

# 辽东山区不同林龄落叶松人工林土壤-根系 C : N : P 生态化学计量特征

曾凡鹏<sup>1,2</sup> 迟光宇<sup>1\*</sup> 陈欣<sup>1</sup> 史奕<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>中国科学院沈阳应用生态研究所, 中国科学院污染生态与环境工程重点实验室, 沈阳 110016; <sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要** C、N、P 元素的循环过程是影响森林生态系统功能的重要因素。本文利用空间代替时间的方法, 对辽东山区落叶松人工幼龄林(10 a)、中龄林(25 a)、成熟林(50 a)土壤、根系的 C、N、P 含量及其生态化学计量特征进行了研究。结果表明: 土壤 C、N、P 含量均随着林龄的增加而降低; C : N 和 C : P 随林龄的增加而增加, N : P 随林龄变化不显著; 落叶松根系 N、P 含量及 C : N 和 C : P 受林龄影响显著, N、P 的含量随林龄的增加而降低, C : N 和 C : P 随林龄增加而增加, C 含量和 N : P 随林龄变化不显著; 随着林龄的增加, 该地区落叶松人工林地地力呈逐渐衰退的趋势。建议通过间伐调整林分结构, 并适度施肥来改善土壤肥力。

**关键词** 大量元素; 时空分异; 幼龄林; 中龄林; 成熟林

**The stoichiometric characteristics of C, N and P in soil and root of larch (*Larix* spp.) plantation at different stand ages in mountainous region of eastern Liaoning Province, China.** ZENG Fan-peng<sup>1,2</sup>, CHI Guang-yu<sup>1\*</sup>, CHEN Xin<sup>1</sup>, SHI Yi<sup>1</sup> (<sup>1</sup>Key Laboratory of Pollution Ecology and Environmental Engineering, Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; <sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China).

**Abstract:** The cycling of C, N and P is important in functioning of forest ecosystem. By applying the method of spatial sequence instead of time successional sequence, the contents and stoichiometric ratios of C, N and P in soil and root of larch (*Larix* spp.) in young (10 a), middle-aged (25 a) and mature plantation (50 a) located in the montane region of eastern Liaoning Province, China were studied. The results showed that the contents of soil C, N and P decreased significantly with the increasing stand age. The soil C : N and C : P increased with the increase of stand age. The stand age had no significant effect on N : P in soil. The N, P, C : N and C : P in roots changed significantly with the increase of stand age. The contents of N and P in roots decreased significantly with the increasing stand age. The root C : N and C : P increased with the increasing stand age. The stand age had no significant effect on the content of C and N : P in roots. Our results suggested that the soil fertility of larch plantation declined with the increase of stand age. In order to improve soil fertility, regulation of stand structure by thinning and reasonable fertilization should be applied.

**Key words:** major element; temporal and spatial variation; young forest; middle-aged forest; mature forest.

C、N 和 P 是植物生长所必需的元素, 其中 C 是植物体内干物质的最主要元素; N 主要参与合成植

物体内的氨基酸、蛋白质等关键物质; P 是核酸的重要组成部分 (Dawson *et al.*, 1998; 贺金生等, 2010; 李征等, 2012; 赵亚芳等, 2014a)。植物和土壤 C、N 和 P 养分的含量变化和循环变化对植物的生长和各种

国家自然科学基金项目(31470624)资助。

收稿日期: 2016-02-05 接受日期: 2016-04-15

\* 通讯作者 E-mail: chiguangyu1018@126.com

生理机能有着重要的调控作用(韩兴国等,1999;Chapin *et al.*,2002;Reich *et al.*,2006),因此,研究土壤和植物体内 C、N 和 P 的含量变化和动态分布显得十分必要。

生态化学计量学是研究生物系统能量和多重化学元素平衡,以及元素平衡对生态交互作用影响的一种理论(Sterner *et al.*,2002;Zhang *et al.*,2003)。生态化学计量学是近年来新兴的一个生态学研究领域,也是目前研究土壤-植物相互作用与 C、N 和 P 循环的新思路(Michaels,2003;Schindler,2003;王绍强等,2008)。因此,通过利用生态化学计量学分析元素之间的比值变化能够深入地揭示植物和土壤的养分比例分配及调节机制,从而系统认识元素比例在土壤-植物养分供需过程中的作用(赵亚芳等,2014b)。

落叶松是中国东北地区三大针叶用材林树种之一,也是最为速生丰产的树种,在木材生产、水土保持、生态环境调节等方面占据着重要地位(邵亚丽等,2011;张田田等,2012)。然而,我国落叶松人工林地质量存在不同程度的下降趋势,无论是自身的时间变化规律还是与其他林型的对比结果来看,落叶松人工林土壤养分指标的衰退是比较确定的(陈乃全等,1990;陈志国等,1991;潘建平等,1997)。长期以来,在人工林生态系统的研究中,人们一直把关注点放在地上部分,而地上和地下的整合被认为是研究人工林生态系统的必然趋势和最有效的途径(赵亚芳等,2014a)。植物根系的 C、N 和 P 的生态化学计量特征相对稳定,受生长季节的影响较小,是分析生态系统养分循环的重要方法(赵亚芳等,2014b)。本文以我国辽东山区不同林龄落叶松人工林为研究对象,以空间代替时间,采用野外原位调查测定不同林龄落叶松人工林土壤-根系的 C、N 和 P 含量,采用生态化学计量分析方法,旨在阐明该地

区落叶松人工林生态系统 C、N 和 P 平衡的元素化学计量比格局,揭示元素相互作用与制约变化规律,为实现该地区落叶松人工林自然资源的可持续经营提供养分管理策略。

# 1 研究地区与研究方法

## 1.1 研究区概况

研究区位于中国科学院清原森林生态系统观测站辽宁省抚顺市清原满族自治县东南部的大边沟林场及周边地区(41°52′N—41°84′N,124°54′E—124°56′E)。样地境内的山脉属长白山系龙岗支脉延伸部分的中低山地,海拔 500~700 m。属于大陆性季风气候,冬季寒冷干燥,夏季炎热多雨。年均温 3.9~5.4℃,最高气温 36.5℃,最低气温-37.7℃,年无霜期 120~125 d,年降水量 700~850 mm。土壤为棕色森林土,土层厚度达 50 cm,pH 值 5.5~6.5(Zhu *et al.*,2010;牛小云等,2015)。落叶松林木的主根主要分布在 0~20 cm 土层,骨骼根主要分布在 0~40 cm 土层,细根的分布主要集中在 0~30 cm 土层,根的水平分布随林木阶级有较大的变化(韩有志等,1997)。20 世纪初到 20 世纪 50 年代期间,该地区原始阔叶林遭到严重破坏,之后通过次生林改造,营造了大量的落叶松人工林和红松人工林(闫涛等,2014a)。

## 1.2 样地选取

在查阅当地造林资料和实地勘察的基础上,在相似立地条件下,按落叶松的生长阶段将不同林龄的落叶松划分为幼龄林(10 a)、中龄林(25 a)、成熟林(50 a)3 个林龄(杨晓娟等,2013),每个林龄各选 3 块样地。样地调查因子主要包括林龄、林分密度、平均树高、平均胸径(表 1)。并在每块样地内设置 3 个 20 m×20 m 的小样方。

表 1 样地基本情况  
Table 1 Basic information of sample plots

样地	林龄 (a)	地理位置	海拔 (m)	pH	密度 (株·hm <sup>-2</sup> )	平均树高 (m)	平均胸径 (cm)
1	10	41°52′44.4″N, 124°54′20.4″E	556	6.12	2000	6.58	6.8
2	10	41°52′26.7″N, 124°54′58.8″E	525	5.83	1733	6.99	6.7
3	10	41°52′34.8″N, 124°54′30.5″E	547	6.01	3600	6.22	5.9
4	25	41°52′38.9″N, 124°54′13.5″E	581	5.72	1900	12.8	20.1
5	25	41°52′41.1″N, 124°54′08.2″E	620	5.87	1833	11.9	14.8
6	25	41°52′28.8″N, 124°55′00.2″E	540	5.80	1400	18.5	23.3
7	50	41°56′56.7″N, 124°56′00″E	606	6.00	950	20.9	25.4
8	50	41°50′25.9″N, 124°54′43.8″E	723	5.93	1500	20.5	23.9
9	50	41°56′56.7″N, 124°56′02″E	650	5.59	1000	20.3	25.2

1.3 样品采集与处理

1.3.1 土壤样品采集 于2014年9月在每个选定好样方内中按“S”形随机设5个土壤取样点,每一取样点分别按0~20、20~40 cm 分层取土壤样品,取好后按分层5点各混成一个土样。土样经实验室自然风干,挑去植物残体和石块等杂物,分别过10目(1.7 mm 孔径)、100目土壤筛(0.15 mm 孔径),用于测定土壤基本物理性质及C、N和P元素含量。

1.3.2 植物样品的采集 对研究区内每块样地内的落叶松进行每木检尺后,测得样地内落叶松的胸径和树高,依次按照胸径顺序,将林木分为基数基本相等的3个径级,再在选定好的径级所对应的胸径范围内,每个径级选择一棵落叶松。利用挖掘法采集根部的样品,在离选定好的落叶松地径下0.5 m处按不同方向挖掘后混合,用蒸馏水冲洗掉表面的泥土。将植物根部鲜样放入105℃的烘箱杀青0.5 h,再在65℃烘箱内烘至恒重后,用植物粉碎机磨碎后过100目筛(0.15 mm 孔径),用于测定植物根部C、N和P元素的含量。

1.4 相关指标测定

土壤pH值的测定采用酸度计法,土壤和植物全碳采用TOC仪分析方法测定;土壤和植物全氮采用凯氏定氮法测定;土壤全磷用H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-HClO<sub>4</sub>消煮、钼锑抗比色法进行测定;植物全磷采用H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>消煮、钼锑抗比色法测定(鲁如坤,1999)。

1.5 数据分析

数据采用Excel 2007进行初步整理后,利用SPSS 16.0对土壤C、N、P数据进行双因素方差分析,以探讨林龄及土层深度对土壤C、N、P含量和生态化学计量特征的影响。通过对植物根部数据进行单因方差分析,明确林龄对根系C、N、P含量和生态化学计量特征的影响;通过LSD显著性检验,比较不同林龄之间土壤-根系的C、N、P含量和生态化学计量特征之间的差异显著性;利用SAS 9.1对土壤、植物根系C、N、P及其生态化学计量比进行Pearson相关分析。文中元素之间的比值均为原子数之比。文中图形采用SigmaPlot 10.0软件制作。

2 结果与分析

2.1 不同林龄落叶松人工林土壤-根系的C、N和P含量

双因素方差分析结果显示,林龄、土层及其交互作用均显著影响着落叶松人工林土壤C含量。土

壤C含量在13.12~31.15 g·kg<sup>-1</sup>,0~20 cm 土壤C随林龄呈现逐渐降低的趋势,不同林龄之间土壤C含量差异显著,其中幼龄林C含量比中龄林和成熟林分别高出18.5%和28.1%。20~40 cm 土壤C含量显著低于0~20 cm 土壤,且不同林龄之间土壤C含量差异不显著(图1)。根系C含量范围为674.86~788.81 g·kg<sup>-1</sup>(图2),单因素方差分析结果显示,林龄对根系C含量影响不显著。

双因素方差分析结果表明,林龄、土层及其交互作用对土壤N含量均具有显著影响。土壤N含量在1.28~2.95 g·kg<sup>-1</sup>,各土层土壤N随着林龄均呈现逐渐降低的趋势,且20~40 cm 土壤N含量低于0~20 cm。多重比较结果表明,0~20 cm 土壤N各林龄组间的含量差异显著,幼龄林N含量比中龄林和成熟林分别高出15.5%和36.3%(图1)。根系N含量在4.66~9.76 g·kg<sup>-1</sup>,单因素方差分析表明,林龄

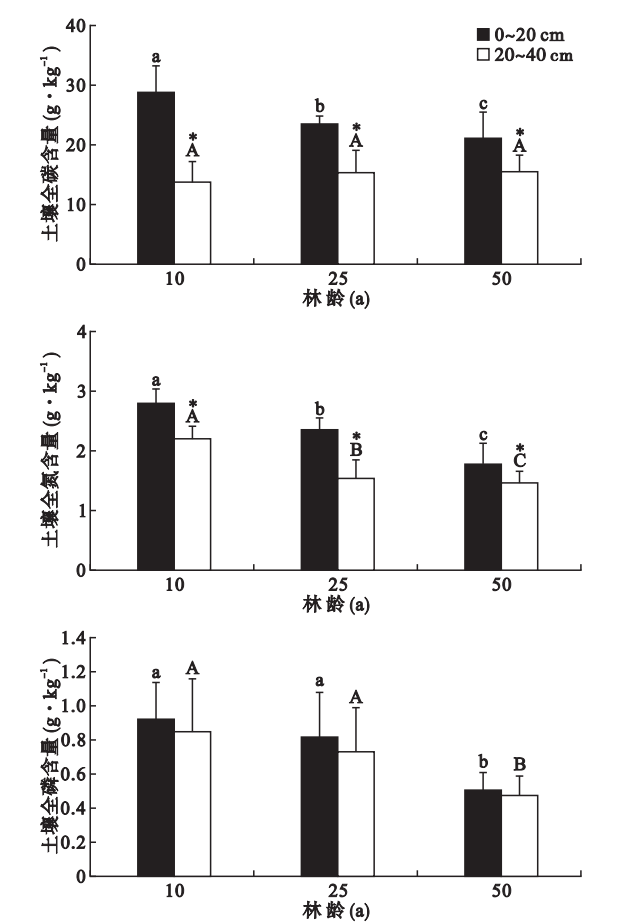


图1 不同土层土壤C、N、P含量随林龄变化情况  
Fig.1 Contents of C, N and P in two soil layers in the forests with different ages  
小写字母表示0~20 cm 土层不同林龄间的多重比较,大写字母表示20~40 cm 土层不同林龄间的多重比较。\*表示同一林龄不同深度差异显著(P<0.05)。

对落叶松根系 N 含量有显著影响,具体表现为根系 N 含量随林龄呈现逐渐降低的趋势,多重比较表明,幼龄林与成熟林之间存在显著差异(图 2)。

双因素方差分析结果表明,林龄对土壤 P 含量影响显著,而土层及其交互作用对土壤 P 含量无显著影响。土壤 P 含量在  $0.34\sim1.07\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,各土层土壤 P 含量均随着林龄呈现逐渐降低的趋势。多重比较显示,0~20 cm 成熟林 P 含量与其余两个林龄组均有显著差异,且幼龄林的 P 含量比中龄林和成熟林分别高出 10.8%和 45.6%(图 1)。根系 P 含量在  $0.24\sim0.48\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (图 2)。单因素方差分析表明,落叶松根系 P 含量随林龄增加呈现逐渐降低的趋势。

2.2 不同林龄落叶松人工林土壤-根系 C、N 和 P 之间的生态化学计量比

落叶松土壤 C : N 在 5.75~16.09,双因素方差分析结果显示,林龄和土层对土壤 C : N 影响显著,

土壤 C : N 随林龄呈现逐渐升高的趋势,且 20~40 cm 土壤 C : N 小于 020 cm 土壤 C : N。多重比较显示,不同林龄 0~20 cm 土壤 C : N 之间差异不显著,20~40 cm 幼龄林的土壤 C : N 与中龄林和成熟林之间存在显著差异(图 3)。根 C : N 在 65.30~211.13。单因素方差分析表明,林龄显著影响植物根系的 C : N,根系 C : N 随林龄呈现逐渐增加的趋势,成熟林的 C : N 与幼龄林和中龄林的 C : N 之间都存在显著差异。

双因素方差分析结果显示,土层对土壤 C : P 影响显著,林龄及林龄与土层的交互作用对土壤 C : P 影响不显著。落叶松土壤 C : P 在 13.69~66.97,20~40 cm 土壤 C : P 高于 0~20 cm 土壤 C : P。多重比较显示不同林龄 0~20 cm 土壤 C : P 差异不显著,20~40 cm 幼龄林与成熟林 C : P 差异显著(图3)。根系的 C : P 在 2098.10~3827.36。单因

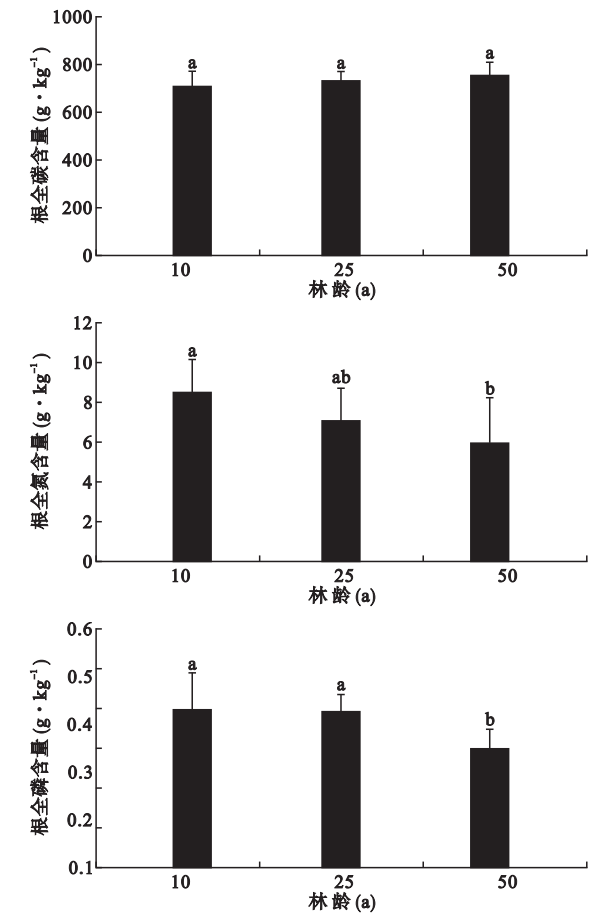


图 2 不同林龄落叶松根部 C、N、P 含量  
Fig.2 Contents of C, N and P in root in the forests at different ages

不同小写字母表示林龄对 0~20 cm 土层元素含量影响显著 ( $P<0.05$ ),不同大写字母表示林龄对 20~40 cm 土层元素含量影响显著 ( $P<0.05$ )。

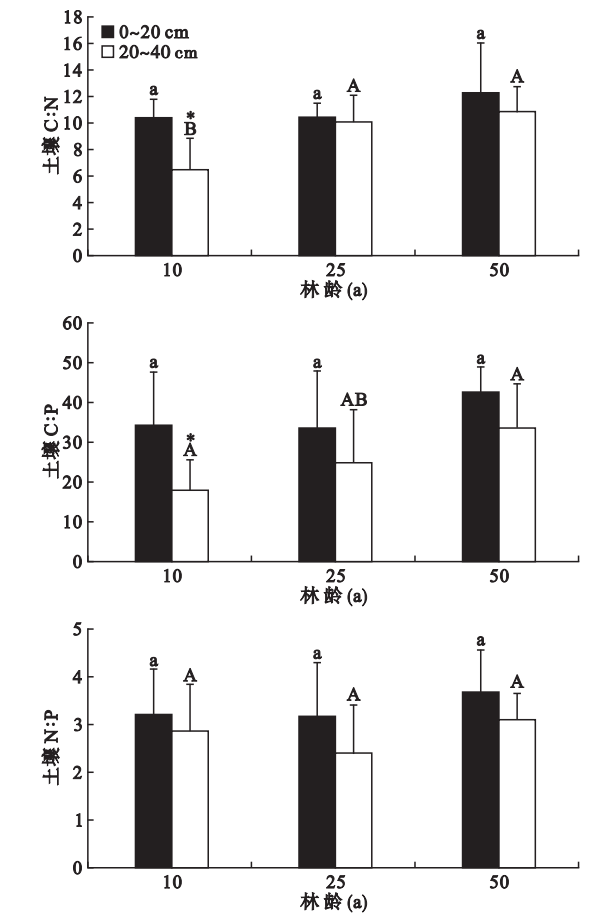


图 3 不同土层土壤 C : N、C : P、N : P 随林龄变化情况  
Fig.3 Ratios of C : N, C : P and N : P in two soil layers in the forests at different ages

小写字母表示 0~20 cm 土层不同林龄间的多重比较,大写字母表示 20~40 cm 土层不同林龄间的多重比较。\* 表示同一林龄不同深度差异显著 ( $P<0.05$ )。



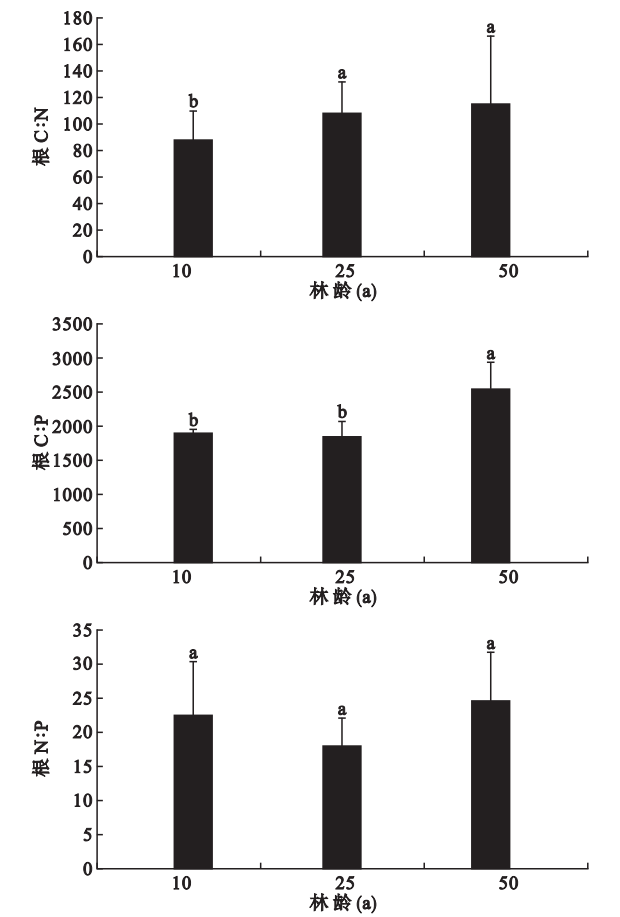


图 4 不同林龄落叶松根部 C : N、C : P、N : P  
Fig.4 Ratios of C : N, C : P and N : P in root at different ages.  
不同小写字母表示林龄对 0~20 cm 土层元素含量影响显著 ( $P<0.05$ ),不同大写字母表示林龄对 20~40 cm 土层元素含量影响显著 ( $P<0.05$ )。

素方差分析显示根系的 C : P 受林龄影响显著,成熟林的 C : P 最大,且成熟林的 C : P 与幼龄林和中龄林均存在显著差异(图 4)。

落叶松土壤 N : P 在 2.03~4.25(图 3),根系

的 N : P 在 14.89~31.27(图 4)。林龄和土层及林龄与土层的交互作用对土壤和根系的 N : P 均无显著影响。

### 2.3 人工林土壤-根系 C、N 和 P 含量及比值的相关性分析

从相关性分析结果可以看出落叶松土壤 N 和 P 含量与根系 N 和 P 含量有显著的正相关关系,根的 C 含量与根的 N 和 P 含量存在显著的负相关联系,且根系的 N 和 P 含量之间存在极显著的正相关性(表 2)。土壤 C : N 与 C : P 和 N : P 分别呈现显著正相关和极显著正相关,落叶松根系的 C : N 与 C : P 存在显著的正相关关系(表 3)。

## 3 讨 论

### 3.1 不同林龄落叶松人工林土壤-根系的 C、N 和 P 含量特征

研究表明,落叶松人工林土壤 C、N、P 的含量随着林龄增加呈现逐渐降低的趋势,植物根的 N 和 P 含量随林龄变化也表现出相同的趋势。土壤养分元素是植物体内养分元素的主要来源,林木的养分状况也反映了土壤的肥力状况(周振英等,1990)。本研究结果表明,随着林龄的增加,该地区落叶松人工林土壤 C、N 和 P 逐渐消耗,落叶松人工林地力出现了衰退的趋势。这与陈志国等(1991)在对不同林型落叶松人工林研究后得出的结论一致。闫德仁等(1993)的研究也表明,随着林龄的增加,土壤有机质、全 N、全 P 等指标都出现了下降的趋势。然而,也有其他学者得出过不同的结论,陈立新等(2006)在大兴安岭林区的研究发现,成熟落叶松人工林的土壤肥力高于幼龄林和中龄林,这可能是由于研究区样地密度、间伐程度不一致造成。本研究中,幼龄

表 2 不同林龄落叶松人工林土壤-根系 C、N 和 P 相关性分析  
Table 2 Correlation analysis of C, N and P in soil and root of larch at different stand ages

指标	SAC	SAN	SAP	SBC	SBN	SBP	RC	RN	RP
SAC	1								
SAN	0.655 **	1							
SAP	0.339	0.627 **	1						
SBC	-0.094	-0.172	-0.455 *	1					
SBN	0.535 **	0.606 **	0.467 *	-0.134	1				
SBP	0.322	0.492 **	0.811 **	-0.261	0.360	1			
RC	-0.302	-0.311	-0.311	-0.193	0.262	0.360	1		
RN	0.513 **	0.648 **	0.455 *	-0.081	0.511	0.214	-0.496 *	1	
RP	0.373	0.475 *	0.570 **	-0.277	0.466 *	0.457 *	-0.070 *	0.323 **	1

\* 表示显著相关 ( $P<0.05$ ), \*\* 表示极显著相关 ( $P<0.01$ )。SAC、SAN、SAP 表示 0~20 cm 土壤 C、N、P;SBC、SBN、SBP 表示 20~40 cm 土壤 C、N、P;RC、RN、RP 表示根部 C、N、P。

表 3 不同林龄落叶松人工林土壤-根系 C、N、P 化学计量比相关性分析  
Table 3 Correlation analysis of the ratio of C, N and P in soil and root of larch at different stand ages

指标	SAC : N	SAC : P	SAN : P	SBC : N	SBC : P	SBN : P	RC : N	RC : P	RN : P
SAC : N	1								
SAC : P	0.443 *	1							
SAN : P	-0.095	0.841 **	1						
SBC : N	0.138	0.396 *	0.399 *	1					
SBC : P	0.157	0.703 **	0.713 **	0.724 **	1				
SBN : P	0.119	0.655 **	0.647 **	0.061	0.699 **	1			
RC : N	0.090	0.207	0.189	0.318	0.339	0.146	1		
RC : P	0.039	0.260	0.314	0.560 **	0.437 *	0.094	0.454 *	1	
RN : P	-0.108	-0.013	0.084	0.043	-0.032	-0.028	-0.618	0.348	1

\* 表示显著相关( $P<0.05$ ), \*\* 表示极显著相关( $P<0.01$ )。SAC : N、SAC : P、SAN : P 表示 0~20 cm 土壤 C : N、C : P、N : P;SBC : N、SBC : P、SBN : P 表示 20~40 cm 土壤 C : N、C : P、N : P;RC : N、RC : P、RN : P 表示根部 C : N、C : P、N : P。

林样地密度比较大,凋落物较多,凋落物的分解速率较快,土壤较肥沃。中龄林在经过间伐后,林分密度开始降低,使得凋落物量减少,土壤肥料损耗量大于归还,土壤肥力与幼龄林比出现了降低的趋势。在近熟林阶段由于不合理的采伐,导致林分密度进一步下降,凋落物急剧减少,成熟林的土壤肥力与幼龄林和中龄林相比出现了衰退,此外,由于成熟林林木消耗量的增加,土壤养分消耗与归还之间的平衡被打破,土壤肥力逐渐减低。

3.2 不同林龄落叶松人工林土壤、根的 C、N 和 P 生态化学计量特征

土壤 C、N 和 P 的生态化学计量比是土壤有机质组成和质量程度的重要指标 (王绍强等,2008)。其中,土壤 C : N 和 C : P 通常评价是有机质矿化快慢和土壤磷有效性的指标,C : N 越低说明土壤有机层的有效氮含量较高 (王维奇等,2011)。本研究结果表明,随着土层深度的增加 C : N 逐渐降低,这与 Batjes (1996) 的研究结果一致。磷的有效性受土壤和有机质的分解速率影响,C : P 越低通常说明磷的有效性越高 (Sterner *et al.*, 2002)。本研究 中,土壤 C : N 和 C : P 随林龄呈现逐渐增高的趋势,这说明随着林龄的增加,落叶松人工林林地氮和磷的有效性正在逐渐降低,落叶松的生长过程可能会受到 N、P 元素的限制,陈立新等 (2003) 的研究也得出了相同结果。植物的 C : N 和 C : P 在一定程度上反映了植物对养分的利用效率及植物的生长速度 (刘万德等,2010; Wardle *et al.*, 2004)。Elser 等 (1996) 认为,生物体的生长速率与生物体的 C : N 和 C : P 比、存在负相关的关系。此外,植物较高的 C : N 和 C : P 也促使植物对 N 和 P 有较高的利用率 (Vitousek, 1982),这是植物应对贫瘠养分状态的

一种策略 (Bowman, 1994)。本研究结果显示,根的 C : N 和 C : P 随林龄的增加呈现逐渐增加的趋势,且成熟林的 C : N 和 C : P 与中龄林及幼龄林存在显著差异。该结果表明,落叶松熟龄林的地力可能出现了衰退的趋势。

3.3 不同林龄落叶松人工林土壤-根 C、N 和 P 含量及 C : N、C : P、N : P 的相关性分析

土壤-根的 C、N 和 P 含量及 C : N、C : P、N : P 的相关分析表明,土壤 N、P 含量与根的 N、P 含量之间存在显著的正相关关系,与马鑫雨等 (2015) 研究结果相同,这进一步说明了植物对营养元素的需求依赖于土壤中的营养元素。根 C 含量与 N 和 P 含量之间存在明显的负相关关系,且根 N 和 P 含量之间存在明显的正相关,本研究与李征等 (2012) 的研究结果一致,这验证了 Sterner 等 (2002) 提出高等陆生植物养分计量的普遍规律之一。

综上所述,随着林龄的增加,研究区域土壤肥力呈现衰退的趋势,限制了当地落叶松人工林的可持续发展。落叶松人工林出现地力衰退的原因可能源于以下几个方面。首先,从落叶松自身来说,其针叶中含有单宁、蜡质和树脂等难分解的物质,养分分解周转较慢,从而导致了营养元素的生物循环不畅,生态系统出现地力衰退 (崔国发, 1996)。其次,与天然林相比,人工林较易受到人类活动的影响,外界活动干扰了土壤肥力发展的内在过程 (潘建平等, 1997)。目前该地区落叶松人工林经营的主要方式为短伐期及小径材生产 (姜金波等, 2002; 闫涛等, 2014b)。这种经营方式会造成土壤养分的大量流失,加重地力衰退。此外,由于盲目追求木材的生产,当地居民在 20 世纪 50 年代开始营造了大量的落叶松人工纯林。由于纯针叶林群落结构简单,个

体生态习性高度一致,生态系统多样性的下降,从而使得自身的缓冲能力和反馈调节能力降低,最终导致生态系统失衡(张露等,2006)。因此,可以通过调整林分结构、促进养分归还以及适度施肥等措施,来缓解当地落叶松人工林地力衰退的趋势,促进落叶松人工林的可持续发展。

**致谢** 中国科学院清原森林系统观测站为本研究提供了实验基地与必要支撑。

## 参考文献

- 陈立新,肖洋. 2006. 大兴安岭林区落叶松林地不同发育阶段土壤肥力演变与评价. 中国水土保持学报, **4**(5): 50-55.
- 陈立新. 2003. 落叶松土壤有机磷形态与林木生长量的关系. 应用生态学报, **14**(12): 2157-2161.
- 陈乃全,尹建道. 1990. 落叶松人工林重茬更新效果的研究. 北京: 中国林业出版社: 105-113.
- 陈志国,王树成,车志文. 1991. 落叶松水曲柳、落叶松胡桃楸混交林的调查研究. 东北林业大学学报, **19**(S1): 99-105.
- 崔国发. 1996. 人工林地力衰退机理及其防止对策. 世界林业研究, (5): 61-69.
- 韩兴国,李凌浩,黄建辉. 1999. 生物地球化学概论. 北京: 高等教育出版社.
- 韩有志,梁胜发. 1997. 华北落叶松人工林根系分布及根系生物量研究. 山西林业科技, (3): 36-40.
- 贺金生,韩兴国. 2010. 生态化学计量学:探索从个体到生态系统的统一化理论. 植物生态学报, **34**(1): 2-6.
- 姜金波,吴耀先,宋德利,等. 2002. 我国落叶松林生物量碳计量参数的初步研究. 吉林林业科技, **20**(7): 325-339.
- 李征,韩琳,刘玉虹,等. 2012. 滨海盐地碱蓬不同生长阶段叶片 C、N、P 化学计量特征植物. 植物生态学报, **36**(10): 1054-1061.
- 刘万德,苏建荣,李帅锋,等. 2010. 云南普洱季风常绿阔叶林演替系列植物和土壤 C、N、P 化学计量特征. 生态学报, **30**(23): 6581-6590.
- 鲁如坤. 1999. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社.
- 马鑫雨,方斌,常艳春,等. 2015. 阅海湿地植物叶片和土壤 C、N、P 季节动态积累. 水土保持学报, **29**(3): 136-143.
- 牛小云,孙晓梅,陈东升,等. 2015. 辽东山区不同林龄日本落叶松人工林土壤微生物、养分及酶活性. 应用生态学报, **26**(9): 2663-2672.
- 潘建平,王华章,杨秀琴. 1997. 落叶松人工林地力衰退研究现状与进展. 东北林业大学学报, **25**(2): 59-63.
- 邵亚丽,安珍,邢新婷,等. 2011. 落叶松木材力学性质及其应用研究进展. 木材加工机械, (3): 46-50.
- 王绍强,于贵瑞. 2008. 生态系统碳氮磷元素的生态化学计量特征. 生态学报, **28**(8): 3937-3947.
- 王维奇,徐玲琳,曾从盛,等. 2011. 河口湿地植物活体-枯落物-土壤的碳氮磷生态化学计量特征. 生态学报, **31**(23): 7119-7124.
- 闫涛,杨凯,朱教君. 2014a. 辽东山区主要树叶氮磷钾

- 再吸收. 生态学报, **33**(8): 2005-2011.
- 闫涛,朱教君,杨凯,等. 2014b. 辽东山区落叶松人工林地上生物量和养分元素分配格局. 应用生态学报, **25**(10): 2772-2778.
- 闫德仁. 1993. 落叶松人工林土壤肥力变化的研究. 生态学报, **12**(3): 8-10.
- 杨晓娟,王海燕,刘玲,等. 2013. 不同林龄长白落叶松人工林土壤肥力. 东北林业大学学报, **41**(3): 51-56.
- 张露,高璜. 2002. 人工林地力衰退研究现状与进展. 江西林业科技, (6): 28-33.
- 张田田,马履一,贾忠奎,等. 2012. 华北落叶松幼中龄林的生物量与碳汇功能. 东北林业大学学报, **40**(12): 32-39.
- 赵亚芳,徐福利,王渭玲,等. 2014b. 华北落叶松根茎叶碳氮磷含量及其生态化学计量学特征的季节变化. 植物学报, **49**(5): 560-568.
- 赵亚芳,徐福利,王渭玲. 2014a. 华北落叶松人工林碳氮磷生态化学计量学特征研究展望. 北方园艺, (17): 197-203.
- 周振英,宋恭诚. 1990. 落叶松针叶营养元素含量和土壤条件的关系. 林业科技, **4**(4): 11-12.
- Batjes NH. 1996. Total carbon and nitrogen in the soils of the world. *European Journal of Soil Science*, **47**: 151-163.
- Bowman WD. 1994. Accumulation and use of nitrogen and phosphorus following fertilization in two alpine tundra communities. *Oikos*, **70**: 261-270.
- Chapin SF, Mastson PM, Mooney HA. 2002. Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology. New York: Springer.
- Dawson TP, Curran PJ. 1998. A new technique for interpolating the reflectance red edge position. *International Journal of Remote Sensing*, **19**: 2133-2139.
- Elser JJ, Dobberfuhl DR, Mackay NA, et al. 1996. Organism size, life history, and N : P stoichiometry. *Bioscience*, **46**: 674-684.
- Michaels AF. 2003. The ratios of life. *Science*, **300**: 906-907.
- Reich PB, Tjoelker MG, Machado JL, et al. 2006. Universal scaling of respiratory metabolism, size and nitrogen in plants. *Nature*, **439**: 457-461.
- Schindler DW. 2003. Balancing planets and molecules. *Nature*, **423**: 225-226.
- Sterner RW, Elser JJ. 2002. Ecological stoichiometry: The biology of elements from molecules to the biosphere. Princeton: Princeton University Press.
- Wardle DA, Walker LR, Bardgett RD. 2004. Ecosystem properties and forest decline in contrasting long-term chronosequence. *Science*, **305**: 553-572.
- Zhang LX, Bai YE, Han XG. 2003. Application of N : P stoichiometry to ecology studies. *Acta Botanica Sinica*, **45**: 1009-1018.
- Zhu JJ, Mao ZH, Hu LL, et al. 2007. Plant diversity of secondary forests in response to anthropogenic disturbance levels in montane regions of China. *Journal of Forest Research*, **12**: 403-416.

**作者简介** 曾凡鹏,1990年生,硕士研究生,主要从事森林土壤养分循环的研究. E-mail: zfprouerseven@163.com

**责任编辑** 张敏