

DOI:10.12171/j.1000-1522.20190113

阔叶树对红皮云杉人工林土壤营养状况的改善作用

周 磊 王树力

(东北林业大学林学院, 黑龙江 哈尔滨 150040)

摘要:【目的】研究红皮云杉人工林培育过程中林分地力的变化状况以及阔叶树对红皮云杉人工林土壤营养的改善作用, 为红皮云杉人工林的培育筛选适宜的混交树种和施肥营养元素。【方法】在红皮云杉人工林和天然林中采集树叶、凋落物和土壤样品, 实验室内使用碳氮分析仪测定样品 C 含量, 凯氏定氮仪测定叶片和凋落物的 N 含量, 连续流动分析仪测定土壤的 N 含量, 硫酸-高氯酸消化-钼锑抗比色法测定样品 P 含量。【结果】(1)4 种红皮云杉人工林间土壤的 C、N、P 含量差异显著, 3 种混交林均大于纯林, 其中红皮云杉胡桃楸混交林 C、N、P 含量最大; (2)4 种红皮云杉人工林间土壤的 C:N、C:P 差异显著, 3 种混交林均小于纯林, 其中, 红皮云杉胡桃楸混交林 C:N、C:P 最小; (3)混交树种叶片及其凋落物的 N、P 含量差异显著, 以黄檗为最低, 胡桃楸为最高, 但均高于红皮云杉; (4)混交树种叶片及其凋落物的 C:N、C:P 以黄檗为最高, 胡桃楸为最低, 但均显著低于红皮云杉; (5)混交林中混交树种叶片及其凋落物与土壤之间 C、N、P 含量及 C:N、C:P 的相关性皆高于同林型中红皮云杉叶片及其凋落物与土壤之间 C、N、P 含量及 C:N、C:P 的相关性。【结论】依据树种叶片、凋落物及土壤部分的 C 含量、N 含量、P 含量、C:N、C:P 和 N:P, 胡桃楸和水曲柳可做为红皮云杉人工林的适宜混交树种, 培育过程中应注意解决 N 素和 P 素含量的不足。

关键词: 红皮云杉人工林; 叶片; 凋落物; 土壤营养; 生态化学计量特征

中图分类号: S791.182; S714.8 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1522(2020)03-0046-08

引文格式: 周磊, 王树力. 阔叶树对红皮云杉人工林土壤营养状况的改善作用 [J]. 北京林业大学学报, 2020, 42(3): 46-53.

Zhou Lei, Wang Shuli. Improvement of broadleaved tree species to soil nutrient conditions of *Picea koraiensis* plantations [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2020, 42(3): 46-53.

Improvement of broadleaved tree species to soil nutrient conditions of *Picea koraiensis* plantations

Zhou Lei Wang Shuli

(School of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, Heilongjiang, China)

Abstract: [Objective] Exploring the changes of soil nutrient conditions and the improvement role of broadleaved tree species to the soil nutrients of *Picea koraiensis* plantations aims to select the suitable mixed species and fertilization elements for the cultivation of *Picea koraiensis* plantations. [Method] We collected the sample of leaf, litter and soil from *Picea koraiensis* plantations and natural forest in the sample plots, and used carbon nitrogen analyzer to determine the C content of the samples, used Kjeldahl instrument to determine the N content of leaves and litter samples, used the continuous flow analyzer to determine the N content of the soil samples, and used sulfuric acid-perchloric acid digestion-molybdenum antimony colorimetry to determine the P content of the samples. [Result] (1) The difference of C content, N content and P content in the soil of four plantation types was significant, pure *Picea koraiensis* plantation was lower than three mixed plantations, and highest in *Picea koraiensis*-*Juglans mandshurica* mixed plantations. (2) The difference of C:N and C:P in the soil of four plantation types was significant, pure *Picea koraiensis*

收稿日期: 2019-03-04 修回日期: 2019-04-23

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFD0601103), 黑龙江省省级财政林业科研专项(201522)。

第一作者: 周磊。主要研究方向: 水土保持与林业生态工程。Email: leizhou93@163.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: 王树力, 教授。主要研究方向: 生态学、水土保持及荒漠化防治。Email: shuliwang@163.com 地址: 同上。

本刊网址: <http://j.bjfu.edu.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

plantation was higher than three mixed plantations, and lowest in *Picea koraiensis*-*Juglans mandshurica* mixed plantations. (3) The difference of N content and P content in the leaf and litter of three mixed species was significant, lowest in *Phellodendron amurense*, and highest in *Juglans mandshurica*, but all of them were higher than that of *Picea koraiensis*. (4) The C:N and C:P in the leaf and litter of mixed tree species were highest in *Phellodendron amurense* and lowest in *Juglans mandshurica*, but all of them were obvious lower than that of *Picea koraiensis*. (5) The correlations of C content, N content, P content, C:N and C:P between leaf and soil as well as between litter and soil were higher in the mixed species than that in *Picea koraiensis*. [Conclusion] According to the C contents, N contents, P contents, C:N, C:P and N:P in the leaf, litter and soil parts of *Picea koraiensis* plantations, *Juglans mandshurica* and *Fraxinus mandshurica* should be prefer as the mixed tree species, more attention should be paid to the lack of N content and P content during the cultivation of *Picea koraiensis* plantations.

Key words: *Picea koraiensis* plantation; leaf; litter; soil nutrient; ecological stoichiometric characteristics

针叶树种人工纯林由于其枯落物营养成分不足或营养回归速度较慢^[1-3],长期培育会产生地力下降的现象^[4-6]。相较于针叶树种人工纯林,针阔混交林则能增加土壤的养分含量^[7-8]。林木通过叶片进行光合作用固定C素为林木的生长提供有机成分,其生长发育所需N、P养分则主要来源于土壤^[9]。林木的枯枝及落叶分解后又输入到土壤系统,补充土壤系统的营养元素^[10]。这一过程当中,凋落物是联系林木和土壤的中间部分,C、N、P等营养成分在林木叶片、凋落物和土壤之间循环,使得林木叶片-凋落物-土壤系统的养分含量保持平衡和稳定^[11]。通过研究林木叶片-凋落物-土壤系统的养分含量与分布,就可确定合理的林分阔叶组成树种,并采取适宜的施肥措施,保持针叶树种人工林的地力水平。

红皮云杉(*Picea koraiensis*)是培育造纸用材和大径材的优良树种。相关研究证明,培育云杉人工纯林,可造成林地土壤肥力的衰退^[12]。笔者曾通过简单对比红皮云杉人工纯林与红皮云杉针阔混交林间土壤的C、N、P含量,初步得出阔叶树混交可改善红皮云杉人工林林地的营养状况^[13]。尚需通过林木叶片-凋落物-土壤系统的生态化学计量学分析,进一步确认阔叶混交树种在红皮云杉人工林地力维持中的作用。因此,本研究分析红皮云杉及其混交树种叶片-凋落物-土壤系统的C、N、P含量及其生态化学计量特征,研究叶片-凋落物-土壤系统的养分分配格局,探讨阔叶树对红皮云杉人工林土壤营养的改善作用,研究结果可为红皮云杉人工林阔叶混交树种的选择与林地施肥提供依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

东北林业大学森林培育试验站(45°23'~45°26'N、127°26'~127°39'E)位于黑龙江省尚志市西侧

帽儿山实验林场,属长白山系张广才岭西坡小岭余脉,为松嫩平原向张广才岭过度的低山丘陵区。平均海拔300 m,坡度一般为6°~15°。本区属温带大陆性季风气候。年均气温2.8℃,≥10℃积温2000~2500℃,无霜期120~140 d。年均蒸发量1094 mm,年均降水量723 mm。研究区主要乔木植物有水曲柳(*Fraxinus mandshurica*)、胡桃楸(*Juglans mandshurica*)、红松(*Pinus koraiensis*)、白桦(*Betula platyphylla*)、长白落叶松(*Larix olgensis*)、红皮云杉、黄檗(*Phellodendron amurense*)等,灌木植物主要有茶条槭(*Acer ginnala*)、忍冬(*Lonicera japonica*)、杜鹃(*Rhododendron* sp.)等,草本植物主要有木贼(*Equisetum hyemale*)、苔草(*Carex* spp.)、地榆(*Sanguisorba officinalis*)等。地带性土壤为暗棕壤^[13]。

1.2 研究方法

1.2.1 研究林分的选取

选取东向9°山坡中部天然林采伐后营造的红皮云杉纯林(PP)、红皮云杉-黄檗混交林(PPHeM)、红皮云杉-水曲柳混交林(PFM)和红皮云杉-胡桃楸混交林(PJM),其林龄均为31年。同一山坡中部未采伐的原有天然林(NF)为对照(表1)。

1.2.2 样品采集、测定及数据处理

2017年8月,在每一林型中顺坡分别设置3条20 m样带,采取各树种中上部位树叶,凋落物及0~10 cm土层土壤样品并进行相应处理^[14-15]。实验室测定各样品的C、N、P含量后,处理数据、作图,对各指标进行方差分析、多重比较及相关性分析^[14-16]。

2 结果与分析

2.1 红皮云杉人工林树种叶片-凋落物-土壤的C、N、P含量

相对于原有天然林而言,4种红皮云杉人工林中红皮云杉叶片、凋落物的C、N、P含量均显著低于对

表 1 研究林分状况

Tab. 1 General information of the study plantations

林分类型 Plantation type	树种 Species	平均树高 Average tree height/m	平均胸径 Average DBH/cm	现存密度/(株·hm ⁻²) Present density/ (tree·ha ⁻¹)	郁闭度 Canopy density/%
红皮云杉纯林 Pure <i>Picea koraiensis</i> plantation (PP)	红皮云杉 <i>Picea koraiensis</i>	15.28	12.82	2 333	95
红皮云杉黄檗混交林 <i>Picea koraiensis</i> - <i>Phellodendron</i> <i>amurens</i> mixed plantations (PPHeM)	黄檗 <i>Phellodendron amurens</i>	16.44	11.45	833	95
红皮云杉水曲柳混交林 <i>Picea koraiensis</i> - <i>Fraxinus</i> <i>mandshurica</i> mixed plantations (PFM)	红皮云杉 <i>Picea koraiensis</i>	15.67	12.90	1 967	
红皮云杉胡桃楸混交林 <i>Picea koraiensis</i> - <i>Juglans mandshurica</i> mixed plantations (PJM)	水曲柳 <i>Fraxinus mandshurica</i>	18.22	13.19	769	95
	红皮云杉 <i>Picea koraiensis</i>	16.83	13.56	1 346	
	胡桃楸 <i>Juglans mandshurica</i>	19.78	14.08	722	95
	红皮云杉 <i>Picea koraiensis</i>	17.89	13.79	1 430	
天然林 Natural forest (NF)	水曲柳 <i>Fraxinus mandshurica</i>	17.75	14.86	950	90
	胡桃楸 <i>Juglans mandshurica</i>	18.23	13.25		

照(图 1A、图 1B、图 1C);红皮云杉针叶纯林土壤的 C、N、P 含量也均显著低于对照(图 1A、图 1B、图 1C)。人工混交林中黄檗凋落物的 C、N、P 含量显著低于对照(图 1a、图 1b、图 1c);红皮云杉黄檗混交林土壤的 C、N、P 含量也显著低于对照(图 1a、图 1b、图 1c)。

红皮云杉混交林中水曲柳、胡桃楸叶片的 C 含量显著高于红皮云杉人工纯林;黄檗、水曲柳、胡桃楸叶片的 N、P 含量显著高于红皮云杉人工纯林,且胡桃楸叶片的 N、P 含量显著高于黄檗叶片的 N、P 含量(图 1a、图 1b、图 1c)。凋落物的 C 含量胡桃楸显著高于黄檗,凋落物的 N、P 含量水曲柳和胡桃楸显著高于黄檗和红皮云杉(图 1a、图 1b、图 1c)。红皮云杉水曲柳混交林和红皮云杉胡桃楸混交林土壤的 C、N、P 含量均显著高于红皮云杉人工纯林。红皮云杉黄檗混交林土壤的 C、P 含量显著低于其他两种混交林,其土壤的 N 含量也显著低于红皮云杉胡桃楸混交林土壤(图 1a、图 1b、图 1c)。

4 种红皮云杉人工林中红皮云杉的 C 含量在不同组分间差异显著(图 1A),植物 N 含量显著高于土壤 N 含量(图 1B)。黄檗、水曲柳和胡桃楸的 C、N 含量在不同组分间差异显著,植物 C、N 含量显著高于土壤 C、N 含量(图 1a、图 1b)。

2.2 红皮云杉人工林树种叶片-凋落物-土壤的生态化学计量特征

相对于原有天然林而言,红皮云杉人工纯林中红皮云杉叶片和凋落物的 C:N、C:P、N:P 均显著高于对照,云杉人工混交林中红皮云杉叶片的 C:N 和 C:P 均显著高于对照(图 2A、图 2B、图 2C)。红皮云杉纯林土壤的 C:N 和 C:P 也均显著高于对照(图 2A、图 2B)。红皮云杉混交林中黄檗凋落物的 C:N、C:P 显著高于对照(图 2a、图 2b)。

红皮云杉人工混交林中黄檗、水曲柳、胡桃楸叶片和凋落物的 C:N、C:P、N:P 均显著低于红皮云杉人工纯林(图 2a、图 2b、图 2c)。且胡桃楸凋落物的 C:N、C:P 显著低于黄檗凋落物的 C:N、C:P(图 2a、图 2b)。红皮云杉混交林土壤的 C:N 和 C:P 均显著低于红皮云杉人工纯林,且红皮云杉胡桃楸混交林土壤的 C:N 和 C:P 显著低于红皮云杉黄檗混交林土壤的 C:N 和 C:P(图 2a、图 2b)。

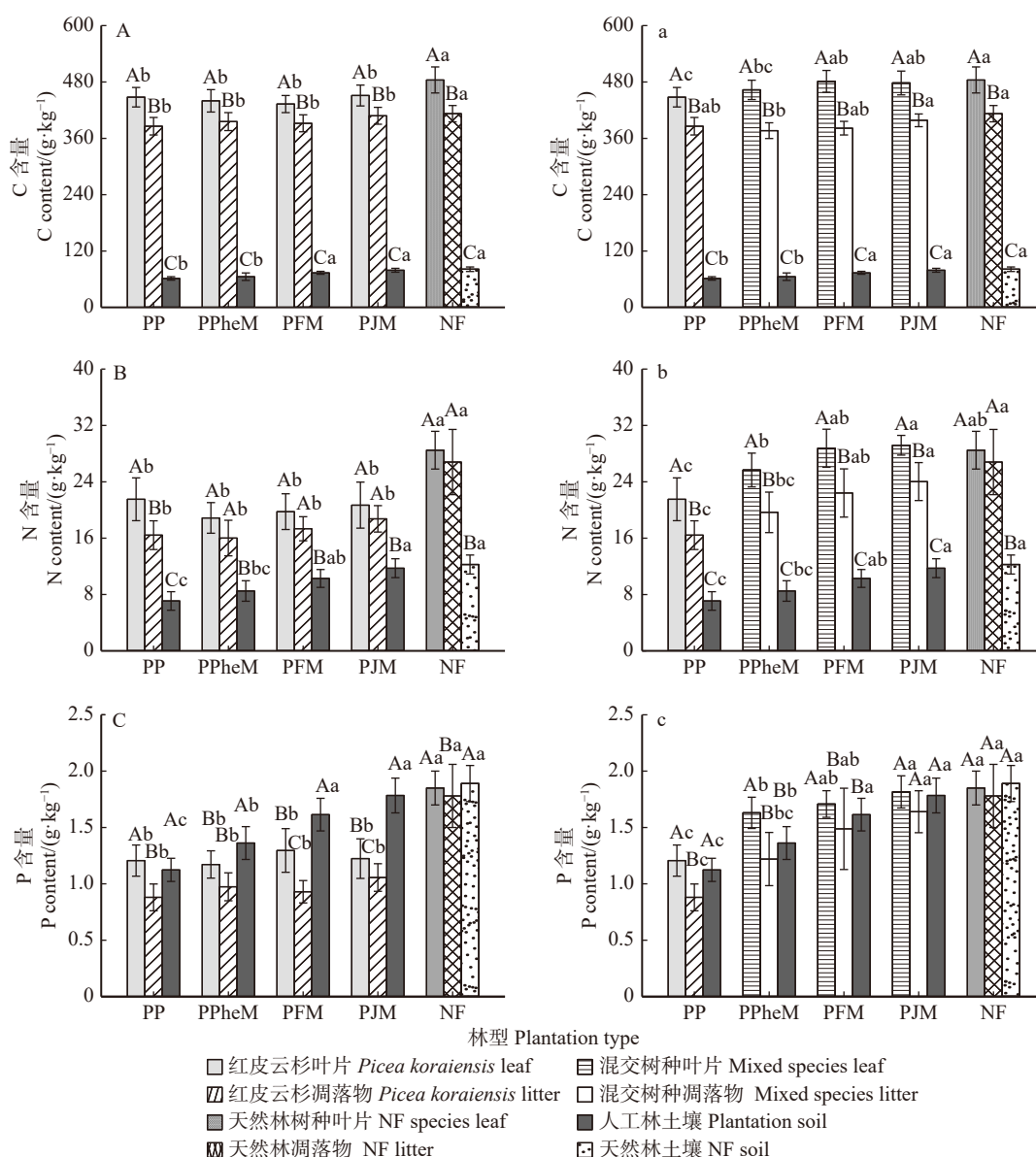
红皮云杉和混交树种叶片、凋落物、土壤的 C:N 和 C:P 均值从大到小依次为凋落物、叶片和土壤。植物的 C:N、C:P、N:P 均显著高于土壤的 C:N、C:P、N:P(图 2a、图 2b、图 2c)。

2.3 红皮云杉人工林树种 C、N、P 含量在叶片、凋落物和土壤间的相关性

4 种红皮云杉人工林中红皮云杉及其混交树种 C、N、P 含量在叶片与凋落物、叶片与土壤、土壤与凋落物之间均为显著或极显著正相关(表 2),原因在于土壤的 C、N、P 主要来源于凋落物,凋落物又直接来源于叶片。混交树种的 C、N、P 含量在叶片与土壤及凋落物与土壤之间的相关性高于同林型中红皮云杉的 C、N、P 含量在叶片与土壤及凋落物与土壤之间的相关性(表 2),说明混交林土壤养分更多决定于混交树种的叶片和凋落物,混交树种对于土壤养分的影响更大。

2.4 红皮云杉人工林树种叶片-凋落物-土壤系统营养状况的变化

不同类型红皮云杉人工林土壤的 C、N、P 含量不同程度的低于天然林林下土壤的 C、N、P 含量(表 3)。其中,红皮云杉人工纯林土壤 C、N、P 含量相对于红皮云杉人工混交林比原有天然林降低程度更大。



不同小写字母表示不同林型间差异显著; 不同大写字母表示不同组分间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。Different lowercase letters mean the difference is significant between varied plantation types; different capital letters mean the difference is significant between varied components ($P < 0.05$). The same below.

图1 红皮云杉人工林和天然林树种叶片-凋落物-土壤的C含量、N含量和P含量

Fig. 1 C content, N content and P content in the species leaf-litter-soil of *Picea koraiensis* plantations and natural forest

相较于红皮云杉人工纯林, 混交林在土壤C、N、P含量上平均分别提高了17.86%、43.64%和41.96%(表4)。但不同树种混交林的提高率不同, 红皮云杉胡桃楸混交林分别提高了28.24%、65.65%和59.29%, 红皮云杉水曲柳混交林分别提高了19.32%、45.14%和44.11%, 红皮云杉黄檗混交林则分别只提高了6.00%、19.94%和21.61%(表4)。

3 讨论

3.1 红皮云杉人工纯林的地力下降及红皮云杉人工林适宜混交树种的选择

本研究结果表明长期培育红皮云杉人工纯林更

易导致土壤地力的下降。这与多数学者对天然林转变为人工纯林后土壤地力变化的研究结果一致^[17-19]。相对于红皮云杉树叶及其凋落物, 3种混交树种叶片和凋落物C、N、P含量的提高程度也预示了3种混交林土壤C、N、P含量的提高程度(表4), 因为混交林土壤养分更多来源于混交树种的叶片和凋落物, 混交树种对于土壤养分的影响更大(表2)。

综合混交林土壤与红皮云杉纯林土壤营养状况的差异(图1a、图1b、图1c)及各混交林树叶凋落物土壤组分营养状况相对于红皮云杉纯林树叶凋落物土壤组分营养状况的提高程度(表4), 可推出胡桃楸和水曲柳与红皮云杉混交更利于红皮云杉人工林

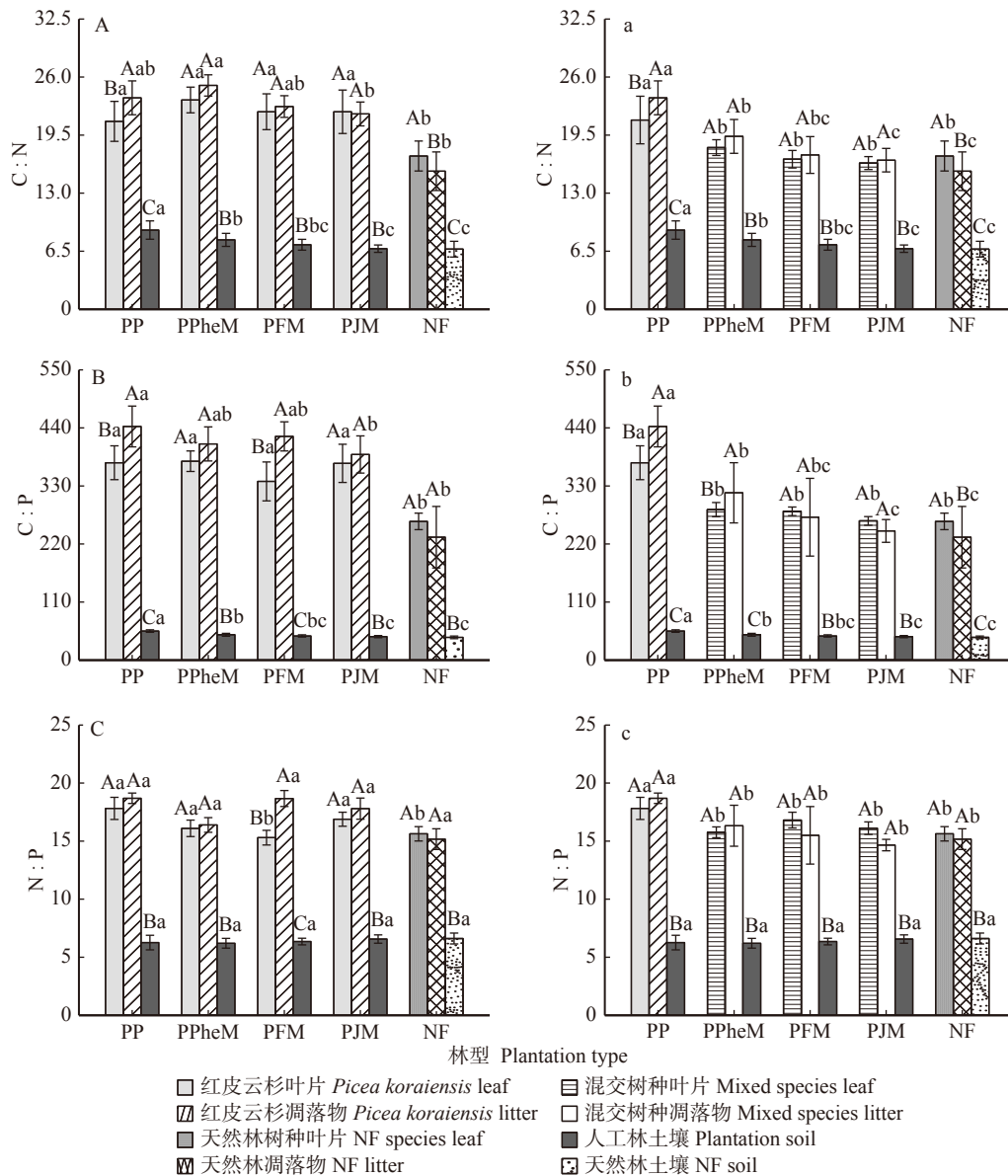


图2 红皮云杉人工林和天然林树种叶片、凋落物和土壤的生态化学计量特征

Fig. 2 Ecological stoichiometric characteristics in the species leaf-litter-soil of *Picea koraiensis* plantations and natural forests

土壤质量的维持,而黄槿与红皮云杉混交对于红皮云杉土壤质量的维持效果不如胡桃楸和水曲柳明显。

3.2 红皮云杉人工林的生态化学计量特征及营养分配

红皮云杉与阔叶混交树叶片化学计量特征的差异说明植物对营养的吸收具有选择性。C:N与营养利用效率成反比^[20]。阔叶混交树叶片的C:N小于红皮云杉叶片的C:N,说明阔叶混交树种对营养元素利用效率更高,且胡桃楸对N、P的利用效率最高。植物叶片N:P反映土壤养分的有效性,指示土壤养分的供给状况^[21]。红皮云杉及其混交树叶片的N:P均值(图2C、图2c)均大于16,可能意味着研究区红皮云杉人工林生长可能会受到P的限制^[20]。

红皮云杉及其混交树种凋落物的C:N均高于叶

片的C:N,说明树木通过重吸收使养分从衰老的叶片中迁移到其他器官,使养分在植物体内的存留时间得到延长,从而增大了养分的利用效率^[22]。凋落物降解速率也是指示土壤养分有效性高低的重要指标^[23]。有研究表明,C:N可影响凋落物的分解和养分归还速率,较高的C:N不利于凋落物的分解^[24]。红皮云杉凋落物的C:N、C:P相对最高,最不容易分解,胡桃楸凋落物C:N、C:P相对最低,最容易分解。

土壤有机质C:N越大,其分解速度越慢^[25],有机质矿化作用越慢,有效N含量也越低^[26]。本研究所得结果(图2)表明,长期培育人工纯林可能会减慢土壤有机质矿化速率,降低有效N含量。土壤有机质的分解速率也会决定P的有效性^[27],由于土壤有机质间的差异,红皮云杉混交林土壤P的有效性也高于红皮云杉纯林。

表 2 红皮云杉人工林树种 C 含量、N 含量、P 含量在叶片、凋落物和土壤间的相关性

Tab. 2 Correlations of C content, N content, P content among species leaf, litter and soil of *Picea koraiensis* plantations

元素 Element	相关组分 Relative component	红皮云杉纯林 PP	红皮云杉黄檗混交林 PPheM	红皮云杉水曲柳混交林 PFM	红皮云杉胡桃楸混交林 PJM			
		红皮云杉 <i>Picea koraiensis</i>	黄檗 <i>Phellodendron amurense</i>	红皮云杉 <i>Picea koraiensis</i>	水曲柳 <i>Fraxinus mandshurica</i>	红皮云杉 <i>Picea koraiensis</i>	胡桃楸 <i>Juglans mandshurica</i>	红皮云杉 <i>Picea koraiensis</i>
C	叶片与凋落物 Leaf and litter	0.82**	0.548*	0.653*	0.507*	0.605*	0.410*	0.639*
	叶片与土壤 Leaf and soil	0.481*	0.701**	0.576*	0.745**	0.692**	0.791**	0.645*
	凋落物与土壤 Litter and soil	0.716**	0.814**	0.642*	0.674*	0.562*	0.860**	0.676*
N	叶片与凋落物 Leaf and litter	0.840**	0.693*	0.736**	0.723**	0.645*	0.641*	0.608*
	叶片与土壤 Leaf and soil	0.503*	0.646*	0.513*	0.804**	0.672*	0.748**	0.573*
	凋落物与土壤 Litter and soil	0.695*	0.765**	0.607*	0.704**	0.691**	0.820**	0.610*
P	叶片与凋落物 Leaf and litter	0.724**	0.696**	0.638*	0.512*	0.658*	0.607*	0.792**
	叶片与土壤 Leaf and soil	0.578*	0.529*	0.402*	0.612*	0.559*	0.694**	0.588*
	凋落物与土壤 Litter and soil	0.638*	0.754**	0.518*	0.733**	0.630*	0.784**	0.607*

注: **表示极显著相关($P < 0.01$), *表示显著相关($P < 0.05$)。Notes: ** means extremely significant correlation at $P < 0.01$ level, * means significant correlation at $P < 0.05$ level.

表 3 红皮云杉人工林树叶凋落物土壤系统的养分下降状况

Tab. 3 Decrease situation of nutrient in the leaf-litter-soil system of *Picea koraiensis* plantations

指标 Index	树叶 Leaf			凋落物 Litter			土壤 Soil		
	C 含量 C content	N 含量 N content	P 含量 P content	C 含量 C content	N 含量 N content	P 含量 P content	C 含量 C content	N 含量 N content	P 含量 P content
红皮云杉人工混交林平均降低值 Average decrease value of PM/(g·kg ⁻¹)	10.17	0.62	0.13	27.05	4.77	0.33	8.60	2.08	0.30
红皮云杉人工纯林平均降低值 Average decrease value of PP/(g·kg ⁻¹)	36.70	6.97	0.64	26.67	10.38	0.90	19.62	5.17	0.77
红皮云杉人工混交林平均降低率 Average decrease rate of pure PM/%	2.10	2.18	7.03	6.56	17.79	18.54	10.58	16.98	15.87
红皮云杉人工纯林平均降低率 Average decrease rate of pure PP/%	7.58	24.46	34.81	6.46	38.72	50.56	24.13	42.20	40.74

表 4 红皮云杉人工混交林树叶凋落物土壤系统的养分改善状况

Tab. 4 Improvement of nutrient in the leaf-litter-soil system of *Picea koraiensis* mixed plantations

指标 Index	树叶 Leaf			凋落物 Litter			土壤 Soil		
	C 含量 C content	N 含量 N content	P 含量 P content	C 含量 C content	N 含量 N content	P 含量 P content	C 含量 C content	N 含量 N content	P 含量 P content
红皮云杉胡桃楸混交林平均提高值 Average increase value of PJM/(g·kg ⁻¹)	30.29	7.67	0.61	12.50	7.61	0.76	17.42	4.65	0.66
红皮云杉水曲柳混交林平均提高值 Average increase value of PFM/(g·kg ⁻¹)	33.72	7.25	0.50	-4.20	5.99	0.61	11.92	3.20	0.49
红皮云杉黄槲混交林平均提高值 Average increase value of PPheM/(g·kg ⁻¹)	15.59	4.16	0.42	-9.43	3.24	0.34	3.70	1.41	0.24
红皮云杉混交林平均提高值 Average increase value of PM/(g·kg ⁻¹)	26.53	6.35	0.51	-0.38	5.61	0.57	11.02	3.09	0.47
红皮云杉胡桃楸混交林平均提高率 Average increase rate of PJM/%	6.77	35.65	50.58	3.24	46.29	86.36	28.24	65.65	59.29
红皮云杉水曲柳混交林平均提高率 Average increase rate of PFM/%	7.53	33.67	41.63	-1.09	36.43	69.09	19.32	45.14	44.11
红皮云杉黄槲混交林平均提高率 Average increase rate of PPheM/%	3.48	19.32	35.16	-2.44	19.73	38.64	6.00	19.94	21.61
红皮云杉混交林平均提高率 Average increase rate of PM/%	5.93	29.51	42.62	-0.10	34.14	64.77	17.86	43.64	41.96

由于叶片养分含量在衰老凋落之前存在较高的转移率^[28-29], 4种红皮云杉人工林中红皮云杉与混交树种凋落物的N、P含量均低于叶片(图1)。土壤中的N、P被树木吸收利用的多, 而从凋落物归还的少, 导致植物N含量显著高于土壤N含量(图1b)。只有及时追肥才能补充土壤养分的缺失, 从而促进林木的生长。

4 结 论

(1)长期培育红皮云杉人工纯林导致林地土壤有机C、全N、全P含量下降。阔叶树种胡桃楸和水曲柳的混交可以有效防止或减缓红皮云杉人工林的地力下降, 增加林地土壤有机C、全N、全P含量。

(2)红皮云杉人工林叶片及其凋落物的C、N、P含量及其生态化学计量为红皮云杉人工林混交树种的选择提供了依据。红皮云杉人工林混交树种叶片和凋落物的N、P含量均高于红皮云杉纯林中红皮云杉叶片和凋落物的N、P含量, 其C:N、C:P、N:P则相反。3种混交树种中胡桃楸叶片和凋落物的N、P含量最高, C:N、C:P、N:P最低。

(3)红皮云杉人工混交林中黄檗、水曲柳、胡桃楸叶片和凋落物C、N、P含量与土壤C、N、P含量间的相关性高于同林型中红皮云杉叶片和凋落物C、N、P含量与土壤C、N、P含量间的相关性, 混交树种比红皮云杉对于凋落物和土壤养分含量的影响更大。

(4)依据红皮云杉人工林树叶、凋落物及土壤部分的营养含量及分布格局, 可选择胡桃楸和水曲柳为红皮云杉人工林的适宜混交树种。研究区红皮云杉人工林可能会受到P的限制, 在培育过程中应注意N肥和P肥的及时施用。

参 考 文 献

- [1] Wang H, Huang Y, Feng Z, et al. C and N stocks under three plantation forest ecosystems of Chinese fir, *Michelia macclurei* and their mixture[J]. *Frontiers of Forestry in China*, 2007, 2(3): 251-259.
- [2] 庞学勇, 刘庆, 刘世全, 等. 川西亚高山云杉人工林土壤质量性状演变[J]. *生态学报*, 2004, 24(2): 261-267.
Pang X Y, Liu Q, Liu S Q, et al. Changes of soil fertility quality properties under subalpine spruce plantation in western Sichuan[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(2): 261-267.
- [3] Hartemink A E. Soil fertility decline in the tropics with case studies on plantations[J]. *Soil Science*, 2003, 170(2): 149-151.
- [4] 盛炜彤. 关于我国人工林长期生产力的保持[J]. *林业科学研究*, 2018, 31(1): 1-14.
Sheng W T. On the maintenance of long-term productivity of plantation in China[J]. *Forest Research*, 2018, 31(1): 1-14.
- [5] 马祥庆, 黄宝龙. 人工林地力衰退研究综述[J]. *南京林业大学学报*, 1997, 21(2): 77-82.
- Ma X Q, Huang B L. Advance in research on site productivity decline of timber plantations[J]. *Journal of Nanjing Forestry University*, 1997, 21(2): 77-82.
- [6] 杨承栋. 杉木人工林地力衰退的原因机制及其防治措施[J]. *世界林业研究*, 1997(4): 34-39.
- Yang C D. The reason and control of site productivity of Chinese fir plantations[J]. *World Forestry Research*, 1997(4): 34-39.
- [7] 王勤, 徐小牛, 平田永二. 琉球松-琉球木荷混交林生长及其土壤特性的研究[J]. *林业科学*, 2004, 40(5): 39-44.
- Wang Q, Xu X N, Eiji H. Characteristics of growth and soil properties in a mixed stand of *Pinus luchuensis* and *Schima wallichii* Kort. ssp. *liukuensis* Bloemb. in subtropical zone[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2004, 40(5): 39-44.
- [8] 秦娟, 唐心红, 杨雪梅. 马尾松不同林型对土壤理化性质的影响[J]. *生态环境学报*, 2013, 22(4): 598-604.
- Qin J, Tang X H, Yang X M. Effects of soil physical and chemical properties on different forest types of *Pinus massoniana*[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2013, 22(4): 598-604.
- [9] 朱媛君, 杨劼, 万俊华, 等. 毛乌素沙地丘间低地主要植物叶片性状及其相互关系[J]. *中国沙漠*, 2015, 35(6): 1496-1504.
- Zhu Y J, Yang J, Wan J H, et al. Leaf traits and their interrelationships of main plant species in inter-dune lowland in the Mu Us Sandy Land[J]. *Journal of Desert Research*, 2015, 35(6): 1496-1504.
- [10] 杨佳佳, 张向茹, 马露莎, 等. 黄土高原刺槐林不同组分生态化学计量关系研究[J]. *土壤学报*, 2014, 51(1): 133-142.
- Yang J J, Zhang X R, Ma L S, et al. Ecological stoichiometric relationships between components of *Robinia pseudoacacia* forest in Loess Plateau[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51(1): 133-142.
- [11] 章广琦, 张萍, 陈云明, 等. 黄土丘陵区刺槐与油松人工林生态系统生态化学计量特征[J]. *生态学报*, 2018, 38(4): 1328-1336.
- Zhang G Q, Zhang P, Chen Y M, et al. Stoichiometric characteristics of *Robinia pseudoacacia* and *Pinus tabulaeformis* plantation ecosystems in the loess hilly-gully region, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(4): 1328-1336.
- [12] 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.
- Xu H C. On the decrease of soil fertility in plantations[J]. *World Forestry Research*, 1992(1): 66-73.
- [13] 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.
- Zhou L, Wang S L. Effects of mixed tree species to soil nutrients in *Picea koraiensis* plantations[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2019, 47(2): 37-41.
- [14] 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)*, 2019, 43(4): 101-108.
- Hao Y Z, Zhou L, Wu H, et al. Comparison of ecological stoichiometric characteristics of leaf-litter-soil in four types of *Fraxinus mandshurica* plantations[J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2019, 43(4): 101-108.

- 101–108.
- [15] 周磊. 红皮云杉人工林 C、N、P 元素生态化学计量特征 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2019.
- Zhou L. Ecological stoichiometric characteristics of C, N and P elements in *Picea koraiensis* plantations[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2019.
- [16] 鲍士旦. 土壤农化分析 (第三版)[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis(3rd ed.)(M). Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [17] 杨玉盛, 杨伦增, 俞新妥. 杉木林取代杂木林后土壤腐殖质组成及特性变化的研究[J]. 福建林学院学报, 1996, 16(2): 97–100.
- Yang Y S, Yang L Z, Yu X T. Changes in composition and propoties of soil humus following replacement of brood-leaved forest by Chinese fir plantation[J]. Journal of Fujian College of Forestry, 1996, 16(2): 97–100.
- [18] Guo L B, Gifford R M. Soil carbon stocks and land use change: a meta analysis[J]. *Global Change Biology*, 2002, 8: 345–360.
- [19] 龚珊珊, 廖善刚. 桉树人工林与天然林土壤养分的对比研究[J]. *江苏林业科技*, 2009, 36(3): 1–4.
- Gong S S, Liao S G. Soil nutrient characteristics in eucalypt plantation and natural forest[J]. Journal of Jiangsu Forestry Science & Technology, 2009, 36(3): 1–4.
- [20] Güsewell S. N: P ratios in terrestrial plants: variation and functional significance[J]. *New Phytologist*, 2004, 164: 243–266.
- [21] Redfield A. The biological control of chemical factors in the environment[J]. *Science*, 1958, 46: 205–221.
- [22] 宗宁, 石培礼, 耿守保, 等. 北方山区主要森林类型树木叶片氮、磷回收效率研究[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(4): 520–529.
- Zong N, Shi P L, Geng S B, et al. Nitrogen and phosphorus resorption efficiency of forests in North China[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2017, 25(4): 520–529.
- [23] 许晓静, 张凯, 刘波, 等. 森林凋落物分解研究进展[J]. 中国水土保持科学, 2007, 5(4): 93–100.
- Xu X J, Zhang K, Liu B, et al. Review on litter decomposition in forest ecosystems[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2007, 5(4): 93–100.
- [24] 何丹, 李栎, 周国新, 等. 马尾松凋落物 C:N:P 化学计量特征对分解速率的影响[J]. *湖南林业科技*, 2015(3): 24–27.
- He D, Li L, Zhou G X, et al. Influence of C:N:P stoichiometry for decomposition rate in *Pinus massoniana* litterfall[J]. *Hunan Forestry Science & Technology*, 2015(3): 24–27.
- [25] Wang W, Wang C, Zeng C, et al. Soil carbon, nitrogen and phosphorus ecological stoichiometry of *Phragmites australis* wetlands in different reaches in Minjiang River estuary[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(13): 4087–4093.
- [26] Agren G I. Stoichiometry and nutrition of plant growth in nature communities[J]. *Annu Rev Ecol Syst*, 2008, 39: 153–170.
- [27] 王绍强, 于贵瑞. 生态系统碳氮磷元素的生态化学计量学特征[J]. *生态学报*, 2008, 28(8): 3937–3947.
- Wang S Q, Yu G R. Ecological stoichiometry characteristics of ecosystem carbon, nitrogen and phosphorus element[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(8): 3937–3947.
- [28] Aerts R, Chapin F S I. The mineral nutrition of wild plants revisited: a re-evaluation of processes and patterns[J]. *Advances in Ecological Research*, 2000, 30: 1–67.
- [29] 郭子武, 陈双林, 杨清平, 等. 密度对四季竹叶片 C、N、P 化学计量和养分重吸收特征的影响[J]. 应用生态学报, 2013, 24(4): 893–899.
- Guo Z W, Chen S L, Yang Q P, et al. Effects of stand density on *Oligostachyum lubricum* leaf carbon, nitrogen, and phosphorus stoichiometry and nutrient resorption[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(4): 893–899.

(责任编辑 范娟
责任编辑 孙向阳)