3%。BM深层(40~50 cm)含水量与深层 NH_4^+ -N之间存在正相关关系,可解释深层 NH_4^+ -N释放的52%。

在秋季冻融中期,XY样地0 cm土壤温度与整体 NO_3^- -N之间存在显著负相关关系($P < 0.05$)(附表5),可解释无机氮释放的65%(表3)。XA样地浅层(0~10 cm)含水量与浅层 NO_3^- -N间存在显著性负相关关系($P < 0.05$),可解释无机氮释放的59.4%。BM无机氮含量与浅层环境因子有关($P < 0.05$),可

解释浅层 NH_4^+ -N释放的64.1%。

如表4所示,在秋季冻融后期,仅有XY环境因子与无机氮含量有关,其中浅层土壤温度与无机氮之间存在显著正相关关系($P < 0.05$)(附表6),可解释整体 NH_4^+ -N释放的69.1%和浅层 NO_3^- -N释放的58.9%。

4 讨论

4.1 多年冻土泥炭地土壤无机氮变化

本研究中,3种多年冻土泥炭地土壤 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N含量的变化范围分别为:(1.00 ± 0.00)~(20.60 ± 0.20) $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、(0.02 ± 0.01)~(14.64 ± 1.11) $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,较该区域7月($98.43 \sim 216 \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $15.58 \sim 17.07 \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)变化明显降低^[44],说明秋季冻融期温度变化会影响北方泥炭地土壤无机氮的动态。但是也有研究发现秋季温度变化对冻土区无机氮含量没有影响^[45],其原因可能是土壤在不同的生态系统中,产生了对环境和温度耐受力不同的土壤微生物

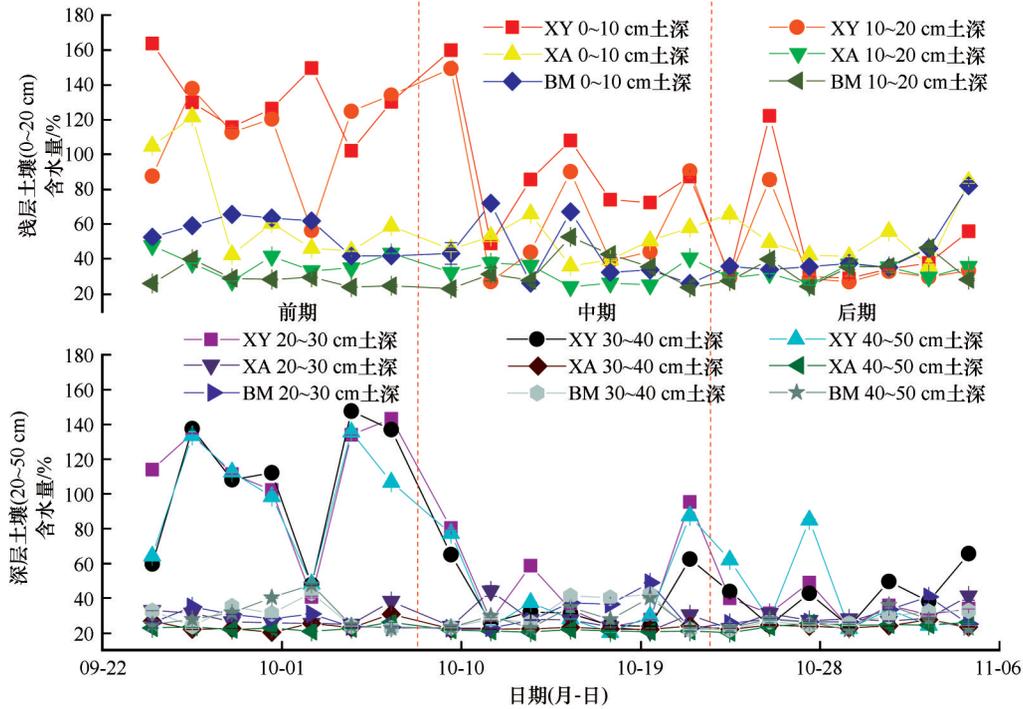


图2 秋季冻融期3种泥炭地浅层、深层土壤含水量变化(XY:小叶章泥炭地;XA:兴安落叶松-泥炭藓泥炭地;BM:白毛羊胡子苔草泥炭地)

Fig. 2 Variations of soil moisture content in shallow and deep layers of three permafrost peatlands during the autumn freeze-thaw period(XY: *Calamagrostis angustifolia* peatland; XA: *Larix gmelina-Sphagnum* peatland; BM: *Eriophorum vaginatum* peatland)

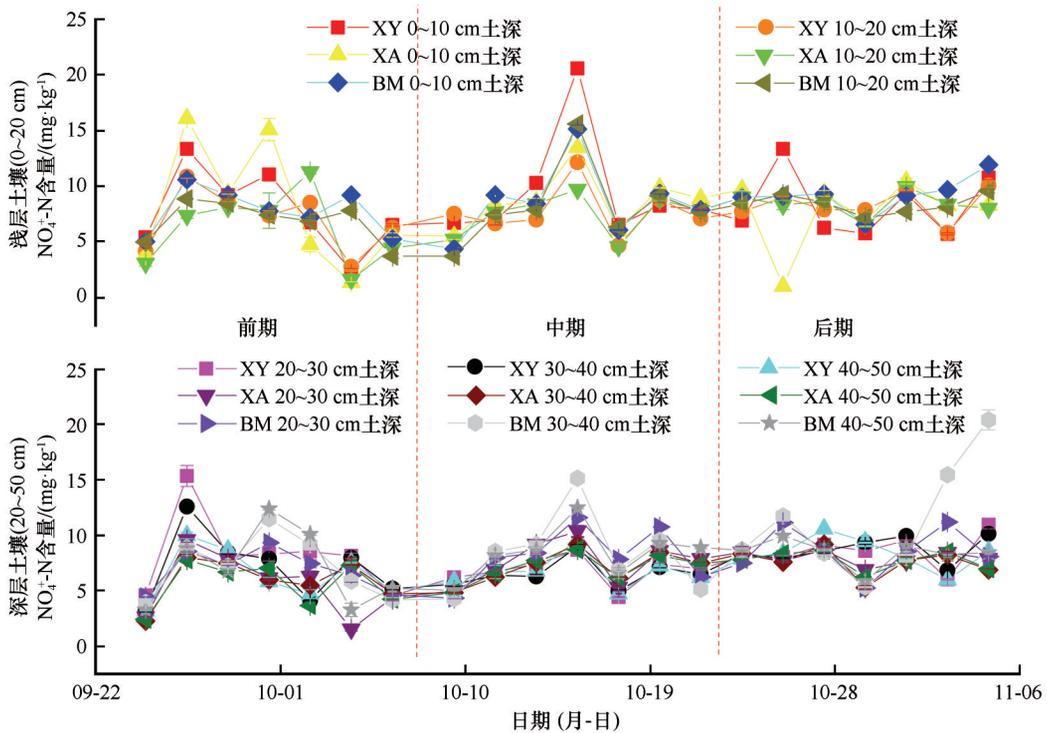


图3 2019年秋季冻融期3种泥炭地浅层、深层土壤NH₄⁺-N含量变化(XY:小叶章泥炭地;XA:兴安落叶松-泥炭藓泥炭地;BM:白毛羊胡子苔草泥炭地)

Fig. 3 Variations of soil NH₄⁺-N content in shallow and deep layers of three permafrost peatlands during the autumn freeze-thaw period in 2019(XY: *Calamagrostis angustifolia* peatland; XA: *Larix gmelina-Sphagnum* peatland; BM: *Eriophorum vaginatum* peatland)

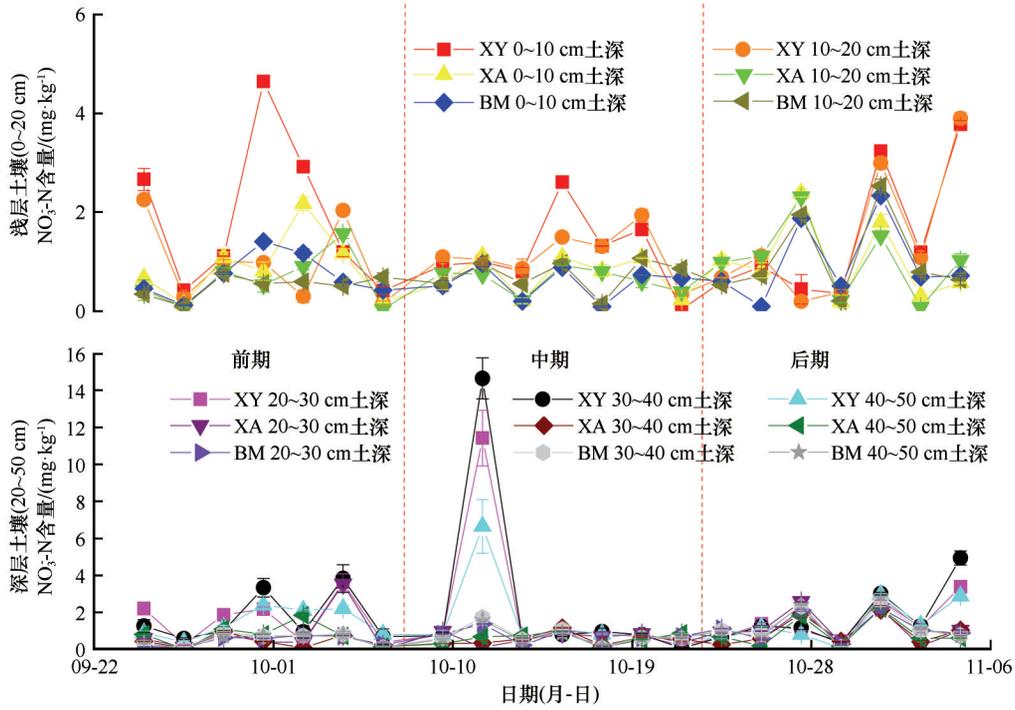


图4 2019年秋季冻融期3种泥炭地浅层、深层土壤NO₃-N含量变化(XY:小叶章泥炭地; XA:兴安落叶松-泥炭藓泥炭地;BM:白毛羊胡子苔草泥炭地)

Fig. 4 Variations of soil NO₃-N content in shallow and deep layers of three permafrost peatlands during the autumn freeze-thaw period in 2019(XY: *Calamagrostis angustifolia* peatland; XA: *Larix gmelina-Sphagnum* peatland; BM: *Eriophorum vaginatum* peatland)

表1 2019年秋季冻融期不同泥炭地类型土壤温度、含水量与无机氮含量的逐步多元线性回归分析

Table 1 Multiple linear stepwise regression analysis of soil temperature, moisture content and inorganic nitrogen concentrations in different peatland types during the whole autumn freeze-thaw period in 2019

无机氮类型	泥炭地类型	土深	a	b	R ²	P
浅层NH ₄ ⁺ -N	白毛羊胡子苔草	10~20 cm 含水量	2.822	0.167	0.301	<0.01
深层NH ₄ ⁺ -N	白毛羊胡子苔草	20~30 cm 含水量	2.792	0.184	0.194	<0.05
整体NH ₄ ⁺ -N	白毛羊胡子苔草	10~20 cm 含水量	2.538	0.177	0.344	<0.01
浅层NO ₃ ⁻ -N	兴安落叶松-泥炭藓	10~20 cm 含水量	2.119	-0.041	0.170	<0.05

注: 线性回归方程为y=a+bx; 在多元线性逐步回归分析中浅层、深层和整体的无机氮浓度在整个秋季冻融期均未于土壤温度构成模型; 此表中仅列出能与土壤无机氮构成模型的回归方程。

表2 2019年秋季冻融前期不同泥炭地类型土壤温度、含水量与无机氮含量的多元线性逐步回归分析

Table 2 Multiple linear stepwise regression analysis of soil temperature, water content and inorganic nitrogen concentrations in different peatland types during the prophase of autumn freeze-thaw period in 2019

无机氮类型	泥炭地类型	土深	a	b	R ²	P
浅层NH ₄ ⁺ -N	小叶章	0 cm 温度	5.094	2.268	0.505	<0.05
浅层NH ₄ ⁺ -N	兴安落叶松-泥炭藓	5 cm 温度	1.570	3.632	0.685	<0.05
深层NH ₄ ⁺ -N	白毛羊胡子苔草	40~50 cm 含水率	0.271	0.216	0.520	<0.01
整体NH ₄ ⁺ -N	小叶章	0 cm 温度	5.095	2.198	0.664	<0.05
浅层NO ₃ ⁻ -N	兴安落叶松-泥炭藓	0 cm 温度	1.287	-0.168	0.503	<0.05

注: 线性回归方程为y=a+bx; 此表中仅列出能与土壤无机氮构成模型的回归方程。

物,而土壤微生物是影响土壤中无机氮变化的关键因素^[46],从而使无机氮变化相对复杂。

本研究发现大兴安岭冻土区土壤有效氮以NH₄⁺-N为主,这与肖瑞晗在研究本区域结果相一

表3 2019年秋季冻融中期不同泥炭地类型土壤温度、含水量与无机氮含量的多元线性逐步回归分析

Table 3 Multiple linear stepwise regression analysis of soil temperature, water content and inorganic nitrogen concentrations in different peatland types during the metaphase of autumn freeze-thaw period in 2019

无机氮类型	泥炭地类型	土深	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>R</i> ²	<i>P</i>
浅层NH ₄ ⁺ -N	白毛羊胡子苔草	15 cm 温度	17.046	-12.563	0.641	<0.05
深层NH ₄ ⁺ -N	白毛羊胡子苔草	50 cm 温度	14.582	-8.475	0.745	<0.01
浅层NO ₃ ⁻ -N	兴安落叶松-泥炭藓	0~10 cm 含水率	1.867	-0.024	0.594	<0.05
整体NO ₃ ⁻ -N	小叶章	0 cm 温度	1.919	-4.336	0.650	<0.05
整体NO ₃ ⁻ -N	白毛羊胡子苔草	0~10 cm 含水率	0.010	0.016	0.553	<0.05

注: 线性回归方程为 $y=a+bx$; 此表中仅列出能与土壤无机氮构成模型的回归方程。

表4 2019年秋季冻融后期小叶章泥炭土壤温度与无机氮含量的多元线性逐步回归分析

Table 4 Multiple linear stepwise regression analysis of soil temperature and inorganic nitrogen concentrations in the XY peatland during the anaphase of autumn freeze-thaw period in 2019

无机氮类型	泥炭地类型	土深	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>R</i> ²	<i>P</i>
整体NH ₄ ⁺ -N	小叶章	10 cm 温度	7.590	1.895	0.691	<0.05
浅层NO ₃ ⁻ -N	小叶章	15 cm 温度	-1.451	3.516	0.589	<0.05

注: 线性回归方程为 $y=a+bx$; 在多元线性逐步回归分析中仅与小叶章泥炭地构成模型; 此表中仅列出能与土壤无机氮构成模型的回归方程。

致^[47]。由于NO₃⁻-N携带被土壤胶体排斥的负电荷^[48],一方面在非生长季受降水等影响向较深土壤淋溶,另一方面受到反硝化作用以挥发方式损失,从而导致土壤中NH₄⁺-N明显高于NO₃⁻-N。本研究中,XA样地土壤浅层无机氮的含量明显高于深层,这一结果与鲁博权等^[49]研究结果相似,即无机氮在垂直方向上具有空间异质性。这是由于冻土区植被根系在汲取氮素时会使得有机质在浅层聚集,且浅层土壤因水热条件和土壤基质有效性条件好,氮矿化程度高于微生物的固持^[50],而深层土壤则相反,从而导致无机氮含量较低。我们发现在整个秋季冻融时期,土壤NH₄⁺-N在3种冻土泥炭地各土层间不存在显著差异($P>0.05$);而NO₃⁻-N在浅层和深层土壤中呈现出显著性差异($P<0.05$),其中XY受饱和含水量的影响NO₃⁻-N平均含量较高,说明较高含水量会促进土壤矿化作用。可能是由于这种条件下微生物活性的增强提高了氨化而抑制了硝化作用,使NH₄⁺-N含量不断累积同时不断向NO₃⁻-N转换^[51]。不同泥炭地间无机氮含量以及组分会形成以上差异,说明不同泥炭地间土壤微生物会因为环境因子的不同形成差异,从而导致土壤氮矿化程度不同^[52],其次由于不同土层间土壤物理性质(结构、孔隙度)的差异,造成了NO₃⁻-N淋溶、NH₄⁺-N吸附程度不同。

4.2 多年冻土泥炭地土壤无机氮对秋季冻融的响应

影响冻土区泥炭地无机氮含量的因素多且复杂,其中土壤温度和含水量是影响无机氮转化的主要环境因子^[53]。在不同生态系统条件下,控制水热条件对无机氮的影响存在差异(表5):森林生态系统中长白山地区温带森林土壤以及湿地生态系统中三江平原沼泽湿地和小兴安岭湿地土壤在经过冻融模拟实验后,均发现培养后无机氮含量高于培养前,这与本研究发现秋季冻融后期土壤无机氮含量明显高于冻融前期的结果相一致,说明土壤氮矿化过程在秋季冻融后期受到强烈影响使硝化底物逐渐聚集,此时环境变化不足以影响硝化细菌活性且硝化过程强于反硝化过程^[54],因而导致无机氮含量上升。但是受培养温度不同的影响,研究发现森林系统中大兴安岭落叶松林土壤冻融交替会减少土壤中有效氮的累积。

有研究认为单一的温度^[50]或水分^[55]条件会对无机氮造成影响,本实验发现在秋季冻融时期土壤温度和含水量与无机氮含量之间存在相关关系,但是与水热的交互作用之间不存在相关性,这与马秀艳^[56]在研究该区结果不同,产生差异的原因可能是因为野外原位实验与室内模拟实验条件下,环境因子变化的复杂程度不同,造成了无机氮与水热交互

表5 控制水热条件下无机氮变化研究的比较

Table 5 Comparisons of inorganic nitrogen changes under controlled hydrothermal conditions

生态系统	研究地点	经纬度	实验类型	冻融处理/次数	含水量	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N
	长白山地区温带森林土壤	127° E, 42° N ^[34]	LT	-10 °C→10 °C, 12 h/1、3、5、7、11、15、22、28、36次	秋季低含水量(40%)	不变	增加
		127° E, 42° N ^[57]	LT	-20 °C→15 °C, 12 h/1、3、5、9、14、21、28、35次	最大田间持水量的60%	增加	增加
森林	河岸带不同植被类型	123° E, 41° N ^[58]	LT	-5 °C、-20 °C→5 °C, 12 h/0、1、5、10、20、30次	原土壤含水量	增加	农田变化不显著
	天山森林土壤	87° E, 43° N ^[31]	ST	0 °C以上→0 °C以下, 3 h/3次	原土壤含水量	草地和灌丛表现为先减少后增加	增加
	大兴安岭落叶松林土壤	121° E, 50° N ^[38]	LT	-5 °C→8 °C, 24 h/1、3、5、7、15次	60%土壤饱和含水量	低于恒温条件下的累积量	低于恒温条件下的累积量
草地	青藏高原高寒草甸区	103° E, 32° N ^[59]	LT	-4 °C、-20 °C→4 °C, 8 h/1、3、5、25、60次	原土壤含水量	先增后减	先增后减
	三江平原沼泽湿地	133° E, 47° N ^[36]	LT	-5 °C、-25 °C→5 °C, 1 d/1、2、4、6、10次	(352.5±1.6) g·kg ⁻¹	增加	增加
湿地	小兴安岭湿地土壤	129° E, 48° N ^[60]	LT	-20 °C→5 °C, 24 h/5次	原土壤含水量	先增后减	先减后增
		128° E, 48° N ^[61]	LT	-5 °C、-25 °C→5 °C, 24 h/0、1、2、4、9次	原土壤含水量	先增后减	先减后增

注: LT: 室内模拟试验; ST: 野外原位试验。

作用的相关性存在差异。

经逐步回归分析表明(表2~4),在不同冻融阶段,无机氮对环境因子的响应程度也存在差异。在整个秋季冻融期,BM浅层(10~20 cm)含水量对无机氮含量的影响程度最大($R^2=0.301$),这是由于浅层土壤含水量更容易影响土壤通气性和土壤微生物活性,进而改变影响了土壤基质的养分循环,从而对无机氮转化产生影响。通常认为无机氮对温度的响应程度大于含水量^[62],但是BM样地在整个秋季冻融时期,温度和含水量都处于较低水平且变化幅度较小,与温度相比含水量对土壤微生物活性起有效作用,这与赵媛^[34]在研究秋末冻融循环对长白山地区无机氮的影响结果相似,即无机氮对含水量的响应程度大于温度。在秋季冻融前、中和后期,3种多年冻土泥炭地浅层(0~20 cm)土壤的环境因子与无机氮释放有关,其中浅层土壤温度对无机氮释放的贡献率最大($R^2=0.685$),这主要受当地非生长季寒冷气候的影响,温度通过改变土壤中生物酶和氨氧化细菌、硝化细菌的活性来影响氮的分解和无机氮的释放^[63]。但是不同土壤环境条件下微生物对温度敏感程度有很大差异^[64],本研究发现,受非生长季温度逐渐降低的影响,XA仅在秋季冻融前期土壤温度对无机氮释放有贡献($R^2=0.685$),在秋季冻融后期不存在相关关系,这与表5中草地

生态系统下青藏高原高寒草甸区研究发现短期的冻融交替可以显著增加土壤中的氮矿化累积结果相似。说明与长期冻融相比,短期温度变化会破坏土壤团聚结构从而影响氨氧化细菌的活性,一部分微生物为了维持繁殖不断汲取死亡微生物的养分,从而促进了微生物的活性,影响土壤氮矿化速度。但也有研究发现,短期冻融对土壤氮矿化并没有影响^[57],土壤微生物会对温度变化做出调节反应,从而无机氮变化不显著。秋季冻融期无机氮对环境因子的响应程度存在以上差异的原因可能有以下四方面:第一,样地沿一定坡度选取,地势高低不同造成了土壤含水量存在显著差异。第二,受到地表植被的影响,土壤微生物的类别和数量存在差异因此对氮矿化程度不同^[44]。第三,与凋落物有关,不同凋落物分解的有机质不同会影响土壤有效基质^[65]。第四,3种泥炭地土壤的容重、孔隙度和pH值等物理性质存在差异^[66]。这些要素的综合影响造成了不同泥炭地间,以及冻融期不同时期无机氮含量对温度和含水量响应程度的不同。

在整个秋季冻融期,频繁的冻融交替一方面会改变土壤理化性质影响氮元素的依附能力,释放出固定的NH₄⁺-N^[67],另一方面会使部分微生物死亡释放出细胞中的矿质氮,为生存微生物提供了养分,因此提高了非生长季土壤氮矿化速度。本研究中,

XY 浅层土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 在秋季冻融中期出现峰值之后下降, 可能是因为在秋季冻融初期土壤环境因子 (其中浅层土壤温度对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 贡献最显著为 66.4%) 变化使土壤粒子不断收缩造成土壤胶体中固定 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 被释放而导致暂时升高, 秋季冻融后期土壤理化性质遭到破坏使土壤孔隙度增大对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的固持能力下降因而不断淋溶减少^[68]。XA 样地在秋季冻融中期, 一方面浅层环境因子对 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 贡献为 59.4% 且存在显著负相关关系 ($P < 0.05$) 因而使浅层 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量明显上升, 另一方面由于泥炭地土层黏重且渗透性差导致 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 淋溶性较差而上升^[69]。

5 结论

本研究以大兴安岭三种多年冻土泥炭地为研究对象, 通过野外原位实验, 分别分析了秋季冻融前、中和后期多年冻土泥炭地浅层和深层土壤无机氮的时空变化特征、浅层和深层土壤含水量和温度的变化规律, 建立了土壤无机氮含量与土壤温度和含水量间的多元线性回归模型。主要结论如下:

(1) 大兴安岭多年冻土泥炭地在秋季冻融期中无机氮含量以 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 为主, 浅层土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量明显高于深层; 秋季冻融后期 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量明显高于秋季冻融前期; 整体上 BM 样地的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量最高, XY 样地的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量最高。

(2) 短期冻融交替更容易影响无机氮含量; XA 和 BM 在秋季冻融前期和中期, 无机氮含量显著受到温度影响 ($P < 0.05$)。3 种泥炭地无机氮含量对土壤温度和含水量的响应程度不同; 浅层土壤无机氮含量对浅层土壤水热条件响应强烈。

(3) 本研究探讨了秋季冻融条件下多年冻土泥炭地无机氮的时空分布变化, 有助于了解在全球变暖条件下中高纬度无机氮变化特征, 也可进一步为秋季冻融期温室气体排放对全球变暖响应的研究提供基础数据。

参考文献 (References):

[1] Qin Dahe. Glossary of cryospheric science [M]. 2nd ed. Beijing: China Meteorological Press, 2016. [秦大河. 冰冻圈科学辞典 [M]. 2 版. 北京: 气象出版社, 2016.]

[2] 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.]

[3] Hu Xingyun, Sun Zhigao. Effects of temperature and nitrogen input on nitrogen mineralization of soils in the newly created marshes of the Yellow River estuary [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(24): 8882-8891. [胡星云, 孙志高. 黄河口碱蓬湿地土壤氮矿化特征对温度及氮输入的响应 [J]. 生态学报, 2020, 40(24): 8882-8891.]

[4] Harden J W, Koven C D, Ping C L, et al. Field information links permafrost carbon to physical vulnerabilities of thawing [J]. Geophysical Research Letters, 2012, 39(15).

[5] Jin Huijun, Yu Shaopeng, Lü Lanzhi, et al. Preliminary assessment of permafrost degradation and its trend in the Great and Small Xing'an Mountains [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2006, 28(4): 467-476. [金会军, 于少鹏, 吕兰芝, 等. 大小兴安岭多年冻土退化及其趋势初步评估 [J]. 冰川冻土, 2006, 28(4): 467-476.]

[6] Marushchak M E, Pitkämäki A, Koponen H, et al. Hot spots for nitrous oxide emissions found in different types of permafrost peatlands [J]. Global Change Biology, 2011, 17(8): 2601-2614.

[7] Wang Lianfeng, Cai Yanjiang, Xie Hongtu. Relationships of soil physical and microbial properties with nitrous oxide emission under effects of freezing-thawing cycles [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(10): 2361-2366. [王连峰, 蔡延江, 解宏图. 冻融作用下土壤物理和微生物性状变化与氧化亚氮排放的关系 [J]. 应用生态学报, 2007, 18(10): 2361-2366.]

[8] Cai Yanjiang, Wang Xiaodan, Ding Weixin, et al. Effects of freeze-thaw on soil nitrogen transformation and N_2O emission: a review [J]. Acta Pedologica Sinica, 2013, 50(5): 1032-1042. [蔡延江, 王小丹, 丁维新, 等. 冻融对土壤氮素转化和 N_2O 排放的影响研究进展 [J]. 土壤学报, 2013, 50(5): 1032-1042.]

[9] Zhao Haipeng, Lü Mingxia, Wang Yibo, et al. Spatiotemporal variation characteristics of soil water content and temperature within active layer at slope scale in the Fenghuoshan Basin, Tibetan Plateau [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020, 42(4): 1158-1168. [赵海鹏, 吕明侠, 王一博, 等. 青藏高原风火山流域坡面尺度活动层土壤水热时空变化特征 [J]. 冰川冻土, 2020, 42(4): 1158-1168.]

[10] Dai Licong, Ke Xun, Zhang Fawei, et al. Characteristics of hydro-thermal coupling during soil freezing-thawing process in seasonally frozen soil regions on the Tibetan Plateau [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020, 42(2): 390-398. [戴黎聪, 柯浔, 张法伟, 等. 青藏高原季节冻土区土壤冻融过程水热耦合特征 [J]. 冰川冻土, 2020, 42(2): 390-398.]

[11] van Bochove E, Prévost D, Pelletier F. Effects of freeze-thaw and soil structure on nitrous oxide produced in a clay soil [J]. Soil Science Society of America Journal, 2000, 64(5): 1638-1643.

[12] Gilliam F S, Cook A, Lyter S. Effects of experimental freezing on soil nitrogen dynamics in soils from a net nitrification gradient in a nitrogen-saturated hardwood forest ecosystem [J]. Canadian Journal of Forest Research, 2010, 40(3): 436-444.

[13] Sulkava P, Huhta V. Effects of hard frost and freeze-thaw cycles on decomposer communities and N mineralisation in boreal forest soil [J]. Applied Soil Ecology, 2003, 22(3): 225-239.

[14] Ludwig B, Teepe R, de Gerenyu V L, et al. CO_2 and N_2O emissions from gleyic soils in the Russian tundra and a German forest during freeze-thaw periods: a microcosm study [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2006, 38(12): 3516-3519.

- [15] Schimel J P, Bilbrough C, Welker J M. Increased snow depth affects microbial activity and nitrogen mineralization in two Arctic tundra communities[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, 36(2): 217-227.
- [16] An Meiling, Zhang Bo, Sun Liwei, et al. Quantitative analysis of dynamic change of land use and its influencing factors in upper reaches of the Heihe River[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2013, 35(2): 355-363. [安美玲, 张勃, 孙力炜, 等. 黑河上游土地利用动态变化及影响因素的定量分析[J]. *冰川冻土*, 2013, 35(2): 355-363.]
- [17] Chen Lei, Chang Shunli, Zhang Yutao, et al. Response of soil gross nitrogen mineralization processes to seasonal freeze-thawing in the forests of Tianshan Mountain[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(12): 3968-3978. [陈磊, 常顺利, 张毓涛, 等. 天山林区土壤总氮矿化过程对季节性冻融的响应[J]. *生态学报*, 2020, 40(12): 3968-3978.]
- [18] Li Guicai, Han Xingguo, Huang Jianhui, et al. A review of affecting factors of soil nitrogen mineralization in forest ecosystems[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(7): 1187-1195. [李贵才, 韩兴国, 黄建辉, 等. 森林生态系统土壤氮矿化影响因素研究进展[J]. *生态学报*, 2001, 21(7): 1187-1195.]
- [19] Plymale A E, Boerner R E J, Logan T J. Relative nitrogen mineralization and nitrification in soils of two contrasting hardwood forests: Effects of site microclimate and initial soil chemistry[J]. *Forest Ecology and Management*, 1987, 21(1/2): 21-36.
- [20] Wang Guangjun, Tian Dalun, Zhu Fan, et al. Net nitrogen mineralization in soils under four forest communities in Hunan Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(3): 1607-1615. [王光军, 田大伦, 朱凡, 等. 湖南省4种森林群落土壤氮的矿化作用[J]. *生态学报*, 2009, 29(3): 1607-1615.]
- [21] Xiao Haoyan, Liu Bao, Yu Zaipeng, et al. Seasonal dynamics of soil mineral nitrogen pools and nitrogen mineralization rate in different forests in subtropical China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(3): 730-738. [肖好燕, 刘宝, 余再鹏, 等. 亚热带不同林分土壤矿质氮库及氮矿化速率的季节动态[J]. *应用生态学报*, 2017, 28(3): 730-738.]
- [22] Yu Xingxiu, Xu Miaomiao, Zhao Jinhui, et al. Nitrogen mineralization rate in different soil layers and its influence factors under plastic film mulched in Danjiangkou Reservoir area, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(4): 1259-1265. [于兴修, 徐苗苗, 赵锦慧, 等. 丹江口库区覆膜土壤不同土层氮素矿化速率及其影响因素[J]. *应用生态学报*, 2018, 29(4): 1259-1265.]
- [23] 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.
- [24] Gui Huiying, Li Xuejiang, Wang Jingyan, et al. Effects of temperature and moisture on soil nitrogen mineralization of *Phyllostachys heterocyclus* plantation in the rainy area of Western China[J]. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 2018, 36(6): 758-764. [桂慧颖, 李雪江, 王景燕, 等. 温度和水分对华西雨屏区毛竹林土壤氮矿化的影响[J]. *四川农业大学学报*, 2018, 36(6): 758-764.]
- [25] Niklińska M, Maryański M, Laskowski R. Effect of temperature on humus respiration rate and nitrogen mineralization: implications for global climate change[J]. *Biogeochemistry*, 1999, 44(3): 239-257.
- [26] Toczydlowski A J Z, Slesak R A, Kolka R K, et al. Effect of simulated emerald ash borer infestation on nitrogen cycling in black ash (*Fraxinus nigra*) wetlands in northern Minnesota, USA[J]. *Forest Ecology and Management*, 2020, 458: 117769.
- [27] Zhang Nanyi, Guo Rui, Song Piao, et al. Effects of warming and nitrogen deposition on the coupling mechanism between soil nitrogen and phosphorus in Songnen Meadow Steppe, northeastern China[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, 65: 96-104.
- [28] Dridi I, Gueddari M. Field and laboratory study of nitrogen mineralization dynamics in four Tunisian soils[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2019, 154: 101-110.
- [29] Girsang S S, Correa T Q, Quilty J R, et al. Soil aeration and relationship to inorganic nitrogen during aerobic cultivation of irrigated rice on a consolidated land parcel[J]. *Soil and Tillage Research*, 2020, 202: 104647.
- [30] Lin Xiaodan, Yu Shen, Yang Dawen, et al. Discriminating surface soil inorganic nitrogen cycling under various land uses in a watershed with simulations of energy balanced temperature and slope introduced moisture[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 587: 124950.
- [31] Hu Zhonghao, Chang Shunli, Zhang Yutao, et al. Dynamic response of soil nitrogen to freeze-thaw processes in different cenotypes in the forests of the Tianshan Mountains[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(2): 571-579. [胡仲豪, 常顺利, 张毓涛, 等. 天山林区不同类型群落土壤氮素对冻融过程的动态响应[J]. *生态学报*, 2019, 39(2): 571-579.]
- [32] Shi Wei, Wang Jingyan, Wei Youbo, et al. Effects of moisture and temperature on soil nitrogen mineralization of *Cryptomeria fortunei* plantations in rainy area of Western China[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2014, 45(6): 1430-1436. [石薇, 王景燕, 魏有波, 等. 水热条件对华西雨屏区柳杉人工林土壤氮矿化的影响[J]. *土壤通报*, 2014, 45(6): 1430-1436.]
- [33] Sun Hui, Qin Jihong, Wu Yang. Freeze-thaw cycles and their impacts on ecological process: a review[J]. *Soils*, 2008, 40(4): 505-509. [孙辉, 秦纪洪, 吴杨. 土壤冻融交替生态效应研究进展[J]. *土壤*, 2008, 40(4): 505-509.]
- [34] Zhao Yuan, Zhou Wangming, Wang Shoule, et al. Effects of freezing-thawing on soil carbon and nitrogen mineralization in temperate forest ecosystems[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2017, 36(6): 1548-1554. [赵媛, 周旺明, 王守乐, 等. 冻融对温带森林土壤碳、氮矿化作用的影响[J]. *生态学报*, 2017, 36(6): 1548-1554.]
- [35] Juan Yinghua, Liu Yan, Tian Lulu, et al. Regulation effects of freezing-thawing cycle on farmland brown soil nitrogen transformation process[J]. *Soils*, 2015, 47(4): 647-652. [隽英华, 刘艳, 田路路, 等. 冻融交替对农田棕壤氮素转化过程的调控效应[J]. *土壤*, 2015, 47(4): 647-652.]
- [36] 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.]
- [37] Wei Zhi, Jin Huijun, Zhang Jianming, et al. Study on the process of soil carbon and nitrogen mineralization in cold-temperate coniferous forests under freezing and thawing[J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 2011, 41(1): 74-84. [魏智, 金会军, 张建明, 等. 气候变化条件下东北地区多年冻土变化预测[J]. *中国科学: 地球科学*, 2011, 41(1): 74-84.]
- [38] Luo Yachen, Lv Yuliang, Yang Hao, et al. Soil carbon and nitrogen mineralization in a *Larix gmelinii* forest during freeze-

- thaw cycles[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, 23(11): 1769-1775. [罗亚晨, 吕瑜良, 杨浩, 等. 冻融作用下寒温带针叶林土壤碳氮矿化过程研究[J]. *生态环境学报*, 2014, 23(11): 1769-1775.]
- [39] Wang Jiaoyue, Han Yaopeng, Song Changchun, et al. Effects of freezing-thawing cycles on soil organic carbon mineralization in the peatland ecosystems from continuous permafrost zone, Great Hinggan Mountains [J]. *Climate Change Research*, 2018, 14(1): 59-66. [王娇月, 韩耀鹏, 宋长春, 等. 冻融作用对大兴安岭多年冻土区泥炭地土壤有机碳矿化的影响研究[J]. *气候变化研究进展*, 2018, 14(1): 59-66.]
- [40] Zhu Yanming, Huo Wenyi, Chen Dingui. Trace element dispersion characteristics of peat in the Da Hingan Mountains and environmental significance [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 1997, 17(2): 63-67. [朱颜明, 霍文毅, 陈定贵. 大兴安岭泥炭微量元素分布特征及其环境意义[J]. *地理科学*, 1997, 17(2): 63-67.]
- [41] Chang Yihui, Mu Changcheng, Peng Wenhong, et al. Characteristics of greenhouse gas emissions from seven swamp types in the permafrost region of Daxing' an Mountains, northeast China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(7): 2333-2346. [常怡慧, 牟长城, 彭文宏, 等. 大兴安岭永久冻土区7种沼泽类型土壤温室气体排放特征[J]. *生态学报*, 2020, 40(7): 2333-2346.]
- [42] Wang Yonghui, Liu Huiying, Chung H, et al. Non-growing-season soil respiration is controlled by freezing and thawing processes in the summer monsoon-dominated Tibetan alpine grassland[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2014, 28(10): 1081-1095.
- [43] Wang Qi, Lü Wangwang, Li Bowen, et al. Annual ecosystem respiration is resistant to changes in freeze-thaw periods in semiarid permafrost [J]. *Global Change Biology*, 2020, 26(4): 2630-2641.
- [44] 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.]
- [45] Groffman P, Driscoll C, Fahey T, et al. Effects of mild winter freezing on soil nitrogen and carbon dynamics in a northern hardwood forest[J]. 2001, 2001, 56(2): 191-213.
- [46] Li Yuan. The influence of hydrothermal conditions change on nitrogen transformation and enzyme activities in black soil in Northeast China[D]. Changchun: Northeast Normal University, 2015. [李源. 东北黑土氮素转化和酶活性对水热条件变化的响应[D]. 长春: 东北师范大学, 2015.]
- [47] Xiao Ruihan, Man Xiuling, Ding Lingzhi. Soil nitrogen mineralization characteristics of the natural coniferous forest in northern Daxing' an Mountains, Northeast China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(8): 2762-2771. [肖瑞晗, 满秀玲, 丁令智. 大兴安岭北部天然针叶林土壤氮矿化特征[J]. *生态学报*, 2019, 39(8): 2762-2771.]
- [48] Li Zhijie, Yang Wanqin, Yue Kai, et al. Effects of temperature on soil nitrogen mineralization in three subalpine forests of western Sichuan, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(12): 4045-4052. [李志杰, 杨万勤, 岳楷, 等. 温度对川西亚高山3种森林土壤氮矿化的影响[J]. *生态学报*, 2017, 37(12): 4045-4052.]
- [49] Lu Boquan, Zang Shuying, Sun Li. The effects of freezing-thawing process on soil active organic carbon and nitrogen mineralization in Daxing' an Mountains 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.]
- [50] Liu Mei, Ma Zhiliang. Effects of experimental warming on soil nitrogen transformation in alpine scrubland of eastern Qinghai-Tibet Plateau, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(6): 2045-2052. [刘美, 马志良. 模拟增温对青藏高原东部高寒灌丛土壤氮转化的影响[J]. *应用生态学报*, 2021, 32(6): 2045-2052.]
- [51] Zhou Wangming, Chen Hua, Zhou Li, et al. Effect of freezing-thawing on nitrogen mineralization in vegetation soils of four landscape zones of Changbai Mountain [J]. *Annals of Forest Science*, 2011, 68(5): 943-951.
- [52] Fierer N, Schimel J P, Holden P A. Variations in microbial community composition through two soil depth profiles [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2003, 35(1): 167-176.
- [53] Zhou Wangming, Qin Shengjin, Liu Jingshuang, et al. Effects of temperature and freeze-thaw on soil nitrogen mineralization in typical *Calamagrostis angustifolia* wetlands in Sanjiang Plain [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(4): 806-811. [周旺明, 秦胜金, 刘景双, 等. 沼泽湿地土壤氮矿化对温度变化及冻融的响应[J]. *农业环境科学学报*, 2011, 30(4): 806-811.]
- [54] Gao Decai, Zhang Lei, Liu Jun, et al. Responses of terrestrial nitrogen pools and dynamics to different patterns of freeze-thaw cycle: A meta-analysis [J]. *Global Change Biology*, 2018, 24(6): 2377-2389.
- [55] Wang Fei, Man Xiuling, Duan Beixing. Characteristics of soil nitrogen mineralization in the main forest types in cold temperate zone during the spring freezing-thawing period [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2020, 42(3): 14-23. [王飞, 满秀玲, 段北星. 春季冻融期寒温带主要森林类型土壤氮矿化特征[J]. *北京林业大学学报*, 2020, 42(3): 14-23.]
- [56] Ma Xiuyan, Jiang Lei, Song Yanyu, et al. Effects of temperature and moisture changes on functional gene abundance of soil nitrogen cycle in permafrost peatland [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(17): 6707-6717. [马秀艳, 蒋磊, 宋艳宇, 等. 温度和水分变化对冻土区泥炭地土壤氮循环功能基因丰度的影响[J]. *生态学报*, 2021, 41(17): 6707-6717.]
- [57] Jia Guojing, Zhou Yongbin, Dai Limin, et al. Effect of freezing-thawing on the carbon and nitrogen mineralization in Changbai Mountain [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2012, 21(4): 624-628. [贾国晶, 周永斌, 代力民, 等. 冻融对长白山森林土壤碳氮矿化的影响[J]. *生态环境学报*, 2012, 21(4): 624-628.]
- [58] Li Shengnan, Fan Zhiping, Li Fayun, et al. Responses of soil nitrogen transformation process to freezing-thawing cycle in a riparian zone under three different vegetation types [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2013, 32(6): 1391-1398. [李胜男, 范志平, 李法云, 等. 河岸带不同植被类型土壤氮素转化过程对冻融交替的响应[J]. *生态学杂志*, 2013, 32(6): 1391-1398.]
- [59] Xu Junjun. Effects of freezing and thawing alternation on soil nitrogen pool in the alpine meadow [D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2010. [徐俊俊. 冻融交替对高寒草甸土壤氮素的影响[D]. 雅安: 四川农业大学, 2010.]
- [60] Ren Yibin, Ren Nanqi, Li Zhiqiang. Effects of freeze-thaw cycles on soil microbial carbon, nitrogen and nitrogen conversion in Xiaoxing' anling boreal wetland of China [J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2013, 34(4): 530-535. [任伊滨,

- 任南琪, 李志强. 冻融对小兴安岭湿地土壤微生物碳、氮和氮转换的影响[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2013, 34(4): 530-535.]
- [61] Guo Dongnan, Zang Shuying, Zhao Guangying, et al. Effect of freeze-thaw action on dissolved organic carbon and nitrogen mineralization of wetland soil in Xiaoxing'an Mountains [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015, 29(5): 260-265. [郭冬楠, 臧淑英, 赵光影, 等. 冻融作用对小兴安岭湿地土壤溶解性有机碳和氮素矿化的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(5): 260-265.]
- [62] Amador J A, Görres J H, Savin M C. Role of soil water content in the carbon and nitrogen dynamics of *Lumbricus terrestris* L. burrow soil[J]. Applied Soil Ecology, 2005, 28(1): 15-22.
- [63] Davidson E A, Janssens I A, Luo Yiqi. On the variability of respiration in terrestrial ecosystems: moving beyond Q_{10} [J]. Global Change Biology, 2006, 12(2): 154-164.
- [64] Ma Xiaofei, Chu Xinzhen, Ma Qian. Soil enzyme activity and microbial biomass of *Haloxylon ammodendron* community under freeze-thaw action[J]. Arid Land Geography, 2015, 38(6): 1190-1201. [马晓飞, 楚新正, 马倩. 艾比湖地区冻融作用对梭梭群落土壤酶活性及微生物数量的影响[J]. 干旱区地理, 2015, 38(6): 1190-1201.]
- [65] Ma Junjie, Li Ren, Liu Hongchao, et al. A review on the development of study on hydrothermal characteristics of active layer in permafrost areas in Qinghai-Tibet Plateau [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020, 42(1): 195-204. [马俊杰, 李韧, 刘宏超, 等. 青藏高原多年冻土区活动层水热特性研究进展[J]. 冰川冻土, 2020, 42(1): 195-204.]
- [66] Martin J F, Reddy K R. Interaction and spatial distribution of wetland nitrogen processes [J]. Ecological Modelling, 1997, 105(1): 1-21.
- [67] Freppaz M, Williams B L, Edwards A C, et al. Simulating soil freeze/thaw cycles typical of winter alpine conditions: implications for N and P availability [J]. Applied Soil Ecology, 2007, 35(1): 247-255.
- [68] Zhang Wei, Zhang Xudong, He Hongbo, et al. Research advances in soil nitrogen transformation as related to drying/wetting cycles [J]. Chinese Journal of Ecology, 2010, 29(4): 783-789. [张威, 张旭东, 何红波, 等. 干湿交替条件下土壤氮素转化及其影响研究进展[J]. 生态学杂志, 2010, 29(4): 783-789.]
- [69] Jin Fengxin, Lü Wenbo, Zhang Yunhui. Discussion on the dependence of wetland and frozen soil in Daxinganling area [J]. Protection Forest Science and Technology, 2007(6): 69-71. [金凤新, 吕文博, 张芸慧. 试论大兴安岭地区湿地与冻土的依存关系[J]. 防护林科技, 2007(6): 69-71.]

Response of inorganic nitrogen dynamics to autumn freeze-thaw in permafrost peatlands of the Greater Hinggan Mountains

JIAO Yaqing^{1,2}, SONG Liquan^{1,2}, ZANG Shuying^{1,2}, SUN Chaofeng^{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: Permafrost peatlands in the Greater Hinggan Mountains are one of the areas sensitive to global warming response. In the context of global warming and permafrost degradation, to investigate the spatial-temporal variations of inorganic nitrogen in permafrost peatlands during the autumn freeze-thaw, this study was conducted in situ field experiments from September to November 2019 in the three permafrost peatlands in the Greater Hinggan Mountains, and analyzed the spatial and temporal variations of inorganic nitrogen in the shallow and deep layers of permafrost peatlands during the prophase, metaphase and anaphase of the autumn freeze-thaw. A multiple linear regression model was established for the relationship between soil inorganic nitrogen content and soil hydrothermal factors. The results of the study showed that the ranges of soil ammonium nitrogen ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) concentration in the permafrost peatlands (*Calamagrostis angustifolia* peatland, XY), (*Larix gmelina-Sphagnum* peatland, XA), and (*Eriophorum vaginatum* peatland, BM) were $(1.00 \pm 0.00) \sim (20.60 \pm 0.20) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, and the ranges of nitrate nitrogen ($\text{NO}_3^-\text{-N}$) concentration were $(0.02 \pm 0.01) \sim (14.64 \pm 1.11) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. The inorganic nitrogen was dominated by soil $\text{NH}_4^+\text{-N}$, and inorganic nitrogen concentrations were significantly higher during the anaphase of the autumn freeze-thaw than that of the prophase. Although hydrothermal interactions did not significantly affect inorganic nitrogen during this freeze-thaw, the BM inorganic nitrogen concentrations in the shallow layers were most responsive to 10~20 cm water content throughout the freeze-thaw period ($R^2=0.344$, $P<0.01$), and the inorganic nitrogen concentrations in the shallow layers was only related to soil moisture and temperature in the shallow layers during the prophase, metaphase and anaphase of the autumn freeze-thaw. The study showed that the autumn freeze-thaw could affect the inorganic nitrogen dynamics in the permafrost peatlands, and that the variations of the soil moisture and temperature in the shallow layers affected the inorganic nitrogen concentrations. This study could complement the data on the effect of autumn freeze-thaw on soil inorganic nitrogen in permafrost peatlands in the Greater Hinggan Mountains and provide basic data for the study of greenhouse gas emissions in response to global warming.

Key words: permafrost peatlands; inorganic nitrogen; autumn freeze-thaw; temperature; moisture content; Greater Hinggan Mountains

(责任编辑: 吴晓东)

附表 1 3 种多年冻土泥炭地的土壤温度、含水量方差分析

Attached table 1 Variance analysis of soil temperature and soil moisture content in the three permafrost peatlands

时期	前期			中期			后期			整个时期			
泥炭地类型	XY×XA	XY×BM	XA×BM	XY×XA	XY×BM	XA×BM	XY×XA	XY×BM	XA×BM	XY×XA	XY×BM	XA×BM	
土温	0 cm	0.065	0.148	0.657	0.002**	0.018*	0.180	0.443	0.166	0.519	0.045*	0.061	0.892
	5 cm	0.823	0.449	0.330	0.336	0.648	0.607	0.619	0.357	0.665	0.846	0.948	0.796
	10 cm	0.139	0.011*	0.215	0.338	0.458	0.901	0.419	0.281	0.779	0.610	0.349	0.668
	15 cm	0.026*	0.001**	0.125	0.050*	0.043*	0.945	0.450	0.719	0.689	0.161	0.019*	0.323
	20 cm	0.012*	0.001**	0.090	0.159	0.032*	0.403	0.806	0.916	0.725	0.113	0.006**	0.225
	25 cm	0.007**	0.001**	0.108	0.068	0.021*	0.569	0.932	0.636	0.576	0.060	0.003**	0.227
	30 cm	0.001**	0.001**	0.249	0.035*	0.013*	0.636	0.950	0.664	0.620	0.024*	0.002**	0.359
	35 cm	0.001**	0.001**	0.268	0.027*	0.014*	0.771	0.947	0.712	0.663	0.015*	0.002**	0.422
	40 cm	0.001**	0.001**	0.259	0.259	0.060	0.410	0.951	0.581	0.623	0.016*	0.001**	0.338
	45 cm	0.001**	0.001**	0.252	0.222	0.067	0.504	0.809	0.435	0.588	0.010*	0.001**	0.318
50 cm	0.001**	0.001**	0.154	0.129	0.092	0.852	0.956	0.739	0.781	0.009**	0.001**	0.436	
含水量	0~10 cm	0.001**	0.001**	0.284	0.005**	0.001**	0.600	0.697	0.711	0.451	0.001**	0.001**	0.292
	10~20 cm	0.001**	0.001**	0.338	0.015*	0.021*	0.887	0.397	0.561	0.786	0.001**	0.001**	0.826
	20~30 cm	0.001**	0.001**	0.919	0.044*	0.077	0.775	0.141	0.142	0.995	0.001**	0.001**	0.941
	30~40 cm	0.001**	0.001**	0.634	0.025*	0.347	0.155	0.002**	0.010*	0.459	0.001**	0.001**	0.404
	40~50 cm	0.001**	0.001**	0.440	0.020*	0.110	0.393	0.050	0.089	0.769	0.001**	0.001**	0.393

注：XY：小叶章泥炭地，XA：兴安落叶松-泥炭藓泥炭地，BM：白毛羊胡子苔草泥炭地。*代表数据统计结果在P<0.05水平上差异显著，**代表数据统计结果在P<0.01水平上差异显著。表格中数据表示统计数据的P值。

附表 2 3 种多年冻土泥炭地不同土层深度的无机氮浓度差异性分析

Attached table 2 Difference analysis of inorganic nitrogen concentration in three permafrost peatlands at different soil depths

时期	前期			中期			后期			整个时期			
泥炭地类型	XY×XA	XY×BM	XA×BM	XY×XA	XY×BM	XA×BM	XY×XA	XY×BM	XA×BM	XY×XA	XY×BM	XA×BM	
浅层NH ₄ ⁺ -N	0~20 cm	0.887	0.973	0.914	0.732	0.900	0.828	0.809	0.572	0.422	0.671	0.917	0.597
深层NH ₄ ⁺ -N	20~50 cm	0.262	0.911	0.311	0.593	0.136	0.323	0.364	0.364	0.079	0.370	0.259	0.045*
整体NH ₄ ⁺ -N	0~50 cm	0.444	0.932	0.496	0.934	0.492	0.545	0.464	0.377	0.116	0.454	0.465	0.142
浅层NO ₃ ⁻ -N	0~20 cm	0.066	0.029*	0.679	0.052	0.041	0.905	0.418	0.404	0.980	0.018*	0.009*	0.777
深层NO ₃ ⁻ -N	20~50 cm	0.030*	0.011*	0.322	0.206	0.247	0.910	0.301	0.513	0.695	0.026*	0.034*	0.903
整体NO ₃ ⁻ -N	0~50 cm	0.030*	0.010*	0.616	0.133	0.158	0.920	0.340	0.462	0.821	0.010*	0.011*	0.981

注：XY：小叶章泥炭地，XA：兴安落叶松-泥炭藓泥炭地，BM：白毛羊胡子苔草泥炭地。*代表数据统计结果在P<0.05水平上差异显著。表格中数据表示统计数据的P值。

附表 3 整个秋季冻融时期冻土泥炭地的环境变量与无机氮浓度的相关分析

Attached table 3 Correlation analysis of environmental variables and inorganic nitrogen concentrations in permafrost peatlands throughout the autumn freeze-thaw period

泥炭地类型		XY	BM	BM	BM	XA
		无机氮	浅层NH ₄ ⁺ -N	深层NH ₄ ⁺ -N	整体NH ₄ ⁺ -N	浅层NO ₃ ⁻ -N
含水量	10~20 cm	/	0.580*(0.006)	/	0.614*(0.003)	-0.459*(0.036)
	20~30 cm	/	/	0.484*(0.026)	0.476*(0.029)	/

注：XY：小叶章泥炭地，XA：兴安落叶松-泥炭藓泥炭地，BM：白毛羊胡子苔草泥炭地。*代表数据统计结果在P<0.05水平上显著；表格中括号内数据表示统计数据的P值。此表中仅列出与土壤无机氮存在相关的P值。

附表4 秋季冻融前期冻土泥炭地的环境变量与无机氮浓度的相关分析

Attached table 4 Correlation analysis of environmental variables and inorganic nitrogen concentrations in permafrost peatlands during the prophase of autumn freeze-thaw

泥炭地类型	XY	XY	XA	XA	XA	BM	BM	BM	
	浅层NH ₄ ⁺ -N	整体NH ₄ ⁺ -N	浅层NH ₄ ⁺ -N	整体NH ₄ ⁺ -N	浅层NO ₃ ⁻ -N	深层NH ₄ ⁺ -N	整体NH ₄ ⁺ -N	整体NO ₃ ⁻ -N	
土温	0 cm	0.767*(0.044)	0.849*(0.016)	0.403(0.371)	0.238(0.607)	-0.765*(0.045)	/	0.415(0.354)	-0.756*(0.049)
	5 cm	0.646(0.117)	0.538(0.213)	0.859*(0.013)	0.876*(0.010)	-0.488(0.267)	/	0.680(0.093)	-0.546(0.204)
	10 cm	0.687(0.088)	0.584(0.169)	0.810*(0.027)	0.750(0.052)	-0.082(0.861)	/	0.771*(0.042)	-0.170(0.715)
	15 cm	0.495(0.259)	0.327(0.474)	0.779*(0.039)	0.799*(0.031)	-0.091(0.845)	/	0.586(0.167)	-0.149(0.750)
含水量	20~30 cm	/	0.119(0.799)	/	-0.272(0.555)	/	0.653(0.112)	0.736(0.059)	-0.788*(0.035)
	40~50 cm	/	0.506(0.247)	/	-0.147(0.753)	/	0.775*(0.041)	0.652(0.112)	-0.705(0.077)

注: XY: 小叶章泥炭地, XA: 兴安落叶松-泥炭藓泥炭地, BM: 白毛羊胡子苔草泥炭地。*代表数据统计结果在P<0.05水平上显著; 表格中括号内数据表示统计数据的P值。此表中仅列出与土壤无机氮存在相关的P值。

附表5 秋季冻融中期冻土泥炭地的环境变量与无机氮浓度的相关分析

Attached table 5 Correlation analysis of environmental variables and inorganic nitrogen concentrations in permafrost peatlands during the metaphase of autumn freeze-thaw

泥炭地类型	XY	XA	XA	BM	BM	BM	BM	
	整体NO ₃ ⁻ -N	浅层NO ₃ ⁻ -N	整体NO ₃ ⁻ -N	浅层NH ₄ ⁺ -N	深层NH ₄ ⁺ -N	整体NH ₄ ⁺ -N	整体NO ₃ ⁻ -N	
土温	0 cm	-0.842*(0.018)	-0.274(0.552)	-0.042(0.929)	-0.026(0.957)	/	-0.060(0.899)	-0.437(0.327)
	5 cm	-0.145(0.757)	-0.749(0.053)	-0.895*(0.006)	-0.656(0.110)	/	-0.706(0.076)	-0.424(0.343)
	10 cm	0.277(0.548)	-0.419(0.349)	-0.757*(0.049)	-0.744(0.055)	/	-0.779*(0.039)	-0.470(0.287)
	15 cm	-0.057(0.903)	-0.452(0.309)	-0.547(0.203)	-0.837*(0.019)	/	-0.884*(0.008)	-0.403(0.371)
	20 cm	0.059(0.900)	-0.419(0.349)	-0.352(0.439)	-0.685(0.089)	-0.761*(0.047)	-0.732(0.061)	-0.579(0.173)
	30 cm	0.424(0.344)	/	-0.410(0.361)	/	-0.756*(0.049)	-0.718(0.069)	-0.558(0.193)
	35 cm	0.348(0.444)	/	-0.361(0.426)	/	-0.777*(0.040)	-0.746(0.054)	-0.552(0.199)
	45 cm	0.283(0.539)	/	-0.434(0.331)	/	-0.810*(0.027)	-0.759*(0.048)	-0.321(0.483)
	50 cm	0.274(0.552)	/	-0.322(0.481)	/	-0.888*(0.008)	-0.855*(0.014)	-0.512(0.240)
	含水量	0~10 cm	-0.511(0.241)	-0.814*(0.026)	-0.674(0.097)	0.486(0.268)	/	0.455(0.305)
10~20 cm		-0.441(0.322)	-0.668(0.101)	-0.705(0.077)	0.745(0.055)	/	0.770*(0.043)	0.046(0.922)

注: XY: 小叶章泥炭地, XA: 兴安落叶松-泥炭藓泥炭地, BM: 白毛羊胡子苔草泥炭地。*代表数据统计结果在P<0.05水平上显著; 表格中括号内数据表示统计数据的P值。此表中仅列出与土壤无机氮存在相关的P值。

附表6 秋季冻融后期冻土泥炭地的环境变量与无机氮浓度的相关分析

Attached table 6 Correlation analysis of environmental variables and inorganic nitrogen concentrations in permafrost peatlands during the anaphase of autumn freeze-thaw

泥炭地类型	XY	XY	XY	XY	XY	XA	BM
	浅层NH ₄ ⁺ -N	整体NH ₄ ⁺ -N	浅层NO ₃ ⁻ -N	深层NO ₃ ⁻ -N	整体NO ₃ ⁻ -N	无机氮	无机氮
土温	5 cm	0.668(0.101)	0.803*(0.030)	0.086(0.855)	/	0.088(0.851)	
	10 cm	0.795*(0.033)	0.862*(0.013)	0.257(0.578)	/	0.256(0.580)	
	15 cm	0.825*(0.022)	0.699(0.081)	0.811*(0.027)	/	0.822*(0.023)	
	25 cm	/	0.156(0.738)	/	0.800*(0.031)	0.815*(0.026)	
	30 cm	/	0.154(0.742)	/	0.808*(0.028)	0.821*(0.024)	/
	35 cm	/	0.125(0.790)	/	0.795*(0.033)	0.809*(0.028)	
	40 cm	/	0.137(0.770)	/	0.769*(0.043)	0.780*(0.039)	
	45 cm	/	0.179(0.701)	/	0.784*(0.037)	0.794*(0.033)	
含水量	30~40 cm	/	0.370(0.414)	/	0.812*(0.026)	0.803*(0.030)	

注: XY: 小叶章泥炭地, XA: 兴安落叶松-泥炭藓泥炭地, BM: 白毛羊胡子苔草泥炭地。*代表数据统计结果在P<0.05水平上显著; 表格中括号内数据表示统计数据的P值。此表中仅列出与土壤无机氮存在相关的P值。