

春季解冻过程对2种温带森林土壤微生物量 碳氮和可溶性有机碳氮的影响

朱国君¹, 尹航², 吴明根¹, 傅民杰¹

(1. 延边大学农学院, 吉林 延吉 133002; 2. 长白山科学研究院, 吉林 安图 133613)

摘要: 为了研究春季土壤冻融过程对碳氮周转的影响, 以长白山地区2种森林土壤为研究对象, 利用原位培养连续取样法, 测定和分析了土壤微生物量碳(M_C)、氮(M_N)和可溶性有机碳(DOC)、氮(DON)在春季解冻期间的含量动态变化。结果表明: 土壤解冻过程中, 2种林型土壤微生物量碳、氮的时间变化动态不同, 且土壤微生物量碳、氮表现出明显的垂直空间异质性, 0—10 cm 土层土壤微生物量氮显著高于 10—20 cm 土层。除个别时期外, 0—10 cm 土层土壤微生物量碳亦显著高于 10—20 cm 土层土壤。解冻过程中, 2种林型 0—10 cm 土层土壤 DOC 含量时间变化动态基本一致, 而红松阔叶林 10—20 cm 土层土壤最大 DOC 释放量早于次生白桦林。2种林型 DOC 释放过程集中于解冻中后期。解冻期2种林型土壤 DON 时间变化动态表现一致, 最大土壤 DON 释放量出现在解冻中后期。解冻期2种林型土壤 DON 存在明显的垂直空间分布特征, 0—10 cm 土层土壤 DON 含量显著高于 10—20 cm 土层。

关键词: 森林土壤; 解冻期; DOC; DON; 微生物量碳; 微生物量氮

中图分类号: S714.2

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)01-0204-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2018.01.032

Effects of Spring Thawing Process on Soil Microbial Biomass Carbon and Nitrogen and Soluble Organic Carbon and Nitrogen in Two Temperate Forests

ZHU Guojun¹, YIN Hang², WU Minggen¹, FU Minjie¹

(1. Agricultural College, Yanbian University, Yanji, Jilin 133002;

2. Changbai Mountain Academy of Sciences, Antu, Jilin 133613)

Abstract: In order to study the effects of soil freezing and thawing process on carbon and nitrogen turnover in spring, the contents of microbial biomass carbon (M_C), microbial biomass nitrogen (M_N), soluble organic carbon (DOC) and nitrogen (DON) in two kinds of forest soil in Changbai Mountain area during spring thawing were measured and analyzed through continuous sampling in situ culture. The results showed that: during the soil thawing process, the temporal variations of M_C and M_N were different in the two types of soil, moreover the M_C and M_N showed obvious vertical spatial heterogeneity, and M_N content in 0—10 cm soil layer was significantly higher than that in 10—20 cm soil layer. Except for individual periods, M_C content in 0—10 cm soil layer was also significantly higher than that in 10—20 cm soil layer. During thawing process, the DOC content dynamics in 0—10 cm soil layers were basically the same in two types of soil, but the maximum DOC release in 10—20 cm soil layer presented earlier in Korean pine broad-leaved forest than that in Secondary birch forest. The DOC releases of the two forest types were both concentrated in the middle and late stages of thawing. During the thawing period, the temporal dynamic changes of DON in two forest types were consistent, and the maximum DON release occurred in the late stage of thawing. There were obvious vertical spatial distribution characteristics for DON content in two forest types during thawing period, and the content of DON in 0—10 cm soil layer was significantly higher than that in 10—20 cm layer.

Keywords: forest soil; thawing period; DOC; DON; microbial biomass carbon; microbial biomass nitrogen

土壤冻融作用是指土壤水分受到温度影响使其在凝固点上下变化导致土壤冻结、融化现象,主要发生于全球的高纬度及高海拔地区^[1-2]。冻融过程对土壤物理、化学和生物学过程产生深刻影响,直接影响了全球碳、氮和水的循环过程。可溶性有机碳和有机氮是土壤有机碳库和氮库的重要组成部分^[3]。尽管其占整个土壤有机碳和氮库的比例很小,但其微弱的变化将影响土壤碳和氮的转化过程^[4-6],以及与土壤对接的森林溪流、江河和湖泊的水体环境。土壤微生物是环境变化最为敏感的生命指标^[7],在土壤碳、氮循环及其对自然和人为干扰响应中具有十分重要的表征功能^[8]。同时,作为土壤有机质中最为活跃部分,土壤微生物担当了土壤内部养分供应机制的源与库的重要角色,是研究土壤能量流动与物质循环的重要内容。可溶性有机碳、氮与微生物的活性存在紧密的联系,它既是微生物新陈代谢的产物又是微生物可以利用的底物。可溶性有机碳、氮和微生物量碳、氮在土壤中的释放与积累过程必然会受到土壤冻融过程的影响。周旺明等^[9]对三江平原小叶章沼泽湿地研究发现随着冻融次数的增加,可溶性有机碳呈现先升高后降低的趋势。Grogan 等^[10]对亚极地石楠苔原研究也发现类似结论,并表明可溶性有机碳含量的增加与微生物量碳的降低有紧密的联系。Dorsch^[11]发现土壤微生物的 C/N 在冬季要高于其他季节,证实了冻融作用促进微生物量碳的积累。长白山区是全球温带生态系统的典型样带区,具有半年以上漫长冬季,秋冬与冬春季的冻融交替过程频繁,是研究冻融过程对土壤生态系统微生物量碳、氮和可溶性有机碳、氮转化影响的理想场所,在该地区的研究结果对研究北方地区冻融作用中碳氮周转具有重要的借鉴意义。本研究采用原位培养连续取样法测定了春季解冻期间长白山地区 2 种典型的森林土壤(红松阔叶林和次生白桦林),红松阔叶林和次生白桦林生长于相同的土壤环境但林型有差异性,红松阔叶林为针阔混交林而次生白桦林为纯阔叶林。本次研究在同一土壤环境下不同森林土壤对微生物量碳氮和可溶性有机碳氮含量的影响,旨在为长白山森林生态系统碳氮循环研究提供理论数据。

1 材料与方法

1.1 试验样地概况

试验地点位于中国吉林省长白山自然保护区内的红松阔叶林(*Korean pine forest broadleaf*)(128°05′35.47″ E,42°24′43.13″ N,海拔 761 m)和次生白桦林(*Secundaria saltus Betula*)(128°04′30.26″ E,42°25′16.22″ N,海拔 751 m)内。2 种林型均为天然林。长白山属于温带大陆性山地气候,冬季漫长寒冷。2 月平均气温(−18)~(−22)℃,7 月平均气温 15~25℃,冻融期达 7 个月。每年 10 月底至 11 月中旬和 3 月中旬至 5 月中旬存在多次冻融过程。

1.2 研究方法

2015 年 11 月 1 日,在上述选取的 2 种林型中,分别选取 3 块样地,每块样地长 50 m,宽 30 m。在每块样地中选取 2 个采样点,在每个采样点将 11 根内径 5 cm,长 20 cm 的 PVC 管打入土壤后带土取出。将所有管底用塑料袋封口,并按原土壤层次将所有 PVC 管填埋到原位,在土壤表面管口上铺上林地凋落物后进行原位培养。同时,另取部分土壤样品带回实验,风干过 2 mm 筛后,用于土壤基本性质测定。自 2016 年 3 月 27 日土壤冻结期开始,采用原状土原位培养连续取样法,每周从每个采样点取回 1 根培养管,将同一样地的 3 根培养管均分为上层(0—10 cm)和下层(10—20 cm),并将同一层次土壤混匀后用塑封袋装好低温带回实验室。挑出新鲜土样中的植物细根、残体与石块(小石粒)后,一部分土样存于−20℃冰箱用于土壤微生物量碳(Microbial biomass carbon, M_C)和微生物量氮(Microbial biomass nitrogen, M_N)测定,另外部分鲜土样直接用于 DOC 和 DON 测定。采样测定过程至 6 月 5 日土壤完全解冻后结束,包括春季完整的冻融循环过程及部分生长季。

土壤样品中的 M_C 和 M_N 采用新鲜土样氯仿熏蒸—0.5 mol/L K_2SO_4 溶液浸提法^[12],DOC 和 DON 均以新鲜土样 0.5 mol/L K_2SO_4 溶液浸提法。DON 和 M_N 采用连续流动分析仪(Seal Analytical)测定,DOC 和 M_C 采用水浴锅加热蒸干—重铬酸钾容量法^[13]测定。2 种林型土壤基本理化性质见表 1。

表 1 2 种森林土壤理化性质

林型	土层深度/cm	有机质/ (g·kg ⁻¹)	总氮/ (g·kg ⁻¹)	总磷/ (g·kg ⁻¹)	总钾/ (g·kg ⁻¹)	水解氮/ (mg·kg ⁻¹)	速效钾/ (mg·kg ⁻¹)	土壤容重/ (g·cm ⁻³)
次生白桦林	0—10	109.7±22.3	12.25±4.11	1.6±0.4	5.3±0.1	280.2±2.3	103.5±42.2	0.56±0.08
	10—20	52.5±6.4	6.51±1.28	0.9±0.1	5.1±0.7	237.0±32.2	39.8±7.9	1.03±0.03
红松阔叶林	0—10	111.5±26.8	7.36±2.96	1.0±0.2	5.5±0.9	302.9±38.9	90.0±39.0	0.65±0.08
	10—20	39.1±12.3	1.70±0.15	0.6±0.2	4.3±0.7	158.7±43.0	36.2±10.5	1.62±0.18

注:表中数据为平均值±标准误差。下同。

1.3 数据分析

文中数据处理与分析采用 SPSS 17.0 软件。林型内不同冻融阶段间的 DOC、DON、 M_N 、 M_C 差异显著性采用单因素方差分析法。森林类型间及同一类型土壤上、下层之间的 DOC、DON、 M_N 、 M_C 差异性采用成对 t-检验法。采用 Excel 2003 绘图。

2 结果与分析

2.1 冻融变化对森林土壤微生物量碳(M_C)的影响

2 种林型上层和下层土壤解冻期间各阶段土壤 M_C 含量变化具有明显的阶段性差异(图 1)。在上层土壤中,红松阔叶林在解冻期间呈现出“中间高,两头低”的特征,即解冻前期 M_C 含量低,解冻中期表现出 M_C 富集特征,在解冻后期 M_C 含量降低。解冻过程

中最大 M_C 出现于 4 月 17 日(1 056.0 mg/kg)。次生白桦林在解冻前期变化稳定,在解冻中期(4 月 24 日)出现峰值(2 069.1 mg/kg)随后降低,在解冻中后期 M_C 含量变化趋势稳定。

下层土壤中,红松阔叶林和次生白桦林均出现两次峰值,红松阔叶林在解冻前期(4 月 10 日)首次出现峰值(294.6 mg/kg),次生白桦林在解冻中前期(4 月 17 日)首次出现峰值(747.6 mg/kg)。在解冻中后期红松阔叶林(5 月 22 日)和次生白桦林(5 月 15 日)都出现第 2 次峰值,分别为(329.2 mg/kg)和(792.1 mg/kg)。2 种森林土壤随冻融时间的增加,土壤中 M_C 含量随土壤深度增加均表现为降低的趋势(图 1)。

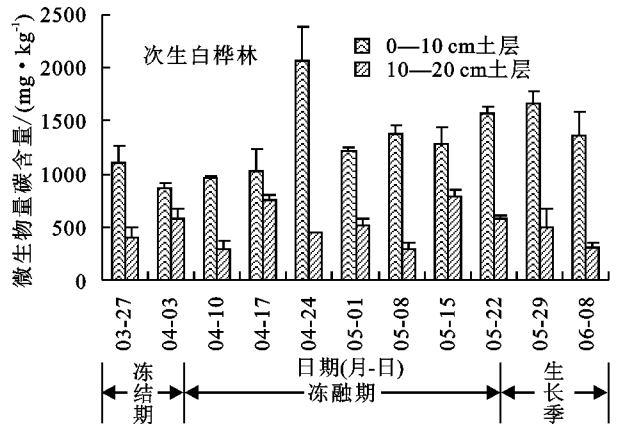
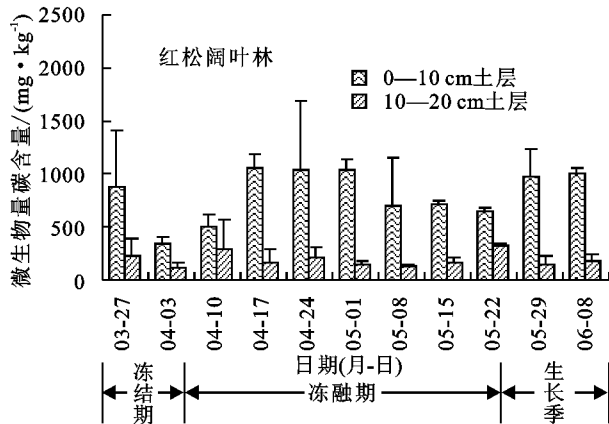


图 1 解冻期 2 种林型土壤微生物量碳变化

2.2 冻融变化对森林土壤微生物量氮(M_N)的影响

2 种林型土壤 M_N 在春季解冻过程中,变化动态表现各异(图 2)。其中,红松阔叶林的上层土壤(0—10 cm)在冻结期(3 月 27 日)、解冻中前期(4 月 24 日)和完全解冻后(6 月 5 日)表现出 3 次明显的 M_N 富集过程,且解冻过程中最大 M_N 出现于解冻中前期(303.2 mg/kg),而在解冻初期(4 月 3 日)和解冻末期(5 月 22 日)出现明显的氮释放特征;次生白桦林上层土壤在解冻中前期的 M_N 变化动态与红松阔叶林土壤基本一致,但解冻末期表现为 M_N 富集特征。

2 种林型上层土壤冻融过程各阶段 M_N 含量间差异显著($P < 0.05$)。下层(10—20 cm)各解冻阶段间 M_N 含量表现出显著差异($P < 0.05$)(图 2)。

此外,从上、下层土壤 M_N 分布来看,2 种林型下层 M_N 含量显著低于同期测定的上层土壤,且下层土壤 M_N 解冻期各阶段的变化动态也未表现出与上层土壤的同步性(图 2)。春季解冻期,红松阔叶林和次生白桦林上层土壤 M_N 分别为 95.1~303.2, 161.1~360.2 mg/kg;而下层土壤依次为 10.3~55.1, 43.8~137.7 mg/kg。

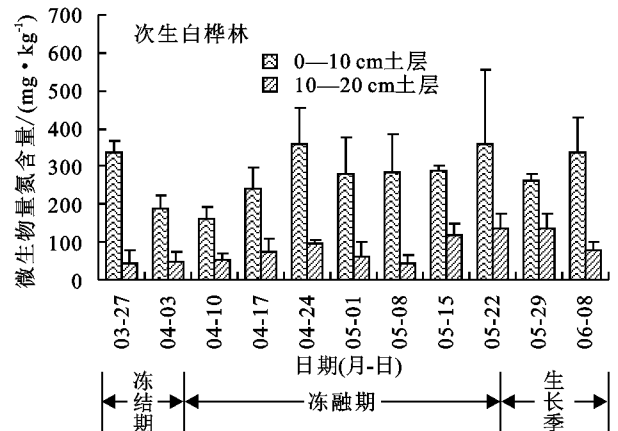
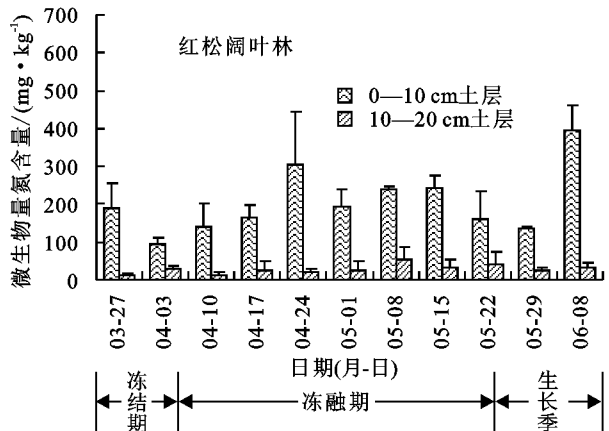
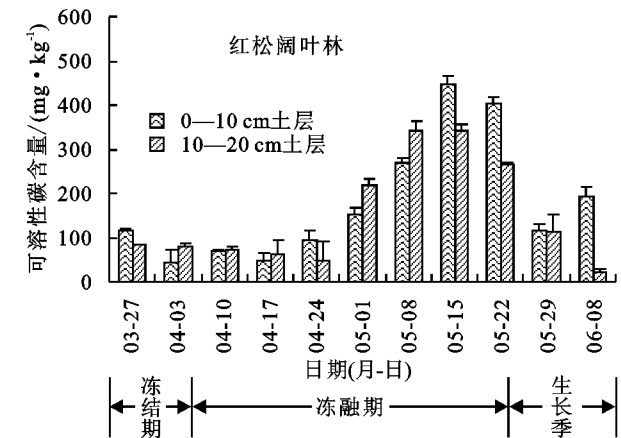


图 2 解冻期 2 种林型土壤微生物量氮变化

2.3 冻融变化对森林土壤可溶性有机碳(DOC)的影响

由图 3 可知,2 种林型上层土壤 DOC 在春季解冻过程中,变化动态表现出较好的一致性。在解冻中前期(4 月 3 日—24 日)红松阔叶林和次生白桦林 DOC 含量变化量较小。解冻中期(5 月 1 日)开始 2 种林型开始表现出明显的 DOC 释放。在解冻后期(5 月 15 日)红松阔叶林和次生白桦林都达到 DOC 释放峰值,分别为(446.5,533.8 mg/kg)。在整个解冻中后期(5 月 1—22 日)DOC 释放过程中,DOC 释放含量分别为 151.4~446.5 mg/kg(红松阔叶林)和 311.8~533.8 mg/kg(次生白桦林)。2 种林型下层



土壤 DOC 含量整体变化趋势同上层土壤大致相同,在解冻中前期释放量整体偏小,从 5 月 1 日开始 DOC 释放量显著增加(图 3)。

此外,在整个春季冻融过程中 2 种林型土壤的 DOC 含量在土壤层次间的分布表现不同,从垂直空间分布来看,红松阔叶林在解冻中前期多表现为下层土 DOC 含量显著高于上层土,在解冻末期(5 月 15—22 日)表现为上层土 DOC 含量显著高于下层土,次生白桦林在解冻中前期,上下层 DOC 含量相近,但解冻中后期,下层 DOC 含量显著高于上层(图 3)。

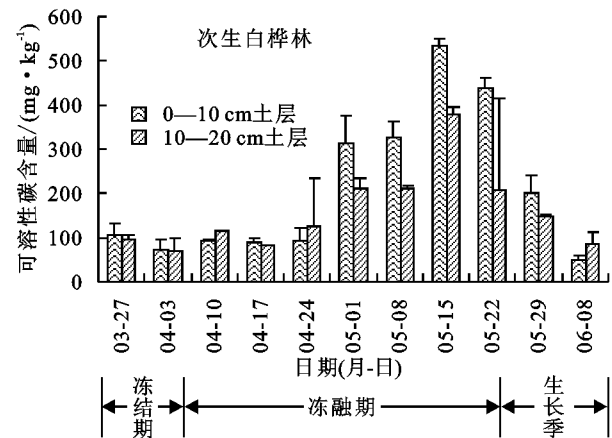


图 3 解冻期 2 种林型土壤可溶性有机碳变化

2.4 冻融变化对森林土壤可溶性有机氮(DON)的影响

由图 4 可知,2 种林型上层土壤解冻期间各阶段土壤 DON 含量变化表现出较好的一致性,均表现出 2 次 DON 释放特征。且 2 种林型 DON 释放的时期一致,即第 1 次释放发生于解冻初期(4 月 3 日),第 2 次释放出处于解冻进程的中后期(5 月 15 日),该次释放也是春季冻融期 2 种林型土壤最大的 DON 释放期,分别是第 1 次释放峰值的 6.6 倍(红松阔叶林)和 6.3 倍(次生白桦

林)。在解冻中后期(5 月 1—15 日)均表现出明显的 DON 释放,而解冻末期(5 月 22 日)明显减少。

2 种林型下层土壤 DON 含量变化规律同样表现出较好的一致性,峰值出现的时期与各林型相应的上层土壤相一致,第 2 次 DON 释放峰值分别是第 1 次释放峰值的 2.8 倍(红松阔叶林)和 3.5 倍(次生白桦林)。在解冻末期(5 月 22 日)表现出 DON 明显的吸收过程。2 种林型在整个解冻期都表现出明显的空间垂直性差异(图 4)。

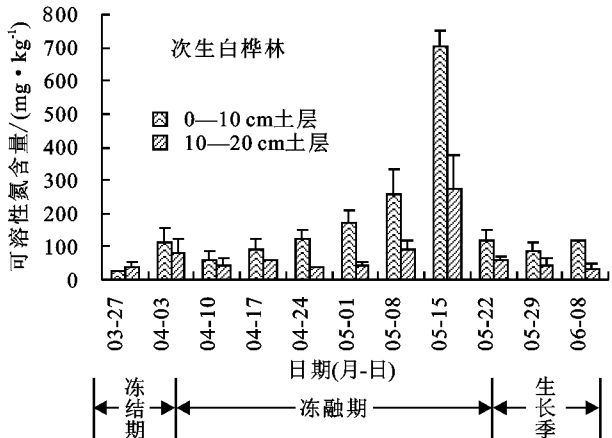
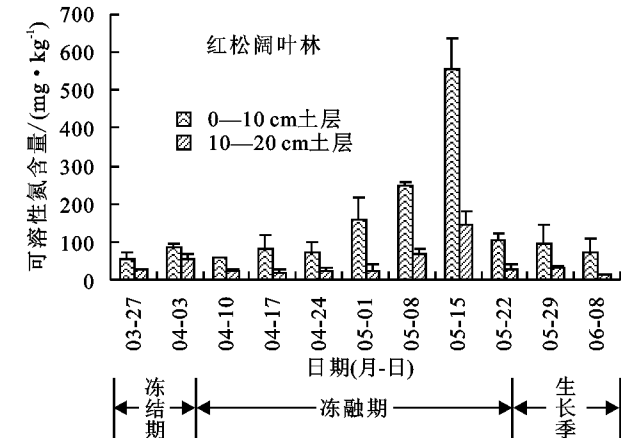


图 4 解冻期 2 种林型土壤可溶性有机氮变化

2.5 冻融变化对森林土壤有机碳和颗粒组分的影响

由图 5 和表 2 可知,在上层土壤中,在解冻初期,红松阔叶林有机碳含量持续上升,在解冻中后期(5

月 15 日)达到峰值。次生白桦林在解冻前中期有机碳含量上升,在解冻中期(5 月 1 日)含量降低,在 5 月 8 日达到峰值。2 种林型上层土壤粗颗粒比例在

解冻前期所占比重较高,在解冻中期所占比重下降,后期缓慢上升。细颗粒所占比重与粗颗粒所占比重变化相反,在解冻中期所占比重较高,其余时期较低。矿质所占比重在整个冻融期间变化量不大。

在下层土壤中,2 种林型有机碳变化规律各异,但峰值都出现在解冻后期(5 月 15 日)。2 种林型粗颗粒所占比重在解冻中前期较低,后期较高而细颗粒在中前期所占比重较高,后期所占比重较低,矿质整体变化不大。

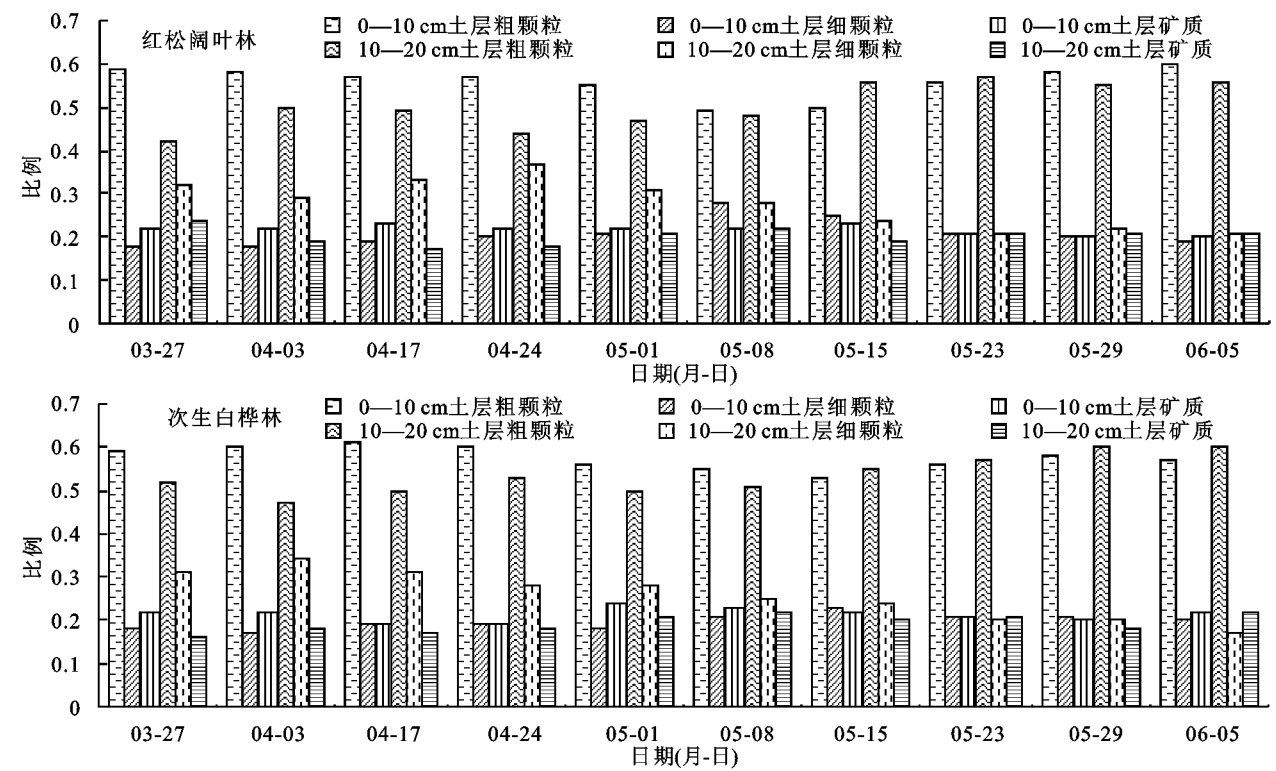


图 5 解冻期 2 种林型土壤颗粒组分比例变化

表 2 2 种林型土壤有机碳含量 单位:g/kg

林型	土层	取样时间(月-日)										
	深度/cm	03-27	04-03	04-10	04-17	04-24	05-01	05-08	05-15	05-22	05-29	06-05
红松阔叶林	0—10	74.2	69.0	70.9	73.7	77.3	76.0	88.0	91.7	67.5	56.3	76.6
	10—20	44.1	29.6	28.6	24.2	29.5	32.0	18.9	32.6	18.3	20.3	22.4
次生白桦林	0—10	79.0	84.8	90.8	96.8	94.7	65.0	103.0	96.0	47.5	62.4	98.1
	10—20	47.5	34.9	35.2	30.0	36.8	33.0	30.1	47.6	27.2	33.7	27.4

3 讨论

土壤中 M_C 和 M_N 受冻融强度、冻融循环次数、土壤含水量以及土壤本身属性等诸多因子影响^[14-15]。本研究发现,春季冻融循环过程对土壤 M_C 和 M_N 富集与释放过程有着明显的影响,但对不同森类型土壤的影响存在明显的差别。其中,2 种森林土壤 0—10 cm 层土壤微生物量氮显著高于 10—20 cm 层。除个别时期外,0—10 cm 层土壤微生物量碳亦显著高于 10—20 cm 层土壤。红松阔叶林与次生白桦林 2 种森林土壤在春季解冻的前中期阶段,土壤 M_N 和 M_C 含量变化趋势表现出较好的一致性,但解冻后期表现不同:红松阔叶林解冻末期土壤 M_C 和 M_N 下降,而次生白桦林则表现出上升特征。分析认为,在春季解冻的前期和中期,土壤解冻层较浅,表层土壤的水分无法下渗而富集,导致红松阔叶林和白桦林土壤中的空气含量和土壤温度的变化程度相近,多数相似的环境

因子及较深的有机质层厚度造成土壤微生物群系与活性趋于接近,因而形成相似的土壤 M_C 和 M_N 变化格局。而解冻后期,因土壤渗透能力不同,2 种林型土壤水分含量发生明显变化,进而导致土壤温度和土壤相比比例发生变化。其中,红松阔叶林土壤质地较黏重,含水量较高,土壤通气性较差,导致解冻后期在温度升高情况下微生物间竞争加剧,土壤微生物数量下降,而次生白桦林土壤条件与红松阔叶林相反,促进了土壤微生物的繁殖,土壤 M_C 和 M_N 始终保持较高甚至升高趋势。任伊滨等^[16]对小兴安岭湿地土壤春季解冻过程中微生物量碳、氮研究结果表明土壤中微生物量碳、氮含量因湿地类型不同而不同,与本研究结果相符。林允伟等^[17]对小兴安岭不同林型土壤春季解冻过程中微生物量氮的研究结果也表明,解冻期间,不同林型的土壤微生物量氮变化格局存在明显的差异,也与本研究结果相符。

冻融过程可改变土壤团聚体的大小和稳定性,冻

结时土壤孔隙中冰晶的膨胀打破颗粒之间的联结,破坏土壤团聚体,呈将大团聚体破碎成小团聚体的趋势。而土壤团聚体是决定土壤 DOC 和 DON 含量的重要因子,土壤团聚体稳定性的破坏有利于被土壤包裹吸附的小分子物质提前释放出来,因此会进一步增加土壤 DOC 和 DON 含量^[18]。本研究中,随着冻融次数的增加,在解冻中前期土壤粗颗粒含量下降细颗粒上升,在解冻中后期粗颗粒含量上升,DON 呈现出先增大再减小的趋势。在解冻后期红松阔叶林和次生白桦林上层土壤达到最大 DON 释放量,分别是解冻期初期的 6.6,6.3 倍。解冻末期 DON 含量开始下降,这一方面是因为微生物适应了冻融循环的过程,死亡微生物绝对量减少;另一方面与解冻末期土壤温度的日较差变小,微生物波动性减小有关。在解冻中期 DOC 含量较高,这可能与同时期土壤中冻融循环中有机碳含量较高有关。在解冻后期土壤中原有的 DOC 可被活着的微生物不断地利用分解,因此,其含量在多次冻融交替循环中会有下降的趋势^[19]。周旺明等^[9]在冻融对湿地土壤可溶性碳氮和氮矿化的影响也得到相似的结论。本研究中土壤 DOC 含量在多次冻融交替处理后在解冻末期呈下降趋势也与上述研究者结论相符。

4 结论

(1)春季冻融过程对2种温带森林 M_C 和 M_N 富集与释放过程影响不同,各个林型微生物量碳、氮在时间变化存在明显差异,次生白桦林 M_C 含量整体略高于红松阔叶林,红松阔叶林解冻末期土壤 M_C 和 M_N 下降,而次生白桦林则表现出上升特征。

(2)春季冻融期间2种温带森林土壤在 DOC 和 DON 含量时间变化特征表现出显著的规律性,DOC 和 DON 含量在2种森林土壤中均表现出先增加,后减少的趋势。

(3)春季过程影响着 DOC 和 DON 的释放与吸收,在解冻中后期 DOC 释放含量分别为 151.4~446.5 mg/kg(红松阔叶林)和 311.8~533.8 mg/kg(次生白桦林)。红松阔叶林与次生白桦林 DON 最大释放量分别是解冻初期第1次释放的 6.6,6.3 倍。

参考文献:

- [1] Yu X F, Zou Y C, Jiang M, et al. Response of soil constituents to freeze thaw cycles in wetland soil solution [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43(6): 1308-1320.
- [2] 秦赛赛,翟秋敏,杜睿,等.冻融对内蒙古温带贝加尔针茅草甸草原 N_2O 通量的影响[J]. *中国环境科学*, 2014, 34(9): 2334-2341.
- [3] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security [J]. *Science*, 2004, 304 (5677): 1623-1627.

- [4] Wang J K, Li C, Yu S, et al. The biodegradation of dissolved organic carbon and nitrogen in brown earth with different fertility levels [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(12): 6165-6171.
- [5] Kalbitz K, Solinger S, Park J H, et al. Controls on the dynamics of dissolved organic matter in soils: A review [J]. *Soil Science*, 2000, 165(4): 277-304.
- [6] Michalzik B, Kalbitz K, Park J H, et al. Fluxes and concentrations of dissolved organic carbon and nitrogen a synthesis for temperate forests [J]. *Biogeochemistry*, 2001, 52(2): 173-205.
- [7] Williams M A, Rice C W, Owensby C E. Carbon dynamics and microbial activity in tallgrass prairie exposed to elevated CO_2 for 8 years [J]. *Plant and Soil*, 2000, 227(1/2): 127-137.
- [8] 吴建国,艾丽,祁连山3种典型生态系统土壤微生物活性和生物量碳氮含量[J]. *植物生态学报*, 2008, 32(2): 465-476.
- [9] 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.
- [10] Grogan P, Michelsen A, Ambus P, et al. Freeze thaw regime effects on carbon and nitrogen dynamics in sub-arctic heath tundra mwsocosms [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, 36(4): 641-654.
- [11] Dorsch P. Overwinter greenhouse gas fluxes in two contrasting agricultural habitats [J]. *Nutrient Cycling in Agro Ecosystems*, 2004, 70(2): 117-133.
- [12] 张海燕,张旭东,李军,等.土壤微生物量测定方法概述[J]. *微生物学杂志*, 2005, 25(4): 95-98.
- [13] 王琳.凯氏法测定土壤全氮的方法改进[J]. *环境监控与预警*, 2013, 3(7): 33-37.
- [14] Yanai Y, Toyota K, Okazaki M. Effects of successive soil freeze thaw cycles on soil microbial biomass and organic matter decomposition potential of soils [J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2004, 50(6): 821-829.
- [15] 徐俊俊,吴彦,张新全,等.冻融交替对高寒草甸土壤微生物量氮和有机氮组分的影响[J]. *应用与环境生物学报*, 2011, 17(1): 57-62.
- [16] 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.
- [17] 林允伟,金光泽.冻融期去根处理对小兴安岭6种林型土壤微生物量的影响[J]. *生态学报*, 2016, 36(19): 6159-6169.
- [18] 李忠佩,张桃林.可溶性有机碳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.
- [19] 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.