

冻融对温带森林土壤碳、氮矿化作用的影响

赵媛^{1,2} 周旺明^{1*} 王守乐^{1,2} 周莉¹ 于大炮¹ 代力民¹

(¹中国科学院森林生态与管理重点实验室(沈阳应用生态研究所), 沈阳 110016; ²中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要 秋末春初, 中高纬度和高海拔地区普遍存在冻融现象。随着全球气候变暖, 冻融对土壤碳/氮循环过程的影响日益受到重视。本研究以长白山地区典型阔叶红松林(*Pinus koraiensis*)、白桦林(*Betula platyphylla*)和长白山落叶松林(*Larix olgensis*)土壤为研究对象, 采用室内模拟控制试验, 研究低含水量(40%)和高含水量(过饱和)条件下, 冻融循环(-10~10℃)对不同林型土壤碳/氮矿化作用的影响。结果表明, 在不同含水量条件下(低含水量条件下的阔叶红松林土壤除外), 冻融处理均显著降低土壤有机碳矿化速率, 且土壤碳矿化速率随冻融次数的增加而显著降低。冻融与土壤水分对氮矿化存在交互影响; 在低含水量条件下, 冻融促进土壤氮矿化作用; 但在高含水量条件下, 该影响不一致。本研究表明, 秋末和春初的冻融循环对长白山地区森林土壤碳、氮矿化过程有重要影响, 且其影响程度很大程度上取决于冻融频率和土壤含水量。

关键词 冻融循环; 土壤水分; 碳/氮矿化; 温带森林; 长白山

Effects of freezing-thawing on soil carbon and nitrogen mineralization in temperate forest ecosystems. ZHAO Yuan^{1,2}, ZHOU Wang-ming^{1*}, WANG Shou-le^{1,2}, ZHOU Li¹, YU Da-pao¹, DAI Li-min¹ (¹Key Laboratory of Forest Ecology and Management, Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; ²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China).

Abstract: In mid-high northern latitude and high altitude regions, a phenomenon of soil freezing-thawing cycles generally occurs in the late autumn and early spring. With the global warming, effects of such freezing-thawing cycles on the processes of soil carbon (C) and nitrogen (N) cycling are attracting more attention. In the present study, we collected soil samples from different types of forest in Changbai Mountain, including *Pinus koraiensis*, *Betula platyphylla* and *Larix olgensis*. We carried out a laboratory incubation experiment to investigate how freezing-thawing cycles (-10 to 10 °C) affect soil C and N mineralization at low soil water content (40%) and high water content (supersaturation). The results show that freezing-thawing cycles significantly restricted C mineralization rate under different water conditions (except for the *P. koraiensis* soil at low soil water content). Such restriction was more pronounced with increase in the frequency of freezing-thawing cycles. Freezing-thawing cycles interacted with soil water content to affect soil N mineralization; they increased N mineralization rate at the low water content, whereas such influence was different at the high soil water content. These results indicate that freezing-thawing cycles in the late autumn and early spring significantly drove soil C and N mineralization in Changbai Mountain, the extent of which depended on freezing-thawing frequency and soil water content.

Key words: freezing-thawing cycle; soil water content; carbon and nitrogen mineralization; temperate forest; Changbai Mountain.

中国科学院沈阳生态所特色研究所项目(Y5YZX151YD)和中国科学院重点部署项目(KFZD-SW-305)资助。

收稿日期: 2016-10-28 接受日期: 2017-03-06

* 通讯作者 E-mail: zhouwangming@126.com

冻融是指温度在 0℃ 上下波动而产生冻结和融化的一种物理作用和现象(王娇月等, 2011), 常发生在中高纬度和高海拔地区非生长季(常宗强等, 2014; 王丽芹等, 2015)。冻融循环改变土壤理化性质(娄鑫等, 2016; 张海欧等, 2016), 影响微生物活性(王连峰等, 2007), 从而影响土壤养分循环过程(Freppaz *et al.*, 2007)。冻融会使土壤水分由土水势高的下部向土水势低的上部移动, 增加冻结层土壤含水量(景国臣等, 2008), 且土壤水分经历多次“液相-固相-液相”之间的转变, 导致土壤空隙中冰晶膨胀, 打破了土壤颗粒之间的联结, 使土壤团聚体遭到破碎化, 促进了土壤中可溶性有机碳和可溶性有机氮的释放(罗亚晨等, 2014; 殷睿等, 2014; 陈哲等, 2016)。而可溶性有机碳与土壤中有机碳的迁移、固持及 CO₂ 释放有关, 可溶性有机氮是土壤中无机氮的重要来源(周旺明等, 2008)。此外, 冻融常导致土壤微生物活性降低甚至死亡。由于微生物是土壤中生态过程的主要驱动者, 微生物活性降低和死亡将直接影响土壤碳氮等元素的转化与循环过程(王连峰等, 2007); 但死亡微生物细胞内物质释放, 又可增加土壤中碳氮磷等养分含量(刘金玲等, 2012; Qian *et al.*, 2013), 增强残余微生物的活性(Nielsen *et al.*, 2001; 郝瑞军等, 2007)。土壤冻融过程还会干扰细根正常生长, 改变土壤中营养物质可利用性与植物吸收在时间上的一致性, 影响土壤中有机质转化与循环速率(王娇月等, 2011), 进而导致生态系统的养分循环和生态系统生产力发生改变(Fitzhugh *et al.*, 2001)。土壤碳氮矿化是森林生态系统养分循环的关键过程之一(贾国晶等, 2012), 也是生态系统碳氮循环的重要组成部分, 对生态系统稳定具有重要作用。研究冻融对土壤碳氮矿化的影响, 揭示冻融循环条件下, 土壤 C、N 元素转化与养分循环机制, 对深入理解非生长季节土壤生态过程具有重要意义。

长白山地区是我国东北阔叶红松林典型分布区, 秋末春初季节存在土壤冻融现象。但由于秋季降水较少, 土壤含水量一般较低; 而在春季由于地表积雪融化和土壤存在冻土层, 导致表层土壤含水量常常达到过饱和状态, 与秋季较低土壤含水量形成明显差异。本研究以阔叶红松林、白桦林和长白落叶松林土壤为研究对象, 利用室内培养试验将回答以下两个问题: (1) 冻融过程对温带森林土壤碳/氮矿化作用的影响如何? (2) 不同含水量条件下, 冻

融过程对土壤碳/氮矿化作用的影响是否不同?

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区概况

露水河林业局(42°24'N—42°49'N, 127°29'E—128°02'E) 位于长白山西北麓的吉林省抚松县境内, 总经营面积 12×10⁴ hm², 森林覆盖率 95.4%, 海拔 450~1400 m, 总坡向为西北向。区域气候属于受季风影响的温带大陆性气候, 年平均温度 2.9℃, 年平均降水量 700 mm 左右, 土壤类型为暗棕壤。地带性植被为阔叶红松林(*Pinus koraiensis*), 主要森林群落类型除阔叶红松林外, 还有皆伐后形成的次生白桦林(*Betula platyphylla*) 和人工种植的长白落叶松林(*Larix olgensis*)。

1.2 样品采集

2015 年 10 月分别于阔叶红松林、白桦林和长白落叶松林地选取 3 块 10 m×10 m 样方, 在每块样地多点采集 0~15 cm 土壤后混合均匀。新鲜土壤剔除石块和其他杂质后, 一部分过 4 mm 孔径筛保存用来做培养试验, 一部分风干后测量理化性质。

1.3 室内培养与测试方法

根据长白山地区秋末和春初土壤含水量及差异, 试验设置 4 个处理, 分别模拟秋季低含水量(40%) 和春季高含水量(淹水过饱和) 条件下, 冻融过程对土壤碳/氮矿化作用的影响, 其试验处理分别为: NFLW(低含水量+不冻融处理)、NFHW(淹水过饱和+不冻融处理)、FLW(低含水量+冻融处理) 和 FHW(淹水过饱和+冻融处理), 每个处理 3 个重复。此外, 根据 2014 年 9 月—2015 年 5 月长白山地区气候数据资料(图 1), 该地区秋末与春初季节平均冻

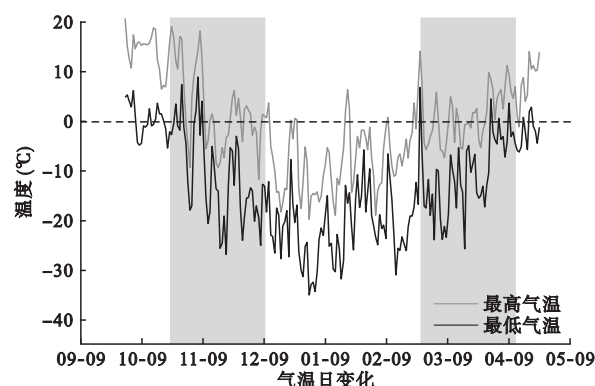


图 1 研究区最高与最低气温日变化

Fig.1 Daily variation in maximum temperature and minimum temperature in research region

表1 研究样地 0~15 cm 土壤一般理化性质

Table 1 General property of the 0~15 cm soils from the studied forest sites

森林类型	TC (%)	TN (%)	TP (%)	MBC (g·kg ⁻¹)	MBN (g·kg ⁻¹)	pH 值	C/N
阔叶红松林	6.93±0.04b	0.62±0.01b	0.012±0.01a	435.05±11.28b	53.88±1.02a	5.74±0.07a	11.23±0.16a
白桦林	6.53±0.01c	0.63±0.01b	0.013±0.00a	418.56±17.30b	63.72±3.72a	5.64±0.10a	10.48±0.15b
长白落叶松林	7.89±0.03a	0.77±0.01a	0.017±0.04a	535.06±3.93a	75.67±5.12a	5.72±0.08a	10.28±0.03b

同列不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。

结温度与融化温度分别为-10 和 10 °C, 存在冻融过程的天数约为 35 d。因此, 将冻融处理设置为先将样品置于-10 °C 的冰柜中冻结 12 h 后, 再在 10 °C 恒温培养箱中融化 12 h, 此为一个冻融循环周期。

土壤有机碳矿化采用室内培养碱液吸收法。称取过筛后的新鲜土壤 50 g 于培养瓶中, 一部分土壤样品调节含水量为 40%, 另一部分土壤样品调节含水量为淹水过饱和, 瓶内置一个盛有 10 mL 0.05 mol·L⁻¹ NaOH 溶液的塑料杯, 用于吸收土壤呼吸释放的 CO₂ 气体。瓶口先用保鲜膜包裹, 盖上瓶盖, 再用凡士林密封。分别在培养第 1、3、5、7、11、15、22、28 和 36 天取出塑料杯并将碱液全部转移至 150 mL 三角瓶中, 先加入 2 mL 1 mol·L⁻¹ BaCl₂ 溶液产生白色沉淀, 再加入一滴酚酞指示剂, 然后用 0.1 mol·L⁻¹ HCl 滴定至红色消失, 最后根据土壤呼吸释放的 CO₂ 量计算培养时期内土壤的有机碳矿化量。在进行碳矿化试验的同时, 称取 50 g 新鲜土壤, 置于 150 mL 塑料杯中, 一部分土壤样品调节含水量为 40%, 另一部分土壤样品调节含水量为淹水过饱和, 用保鲜膜封住杯口, 并用针在保鲜膜上扎 5~10 个小孔, 保持塑料杯内外空气流通, 定期称重保持土壤水分恒定。培养 35 d 取出土壤, 用 2 mol·L⁻¹ KCl 溶液浸提过滤后, 分析浸提液中 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 含量(周才平等, 2001)。

1.4 数据处理

本研究所得数据采用 Microsoft Excel 2007 进行处理和计算; 再使用 R 3.2.3 软件进行三因素方差分析(ANOVA)和组间比较(Tukey HSD), 最后用 Origin 8.5 软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 冻融对土壤碳矿化的影响

2.1.1 冻融对土壤碳矿化速率的影响 不同处理土壤 CO₂ 释放速率不同, 整个培养期间内, 土壤 CO₂ 释放速率随时间逐渐降低(图 2)。经过 36 d 培养后, 阔叶红松林、白桦林和长白落叶松林土壤有机碳

矿化速率分别降低了 57.57%~84.87%、64.99%~84.45% 和 33.60%~62.54%。3 种林型除阔叶红松林土壤低含水量冻融处理(FLW) CO₂ 释放速率高于非冻融处理(NFLW)外, 均表现为冻融处理土壤 CO₂ 释放速率显著低于非冻融处理($P<0.05$)。说明从长期来看, 冻融会显著降低土壤 CO₂ 释放。此外, 在冻融条件下, 3 种林型土壤有机碳矿化速率均表现为高含水量条件下冻融处理显著低于低含水量处理($P<0.05$), 说明在高含水量条件下, 冻融对土

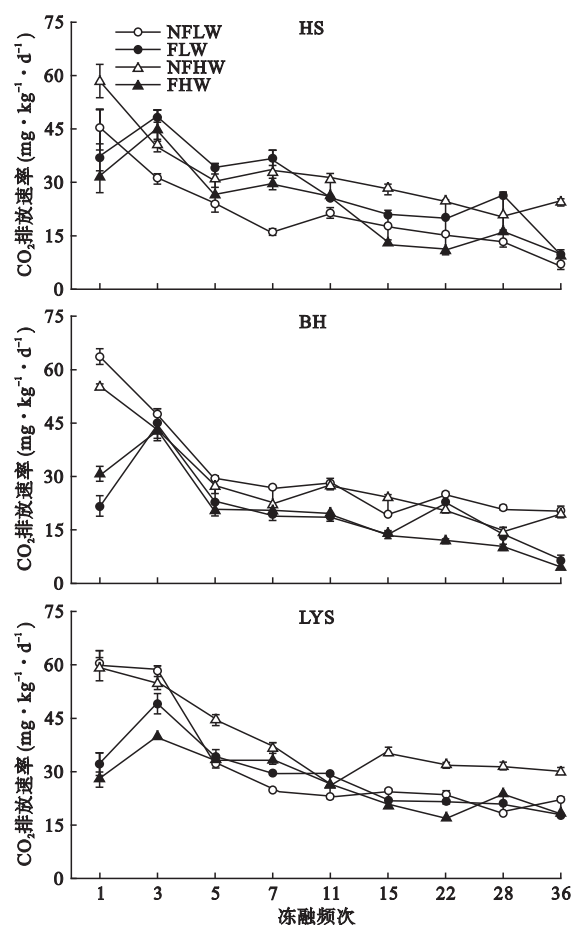


图2 不同土壤有机碳矿化速率

Fig.2 Carbon mineralization rate of different soils during incubation

HS, 阔叶红松林; BH, 白桦林; LYS, 长白落叶松林; 平均值±标准差。NFLW, 低含水量+不冻融处理; NFHW, 淹水过饱和+不冻融处理; FLW, 低含水量+冻融处理; FHW, 淹水过饱和+冻融处理。下同。

表2 冻融处理、土壤含水量和冻融频次对土壤碳矿化速率影响的方差分析结果

Table 2 ANOVA results of the effect of temperature, soil water content and freezing-thawing frequency on soil carbon mineralization rate

变异来源	阔叶红松林	白桦林	长白落叶松林
冻融处理	**	***	***
土壤含水量	***	***	***
冻融频次	***	***	***
冻融处理×土壤含水量	***	***	***
冻融处理×冻融频次	***	***	***
土壤含水量×冻融频次	***	***	***
冻融处理×土壤含水量×冻融频次	***	***	***

* $P<0.05$, ** $P<0.01$, *** $P<0.001$ 。下同。

壤碳矿化过程抑制作用更明显。方差分析表明,冻融、土壤含水量以及冻融频次对土壤碳矿化速率影响显著(表2)。

2.1.2 冻融对土壤碳累积矿化量的影响

阔叶红松林、白桦林和长白落叶松林土壤碳累积矿化量分别达到 589.39~998.90、511.69~922.00 和 829.96~1223.41 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图3)。除阔叶红松林低含水量冻融处理(FLW)碳矿化量高于非冻融处理(NFLW)外,冻融处理土壤碳矿化量显著低于非冻融处理($P<0.001$),且高含水量冻融处理土壤碳矿化量显著低于低含水量冻融处理($P<0.001$)。方差分析结果表明,冻融处理显著影响土壤有机碳累积矿化量,高含水量冻融循环显著降低土壤有机碳累积矿化量(表3)。

2.2 冻融对土壤氮矿化的影响

土壤无机氮含量以 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 为主,经过 35 d 培养后 3 种林型低含水量冻融处理土壤 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 含量显著高于非冻融处理($P<0.001$),阔叶红松林、白桦林和长白落叶松林低含水量冻融处理土壤无机氮含量分别是非冻融处理的1.86、1.19和1.14倍;培养

表3 冻融处理、土壤含水量和冻融频次对土壤碳累积矿化影响的方差分析结果

Table 3 ANOVA results of the effect of temperature, soil water content and freezing-thawing frequency on soil carbon cumulative mineralization

变异来源	阔叶红松林	白桦林	长白落叶松林
冻融处理	*	***	***
土壤含水量	***	***	***
冻融频次	***	***	***
冻融处理×土壤含水量	***	***	***
冻融处理×冻融频次	***	***	***
土壤含水量×冻融频次	***	***	***
冻融处理×土壤含水量×冻融频次	***	***	***

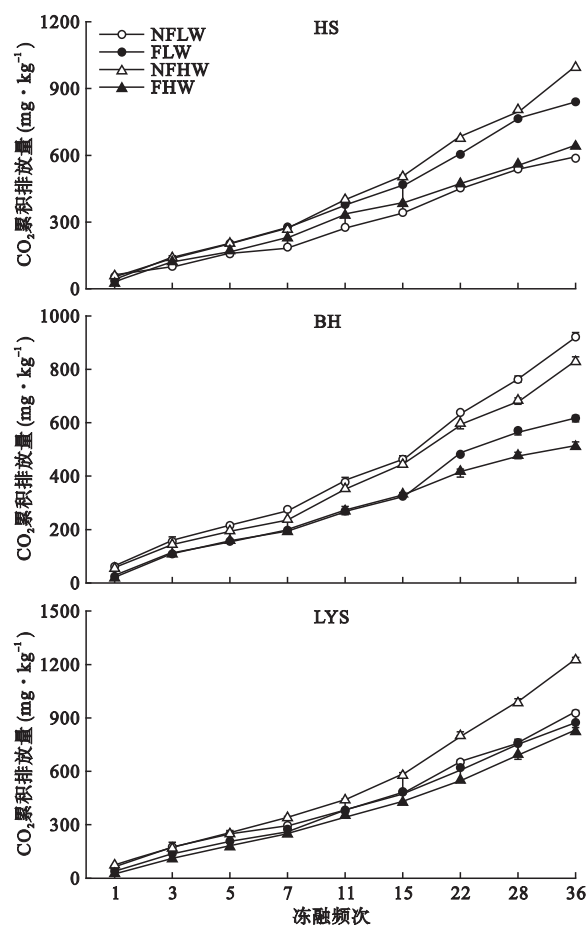


图3 不同土壤有机碳累积矿化量

Fig.3 Carbon cumulative mineralization of different soils during incubation

后土壤无机氮含量显著高于培养前,说明低含水量冻融处理显著促进土壤氮矿化作用(图4)。其中,阔叶红松林和白桦林高含水量冻融处理土壤 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 含量变化不显著,但长白落叶松林高含水量冻融处理土壤 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 含量显著增加($P<0.05$),导致长白落叶松林高含水量冻融处理土壤无机氮含量是非冻融处理的1.14倍。此外 3 种林型土壤无机氮含量均表现为高含水量冻融处理显著低于低含水量冻融处理($P<0.05$)。方差分析表明,冻融循环条件下,高含水量显著抑制土壤有机氮矿化过程(表4)。

3 讨论

冻融过程改变土壤水热分布,进而影响土壤理化性质(王广帅等,2013)和土壤微生物活性(王娇月等,2011),而土壤微生物是土壤有机碳氮矿化作用的主要驱动者。多数研究表明,短期冻融对土壤 CO_2 释放有“激发效应”,但长期冻融抑制土壤有机碳矿化作用(贾国晶等,2012; Reinmann *et al.*, 2012)。

表4 冻融处理、土壤含水量和冻融频次对土壤氮矿化速率影响的方差分析结果

Table 4 ANOVA results of the effect of temperature, soil water content and freezing-thawing frequency on soil nitrogen mineralization

变异来源	阔叶红松林	白桦林	长白落叶松林
冻融处理	***	***	***
土壤含水量	***	***	***
冻融频次	***	***	***
冻融处理×土壤含水量	***	***	**
冻融处理×冻融频次	***	***	***
土壤含水量×冻融频次	***	***	***
冻融处理×土壤含水量×冻融频次	***	***	**

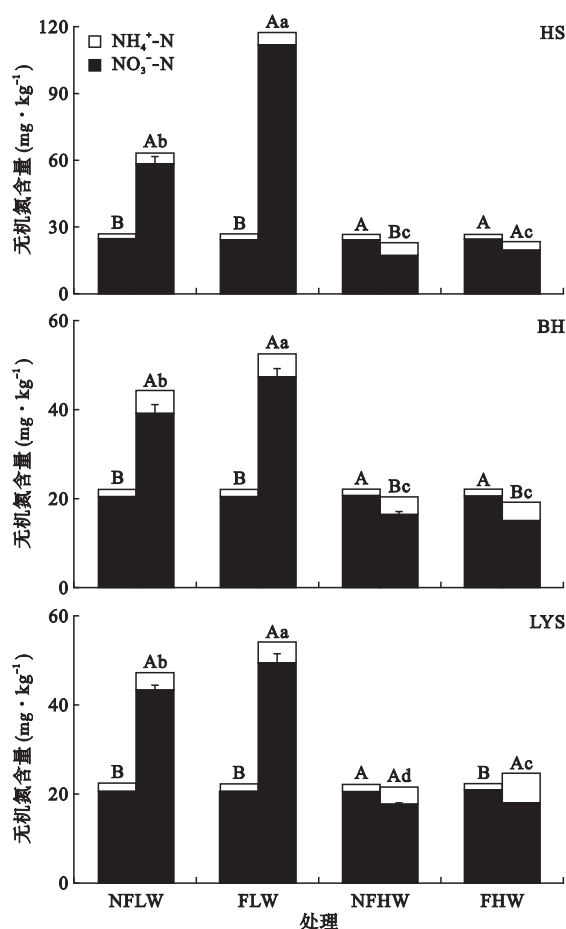


图4 不同处理培养前后土壤有机氮累积矿化量

Fig.4 Soil organic nitrogen cumulative mineralization of different treatments during incubation

2012), 却对土壤有机氮矿化多表现为促进作用 (Yang *et al.* 2016), 且深度冻结更有利于土壤氮矿化作用的进行 (Zhao *et al.* 2010)。

本研究中, 整个培养期内, 除阔叶红松林低含水量冻融处理 (FLW) 增加土壤 CO₂ 释放速率, 均表现为冻融处理土壤 CO₂ 释放速率显著低于非冻融处

理 ($P < 0.05$)。在培养初期, 冻融处理土壤 CO₂ 释放速率迅速降低 (图 2), 主要是由于土壤微生物没有适应冻融循环, 大量微生物死亡 (Zhou *et al.* 2011)。但冻融处理第 3 次土壤 CO₂ 释放速率表现为增加, 其中阔叶红松林 FLW 和 FHW 处理土壤 CO₂ 释放速率比非冻融处理分别高 56.06% 和 11.36%。这是由于冻融循环后, 死亡微生物细胞内物质释放, 增加残余微生物可利用的底物, 使土壤微生物活性增强 (Sulkava *et al.* 2003; 罗亚晨等, 2014), 从而引起土壤 CO₂ 释放速率迅速增加。但从长期来看, 土壤 CO₂ 释放速率随冻融次数增加逐渐降低 (图 2)。主要是因为多次冻融循环使土壤微生物数量逐渐减少 (Elberling *et al.* 2003), 来自微生物呼吸释放的 CO₂ 随之减少。此外, 长期冻融土壤 CO₂ 释放除来自于微生物呼吸释放外, 还与土壤有机质分解有重要联系。冻融破坏土壤团聚体结构, 加速土壤有机质释放, 土壤有机质的分解损失不能通过死亡微生物的代谢来补充, 来自有机质分解产生的 CO₂ 也减少 (常宗强等, 2014)。因此, 长期冻融会抑制土壤碳矿化作用。此外, 与低含水量条件下冻融处理的土壤 CO₂ 释放速率相比, 高含水量条件下冻融处理的土壤 CO₂ 释放速率更低 (图 2), 是因为土壤淹水影响土壤微生物活性而降低土壤 CO₂ 释放速率, 且淹水易阻碍土壤 CO₂ 释放 (刘岳燕等, 2006; Reinmann *et al.* 2012)。

经过 35 d 培养结束后, 阔叶红松林、白桦林和长白落叶松林在低含水量条件下冻融处理后, 土壤无机氮含量分别提高了 3.41、1.36、1.44 倍 (图 4)。这主要是因为土壤经历冻融循环后, 土壤中微生物大量死亡, 死亡细胞一方面会释放大量无机氮, 另外一方面增加了土壤中可利用底物, 刺激残余微生物的活性, 也有利于促进融化阶段土壤氮矿化过程 (周旺明等, 2011; 常宗强等, 2014)。此外, 冻融过程会使土壤交替收缩膨胀, 破坏土壤的物理结构, 导致土壤晶格开放, 释放出固定的 NH₄⁺-N (Freppaz *et al.* 2007; 罗亚晨等, 2014); 且在土壤融化时土壤含水量增加, 引起不易被土壤颗粒吸附的 NO₃⁻-N 含量增加 (Freppaz *et al.* 2007; 常宗强等, 2014)。但高含水量冻融处理 (FHW) 土壤 NO₃⁻-N 含量与非冻融处理之间差异不显著, 且 3 种林型土壤硝态氮含量显著低于低含水量冻融 (FLW) 处理 (图 4, 表 4)。这是由于当土壤含水量高于某一值时, 土壤中氧气含量降低, 从而导致厌氧细菌如反硝化细菌的

作用加强,使土壤中的部分无机氮以气态形式散失(周才平等,2001; Koponen *et al.*, 2004)。此外,土壤淹水冻融可能抑制土壤微生物活性(刘岳燕等,2006; Reinmann *et al.*, 2012),增加微生物对土壤氮素的固持(蔡延江等,2013; 罗亚晨等,2014),不利于土壤氮的矿化过程。而且一些研究认为 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 不能导致微生物细胞破裂释放无机氮, $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 才可使土壤矿质氮含量增加(Deluca *et al.*, 1992; Hentsche *et al.*, 2008)。因为冻结温度越低,冻结速率越快,则冻融对土壤团聚体破坏程度越大,使团聚体释放更多的有机氮供微生物利用,增加土壤氮矿化的底物(Lehrsch *et al.*, 1991)。因此,冻结温度是影响冻融对土壤有机氮矿化过程的一个重要因素。在高含水量条件下,长白落叶松林土壤无机氮含量增加主要是由于 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量显著增加导致(图4),不同植被类型的土壤氮矿化作用对冻融的响应不同(李胜男等,2013),有关不同植被类型土壤对冻融循环响应的机制还有待于进一步深入研究。

4 结 论

冻融循环通过改变土壤水热状况和理化性质进而对土壤碳/氮元素转化与循环产生重要影响,进而影响森林生态系统养分循环与生产力。长白山地区秋末与春初常发生冻融循环现象,冻融循环对土壤碳氮矿化过程有重要影响,并与冻结温度、土壤起始含水量和冻融频次有关。从长期来看,冻融过程对土壤碳矿化表现为抑制作用;在高含水量条件下,冻融对土壤碳矿化抑制作用更显著。在低含水量条件下,冻融促进土壤氮矿化作用;但高含水量条件下,冻融对土壤氮矿化作用影响不一致。今后需要进一步研究不同林型土壤底物含量及微生物在碳、氮矿化过程中对冻融的响应机制。

参考文献

- 蔡延江,王小丹,丁维新,等. 2013. 冻融对土壤氮素转化和 N_2O 排放的影响研究进展. 土壤学报, 50(5): 1032-1042.
- 常宗强,马亚丽,刘 蔚,等. 2014. 土壤冻融过程对祁连山森林土壤碳氮的影响. 冰川冻土, 36(1): 200-206.
- 陈 哲,杨世琦,张晴雯,等. 2016. 冻融对土壤氮素损失及有效性的影响. 生态学报, 36(4): 1083-1094.
- 郝瑞军,李忠佩,车玉萍. 2007. 冻融交替对水稻土水溶性有机碳含量及有机碳矿化的影响. 土壤通报, 28(6): 1052-1057.
- 贾国晶,周永斌,代力民,等. 2012. 冻融对长白山森林土壤碳氮矿化的影响. 生态环境学报, 21(4): 628-624.
- 景国臣,任宪平,刘绪军,等. 2008. 东北黑土区冻融作用于土壤水分的关系. 中国水土保持科学, 6(5): 32-36.
- 李胜男,范志平,李法云,等. 2013. 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. 生态学杂志, 32(6): 1391-1398.
- 刘金玲,吴福忠,杨万勤,等. 2012. 季节性冻融期间川西亚高山/高山森林土壤净氮矿化特征. 应用生态学报, 23(3): 610-616.
- 刘岳燕,姚槐应,黄昌勇. 2006. 水分条件对水稻土微生物群落多样性及活性的影响. 土壤学报, 43(5): 828-834.
- 娄 鑫,谷 岩,张军辉,等. 2016. 冬季积雪与冻融对土壤团聚体稳定性的影响. 北京林业大学学报, 38(4): 63-70.
- 罗亚晨,吕瑜良,杨 浩,等. 2014. 冻融作用下寒温带针叶林土壤碳氮矿化过程研究. 生态环境学报, 23(11): 1769-1775.
- 王广帅,杨晓霞,任 飞,等. 2013. 青藏高原高寒草甸非生长季温室气体排放特征及其年度贡献. 生态学杂志, 32(8): 1994-2001.
- 王娇月,宋长春,王宪伟,等. 2011. 冻融作用对土壤有机碳库及微生物的影响研究进展. 冰川冻土, 33(2): 442-452.
- 王丽芹,齐玉春,董云社,等. 2015. 冻融作用对陆地生态系统循环关键过程的影响效应及其机制. 应用生态学报, 26(11): 3532-3544.
- 王连峰,蔡延江,解宏图. 2007. 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. 应用生态学报, 18(10): 2361-2366.
- 殷 睿,徐振锋,吴福忠,等. 2014. 川西高山森林林窗对季节性冻融期土壤氮动态的影响. 生态学杂志, 33(9): 2483-2489.
- 张海欧,韩霖昌,张 扬,等. 2016. 冻融交替对砒砂岩与沙复配土壤团粒结构的影响. 冰川冻土, 38(1): 186-191.
- 周才平,欧阳华. 2001. 温度和湿度对长白山两种林型下土壤氮矿化的影响. 应用生态学报, 12(4): 505-508.
- 周旺明,秦胜金,刘景双,等. 2011. 沼泽湿地土壤氮矿化对温度变化及冻融的响应. 农业环境科学学报, 30(4): 806-811.
- 周旺明,王金达,刘景双,等. 2008. 冻融对湿地土壤可溶性碳、氮和氮矿化的影响. 生态与农村环境学报, 24(3): 1-6.
- Deluca TH, Keeney DR, McCarty GW. 1992. Effect of freeze-thaw events on mineralization of soil nitrogen. *Biology and Fertility of Soils*, 14: 116-120.
- Elberlinga B, Brandt KK. 2003. Uncoupling of microbial CO_2 production and release in frozen soil and its implications for field studies of arctic C cycling. *Soil Biology & Biochemistry*, 35: 263-272.
- Fitzhugh RD, Driscoll CT, Groffman PM, *et al.* 2001. Effects of mild winter freezing on soil nitrogen and carbon dynamics in a northern hardwood forest. *Biogeochemistry*, 56: 191-

- 213.
- Freppaz M , Williams BL , Edwards AC , *et al.* 2007. Simulating soil freeze/thaw cycles typical of winter alpine conditions: Implications for N and P availability. *Applied Soil Ecology* , **35**: 247–255.
- Hentsche K , Borken W , Matzner E. 2008. Repeated freeze-thaw events affect leaching losses of nitrogen and dissolved organic matter in a forest soil. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* , **171**: 699–706.
- Koponen HT , Martikainen PJ. 2004. Soil water content and freezing temperature affect freeze-thaw related N₂O production in organic soil. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* , **69**: 213–219.
- Lehrsch GA , Sojka RE , Carter DL , *et al.* 1991. Freezing effects on aggregate stability affected by texture , mineralogy , and organic matter. *Soil Science Society of America Journal* , **55**: 1401–1406.
- Nielsen CB , Groffman PM , Hamburg SP , *et al.* 2001. Freezing effects on carbon and nitrogen cycling in northern hardwood forest soil. *Soil Science Society of America Journal* , **65**: 1723–1730.
- Qian D , Fan HM , Zhou LL , *et al.* 2013. Effects of freeze-thaw cycles on brown forest soil available phosphorus in North-eastern China. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* , **44**: 2361–2370.
- Reinmann AB , Templer PH , Campbell JL. 2012. Severe soil frost reduces losses of carbon and nitrogen from the forest floor during simulated snow melt: A laboratory experiment. *Soil Biology & Biochemistry* , **44**: 65–74.
- Sulkava P , Huhta V. 2003. Effects of hard frost and freeze-thaw cycles on decomposer communities and N mineralization in boreal forest soil. *Applied Soil Ecology* , **22**: 225–239.
- Yang ZP , Gao JX , Yang M , *et al.* 2016. Effects of freezing intensity on soil solution nitrogen and microbial biomass nitrogen in an alpine grassland ecosystem on the Tibetan Plateau , China. *Journal of Arid Land* , **8**: 749–759.
- Zhao HT , Zhang XL , Xu ST , *et al.* 2010. Effect of freezing on soil nitrogen mineralization under different plant communities in a semi-arid area during a non-growing season. *Applied Soil Ecology* , **45**: 187–192.
- Zhou WM , Chen H , Zhou L , *et al.* 2011. Effect of freezing-thawing on nitrogen mineralization in vegetation soils of four landscape zones. *Annals of Forest Science* , **68**: 943–951.
-
- 作者简介 赵 媛,女,1989年生,硕士,主要从事生态系统碳氮生物地球化学循环方面的研究。E-mail: zhaoyuan1016@163.com
- 责任编辑 魏中青
-