

# 不同林分红皮云杉针叶养分含量及生态化学计量特征研究

周 磊, 吴 慧, 王树力<sup>①</sup>

(东北林业大学林学院, 黑龙江 哈尔滨 150040)

**摘要:** 为了探明红皮云杉 (*Picea koraiensis* Nakai) 的限制性营养元素和合理施肥措施, 对胡桃楸 (*Juglans mandshurica* Maxim.)-红皮云杉混交林、水曲柳 (*Fraxinus mandshurica* Rupr.)-红皮云杉混交林、黄檗 (*Phellodendron amurense* Rupr.)-红皮云杉混交林和红皮云杉纯林中红皮云杉的针叶 C、N 和 P 含量以及 C : N、C : P 和 N : P 的变化进行了比较, 并对其变异和相关性进行了分析。结果表明: 4 种林分中红皮云杉的针叶 C 含量呈“升高—降低”的趋势, 且在 5 月份最低、在 8 月份最高; 4 种林分中红皮云杉的针叶 N 和 P 含量大多呈“降低—升高—降低”的趋势, 且在 5 月份最高、在 9 月份最低。胡桃楸-红皮云杉混交林和黄檗-红皮云杉混交林中红皮云杉的针叶 C : N、C : P 和 N : P 持续升高, 而其余 2 种林分中这 3 个指标呈“升高—降低—升高”的趋势, 且 4 种林分中这 3 个指标在 5 月份最低、在 9 月份最高。比较而言, 4 种林分中红皮云杉的针叶 C 含量变异系数最小 (5.02%~6.17%), 而 C : P 变异系数最大 (16.59%~23.46%)。3 种混交林中红皮云杉的针叶 N : P 在 5 月份至 6 月份小于 14, 在 7 月份至 8 月份介于 14~16, 在 9 月份大于 16; 而红皮云杉纯林中红皮云杉的针叶 N : P 则在 5 月份至 8 月份介于 14~16, 在 9 月份大于 16。相关性分析结果表明: 4 种林分中红皮云杉的针叶 C 含量与 N 和 P 含量呈显著或极显著负相关; N 含量与 P 含量呈极显著正相关; C : N 和 C : P 与 N 和 P 含量呈负相关, 且多数相关性显著。研究结果显示: 总体来看, 4 种林分中红皮云杉生长在 5 月份至 6 月份受 N 限制, 在 7 月份至 8 月份受 N 和 P 共同限制, 在 9 月份受 P 限制, 因此, 建议在 5 月份至 6 月份施加氮肥, 在 7 月份至 8 月份同时施加氮肥和磷肥。

**关键词:** 红皮云杉; 林分; 养分含量; 生态化学计量特征; 变异系数; 相关性分析

中图分类号: Q946.91; S791.182 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2020)03-0019-07

DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2020.03.03

**Study on nutrient contents and ecological stoichiometric characteristics in needles of *Picea koraiensis* in different stands** ZHOU Lei, WU Hui, WANG Shuli<sup>①</sup> (School of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China), *J. Plant Resour. & Environ.*, 2020, 29(3): 19-25, 33

**Abstract:** In order to explore restrictive nutrition elements and reasonable fertilization measures of *Picea koraiensis* Nakai, changes in C, N and P contents and C : N, C : P and N : P in needles of *P. koraiensis* in *Juglans mandshurica* Maxim.-*P. koraiensis* mixed forest, *Fraxinus mandshurica* Rupr.-*P. koraiensis* mixed forest, *Phellodendron amurense* Rupr.-*P. koraiensis* mixed forest and *P. koraiensis* pure forest were compared, and their variations and correlations were analyzed. The results show that C content in needles of *P. koraiensis* in four stands shows a trend of “increasing-decreasing”, and reaches the lowest in May and the highest in August. N and P contents in needles of *P. koraiensis* in four stands mostly show a trend of “decreasing-increasing-decreasing”, and reach the highest in May and the lowest in September. C : N, C : P, and N : P in needles of *P. koraiensis* in *J. mandshurica*-*P. koraiensis* mixed forest and *P. amurense*-*P. koraiensis* mixed forest increase gradually, while these three indexes in other two stands show a trend of “increasing-decreasing-increasing”, and these three indexes in four stands reach the lowest in

收稿日期: 2019-08-23

基金项目: 国家科学技术部“十三五”重点研发计划项目(2017YFD0601103); 黑龙江省省级财政林业科研专项(201522)

作者简介: 周 磊(1993—), 男, 吉林辽源人, 硕士研究生, 主要从事林业生态工程方面的研究。

<sup>①</sup>通信作者 E-mail: shuliwang@163.com

May and the highest in September. In comparison, the coefficient of variation of C content in needles of *P. koraiensis* in four stands is the smallest (5.02%–6.17%), while that of C : P is the largest (16.59%–23.46%). N : P in needles of *P. koraiensis* in three mixed forests is less than 14 from May to June, between 14–16 from July to August, and greater than 16 in September; while that in needles of *P. koraiensis* in *P. koraiensis* pure forest is between 14–16 from May to August, and greater than 16 in September. The correlation analysis result shows that C content in needles of *P. koraiensis* in four stands shows a significant or extremely significant negative correlation with N and P contents; N content shows an extremely significant positive correlation with P content; C : N and C : P show negative correlations with N and P contents, and most correlations are significant. It is suggested that overall, the growth of *P. koraiensis* in four stands is limited by N from May to June, commonly limited by N and P from July to August, and limited by P in September. Therefore, it is recommended to apply nitrogen fertilizer from May to June and simultaneously apply nitrogen and phosphate fertilizers from July to August.

**Key words:** *Picea koraiensis* Nakai; stand; nutrient content; ecological stoichiometric characteristics; coefficient of variation; correlation analysis

叶片养分含量及生态化学计量特征可直接或间接反映植物的生产能力或生长状况<sup>[1]</sup>。研究者可通过植物叶片营养元素的种类、数量及生态化学计量特征判定植物生长过程中的营养状况,从而制定有针对性的施肥方案,促进植物生长<sup>[2]</sup>。C、N和P为植物体结构和功能的主要元素,共同维持植物代谢过程,调节植物生长<sup>[3-5]</sup>。N和P还是植物生长的常见限制性营养元素,可通过叶片N:P值判定植物生长的限制性营养元素(N:P小于14表示植物生长受N限制;N:P大于16表示植物生长受P限制;N:P介于14~16表示植物生长受N和P共同限制)<sup>[6]</sup>。

迄今为止,相关学者对植物叶片营养元素含量及生态化学计量特征进行了大量研究<sup>[7-10]</sup>,主要探讨不同植物C、N和P等营养元素的含量及生态化学计量特征<sup>[11-13]</sup>。Han等<sup>[14]</sup>发现,中国植物P含量的平均值低于全球植物P含量的平均值,并且,其N和P含量与纬度呈正相关。国内学者还对不同地区植物叶片的生态化学计量特征及植物生长的限制性营养元素进行了研究<sup>[15-16]</sup>。目前,虽然已有关于中国东北地区针叶树兴安落叶松〔*Larix gmelinii* (Rupr.) Kuze.〕枝、叶和根N和P的生态化学计量特征的研究报道<sup>[17]</sup>,但关于针叶树叶中C、N和P含量及其生态化学计量特征变化的研究却较少<sup>[18]</sup>。

红皮云杉(*Picea koraiensis* Nakai)是中国东北地区主要的造林及材用针叶树种,其人工林的培育和经营已被列入国家“十三五”重点研发计划。有研究表明:红皮云杉人工纯林的土壤地力下降<sup>[19]</sup>;与阔叶树种混交后,红皮云杉人工林的土壤营养状况明显改善,土壤地力有所恢复<sup>[20]</sup>。植物各器官的养分含量

受到各种环境条件的共同影响<sup>[21]</sup>,且在不同时间存在较大差异<sup>[18]</sup>,因此,基于某一采样时间的植物器官研究可能无法真实反映植物器官的生态化学计量特征,尤其是植物叶片的生态化学计量特征。只有在植物的整个生长季进行多次采样分析,才能明确植物叶片营养元素的动态变化,更加准确地掌握植物叶片的生态化学计量特征,为植物人工培育过程中的合理施肥和土壤改良奠定科学基础。

鉴于此,作者以位于阿什河流域的东北林业大学森林培育试验站内1987年营造的胡桃楸(*Juglans mandshurica* Maxim.)-红皮云杉混交林、水曲柳(*Fraxinus mandshurica* Rupr.)-红皮云杉混交林、黄檗(*Phellodendron amurense* Rupr.)-红皮云杉混交林和红皮云杉纯林为研究对象,对4种林分中红皮云杉的针叶养分(包括C、N和P)含量及生态化学计量特征(包括C:N、C:P和N:P)的变化进行了比较,并对上述6个指标的变异和相关性进行了分析,以期判定红皮云杉生长的限制性营养元素,为红皮云杉人工林的科学经营和施肥方案制定提供理论依据。

## 1 研究地概况和研究方法

### 1.1 研究地概况

本研究在位于阿什河流域的东北林业大学森林培育试验站(东经127°26′~127°39′、北纬45°23′~45°26′)内完成。该区域属温带大陆性季风气候,年均温2.4℃,≥10℃年积温2000℃~2500℃,无霜期120~140d,年均蒸发量1094mm,年均降水量700mm。区内地带性土壤为暗棕壤;地貌以山区丘

陵为主,平均海拔约 300 m;主要河流多数为松花江二级以上支流。该区域属于长白山植物区系和小兴安岭-张广才岭亚区,地带性植被为红松(*Pinus koraiensis* Sieb. et Zucc.)林<sup>[18]</sup>。

在研究区内选取天然次生林带状采伐后营造的 31 年生胡桃楸-红皮云杉混交林、水曲柳-红皮云杉混交林、黄檗-红皮云杉混交林和红皮云杉纯林进行研究。胡桃楸-红皮云杉混交林的郁闭度为 80%,林内胡桃楸密度 722  $\text{hm}^{-2}$ ,平均树高 19.78 m,平均胸径 14.08 cm;林内红皮云杉密度 1 430  $\text{hm}^{-2}$ ,平均树高 17.89 m,平均胸径 13.79 cm。水曲柳-红皮云杉混交林的郁闭度为 70%,林内水曲柳密度 769  $\text{hm}^{-2}$ ,平均树高 18.22 m,平均胸径 13.19 cm;林内红皮云杉密度 1 346  $\text{hm}^{-2}$ ,平均树高 16.83 m,平均胸径 13.56 cm。黄檗-红皮云杉混交林的郁闭度为 80%,林内黄檗密度 833 株· $\text{hm}^{-2}$ ,平均树高 16.44 m,平均胸径 11.45 cm;林内红皮云杉密度 1 967  $\text{hm}^{-2}$ ,平均树高 15.67 m,平均胸径 12.90 cm。红皮云杉纯林的郁闭度为 80%,林内红皮云杉密度 2 333  $\text{hm}^{-2}$ ,平均树高 15.28 m,平均胸径 12.82 cm。各林分位置相邻,且均位于山地东坡的中部,坡度 8°,除在造林初期进行基本的人工抚育外,无其他人为干扰。

## 1.2 研究方法

1.2.1 样品采集 于 2017 年 5 月中旬,在 4 种林分中分别设置 3 个 20 m×20 m 样方,详细记录每个样方的地形和地貌等环境特征。根据样方内的每木检尺结果,在每个样方内选取胸径接近平均胸径的 5 株红皮云杉作为样木,并挂牌标记。在红皮云杉的整个生长季(即 5 月份至 9 月份)内于每月中旬进行采样。分别在样株东、南、西、北 4 个方向上均匀采集树冠中上部的健康针叶,每个方向采集约 50 g 针叶,同株针叶混合均匀;将针叶置于牛皮纸袋中带回实验室,用微波炉高火杀青 2 min 后,置于 90 °C 烘箱中烘干至恒质量;将烘干的针叶粉碎,过 100 目筛,备用。

1.2.2 养分含量测定 称取 25.0~25.9 mg 干燥粉末,使用 vario EL cube 有机元素分析仪(德国 Elementar 公司)测定有机碳含量,即 C 含量。称取 0.25 g 干燥粉末,参照文献[22]进行  $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$  消煮及 N 和 P 含量测定。其中,N 含量测定采用 K9840 全自动凯氏定氮仪(济南海能仪器股份有限公司),P 含量测定采用钼锑抗比色法。各养分元素含量均重复测定 5 次。

## 1.3 数据处理及统计分析

采用 EXCEL 2010 软件对实验数据进行整理,计算 4 种林分中红皮云杉的针叶 C:N、C:P 和 N:P,并计算 C、N 和 P 含量及 C:N、C:P 和 N:P 的变异系数;采用 SPSS 19.0 统计分析软件对上述 6 个指标进行单因素方差分析(one-way ANOVA)和 LSD 多重比较,并对各指标进行 Pearson 相关性分析。

## 2 结果和分析

### 2.1 不同林分中红皮云杉的针叶养分含量变化及变异分析

不同林分中红皮云杉的针叶养分含量变化及变异系数见表 1。

2.1.1 C 含量变化分析 实验期间,4 种林分中红皮云杉的针叶 C 含量表现为“升高—降低”趋势,且在 5 月份最低、在 8 月份最高。与 5 月份相比,胡桃楸-红皮云杉混交林中红皮云杉的针叶 C 含量在 7 月份显著( $P<0.05$ )升高,水曲柳-红皮云杉混交林中红皮云杉的针叶 C 含量在 6 月份显著升高,而黄檗-红皮云杉混交林和红皮云杉纯林中红皮云杉的针叶 C 含量在 8 月份显著升高。

方差分析结果表明:实验期间同一月份 4 种林分间红皮云杉的针叶 C 含量无显著差异。各林分中红皮云杉的针叶 C 含量平均值从高到低依次为胡桃楸-红皮云杉混交林(482.49  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )、红皮云杉纯林(478.88  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )、黄檗-红皮云杉混交林(471.13  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )、水曲柳-红皮云杉混交林(464.96  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ),且 4 种林分间红皮云杉的针叶 C 含量平均值无显著差异。

2.1.2 N 含量变化分析 实验期间,胡桃楸-红皮云杉混交林、水曲柳-红皮云杉混交林和红皮云杉纯林中红皮云杉的针叶 N 含量表现为“降低—升高—降低”趋势,而黄檗-红皮云杉混交林中红皮云杉的针叶 N 含量表现为持续降低趋势;4 种林分中红皮云杉的针叶 N 含量在 5 月份最高、在 9 月份最低。与 5 月份相比,4 种林分中红皮云杉的针叶 N 含量在 6 月份至 9 月份总体上显著降低。

方差分析结果表明:总体来看,实验期间同一月份 4 种林分间红皮云杉的针叶 N 含量存在显著差异。各林分中红皮云杉的针叶 N 含量平均值从高到低依次为红皮云杉纯林(21.15  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )、胡桃楸-红

表 1 不同林分中红皮云杉的针叶养分含量变化及变异系数

Table 1 Changes and coefficients of variation of nutrient contents in needles of *Picea koraiensis* Nakai in different stands

林分 <sup>1)</sup> Stand <sup>1)</sup>	不同月份 C 含量/(g · kg <sup>-1</sup> ) <sup>2)</sup>					平均值 Average	CV/% <sup>3)</sup>
	5 月 May	6 月 June	7 月 July	8 月 August	9 月 September		
S1	451.23±22.22Ac	472.86±15.82Abc	484.48±25.56Ab	517.20±23.55Aa	486.70±14.19Ab	482.49±28.94A	6.00
S2	431.09±6.28Ab	464.72±31.32Aa	466.34±30.00Aa	489.06±8.55Aa	468.56±27.86Aa	463.96±28.70A	6.17
S3	454.86±12.33Ab	461.49±21.89Ab	473.11±19.99Aab	490.83±28.20Aa	475.33±23.82Aab	471.13±23.64A	5.02
S4	462.61±39.23Ab	469.24±17.64Aab	480.86±14.79Aab	498.58±22.04Aa	483.08±25.60Aab	478.88±26.36A	5.50

  

林分 <sup>1)</sup> Stand <sup>1)</sup>	不同月份 N 含量/(g · kg <sup>-1</sup> ) <sup>2)</sup>					平均值 Average	CV/% <sup>3)</sup>
	5 月 May	6 月 June	7 月 July	8 月 August	9 月 September		
S1	23.03±0.85ABa	20.69±1.18Ab	19.60±0.89ABb	20.41±1.61ABb	17.85±1.52ABc	20.32±2.00A	9.84
S2	22.13±0.85Ba	20.77±0.82Aab	17.59±0.25Bc	19.49±1.01Bb	16.93±2.09ABc	19.38±2.24A	11.56
S3	21.23±1.68Ba	18.87±1.42Bb	18.78±1.26Bb	17.59±0.86Bc	16.03±0.86Bc	18.50±2.09A	11.30
S4	23.88±1.08Aa	21.52±1.04Ab	20.43±1.67Abc	21.24±1.28Ab	18.68±2.02Ac	21.15±2.18A	10.31

  

林分 <sup>1)</sup> Stand <sup>1)</sup>	不同月份 P 含量/(g · kg <sup>-1</sup> ) <sup>2)</sup>					平均值 Average	CV/% <sup>3)</sup>
	5 月 May	6 月 June	7 月 July	8 月 August	9 月 September		
S1	1.82±0.06ABa	1.54±0.07ABb	1.38±0.02Ac	1.31±0.09Ac	1.03±0.06Bd	1.42±0.27A	19.01
S2	1.90±0.09Aa	1.62±0.11Ab	1.22±0.04Cd	1.39±0.08Ac	1.06±0.04ABe	1.43±0.31A	21.68
S3	1.77±0.04Ba	1.42±0.05Bb	1.27±0.04Bc	1.17±0.05Bd	0.98±0.04Be	1.32±0.27A	20.45
S4	1.71±0.08Ba	1.47±0.03Bb	1.31±0.03Bd	1.39±0.05Ac	1.11±0.03Ae	1.39±0.21A	15.11

<sup>1)</sup> S1: 胡桃楸-红皮云杉混交林 *Juglans mandshurica*-*Picea koraiensis* mixed forest; S2: 水曲柳-红皮云杉混交林 *Fraxinus mandshurica*-*Picea koraiensis* mixed forest; S3: 黄檗-红皮云杉混交林 *Phellodendron amurense*-*Picea koraiensis* mixed forest; S4: 红皮云杉纯林 *Picea koraiensis* pure forest.

<sup>2)</sup> 同列中不同大写字母表示在不同林分间差异显著 ( $P < 0.05$ ) Different uppercases in the same column indicate the significant ( $P < 0.05$ ) difference among different stands; 同行中不同小写字母表示在不同月份间差异显著 ( $P < 0.05$ ) Different lowercases in the same row indicate the significant ( $P < 0.05$ ) difference among different months.

<sup>3)</sup> CV: 变异系数 Coefficient of variation.

皮云杉混交林 ( $20.32 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )、水曲柳-红皮云杉混交林 ( $19.38 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )、黄檗-红皮云杉混交林 ( $18.50 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )，且 4 种林分间红皮云杉的针叶 N 含量平均值无显著差异。

**2.1.3 P 含量变化分析** 实验期间，胡桃楸-红皮云杉混交林和黄檗-红皮云杉混交林中红皮云杉的针叶 P 含量表现为持续下降趋势，而水曲柳-红皮云杉混交林和红皮云杉纯林中红皮云杉的针叶 P 含量表现为“降低—升高—降低”趋势；4 种林分中红皮云杉的针叶 P 含量在 5 月份最高、在 9 月份最低。与 5 月份相比，4 种林分中红皮云杉的针叶 P 含量在 6 月份至 9 月份显著降低。

方差分析结果表明：总体来看，实验期间同一月份 4 种林分间红皮云杉的针叶 P 含量存在显著差异。各林分中红皮云杉的针叶 P 含量平均值从高到低依次为水曲柳-红皮云杉混交林 ( $1.43 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )、胡桃楸-红皮云杉混交林 ( $1.42 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )、红皮云杉纯林 ( $1.39 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )、黄檗-红皮云杉混交林 ( $1.32$

$\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )，且 4 种林分间红皮云杉的针叶 P 含量平均值无显著差异。

**2.1.4 养分含量变异分析** 各林分中红皮云杉的针叶 C 含量变异系数从高到低依次为水曲柳-红皮云杉混交林 (6.17%)、胡桃楸-红皮云杉混交林 (6.00%)、红皮云杉纯林 (5.50%)、黄檗-红皮云杉混交林 (5.02%)；各林分中红皮云杉的针叶 N 含量变异系数从高到低依次为水曲柳-红皮云杉混交林 (11.56%)、黄檗-红皮云杉混交林 (11.30%)、红皮云杉纯林 (10.31%)、胡桃楸-红皮云杉混交林 (9.84%)；各林分中红皮云杉的针叶 P 含量变异系数从高到低依次为水曲柳-红皮云杉混交林 (21.68%)、黄檗-红皮云杉混交林 (20.45%)、胡桃楸-红皮云杉混交林 (19.01%)、红皮云杉纯林 (15.11%)。

## 2.2 不同林分中红皮云杉的针叶养分生态化学计量特征变化及变异分析

不同林分中红皮云杉的针叶养分生态化学计量特征 (C : N、C : P 和 N : P) 变化及变异系数见表 2。

表2 不同林分中红皮云杉的针叶养分生态化学计量特征变化及变异系数

Table 2 Changes and coefficients of variation of nutrient ecological stoichiometric characteristics in needles of *Picea koraiensis* Nakai in different stands

林分 <sup>1)</sup> Stand <sup>1)</sup>	不同月份 C : N <sup>2)</sup> C : N in different months <sup>2)</sup>						CV/% <sup>3)</sup>
	5月 May	6月 June	7月 July	8月 August	9月 September	平均值 Average	
S1	19.59±0.44Bd	22.88±0.72Bc	24.71±0.58Bb	25.40±1.12Bb	27.37±1.57Ba	23.99±2.83A	11.80
S2	19.51±0.97Bd	22.36±0.64BCc	26.54±2.07Aab	25.17±1.74Bb	27.87±1.99ABa	24.29±3.40A	14.00
S3	21.49±1.15Ad	24.49±0.79Ac	25.22±0.71ABc	27.89±0.48Ab	29.65±0.57Aa	25.75±2.97A	11.53
S4	19.35±1.12Bd	21.81±0.35Cc	23.62±1.36Bb	23.49±0.59Cb	25.98±1.49Ba	22.85±2.45A	10.72
林分 <sup>1)</sup> Stand <sup>1)</sup>	不同月份 C : P <sup>2)</sup> C : P in different months <sup>2)</sup>						CV/% <sup>3)</sup>
	5月 May	6月 June	7月 July	8月 August	9月 September	平均值 Average	
S1	247.68±16.12Be	306.81±17.88ABd	350.18±20.19Bc	394.46±21.48Ab	472.14±32.55ABa	354.25±80.55A	22.74
S2	227.81±11.63Bd	288.71±27.45Bc	383.88±27.98Ab	353.55±15.85Bb	444.29±30.53Ba	339.65±79.69A	23.46
S3	256.79±8.49ABe	324.35±16.97Ad	372.37±22.27ABc	419.08±23.06Ab	484.62±30.46Aa	371.44±82.03A	22.08
S4	271.90±28.03Ad	320.10±11.17Ac	368.23±10.19ABb	359.83±12.22Bb	436.88±23.00Ba	351.39±58.30A	16.59
林分 <sup>1)</sup> Stand <sup>1)</sup>	不同月份 N : P <sup>2)</sup> N : P in different months <sup>2)</sup>						CV/% <sup>3)</sup>
	5月 May	6月 June	7月 July	8月 August	9月 September	平均值 Average	
S1	12.64±0.59Bc	13.44±1.14ABc	14.17±0.64Bbc	15.54±0.74Ab	17.33±1.85Aa	14.62±1.97A	13.47
S2	11.68±0.52Bc	12.90±1.00Bbc	14.47±0.48ABab	14.11±1.31Bb	16.05±2.03Aa	13.84±1.87A	13.51
S3	11.99±0.97Bc	13.26±0.93Bc	14.78±1.14ABb	15.02±0.68ABb	16.35±1.13Aa	14.28±1.78A	12.46
S4	14.03±0.91Ab	14.68±0.70Ab	15.65±1.28Aab	15.33±0.81ABb	16.89±1.73Aa	15.32±1.44A	9.40

<sup>1)</sup> S1: 胡桃楸-红皮云杉混交林 *Juglans mandshurica*-*Picea koraiensis* mixed forest; S2: 水曲柳-红皮云杉混交林 *Fraxinus mandshurica*-*Picea koraiensis* mixed forest; S3: 黄檗-红皮云杉混交林 *Phellodendron amurense*-*Picea koraiensis* mixed forest; S4: 红皮云杉纯林 *Picea koraiensis* pure forest.

<sup>2)</sup> 同列中不同大写字母表示在不同林分间差异显著 ( $P < 0.05$ ) Different uppercases in the same column indicate the significant ( $P < 0.05$ ) difference among different stands; 同行中不同小写字母表示在不同月份间差异显著 ( $P < 0.05$ ) Different lowercases in the same row indicate the significant ( $P < 0.05$ ) difference among different months.

<sup>3)</sup> CV: 变异系数 Coefficient of variation.

实验期间,胡桃楸-红皮云杉混交林和黄檗-红皮云杉混交林中红皮云杉的针叶 C : N、C : P 和 N : P 表现为持续升高趋势,而水曲柳-红皮云杉混交林和红皮云杉纯林中红皮云杉的针叶 C : N、C : P 和 N : P 表现为“升高—降低—升高”趋势;4 种林分中红皮云杉的针叶 C : N、C : P 和 N : P 在 5 月份最低、在 9 月份最高。与 5 月份相比,4 种林分中红皮云杉的针叶 C : N、C : P 和 N : P 在 6 月份至 9 月份总体上显著 ( $P < 0.05$ ) 升高。

方差分析结果表明:总体来看,实验期间同一月份 4 种林分间红皮云杉的针叶 C : N、C : P 和 N : P 存在显著差异。各林分中红皮云杉的针叶 C : N 平均值从高到低依次为黄檗-红皮云杉混交林 (25.75)、水曲柳-红皮云杉混交林 (24.29)、胡桃楸-红皮云杉混交林 (23.99)、红皮云杉纯林 (22.85); 各林分中红皮云杉的针叶 C : P 平均值从高到低依次为黄檗-红皮云杉混交林 (371.44)、胡桃楸-红皮云杉混交林 (354.25)、红皮云杉纯林 (351.39)、水曲柳-

红皮云杉混交林 (339.65); 各林分中红皮云杉的针叶 N : P 平均值从高到低依次为红皮云杉纯林 (15.32)、胡桃楸-红皮云杉混交林 (14.62)、黄檗-红皮云杉混交林 (14.28)、水曲柳-红皮云杉混交林 (13.84)。并且,4 种林分间红皮云杉的针叶 C : N、C : P 和 N : P 平均值无显著差异。

各林分中红皮云杉的针叶 C : N、C : P 和 N : P 变异系数从高到低均依次为水曲柳-红皮云杉混交林 (分别为 14.00%、23.46% 和 13.51%)、胡桃楸-红皮云杉混交林 (分别为 11.80%、22.74% 和 13.47%)、黄檗-红皮云杉混交林 (分别为 11.53%、22.08% 和 12.46%)、红皮云杉纯林 (分别为 10.72%、16.59% 和 9.40%)。

### 2.3 不同林分中红皮云杉的针叶养分含量及生态化学计量特征的相关性分析

不同林分中红皮云杉的针叶养分 (包括 C、N 和 P) 含量及生态化学计量特征 (C : N、C : P 和 N : P) 的相关性分析结果见表 3。结果表明:在 4 种林分中

表3 不同林分中红皮云杉针叶养分含量及生态化学计量特征的相关性分析<sup>1)</sup>Table 3 Correlation analysis on nutrient contents and ecological stoichiometric characteristics in needles of *Picea koraiensis* Nakai in different stands<sup>1)</sup>

指标 Index	胡桃楸-红皮云杉混交林中各指标的相关系数 Correlation coefficient among indexes in <i>Juglans mandshurica-Picea koraiensis</i> mixed forest					
	C	N	P	C : N	C : P	N : P
C	1.000					
N	-0.734**	1.000				
P	-0.823**	0.842**	1.000			
C : N	0.534*	-0.706**	-0.682*	1.000		
C : P	0.681**	-0.463*	-0.902**	0.332	1.000	
N : P	0.218	-0.197	-0.751**	0.483*	0.455*	1.000
指标 Index	水曲柳-红皮云杉混交林中各指标的相关系数 Correlation coefficient among indexes in <i>Fraxinus mandshurica-Picea koraiensis</i> mixed forest					
	C	N	P	C : N	C : P	N : P
C	1.000					
N	-0.663**	1.000				
P	-0.603**	0.846**	1.000			
C : N	0.186	-0.587**	-0.389	1.000		
C : P	0.474*	-0.178	-0.916**	0.551*	1.000	
N : P	0.537*	-0.241	-0.665**	0.308	0.242	1.000
指标 Index	黄檗-红皮云杉混交林中各指标的相关系数 Correlation coefficient among indexes in <i>Phellodendron amurense-Picea koraiensis</i> mixed forest					
	C	N	P	C : N	C : P	N : P
C	1.000					
N	-0.492*	1.000				
P	-0.633**	0.763**	1.000			
C : N	0.386*	-0.702**	-0.176	1.000		
C : P	0.208	-0.598**	-0.935**	0.146	1.000	
N : P	0.082	-0.594*	-0.126	0.095	0.528*	1.000
指标 Index	红皮云杉纯林中各指标的相关系数 Correlation coefficient among indexes in <i>Picea koraiensis</i> pure forest					
	C	N	P	C : N	C : P	N : P
C	1.000					
N	-0.835**	1.000				
P	-0.582*	0.819**	1.000			
C : N	0.617**	-0.642**	-0.416*	1.000		
C : P	0.340	-0.124	-0.868**	0.637*	1.000	
N : P	0.209	-0.704**	-0.752**	0.405	0.232	1.000

<sup>1)</sup> C: C 含量 C content; N: N 含量 N content; P: P 含量 P content.  
\*:  $P < 0.05$ ; \*\*:  $P < 0.01$ .

红皮云杉的针叶各指标间, C 含量与 N 和 P 含量呈显著 ( $P < 0.05$ ) 或极显著 ( $P < 0.01$ ) 负相关; N 含量与 P 含量呈极显著正相关; C : N 与 N 含量及 C : P 与 P 含量呈极显著负相关。此外, 胡桃楸-红皮云杉混交林中红皮云杉针叶的 C : N 与 C 含量呈显著正相

关, 与 P 含量呈显著负相关; C : P 与 C 含量呈极显著正相关, 与 N 含量呈显著负相关; N : P 与 P 含量呈极显著负相关, 与 C : N 和 C : P 呈显著正相关。水曲柳-红皮云杉混交林中红皮云杉的针叶 C : P 与 C 含量和 C : N 呈显著正相关; N : P 与 C 含量呈显著正相关, 与 P 含量呈极显著负相关。黄檗-红皮云杉混交林中红皮云杉的针叶 C : N 与 C 含量呈显著正相关; C : P 与 N 含量呈极显著负相关; N : P 与 N 含量呈显著负相关, 与 C : P 呈显著正相关。红皮云杉纯林中红皮云杉的针叶 C : N 与 C 含量呈极显著正相关, 与 P 含量呈显著负相关; C : P 与 C : N 呈显著正相关; N : P 与 N 和 P 含量呈极显著负相关。

### 3 讨论和结论

研究表明: 植物叶片中的 C、N 和 P 含量在不同生长阶段差异较大<sup>[18]</sup>。供试 4 种林分中红皮云杉的针叶 C 含量在 5 月份至 8 月份逐渐升高, 这是因为从 5 月份开始气温逐渐升高, 红皮云杉针叶的光合作用不断增强, 致使糖类产物在针叶中不断积累, 从而导致 C 含量显著提高<sup>[23]</sup>。供试 4 种林分中红皮云杉的针叶 N 和 P 含量均在 5 月份最高, 这是因为此时红皮云杉的针叶刚刚伸展, 需要大量的蛋白质和核酸来维持细胞快速分裂, 因此, 土壤及其他器官中的 N 和 P 被转移到针叶中, 从而导致针叶的 N 和 P 含量升高; 在 6 月份至 7 月份, 红皮云杉针叶的生长速度加快, 其生物量在短期内迅速增加, 受稀释效应影响, 针叶的 N 和 P 含量不断降低<sup>[24]</sup>; 在 7 月份至 8 月份, 红皮云杉进入旺盛生长期, 根部吸收的 N 和 P 基本能够满足针叶生长需要, 致使针叶的 N 和 P 含量下降幅度得到缓解甚至回升; 而在 9 月份, 红皮云杉的针叶 N 和 P 含量继续降低, 这是因为植物生长终究是靠消耗 N 和 P 实现, 必然在缓解后继续降低。

研究表明: 叶片的 C : N 和 C : P 能够反映植物在吸收 N 和 P 的过程中同化 C 的能力, 并能够反映植物对 N 和 P 的利用效率<sup>[25]</sup>。总体来看, 在整个实验期间, 4 种林分中红皮云杉的针叶 C : N 和 C : P 表现为持续升高或“升高—降低—升高”趋势, 且变化趋势与针叶 N 和 P 含量的变化趋势相反, 这可能是由于针叶快速生长导致的 N 和 P 含量不断降低所致<sup>[26]</sup>。比较而言, 4 种林分中红皮云杉的针叶 C : P 变异系数最大, 说明各林分中红皮云杉的针叶 C : P

变化最大。植物叶片 N:P 是决定群落结构和功能的重要指标<sup>[27]</sup>,可用于判断植物受土壤养分限制的阈值<sup>[6]</sup>,也可反映土壤对植物的养分供应情况<sup>[28]</sup>。胡桃楸-红皮云杉混交林、水曲柳-红皮云杉混交林和黄檗-红皮云杉混交林中红皮云杉的针叶 N:P 在 5 月份至 6 月份小于 14,在 7 月份至 8 月份介于 14~16,在 9 月份大于 16;而红皮云杉纯林中红皮云杉的针叶 N:P 则在 5 月份至 8 月份介于 14~16,在 9 月份大于 16,说明 3 种混交林中红皮云杉的生长在 5 月份至 6 月份受 N 限制,在 7 月份和 8 月份受 N 和 P 共同限制,在 9 月份受 P 限制,而纯林中红皮云杉的生长在 5 月份至 8 月份受 N 和 P 共同限制,在 9 月份受 P 限制<sup>[6,29]</sup>。

相关性分析结果表明:4 种林分中红皮云杉的针叶 C 含量与 N 和 P 含量呈显著或极显著负相关,这是因为植物在固定 C 过程中需要大量的 N 和 P,表明 C 与 N 和 P 存在协调作用。4 种林分中红皮云杉的针叶 N 含量与 P 含量呈极显著正相关,说明 4 种林分中红皮云杉的针叶 N 和 P 含量变化一致,体现了红皮云杉在固定 C 过程中对 N、P 利用效率的权衡策略<sup>[30]</sup>。4 种林分中红皮云杉的针叶 C:N 和 C:P 与 N 和 P 含量呈负相关,且多数呈显著相关性,说明在一定范围内,4 种林分中红皮云杉的 N 和 P 利用效率随针叶中 N 和 P 含量升高而降低。不同林分间红皮云杉的针叶 C:N 和 C:P 与 C 含量的相关性差异可能与 N 和 P 含量与 C 含量存在显著负相关有关,也可能与各林分中红皮云杉的针叶 C、N 和 P 含量变异系数有关。值得注意的是,胡桃楸-红皮云杉混交林和水曲柳-红皮云杉混交林中红皮云杉的针叶 N:P 与 P 含量呈极显著负相关,但与 N 含量呈不显著负相关,说明这 2 种林分中红皮云杉的针叶 N:P 主要受 P 含量影响;黄檗-红皮云杉混交林中红皮云杉的针叶 N:P 与 N 含量呈显著负相关,但与 P 含量呈不显著负相关,说明黄檗-红皮云杉混交林中红皮云杉的针叶 N:P 主要受 N 含量影响;而红皮云杉纯林中红皮云杉的针叶 N:P 与 N 和 P 含量呈极显著负相关,说明红皮云杉纯林中红皮云杉的针叶 N:P 受 N 和 P 含量共同影响。

研究结果显示:在 5 月份至 9 月份,4 种林分中红皮云杉的针叶 C 含量变化趋势完全一致,而 N 和 P 含量及 C:N、C:P 和 N:P 的变化趋势却不完全一

致;同一林分的各指标在不同月份间存在明显差异,但不同林分间各指标平均值的差异却不显著。比较而言,4 种林分中红皮云杉的针叶 C 含量变异系数最小,C:P 变异系数最大。总体来看,4 种林分中红皮云杉的生长在 5 月份至 6 月份受 N 限制,在 7 月份至 8 月份受 N 和 P 共同限制,在 9 月份受 P 限制。根据上述研究结果,建议在 5 月份至 6 月份施加氮肥,并在 7 月份至 8 月份同时施加氮肥和磷肥,以提高红皮云杉的养分利用效率,促进其快速生长。

#### 参考文献:

- [1] 付晓凤,朱原,黄杰,等.氮磷钾配比施肥对扁桃幼苗生长及叶片养分含量的影响[J].四川农业大学学报,2019,37(5):629-635.
- [2] 张彤彤,徐福利,汪有科,等.施用氮磷钾对密植梨枣生长与叶片养分季节动态的影响[J].植物营养与肥料学报,2012,18(1):241-248.
- [3] SARDANS J, RIVAS-UBACH A, PEÑUELAS J. The elemental stoichiometry of aquatic and terrestrial ecosystems and its relationships with organismic lifestyle and ecosystem structure and function: a review and perspectives[J]. Biogeochemistry, 2012, 111: 1-39.
- [4] 项文化,黄志宏,闫文德,等.森林生态系统碳氮循环功能耦合研究综述[J].生态学报,2006,26(7):2365-2372.
- [5] 赵亚芳,徐福利,王渭玲,等.华北落叶松针叶碳、氮、磷含量及化学计量比的季节变化[J].植物营养与肥料学报,2015,21(5):1328-1335.
- [6] KOERSELMAN W, MEULEMAN A F M. The vegetation N:P ratio: a new tool to detect the nature of nutrient limitation [J]. Journal of Applied Ecology, 1996, 33: 1441-1450.
- [7] REICH P B, OLEKSYN J. Global patterns of plant leaf N and P in relation to temperature and latitude[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2004, 101(30): 11001-11006.
- [8] ELSER J J, FAGAN W F, KERKHOFF A J, et al. Biological stoichiometry of plant production: metabolism, scaling and ecological response to global change[J]. New Phytologist, 2010, 186: 593-608.
- [9] MCGRODDY M E, DAUFRESNE T, HEDIN L O. Scaling of C:N:P stoichiometry in forests worldwide: implications of terrestrial Redfield-type ratios[J]. Ecology, 2004, 85: 2390-2401.
- [10] 郝玉琢,周磊,吴慧,等.4 种类型水曲柳人工林叶片-凋落物-土壤生态化学计量特征比较[J].南京林业大学学报(自然科学版),2009,43(4):101-108.
- [11] 张立华,林益明,叶功富,等.不同林分类型叶片氮磷含量、氮磷比及其内吸收率[J].北京林业大学学报,2009,31(5):67-72.

- variation in seed production, predation and abortion in *Juniperus communis* throughout its range in Europe[J]. *Journal of Ecology*, 2000, 88(3): 436-446.
- [19] 何 权,蒋瑞娟,朱 军,等. 新疆梭梭种子表型性状变异分析及相关研究[J]. *植物资源与环境学报*, 2019, 28(3): 26-32.
- [20] 魏胜利,王文全,秦淑英,等. 甘草种源种子形态与萌发特性的地理变异研究[J]. *中国中药杂志*, 2008, 33(8): 869-873.
- [21] 宋松泉. 种子生物学研究指南[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 3-4.
- [22] 陈丽君,邓小梅,丁美美,等. 苦楝种源果核及种子性状地理变异的研究[J]. *北京林业大学学报*, 2014, 36(1): 15-20.
- [23] 郭 松,李在留,薛建辉,等. 不同种源掌叶木果实和种子表型性状多样性分析及综合评价[J]. *植物资源与环境学报*, 2018, 27(4): 11-20.
- [24] 姜 楠. 基于叶绿体 DNA 的兴安杜鹃遗传结构与亲缘地理学研究[D]. 长春: 东北师范大学生命科学院, 2016: 36-37.
- [25] 满 莉. 基于 SSR 分子标记的兴安杜鹃群体遗传结构研究[D]. 长春: 东北师范大学生命科学院, 2016: 33-34.
- [26] HUSBAND B C, BARRETT S C H. Estimates of gene flow in *Eichhornia paniculata* (Pontederiaceae): effects of range substructure[J]. *Heredity*, 1995, 75(4): 549-560.
- [27] SLATKIN M. Gene flow and the geographic structure of natural populations[J]. *Science*, 1987, 236(4803): 787-792.
- [28] 张元燕,虞木奎,方炎明. 麻栎不同种源的表型性状变异分析[J]. *植物资源与环境学报*, 2014, 23(3): 36-44.
- (责任编辑: 张明霞)

~~~~~  
(上接第 25 页 Continued from page 25)

- [12] 张国君,李 云,徐兆翻,等. 引种刺槐无性系形态及叶片营养的初步研究[J]. *北京林业大学学报*, 2012, 34(2): 52-56.
- [13] 任 悦,高广磊,丁国栋,等. 沙地樟子松人工林叶片-枯落物-土壤有机碳含量特征[J]. *北京林业大学学报*, 2018, 40(7): 36-44.
- [14] HAN W, FANG J, GUO D, et al. Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 753 terrestrial plant species in China[J]. *New Phytologist*, 2005, 168: 377-385.
- [15] 任书杰,于贵瑞,陶 波,等. 中国东部南北样带 654 种植物叶片氮和磷的化学计量学特征研究[J]. *环境科学*, 2007, 28(12): 2665-2673.
- [16] 吴统贵,陈步峰,肖以华,等. 珠江三角洲 3 种典型森林类型乔木叶片生态化学计量学[J]. *植物生态学报*, 2010, 34(1): 58-63.
- [17] 平 川,王传宽,全先奎. 环境变化对兴安落叶松氮磷化学计量特征的影响[J]. *生态学报*, 2014, 34(8): 1965-1974.
- [18] 王树力,郝玉琢,周 磊,等. 水曲柳人工林树木叶片营养元素及其化学计量特征的季节动态[J]. *北京林业大学学报*, 2018, 40(10): 24-33.
- [19] 徐化成. 关于人工林的地力下降问题[J]. *世界林业研究*, 1992(1): 66-73.
- [20] 周 磊,王树力. 树种混交对红皮云杉人工林土壤养分的影响[J]. *东北林业大学学报*, 2019, 47(2): 37-41.
- [21] 牛得草,李 茜,江世高,等. 阿拉善荒漠区 6 种主要灌木植物叶片 C:N:P 化学计量比的季节变化[J]. *植物生态学报*, 2013, 37(4): 317-325.
- [22] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 222-232.
- [23] 李 征,韩 琳,刘玉虹,等. 滨海盐地碱蓬不同生长阶段叶片 C、N、P 化学计量特征[J]. *植物生态学报*, 2012, 36(10): 1054-1061.
- [24] 刘广全,赵士洞,王 浩,等. 锐齿栎林非同化器官营养元素含量的分布[J]. *生态学报*, 2001, 21(3): 422-429.
- [25] HERBERT D A, WILLIAMS M, RASTETTER E B. A model analysis of N and P limitation on carbon accumulation in Amazonian secondary forest after alternate land-use abandonment [J]. *Biogeochemistry*, 2003, 65: 121-150.
- [26] ÅGREN G I. Stoichiometry and nutrition of plant growth in natural communities [J]. *Annual Review of Ecology Evolution, and Systematics*, 2008, 39: 153-170.
- [27] AERTS R, CHAPIN III F S. The mineral nutrition of wild plants revisited: a re-evaluation of processes and patterns[J]. *Advances in Ecological Research*, 1999, 30: 1-67.
- [28] ELSER J J, FAGAN W F, DENNO R F, et al. Nutritional constraints in terrestrial and freshwater food webs [J]. *Nature*, 2000, 408(6812): 578-580.
- [29] GÜSEWELL S. N:P ratios in terrestrial plants: variation and functional significance[J]. *New Phytologist*, 2004, 164: 243-266.
- [30] REICH P B, WALTERS M B, ELLSWORTH D S. Leaf life-span in relation to leaf, plant, and stand characteristics among diverse ecosystems[J]. *Ecological Monographs*, 1992, 62(3): 365-392.
- (责任编辑: 佟金凤)