

DOI: 10.5846/stxb201312303063

谭波, 吴庆贵, 吴福忠, 杨万勤. 川西亚高山-高山森林土壤养分动态及其对季节性冻融的响应. 生态学报, 2015, 35(15): 5175-5182.

Tan B, Wu Q G, Wu F Z, Yang W Q. Dynamics of soil nutrients and their response to seasonal freeze-thaw in the subalpine-alpine forests of western Sichuan. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(15): 5175-5182.

川西亚高山-高山森林土壤养分动态及其对季节性冻融的响应

谭 波¹, 吴庆贵^{1,2}, 吴福忠¹, 杨万勤^{1*}

1 四川农业大学, 生态林业研究所/林业生态工程省级重点实验室, 成都 611130

2 绵阳师范学院, 生态安全与保护四川省重点实验室, 绵阳 621000

摘要: 为深入了解川西亚高山-高山森林冬季生态学过程,于2008年11月—2009年10月,在土壤冻结初期、冻结期和融化期及植被生长季节,研究了不同海拔(3582 m、3298 m 和 3023 m)岷江冷杉林土壤养分动态及其对季节性冻融的响应。3个海拔森林土壤冬季具有较高养分含量,且随土壤冻融过程不断变化。土壤有机层可溶性碳和氮、铵态氮、硝态氮含量在冻结初期显著增加后快速降低,并随融化过程迅速增加后再次降低,而土壤可溶性碳和氮、硝态氮含量在冻结期变化不明显,铵态氮显著增加。矿质土壤层可溶性碳和氮、铵态氮含量也在冻结初期显著增加后降低,而土壤可溶性氮、铵态氮和硝态氮在冻结期显著增加,并在融化期经历一个明显的含量高峰。海拔和土层的交互作用显著影响土壤可溶性碳和硝态氮含量,土壤养分含量与土壤温度的相关性随海拔差异而不同。这表明季节性冻融期是土壤生态过程的重要时期,土壤冻融格局显著影响川西亚高山-高山森林土壤养分动态。

关键词: 亚高山-高山森林; 季节性冻融; 土壤养分; 冬季生态学

Dynamics of soil nutrients and their response to seasonal freeze-thaw in the subalpine-alpine forests of western Sichuan

TAN Bo¹, WU Qinggui^{1,2}, WU Fuzhong¹, YANG Wanqin^{1,*}

1 Key Laboratory of Ecological Forestry Engineering, Institute of Ecology & Forestry, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China

2 Ecological Security and Protection Key Laboratory of Sichuan Province, Mianyang Normal University, Mianyang 621000, China

Abstract: Soils in subalpine and alpine ecosystems during winter experience extensive snow cover, freezing, thawing, and freeze-thaw cycle with air temperatures fluctuating above and below 0 °C. Such conditions have profound repercussions on soil nutrient availability, microbial biomass, and enzyme activity in subalpine and alpine ecosystems during winter, yet systemic studies of these ecosystems are lacking. In order to deeply understand winter ecological processes in the subalpine and alpine forests of western Sichuan, three fir (*Abies faxoniana*) forests including primary fir forest at 3582 m altitude, fir and birch mixed forest at 3298 m altitude, and secondary fir forest at 3023 m altitude were chosen as study subjects. Soil was collected at different stages: at the onset of the soil freezing period, the soil frozen period, the soil thawing period, and the growing season from November 2008 to October 2009. Concentration of dissolved carbon and nitrogen, NH₄⁺-N, and NO₃⁻-N were measured in each soil sample. Compared to the growing season, the content of measured nutrients was relatively

基金项目: 国家自然科学基金项目(31170423, 31270498); 国家“十二五”科技支撑计划(2011BAC09B05); 四川省杰出青年学术与技术带头人培育项目(2012JQ0008, 2012JQ0059); 高等学校博士学科点(博导类)专项科研基金(20105103110002)项目

收稿日期: 2013-12-30; **网络出版日期:** 2014-09-25

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: seyangwq@163.com

high during winter in all sampled forests. Moreover, the dynamics of the measured soil nutrients changed with the processes of the soil freeze-thaw cycle. In the soil organic layer, the amount of dissolved carbon and nitrogen, $\text{NH}_4^+ \text{-N}$, and $\text{NO}_3^- \text{-N}$ significantly increased followed by a decrease in both the onset of the soil freezing period and the soil thawing period, whereas they showed little change in the soil frozen period, except for $\text{NH}_4^+ \text{-N}$. In the mineral soil layer, the content of the measured nutrients also significantly increased and then decreased with the onset of the soil freezing period. However, the content of the dissolved nitrogen, $\text{NH}_4^+ \text{-N}$, and $\text{NO}_3^- \text{-N}$ visibly increased in the soil frozen period, reaching a peak in the soil thawing period. Additionally, the interaction of the altitude and soil layer affected the amount of dissolved carbon and $\text{NO}_3^- \text{-N}$. Correlation between the concentration of soil nutrients and soil temperature varied with the altitude. The results suggested that the seasonal freeze-thaw period is a crucial stage for ecological processes in the soil, and the soil freeze-thaw pattern significantly affects the dynamics of soil nutrients in the subalpine and alpine forests of western Sichuan.

Key Words: subalpine/alpine forest; seasonal freeze-thaw; soil nutrients; winter ecology

季节性冻融是高海拔地区普遍存在的自然现象^[1]。由于土壤养分有效性和生物活性常常随土壤温度升高而增加,而低温、冻融和冻结环境限制着土壤养分矿化、凋落物分解、根系生长等过程,因此土壤养分有效性问题通常是制约高海拔地区森林生产力、群落演替、系统结构和功能稳定的重要限制因子^[1-2]。近期研究发现,土壤冻融循环导致的土壤团粒结构破碎、凋落物分解及细根和微生物死亡可促进土壤养分大量积累与释放^[3-4],这些有效基质可被植物和土壤生物直接利用或随雪融淋洗流失,对冬季土壤碳氮矿化、养分周转及生长季节植物生长具有重要意义^[5-6]。这种土壤养分积累和释放的机制是深入研究高海拔地区土壤养分循环过程的重要基础。虽然已有的研究已注意到季节性冻融对土壤生态过程的重要作用^[6-9],但迄今为止的研究更加关注生长季节土壤养分格局及其相关生态学过程。这极大地限制了对冬季土壤养分循环机制的理解,也不利于认识冬季与生长季节土壤养分过程的相互关系。

川西亚高山-高山森林是我国第二大林区的主体,在区域气候调节、水土保持、水源涵养和生物多样性保育方面具有举足轻重的地位^[2]。每年11月至次年4月伴随着气候的变化土壤表现出明显的季节性冻融过程^[8],且由于气温降低常常是沿海拔自上而下的,因而季节性冻融特征也随海拔垂直分异连续变化。这为研究中纬度高海拔森林冬季土壤生态过程及其对环境变化的响应提供了理想的天然实验室。然而,仅有较少的研究关注到川西亚高山-高山森林生长季节土壤养分变化,更没有注意非生长季节动态特征^[10]。因此,以川西亚高山-高山地区广泛分布的岷江冷杉林(*Abies faxoniana*)为研究对象,研究了海拔梯度上冬季不同冻融时期及生长季节土壤养分动态特征,以期深入认识中纬度高海拔森林冬季土壤生态过程,探讨冬季与生长季节土壤生态过程的相互联系提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

研究区域位于四川省理县毕棚沟(102°53'—102°57' E, 31°14'—31°19' N, 海拔2458—4619 m),地处青藏高原东缘与四川盆地的过渡带。年平均气温2—4 °C,最高气温(7月)23 °C,最低气温(1月)地-18 °C,年均降雨量约850 mm。土壤季节性冻结期为每年11月初至次年4月中旬,土壤冻结初期和融化期间具有明显的冻融循环^[8]。区域内主要森林植被随海拔分异为落叶阔叶林、针阔混交林、针叶林,高山灌丛和草甸^[11]。其中,岷江冷杉、川西云杉(*Picea likiangensis* var *balfouriana*)和红桦(*Betula albo-sinensis*)是研究区域最典型的森林植被^[20]和构成乔木层主要树种。林下灌木主要有箭竹(*Fargesia spathacea*)、高山杜鹃(*Rhododendron delavayi*)、三颗针(*Berberis julianae*)、红毛花楸(*Sorbus rufopilosa*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)和扁刺蔷薇(*Rosa sweginzowii*)等;草本主要有蟹甲草(*Cacalia auriculata*)、高山冷蕨(*Cystopteris montana*)、苔草属(*Carex* spp.)和莎草属(*Cyperus* spp.)等^[11]。

1.2 样地设置

研究区域内海拔跨度约 300 m 选取 3 个海拔森林群落作为研究样地。海拔 3582 m 乔木层以岷江冷杉为主,树龄约 120a,林下植物主要为高山杜鹃、三颗针、冷蕨等;海拔 3298 m 乔木层以岷江冷杉和红桦为主,树龄约 80a,林下植物主要为箭竹、红毛花楸、高山柳等;海拔 3023 m 乔木层以岷江冷杉次生林为主,树龄约 70a,林下植物主要为箭竹、三颗针、扁刺蔷薇等群落。森林群落土壤为雏形土(Cambisols),基本概况和理化性质详见谭波等的研究^[11]。

1.3 样品采集及测定

2008 年 11 月 1 日,分别在样地内土壤 5 cm 处理设钮扣式温度传感器(DS1923-F5#, Maxim/Dallas semiconductor Inc., USA)连续监测土壤温度,1 h 记录 1 次数据。3 个森林群落土壤温度及冻融循环特征见谭波等的研究^[11]。

于 2008 至 2009 年季节性冻融期间及 2009 年生长季节进行土壤样品采集。基于前期监测结果^[11],土壤冻结通常从 11 月中旬开始,到 12 月下旬完全冻结,到次年 3 月初开始融化。因此,具体的采样时间包括:土壤冻结初期(11 月 5 日、11 月 15 日和 11 月 25 日)、土壤冻结期(12 月 15 日、1 月 15 日和 2 月 15 日)、土壤融化期(3 月 5 日、3 月 25 日、4 月 5 日和 4 月 25 日)和生长季节(5 月 25 日、8 月 5 日和 10 月 25 日)。在样地内随机选取 5 个 5 m×5 m 的均质样方采样。由于地处高山峡谷区的川西亚高山-高山森林土壤发育经常受阻,且普遍存在较厚的土壤有机层和浅薄的矿质土壤层^[2]。因此,本研究按照土壤有机层(0—15 cm)和矿质土壤层(15—30 cm)采集样品。将样品装入冰盒低温处理,24h 内运回实验室,然后将每个样品分成 3 份:一份样品去掉石块、动植物残体和根系后,混匀,过 2 mm 筛,装入保鲜袋,贮于 4 ℃ 冰箱供土壤酶活性测定;一份样品风干,研磨,分别过 2 mm 和 0.25 mm 筛,装入保鲜袋,室温保存供土壤全量养分测定;其余样品则立即测定土壤含水量。

土壤铵态氮(NH_4^+ -N)用靛酚蓝比色法测定;硝态氮(NO_3^- -N)用酚二磺酸比色法测定^[12]。同时,采用 0.5 mol/L K_2SO_4 浸提土壤中可溶性碳(Dissolve carbon)和氮(Dissolve nitrogen)^[13]:称取 3 份 10g 土壤样品于 150mL 提取瓶中,加入 50ml 0.5 mol/L K_2SO_4 浸提液,振荡浸提 30min,用定量滤纸过滤,再用 0.45 μm 滤膜过滤,滤液采用总有机碳分析仪(TOC-VcPH+TNM-1, Shimazu Inc., Kyoto, Japan)测定。

1.4 统计分析

采用三因素方差分析(three-way ANOVA)和最小显著差异法(LSD)检验海拔、土层、冻融时期及各因子交互作用对土壤可溶性碳和氮、铵态氮、硝态氮的影响。采用 Pearson 相关系数评价 5cm 土壤温度与土壤养分特征的相关关系(土壤温度用样品采集前 5d 和后 5d 的平均值)。所有统计分析采用 SPSS13.0 完成,显著性水平设定为 $\alpha=0.05$ 。

2 结果

2.1 土壤可溶性碳含量

3 个海拔土壤有机层和矿质土壤层冬季可溶性碳含量表现出受冻结初期土壤冻融循环影响显著增加后快速降低,在冻结期变化不明显,在融化期迅速增加至融化后再次降低的趋势(图 1)。3 个海拔土壤有机层可溶性碳含量均在冻结初期(11 月 25 日)达冬季最高值,与生长旺盛季节(8 月 5 日)差异不显著。3582 m 矿质土壤层的可溶性碳含量在融化期(3 月 25 日)达冬季最高值,且显著高于生长季节,而 3298 m 和 3023 m 矿质土壤层的可溶性碳含量则在冻结初期(11 月 25 日)达冬季最高值,与生长季节含量相当。3 个海拔土壤有机层可溶性碳含量以冻结期最低(1 月 15 日),矿质土壤层以融化末期最低(4 月 25 日)。与 3298 m 和 3023 m 相比,冻结持续时间和冻融循环次数更高的 3582 m 土壤可溶性碳含量变化更加明显。

2.2 土壤可溶性氮含量

3 个海拔土壤有机层冬季可溶性氮含量表现出受冻结初期土壤冻融循环影响显著增加后快速降低,在冻

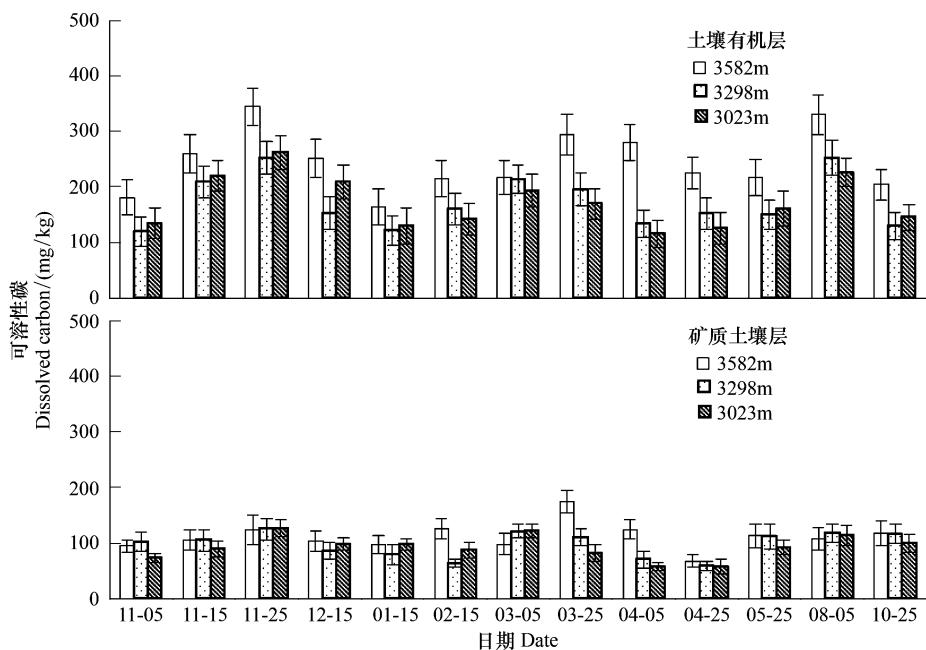


图1 不同海拔森林土壤可溶性碳动态变化

Fig.1 Dynamics of soil dissolve carbon in the forests at different altitudes from November 5, 2008 to October 25, 2009

结期变化不明显,随后在土壤融化期迅速增加至完全融化后再次降低的变化,而各海拔矿质土壤层冬季可溶性氮含量也受冻结初期土壤冻融循环影响显著增加后快速降低,此后在冻结期显著增加,至融化期(3月25日)达峰值后迅速降低(图2)。3个海拔土壤有机层可溶性氮含量在冻结初期(11月15日)达冬季最高值,3582 m 可溶性氮含量与生长旺盛季节(8月5日)差异不显著,3298 m 和 3023 m 显著高于生长季节且达全年含量最高值,而各海拔矿质土壤层可溶性氮含量在融化期(3月25日)达全年最高值,显著高于与生长旺盛季节(8月5日)。

2.3 土壤铵态氮

3个海拔土壤有机层和矿质土壤层冬季铵态氮含量表现出受冻结初期土壤冻融循环影响显著增加后快速降低,并在冻结期再次显著增加后迅速降低(图3)。土壤有机层铵态氮含量在土壤融化初期(3月5日)显著增加至冬季含量最高值,显著高于生长季节,此后随土壤融化过程显著降低。而矿质土壤层铵态氮含量则在土壤融化初期(3月5日)降至全年含量最低值,此后,随土壤融化过程在土壤融化中期(3月25日)显著增加后快速降低。相对于低海拔的3298 m 和 3023 m,冻结持续时间和冻融循环次数更高的3582 m 土壤铵态氮含量变化更加明显。

2.4 土壤硝态氮

3个海拔土壤有机层冬季硝态氮含量表现出受冻结初期土壤冻融循环影响显著增加后快速降低,在冻结期变化不明显,在土壤融化期迅速增加至融化后再次降低的趋势(图4)。3582、3298 m 和 3023 m 土壤有机层硝态氮含量分别在融化期的3月25日、4月5日和3月5日达冬季最高值,显著高于与生长旺盛季节(8月5日)。而从冻结初期至冻结期(12月15日),3582 m 和 3298 m 矿质土壤层冬季硝态氮含量显著降低,3023 m 变化不显著,随土壤冻结持续,3个海拔矿质土壤层的硝态氮含量显著增加,并在融化期迅速降低。3个海拔矿质土壤层冻结初期和冻结期的硝态氮含量显著高于生长旺盛季节。

2.5 土壤养分与环境因素关系

海拔、土层和冻融时期变化显著影响了3个海拔森林土壤养分含量(表1)。海拔和土层的交互作用显著影响了土壤可溶性碳和硝态氮含量,但对土壤可溶性氮和铵态氮含量不显著。海拔、土层和冻融时期的交互作用对土壤可溶性氮含量影响不显著,但三者的共同作用显著影响了土壤铵态氮含量。同时,土壤温度与

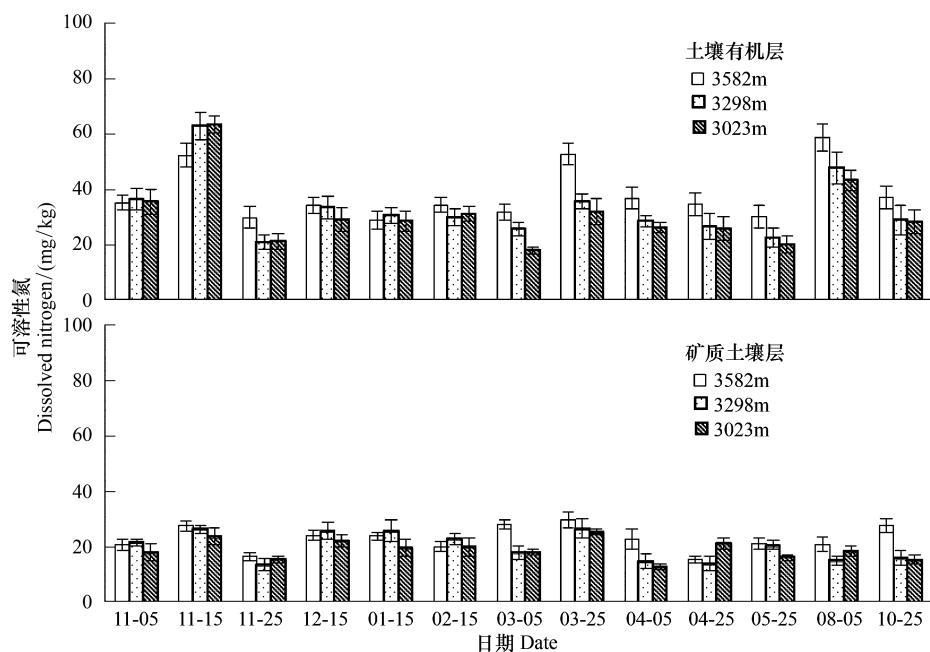


图2 不同海拔森林土壤可溶性氮动态变化

Fig.2 Dynamics of soil dissolve nitrogen in the forests at different altitudes from November 5, 2008 to October 25, 2009

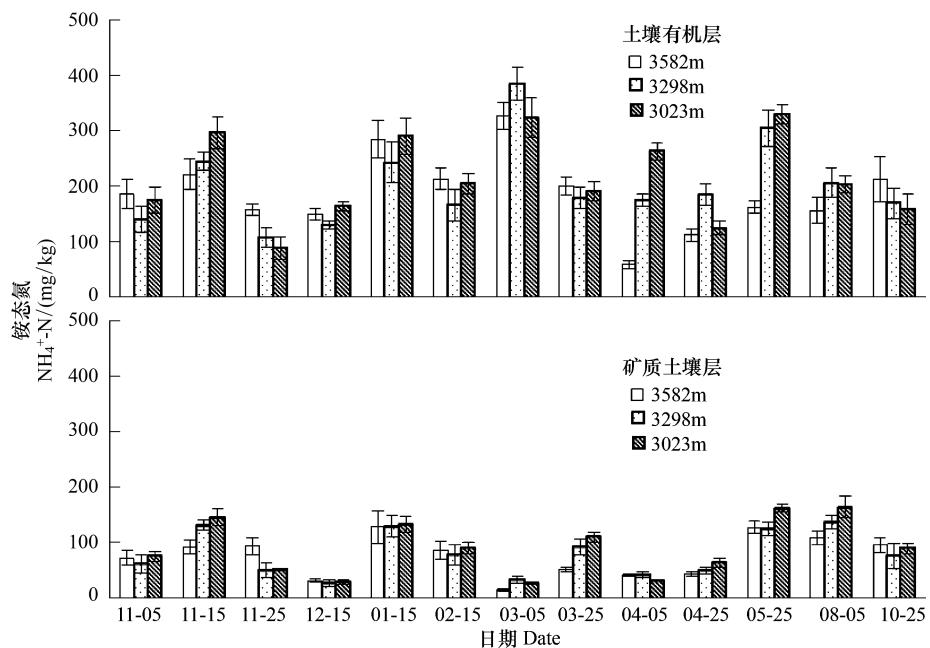


图3 不同海拔森林土壤铵态氮动态变化

Fig.3 Dynamics of soil $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ in the forests at different altitudes from November 5, 2008 to October 25, 2009

3582 m 土壤可溶性碳和氮含量相关显著,与 3298 m 和 3023 m 土壤铵态氮含量相关极显著(表 2)。

3 讨论

季节性冻融的冻结初期和融化期是亚高山-高山生态系统季节转换的过渡时期和凋落物量的高峰期。土壤冻融交替作用可导致土壤团粒结构破碎、凋落物分解以及细根和微生物死亡,对冬季土壤养分循环具有重要意义^[3, 14-15]。本研究中,川西亚高山-高山森林群落土壤在冬季维持着较高的养分含量,其动态随土壤冻融

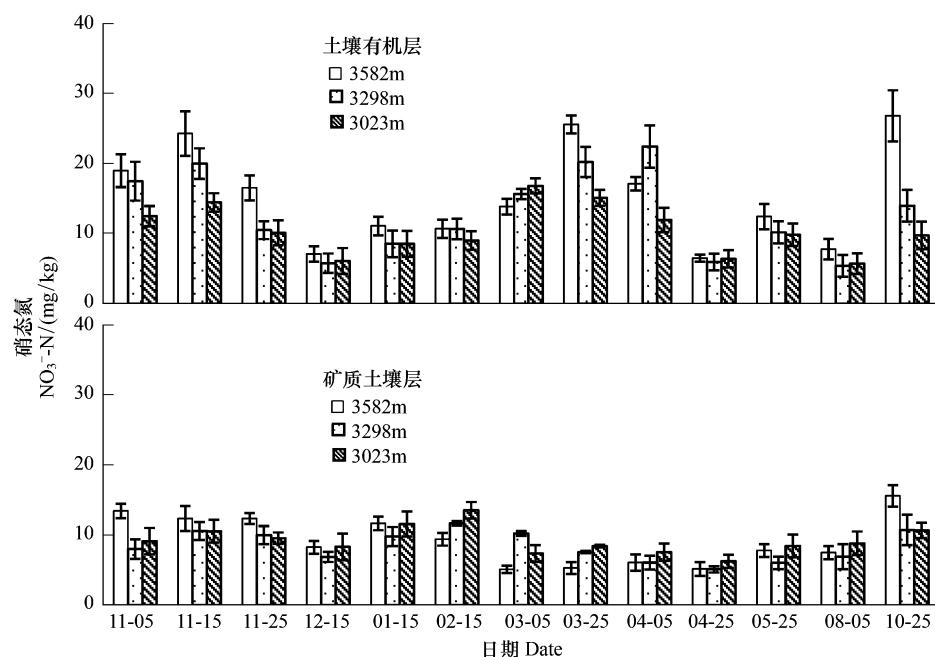


图4 不同海拔森林土壤铵态氮动态变化

Fig.4 Dynamics of soil NO_3^- -N in the forests at different altitudes from November 5, 2008 to October 25, 2009

过程不断变化,在土壤冻结初期(或融化期)出现一个明显的含量高峰,显著高于生长旺盛季节(或与之相当)。然而,由于3个森林群落组成、海拔梯度、有机层厚度等环境条件差异,各海拔森林土壤冻融持续时间和冻融循环显著不同,土壤养分动态也随之表现出明显差异。这表明季节性冻融期是土壤生态过程动态变化的重要时期,土壤冻融格局显著影响了冬季土壤养分特征。

表1 海拔、土层和冻融时期对土壤养分影响的三因素方差分析

Table 1 Three-way ANOVA for soil nutrients to altitude, soil layer, and freeze-thaw stage

因子 Factor	可溶性碳 Dissolved carbon	可溶性氮 Dissolved nitrogen	铵态氮 NH_4^+ -N	硝态氮 NO_3^- -N
A	<0.001	0.893	<0.001	<0.001
L	<0.001	0.004	<0.001	<0.001
FS	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
A×L	<0.001	0.911	0.156	<0.001
A×FS	<0.001	0.626	<0.001	<0.001
L×FS	<0.001	0.710	<0.001	<0.001
A×L×FS	0.622	0.996	0.009	0.727

A: 海拔 Altitude; L: 土层 Soil layer; FS: 冻融时期 Freeze-thaw stage

表2 土壤酶活性与土壤温度的相关系数

Table 2 Correlation coefficients between soil nutrients and soil temperature

海拔/m Altitude	因子 Factor	可溶性碳 Dissolved carbon	可溶性氮 Dissolved nitrogen	铵态氮 NH_4^+ -N	硝态氮 NO_3^- -N
3582	土壤温度 Soil temperature	0.108 *	0.123 *	0.101 ns	0.084 ns
3298	土壤温度 Soil temperature	0.083 ns	-0.118 ns	0.373 **	-0.019 ns
3023	土壤温度 Soil temperature	-0.008 ns	-0.012 ns	0.288 **	-0.078 ns

ns: $P>0.05$; * $P<0.05$; ** $P<0.01$

土壤可溶性有机质(DOM)是土壤物质循环中易分解的碳源和养分资源,对环境变化(如温度、湿度)响应敏感^[16]。季节性冻融可通过增加土壤团聚体结构的物理破坏和可溶性有机质的分解矿化影响土壤生态系统

可溶性有机质库的变化^[17]。本研究中,3个海拔森林土壤可溶性碳和氮含量在土壤冻结初期和融化期间均显著变化,释放出大量的有效养分资源,并随冻融格局变化而变化(图1和图2)。这主要是因为:一方面,冻结初期新鲜凋落物大量归还到土壤表面,新鲜凋落物养分的快速释放以及冻融循环对土壤和细根破坏作用导致了冻结初期土壤可溶性碳和氮的显著增加^[8, 15]。而这些释放的可溶性养分增加了底物有效性^[5],为土壤中的低温嗜冷微生物提供有效基质,促进了土壤生物生长和有机物质矿化,因而土壤可溶性碳和氮增加后又显著降低。另一方面,随着土壤融化,冻结期积累的大量养分释放和冻融交替破坏作用进一步提高了土壤中有效资源^[13]。因此,土壤融化早期土壤可溶性碳和氮同样迅速增加。而随着土壤温度的升高,土壤生物快速生长繁殖,提高了土壤生物活性,增加了对碳、氮的矿化利用,且雪被融化过程强烈的淋溶作用和植物休眠期打破后的吸收利用减少了土壤中有效资源,因而降低了土壤可溶性碳和氮含量^[13, 18]。这种动态与前人在温带森林原位监测和室内微缩模拟实验的研究结果基本一致^[3-5]。同时,本研究中,冻融格局和冻融交替对土壤有机层养分动态影响比矿质土壤层更为显著。主要原因是有机土壤层自身具有相对较高碳、氮、磷等含量,且直接应力于气温变化以及融化淋溶,表明亚高山-高山有机土壤层是频繁物质循环和能量流动的活跃生态界面。此外,各土层可溶性碳含量均受冻融时期、海拔及其交互作用的显著影响,海拔及冻融时期和海拔的交互作用对可溶性氮含量影响不显著,这可能是气候、土壤和植被等多因子综合作用的结果。

一般地,土壤养分有效性和生物活性随着土壤温度升高而增加^[2]。因而,低温、冻融和冻结过程中土壤养分有效性和生物活性通常很低。但是,近期大量研究表明^[9, 13-14],冻结或冻融循环的破坏作用可有效促进冬季土壤有机质矿化分解,并可在融化期释放有效养分,促进生长季节,特别是春季土壤融化期间植物和土壤生物生长及凋落物分解^[8, 13]。本研究中,3个森林土壤在土壤季节性融化期间均释放出大量的有效养分,且有效养分含量随土壤冻融格局不断改变(图3和图4)。其可能的机制包括:1)冻结初期土壤团聚体的破坏、新鲜凋落物和死亡根系的分解以及植物根系对土壤有效养分吸收的停滞使得土壤铵态氮和硝态氮迅速累积增加^[15],而初冬雪被的融化淋洗流失和微生物的硝化与反硝化利用使累积的有效养分被快速利用^[19]。因此,土壤铵态氮和硝态氮含量在冻结初期显著增加后降低。2)雪被的保温为土壤微生物提供了较为稳定的微环境^[11, 20],土壤中存活的微生物活性提高,增加对土壤有机质、凋落叶的矿化,促进了冻结期土壤铵态氮和硝态氮含量的提高。3)凋落物解冻后的矿化分解和土壤嗜冷生物死亡释放的可溶性养分等能促进土壤中有有效养分显著提高,而雪被融化淋洗流失和植物萌动利用及死亡生物残体快速降解限制了土壤有效养分的持续增加^[13, 21]。因而,土壤铵态氮和硝态氮含量随融化过程显著增高后降低。这种变化与在 Hubbard Brook 森林的长期研究结果相似^[3-5]。这表明土壤有效养分动态变化对季节性冻融及其变化敏感响应。同时,本研究还发现,冻融作用持续时间显著影响土壤有效养分性,且土壤有机层有效养分动态对冻融格局变化响应更显著。这同样是因为土壤有机层自身含有大量有效养分和直接应力于气温变化以及融化淋溶的原因。而融化期土温回升后土壤养分可能更多被复苏的土壤生物以及植物吸收利用,因而土壤养分有效性维持在较低水平^[5, 13],这在 Schütt 等研究温带森林碳、氮矿化速率对低温度环境敏感性的模拟实验也得到证实。此外,不同海拔植被变化以及对土壤有效氮吸收不同,土壤微生物对无机氮矿化效率差异等都可能影响有效氮对海拔梯度温度变化的敏感性。这些结果不仅意味着冬季土壤养分过程是川西亚高山-高山森林物质循环的重要环节,而且也暗示着全球气候变化导致的季节性冻融特征变化可能对亚高山-高山森林冬季生态系统过程施加强烈影响。

参考文献(References):

- [1] Liu J L, Wu F Z, Yang W Q, Shi P L, Wang A, Yang Y L, Wu Z C. Effect of seasonal freeze-thaw cycle on net nitrogen mineralization of soil organic layer in the subalpine/alpine forests of western Sichuan, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(1): 32-37.
- [2] 刘庆. 亚高山针叶林生态学研究. 成都: 四川大学出版社, 2002: 1-50.
- [3] Herrmann A, Witter E. Sources of C and N contributing to the flush in mineralization upon freeze-thaw cycles in soils. *Soil Biology & Biochemistry*, 2002, 34(10): 1495-1505.

- [4] Hentschel K, Borken W, Matzner E. Repeated freeze-thaw events affect leaching losses of nitrogen and dissolved organic matter in a forest soil. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2008, 171(5) : 699-706.
- [5] Ueda M U, Muller O, Nakamura M, Nakaji T, Hiura T. Soil warming decreases inorganic and dissolved organic nitrogen pools by preventing the soil from freezing in a cool temperate forest. *Soil Biology & Biochemistry*, 2013, 61(6) : 105-108.
- [6] Tan B, Wu F Z, Yang W Q, He X H. Snow removal alters soil microbial biomass and enzyme activity in a Tibetan alpine forest. *Applied Soil Ecology*, 2014, 76(6) : 34-41.
- [7] 张殿发, 郑琦宏. 冻融条件下土壤中水盐运移规律模拟研究. *地理科学进展*, 2005, 24(4) : 46-55.
- [8] Wu F Z, Yang W Q, Zhang J, Deng R J. Litter decomposition in two subalpine forests during the freeze-thaw season. *Acta Oecologica*, 2010, 36 (1) : 135-140.
- [9] Schmitt A, Glaser B, Borken W, Matzner E. Repeated freeze-thaw cycles changed organic matter quality in a temperate forest soil. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2008, 171(5) : 707-718.
- [10] 邓仁菊, 杨万勤, 胡建利, 冯瑞芳. 亚高山针叶林土壤有机层有效氮动态及其对外源 C, N 增加的响应. *生态学报*, 2009, 29(5) : 2717-2724.
- [11] 谭波, 吴福忠, 杨万勤, 余胜, 刘利, 王奥, 杨玉莲. 川西亚高山/高山森林土壤氧化还原酶活性及其对季节性冻融的响应. *生态学报*, 2012, 32(21) : 6670-6678.
- [12] 鲁如坤. 土壤农化分析. 北京: 中国农业科技出版社, 2000: 296-338.
- [13] Edwards K A, McCulloch J, Kershaw G P, Jefferies R L. Soil microbial and nutrient dynamics in a wet Arctic sedge meadow in late winter and early spring. *Soil Biology & Biochemistry*, 2006, 38(9) : 2843-2851.
- [14] Freppaz M, Williams B L, Edwards A C, Scalenghe R, Zanini E. Simulating soil freeze/thaw cycles typical of winter alpine conditions: implications for N and P availability. *Applied Soil Ecology*, 2007, 35(1) : 247-255.
- [15] Tierney G L, Fahey T J, Groffman P M, Hardy J P, Fitzhugh R D, Driscoll C T. Soil freezing alters fine root dynamics in a northern hardwood forest. *Biogeochemistry*, 2001, 56(2) : 175-190.
- [16] Jones D L, Willett V B. Experimental evaluation of methods to quantify dissolved organic nitrogen (DON) and dissolved organic carbon (DOC) in soil. *Soil Biology & Biochemistry*, 2006, 38(5) : 991-999.
- [17] Fitzhugh R D, Driscoll C T, Groffman P M, Tierney G L, Fahey T J, Hardy J P. Effects of soil freezing disturbance on soil solution nitrogen, phosphorus, and carbon chemistry in a northern hardwood ecosystem. *Biogeochemistry*, 2001, 56(2) : 215-238.
- [18] Freppaz M, Williams M W, Seastedt T, Filippa G. Response of soil organic and inorganic nutrients in alpine soils to a 16-year factorial snow and N-fertilization experiment, Colorado Front Range, USA. *Applied Soil Ecology*, 2012, 62(11) : 131-141.
- [19] Groffman P M, Hardy J P, Fisk M C, Fahey T J, Driscoll C T. Climate variation and soil carbon and nitrogen cycling processes in a northern hardwood forest. *Ecosystems*, 2009, 12(6) : 927-943.
- [20] Comerford D P, Schaberg P G, Templer P H, Soccia A M, Campbell J L, Wallin K F. Influence of experimental snow removal on root and canopy physiology of sugar maple trees in a northern hardwood forest. *Oecologia*, 2013, 171(1) : 261-269.
- [21] Schütt M, Borken W, Spott O, Stange C F, Matzner E. Temperature sensitivity of C and N mineralization in temperate forest soils at low temperatures. *Soil Biology & Biochemistry*, 2014, 69(2) : 320-327.