

原始阔叶红松林、次生林土壤矿质氮特征及树种吸收反应

郝敬梅¹ 张 韫¹ 崔晓阳¹ 彭红梅²

(1 东北林业大学林学院 2 东北林业大学帽儿山实验基地)

摘要:以原始阔叶红松林、次生林土壤 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 与 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 为研究对象,采用原位顶盖埋管法,研究 2 个林地土壤矿质氮供应水平与组成的差异动态。结果表明:观测期内原始阔叶红松林土壤 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 含量均高于次生林,5、6、7 月原始阔叶红松林土壤 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 含量低于次生林,其他时段高于次生林;观测期内原始阔叶红松林土壤 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 始终占优势,5、6、7 月次生林土壤 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 占优势,其他时段 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 占优势。以红松、白桦分别作为顶级群落优势树种与退化演替群落先锋树种的代表植物,根据各器官氮含量动态与生长动态,对 2 个树种氮素获取行为模式进行连续研究。结果表明:红松、白桦氮吸收动态与原始阔叶红松林、次生林土壤矿质氮含量动态相似;4—10 月红松持续平缓地吸收土壤氮素,5—8 月白桦大量吸收土壤氮素并在 6 月中下旬达到吸收峰值。

关键词:原始阔叶红松林; 次生林; 矿质氮; 吸收

中图分类号:S714.5; S718.5 文献标志码:A 文章编号:1000-1522(2014)01-0021-05

HAO Jing-mei¹; ZHANG Yun¹; CUI Xiao-yang¹; PENG Hong-mei². **Soil mineral N characteristics in original broadleaved *Pinus koraiensis* forest and secondary forest and N absorption of some tree species.** *Journal of Beijing Forestry University* (2014)36(1)21-25 [Ch,24 ref.]

1 College of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin, 150040, P. R. China;

2 Maershan Mountain Experimental Base of Northeast Forestry University, Shangzhi, Heilongjiang, 150600, P. R. China.

Soil $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ and $\text{NO}_3^- \text{-N}$ were the research objects, and tube closed-top incubation method was conducted to investigate the content and composition of soil mineral N in the original broadleaved *Pinus koraiensis* forest and the secondary forest. The results showed that soil $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ content of the original broadleaved *P. koraiensis* forest was always more than the secondary forest from April to October, and soil $\text{NO}_3^- \text{-N}$ content of original broadleaved *P. koraiensis* forest was less than the secondary forest from May to July. In the original broadleaved *P. koraiensis* forest, soil $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ was always the dominating N form. In the secondary forest, soil $\text{NO}_3^- \text{-N}$ was the dominating N form from May to July, and soil $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ was dominated in the other months. *P. koraiensis* and *Betula platyphylla* represented respectively the dominant tree species in the climax community and the pioneer tree species in the degenerated community, whose N absorption pattern was studied continuously by investigating their organ N content and growth. The results showed that N absorption trends of the two tree species were similar to soil mineral N content trends in the original broadleaved *P. koraiensis* forest and the secondary forest. From April to October, soil mineral N was absorbed gently by *P. koraiensis*, and it was absorbed rapidly by *B. platyphylla* from May to August, and its peak period was late June.

Key words original broadleaved *Pinus koraiensis* forest; secondary forest; mineral N; absorption

红松(*Pinus koraiensis*)是我国温带林区森林群落的优势种和建群种,又是极具经济价值的用材树

收稿日期: 2013-03-06 修回日期: 2013-05-20
基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金项目(DL12BA03)。
第一作者: 郝敬梅, 博士生。主要研究方向: 森林土壤学。Email: haosdyt2011@126.com 地址: 150040 黑龙江省哈尔滨市和兴路 26 号东北林业大学林学院。
责任作者: 张韫, 博士, 讲师。主要研究方向: 森林土壤学与植物营养学。Email: rowena_zy@163.com 地址: 同上。
本刊网址: <http://journal.bjfu.edu.cn>

种。由于长期以来大规模的掠夺式开发,目前除极少数自然保护区外,原始阔叶红松林已基本消失,取而代之的是温带阔叶次生林。这个退化演替过程往往造成包括土壤氮营养条件在内的生境演变。很多研究表明,从北方针叶林至热带雨林,酸性、弱酸性原始森林土壤中 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 供应大都远高于 $\text{NO}_3^- \text{-N}$, $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 相对和绝对的过低现象在原始针叶林或演替后期阶段的稳定系统中尤为明显^[1-7];而被干扰森林立地土壤 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 供应优势明显^[8]。此外研究还发现,不同森林群落获取土壤氮素的行为模式也存在很大差别,能够适应被干扰的立地条件的植物具有喜硝性,而演替晚期的耐阴植物(特别是某些针叶树种)对 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 具有明显的偏好性^[9-10]。

目前,关于不同森林群落土壤矿质氮特征以及林木氮吸收的研究较多^[11-14],但是关于原始阔叶红松林、次生林土壤矿质氮特征与红松、白桦(*Betula platyphylla*)等树种吸收反应关系的动态研究资料仍然相对匮乏。本文以原始阔叶红松林、次生林土壤 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 与 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 为研究对象,分析 2 林地土壤矿质氮供应水平与组成差异动态,并选择红松、白桦分别作为顶级群落优势树种和退化演替群落先锋树种的代表植物,对 2 树种氮素获取行为模式进行连续研究,旨在从营养生态学角度探讨不同森林群落土壤氮素供需特征,为改良我国温带森林生态系统结构和功能提供氮营养方面的理论依据。

1 研究地概况与研究方法

1.1 研究地概况

研究地位于凉水国家级自然保护区,行政区划属于黑龙江省伊春市,地理坐标 E 128°48′30″~128°55′50″,N 47°07′39″~47°14′22″。温带大陆性季风气候,冬长夏短,年均气温 -0.3℃,年均降水量约 680 mm,年均蒸发量约 800 mm,无霜期 100~120 d。低山丘陵地貌,地带性土壤为暗棕壤。研究样地分别设置于原始阔叶红松林(顶级植物群落)与次生林。其中,原始阔叶红松林研究样地内乔木树种主要有红松(约占 60%)、裂叶榆(*Ulmus laciniata*)、臭松(*Abies nephrolepis*)、色木槭(*Acer mono*)、簇毛槭(*Acer barbinerve*)、糠椴(*Tilia mandshurica*)、紫椴(*T. amurensis*)、大青杨(*Populus ussuriensis*)等,郁闭度 0.85,地表草本以薹草(*Carex* spp.)为优势种群,盖度 >0.9;土壤(A 层)有机质含量 13.34%,全氮量 0.56%,pH 值 5.48。次生林研究样地内乔木树种主要有白桦、山杨(*Populus davidiana*)、色木槭、臭松、鱼鳞云杉(*Picea jezoensis*)等,郁闭度 0.8,地表草本以薹草为优势种群,盖

度 >0.7;土壤(A 层)有机质含量 11.21%,全氮量 0.52%,pH 值 5.57。

1.2 土壤样品采集

采用原位顶盖埋管法进行土壤样品采集^[15]。分别于原始阔叶红松林地和次生林地设置 5 m×5 m 样方,对角线样带法布点,每点再设 1 m×1 m 小样方,随机埋设培养管。4—10 月,每月下旬于每个小样方内随机取出 2 个培养管中的土壤样品,放入装有冰块保温箱,随即带回实验室,立即测定土壤 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 含量。

1.3 红松、白桦氮吸收估测

在原始阔叶红松林、次生林研究样地,分别选择 3 株生长较一致的红松和白桦亚优势木,挂牌标记,作为固定样株。4—10 月连续观测生长因子(叶量、叶面积、净光合速率等)并分析不同器官氮含量动态,生长结束后测定各器官年生长量,通过函数模型模拟各器官生物量及生长量动态^[16]。根据各器官氮含量动态和生长量动态推算红松、白桦(地上部)氮积累量,近似地表达其氮吸收反应。具体采样方法如下^[16]:

样枝叶、小枝样品均采自树冠中上部枝条,方向为主冠方向,若无主冠方向,则取向阳;将样株整段枝条取下,逐项分解(红松分解为当年生叶、1 年生叶、多年生叶、当年枝、1 年枝,白桦分解为活体叶、当年枝、1 年枝、2 年枝),收集地表凋落叶。为避免样株过度破坏,多年生枝仅在生长结束后进行生物量调查时取样,将不同粗度多年生枝按照自然比例混合,制备混合样品。干材、干皮采用钢制手动螺旋钻孔器取样,取样高度 1.3 m,钻孔深度 1.5 cm,分开干材与干皮(清除树皮外部死皮),并将取样孔蜡封。

1.4 指标测定

土壤 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 含量在取样后立即测定, $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 含量测定采用靛酚兰比色法^[17], $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 含量测定采用紫外分光光度法^[17]。红松、白桦各器官样品杀青后,烘干、粉碎、保存,氮含量测定采用凯氏法^[18]。

1.5 数据处理

采用 Excel 2007 与 SPSS 17.0 软件进行数据统计分析。

2 结果与分析

2.1 原始阔叶红松林、次生林土壤矿质氮数量特征与组成特征

原始阔叶红松林、次生林土壤矿质氮数量特征与组成特征因植被类型和季节因素而异。原始阔叶

红松林研究表明(图1):1)4—10月,土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量类似“余弦”波动,6、9月分别达到最小值3.95 mg/kg 和最大值14.50 mg/kg;9、10月与5、6、7、8月差异显著($P < 0.05$)。2)4—8月,土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量变化与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 相似,9、10月显著下降;8月与6、9、10月差异显著($P < 0.05$)。3)土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量始终占相对优势,且其优势度因季节而异, $\text{NH}_4^+\text{-N}/\text{NO}_3^-\text{-N}$ 分别为1.41、2.80、2.90、1.30、1.00、7.80、13.84,这说明原始阔叶红松林土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 优势在夏季逐渐减弱,在秋季明显增强。

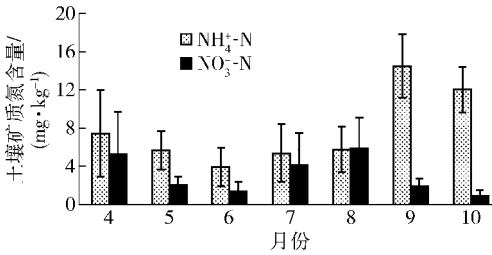


图1 原始阔叶红松林土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 与 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量动态
Fig. 1 Soil $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and $\text{NO}_3^-\text{-N}$ content in the original broadleaved *P. koraiensis* forest

与原始阔叶红松林研究结果不同。次生林研究表明(图2):1)5月土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量下降至最小值而后小幅升高,至9、10月达最大值;9、10月与其他时段差异显著($P < 0.05$)。2)土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量逐渐升高,至7月达最大值7.85 mg/kg,而后迅速下降,至10月达最小值0.26 mg/kg;7月与4、8、9、10月差异显著($P < 0.05$)。3)4、8、9、10月土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 占优势, $\text{NH}_4^+\text{-N}/\text{NO}_3^-\text{-N}$ 分别为1.94、1.75、8.67、41.27,5、6、7月土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 占优势, $\text{NH}_4^+\text{-N}/\text{NO}_3^-\text{-N}$ 分别为0.66、0.77、0.51,这说明次生林土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 与 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 优势存在明显的季节性。

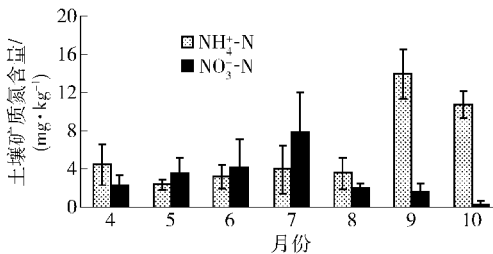


图2 次生林土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 与 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量动态
Fig. 2 Soil $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and $\text{NO}_3^-\text{-N}$ content in the secondary forest

比较原始阔叶红松林、次生林土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 与 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 数量特点发现(图1、2):1)观测时段内原始阔叶红松林土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量均高于次生林,其中5月2林地差异显著($P < 0.05$);2)5、6、7月原始阔叶红松林土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量低于次生林,其他时段则高于次生林,其中8月2林地差异显著($P < 0.05$)。

2.2 红松、白桦氮吸收动态

时间序列上红松各器官氮含量波动表现不一(表1)。当年生针叶与小枝新生伊始氮含量最高,7、8月氮含量迅速下降20%以上,9、10月小幅升高;其中,当年生针叶6月与其他时段差异显著($P < 0.05$),当年生枝5月与其他时段差异显著($P < 0.05$)。1年生针叶氮含量4、5月较高,6、7、8月下降至全年最低水平,9、10月小幅升高;其中4、5月与6、7、8月差异显著($P < 0.05$),1年生枝5月氮含量上升至最大值,6、7、8月逐渐下降,9、10月小幅上升,其中4、5月与其他多数时段差异显著($P < 0.05$,4月与6月差异不显著)。多年生针叶氮含量沿时间序列持续下降,各时段差异不显著。多年生枝、干皮、干材氮含量4、5、6月较高,7、8、9月下降至全年最低水平,10月回升至观测前期水平,各时段差异不显著。

时间序列上白桦各器官氮含量波动也表现不一

表1 红松各器官氮含量动态

Tab. 1 Dynamics of N content of different organs in *P. koraiensis* g·kg⁻¹

器官	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月
叶	当年生		19.30 ± 1.54 ^a	15.09 ± 1.82 ^b	15.50 ± 0.99 ^b	16.70 ± 0.68 ^b	16.71 ± 0.70 ^b
	1年生	17.04 ± 1.66 ^a	16.96 ± 0.51 ^a	15.02 ± 0.60 ^b	14.68 ± 0.68 ^b	14.81 ± 0.95 ^b	16.09 ± 0.76 ^{ab}
	多年生	14.31 ± 1.63 ^a	14.10 ± 0.77 ^a	13.15 ± 1.01 ^a	12.92 ± 0.12 ^a	12.56 ± 0.90 ^a	12.51 ± 1.63 ^a
	凋落叶	6.52 ± 0.97	6.52 ± 0.97	6.52 ± 0.97	6.52 ± 0.97	6.52 ± 0.97	6.52 ± 0.97
枝	当年生		12.76 ± 1.22 ^a	8.70 ± 0.70 ^b	7.35 ± 1.25 ^{bc}	6.59 ± 0.72 ^c	7.40 ± 0.42 ^{bc}
	1年生	9.46 ± 0.98 ^a	13.03 ± 1.81 ^b	8.39 ± 0.78 ^{ac}	6.93 ± 0.60 ^c	6.38 ± 1.49 ^c	6.80 ± 1.26 ^c
	多年生	4.00 ± 0.87 ^a	4.03 ± 0.53 ^a	3.89 ± 0.82 ^a	3.83 ± 0.68 ^a	3.77 ± 0.04 ^a	3.81 ± 0.81 ^a
	干皮	4.62 ± 0.57 ^a	4.66 ± 0.36 ^a	4.46 ± 0.81 ^a	4.35 ± 0.39 ^a	4.26 ± 0.25 ^a	4.31 ± 0.37 ^a
	干材	1.32 ± 0.03 ^a	1.33 ± 0.10 ^a	1.30 ± 0.27 ^a	1.28 ± 0.20 ^a	1.27 ± 0.45 ^a	1.28 ± 0.25 ^a

注:表中不同字母表示差异显著。凋落叶氮含量采用全观测期混合样测定。表2同此。

(表 2)。活体叶 5 月氮含量最高,而后持续下降,8 月氮含量仅为 5 月的 63.42%;5 月与 6、7、8 月差异显著($P<0.05$)。当年生小枝、1 年生枝、2 年生枝最初测定时间点氮含量最高,而后迅速下降,至 8 月氮含量仅为最高值的 61.26%~72.36%,9 月小幅升高;其中,当年生枝 5 月与其他时段差异显著

($P<0.05$),1 年生枝 4 月与其他时段差异显著($P<0.05$),2 年生枝 4 月与 5、6、7、8 月差异显著($P<0.05$)。多年生枝、干皮、干材 4 月氮含量较高,5 月迅速下降至全年最低水平,约为 4 月氮含量的 80%~85%,而后持续增加,至 9 月回升至 4 月水平,各时段差异不显著。

表 2 白桦各器官氮含量动态
Tab.2 Dynamics of N content of different organs in *B. platyphylla* g·kg⁻¹

器官		4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月
叶	活体叶		31.90 ± 3.51 ^a	23.13 ± 2.76 ^b	21.94 ± 2.91 ^b	20.23 ± 3.08 ^b	
	凋落叶			12.42 ± 1.54	12.42 ± 1.54	12.42 ± 1.54	12.42 ± 1.54
枝	当年生		19.00 ± 2.06 ^a	12.18 ± 1.79 ^b	12.00 ± 1.98 ^b	11.46 ± 1.28 ^b	12.93 ± 1.35 ^b
	1 年生	13.02 ± 1.95 ^a	8.74 ± 0.82 ^b	8.44 ± 0.79 ^b	8.15 ± 0.42 ^b	8.78 ± 0.68 ^b	9.20 ± 0.75 ^b
	2 年生	9.66 ± 1.52 ^a	6.74 ± 1.12 ^b	6.43 ± 0.59 ^b	6.54 ± 0.60 ^b	6.99 ± 1.07 ^b	8.09 ± 0.67 ^{ab}
	多年生	4.97 ± 0.40 ^a	4.21 ± 0.23 ^a	4.43 ± 0.74 ^a	4.64 ± 1.25 ^a	4.83 ± 0.65 ^a	5.00 ± 0.46 ^a
	干皮	5.90 ± 0.68 ^a	4.77 ± 0.34 ^a	5.10 ± 0.94 ^a	5.36 ± 0.82 ^a	5.67 ± 0.91 ^a	5.91 ± 0.74 ^a
	干材	1.39 ± 0.22 ^a	1.20 ± 0.36 ^a	1.25 ± 0.23 ^a	1.32 ± 0.14 ^a	1.36 ± 0.26 ^a	1.40 ± 0.15 ^a

红松、白桦氮素吸收模式截然不同(图 3)。4—10 月,红松不断从土壤中吸收氮素,直至 10 月中下旬,土壤开始冻结,光合作用消失,氮素吸收基本停滞;红松在 6 个月的生长季中,持续平缓地吸收土壤氮素,氮素的吸收峰期不明显。5—8 月,白桦大量吸收土壤氮素,至 8 月中下旬,氮素吸收基本停滞;白桦较短的 4 个月生长季中,6 月中下旬达到氮素吸收峰期。

叶红松林土壤 NH_4^+ -N 含量均高于次生林,5、6、7 月原始阔叶红松林土壤 NO_3^- -N 含量低于次生林,其他时段高于次生林(图 1、2)。演替晚期森林土壤低 pH 值对硝化作用的抑制,低 NH_4^+ 可给性对 NO_3^- 生成的限制,树干淋洗或凋落物分解释放的化感物质(如单宁或多元酚类)对硝化微生物活性的抑制等因素^[1]可能是导致原始阔叶红松林土壤 NH_4^+ -N 含量较高的主要原因。这与以往研究结果相似,如:美国黄松(*Pinus ponderosa*)林土壤 NH_4^+ -N 含量为 2.1 $\mu\text{g/g}$, NO_3^- -N 含量仅为 0.1 $\mu\text{g/g}$ ^[2];兴安落叶松(*Larix gmelinii*)林土壤 NH_4^+ -N 含量为 15.6 $\mu\text{g/g}$, NO_3^- -N 含量为 2.3 $\mu\text{g/g}$ ^[16];此外,美国新墨西哥州针叶混交林、云冷杉(*Picea-Abies* spp.)林,美国西北部花旗松(*Pseudotsuga menziesii*)林、银枞(*Abies alba*)林,以及我国长白山阔叶红松林研究也有相似的结论^[2-5]。

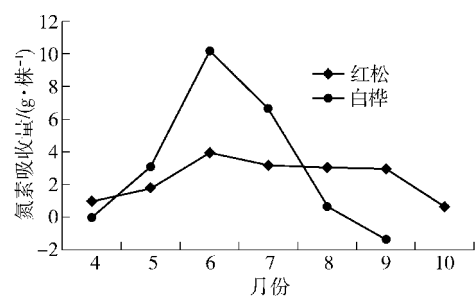


图 3 红松、白桦(地上部)氮吸收动态
Fig.3 N absorption dynamics of *P. koraiensis* and *B. platyphylla* (aboveground parts)

3 结论与讨论

不同森林群落土壤 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N 供应水平存在显著差异,并且存在明显的季节动态。这在西双版纳部分热带森林土壤^[19]和小兴安岭部分温带森林土壤^[12]的研究中已经证实。本文对原始阔叶红松林和次生林土壤 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N 含量动态的研究发现,尽管一些时段 2 林地并未达到统计学显著水平,但其均值规律仍有迹可循:观测期内原始阔

相对于数量特征,原始阔叶红松林、次生林土壤矿质氮组成特征更为鲜明:尽管原始阔叶红松林土壤 NH_4^+ -N/ NO_3^- -N 随季节变化呈现“夏低秋高”的波动(图 1),但是 NH_4^+ -N 始终占相对优势;与原始阔叶红松林研究结果不同,次生林土壤优势氮形态呈现明显的季节性,即 4、8、9、10 月 NH_4^+ -N 占优势,5、6、7 月 NO_3^- -N 占优势(图 2)。相比原始阔叶红松林,次生林土壤与凋落物 C/N 更低,更有利于有机质矿化(特别是 5、6、7 月温度条件适宜),为硝化作用提供了相对充足的 NH_4^+ 源;同时,次生林土壤与凋落物(特别是凋落物)相对较高的 pH 值(本文

相同样地测定)促进硝化微生物活性,硝化速率加快^[20]。

植物组织中的矿质养分含量状况直接反映生境养分供给能力^[21]。当土壤养分含量丰富或养分有效性高时,根系和叶片等器官氮含量与养分供给水平不成正比,但当其成为限制性资源时,养分含量相应降低^[22]。本文研究发现,红松、白桦各器官氮含量似乎与原始阔叶红松林、次生林土壤矿质氮含量没有直接联系(图 1、2;表 1、2);然而,原始阔叶红松林、次生林土壤矿质氮含量与红松、白桦氮吸收的动态模式极为相似(图 1、2、3),红松、白桦氮吸收反应稍滞后于各自林地土壤矿质氮变化(不包括 9、10 月,此时段林地大量凋落物矿化导致土壤 NH_4^+ -N 激增,而植物光合作用下降)。因此推测,一定范围内原始阔叶红松林、次生林土壤矿质氮供应水平决定了红松、白桦氮吸收量。此外,原始阔叶红松林与次生林土壤矿质氮组成特征也可能影响红松、白桦氮吸收。有研究表明, NH_4^+ -N 与 NO_3^- -N 分别是红松、白桦的偏选性氮素^[23-24],这与生长季原始阔叶红松林(4—10 月)及次生林(5—7 月)土壤优势氮形态一致。

参 考 文 献

[1] 崔晓阳,宋金凤. 原始森林土壤 $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ 生境特征与某些针叶树种的适应性[J]. 生态学报,2005, 25(11): 3082-3092.

[2] VITOUSEK P M, GOSZ J R, GRIER C C, et al. A comparative analysis of potential nitrification and nitrate mobility in forest ecosystems[J]. Ecological Monographs, 1982, 52(2):155-177.

[3] STARK J M, HART S C. High rates of nitrification and nitrate turnover in undisturbed coniferous forests[J]. Nature, 1997,385: 61-64.

[4] 李玉文. 森林群落 N 循环过程化学生态研究 I [J]. 生态学报, 1995,15(增刊 B):31-40.

[5] 李玉文. 森林群落 N 循环过程化学生态研究 II [J]. 生态学报, 1995,15(增刊 B):148-159.

[6] 沙丽清,曹敏. 西双版纳热带季雨林林冠下及林窗土壤养分对比研究[J]. 东北林业大学学报,1999,27(6): 78-80.

[7] 沙丽清,孟盈,冯志立,等. 西双版纳不同热带森林土壤氮矿化和硝化作用研究[J]. 植物生态学报,2000,24(2):152-156.

[8] 曲明华. 温带森林土壤有效态氮营养生境演变特征[D]. 哈尔滨:东北林业大学,2005:41-42.

[9] ROTHSTEIN D E, CREGG B. Effects of nitrogen form on nutrient uptake and physiology of Fraser fir (*Abies fraseri*) [J]. Forest Ecology and Management, 2005,219:69-80.

[10] KRONZUCHER H J, SIDDIQI M Y, GLASS A D M. Conifer root discrimination against soil nitrate and the ecology of forest succession[J]. Nature,1997,385:59-61.

[11] REICH P B, GRIGAL D F, ABER J D. Nitrogen mineralization and productivity in 50 hardwood and conifer stands on diverse soils [J]. Ecology,1997,78:335-347.

[12] 许翠清,陈立新,颜永强,等. 温带森林土壤铵态氮、硝态氮季节动态特征[J]. 东北林业大学学报,2008,36(10): 19-21.

[13] 欧阳学军,周国逸,魏识广,等. 南亚热带森林植被恢复演替序列的土壤有机碳氮矿化[J]. 应用生态学报, 2007,18(8): 1688-1694.

[14] 王琳琳,陈立新,刘振花,等. 红松阔叶混交林不同演替阶段土壤肥力与林木生长的关系[J]. 中国水土保持科学,2008,6(4):59-65.

[15] 苏波,韩兴国,渠春梅,等. 东灵山油松纯林和油松-辽东栎针阔混交林土壤氮素矿化/硝化作用研究[J]. 植物生态学报, 2001,25(2):195-203.

[16] 崔晓阳. 东北森林氮素营养的生态学[M]. 哈尔滨:东北林业大学出版社,1998:113-153.

[17] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业科技出版社,1999: 129-130.

[18] 张韞. 土壤·水·植物理化分析教程[M]. 北京:中国林业出版社,2011:222-228.

[19] 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[J]. 植物生态学报,2001, 25(1):99-104.

[20] 刘宝东. 实验室培养条件下森林暗棕壤的氮矿化特征[D]. 哈尔滨:东北林业大学,2006:38-39.

[21] ADAMAS M B, CAMPBELL R G, ALLEN H L, et al. Root and foliar nutrient concentrations in loblolly pine: effects of season, site and fertilization[J]. Forest Science, 1987, 33: 984-996.

[22] HÖGBERG P, HÖGBOM L, SCHINKEL H. Nitrogen-related root variables of trees along an N-deposition gradient in Europe[J]. Tree Physiology, 1998, 18: 823-828.

[23] 张韞,崔晓阳. 白桦幼苗 $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ 吸收特征的研究[J]. 北京林业大学学报,2011,33(3):26-30.

[24] 张韞,崔晓阳. 不同 $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ 配比作用下红松幼苗的氮吸收和同化特征[J]. 北京林业大学学报,2011,33(5): 61-64.

(责任编辑 赵 勃)