



青藏高原东缘亚高山针叶林碳氮磷 生态化学计量特征

齐 瑞^{1,2}, 刘锦乾^{1,2*}, 李 波^{1,2}, 陈学龙^{1,2}

(1 甘肃省白龙江林业管理局林业科学研究所, 兰州 730070; 2 甘肃白龙江森林生态系统国家定位观测研究站, 甘肃武都 746000)

摘 要: 为深入理解针叶林生态系统植物叶片和土壤碳(C)、氮(N)、磷(P)生态化学计量特征及其内在相互关系, 该研究以青藏高原东缘亚高山岷江冷杉(*Abies faxoniana*)林(针叶林Ⅰ)、云杉(*Picea asperata*)林(针叶林Ⅱ)、油松(*Pinus tabulaeformis*)林(针叶林Ⅲ)为研究对象, 测定了3种林分针叶、灌木、草本和土壤的碳、氮、磷含量及其比值。结果表明: (1) 3种针叶林植物叶片C、N含量表现为草叶>针叶>灌叶>土壤; C:N、C:P、N:P表现为灌叶最高、针叶和草叶次之, 土壤最低。其中C、N、P含量均表现为云杉林>冷杉林>油松林; 同一针叶林不同组分C、N、P含量均表现为草叶>针叶>灌叶。 (2) 不同针叶林C:N和C:P均表现出油松林>冷杉林>云杉林, 而叶片C:N、C:P均表现为灌叶>针叶>草叶。 (3) 针叶林植物叶片N与P含量呈显著正相关关系, 针叶与灌叶的C含量、针叶-灌叶-草叶之间的N、P含量以及C:N、C:P均呈显著正相关关系; 针叶的C含量与其自身的N、P含量呈极显著负相关关系, 针叶与土壤TP和N:P、灌叶与土壤TP含量、草叶与土壤N:P均呈显著负相关关系, 体现了营养元素在针叶林针叶、灌叶、草叶和土壤之间的相互循环和转移。研究认为, 青藏高原东缘亚高山针叶林植物生长受N限制, 该区域土壤有机质的矿化作用较慢, 在针叶林的保护和经营过程中, 要加大对林下植被的保护, 提高土壤肥力, 从而达到维护森林长期生产力的作用。

关键词: 青藏高原东缘; 亚高山针叶林; 叶片; 土壤; 化学计量特征

中图分类号: Q948.11; S718.52

文献标志码: A

Stoichiometry of Carbon, Nitrogen, and Phosphorus of Subalpine Coniferous Forests on the Eastern Edge of Qinghai-Tibet Plateau

QI Rui^{1,2}, LIU Jinqian^{1,2*}, LI Bo^{1,2}, CHEN Xuelong^{1,2}

(1 Research Institute of Forestry, Bailongjiang Forestry Administration, Lanzhou 730070, China; 2 Gansu Bailongjiang National Forest Ecosystem Research Station, Wudu, Gansu 746000, China)

Abstract: To further understand the ecological stoichiometric characteristics of coniferous forest ecosystem plants and soil carbon, nitrogen, phosphorus and their internal relationships, we selected *Pinus tabulaeformis*, *Picea asperata*, *Abies faxoniana* coniferous forest in subalpine areas on the eastern edge of Qinghai-Tibet plateau. We analyzed the carbon, nitrogen, phosphorus stoichiometric characteristics in needle, shrub, herb leaf and soil in each coniferous forest. The results indicated that: (1) C, N contents followed herb leaf > needle leaf > shrub leaf > soil. C:N, C:P and N:P were the highest in shrub leaf, followed by needle and herb leaf, and the lowest in soil. There was a significantly positive correlation between the con-

收稿日期: 2020-09-15; 修改稿收到日期: 2020-12-21

基金项目: 甘肃省科技支撑计划(144FKCK072); 甘肃林业科技项目(2016kj060, 2016kj063, 2016kj058)

作者简介: 齐 瑞(1987—), 男, 高级工程师, 主要从事森林生态学研究。E-mail: lovefy201311@163.com

* 通信作者: 刘锦乾, 正高级工程师, 主要从事森林生态学研究。E-mail: 436029611@qq.com

tent of N and P in coniferous forest, the content of C was negatively correlated with the contents of N and P. And C content between needle and shrub leaf, N, P content, C : N, C : P in leaves also showed a significantly positive correlation. There was a significantly negative correlation between needle leaf and soil P, N : P, shrub leaf and soil P, herb leaf and soil N : P. (2) Our results demonstrated that the contents of C, N and P in the subalpine coniferous forest ecosystem were ranked in the order of *P. asperata* forest > *A. faxoniana* forest > *P. tabuliformis* forest. (3) The contents of C, N and P of different components were followed the order of herb leaf > needle leaf > shrub leaf. C : N and C : P all showed *P. tabuliformis* forest > *A. faxoniana* forest > *P. asperata* forest, and C : N and C : P showed shrub leaf > needle leaf > herb leaf. Plant growth is limited by N, and mineralization of soil organic matter was slow. Therefore, in the process of coniferous forest protection and management, we suggested to increase the protection of undergrowth and improve soil fertility, so as to maintain the long-term productivity of forests.

Key words: the eastern Qinghai-Tibet plateau; subalpine coniferous forests; leaf; soil; stoichiometry

碳(C)、氮(N)、磷(P)作为重要的生命元素,对植物体生长、细胞蛋白质和核酸的生成和转化起着关键作用^[1]。C、N、P 元素的吸收、利用及其平衡,对群落结构、植物-土壤间营养元素循环^[2]等产生重要影响,已备受生态学家的关注。已有研究表明,C : N、C : P 可以反映植物的生长速率和养分利用效率^[3],叶片 N : P 化学计量比的变化能够反映出叶片对 N、P 元素的限制状况^[4]。植物生长所需养分主要来源于土壤,植物的生长和土壤密切相关,土壤对生态系统物质循环、碳氮磷元素的平衡过程中起着重要作用^[5]。研究植物-土壤 C、N、P 含量以及之间的关系,对于揭示生态系统 C、N、P 元素的循环和平衡机制具有重要意义。

近年来,对森林生态系统 C、N、P 化学计量的研究集中于叶片与土壤以及二者之间的关系,尤其是,在中国区域乃至全球范围内,对叶片 C、N、P 化学计量特征变化差异^[6-8],以及植物和土壤 C、N、P 含量及二者间关系进行了广泛的研究报道^[9-11]。这些研究对深入了解植物-土壤生态化学计量特征乃至生态系统化学计量特征具有重要意义。已有的研究大多针对单一的叶片和土壤 C、N、P 化学计量,而从不同针叶林中的针叶、灌叶和草叶以及对应的土壤之间的 C、N、P 化学计量特征的综合角度来研究较少。将针叶、灌叶、草叶和土壤结合起来,有助于深入了解不同针叶林下 C、N、P 元素化学计量特征的变化规律。

甘肃白龙江林区,位于青藏高原东缘,是全国九大重点林区之一,也是中国西北地区重要的绿色屏障。冷杉、云杉、油松林面积占有林地面积 60% 以上,蓄积量占 70% 以上,本研究对青藏高原东缘亚高山 3 种典型针叶林(油松林、云杉林、冷杉林)的针叶、灌叶、草叶和土壤 C、N、P 含量及其化学计量比进行测定,分析它们之间的化学计量特征和元素循

环规律,揭示不同针叶林生态系统中养分元素的分配格局,以期为针叶林生态系统的经营管理提供基础数据。

1 材料和方法

1.1 研究区自然概况

研究区设在甘肃白龙江林区(33°04'~35°09' N, 102°46'~104°52' E),地处青藏高原东部边缘与岷山脉的白龙江和洮河两大河流上游,属长江和黄河的源头地区,属于典型高山峡谷地区,森林覆盖率达 50.96%,植物种类丰富。该区属于亚热带大陆性过渡区季风性山地气候,年均温 3.9 °C,年平均降水量 966.6 mm,无霜期 93 d 左右,日照时数 1 398~2 275 h。土壤以棕色灰化土、棕色森林土、褐色森林土为主,其中主要乔木类型有岷江冷杉(*Abies faxoniana*)、云杉(*Picea asperata*)、油松(*Pinus tabuliformis*)、红桦(*Betula albo-sinensis*)和白桦(*Betula platyphylla*)等。

1.2 野外调查及取样

2019 年 8~10 月,在对青藏高原东缘植被调查的基础上,选择具有代表性和典型性的岷江冷杉、云杉和油松为单优种的森林类型,样地基本信息见表 1。其中岷江冷杉林为天然林,云杉林和油松林为人工林,2 种人工林都是 20 世纪 80 年代后期白龙江林区大规模植被恢复时栽种,期间实施了一次间伐,并且每年进行人工割灌和修枝抚育。每种林分各设立 3 个 20 m×20 m 的样地,共计 9 个。记录样地的经纬度、海拔、坡向与坡度等信息。在每个样地,乔木叶片按胸径选取 3 株标准木采摘四个方向健康叶片并混合,在样地内按对角线法选择 3 个有代表性的 2 m×2 m 的灌木样方,收获灌木样方内所有灌叶混装,在样地内按对角线法选择 3 个 1 m×1 m

表 1 不同针叶林样地基本情况

Table 1 Basic characteristics of the different coniferous forests

针叶林类型 Coniferous forest type	平均胸径 Mean DBH/cm	平均树高 Mean tree height/cm	郁闭度 Crown density	灌木代表物种 Representative shrub species	草本代表物种 Representative herb species
I 岷江冷杉林 <i>Abies faxoniana</i>	24.6	18.5	0.7		珠芽蓼 <i>Polygonum viviparum</i>
					林猪殃殃 <i>Galium paradoxum</i>
				忍冬 <i>Lonicera japonica</i>	唐松草 <i>Thalictrum culttratum</i>
				蔷薇 <i>Rosa omeiensis</i>	鳞毛蕨 <i>Dryopteris toyamae</i>
				茶藨子 <i>Ribes stenocarpum</i>	东方草莓 <i>Fragaria orientalis</i>
					冷蕨 <i>Cystopteris fragilis</i>
II 云杉林 <i>Picea sperata</i>	19.3	19.1	0.8		蟹甲草 <i>Parasenecio forrestii</i>
					荨麻 <i>Urtica fissa</i>
				秀丽莓 <i>Rubus amabilis</i>	冷蕨 <i>Cystopteris fragilis</i>
				茶藨子 <i>Ribes stenocarpum</i>	鳞毛蕨 <i>Dryopteris toyamae</i>
				小檗 <i>Berberis aggregata</i>	东方草莓 <i>Fragaria orientalis</i>
					鹿蹄草 <i>Pyrola calliantha</i>
III 油松林 <i>Pinus tabuliformis</i>	18.6	12.6	0.7		蟹甲草 <i>Parasenecio forrestii</i>
				灰栒子 <i>Cotoneaster acutifolius</i>	高山露珠草 <i>Circaea alpina</i>
				蔷薇 <i>Rosa omeiensis</i>	东方草莓 <i>Fragaria orientalis</i>
				臭樱 <i>Maddenia hypoleuca</i>	银莲花 <i>Anemone cathayensis</i>
					蟹甲草 <i>Parasenecio forrestii</i>
					臭蒿 <i>Artemisia hedinii</i>

的草本样方,收获样方内全部草叶混装。在各个样地内,按“品”字形选择 3 个点采集 0~10 cm 土壤样品。不同针叶林林分基本状况见表 1(岷江冷杉林-针叶林 I、云杉林-针叶林 II、油松林-针叶林 III)。

1.3 样品处理及测定

植物样品在 85 ℃ 条件下在烘箱内烘干至恒重,然后将烘干后的样品粉碎,过 0.25 mm 筛备用。土壤样品去除石粒和树根等杂物,风干研磨过筛后待用。植物和土壤样品有机质采用重铬酸钾外加热法测定,全氮采用凯式蒸馏法测定,全磷采用钼锑抗比色法测定^[12]。

1.4 数据处理

采用 Excel 2010 和 SPSS 16.0 软件对数据进行统计分析,用 SigmaPlot12.0 作图。针叶、灌叶、草叶和土壤 4 个组分内 C、N、P 含量和组分间 C、N、P 含量及其比值两两之间的关系进行 Pearson 相关分析。图表中数据为平均值±标准差。

2 结果与分析

2.1 针叶林植物叶片和土壤 C、N、P 含量特征

从图 1 可以看出,不同林分类型的针叶、灌叶和

草叶 C 含量差异不显著($P>0.05$),针叶 C 含量分别为 433.98~450.48 g/kg,灌叶 C 含量分别为 429.10~434.03 g/kg,草叶 C 含量分别为 518.93~533.90 g/kg。针叶、灌叶、草叶 N、P 含量差异显著($P<0.05$),均表现为 II>I>III。同一针叶林不同组分 C、N、P 含量差异显著($P<0.05$),均表现为草叶>针叶>灌叶。

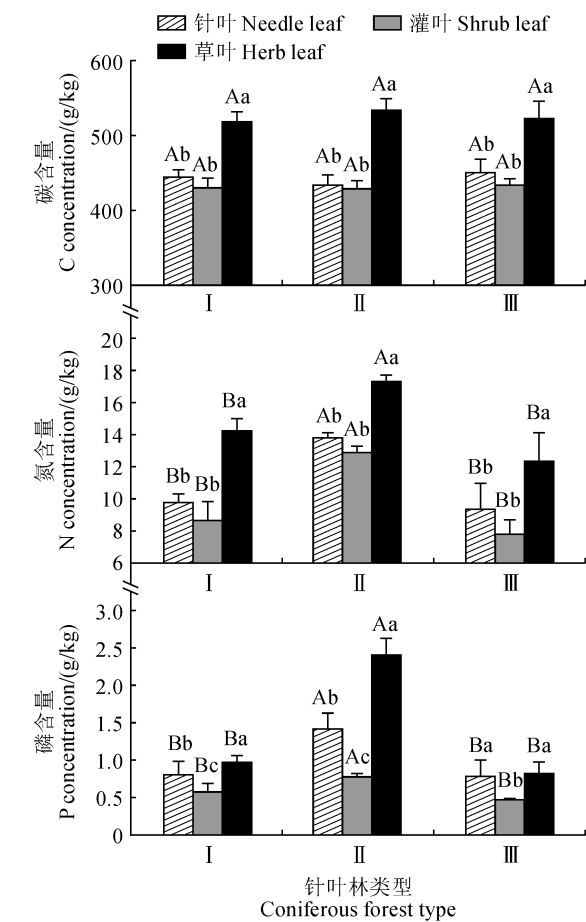
从表 2 可以得出,不同针叶林下 0~10 cm 土壤有机碳平均含量差异显著($P<0.05$),表现为 I>III>II。不同针叶林下 0~10 cm 土壤全氮平均含量分别为 1.71、1.75 g/kg 和 1.54 g/kg,且无显著差异($P>0.05$)。0~10 cm 土壤全磷含量在不同针叶林中差异显著($P<0.05$),表现为 I>III>II。

2.2 针叶林植物叶片及其与土壤 C、N、P 化学计量比特征

从图 2 可以看出,不同针叶林不同组分 C:N、C:P 差异显著($P<0.05$),针叶、灌叶、草叶 C:N 和 C:P 均表现出 III>I>II,针叶和草叶 N:P 在不同针叶林中差异显著($P<0.05$),均表现出 III>I>II,灌叶 N:P 在不同针叶林中无显著差异($P>0.05$)。C:N、C:P 在不同针叶林中均变现为灌叶>针叶>草

叶,灌叶 N:P 也高于针叶和草叶。

从表 3 可以得出,不同针叶林下 0~10 cm 土壤平均 C:N、C:P、N:P 差异显著($P<0.05$),C:N 表现为 I>Ⅲ>Ⅱ,C:P 表现为 I>Ⅱ>Ⅲ,C:P 在Ⅱ和Ⅲ之间无显著差异,N:P 表现为Ⅱ>Ⅲ>I。



图中不同大写字母表示不同针叶林间差异显著($P<0.05$),不同小写字母表示同一针叶林内差异显著($P<0.05$);下同

图 1 不同针叶林针叶、灌叶、草叶 C、N、P 含量
Different capital letter mean significant among different coniferous forests ($P<0.05$); different normal letters indicate significant differences in the same coniferous forest ($P<0.05$);
The same as below
Fig. 1 C, N, P contents of needle, shrub and herb leaf in different coniferous forests

2.3 针叶、灌叶、草叶和土壤 C、N、P 及其比值相关性分析

对针叶、灌叶、草叶和 0~10 cm 土壤 C、N、P 及其化学计量比进行相关性分析(表 4),结果表明:针叶、灌叶、草叶的 N 含量与其自身 P 含量呈极显著正相关关系($P<0.01$)。针叶和灌叶的 C 含量与其自身的 N 含量呈极显著负相关($P<0.01$)。针叶的 C 含量与其自身的 P 含量呈显著负相关($P<0.05$)。针叶、灌叶、草叶的 P 含量与其自身的 C:N、C:P 呈极显著负相关($P<0.01$)。灌叶、草叶的

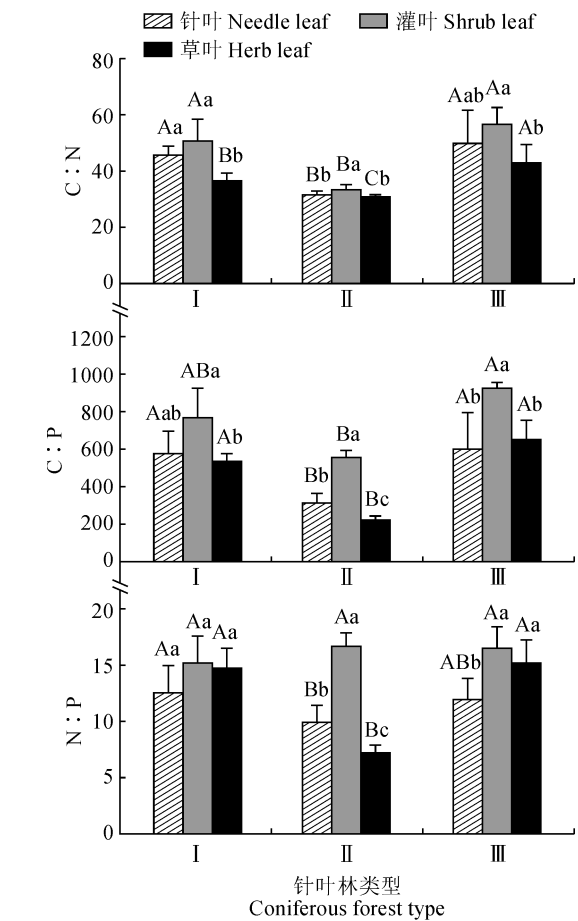


图 2 不同针叶林针叶、灌叶、草叶 C、N、P 化学计量比特征
Fig. 2 The stoichiometry characteristics of needle, shrub and herb leaves in different coniferous forests

表 2 不同针叶林下 0~10 cm 土层有机碳、全氮、全磷含量			
Table 2 Soil organic carbon, total N and total P in 0—10 cm layer under different coniferous forests			
针叶林类型 Coniferous forest type	OC/(g/kg)	TN/(g/kg)	TP/(g/kg)
I	64.33±1.94a	1.71±0.05a	1.19±0.11a
II	40.85±0.50b	1.75±0.05a	0.86±0.03b
III	43.38±1.10c	1.54±0.15a	0.93±0.02c

注:同列不同字母表示在 0.05 水平差异显著,下同
Note:Different letters in the same line represent significant differences at 0.05 level, the same as below

表 3 不同针叶林下 0~10 cm 土层 C : N, C : P, N : P
Table 3 Ratios of C : N, C : P and N : P in 0—10 cm layer under different coniferous forests

针叶林类型 Coniferous forest type	C : N	C : P	N : P
I	37.63±2.26a	54.56±4.28a	1.46±0.15a
II	23.43±0.73b	47.44±0.95b	2.03±0.08b
III	28.45±2.20c	46.55±1.42b	1.65±0.16c

表 4 针叶、灌叶、草叶和土壤 C、N、P 含量及其化学计量的相关性
Table 4 Correlations of needle, shrub, herb leaves and soil C, N, P stoichiometry

组分 Component	指标 Index	C	N	P	C : N	C : P
针叶-针叶 Needle leaf-Needle leaf	C	1				
	N	−0.634 **	1			
	P	−0.522 *	0.892 **	1		
	C : N	0.781 **	−0.951 **	−0.830 **	1	
	C : P	0.627 **	−0.874 **	−0.943 **	0.459	1
	N : P	0.192	−0.517 *	−0.825 **	0.110	0.795 **
灌叶-灌叶 Shrub leaf-Shrub leaf	C	1				
	N	−0.182 **	1			
	P	−0.257	0.879 **	1		
	C : N	0.253	−0.982 **	−0.873 **	1	
	C : P	0.366	−0.860 **	−0.984 **	0.872 **	1
	N : P	0.169	0.299	0.181	−0.299	0.199
草叶-草叶 Herb leaf-Herb leaf	C	1				
	N	0.336	1			
	P	0.233	0.733 **	1		
	C : N	−0.078	−0.951 **	−0.636 **	1	
	C : P	−0.450	−0.919 **	−0.781 **	0.811 **	1
	N : P	−0.549	−0.736 **	−0.748 **	0.557 *	0.934 **
针叶-灌叶 Needle leaf-Shrub leaf	0.482 *	0.854 **	0.767 **	0.674 **	0.651 **	−0.162
针叶-草叶 Needle leaf-Herb leaf	−0.465	0.850 **	0.525 *	0.669 **	0.653 **	0.430
针叶-土壤 Needle leaf-soil	0.397	0.333	−0.533 *	0.465	0.002	−0.597 **
灌叶-草叶 Shrub leaf-Herb leaf	−0.098	0.811 **	0.749 **	0.662 **	0.825 **	−0.076
灌叶-土壤 Shrub leaf-soil	0.184	0.419	−0.714 **	0.417	−0.061	0.153
草叶-土壤 Herb leaf-soil	−0.201	0.240	−0.469	0.268	0.163	−0.736 **

注：* 表示显著相关($P<0.05$), ** 表示极显著相关($P<0.01$)
Note: * indicates significant correlation ($P<0.05$), ** indicate extremely significant correlation ($P<0.01$)

C : N 与其自身的 C : P 呈极显著正相关关系。针叶、草叶的 C : P 与其自身的 N : P 呈极显著正相关关系。针叶和灌叶 C 含量呈显著正相关($P < 0.05$), N 含量、P 含量、C : N、C : P 呈极显著正相关($P < 0.01$)。针叶和草叶 P 含量呈显著正相关($P < 0.05$), N 含量、C : N、C : P 呈极显著正相关($P < 0.01$)。灌叶和草叶 N 含量、P 含量、C : N、C : P 呈极显著正相关($P < 0.01$)。针叶和土壤 TP 含量呈显著负相关($P < 0.05$), N : P 呈极显著负相关($P < 0.01$)。灌叶和土壤 TP 含量呈极显著负相关($P < 0.01$)。草叶和土壤 N : P 呈极显著负相关($P < 0.01$)。其他组分之间的 C、N、P 化学计

量比均无明显相关关系。

3 讨 论

3.1 针叶林植物叶片和土壤 C、N、P 含量特征

C、N、P 是构成植物干物质、蛋白质和遗传物质的重要元素^[13],对森林系统内养分的循环和转换具有重要作用。在本研究中,针叶的 C 含量平均值为 442.66 g/kg,高于赵维俊等^[14]研究的祁连山青海云杉林针叶 C 含量平均值(432.4 g/kg),但低于中国东部南北样带 C 含量平均值(480.1 g/kg)和全球植物叶片 C 含量平均值(464 g/kg)^[15]。针叶的 N、P 含量均低于中国区域的 N 含量($20.24 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$)和 P 含量($1.46 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$)^[6]以及全球尺度的 N 含量($20.6 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$)和 P 含量($1.99 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$)^[15]。这主要与亚高山针叶林的单优种和地处亚高山地带阴冷潮湿的地理环境有一定关系。另外,青藏高原东缘亚高山地区是甘肃降水较多的区域,N、P 元素受雨水冲刷影响,植被可利用的元素较少,导致植物 N、P 含量较低。灌叶的 C、N、P 含量均值均低于针叶,可能是由于乔木比灌木对光竞争更有优势,从而使得对养分的吸收较强。草叶的 C、N、P 含量均高于针叶和灌叶,这说明一年生或生长较快的草本植物在生长期对 C、N、P 的需求和吸收能力较高,其叶片 C、N、P 含量高于生长较慢的木本植物^[16-17],这也符合植物相对生长速率假说^[18]。本研究发现云杉林植物叶片的 C、N、P 含量均显著高于其他 2 种针叶林,这可能是由于云杉作为青藏高原东缘代表性造林树种,生长迅速,发育良好有很大关系。

土壤与植物的生存和发展密切相关,其 C、N、P 元素是植物生长的非常重要的影响因子,与植物的生长发育密切相关^[19]。本研究中,3 种针叶林下 0~10 cm 土壤平均有机碳含量均高于中国 0~10 cm 土壤有机碳含量均值 24.56 g/kg ^[20],与赵维俊等^[14]在祁连山云杉林土壤的研究一致。土壤有机质的积累受气候与植被的影响,低温可促进森林土壤碳的累积,地下细根生物量增加以及树种不同带来较大的生物量输入均可增加碳库累积^[21]。在本研究区,针叶林地处高海拔高寒地带,植被茂盛,凋落物层较厚,温度适中,加速了凋落物的分解,导致针叶林下土壤有机碳含量较高。0~10 cm 全氮含量均低于中国全氮含量均值 1.88 g/kg ^[20],0~10 cm 全磷含量均值分别均高于中国全磷含量均值 0.78 g/kg ^[20],可见,青藏高原东缘亚高山森林土层虽然薄,但表层土壤全磷含量高,可能由于亚高山低

温潮湿的气候条件有利于土壤微生物的生长,使得土壤全磷的转化率高。但低于全球平均值($2.8 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$)^[22],与中国土壤 P 含量低于全球水平的研究结果一致,也与中国土壤 P 含量低导致植物叶片 P 含量低的推论一致^[6]。与油松林和云杉林相比,冷杉林(天然林)下土壤肥力更高,这是由于人工林内生物多样性较低、凋落物种类较少、凋落物分解速率较低等因素所致,从而造成土壤养分得不到及时补充,从而引起人工林土壤 C、N、P 含量呈现较低的状态^[23]。然而天然林生物多样性较高,凋落物种类繁多,利于土壤微生物与小型动物活动,从而促进凋落物中 C、N、P 的归还^[24]。这也说明了冷杉林作为青藏高原东缘地带性顶极群落,土壤的矿化能力高于云杉林和油松林。

3.2 针叶林植物叶片及其与土壤 N、P 化学计量比特征

作为重要的生理指标,植物体的 C : N 和 C : P 反映了植物的生长速度^[25]。N 和 P 作为陆地生态系统生产力的重要限制因子,N : P 值通常被用来判断植物养分限制状况^[26-27]。本研究中,叶片的 C : N、C : P、N : P 均值分别为 42.00、569.07、13.36,叶片 C : N、C : P 高于任书杰等^[28]在中国南北样带森林群落叶片的 C : N(29.1)、C : P(313.9),通常认为低的 C : N 和 C : P 表征植物较快的生长速率,表明青藏高原东缘亚高山针叶林生长比较缓慢。叶片 N : P < 14,表明青藏高原东缘典型针叶林生长更易受到 N 的限制;这与前人的研究结果有所不同,例如,在中国区域和中国东部南北样带的研究显示,植被生产力主要受 P 限制,而不是 N 限制^[6, 28],二者研究结果的不同可能与针叶林是由单一树种组成的纯林和其地处亚高山地带及温湿度、根系对养分的吸收等因素有关,也可能是由于 3 种针叶林长期处于高海拔、郁闭度较高的环境中,长期的极端低温环境不利于岩石风化,影响土壤氮的矿化,因此更易受到 N 的限制。土壤碳氮磷比是有机质或其他成分中的碳素与氮素、磷素总质量的比值,是土壤有机质组成和质量程度的一个重要指标^[29]。土壤有机层的 C : N、C : P 可以用来指示有机质矿化速率和土壤 P 的有效性,较低的 C : N、C : P 表明土壤有机层矿化作用快和 P 的有效性高^[30]。本研究中,0~10 cm 土层土壤 C : N 均值为 29.84,高于中国陆地土壤 C : N 的平均值(11.9)^[20],说明针叶林土壤有机层矿化作用缓慢,土壤 N 含量低。0~10 cm 土层土壤 C : P、N : P 均值分别为 49.52、1.71,均低于中国陆地土壤 C : P、N :

P 均值(61、5.2)^[31],说明针叶林土壤 P 有效性更高。

3.3 针叶林植物叶片与土壤 C、N、P 及其比值的相关性

Sterner 等^[32]研究表明,植物叶片 C 含量与 N、P 含量呈显著负相关关系,N 含量与 P 含量呈显著正相关关系,认为植物叶片间养分元素的相互平衡关系受任何一种元素的过量和不足影响。相关分析结果表明,本研究中针叶林各层次植物叶片 N 含量与其自身的 P 含量均呈极显著的正相关关系,表明 N、P 含量在植物体内的一致性很高。针叶的 C 含量与其自身的 N、P 含量呈极显著负相关,这与 Sterner 等^[32]一致。因此,这可能是该区域植物的生长受 N 限制使其养分利用不平衡关系导致的一系列变化。与 P 含量相比,C 含量与 N 含量在叶片各层次间呈现出更好的相关性,这可能是由于 C、N 这 2 种重要的生命元素在各层次的叶片中具有相似性,表明植物的进化过程是具有一定的稳定性。针

叶、草叶的 C : P 与其自身的 N : P 呈极显著正相关关系,这与胡小燕等^[30]对不同密度杉木林的研究一致。可能是因为针叶林所处的高寒环境、植被构成以及低端的局部气候条件引起了植物叶片对 C、N、P 元素吸收的时滞效应,同时也说明不同针叶林的针叶、灌叶和草叶并不能直接判断元素计量关系。已有研究表明植物 N、P 与土壤 N、P 之间存在显著的正相关关系^[33-34]。本研究中,各层次植物叶片 N 和土壤 N 含量均无显著相关性,而针叶、灌叶 P 和土壤 P 含量呈显著负相关。这可能是由于针叶林植物生长受 N 限制,而土壤 P 含量较丰富而过剩;以及不同针叶林受到的人为干扰程度、群落构成、土壤特性等因子的直接或间接影响导致其营养元素含量差异很大;针叶、草叶和土壤 N : P 呈极显著负相关,说明植物体内的营养元素有一部分是来自于土壤养分的供应。

致谢:感谢甘肃省白龙江林管局舟曲生态建设局徐德才、迭部生态建设局汤勇在样地选择和布设工作中给予的帮助。

参考文献:

[1] GARTEN C T JR. Correlations between concentrations of elements in plants[J]. *Nature*, 1976, **261**(5 562): 686-688.

[2] DENG Q, HUI D F, *et al.* Responses of terrestrial ecosystem phosphorus cycling to nitrogen addition; a meta-analysis[J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2017, **26**(6): 713-728.

[3] ELSER J J, ACHARYA K, KYLE M, *et al.* Growth rate-stoichiometry couplings in diverse biota[J]. *Ecology Letters*, 2003, **6**(10): 936-943.

[4] KOERSELMAN W, MEULEMAN A F M. The vegetation N : P ratio: a new tool to detect the nature of nutrient limitation [J]. *The Journal of Applied Ecology*, 1996, **33**(6): 1 441.

[5] 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 pseud-oacacia* forest in loess plateau[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2014, **51**(1): 133-142.

[6] 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**(2): 377-385.

[7] 毕建华, 苏宝玲, 于大炮, 等. 辽东山区不同森林类型生态化学计量特征[J]. *生态学报*, 2017, **36**(11): 3 109-3 115.

BI J H, SU B L, YU D P, *et al.* Ecological stoichiometry of different forest types in mountainous region of eastern Liaoning Province [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2017, **36**(11): 3 109-3 115.

[8] 王晶苑, 王绍强, 李勿兰, 等. 中国四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.

WANG J Y, WANG S Q, LI R L, *et al.* C : N : P stoichiometric characteristics of four forest types' dominant tree species in China[J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2011, **35**(6): 587-595.

[9] 姜沛沛, 曹 扬, 陈云明, 等. 陕西省 3 种主要树种叶片、凋落物和土壤 N、P 化学计量特征[J]. *生态学报*, 2017, **37**(2): 443-454.

JIANG P P, CAO Y, CHEN Y M, *et al.* N and P stoichiometric characteristics of leaves, litter, and soil for three dominant tree species in the Shaanxi Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, **37**(2): 443-454.

[10] HAN W X, FANG J Y, REICH P B, *et al.* Biogeography and variability of eleven mineral elements in plant leaves across gradients of climate, soil and plant functional type in China[J]. *Ecology Letters*, 2011, **14**(8): 788-796.

[11] HE X J, HOU E Q, LIU Y, *et al.* Altitudinal patterns and controls of plant and soil nutrient concentrations and stoichiometry in subtropical China[J]. *Scientific Reports*, 2016, **6**: 24 261.

[12] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.

[13] 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): 2 365-2 372.

XIANG W H, HUANG Z H, YAN W D, *et al.* Review on coupling of interactive functions between carbon and nitrogen cycles in forest ecosystems [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, **26**(7): 2 365-2 372.

- [14] 赵维俊, 刘贤德, 金 铭, 等. 祁连山青海云杉林叶片-枯落物-土壤的碳氮磷生态化学计量特征[J]. 土壤学报, 2016, **53**(2): 477-489.
ZHAO W J, LIU X D, JIN M, *et al.* Ecological stoichiometric characteristics of carbon, nitrogen and phosphorus in leaf-litter-soil system of *Picea crassifolia* forest in the Qilian Mountains[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, **53**(2): 477-489.
- [15] ELSER J J, FAGAN W F, DENNO R F, *et al.* Nutritional constraints in terrestrial and freshwater food webs[J]. *Nature*, 2000, **408**(6 812): 578-580.
- [16] THOMPSON K, PARKINSON J A, BAND S R, *et al.* a comparative study of leaf nutrient concentrations in a regional herbaceous flora[J]. *New Phytologist*, 1997, **136**(4): 679-689.
- [17] REICH P B, OLEKSYN J. Global patterns of plant leaf N and P in relation to temperature and latitude[J]. *PNAS*, 2004, **101**(30): 11 001-11 006.
- [18] ELSER J J, STERNER R W, GOROKHOVA E, *et al.* Biological stoichiometry from genes to ecosystems[J]. *Ecology Letters*, 2000, **3**(6): 540-550.
- [19] 宾振钧, 王静静, 张文鹏, 等. 氮肥添加对青藏高原高寒草甸 6 个群落优势种生态化学计量学特征的影响[J]. 植物生态学报, 2014, **38**(3): 231-237.
BIN Z J, WANG J J, ZHANG W P, *et al.* Effects of N addition on ecological stoichiometric characteristics in six dominant plant species of alpine meadow on the Qinghai-Xizang Plateau, China[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2014, **38**(3): 231-237.
- [20] 向慧敏, 温达志, 张玲玲, 等. 鼎湖山森林土壤活性碳及惰性碳沿海拔梯度的变化[J]. 生态学报, 2015, **35**(18): 6 089-6 099.
XIANG H M, WEN D Z, ZHANG L L, *et al.* Altitudinal changes in active and recalcitrant soil carbon pools of forests in the Dinghu Mountains[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, **35**(18): 6 089-6 099.
- [21] TIAN H Q, CHEN G S, ZHANG C, *et al.* Pattern and variation of C : N ratios in China's soils: a synthesis of observational data[J]. *Biogeochemistry*, 2010, **98**(1-3): 139-151.
- [22] 邵梅香. 南亚热带红椎与西南桦生态化学计量特征研究[D]. 南宁: 广西大学, 2012.
SHAO M X. Ecological stoichiometry characteristics of *Castanopsis hystrix* and *Atula alnoides* in south subtropical area of China[D]. NanNing: University, 2012.
- [23] 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): 3 823-3 830.
BAI X J, ZENG Q C, AN S S, *et al.* Ecological stoichiometry characteristics of leaf-litter-soil in different plantations on the Loess Plateau, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, **27**(12): 3 823-3 830.
- [24] 王文君, 杨万勤, 谭 波, 等. 四川盆地亚热带常绿阔叶林不同物候期凋落物分解与土壤动物群落结构的关系[J]. 生态学报, 2013, **33**(18): 5 737-5 750.
WANG W J, YANG W Q, TAN B, *et al.* The dynamics of soil fauna community during litter decomposition at different phenological stages in the subtropical evergreen broad-leaved forests in Sichuan basin[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, **33**(18): 5 737-5 750.
- [25] ÅGREN G I. The C : N stoichiometry of autotrophs-theory and observations[J]. *Ecology Letters*, 2004, **7**(3): 185-191.
- [26] GÜSEWELL S. N : P ratios in terrestrial plants: variation and functional significance[J]. *New Phytologist*, 2004, **164**(2): 243-266.
- [27] NIKLAS K J, OWENS T, REICH P B, *et al.* Nitrogen/phosphorus leaf stoichiometry and the scaling of plant growth[J]. *Ecology Letters*, 2005, **8**(6): 636-642.
- [28] 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): 2 665-2 673.
REN S J, YU G R, TAO B, *et al.* Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 654 terrestrial plant species in NSTEC[J]. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2007, **28**(12): 2 665-2 673.
- [29] 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): 3 937-3 947.
WANG S Q, YU G R. Ecological stoichiometry characteristics of ecosystem carbon, nitrogen and phosphorus elements[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, **28**(8): 3 937-3 947.
- [30] 胡小燕, 段爱国, 张建国, 等. 广西大青山杉木人工林碳氮磷生态化学计量特征[J]. 生态学报, 2020, **40**(4): 1 207-1 218.
HU X Y, DUAN A G, ZHANG J G, *et al.* Stoichiometry of carbon, nitrogen, and phosphorus of Chinese fir plantations in Daqing Mountain, Guangxi[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, **40**(4): 1 207-1 218.
- [31] 曾冬萍, 蒋利玲, 曾从盛, 等. 生态化学计量学特征及其应用研究进展[J]. 生态学报, 2013, **33**(18): 5 484-5 492.
ZENG D P, JIANG L L, ZENG C S, *et al.* Reviews on the ecological stoichiometry characteristics and its applications[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, **33**(18): 5 484-5 492.
- [32] STERNER R W, ELSER J J. Ecological Stoichiometry[M]. Princeton: Princeton University Press, 2003.
- [33] 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): 6 581-6 590.
LIU W D, SU J R, LI S F, *et al.* Stoichiometry study of C, N and P in plant and soil at different successional stages of monsoon evergreen broad-leaved forest in Pu'er, Yunnan Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, **30**(23): 6 581-6 590.
- [34] 肖 遥, 陶 冶, 张元明. 古尔班通古特沙漠 4 种荒漠草本植物不同生长期的生物量分配与叶片化学计量特征[J]. 植物生态学报, 2014, **38**(9): 929-940.
XIAO Y, TAO Y, ZHANG Y M. Biomass allocation and leaf stoichiometric characteristics in four desert herbaceous plants during different growth periods in the Gurbantünggüt Desert, China[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2014, **38**(9): 929-940.