

小兴安岭原始红松混交林林隙土壤不同形态氮含量*

姜 一^{1,2} 陈立新^{1**} 段文标¹ 步 凡¹ 孙双红¹ 李帆帆¹ 徐一凡³

(¹东北林业大学林学院, 哈尔滨 150040; ²黑龙江省鑫农农业发展有限公司, 黑龙江齐齐哈尔 164800; ³桂林理工大学, 广西桂林 541004)

摘 要 以小兴安岭地区红松混交林(椴树红松混交林、云冷杉红松混交林和枫桦红松混交林)大、中、小3个林隙为研究对象,对林隙和郁闭林分土壤铵态氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)、硝态氮($\text{NO}_3^-\text{-N}$)、可溶性全氮(TSN)、可溶性有机氮(SON)、微生物氮(MBN)和全氮(TN)含量进行分析,探讨不同混交林林隙中土壤氮形态特征。结果表明:林隙和郁闭林分土壤以有机氮为主,占TN 98%以上。林隙中土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量高于 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量;SON含量高于 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量。红松混交林中土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、SON和MBN含量在大、小林隙之间以及林隙与郁闭林分之间差异显著,尤其是MBN含量表现为郁闭林分>小林隙>中林隙>大林隙,与林隙面积呈极显著负相关;3个林型中 $\text{NO}_3^-\text{-N}/\text{TN}$ 和 MBN/TN 随着林隙面积增大而减小;椴树红松混交林和云冷杉红松混交林林隙中 $\text{NH}_4^+\text{-N}/\text{TN}$ 、 TSN/TN 和 SON/TN 随林隙面积增大而减小,枫桦红松混交林林隙中随林隙面积增大而增大。林隙和郁闭林分中土壤TSN与SON均呈现极显著正相关;林隙土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 与 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和MBN呈显著相关,但在郁闭林中未表现出此关系。

关键词 林隙;郁闭林分;铵态氮;硝态氮;可溶性有机氮;微生物氮

中图分类号 S7143.2;S718.55 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2014)12-3374-07

Concentrations of different nitrogen forms in gaps of natural *Pinus koraiensis* mixed forest in Xiao Xing'anling Mountains. JIANG Yi¹, CHEN Li-xin^{1**}, DUAN Wen-biao¹, BU Fan¹, SUN Shuang-hong¹, LI Fan-fan¹, XU Yi-fan² (¹College of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China; ²Heilongjiang Xinnong Agricultural Development Limited Company, Qiqihar 164800, Heilongjiang, China; ³Guilin University of Technology, Guilin 541004, Guangxi, China). *Chinese Journal of Ecology*, 2014, 33(12): 3374–3380.

Abstract: The concentrations of different nitrogen (N) forms in soil (ammonium N ($\text{NH}_4^+\text{-N}$), nitrate N ($\text{NO}_3^-\text{-N}$), total soluble N (TSN), soluble organic nitrogen N (SON), microbial biomass N (MBN) and total N (TN)) were investigated under gaps with different sizes in three Korean pine (*Pinus koraiensis*) mixed forests (*i. e.*, Tilia-Korean pine mixed forest, spruce-fir-Korean pine mixed forest, and birch-Korean pine mixed forest) in Xiao Xing'anling Mountains. The results showed that organic N was the dominant form of TN, accounting for more than 98% of TN. Concentration of $\text{NO}_3^-\text{-N}$ was higher than that of $\text{NH}_4^+\text{-N}$, and SON concentration were higher than $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and $\text{NO}_3^-\text{-N}$. Concentrations of $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$, SON and MBN showed significant differences between large and small forest gaps and between forest gaps and closed forests. Especially, MBN was in the order of closed forests > small gap > medium gap > large gap, showing a significant negative correlation with gap size. $\text{NO}_3^-\text{-N}/\text{TN}$ and MBN/TN decreased with the increase of gap size in the three forests. $\text{NH}_4^+\text{-N}/\text{TN}$, TSN/TN and SON/TN decreased with the increase of gap size in the Tilia-Korean pine mixed forest gaps and spruce-fir-Korean pine mixed forest gaps, but increased with the increase of gap size in the birch-Korean pine mixed forest gaps. Significant correlations were observed between TSN and SON in forest gaps and closed forests. $\text{NH}_4^+\text{-N}$ was significantly correlated with $\text{NO}_3^-\text{-N}$ and MBN in forest gaps,

* 国家自然科学基金项目(31270666)资助。

** 通讯作者 E-mail: lxchen88@163.com

收稿日期: 2014-04-25 接受日期: 2014-08-18

but such relationships were not found in the closed forests.

Key words: forest gap; closed forest; ammonium nitrogen; nitrate nitrogen; soluble organic nitrogen; microbial biomass nitrogen.

林隙是森林中因较大树木死亡、大的树干和树枝自然老龄死亡及偶然因素(如火灾,干旱等)导致成熟阶段优势树种死亡而形成的森林冠层不连续性的空隙的现象(Watt, 1974; Runkle, 1981)。对于林隙的研究,目前国内外学者主要集中在林隙大小、形成方式、形成年龄、林隙内群落、形成木特征、林隙模型(Kern *et al.*, 2013)及林隙估算面积(赵桂玲, 2013; Otto *et al.*, 2013),不同林隙大小气温、光合有效辐射、相对湿度等因子的变化(Kern & Duan, 2013)等方面,对林隙内土壤养分的报道相对较少。

林隙影响着林隙中心、郁闭林分、边缘带及林下的光照、温度和土壤水分,还影响植物的分布和生长,从而影响土壤养分的含量和比例(朱教君等, 2009; 刘少冲等, 2012; Kern *et al.*, 2013)。Denslow (1998)研究表明,土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量与林隙大小呈正相关,并且林隙内高于郁闭林分;沙丽清等(1999)研究西双版纳热带季节雨林得出,林下土壤有机碳、全氮、全磷的质量分数显著高于林隙土壤,而刘聪等(2011)的研究表明,林隙土壤有机碳、全氮和全磷质量分数与郁闭林分无显著差异。可见,不同森林类型研究结果不一致,目前缺乏对红松混交林不同大小林隙下土壤氮形态的研究。因此,本文研究小兴安岭地区不同大小原始红松混交林(椴树红松混交林、云冷杉红松混交林、枫桦红松混交林)林隙之间和郁闭林分之间不同氮形态含量状况,比较林隙对不同氮形态含量的影响,以及各形态氮素之间的相互关系,揭示林隙土壤养分变化特征,为红松混交林林隙更新以及可持续经营提供科学依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

研究区设在黑龙江省伊春市带岭区凉水国家级自然保护区($47^\circ6'\text{N}$ — $47^\circ16'\text{N}$, $128^\circ47'\text{E}$ — $128^\circ57'\text{E}$)的原始红松混交林内,地处欧亚大陆的东缘,具有明显的温带大陆性季风气候特征。地带性土壤为暗棕壤。地带性植被是以红松为主的针阔混交林,属温带针阔叶混交林地带北部亚地带植被,森林覆盖率达98%以上。群落组成以红松(*Pinus koraiensis*)为

主,伴生着冷杉(*Abies nephrolepis*)、云杉(*Picea koraiensis*)、紫椴(*Tilia amurensis*)、糠椴(*T. mandshurica*)、枫桦(*Betula costata*)、裂叶榆(*Ulmus laciniata*)、大青杨(*Populus ussuriensis*)、花楷槭(*Acer ukurunduense*)、青楷槭(*A. tegmentosum*)和五角槭(*A. mono*)等20余种树种,主要下木有刺五加(*Acanthopanax senticosus*)、毛榛子(*Corylus mandshurica*)、珍珠梅(*Sorbaria kirilowii*)、东北山梅花(*Philadelphus schrenkii*)等,草本植物主要有宽山苔草(*Carex siderosticta*)、猴腿蹄盖蕨(*Athyrium maltidentatum*)和小叶芹(*Aegopodium alpestre*)等,藤本植物有山葡萄(*Vitis amurensis*)、五味子(*Schizandra chinensis*)和狗枣猕猴桃(*Actinidia kolomikta*)等。

1.2 样地设置与样品采集

于2012年5月在原始红松林内通过踏查筛选出椴树红松混交林、云冷杉红松混交林、枫桦红松混交林3种林分类型,每个林分类型内选取基本特征相似,按照相对面积的大小分为大、中、小林隙(段文标, 2013; 魏全帅, 2014),利用罗盘和指南针在每个林隙边缘木树冠以外的东、南、西、北方向上选取一个10 m×10 m的郁闭林分作为对照(样地基本情况见表1)。每个林型大中小林隙各一个,并以林隙边缘木树冠为界限划定,紧挨着林隙边缘木树冠以外设置郁闭林样方。每个样地林隙按照“S”取样法选取了东、南、西、北和中5个点,并在林隙外郁闭林分按照东、南、西和北4个方向郁闭林分内选取4个点,采集每个样点(0~10 cm)土壤,密封带回实验室冷藏分析。

1.3 测定方法与数据处理

土壤全氮采用凯氏定氮法(仪器KETUO-KDY9830);土壤硝态氮采用GB中酚二磺酸比色法测定,铵态氮采用靛酚蓝比色法测定(鲍士旦, 2000);可溶性氮采用3%碱性过硫酸钾氧化,紫外/可见分光光度计测定(UV1100),可溶性有机氮=可溶性全氮-(铵态氮+硝态氮)(赵满兴等, 2008);微生物氮采用氯仿熏蒸法(吴金水, 2006)。

采用IBM SPSS Statistics 19.0软件对林隙各氮形态间差异以及林隙与郁闭林间各形态差异进行双因素方差分析(two-way ANOVA),并用Bivariate

表 1 林地基本概况

Table 1 Basic information of different forest stands

林型	林隙	面积 (m ²)	长轴 (m)	短轴 (m)	坡度 (°)	坡向	林隙形成木	边缘木主要树种	针阔株数比	平均树高 (m)	平均胸径 (cm)
椴树红松混交林(Ⅰ)	大林隙	1030.84	37.50	35.00	5	西南	红松(<i>Pinus koraiensis</i>)、椴树(<i>Tilia amurensis</i> and <i>mandshurica</i>)	红松、椴树、花楷槭(<i>Acer ukurunduense</i>)	55 : 45	25.9	62.3
	中林隙	812.79	33.60	30.00	6	东南	红松、椴树	红松、椴树、花楷槭	58 : 32	26.7	57.6
	小林隙	228.74	20.00	18.00	4	东南	红松、椴树、裂叶榆(<i>Ulmus laciniata</i>)	红松、椴树、裂叶榆、五角槭(<i>Acer tegmentosum</i>)	65 : 35	29.6	58.3
云冷杉红松混交林(Ⅱ)	大林隙	783.36	33.04	30.02	3	西南	红松、冷杉(<i>Abies nephrolepis</i>)	红松、冷杉、云杉(<i>Picea koraiensis</i>)、花楷槭	55 : 45	22.6	43.5
	中林隙	412.5	24.14	21.63	2	西南	红松、冷杉、云杉	红松、冷杉、云杉、青楷槭	55 : 45	25.7	48.6
	小林隙	123.77	13.50	11.60	2	西南	红松、云杉	红松、冷杉、云杉、花楷槭、青楷槭(<i>Acer tegmentosum</i>)	82 : 18	19.5	39.6
枫桦红松混交林(Ⅲ)	大林隙	805.49	33.50	30.45	3	西南	红松、枫桦(<i>Betula costata</i>)	红松、枫桦、五角槭	35 : 65	23.2	38.7
	中林隙	502.39	26.58	23.93	2	东南	红松、枫桦	红松、冷杉	41 : 59	25.1	42.4
	小林隙	309.02	20.98	18.65	3	东南	红松、枫桦	红松、枫桦、花楷槭、五角槭	38 : 62	22.9	39.1

Correlations 的 Pearson 做相关分析,图表采用 Sigma-plot 10.0 和 Excel 2007 绘制。

2 结果与分析

2.1 不同林型下林隙土壤氮含量

2.1.1 椴树红松混交林林隙大小对土壤氮素含量的影响 在椴树红松混交林中,大林隙中的铵态氮、硝态氮、可溶性全氮、可溶性有机氮、微生物氮和全氮含量均显著低于郁闭林分(表 2)。中林隙铵态氮、可溶性全氮和可溶性有机氮含量均显著高于郁闭林分,硝态氮和微生物氮含量均显著低于郁闭林分,全氮含量与郁闭林分差异不显著。小林隙铵态氮、硝态氮、可溶性全氮和可溶性有机氮含量显著高于郁闭林分,微生物氮显著低于郁闭林分,全氮含量

与郁闭林分差异不显著($P>0.05$)。

2.1.2 云冷杉红松混交林林隙大小对土壤氮素含量的影响 云冷杉红松混交林大林隙铵态氮、硝态氮和全氮含量,均显著高于郁闭林分含量;可溶性全氮、可溶性有机氮和微生物氮含量显著低于郁闭林分(表 2)。中林隙铵态氮和全氮含量显著高于郁闭林分;硝态氮、可溶性全氮、可溶性有机氮和微生物氮均显著低于郁闭林分。小林隙铵态氮、硝态氮显著高于郁闭林分,可溶性有机氮和微生物氮显著低于郁闭林分,可溶性全氮和全氮含量与郁闭林分差异不显著($P>0.05$)。

2.1.3 枫桦红松混交林林隙大小对土壤氮素含量的影响 大林隙的铵态氮、硝态氮、可溶性全氮、微生物氮和全氮含量均显著低于郁闭林分;可溶性有

表 2 不同形态氮素含量

Table 2 Nitrogen content of different components

林型	林隙	NH ₄ ⁺ -N (mg · kg ⁻¹)	NO ₃ ⁻ -N (mg · kg ⁻¹)	TSN (mg · kg ⁻¹)	SON (mg · kg ⁻¹)	BMN (mg · kg ⁻¹)	TN (g · kg ⁻¹)
Ⅰ	L	5.73 e(9.89 d)	35.26 e(47.94 d)	137.11 c(184.35 bc)	96.11 b(126.52 b)	20.66 e(35.12 c)	6.65 b(9.85 a)
	M	10.31 d(4.81 e)	51.10 bc(87.32 a)	257.63 a(208.65 ab)	196.22 a(116.52 bc)	27.39 de(35.76 c)	6.53 b(7.29 bc)
	S	15.25 c(12.44 c)	121.71 a(81.57 b)	181.90 b(126.06 e)	44.94 cd(32.05 e)	41.81 bc(52.12 b)	7.09 b(6.73 bcd)
Ⅱ	L	9.31 d(2.52 f)	38.50 e(26.64 f)	98.50 d(163.56 cd)	50.69 cd(134.4 b)	28.06 de(80.91 a)	10.17 a(7.92 b)
	M	18.01 a(12.83 ac)	26.18 f(45.16 d)	99.70 d(231.21 a)	55.52 cd(173.22 a)	45.03 ab(78.74 a)	7.49 b(5.45 d)
	S	16.90 b(14.38 a)	45.49 d(34.81 e)	120.19 cd(135.71 de)	57.8 cd(86.52 cd)	52.34 a(66.90 a)	6.63 b(6.31 cd)
Ⅲ	L	4.47 ef(5.41 e)	46.45 cd(70.82 c)	123.37 cd(137.38 de)	72.45 bc(61.15 de)	29.47 de(42.04 bc)	6.49 b(6.72 bcd)
	M	3.05 fg(4.66 e)	45.35 d(71.13 c)	116.12 cd(127.42 e)	67.71 bcd(51.63 de)	34.31 c(37.99 bc)	6.18 b(5.90 d)
	S	2.26 g(4.48 e)	54.21 b(70.67 c)	97.02 d(125.17 e)	40.56 d(50.02 e)	41.21 bc(47.00 bc)	6.55 b(5.69 d)

Ⅰ:椴树红松混交林;Ⅱ:云冷杉红松混交林;Ⅲ:枫桦红松混交林;NH₄⁺-N:铵态氮;NO₃⁻-N:硝态氮;TSN:可溶性全氮;SON:可溶性有机氮;BMN:微生物氮;TN:全氮;L:大林隙;M:中林隙;S:小林隙;括号外数据为林隙氮含量,括号内为郁闭林氮含量。下同。同列小写字母不同表示林隙间及郁闭林间各形态氮含量差异显著($P<0.05$)。

机氮显著高于郁闭林分(表2)。中林隙中铵态氮、硝态氮、可溶性全氮和微生物氮显著低于郁闭林分,可溶性有机氮和全氮含量显著高于郁闭林分;小林隙中铵态氮、硝态氮、可溶性全氮、可溶性有机氮和微生物氮显著低于郁闭林分,全氮显著高于郁闭林分。

2.1.4 不同林型间土壤各形态氮含量比较 如表2所示,同林型林隙同一形态氮含量的比较,椴树红松混交林林隙中土壤铵态氮、硝态氮和微生物氮均有一致趋势:小林隙>中林隙>大林隙。可溶性全氮和可溶性有机氮的含量表现出相同的趋势为中林型>小林隙>大林隙,大中小林隙全氮含量差异不显著。云冷杉红松混交林林隙土壤铵态氮含量随不同林隙变化差异较大,其含量大小顺序为中林隙>小林隙>大林隙;硝态氮含量差异较大,大小顺序为:小林隙>大林隙>中林隙;可溶性全氮和可溶性有机氮在大中小林隙变化差异不显著($P>0.05$);微生物氮含量大小顺序为小林隙>中林隙>大林隙;全氮含量大小顺序为大林隙>中林隙>小林隙。枫桦红松混交林林隙土壤铵态氮和可溶性有机氮含量随林隙变化差异较大,大小顺序为大林隙>中林隙>小林隙;硝态氮含量在大林隙与小林隙差异显著,在大林隙和中林隙之间以及中林隙和小林隙之间差异不显著;可溶性全氮在小林隙中显著低于大林隙和中林隙,全氮含量小林隙显著大于大林隙和中林隙;微生物氮含量大小顺序为小林隙>中林隙>大林隙。

同一形态氮含量在不同林型林隙间分析发现,土壤铵态氮、硝态氮、可溶性全氮、可溶性有机氮和微生物氮差异显著,土壤全氮差异不显著。不同林型相同林隙大小比较发现,土壤铵态氮在不同林型之间大小顺序为云冷杉红松混交林>椴树红松混交林>枫桦红松混交林;硝态氮含量在大林隙中表现

出枫桦红松混交林>云冷杉红松混交林>椴树红松混交林,中林隙和小林隙则为椴树红松混交林>枫桦红松混交林>云冷杉红松混交林;椴树红松混交林林隙可溶性全氮和可溶性有机氮含量显著高于枫桦红松混交林和云冷杉红松混交林;大林隙和小林隙中3个林型间土壤微生物氮差异不显著,中林隙中云冷杉红松混交林>枫桦红松混交林>椴树红松混交林。

2.2 土壤不同组分氮含量所占的比例

如表3所示,3种林型中,大中小林隙及其所对应的郁闭林分无机氮占比例较少,铵态氮范围在0.03%~0.28%,硝态氮0.34%~1.72%,无机氮主要以硝态氮为主,占无机氮比例中椴树红松混交林可达82.90%~94.78%,云冷杉红松混交林为56.04%~91.36%,枫桦红松混交林为91.22%~96.01%。土壤氮素主要以有机氮为主,3种林型平均土壤氮素中有机氮分别为98.88%、99.30%和98.97%。可溶性全氮在土壤氮素中占相当大比例,3种林型分别为1.87%~3.94%、0.97%~4.24%和1.48%~2.20%。3种林型中可溶性有机氮占土壤氮素的比例分别为0.48%~3.00%、0.50%~3.18%和0.62%~1.10%;椴树红松、云冷杉红松和枫桦红松混交林林隙以可溶性有机氮为主,分别占可溶性全氮为56.99%、52.33%和52.95%;云冷杉红松混交林郁闭林以可溶性有机氮为主,占可溶性全氮73.62%,椴树红松和枫桦红松混交林郁闭林以无机氮为主。微生物氮占全氮比例在3个林型中的变化基本稳定,差异不大,微生物氮也属于可溶性全氮中的一部分,3种林型中土壤微生物氮占可溶性全氮比例为21.04%、41.67%和32.31%。

如表3所示,椴树红松混交林林隙土壤铵态氮、硝态氮和微生物氮占土壤全氮的比例,云冷杉红松

表3 不同组分氮占全氮的比例(%)
Table 3 Ratio of different components of nitrogen to total nitrogen

林型	林隙	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	TSN	SON	BMN
I	L	0.09(0.10)	0.53(0.49)	2.06(1.87)	1.44(1.28)	0.31(0.36)
	M	0.16(0.07)	0.78(1.20)	3.94(2.86)	3.00(1.60)	0.42(0.49)
	S	0.22(0.18)	1.72(1.21)	2.57(1.87)	0.63(0.48)	0.59(0.77)
II	L	0.09(0.03)	0.38(0.34)	0.97(2.07)	0.50(1.70)	0.28(1.02)
	M	0.24(0.24)	0.40(0.83)	1.51(4.24)	0.84(3.18)	0.68(1.44)
	S	0.25(0.23)	0.63(0.55)	1.67(2.15)	0.80(1.37)	0.73(1.06)
III	L	0.07(0.08)	0.72(1.05)	1.90(2.04)	1.12(0.91)	0.45(0.63)
	M	0.05(0.08)	0.73(1.21)	1.88(2.16)	1.10(0.88)	0.56(0.64)
	S	0.03(0.08)	0.83(1.24)	1.48(2.20)	0.62(0.88)	0.63(0.83)

表 4 红松混交林土壤氮素不同组分之间的相关性
Table 4 Correlation of different components of nitrogen in different mixed forests

林型	氮形态	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	TSN	SON	BMN	TN
I	NH ₄ ⁺ -N	1					
	NO ₃ ⁻ -N	0.929**(-0.314)	1				
	TSN	0.347(-0.852**)	0.030(-0.090)	1			
	SON	-0.310(-0.653*)	-0.605*(-0.455)	0.778** (0.927**)	1		
	BMN	0.855** (0.622*)	0.927** (0.334)	0.122(-0.838**)	-0.484(-0.878**)	1	
	TN	0.206(0.011)	0.251(-0.848**)	-0.144(0.294)	-0.273(0.585*)	0.350(-0.476)	1
II	NH ₄ ⁺ -N	1					
	NO ₃ ⁻ -N	-0.258(0.702**)	1				
	TSN	0.273(0.110)	0.462(0.613*)	1			
	SON	0.189(-0.144)	-0.013(0.389)	0.846** (0.964**)	1		
	BMN	0.733** (-0.414)	0.108(-0.052)	0.150(0.209)	-0.124(0.292)	1	
	TN	-0.913** (-0.802**)	-0.065(-0.869**)	-0.465(-0.302)	-0.239(-0.061)	-0.840** (0.097)	1
III	NH ₄ ⁺ -N	1					
	NO ₃ ⁻ -N	-0.639*(-0.228)	1				
	TSN	0.859** (0.852**)	-0.871** (0.126)	1			
	SON	0.798** (0.899**)	-0.938** (-0.146)	0.987** (0.963**)	1		
	BMN	-0.832** (-0.198)	0.719** (0.108)	-0.923** (-0.056)	-0.833** (-0.077)	1	
	TN	0.100(0.873**)	0.409(-0.034)	-0.133(0.892**)	-0.203(0.893**)	0.027(-0.076)	1

* $P<0.05$; ** $P<0.01$ 。下同。

表 5 林隙面积与各形态氮含量关系
Table 5 Relationship between nitrogen forms and gap sizes

	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	TSN	SON	BMN	TN
面积	-0.464(-0.510)	-0.421(-0.061)	0.212(0.413)	0.530(0.398)	-0.958**(-0.362)	0.130(0.750*)

数据为相关系数 r 。

混交林的铵态氮、硝态氮、可溶性全氮、可溶性有机氮和微生物氮占土壤全氮的比例均表现出随着林隙面积增大而减小的趋势。枫桦红松混交林林隙土壤硝态氮和微生物氮占土壤全氮的比例随林隙面积增大而减小趋势,铵态氮、可溶性全氮和可溶性有机氮所占土壤全氮比例则为增大趋势。但郁闭林各形态氮含量占土壤全氮的比例随林隙面积的变化并未表现出类似的规律。

2.3 土壤各形态氮之间的关系

如表 4 所示,3 个林型的林隙和郁闭林中可溶性全氮与可溶性有机氮均呈极显著正相关($R^2>0.605$)。椴树红松混交林和枫桦混交林林隙中铵态氮与硝态氮显著相关,但其相应的郁闭林中未出现相同的关系,云冷杉红松混交林郁闭林铵态氮和硝态氮呈显著关系($r=0.702$),但其林隙中相关系数 $r=-0.258$,这表明林隙中铵态氮和硝态氮之间的关系是有差别的。3 种林型的林隙铵态氮和微生物氮之间相关系数 r 分别为 0.855**、0.733** 和 -0.832**,郁闭林中的相关系数 r 分别为 0.622*、-0.414和-0.198,这表明铵态氮和微生物氮的关系在林隙呈显著相关,但在郁闭林中这种关系不统一,

林隙与郁闭林之间表现不同。

2.4 林隙大小与土壤各形态氮含量关系

如表 5 所示,林隙面积与各形态氮含量之间的关系,其中林隙中仅微生物氮含量与林隙面积呈极显著负相关($r=-0.958,P<0.01$),郁闭林中仅土壤全氮和林隙面积呈显著正相关($r=0.750,P<0.05$),其余形态氮含量在林隙和郁闭林中与林隙面积大小均未表现出显著相关。

3 讨 论

3.1 不同森林类型土壤各形态氮素占全氮百分比
铵态氮较硝态氮易被土壤颗粒吸附,不易流失,通常情况下土壤中的铵态氮含量均高于硝态氮含量(孟盈等,2001;鞠敏睿等,2010)。本实验中,无机氮含量很少,铵态氮含量均小于硝态氮,这与鞠敏睿等(2010)在小兴安岭凉水地区红松阔叶林 7 月铵态氮和硝态氮的研究结果不一致。分析认为,5 月份凉水地区土壤刚好解冻,微生物活动较弱,氧化脱氨和还原脱氨能力反应较慢,产生的铵态氮较少,加上植物的吸收以及铵态氮经硝化作用转变为硝态氮,解冻的土壤水分使土壤表层的硝态氮向下迁移,

使得硝态氮在土壤中聚集,因而此时的硝态氮含量大于铵态氮。如表2和表3所示,3种林分类型的土壤氮素主要以有机氮为主可达全氮的98%以上,可溶性全氮中可溶性有机氮和微生物氮也占相当大的比例,分别为23.64%~70.10%和10.48%~49.30%,和Chen等(2005)、杨凯等(2009)森林土壤中可溶性全氮、可溶有机氮和微生物氮的相关研究一致。

3.2 大中小林隙土壤氮素含量

林隙的形成改变了森林生态系统的群落结构,使得林隙内的水、气、光、温、地形等微环境以及土壤的理化性质发生了变化,与郁闭林产生差异。研究表明,林隙大小以及与郁闭林之间的土壤含水量、有机质、全氮、碱解氮、铵态氮、硝态氮、速效磷和微生物磷有一定的差异(Denslow, 1998; 沙丽清和曹敏, 1999; 江国华等, 2012; 刘少冲等, 2012), 但刘聪等(2011)指出,林隙土壤有机碳、全氮和全磷质量分数与郁闭林分无显著差异,这是因地域差异、林隙(形成机制、干扰状况、更新规律、物种多样性、小气候、时空格局和模型等)差异以及研究时期、对象、目的等的差异,林隙中土壤理化性质表现出复杂的特征。本研究也体现出林型的差异,林隙土壤养分的差异,如各形态氮含量在各相同林隙下不同林型之间含量不同。

林隙对土壤养分的影响表现在林隙大小产生的干扰作用,通过以下3个方面引起土壤养分的差异:1)减少生物量和原来树木对养分的吸收(Canham *et al.*, 1990);2)加速土壤内部有机质的分解或矿化(刘少冲等, 2013);3)影响凋落物分解和经过沉降输入到土壤中的养分(Jassby *et al.*, 1994; Kuperman, 1999; Doney *et al.*, 2007)。Denslow (1998)指出,林隙土壤铵态氮和硝态氮与林隙面积呈正相关。本实验中,仅林隙中土壤微生物氮和林隙大小呈线性负相关。因温度会影响微生物的活动和微生物数量,分析认为,研究期间林隙大小引起温度的差异进而对微生物氮含量产生一定的影响。根据往年资料及前人的研究发现,5月份小兴安岭凉水林场白天土壤4.4~6.7℃,显著高于郁闭林分平均温度3.9℃(刘少冲等, 2012);李岩等(2007)也指出,5月林隙地面温度变异系数最大。白天林隙空地面积比较大,受太阳辐射升温较快,温度高于郁闭林分。夜间,林隙没有太阳辐射升温 and 林木及林内凋落物层的保温作用,致使林隙土壤温度下降低于郁闭林分,

林隙内昼夜温差较大,而郁闭林分内土壤温度维持在一个相对稳定的状态,因而郁闭林分土壤更适合微生物的生存(窦军霞等, 2003; Ritter *et al.*, 2005)。

3.3 林隙土壤氮形态之间的相互关系

研究表明,林分土壤中的各形态氮含量之间存在显著相关关系(王清奎, 2005; Chen *et al.*, 2005; 杨绒等, 2007), 因林隙的影响,林隙土壤养分较林分土壤养分有一定的差异性,但也与林分土壤各养分间的关系有着相似规律。本研究中,林隙和郁闭林分土壤可溶性全氮和可溶性有机氮均呈现极显著正相关($R^2 > 0.605$, $P < 0.05$),林隙土壤铵态氮与硝态氮和微生物氮呈显著相关($P < 0.05$),但在相应的郁闭林中却未表现出类似的关系。不同林分类型不同大小林隙,各氮素之间均有显著相关。后续工作将结合林隙的气象因素、微生物、植物、土壤、大气和水等因素研究各形态氮的特征。

4 结 论

小兴安岭地区原始红松混交林5月份土壤氮素主要以有机氮为主,占全氮的98%以上,无机氮含量较少,铵态氮含量均小于硝态氮,林隙以可溶性有机氮为主。云冷杉红松混交林郁闭林以可溶性有机氮为主,椴树红松和枫桦红松混交林郁闭林以无机氮为主。微生物氮占全氮比例在3个林型中的变化基本稳定,差异不大。

红松混交林中铵态氮、硝态氮、可溶性有机氮和微生物氮含量在大、小林隙之间以及林隙与郁闭林分之间差异显著。3个林型林隙中土壤硝态氮和微生物氮占全氮的比例均表现出随着林隙面积增大而减小的趋势;椴树红松混交林和云冷杉红松混交林林隙中土壤铵态氮、可溶性全氮和可溶性有机氮所占土壤全氮比例随林隙面积增大而减小,枫桦混交林林隙则为随面积增大而增大。

红松混交林中不同林分类型不同林隙,林隙和郁闭林中土壤可溶性全氮和可溶性有机氮均呈极显著正相关,林隙土壤铵态氮、硝态氮与微生物氮呈显著相关,但在相应的郁闭林中却未表现出类似的关系。

参考文献

鲍士旦. 土壤氨化分析(第3版). 2000. 北京: 中国农业出版社.

- 寞军霞, 张一平, 马友鑫, 等. 2003. 热带次生林林窗区域土壤-植物-大气连续体热力效应初步分析. 热带气象学报, **19**(3): 329-333.
- 段文标, 杜 珊, 陈立新, 等. 2013. 阔叶红松混交林林隙大小和掘根微立地对小气候的影响. 应用生态学报, **24**(8): 2097-2105.
- 江国华, 吴泽民. 2012. 安徽查湾甜槠林林隙及林下土壤养分对比. 东北林业大学学报, **40**(10): 89-92.
- 鞠敏睿, 郝敬梅, 崔晓阳, 等. 2010. 原始红松林及其次生林土壤游离氨基酸季节动态变化. 东北林业大学学报, **38**(9): 74-77.
- 李 岩, 段文标, 陈立新, 等. 2007. 阔叶红松林林隙地面温度微环境变异特征. 中国水土保持科学, **5**(2): 81-85.
- 刘 聪, 朱教君, 吴祥云, 等. 2011. 辽东山区次生林不同大小林窗土壤养分特征. 东北林业大学学报, **39**(1): 79-81.
- 刘少冲, 段文标, 钟春艳, 等. 2012. 阔叶红松林不同大小林隙土壤温度、水分、养分及微生物动态变化. 水土保持学报, **26**(5): 78-83.
- 刘少冲, 王敬华, 段文标, 等. 2013. 小兴安岭阔叶红松混交林林隙特征. 生态学报, **33**(17): 5234-5244.
- 孟 盈, 薛敬意, 沙丽清, 等. 2001. 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, **25**(1): 99-104.
- 沙丽清, 曹 敏. 1999. 西双版纳热带季节雨林林冠下及林窗中土壤养分对比研究. 东北林业大学学报, **27**(6): 78-80.
- 王清奎, 汪思龙, 冯宗炜. 2005. 杉木人工林土壤可溶性有机质及其与土壤养分的关系. 生态学报, **25**(6): 1299-1305.
- 魏全帅, 王敬华, 段文标, 等. 2014. 红松阔叶混交林不同大小林隙内丘坑复合体微气候动态变化. 应用生态学报, **25**(3): 702-710.
- 吴金水. 2006. 土壤微生物生物量测定方法及其应用. 北京: 气象出版社.
- 杨 凯, 朱教君, 张金鑫, 等. 2009. 不同林龄落叶松人工林土壤微生物生物量碳氮的季节变化. 生态学报, **29**(10): 5500-5507.
- 杨 绒, 严德翼, 周建斌, 等. 2007. 黄土区不同类型土壤可溶性有机氮的含量及特性. 生态学报, **27**(4): 1397-1403.
- 赵桂玲. 2013. 林窗研究进展: 国家自然科学基金重点项目部分成果简介. 中国科学基金, **27**(4): 218-221.
- 赵满兴, 周建斌, 陈竹君, 等. 2008. 不同类型农田土壤对可溶性有机氮、碳的吸附特性. 应用生态学报, **19**(1): 76-80.
- 朱教君, 谭 辉, 李凤芹, 等. 2009. 辽东山区次生林3种大小林窗夏季近地面气温及土壤温度比较. 林业科学, **45**(8): 161-165.
- Canham CD, Denslow JS, Platt WJ, *et al.* 1990. Light regimes beneath closed canopies and tree-fall gaps in temperate and tropical forests. *Canadian Journal of Forest Research*, **20**: 620-631.
- Chen CR, Xu ZH, Zhang SL, *et al.* 2005. Soluble organic nitrogen pools in forest soils of subtropical Australia. *Plant and Soil*, **277**: 285-297.
- Denslow JS, Ellison AM, Sanford RE. 1998. Treefall gap size effects on above- and below-ground processes in a tropical wet forest. *Journal of Ecology*, **86**: 597-609.
- Doney SC, Mahowald N, Lima I, *et al.* 2007. Impact of anthropogenic atmospheric nitrogen and sulfur deposition on ocean acidification and the inorganic carbon system. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **104**: 14580-14585.
- Jassby AD, Reuter JE, Axler RP, *et al.* 1994. Atmospheric deposition of nitrogen and phosphorus in the annual nutrient load of Lake Tahoe (California-Nevada). *Water Resources Research*, **30**: 2207-2216.
- Kern CC, Montgomery RA, Reich PB, *et al.* 2013. Canopy gap size influences niche partitioning of the ground-layer plant community in a northern temperate forest. *Journal of Plant Ecology*, **6**: 101-112.
- Kuperman RG. 1999. Litter decomposition and nutrient dynamics in oak-hickory forests along a historic gradient of nitrogen and sulfur deposition. *Soil Biology and Biochemistry*, **31**: 237-244.
- Otto J, Berveiller D, Bréon FM, *et al.* 2013. Effects of species selection and management on forest canopy albedo. *EGU General Assembly Conference Abstracts*, **15**: 10100.
- Ritter E, Dalsgaard L, Einhorn KS. 2005. Light, temperature and soil moisture regimes following gap formation in a semi-natural beech-dominated forest in Denmark. *Forest Ecology and Management*, **206**: 15-33.
- Runkle JR. 1981. Gap regeneration in some old-growth forests of the eastern United States. *Ecology*, **62**: 1041-1051.
- Watt AS. 1947. Pattern and process in the plant community. *Ecology*, **35**: 1-22.

作者简介 姜 一, 男, 1987年生, 硕士研究生, 主要从事森林土壤方面的研究。E-mail: jy1987jiangyi@sina.com
责任编辑 张 敏