

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

邓仁菊, 杨万勤*, 胡建利, 冯瑞芳

(四川农业大学林学院, 四川雅安 625014)

摘要: 为了解川西亚高山针叶林土壤有机层有效 N 的动态及其对外源 C、N 增加的响应, 2005 年 4 ~ 10 月采用人为施加 C、N 的控制实验方法, 研究了川西亚高山紫果云杉(*Picea purpurea* Masters) 林和岷江冷杉(*Abies faxoniana* Rehder & E. H. Wilson) 林下土壤有机层(OL) 的半分解层(FL) 和完全分解层(HL) 及矿质土壤层(MS) 有效氮(NH_4^+ -N + NO_3^- -N) 动态及其对外源 C、N 的响应。云杉和冷杉林 FL 和 HL 的有效氮含量均显著高于 MS。云杉林 FL、HL 和 MS 的 NH_4^+ -N 分别为总有效氮含量的 77.4%、72.4% 和 76.6%, 而冷杉林分别为 65.2%、57.6% 和 67.2%。有效氮和 NH_4^+ -N 含量均以 10 月份最高, 而 NO_3^- -N 含量以 8 月份最高。外源 C 输入使云杉林土壤 FL、HL 和 MS 有效氮含量提高了 14.6%、21.2% 和 28.0%, 使冷杉林提高了 16.7%、25.3% 和 5.2%。外源 N 输入使云杉林土壤 FL、HL 和 MS 有效氮含量提高了 53.9%、11.6% 和 13.2%, 冷杉林提高了 14.2%、23.8% 和 50.5%。OL 对外源 C、N 输入的响应比 MS 更敏感, 且云杉林大于冷杉林。处理时间越长, 外源 C、N 输入对 OL 和 MS 有效氮含量的影响越大。

关键词: 外源 C; 外源 N; 有效 N; 土壤有机层; 亚高山针叶林

文章编号: 1000-0933(2009)05-2716-09 中图分类号: Q142, S154.1, S178.5 文献标识码: A

Dynamics on soil available nitrogen in organic layer and its responses to carbon and nitrogen supply in two subalpine coniferous forests of western Sichuan

DENG Ren-Ju, YANG Wan-Qin*, HU Jian-Li, FENG Rui-Fang

Faculty of Forestry, Sichuan Agricultural University, Ya'an 625014, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(5): 2716 ~ 2724.

Abstract: As a characteristic component in the subalpine forest ecosystem, soil organic layer (OL) plays an important role in soil and water conserving, and soil fertility maintaining. As yet, little is known about the response of nutrient availability in the OL to future climate change. In order to obtain a clear knowledge of biochemical process in the OL as well as their responses to exogenous carbon and nitrogen supplies in the subalpine forest, therefore, an experiment with adding 10% carbon and 10% nitrogen to the forest floor was carried out in spruce (*Picea purpurea* Masters) and fir (*Abies faxoniana* Rehder & E. H. Wilson) forests, two representative subalpine forests in Wanglang National Reserve from April to October, 2005, based on one hypothesis of "the ratio of carbon to nitrogen in the OL will increase or decrease 10% in the context of climate in the future" and the past results of carbon and nitrogen stocks in OL and mineral soil (MS) of the corresponding forests. OL was divided into a fresh litter layer (LL), semi-decomposed litter layer (FL) and decomposed litter layer (HL), and available N contents in FL and HL of OL and MS with carbon and nitrogen supplies were measured simultaneously to understand the monthly dynamics of nitrogen availability and their responses to future climate change. Available nitrogen contents in FL and HL were $(163.4 \pm 78.4) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ and $(125.5 \pm 50.7) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ in spruce forest,

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(30771702, 30471378); 教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-07-0592); 国家“十一五”重大科技支撑计划课题(2006BAC01A11); 四川省杰出青年学科带头人培养基金(07ZQ026-022)

收稿日期: 2008-01-04; 修订日期: 2008-05-02

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: scyangwq@163.com; ywq918@yahoo.com

(242.2 ± 107.2) $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ and (192.3 ± 70.2) $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ in fir forest, respectively, while those in MS were (96.2 ± 47.6) $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ and (112.3 ± 53.4) $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ in the corresponding forest, implying that the OL had significant higher available nitrogen content in comparison with the MS. In spruce forest, ammonium nitrogen content accounted for 77.4%, 72.4% and 76.6% of the total available nitrogen in FL, HL and MS, respectively, while in fir forest, the percentage was 65.2%, 57.6% and 67.2%, respectively. Regardless of the forests and soil layers, the maximum contents of both available nitrogen and ammonium nitrogen were found in October, while the maximum of nitrate content was found in August. Exogenous carbon and nitrogen inputs significantly increased available nitrogen content in the OL and MS in both spruce and fir forests. Carbon inputs made FL, HL and MS increase 14.6%, 21.2% and 28.0% in spruce forest, 16.7%, 25.3% and 5.2% in fir forest. Nitrogen inputs made FL, HL and MS increase 53.9%, 11.6% and 13.2% in spruce forest, 14.2%, 23.8% and 50.5% in fir forest. Judged by available nitrogen content, the response of OL to exogenous carbon and nitrogen inputs was more sensitive than MS, and the responses in spruce forest were more sensitive than those in fir forest. In addition, available nitrogen contents in OL and MS increased more rapid from May to Oct, 2005 with supplied carbon and nitrogen.

Key Words: carbon supply; nitrogen supply; available nitrogen; soil organic layer; subalpine forest

土壤有机层(soil organic layer, OL)主要由累积在矿质土壤上的各种未分解、半分解以及腐殖化的有机物质组成^[1, 2],是高寒森林生态系统中极具特征的重要组成部分^[3, 4],不仅在水土保持和维持土壤肥力方面具有重要的生态功能,而且被认为是高寒森林生态系统中植被与土壤之间进行物质循环和能量转换最为活跃的生态界面之一^[4, 5],因而其对气候变化的响应可能比矿质土壤层(MS)更为敏感^[6]。但以大气 CO_2 浓度升高和全球变暖为主要特征的气候变化可能改变凋落物的产量和质量而改变 OL 的物质组成,从而对 OL 和 MS 的生化特性及养分有效性施加强烈影响。N 是高纬度和高海拔地区森林生态系统中植物生长的限制性营养元素之一,其有效性与林木生长密切相关。因此,同步研究森林 OL 和 MS 有效氮动态及其对外源 C、N 输入的响应是了解未来气候变化条件下高寒森林生态系统过程的重要方面。

以冷杉林和云杉林为代表的川西亚高山针叶林是我国的第二大林区^[7],地处高山峡谷地带,是全球变化的敏感地带^[8]。受低温和森林凋落物质量限制,亚高山森林 OL 的微生物活性较低,凋落物分解缓慢,同时,频繁的地质灾害也使该区土壤发育缓慢甚至经常被中断,从而导致其普遍存在一层较厚的 OL 和浅薄的 MS, OL 的养分释放可能是该区植物生长发育的主要养分来源^[5, 8]。但迄今尚无亚高山针叶林 OL 有效氮动态及其对外源 C、N 响应的研究报道,这很难满足亚高山森林生态系统过程研究的需要。因此,本研究基于“未来气候变化可能降低或增加 OL 和 MS 的 C/N 比”的假说以及前期对相同森林 OL 和 MS 中 C、N 储量的研究^[9, 10, 13],采用模拟控制实验,同步研究了亚高山针叶林 OL 和 MS 有效氮动态及其对外源 C、N 输入的响应,以期为深入揭示未来气候变化条件下亚高山森林生态系统过程提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域与样地概况

研究区域位于王朗国家级自然保护区($103^{\circ}55' \sim 104^{\circ}10'E$, $32^{\circ}49' \sim 33^{\circ}2'N$, a. s. l 2300 ~ 4980m),地处青藏高原-四川盆地的过渡地带,属丹巴-松潘半湿润气候。受季风影响,形成干湿季节差异,干季(当年 11 月至翌年 4 月)表现为日照强烈、降水少、气候寒冷、空气干燥;湿季(5 ~ 10 月份)的气候特征为降雨集中、多云雾、日照少、气候暖湿。年平均气温 $2.5 \sim 2.9^{\circ}\text{C}$ (最高气温 26.2°C ,最低气温 -17.8°C),7 月平均气温 12.7°C ,1 月平均气温 -6.1°C ,年降雨量 $805.2 \sim 825 \text{ mm}$,主要植被为针阔混交林和针叶林^[13]。原始紫果云杉(*Picea purpurea* Masters, SF)林和岷江冷杉(*Abies faxoniana* Rehder & E. H. Wilson, FF)林是该区最为典型的两类针叶林^[3, 4],其植被特征和土壤详见文献^[9~13]。

1.2 样地设计和处理

通过对研究区域内森林群落的物种组成、树木密度、树木年龄、冠层结构以及坡向、坡度和土壤类型进行调查和研究后,在川西亚高山森林区分布最为广泛和面积最大的云杉林和冷杉林分别建立了1个面积为600m² (20m×30m)的固定研究样地。2005年4月中旬,在每个样地内随机设置15个面积为4m²的小样方(2m×2m),根据样地内OL和MS的厚度和质量以及C/N比进行外源施加C、N处理^[3, 9, 10, 13]。云杉林样地施葡萄糖(809.9±27.5)g·m⁻² (C/N增加10%)、硝酸铵(24.3±3.1)g·m⁻² (C/N降低10%);冷杉林样地施葡萄糖(625.0±27.5)g·m⁻² (C/N增加10%)、硝酸铵(19.4±1.7)g·m⁻² (C/N降低10%);将每个样方所需施加的葡萄糖和硝酸铵分别溶解在5L水中(相当于新增降水量1.25mm),用小喷雾器均匀喷洒在样方内。对照(CK)喷洒同样量的水;每个处理5个重复。

1.3 样品采集

2005年5月~10月中旬分别在各小样方内采集有机层(OL)和矿质土壤(MS)样品。其中,OL分新鲜凋落物层(LL,新鲜的或轻微变色的未分解的凋落物)、半分解层(FL,具有菌丝和细根的中度到强度的成片断的凋落物)和完全分解层(HL,腐殖化的无定形的凋落物)采集分析样品^[1, 2, 5]。每层样品各采集1kg左右,迅速带回实验室。然后将每个样品分成两部分:一部分样品在去掉石块、动物残体和根系后,研磨、过2mm筛、混匀,装入保鲜袋,贮于4℃的冰箱中,供土壤铵态氮和硝态氮的测定用,一个月内完成;另一部分样品用于立即测定含水量。

1.4 实验方法与统计分析

铵态氮用氯化钾浸提后,采用靛酚蓝比色法测定^[14]。硝态氮采用酚二磺酸比色法测定^[14]。以上分析均做3个重复。所有数据用SPSS 12.0进行统计分析,方差分析检验处理间的效应,用LSD法检验不同森林类型、土层和不同处理间的差异。

2 结果

2.1 土壤OL和MS有效氮动态

图1显示,对照样方土壤NH₄⁺-N、NO₃⁻-N及有效N含量均具有明显的月动态规律,NH₄⁺-N和有效N含量总体上随月份的增加而增加,最大值出现在10月份。NO₃⁻-N含量随月份的增加总体上呈先增加再减小再增加的趋势,高大值出现在8月份。整个研究期内,云杉林和冷杉林中FL和HL的有效N(NH₄⁺-N + NO₃⁻-N)含量显著高于MS。

不同土层比较,NH₄⁺-N、NO₃⁻-N及有效N含量都表现为FL>HL>MS。其中,云杉林FL、HL和MS的有效N含量分别为163.4、125.5 mg·kg⁻¹和96.2 mg·kg⁻¹,NH₄⁺-N占有有效N的77.4%、72.4%和76.6%,而冷杉林对应的值分别为242.2、192.3、112.3 mg·kg⁻¹、65.2%、57.6%和67.2%。冷杉林的FL、HL和MS具有较高的有效N、NH₄⁺-N和NO₃⁻-N含量,但云杉林的土壤FL、HL和MS具有较高的NH₄⁺-N/(NH₄⁺-N + NO₃⁻-N)比例(表1)。

表1 云杉林(SF)和冷杉(FF)林土壤有机层(FL和HL)和矿质土壤层(MS)的有效N含量*

Table 1 Available N contents (means ± SD, n=7) in FL and HL of OL and MS beneath spruce (*Picea purpurea* Masters, SF) and fir (*Abies faxoniana* Rehder & E. H. Wilson, FF) forests

林型 Forest stand	土壤层次 Soil layer	NH ₄ ⁺ -N (mg·kg ⁻¹)	NO ₃ ⁻ -N (mg·kg ⁻¹)	NH ₄ ⁺ -N + NO ₃ ⁻ -N (mg·kg ⁻¹)	NH ₄ ⁺ -N/(NH ₄ ⁺ -N + NO ₃ ⁻ -N) (%)
SF	FL	126.4(±64.0)aA	37.0(±22.4)aA	163.4(±78.4)aA	77.4(±8.2)aA
	HL	90.8(±38.8)aB	34.7(±18.3)aA	125.5(±50.7)aB	72.4(±16.8)aA
	MS	73.7(±41.1)aC	22.5(±8.2)aB	96.2(±47.6)aC	76.6(±10.8)aA
FF	FL	157.9(±53.7)bA	84.3(±41.4)bA	242.2(±107.2)bA	65.2(±9.3)aA
	HL	110.8(±32.5)bB	81.5(±32.9)bA	192.3(±70.2)bB	57.6(±12.4)bA
	MS	75.5(±42.0)aC	36.8(±23.7)bB	112.3(±53.4)bC	67.2(±15.3)aA

* 每一栏中不同的上标代表不同森林之间(小写字母)和不同土层之间(大写字母)的差异性是否显著(ANOVA, P<0.05) Different superscript within a column indicate denote the significant differences among different forests (the first letter) and soil layers (the second letter) (ANOVA, P<0.05)

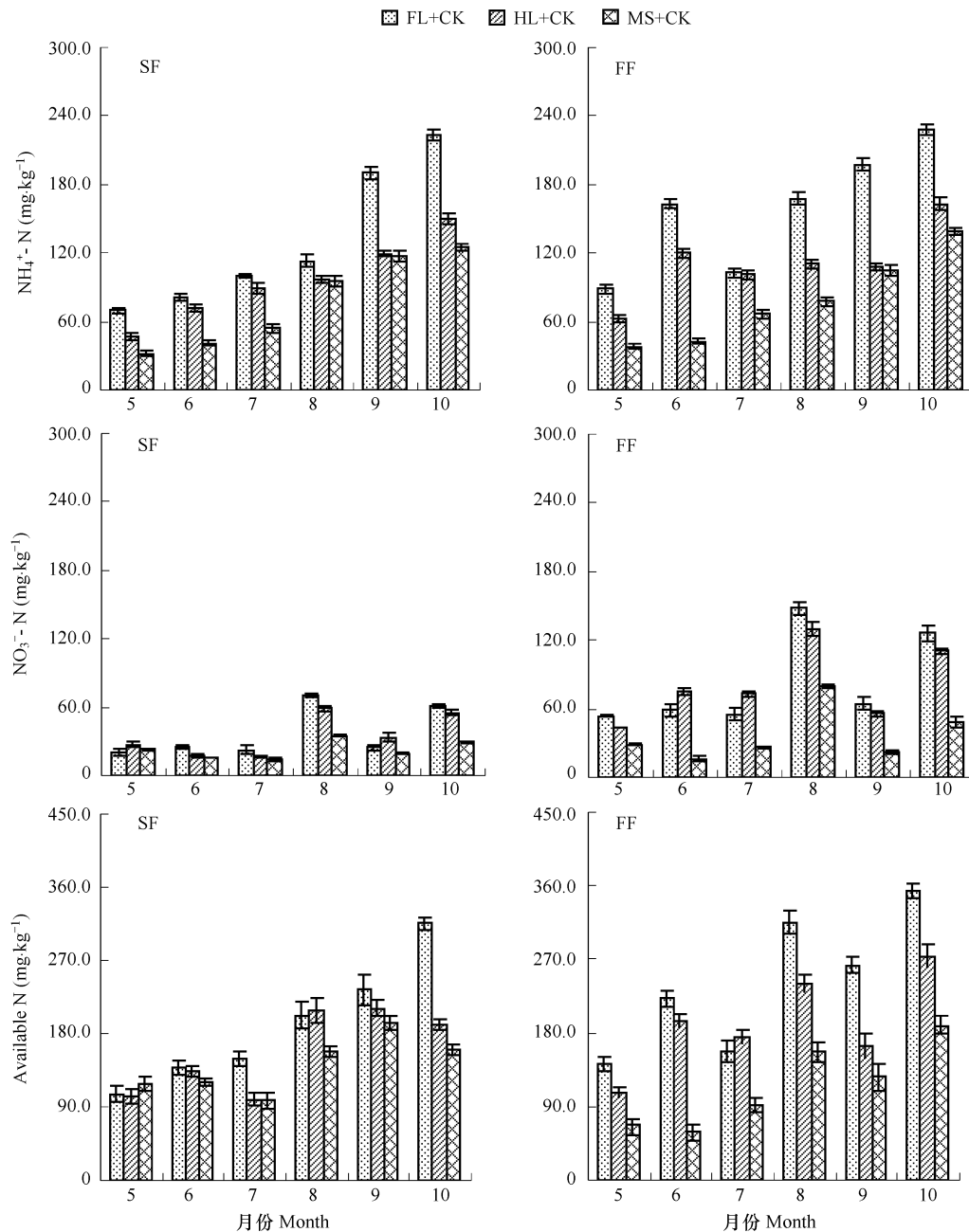


图 1 云杉林(SF)和冷杉林(FF)土壤有机层(OL)(半分解层(FL)和完全分解层(HL))和矿质土壤层(MS)铵态氮、硝态氮及有效氮的动态特征

Fig. 1 Dynamics of soil NH_4^+-N , NO_3^--N and available N in FL and HL of OL and MS beneath spruce (*Picea purpurea* Masters, SF) and fir (*Abies faxoniana* Rehder & E. H. Wilson, FF) forests

竖条表示标准偏差 Bars indicate SD, 下同 the same below

2.2 外源 C 输入对土壤 OL 和 MS 有效氮含量的影响

外源 C 输入均显著增加了两种林分下土壤 OL 和 MS 的有效 N 含量,但其增幅随着林型、土层和取样时间的变化而变化(图 2)。云杉林 FL、HL 和 MS 的 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 含量均随着外源 C 处理时间的增加逐渐增大,而且不同月份的 NH_4^+-N 含量均表现出 $\text{FL} > \text{HL} > \text{MS}$ 。与对照相比(图 1),C 处理显著增加了云杉林 FL、HL 和 MS 有效氮含量,分别使铵态氮含量提高了 21.5%、34.8% 和 19.2%,硝态氮含量提高了 15.3%、23.1% 和 123.1%。对于冷杉林,C 处理后的铵态氮含量除 7 月份外随时间的增加而增加,各月份铵态氮含量均表现为 $\text{FL} < \text{HL} < \text{MS}$,硝态氮含量随着时间的增加有先增加后降低的趋势,各月份硝态氮含量均表现出 FL

>HL>MS。C 处理也显著增加了冷杉林 FL、HL 和 MS 有效氮含量,分别使铵态氮含量提高了 43.9%、19.1% 和 15.1%,硝态氮含量提高了 12.0%、33.8% 和 33.9%。整个研究期内,C 处理使得云杉林土壤 FL、HL 和 AL 有效氮含量提高了 14.6%、21.2% 和 28.0%,冷杉林提高了 16.7%、25.3% 和 5.2%。

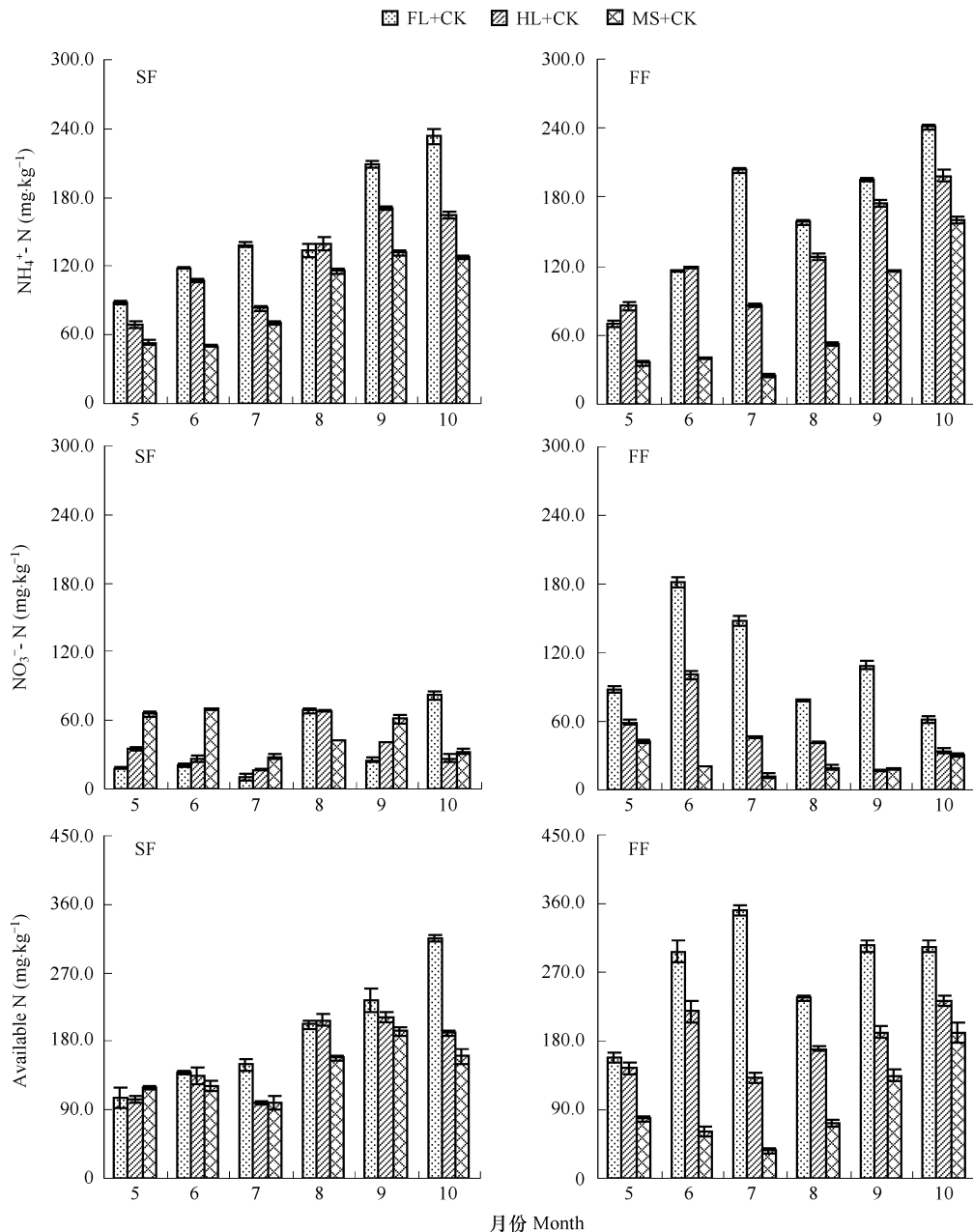


图2 云杉林(SF)和冷杉林(FF)土壤有机层(FL和HL)和矿质土层(MS)的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 及有效 N 对外源 C 处理的响应

Fig 2 Responses of soil $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ and available N in FF and HL of OL and MS to the exogenous of C supply beneath spruce (*Picea purpurea* Masters, SF) and fir (*Abies faxoniana* Rehder & E. H. Wilson, FF) forests

2.3 外源 N 输入对土壤 OL 和 MS 有效氮含量的影响

外源 N 增加对土壤 OL 和 MS 铵态氮和硝态氮含量的影响随着林型、土层和取样时间的变化而变化(图 3)。对于云杉林,各月份铵态氮含量均表现出 FL>HL>MS,硝态氮含量除 7、8 月份表现为 FL>HL>MS 外,其余各月份均表现为 HL>FL>MS。与对照相比(图 1),N 处理使云杉林 FL 和 HL 铵态氮含量分别提高了 15.5% 和 5.8%,但 MS 铵态氮含量降低了 6.0%,硝态氮含量分别提高了 199.8%、43.0% 和 36.4%。对于冷

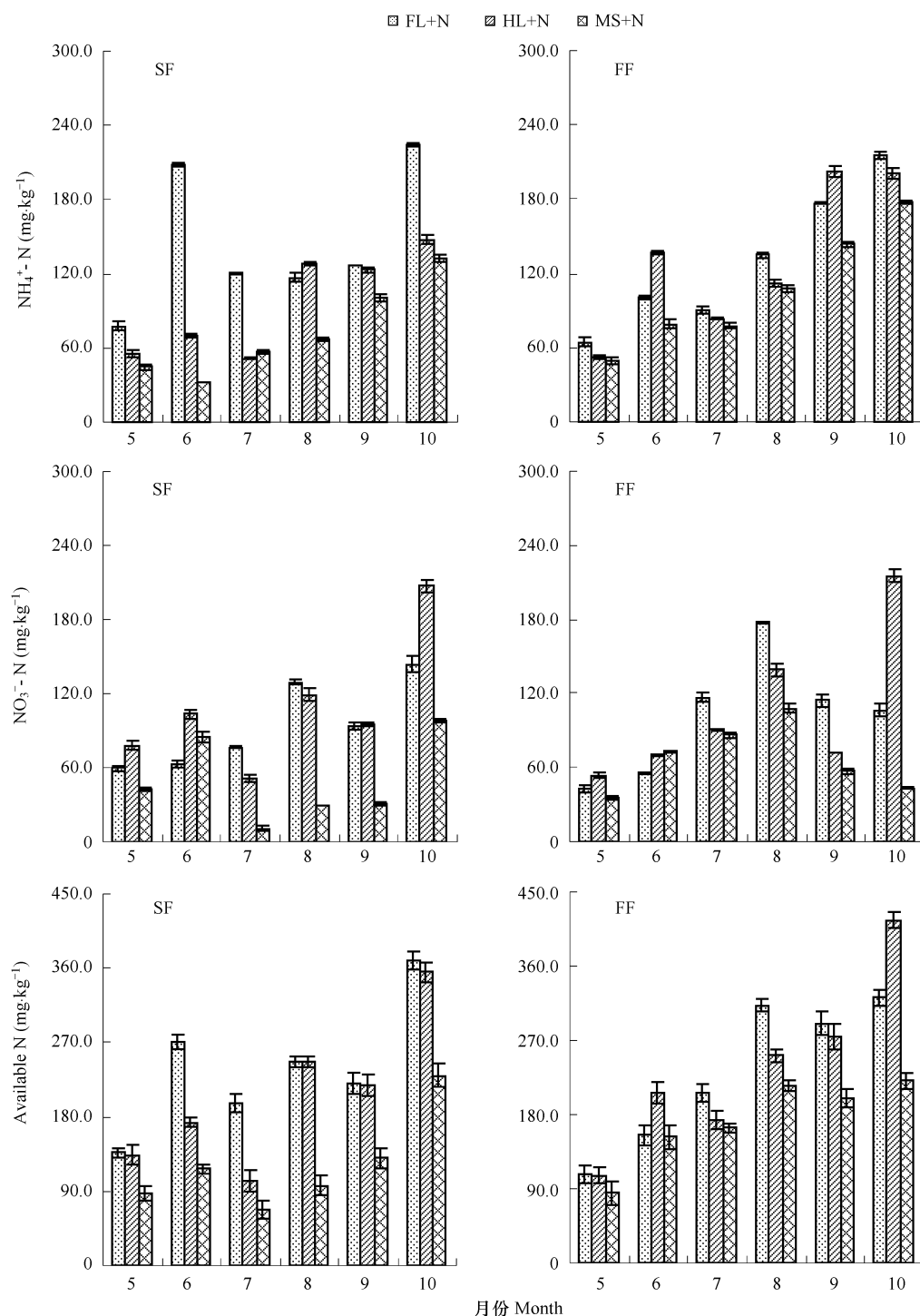


图3 云杉林(SF)和冷杉林(FF)土壤有机层(FL,HL)和MS的NH₄⁺-N、NO₃⁻-N及有效N含量对外源N处理的响应

Fig 3 Responses of NH₄⁺-N, NO₃⁻-N and available N in FL and HL of OL and MS to the exogenous of N supply beneath spruce (*Picea purpurea* Masters, SF) and fir (*Abies faxoniana* Rehder & E. H. Wilson, FF) forests

杉林,铵态氮含量除6、9月份表现为HL>FL>MS外,其余各月份均表现为FL>HL>MS,硝态氮含量除5、10月份表现为HL>FL>MS外,其余各月份均表现为FL>HL>MS。N处理使冷杉林FL的铵态氮含量降低了17.6%,而HL和MS分别提高了18.5%和40.4%,硝态氮含量分别提高了21.0%、31.1%和82.3%。整个研究期内,N处理使得云杉林土壤FL、HL和MS有效氮含量提高了53.9%、11.6%和13.2%,冷杉林提高

了 14.2%、23.8% 和 50.5%。

3 讨论与结论

铵态氮和硝态氮是土壤有效氮的主要存在形式,其组成受光照、水分和温度等环境因子和土壤 pH 值、凋落物数量和质量、土壤动物、微生物种群和活性等基质条件的影响^[15~18]。本研究表明,川西亚高山针叶林土壤 OL 和 MS 的硝态氮和铵态氮具有明显的变化规律。FL、HL 和 MS 的铵态氮含量均以 10 月份最高,FL、HL 和 MS 的硝态氮含量均以 8 月份最高。OL 的有效氮含量显著高于 MS,这不仅与高山峡谷地带土层较薄有关,而且与高海拔地带的低温限制有关。受低温限制,川西亚高山森林土壤微生物活性较低,地表有机物质分解缓慢,因而相对于同纬度的低海拔而言,具有较厚的土壤 OL,且植物细根主要从 OL 吸收有效养分^[18],这支持了“土壤有机层作为植被与土壤之间进行物质循环和能量转换的最活跃的生态界面,在森林生态系统中扮演着植物生长重要的源和汇”的观点^[5,9]。本项研究还发现,川西亚高山针叶林土壤 OL 和 MS 的铵态氮含量显著高于硝态氮,铵态氮含量占总有效氮含量的 50% 以上,这与该土壤处于微酸性状态、氨化作用较强而硝化作用相对较弱有关^[18,20]。但方运霆等^[21]对南亚热带马尾松林、混交林和季风常绿阔叶林土壤有效氮含量的研究发现,马尾松林、混交林铵态氮不到有效氮的 50%,阔叶林下的土壤铵态氮含量更低,还不到 20%,这与植物对有效氮的选择吸收以及土壤湿度、通气性、土壤 pH 值、反硝化作用强度和淋洗作用等有关。可见,森林土壤有效氮含量及铵态氮所占的比例随着气候、土壤类型和树种组成的变化而存在很大差异。

据预测,未来气候变化条件下,森林凋落物的 C/N 比可能增加或降低 8%~10%,从而使土壤 OL 和 MS 的 C/N 比降低或者升高 10%^[5]。通过林地施加无机 C 和 N 直接改变了凋落物的 C/N 比,可能对土壤微生物的活性产生显著的影响,使土壤氮素矿化硝化作用增强,从而改变土壤养分的有效性^[22~24]。本项研究基于“未来气候变化条件下土壤 OL 和 MS 的 C/N 比可能增加或降低 10%”的假说,设置了林地外源 C、N 处理实验,以预测未来气候变化条件下亚高山针叶林土壤 OL 和 MS 养分有效性可能发生的变化。研究表明,施加 C、N 处理显著增加了两个林分土壤 OL 和 MS 有效氮含量。这意味着,未来气候变化条件下亚高山针叶林土壤 OL 和 MS 的养分有效性将增加。对比外源 C、N 处理条件下土壤 OL 和 MS 的有效氮含量变化可以初步推测,土壤 OL 对外源 C、N 处理的响应比 MS 更敏感,这说明 OL 受未来气候变化的影响可能更大,这验证了“土壤有机层对气候变化的响应可能比矿质土壤层更敏感”的假说。冷杉林土壤 OL 和 MS 对外源 C、N 处理的响应小于云杉林,这与本项研究中的云杉林所处海拔较高有关,说明高海拔地区的森林土壤对未来气候变化的响应可能更敏感。外加 C、N 处理时间越长,其有效氮含量与对照样方的差距越大。

N 是川西亚高山植物生长的主要限制因子之一^[9]。因此,研究高纬度高海拔地区森林土壤 OL 和 MS 有效氮动态及其对外源 C、N 输入的响应是了解未来气候变化条件下高寒森林生态系统过程的重要方面。本项研究表明,外源 N 的输入使 C/N 比降低,微生物活性增强,凋落物分解速率加快,释放的有效养分也较多。这与方运霆等^[20]对南亚热带的研究结果相似,其研究表明,外源 N 的输入增强了凋落物的氮矿化、硝化作用,从而增加土壤有效氮的输入。本项研究还发现,尽管外源 C 的增加提高了 C/N 比,但土壤 OL 和 MS 的有效氮含量也显著增加,表明外源 C 处理提高了土壤 OL 和 MS 中与 N 矿化作用有关的微生物活性,提高了 N 的有效性。这是因为本项研究中加入的 C 为葡萄糖,其直接为微生物活动提供能量,促进了微生物生长繁衍。这表明,土壤 OL 和 MS 的微生物活性除了受到 C/N 比的影响外,还受到基质(substrates)有效性的影响。当然,外源 C、N 输入对有效氮的影响还受到物种组成、林龄、土壤类型、施加频率等因素的影响,且生态系统对外源 C、N 处理的响应可能需要较长时间才能表现出来^[23~25]。因此,为揭示未来气候变化条件下亚高山针叶林生态系统过程,长时间的动态监测和深入研究更具有说服力。另外,外源 C、N 输入可能引起土壤有效氮含量增加,而有效氮含量增加既可能增加森林生产力,也有可能增加有效氮流失的潜力^[26];未来以 CO₂ 浓度升高、N 沉降等为主要特征的全球气候变化究竟会对亚高山针叶林生态系统产生何种影响,这些都有待于进一步研究证实。

References:

- [1] Chapin F S III, Zavaleta E S, Eviner V T. Functional and societal consequences of changing biotic diversity. *Nature*, 2000, 405: 234—242.
- [2] Papamichos N. *Forest Soils*. Aristotle University of Thessaloniki, 1990. 414.
- [3] Yang W Q, Wang K Y, Kellomäki S, *et al.* Litter dynamics of three subalpine forests in Western Sichuan. *Pedosphere*, 2005, 15(5): 653—659.
- [4] Wu Q X, Zhao H Y, Liu X D, *et al.* Evaluation on role of forest litter to water source conservation and soil and water conservation. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1998, 4(2): 23—28.
- [5] Feng R F, Yang W Q, Zhang J. Review on biochemical property in forest soil organic layer and its responses to climate change. *Chinese Journal of Applied & Environmental Biology*, 2006, 12(5): 734—739.
- [6] Currie W S. The responsive C and N biogeochemistry of the tempte forest floor. *Tree*, 1999, 14: 316—320.
- [7] Yang Y P, Li C B, Guan Z T eds. *Sichuan Forest*. Beijing: Chinese Forest Press, 1992.
- [8] Li C B ed. *Ecological study of Sichuan forest*. Chengdu: Sichuan Sci-Tech Publishing House, 1990.
- [9] Yang W Q, Wang K Y. Biogeochemistry characteristics in the surface and soil nutrient pools of forest communities. In: Wang K Y ed. *Processes of subalpine forest ecosystems in the west of Sichuan*. Chengdu: Sichuan Sci-Tech Publishing House, 2004. 200—285.
- [10] Yang W Q, Wang K Y, Kellomäki S, *et al.* Annual and monthly variations in litter macronutrients of three subalpine forests in western China. *Pedosphere*, 2006; 16(6): 16(6): 788—798.
- [11] Feng R F, Yang W Q, Zhang J, *et al.* Effects of simulated elevated atmospheric CO₂ concentration and temperature on soil enzyme activity in the subalpine fir forest. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(10): 4019—4026.
- [12] Deng R J, Yang W Q, Zhang J, *et al.* Carbon, nitrogen and phosphorus stocks in soil organic layer beneath the Subalpine forests of Western Sichuan. *Chinese Journal of Applied & Environmental Biology*, 2007, 13(4): 492—496.
- [13] Yang W Q, Feng R F, Zhang J, *et al.* Carbon stock and biochemical properties in the organic layer and mineral soil under three subalpine forests in Western China. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(10): 4157—4165.
- [14] Lu R K. *Methods of soil agricultural chemistry analysis*. Beijing: Chinese Agricultural Sci-Tech Press, 1999. 296—338.
- [15] Mo J M, Peng S L, Fang Y T, *et al.* A preliminary study on the dynamics of bio-available nitrogen in soil of pine-broadleaved mixed forest in Dinghushan Biosphere Reserve. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(3): 492—497.
- [16] Mo J M, Yu M D, Kong G H. The dynamics of soil NH₄⁺-N and NO₃⁻-N in a pine forest of Dinghushan, as assessed by ion exchange resin bag method. *Acta Phytoecologica Sinica*, 1997, 21(4): 335—341.
- [17] Meng Y, Xue J Y, Sha L Q, *et al.* Variations of soil NH₄⁺-N and NO₃⁻-N mineralization under different forests in Xishuangbanna, Southwest China. *Acta Phytoecologica Sinica*, 2001, 25(1): 99—104.
- [18] Yuan Y H, Fan H B, Wang Q, *et al.* Available nutrient s with increased N deposition in soils of *Cunninghamia lanceolata* plantations. *Journal of Zhejiang Forestry*, 2007, 24(4): 437—444.
- [19] Hu J L, Yang W Q, Zhang J, *et al.* Characteristics of biomass and carbon stock of fine root in two subalpine forests of Western Sichuan. *Chinese Journal of Applied & Environmental Biology*, 2008.
- [20] Li G C, Han X G, Huang J H. Dry-season dynamics of soil inorganic nitrogen pools in primary *Lithocarpus xylocarpus* forest and degraded vegetations in Ailao Mountain, Yunnan Province. *Acta Phytoecologica Sinica*, 2001, 25(2): 210—217.
- [21] Fang Y T, Mo J M, Zhou G Y, *et al.* The short-term responses of soil available nitrogen of Dinghushan forests to simulated N deposition in subtropical China. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(11): 2359—2359.
- [22] Fang Y T, Mo J M, Per Gundersen, *et al.* Nitrogen transformations in forest soils and their responses to atmospheric nitrogen deposition; a review. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(7): 1523—1531.
- [23] Aber J D, McDowell W, Nadelhoffer K J, *et al.* Nitrogen saturation in Northern forest ecosystems, hypotheses revisited. *Bioscience*, 1998, 48: 921—934.
- [24] Gundersen P, Emmett B A, KiOonaas O J, *et al.* Impact of nitrogen deposition on nitrogen cycling in forest: a synthesis of NITREX data. *Forest Ecology & Management*, 1998, 101: 37—55.
- [25] Fenn M A, Poth M A, Aber J D, *et al.* Nitrogen excess in North American ecosystems: Predisposing factors, ecosystem responses, and management strategies. *Ecological Applications*, 1998, 8: 706—733.
- [26] Gundersen P, Rasmussen L. Nitrification in forest soils; effects from nitrogen deposition on soil acidification and aluminum release. *Rev Environ Contami Toxicol*, 1990, 113: 1—45.

参考文献:

- [4] 吴钦孝, 赵鸿雁, 刘向东, 等. 森林枯枝落叶层涵养水源保持水土的作用评价. 水土保持学报, 1998, 4(2): 23 ~ 28.
- [5] 冯瑞芳, 杨万勤, 张健. 森林土壤有机层生化特性及其对气候变化响应的研究综述. 应用与环境生物学报, 2006, 12(5): 734 ~ 739.
- [7] 杨玉坡, 李承彪, 管仲天编著. 四川森林. 北京: 中国林业出版社, 1992.
- [8] 李承彪编著. 四川森林生态研究. 成都: 四川科学技术出版社, 1990.
- [9] 杨万勤, 王开运. 森林群落地表和土壤的碳和养分库及生物化学特性. 王开运主编. 川西亚高山森林群落生态系统过程. 成都: 四川科学技术出版社, 2004. 200 ~ 285.
- [10] 冯瑞芳, 杨万勤, 张健, 等. 模拟大气 CO₂ 浓度和温度升高对亚高山冷杉林土壤酶活性的影响. 生态学报, 2007, 27(10): 4019 ~ 4026.
- [12] 邓仁菊, 杨万勤, 张健, 等. 川西亚高山森林土壤有机层碳、氮、磷储量特征. 应用与环境生物学报, 2007, 13(4): 492 ~ 496.
- [14] 鲁如坤. 土壤农化分析. 北京: 中国农业科技出版社, 1999. 296 ~ 338.
- [15] 莫江明, 彭少麟, 方运霆, 等. 鼎湖山马尾松针叶阔叶混交林土壤有效氮动态的初步研究. 生态学报, 2001, 21(3): 492 ~ 497.
- [16] 莫江明, 郁梦德, 孔国辉. 鼎湖山马尾松人工林土壤硝态氮和铵态氮动态研究. 植物生态学报, 1997, 21(4): 335 ~ 341.
- [17] 孟盈, 薛敬意, 沙丽清, 等. 西双版纳不同热带森林下土壤铵态氮和硝态氮动态研究. 植物生态学报, 2001, 25(1): 99 ~ 104.
- [18] 袁颖红, 樊后保, 王强, 等. 模拟氮沉降对杉木人工林土壤有效养分的影响. 浙江林学院学报, 2007, 24(4): 437 ~ 444.
- [19] 胡建利, 杨万勤, 张健, 等. 川西亚高山两种林分细根生物量及其碳储量特征. 应用与环境生物学报, 2008.
- [20] 李贵才, 韩兴国, 黄建辉. 哀牢山木果柯林及其退化植被下土壤无机氮库的干季动态特征. 植物生态学报, 2001, 25(2): 210 ~ 217.
- [21] 方运霆, 莫江明, 周国逸, 等. 南亚热带森林土壤有效氮含量用项对模拟氮沉降增加的初期响应. 生态学报, 2004, 24(11): 2359 ~ 2359.
- [22] 方运霆, 莫江明, Per Gundersen, 等. 森林土壤氮素转换及其对氮沉降的响应. 生态学报, 2004, 24(7): 1523 ~ 1531.