

不同林龄樟子松人工林针叶—凋落叶—土壤生态化学计量特征

淑敏, 王东丽, 王凯, 连昭, 汤家喜, 韩小美, 斯日木极

(辽宁工程技术大学环境科学与工程学院, 辽宁 阜新 123000)

摘要: 为明确科尔沁沙地引种樟子松人工林生态系统的 C、N、P 含量及化学计量特征, 采用时空互代的方法, 在章古台地区选取 4 种不同林龄(15, 25, 35, 45 年)、立地条件基本一致的樟子松人工林作为研究对象, 比较针叶—凋落叶—土壤的 C、N、P 含量及化学计量比的差异, 探讨它们随林龄的变化及其相互间的关系。结果表明: (1) C、N、P 含量表现为针叶 > 凋落叶 > 土壤, C/N、C/P、N/P 表现为凋落叶 > 针叶 > 土壤, 且在 3 个库之间都有显著差异; (2) 林龄对针叶—凋落叶—土壤的 C、N、P 及 C/N、C/P 有显著影响, 均在 35 年生樟子松林中针叶—凋落叶—土壤的 C、N、P 含量最高; (3) 相较于其他地区, 针叶和凋落叶均表现出高 C、P 和低 N 的特征, 具有较高的 C/N、C/P 和较低的 N/P; (4) 各林龄针叶 N/P 均小于 14, 表明该地区樟子松林整个生长过程始终受 N 的限制, 但不同林龄间差异不显著; (5) 针叶—凋落叶—土壤的 C、N、P 含量及其 C/N、N/P 之间存在显著的相关性, 说明该樟子松林生态系统的 C、N、P 元素在针叶、凋落叶和土壤 3 个库之间存在运输转换, 但其内在维持机制需要进一步深入研究。

关键词: 生态化学计量学; 针叶; 凋落叶; 土壤; 不同林龄樟子松林; 科尔沁沙地

中图分类号: X717.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2018)03-0174-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2018.03.027

Ecological Stoichiometry Characteristics of Needle Leaves-litter-soils in *Pinus sylvestris* var. *Mongolica* Plantations with Different Forest Ages

SHU Min, WANG Dongli, WANG Kai, LIAN Zhao, TANG Jiayi, HAN Xiaomei, SIRI muji

(College of Environmental Sciences and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning 123000)

Abstract: In order to understand the characteristics of carbon, nitrogen, phosphorus, and the stoichiometry characteristics of *Pinus sylvestris* var. *Mongolica* plantation ecosystem in Horqin Sandy land, we used the space-temporal exchanging method and selected four forests with different stand ages (15, 25, 35, and 45 years) but with similar site condition as the objects. The contents of carbon, nitrogen, phosphorus, and the stoichiometry characteristics in the needle leaf, litter, and soil were analyzed, then their changing characteristics as stand age increasing and the relationships between them were explored. The results showed that: (1) The contents of C, N, and P were in order of needle leaf > litter > soil, C/N, C/P, and N/P were in order of litter > needle leaf > soil, whose differences were significant among needle leaf, litter, and soil. (2) There were significant differences for C, N, P concentrations, and C/N, C/P stoichiometry ratios among forests with different stand ages. The C, N, and P contents of leaf, litter, and soil were the highest in the 35-years-old forest. (3) Compared to other regions, the leaf and litter performed the same characteristic with higher C and P, lower N, higher C/N, higher C/P and lower N/P. (4) The N/P ratios of all forests with different ages were lower than 14, but there was no significant difference between them, which indicated that the *P. sylvestris* plantation was restricted by N, but the N limitation was not significant between forest ages. (5) There were significant correlations between the contents of C, N, P and C/N, N/P ratios of the leaf, litter and soil, which indicated that the C, N, P elements of *P. sylvestris* plantation were transferred between 3 libraries of the conifer, litter, and soil, but its internal maintenance mechanism needs further study.

Keywords: ecological stoichiometry; needle leaf; litter; soil; *pinus sylvestris* var. *mongolica* plantations in different ages; Horqin Sandy land ages; Horqin Sandy

收稿日期: 2017-11-27

资助项目: 生产技术创新研究基金项目(20160013T); 国家自然科学基金项目(41701325, 41501548); 辽宁省教育厅科学技术研究项目(LJYL023); 辽宁省大学生创新项目(201610147000021)

第一作者: 淑敏(1984—), 女, 博士, 主要从事水土保持与防护林生态研究。E-mail: bcym1984@163.com

通信作者: 汤家喜(1986—), 男, 博士, 主要从事水土保持与生态修复研究。E-mail: tangjiayi@lntu.edu.cn

生态化学计量学是研究多种化学元素平衡问题的一门科学,主要强调活有机体主要组成元素(C、N、P)的生态化学计量特征关系^[1],也能更好地揭示森林生态系统各组分(植物、凋落物和土壤)养分比例和调控机制在生态系统中的功能和作用^[2]。凋落物作为森林生态系统养分储存库和植物与土壤之间物质、能量交换的重要枢纽,对生态系统养分循环和能量流动起着重要的作用^[3]。与此同时,土壤养分的积累主要源于凋落物的归还,植物通过光合作用固C,将一部分的C转移给土壤,同时以凋落物的形式将C补偿给土壤^[4]。而植物养分需求量、土壤养分供应量、植物的自我调节以及凋落物分解过程中养分的归还量又相互作用和影响,增加了“植物—凋落物—土壤”连续体养分含量研究的复杂性^[5]。而且随着林龄的增加,森林生态系统的组成结构、内部环境以及土壤性质也会随之发生改变,进而也影响养分分配格局^[6],因此系统研究不同林龄不同森林生态系统类型的植物—凋落物—土壤三者联系起来的养分分配格局和循环,对科学合理地经营森林整个生长过程具有重要意义。

樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)由于其耐寒、抗旱、较速生等优良特性,已成为东北地区速生用材、防风固沙和水土保持的优良树种^[7]。自20世纪50年代初期在科尔沁沙地东南缘章古台地区人工引种用于固沙造林试验成功以来,近几十年中当地政府及科研机构先后进行了大规模的樟子松种植,使章古台地区呈现不同林龄樟子松共存格局,在维持干旱荒漠区脆弱的生态系统平衡方面发挥着重要的生态意义和社会价值。目前,对于科尔沁沙地引种樟子松不同生长发育阶段的针叶—凋落叶—土壤三者联系起来探讨生态化学计量特征的研究还未见报道。因此本文以科尔沁沙地的不同林龄樟子松人工林为研究对象,对樟子松针叶—凋落叶—土壤的C、N、P含量及化学计量比进行测定分析,探讨随林龄的变化,比较针叶—凋落叶—土壤之间C、N、P含量和化学计量比以及相互之间存在的关系,有助于更深入认

识不同林龄樟子松人工林生态系统养分循环规律和稳定机制,为实现该地区樟子松人工林自然资源的可持续经营提供养分管理策略。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于辽宁省风沙地利用改良研究所章古台试验基地(122°32'E,42°42'N)。该区位于科尔沁沙地东南部,海拔345.1 m,年平均气温6.82℃,极端最低气温-33.4℃,极端最高气温43.2℃;年降水量450 mm,年蒸发量为1590 mm,降水主要集中在6—8月。土壤以风沙土为主,植被属内蒙古植物区系,以抗旱性较强的沙生植物为主。目前,以樟子松、油松(*Pinus tabulaeformis*)和小钻杨(*Populus X xiaozhuanica*)为主体的防风固沙林已成为该地区的主要植被群落。此外,还包括少量的灌木和草本,如黄柳(*Salix gordejewii*)、紫穗槐(*Amorpha fruticosa*)、狗尾草(*Setaria viridis*)和唐松草(*Thalictrum aquilegifolium*)等。

1.2 样品采集与测定

2015年8月,在表1中所列的土壤类型和立地条件基本一致的4种林龄樟子松林样地内分别设置3块20 m×20 m的样地,在每个样地内挑选3株生长良好的健康樟子松树木,采集新鲜的樟子松针叶,并在相应的樟子松树冠下选取1 m×1 m的5个小样方收集地表凋落叶,将采集好的样品混合均匀后放入纸袋中,做好标记带回实验室。经过105℃杀青、65℃条件下烘干至恒重,使用样品粉碎机磨成0.15 mm的粉末后用于测定植物叶片和凋落叶样品中的全碳(C)、全氮(N)、全磷(P)含量。同时,土壤样品的采集是在凋落叶的相应小样方里进行,轻轻剥掉上层枯落物层,用土钻采集0—20 cm表土层土壤样品,5个样点的土样充分混合均匀后,取样带回实验室,土壤样品风干后,剔除石头等杂物,研磨并过0.25 mm的网筛后测定土壤有机碳(C)、全氮(N)、全磷(P)含量。全碳采用重铬酸钾氧化外加加热法测定,全氮采用凯氏定氮法测定,全磷采用钼锑抗比色法测定^[8]。

表1 样地基本情况

样地	林龄/ a	平均 树高/m	平均 胸径/cm	密度/ (株·hm ⁻²)	植被 类型	草本 盖度/%
樟子松纯林	15	2.1	4.3	785	狗尾草为主	27.98
樟子松纯林	25	5.4	7.8	642	狗尾草为主	26.17
樟子松纯林	35	8.9	12.6	614	狗尾草为主	30.17
樟子松纯林	45	9.7	17.5	419	唐松草为主	36.08

1.3 数据处理

采用 Excel 2017 进行数据处理和作图,运用

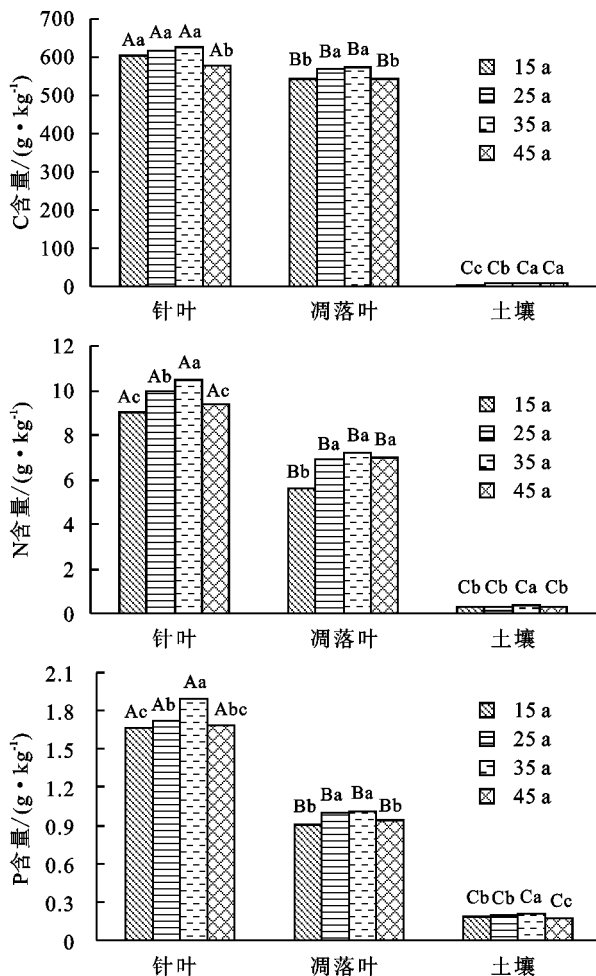
SPSS 20.0 进行数据统计与分析,分别对不同林龄的樟子松针叶、凋落叶和土壤 C、N、P、C/N、C/P、N/P

进行单因素方差分析(one-way ANOVA)和多重比较(LSD),并对樟子松针叶、凋落叶和土壤的 C、N、P 含量, C/N、C/P、N/P 进行 Pearson 相关分析。

2 结果与分析

2.1 不同林龄樟子松林针叶—凋落叶—土壤的 C、N、P 含量

由图 1 可知,樟子松林针叶 C、N、P 含量均表现为针叶>凋落叶>土壤,且 3 个库之间差异显著($P<0.05$)。针叶 C 含量为 576.31~625.31 g/kg,凋落叶 C 含量为 544.78~572.41 g/kg,土壤 C 含量为 5.41~8.37 g/kg。针叶、凋落叶和土壤的 C 含量均随着林龄的增加先增加后降低,且在 35 年生樟子松林阶段达到最大值。然而,不同林龄对樟子松林针叶、凋落叶和土壤的 C 含量的影响各异,其中 45 年生樟子松林针叶 C 含量显著低于其他林分($P<0.05$);凋落叶 C 含量在 15,45 年生樟子松林显著低于 25,35 年生樟子松林($P<0.05$);土壤 C 含量在 35,45 年生樟子松林之间差异不显著,而其他樟子松林之间均有显著差异($P<0.05$)。



注:大写字母表示同林龄不同研究对象之间的差异显著性($P<0.05$);小写字母表示同研究对象不同林龄之间的差异显著性($P<0.05$)。下同。

图 1 不同林龄樟子松林针叶—凋落叶—土壤的 C、N、P 含量

针叶 N 含量为 8.99~10.49 g/kg,凋落叶 N 含量为 5.61~7.21 g/kg,土壤 N 含量为 0.29~0.33 g/kg。林龄对樟子松林针叶、凋落叶和土壤的 N 含量的影响与其 C 含量具有相似规律,随着林龄的增加,其 N 含量先增加后降低,均在 35 年生樟子松林阶段达到最大值。针叶 N 含量在 15,45 年生樟子松林之间差异不显著,而其他樟子松林之间均有显著差异($P<0.05$);15 年生樟子松林凋落叶 N 含量显著低于其他樟子松林($P<0.05$);土壤 N 含量在 15,25,45 年生樟子松林之间差异不大,显著低于 35 年生樟子松林($P<0.05$)。

针叶 P 含量为 1.66~1.89 g/kg,凋落叶 P 含量为 0.91~1.01 g/kg,土壤 P 含量为 0.18~0.21 g/kg。林龄对樟子松林针叶、凋落叶和土壤的 P 含量的影响与其 C、N 含量具有相似规律,随着林龄的增加,其 P 含量先增加后降低,均在 35 年生樟子松林阶段达到最大值。针叶 P 含量在 15,25,45 年生樟子松林之间差异不大,显著低于 35 年生樟子松林($P<0.05$);凋落叶 P 含量在 25,35 年生樟子松林显著高于 15,45 年生樟子松林($P<0.05$)。土壤 C 含量在 15,25 年生樟子松林之间差异不显著,而其他樟子松林之间均有显著差异($P<0.05$)。

2.2 不同林龄樟子松林针叶—凋落叶—土壤的化学计量比

由图 2 可知,不同林龄樟子松林的 C/N、C/P 和 N/P 均表现为凋落叶>针叶>土壤,且 3 个库之间差异显著($P<0.05$)。针叶的 C/N 为 58.63~67.04,凋落叶的 C/N 为 79.35~97.11,土壤的 C/N 为 17.31~20.51。随林龄的增加,针叶、凋落叶和土壤的 C/N 变化完全一致,均在 15 年生樟子林中最高,35 年生樟子松林中最低。

针叶的 C/P 为 325.55~361.51,凋落叶的 C/P 为 510.82~578.61,土壤的 C/P 为 37.62~46.45。林龄对樟子松林针叶、凋落叶和土壤的 C/P 均有显著影响($P<0.05$),针叶、凋落叶和土壤的 C/P 变化规律一致,均是随林龄的增加而先降低后又逐渐回升。多重比较显示,15,45 年生樟子松林针叶的 C/P 显著高于 25,35 年生樟子松林($P<0.05$)。25 年生樟子松林凋落叶的 C/P 显著低于其他樟子松林($P<0.05$);45 年生樟子松林土壤的 C/P 显著高于其他樟子松林($P<0.05$)。

针叶的 N/P 为 5.54~5.75,凋落叶的 N/P 为 6.76~7.32,土壤 N/P 为 1.71~2.27。樟子松林凋落叶的 N/P 随林龄的增加而逐渐增加,但是方差分析显示,林龄对针叶、凋落叶和土壤的 N/P 影响均不显著。针叶、凋落叶和土壤的 N/P 在不同林龄之间差异都不大。

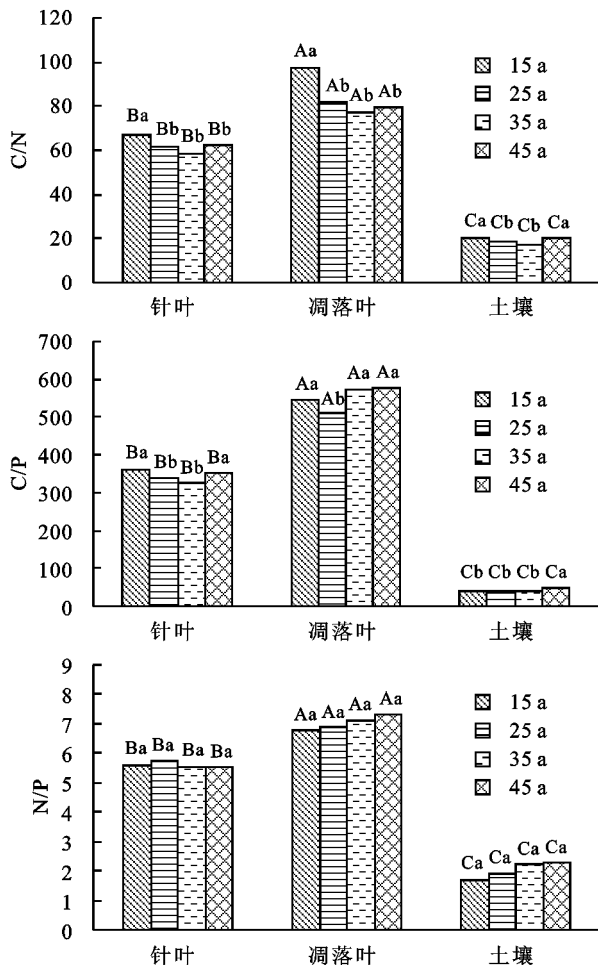


图 2 不同林龄樟子松林针叶-凋落叶-土壤的 C/N、C/P、N/P

2.3 樟子松林针叶-凋落叶-土壤 C、N、P 含量与化学计量比的相关性分析

由表 2、表 3 可知,樟子松林针叶 N 与土壤 C、N 含量之间、针叶 P 与凋落叶 C、P 含量之间、凋落叶 N 与土壤 N 含量之间均存在极显著相关关系($P < 0.01$)。针叶

C/N 与凋落叶 C/N 之间存在显著相关关系($P < 0.05$); 针叶 N/P 与凋落叶 C/N, 土壤的 C/N、N/P 之间均存在显著相关关系($P < 0.05$); 凋落叶 N/P 与土壤的 C/N 之间存在显著相关关系($P < 0.05$)。

3 讨论

3.1 不同林龄樟子松林针叶-凋落叶-土壤 C、N、P 含量特征

本研究中的 4 种林龄樟子松林针叶 C 含量为 576.31~615.31 g/kg, 明显高于全球尺度的叶 C 含量 (461.6 g/kg), 以及干旱区植物叶 C 含量 (338.0 g/kg)^[9], 表明樟子松针叶有机化合物含量较高。针叶 N 含量为 8.99~10.49 g/kg, 明显低于我国的叶 N 含量 (19.7 g/kg)^[10] 和全球尺度的叶 N 含量 (20.1 g/kg)^[11] 及干旱区植物叶 N 含量 (18.1 g/kg)^[9]。樟子松林生态系统 N 含量低可能与区域土壤环境中 N 缺乏有关, 表明樟子松生长对 N 长期供给不足具有较高的适应能力, 也说明 N 是樟子松林生态系统中主要的限制矿质营养元素。樟子松不同生长阶段针叶 P 含量为 1.66~1.89 g/kg, 明显高于我国区域的 P 含量 (1.30 g/kg)^[10] 和全球尺度的 P 含量 (1.40 g/kg)^[11], 总之该地区樟子松针叶具有较高的 C 和 P、较低 N 的特征。随着林龄的增加, 针叶中的 C、N、P 含量均先增加后降低, 在 35 年生林分时达到最大值, 推测与樟子松的生长规律有关。本研究区樟子松 15 年到 35 年阶段生长较快, 不断合成干物质, 故 15、35 年阶段樟子松 C 含量增高。由于 35 年生樟子松林生长速率较快, 需要较多的 rRNA 以增加蛋白质的合成, 最终导致针叶 N 含量较高。而 rRNA 又是植物的一个主要 P 库^[12-13], 故樟子松针叶 N、P 含量也表现为 35 年生林分时最高。

表 2 针叶-凋落叶-土壤的 C、N、P 含量相关性

研究对象	针叶			凋落叶			土壤		
	C	N	P	C	N	P	C	N	P
C	1								
N	0.666*	1							
针叶 P	0.283	0.063	1						
C	0.190	0.072	0.829**	1					
N	0.493	0.354	0.064	0.324	1				
凋落叶 P	0.254	0.205	0.946**	0.931**	0.164	1			
C	0.517	0.758**	0.218	0.317	-0.318	0.392	1		
N	0.553	0.711**	0.487	0.074	-0.759**	0.227	0.407	1	
土壤 P	-0.078	0.074	-0.070	0.205	0.183	0.152	0.646*	0.152	1

注: * 表示显著相关 ($P < 0.05$); ** 表示极显著相关 ($P < 0.01$)。下同。

凋落叶是森林生态系统养分循环的内在组成部分和土壤有机质的主要来源^[14]。与针叶相比, 凋落叶的 C、N、P 含量明显降低, 而 C/N、C/P、N/P 则有所上升, 这反映了针叶在衰落前后养分的再吸收状况, 其实也是植物在养分供应有限的环境中进化出来的保持养分的一种机制^[15]。凋落叶中的 C、N、

P 含量随着林龄的增加而得到积累, 也在 35 年生樟子松林时体现出最大值。这个结果主要和 35 年生樟子松林针叶的 C、N、P 含量最高有关, 因为樟子松针叶是凋落叶组分的主要来源, 相关分析结果也表明针叶 C、N、P 含量与凋落叶 C、N、P 含量存在正相关关系。

表 3 针叶—凋落叶—土壤的 C/N、C/P、N/P 相关性

研究对象	针叶			凋落叶			土壤		
	C/N	C/P	N/P	C/N	C/P	N/P	C/N	C/P	N/P
针叶	C/N	1							
	C/P	0.755**	1						
	N/P	-0.753**	-1.463	1					
凋落叶	C/N	0.624*	0.319	-0.678*	1				
	C/P	0.397	0.090	-0.545	0.431	1			
	N/P	-0.531	-0.401	0.466	-0.902**	-0.014	1		
土壤	C/N	-0.532	0.187	0.639*	-0.370	-0.188	-0.670*	1	
	C/P	-0.373	0.109	0.495	-0.730**	-0.335	-0.094	0.652*	1
	N/P	0.412	-0.477	-0.693*	0.084	0.061	-0.380	-0.658*	-0.830**

不同林龄樟子松林土壤 C、N、P 含量平均值(7.29, 0.31, 0.19 g/kg)均远低于全国(11.12, 1.06, 0.65 g/kg)水平^[16]和黄土高原刺槐林(8.13, 0.74, 1.12 g/kg)^[17], 可知研究区土壤 C、N、P 含量极为贫瘠。随着林龄的增加, 该地区樟子松林土壤 C、N、P 含量均先增加后降低, 在 35 年生林分时均达到最大值。王凯等^[18]和 Luysaert 等^[19]的研究也表明, 土壤有机碳积累与植被群落年龄存在正相关关系, 土壤有机质是各种营养元素特别是 N 元素的主要来源, 故土壤理化性质的变化、凋落叶养分归还等因素均会影响土壤 C、N、P 含量。本研究区 35 年生樟子松林林下草本的枯落物相对比例提高, 能够在土壤微生物等的作用下较快分解并将养分释放到土壤中^[20], 故土壤 C、N、P 均较高。而 45 年生樟子松林的枯损量较高, 相比出现了林分衰退, 故土壤 C、N 和 P 含量出现降低的趋势, 这与以往的樟子松的研究结果基本一致^[21-22]。

3.2 不同林龄樟子松林针叶—凋落叶—土壤的化学计量比特征

植物叶片的 C/N 和 C/P 表征植物吸收营养同化 C 的能力, 在一定程度上反映了植物的养分利用效率, 具有重要的生态学意义^[12]。本研究结果显示, 樟子松林针叶 C/N 和 C/P 的变化为 15 年 > 45 年 > 25 年 > 35 年生樟子松林。这个结果可能是由于该地区樟子松生长发育的早期土壤相对贫瘠, 可供植物吸收利用的 N、P 养分较少, 使樟子松的生长发育受到一定的限制, 造成樟子松的 C/N 与 C/P 的失衡。较高的 C/N 与 C/P 同时代表植物对 N、P 的利用率较高^[23], 以往研究也证实了植物在营养元素供应缺乏的情况下往往具有较高的养分利用效率, 是植物适应贫瘠养分状态的一种生存策略^[24], 这一观点恰好符合上段做出的推断。N 和 P 通常被认为是陆地植物两种最主要的限制元素, 叶片 N 和 P 含量通常反映土壤 N、P 有效性^[11]。植物 N/P 可用作 N 饱和和以及 P 缺乏的诊断指标, 不仅被用于确定养分限制的阈值, 也可以用来反映土壤对植物生长的养分供应状

况^[25]。以往研究认为, 叶的 $N/P < 14$ 反映植物受 N 限制, $N/P > 16$ 反映植物受 P 限制, $14 < N/P < 16$ 表示 N、P 的共同限制^[26-27]。本研究结果显示, 樟子松不同生长阶段针叶的 N/P 为 5.54~5.75, 明显小于全国平均 14.4^[28]和全球平均水平 13.8^[29]。说明樟子松整个生长过程中始终受 N 的限制, 这可为研究区樟子松林培育管理提供科学指导。如建议合理施用 N 肥以改善土壤养分供给的同时也可引入固氮植物以提高地力。虽说不同生长阶段的樟子松林针叶—凋落叶—土壤的 N、P 含量均随林龄增加有显著变化, 但 N/P 却保持相对稳定, 这说明植物自身具有调节元素需求与养分吸收平衡的能力, 验证了樟子松具有相对稳定的适应特征。

3.3 樟子松林针叶—凋落叶—土壤 C、N、P 含量与化学计量比的关系

本研究中的樟子松林针叶—凋落叶—土壤的 C、N、P 含量以及 C/N、C/P 随林龄的增加呈现相似的变化规律, 表明针叶—凋落叶—土壤之间有着密切的关系。从相关分析结果也看到, 樟子松林土壤 N 含量与针叶和凋落叶的 N 含量呈现极显著相关关系, 说明各林龄樟子松林土壤 N 含量依赖于凋落叶 N 含量, 针叶 N 含量依赖于土壤 N 含量, 同时也说明樟子松针叶较低 N 含量可能是土壤的 N 含量较低所导致的。针叶和凋落叶 C、N、P 含量之间以及化学计量比之间也均存在显著相关关系, 说明了凋落叶的养分来自针叶养分, 二者具有非常紧密的关联。以上结果说明, 该樟子松林生态系统的 C、N、P 养分在针叶—凋落叶—土壤 3 个库之间不断的运输转换中^[30], 但其内在的维持机制需要进一步的深入研究。

4 结论

科尔沁沙地樟子松林在土壤养分贫瘠的条件下, 经过长期的进化适应形成了自身独特的生态化学计量特征, 针叶和凋落叶均表现出高 C、P 和低 N 的特征, 具有较高的 C/N、C/P 和较低的 N/P (小于 14)。为了提高该区樟子松林的生产力, 在人工林的抚育管

理中适当增加 N 肥,同时林内引入豆科固氮植物来提高地力。尤其 45 年生樟子松林对生境的适应性逐渐降低,表现出了一种衰退特征。建议在 45 年生樟子松人工林要采取禁牧(封育)的经营措施,防止凋落物的大量损失而加剧养分的亏缺;另一方面,对衰退樟子松及时进行更新,同时要营造混交林,以维护生态系统的稳定性和持续性。

参考文献:

- [1] Elser L J J, Dobberfuhl D R, Mackay N A, et al. Organism size, life history, and N : P stoichiometry [J]. *Bioscience*, 1996, 46(9): 674-684.
- [2] 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.
- [3] Cross W F, Benstead J P, Frost P C, et al. Ecological stoichiometry in freshwater benthic systems: Recent progress and perspectives [J]. *Freshwater Biology*, 2005, 50(11): 1895-1912.
- [4] Zeng D, Chen G. Ecological stoichiometry: A science to explore the complexity of living systems [J]. *Acta Phytocological Sinica*, 2004, 29(6): 1007-1019.
- [5] 王维奇,徐玲琳,曾从盛,等. 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[J]. *生态学报*, 2011, 31(23): 7119-7124.
- [6] 姜沛沛,曹扬,陈云明,等. 不同林龄油松(*Pinus tabulaeformis*)人工林植物、凋落物与土壤 C、N、P 化学计量特征[J]. *生态学报*, 2016, 36(19): 6188-6197.
- [7] 朱教君,康宏樟,许美玲. 科尔沁沙地南缘樟子松(*pinus sylvestris* var. *mongolica*)人工林天然更新障碍[J]. *生态学报*, 2007, 27(10): 4086-4095.
- [8] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2005.
- [9] 李从娟,雷加强,徐新文,等. 塔克拉玛干沙漠腹地人工植被及土壤 C、N、P 的化学计量特征[J]. *生态学报*, 2013, 33(18): 5760-5767.
- [10] 王晶苑,王绍强,李幼兰,等. 中国 4 种森林类型主要优势植物的 C : N : P 化学计量学特征[J]. *植物生态学报*, 2011, 35(6): 587-595.
- [11] Elser J J, Stemer R W, Gorokhova E, et al. Biological stoichiometry from genes to ecosystems [J]. *Ecology Letters*, 2000, 3(6): 540-550.
- [12] 高三平,李俊祥,徐明策,等. 天童常绿阔叶林不同演替阶段常见种叶片 N、P 化学计量学特征[J]. *生态学报*, 2007, 27(3): 947-952.
- [13] 刘万德,苏建荣,李帅锋,等. 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[J]. *生态学报*, 2010, 30(23): 6581-6590.
- [14] Kang H Z, Xin Z J, Berg B, et al. Global pattern of leaf litter nitrogen and phosphorus in woody plants [J]. *Annals of Forest Science*, 2010, 67(8): 811-817.
- [15] Drenovsky R E, Richards J H. Critical N : P values: Predicting nutrient deficiencies in desert shrublands [J]. *Plant and Soil*, 2004, 259(1/2): 59-69.
- [16] 胡启武,聂兰琴,郑艳明,等. 沙化程度和林龄对湿地松叶片及林下土壤 C、N、P 化学计量特征影响[J]. *生态学报*, 2014, 34(9): 2246-2255.
- [17] 白雪娟,曾全超,安韶山,等. 黄土高原不同人工林叶片—凋落叶—土壤生态化学计量特征[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(12): 3823-3830.
- [18] 王凯,吴祥云,卢慧,等. 阜新市主要园林树种叶片生态化学计量特征[J]. *干旱区研究*, 2013, 30(2): 236-241.
- [19] Luysaert S, Schulze E D, Börner A, et al. Old growth forests as global carbon sinks [J]. *Nature*, 2008, 455(7210): 213-215.
- [20] 李志安,邹碧,丁永祯,等. 森林凋落物分解重要影响因素及其研究进展[J]. *生态学杂志*, 2004, 23(6): 77-83.
- [21] 谷杨. 章古台樟子松固沙林衰退成因及有效防治措施研究[D]. 辽宁 阜新: 辽宁工程技术大学, 2009.
- [22] 牛沙沙,周永斌,刘丽颖,等. 不同林龄樟子松人工林土壤理化性质[J]. *东北林业大学学报*, 2015, 43(2): 47-50.
- [23] Vitousek P. Nutrient cycling and nutrient use efficiency [J]. *American Naturalist*, 1982, 119(4): 553-572.
- [24] Bowman W D. Accumulation and use of nitrogen and phosphorus following fertilization in two alpine tundra communities [J]. *Oikos*, 1994, 70(2): 261-270.
- [25] Koerselman W, Meuleman A F. The vegetation N : P ratio: A new tool to detect the nature of nutrient limitation [J]. *Journal of Applied Ecology*, 1996, 33(6): 1441-1450.
- [26] Drenovsky R E, Richards J H. Critical N : P values: Predicting nutrient deficiencies in desert shrublands [J]. *Plant and Soil*, 2004, 259(1/2): 59-69.
- [27] Rothstein D E, Vitousek P M, Simmons B L. An exotic tree alters decomposition and nutrient cycling in Hawaiian montane forest [J]. *Ecosystem*, 2004, 7(8): 805-814.
- [28] Han W X, Fang J Y, Guo D L, et al. Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 753 terrestrial plant species in China [J]. *New Phytologist*, 2005, 168: 377-385.
- [29] 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 Science of the United States of America*, 2004, 101: 11001-11006.
- [30] 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(9): 2390-2401.