doi:10.3969/j.issn.1006-8023.2024.03.001

大兴安岭北部主要乔木树种叶片-土壤碳氮磷生态化学计量特征

景继鑫,陈灿阳,满秀玲*,韩昭郅
(东北林业大学 林学院,哈尔滨 150040)

摘　要:以大兴安岭北部多年冻土区典型森林群落主要乔木为研究对象,分析叶片和土壤碳(C)、氮(N)、磷(P)含量及生态化学计量特征,探讨叶片和土壤C、N、P生态化学计量之间的关系,为该地区森林生态系统养分循环研究提供理论依据。结果表明,4种乔木叶片C∶N范围为25.66~47.92,C∶P范围为323.83~603.86,N∶P为10.21~20.59,兴安落叶松叶片C∶P和N∶P均最低,樟子松叶片C∶N和C∶P均最高,白桦C∶N最低,山杨N∶P最高;4种乔木叶片C∶N和C∶P都高于全球植物平均水平,表明这些乔木叶片具有较高的N、P利用效率,同时山杨叶片N∶P>20,其生长主要受P素限制;不同的群落土壤C∶N为13.89~18.46,C∶P为35.43~77.19,N∶P为1.96~5.26,山杨林C∶P和N∶P均为最高,而C∶N最低。白桦林C∶N最高,N∶P最低。樟子松林C∶P最低。冗余分析结果显示,4种乔木叶片C、N、P生态化学计量与土壤之间存在显著相关关系,土壤C、N、P含量及化学计量对乔木固碳及氮磷吸收具有显著影响。由此可见,我国寒温带4种乔木具有较高的N、P利用效率,但山杨生长受到P的限制,叶片C、N、P生态化学计量与土壤生态化学计量显著相关。

关键词:大兴安岭北部地区;兴安落叶松;樟子松;生态化学计量;土壤;叶片
中图分类号:S714　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1006-8023(2024)03-0001-10

The Foliar-soil Ecostoichiometric Characteristics of the Principal Arboreal Species in the Northern Region of the Greater Hinggan Mountains

JING Jixin, CHEN Canyang, MAN Xiuling*, HAN Zhaozhi
(College of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

Abstract: In this study, the main trees of typical forest communities in permafrost area of northern Greater Khingan Mountains were selected as the research objects, the contents of carbon (C), nitrogen (N) and phosphorus (P) in leaves and soil and their ecological stoichiometric characteristics were analyzed, and the relationship between leaves and soil C, N and P ecological stoichiometry was discussed to provide theoretical basis for the study of nutrient cycling in forest ecosystem in this area. Results indicated that the C∶N ratio of four tree leaves ranged from 25.66 to 47.92, the C∶P ratio ranged from 323.83 to 603.86, and the N:P ratio ranged from 10.21 to 20.59. *Larix gmelini* exhibited the lowest C∶N and N∶P ratios, while *Pinus sylvestris* var *mongolica* had the highest C∶N and C∶P ratios, *Betula platyphylla* had the lowest C∶N ratio and *Populus davidiana had* the highest N∶P ratio. The C∶N and C∶P ratios of all four tree species exceeded the global average, suggesting efficient utilization of N and P. Nevertheless, the leaf N∶P >20 of *Populus davidiana* was primarily limited by P in its growth. The soil C∶N ratio of different communities ranged from 13.89 to 18.46, the C∶P ratio ranged from 35.43 to 77.19, and the N∶P ratio ranged from 1.96 to 5.26. *Populus davidiana* forests exhibited the highest C∶P and N∶P ratios, while having the lowest C∶N ratio. *Betula platyphylla* had the highest C∶N ratio and the lowest N∶P ratio. *Pinus sylvestris* var *mongolica* displayed the lowest C∶P ratio. The redundancy analysis results showed that there was a significant correlation between the ecological stoichiometry of C, N, and P in the leaves of four trees and the soil. The content and stoichiometry of soil C, N, P had a significant impact on the carbon fixation and nitrogen and phosphorus absorption of trees. It can be seen that the four types of trees in the cold temperate zone of China have high N and P utilization efficiency, but the growth of *Populus davidiana* is limited by P. The ecological stoichiometry of leaf C, N, and P is significantly correlated with soil ecological stoichiometry.

Keywords: Northern Greater Hinggan Mountains; *Larix gmelini*; *Pinus sylvestris* var *mongolica*; ecological stoichiometry; soil; foliage

---

收稿日期:2023-10-26
基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFD2200405-4);黑龙江省级大学生创新训练项目资助(S202210225296)。
第一作者简介:景继鑫,博士研究生。研究方向为森林生态系统碳汇。E-mail: 18846921406@139.com
*通信作者:满秀玲,博士,教授。研究方向为水土保持。E-mail: mannefu@163.com
引文格式:景继鑫,陈灿阳,满秀玲,等.大兴安岭北部主要乔木树种叶片-土壤碳氮磷生态化学计量特征[J].森林工程,2024,40(3):1-10.

JING J X, CHEN C Y, MAN X L, et al. The foliar-soil ecostoichiometric characteristics of the principal arboreal species in the northern region of the Greater Hinggan Mountains[J]. Forest Engineering, 2024, 40(3):1-10.

0 引言

生态化学计量学作为一门对生态系统中能量循环过程和多种化学元素平衡深入探究的学科[1-2],对分析生态循环中碳(C)、氮(N)、磷(P)等元素间相互耦合关系发挥着重要作用[3]。目前,C∶N∶P化学计量特征对于植物养分利用[4]、营养元素限制[5]、群落结构功能稳定性[6]、凋落物分解[7]和微生物调节[8]等方面的研究都有广泛应用。通过叶片的生态化学计量可以反映植物的生长和营养限制的情况,而叶片的C∶N和C∶P则可以表现出植物的碳同化速率,并用于评估其营养利用的效率[9],而叶片N∶P用于评价植物生长过程N、P养分限制状况[10]。在不同季节[11]、生长阶段[12]和演替阶段[13],植物生长发育情况亦会有所不同,并通过不同的生态化学计量特征呈现。影响植物生长发育的一个关键决定性因素是土壤可利用的N和P[14],其含量高低和土壤矿化程度可以通过土壤C∶N和C∶P来反映[15],其中N∶P是评估植物生长受N、P限制情况的重要指标[16]。Güsewell等[17]认为陆地植物的N∶P在10以下时,植物生长受N限制,在10~20时,N和P对植物生长无影响,超过20则受P限制。一般来说,温带和北方森林主要受N限制,而热带和亚热带森林则普遍受P限制[18-19]。在不同的生态系统中,植物叶片-土壤化学计量关系也有所不同,这是由于植物需要对不同的环境做出相应的适应策略[20]。因此,生态化学计量学研究对于生态系统养分供给研究具有重要意义。

大兴安岭北部作为我国唯一的寒温带林区,该地区,冬季漫长且寒冷,年均气温约为-4.5 ℃且无霜期仅约90 d。这些独特的气候条件对植物生长产生了重大影响,可能改变其对养分的需求水平和养分适应策略。因此,本研究选择大兴安岭北部多年冻土区的典型森林群落作为研究对象,探究其主要乔木叶片与土壤C、N、P化学计量特征及其影响因子,以期为大兴安岭地区森林养分循环研究提供科学依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于大兴安岭地区的漠河市北极村镇,坐落在黑龙江上游的大兴安岭山脉北麓,黑龙江上游(50°10′~53°33′N,121°7′~124°20′E)。该地为寒温带大陆性季风气候,四季分明,冬季长且寒冷,夏季短而温热,年均气温-4.9 ℃,6—9月的平均气温为7.5~18.1 ℃。海拔300~700 m,年均降水量350~500 mm,年无霜期90 d左右,是我国多年冻土主要分布区。本区顶级群落是以兴安落叶松(*Larix gmelini*)为主的明亮针叶林,其他森林类型有白桦(*Betula platyphylla*)、樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)和山杨(*Populus davidiana*)等,林下灌木主要有兴安杜鹃(*Rhododendron dauricum*)、杜香(*Ledum palustre*)和越橘(*Vaccinium vitis-idaea*)等。地带性土壤为棕色针叶林土,且有多年冻土的分布。

1.2 样品采集与分析方法

在前期踏查的基础上,于2022年7月选择4种典型森林群落,即兴安落叶松林、樟子松林、白桦林和山杨林,在每一群落中选典型地段设置3块面积为20 m×30 m的调查样地,对样地进行每木检尺,样地基本情况见表1。在每个样地内选择3株标准

表1 样地基本信息

Tab. 1 Basic information of the sample plots

森林植被类型 Forest vegetation types	海拔/m Altitude	坡度/(°) Slope	坡向 Aspect	坡位 Slope position	平均胸径/cm DBH	平均树高/m Average tree height	林龄/a Forest age	树种组成 Species composition	密度/(株·hm^{-2}) Density	郁闭度 Canopy density
兴安落叶松林 *Larix gmelinii* forest	302	5	阳坡	中下部	15.67±0.32	17.15±1.05	86±8	8落1樟1白	1 260	0.7
樟子松林 *Pinus sylvestris* var. *mongolica* forest	361	10	阳坡	中下部	22.90±1.08	23.66±0.77	97±12	8樟2落	736	0.6
白桦林 *Betula platyphylla* forest	412	8	阳坡	中部	12.68±0.66	14.62±0.61	43±5	10白	1 663	0.8
山杨林 *Populus davidiana* forest	457	7	阳坡	中部	13.82±0.47	18.54±0.26	41±6	8杨2白	975	0.8

注:树种组成中"落"为落叶松;"樟"为樟子松;"白"为白桦;"杨"为山杨。

Note: In the composition of tree species, "Luo" means *Larix gmelinii*, "Zhang" means *Pinus sylvestris* var. *mongolica*, "Bai" means *Betula platyphylla*, "Yang" means *Populus davidiana*.

木为调查样木,在每个标准木的东南西北 4 个方位,分别剪取树冠内部和外部相同部位无病虫害成熟的叶片混匀,每个标准木获得 3 份样本,共 108 个样本,用于 C、N 和 P 含量的检测。叶片采集的同时,在每个样地内随机选取 3 个点,挖掘土壤剖面,在去除凋落物后,分别按照 0~5、5~10、10~20 cm 进行分层采集土壤样品,将同一土层不同点的土壤样品混匀,每块样地同一土层取 3 个样本,4 个林型共 108 个样本,用于测定土壤养分含量。同时,用环刀取原状土,测定土壤容重和含水量。

1.3　土壤及叶片 C、N、P 含量测定

将取回的新鲜土壤挑去根系和石砾等杂物,放置在阴凉通风处自然风干,风干后土样用研钵研磨并过 0.149 mm 筛,用于测定土壤有机碳(soil organic carbon, SOC)、全氮(total nitrogen, TN)和全磷(total phosphorus, TP)含量。新鲜叶片置于烘箱中经过 105 ℃ 2 h 杀青后,在 65 ℃烘干至恒重,粉碎后过 100 目筛,用于测定叶片 C、N 和 P 含量。土壤和植物叶片有机 C 含量均采用重铬酸钾-硫酸外加热法测定;采用凯氏定氮法测定 N 含量,钼锑抗比色法测定 P 含量。

1.4　数据统计与分析

使用 Excel 2020 和 SPSS 16.0 软件对数据进行统计分析。首先对数据进行 K-S 检验,对 $P<0.05$ 的数据进行对数转换,使其符合正态分布。采用单因素方差分析比较不同样地叶片和土壤以及不同土层间 C、N、P、C∶N、C∶P、N∶P 含量差异性。用 R4.0.5 完成冗余分析(Redundancy Analysis, RDA)检验乔木叶片与土壤 C、N、P 含量及化学计量比之间的相关关系。化学计量比为质量分数比,0~20 cm 土层数据由加权平均获得,数据表示均为平均值±标准差。

2　结果与分析

2.1　不同树种叶片 C、N、P 含量及其化学计量比特征

由表 2 可知,大兴安岭北部 4 种乔木叶片 TC 含量变化幅度为 455.53~487.00 g/kg,其中兴安落叶松叶片 TC 含量最低,白桦叶片最高,二者差异显著($P<0.05$)。4 种乔木叶片 TN 含量在 9.88~18.99 g/kg 范围内波动,由大到小表现为白桦、山杨、兴安落叶松和樟子松。其中,白桦叶片 TN 含量是樟子松叶片的 1.70 倍,差异极显著($P<0.01$);叶片 TP 含量为 0.81~1.43 g/kg,由大到小表现为兴安落叶松、白桦、山杨和樟子松,兴安落叶松叶片 TP 含量显著高于樟子松($P<0.05$)。总结来看,兴安落叶松叶片 TP 含量最高,TC 含量最低,樟子松叶片 TN 和 TP 含量均最低,而白桦叶片 TC 和 TN 均最高,山杨叶片 TC、TN 和 TP 含量则处于中间水平。

表 2　4 种乔木叶片 C、N、P 含量及其化学计量比

Tab. 2 The content of C, N, P and their stoichiometric ratios in the leaves of four tree species

树种 Types	全碳/(g·kg^{-1}) TC	全氮/(g·kg^{-1}) TN	全磷/(g·kg^{-1}) TP	C∶N	C∶P	N∶P
兴安落叶松林 *Larix gmelinii* forest	455.53±11.72b	14.24±1.03c	1.43±0.32a	31.69±1.55b	323.83±58.50a	10.21±1.75b
樟子松林 *Pinus sylvestris* forest	473.33±6.11ab	9.88±0.44d	0.81±0.65b	47.92±1.34a	603.86±127.52a	12.59±2.59ab
白桦林 *Betula platyphylla* forest	487.00±16.32a	18.99±0.58a	1.28±0.29ab	25.66±1.63c	390.44±69.09a	15.34±3.41ab
山杨林 *Populus davidiana* forest	458.00±7.00ab	16.76±0.85b	0.91±0.34ab	27.32±0.85c	564.16±236.27a	20.59±8.46a

注:同列不同小写字母表示不同林型间差异显著($P<0.05$);表中数据为平均数±标准差。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences between different forest types ($P<0.05$); and the data in the table are mean ± standard deviation.

不同树种叶片 C∶N 范围为 25.66~47.92,樟子松叶片 C∶N 显著高于其他 3 个树种,白桦叶片最低,而白桦和山杨叶片差异不显著($P>0.05$);4 种乔木叶片 C∶P 范围在 323.83~603.86,4 种乔木间差异并不显著;叶片 N∶P 范围在 10.21~20.59,山杨叶片 N∶P 为兴安落叶松叶片的 2.02 倍,差异显著($P<0.05$)。由此可见,兴安落叶松叶片 C∶P 和 N∶P 均最低,樟子松叶片 C∶N 和 C∶P 均最

高,白桦叶片 C∶N 最低,山杨叶片 N∶P 最高,且 4 种乔木叶片 C∶P 差异均不显著。

2.2 不同群落类型土壤 C、N、P 含量及其化学计量比特征

由表 3 可知,不同群落类型土壤 SOC 含量呈现随土层加深而逐渐减少的趋势,不同土层波动范围为 9.59~37.87 g/kg,白桦林 0~20 cm 土层 SOC 含量(26.14 g/kg)极显著高于樟子松林(14.23 g/kg)($P<0.01$)。4 种群落类型 0~20 cm 土壤 TN 含量在 0.96~1.71 g/kg 变化,其中,由大到小排序为山杨林、白桦林、兴安落叶松林和樟子松林,山杨林土壤 TN 含量在所有土层中均显著高于其他 3 种群落类型;兴安落叶松林 TP 含量随土层下降而增加,但各土层之间差异不显著,且 10~20 cm 土层 TP 含量显著高于其他 3 种群落类型。白桦林 0~20 cm 土壤 TP 含量(0.71 g/kg)为山杨林(0.32 g/kg)的 2.22 倍,差异极显著($P<0.01$)。由此可见,白桦林土壤 SOC 和 TP 含量均最高,山杨林土壤 TN 最高而 TP 最低,樟子松林土壤 SOC 和 TN 均最低,兴安落叶松林土壤 SOC 和 TP 在 0~5 cm 和 5~10 cm 含量相对较低,但 10~20 cm 含量显著高于其他群落类型。

不同群落类型土壤 C∶N 在 13.89~18.46,由大到小表现为白桦林、兴安落叶松林、樟子松林和山杨林,而樟子松林和山杨林之间差异不显著;4 种群落 0~20 cm 土壤 C∶P 在 35.43~77.19,樟子松林和白桦林差异不显著,同时,樟子松林在不同土层之间由大到小表现为 10~20、0~5、5~10 cm,其在 10~20 cm 土层 C∶P 最高,其余群落类型均为 0~5 cm 最高;各群落 N∶P 范围在 1.96~5.26,山杨林显著高于白桦林,兴安落叶松林和樟子松林为中等水平且差异不显著。樟子松林 N∶P 表现为随土层加深而升高的趋势,其余群落类型表现相反。由此可见,山杨林 C∶P 和 N∶P 均为最高,而 C∶N 最低。白桦林 C∶N 最高,N∶P 最低。樟子松林 C∶P 最低。

表 3 4 种群落土壤 C、N、P 含量及其化学计量比

Tab. 3 The content of C, N, P and their stoichiometric ratios in the soil of four communities

森林植被类型 Forest vegetation types	土层/cm Soil layer	有机碳(SOC)/(g·kg^{-1}) SOC	全氮(TN)/(g·kg^{-1}) TN	全磷(TP)/(g·kg^{-1}) TP	C∶N	C∶P	N∶P
兴安落叶松林 *Larix gmelinii* forest	0~5	30.59±1.36Ca	1.46±0.44Ca	0.50±0.63Ca	20.92±3.71Aa	60.40±8.60Ba	2.92±0.48Ba
	5~10	20.36±0.94Cb	1.27±0.65Bb	0.51±0.59Ba	16.12±1.05Bb	40.25±4.53Bb	2.51±0.43Bb
	10~20	15.49±0.88Ab	1.09±0.69Bc	0.53±0.21Aa	14.28±0.89Bb	29.66±1.50Cb	2.08±0.19Cb
	0~20	22.15±1.21C	1.26±0.67C	0.51±0.47B	17.12±2.83B	43.43±7.62B	2.52±0.35B
樟子松林 *Pinus sylvestris* forest	0~5	21.07±0.88Ba	1.23±0.51Da	0.61±0.34Ba	17.10±0.64BCa	34.28±1.79Dab	2.01±0.11Cc
	5~10	12.04±0.59Db	0.88±0.13Cb	0.35±0.16Cb	13.60±0.29Cb	33.72±1.53Cb	2.48±0.77Bb
	10~20	9.59±1.03Cc	0.79±0.58Dc	0.25±0.22Cc	12.04±0.45Cc	38.30±2.88Ba	3.18±0.35Ba
	0~20	14.23±0.97D	0.96±0.59D	0.41±0.36C	14.25±0.70C	35.43±1.99C	2.55±0.64B
白桦林 *Betula platyphylla* forest	0~5	37.87±1.20Aa	1.93±0.55Ba	0.88±0.31Aa	19.59±0.58ABa	43.25±1.69Ca	2.21±0.81Ca
	5~10	27.30±0.86Ab	1.35±0.23Bb	0.78±0.43Ab	20.23±0.66Aa	35.14±2.47BCb	1.73±0.66Cc
	10~20	14.25±0.99Bc	0.91±0.19Cc	0.48±0.19Bc	15.57±0.48Ab	29.99±0.88Cc	1.93±0.85Cb
	0~20	26.14±1.27A	1.39±0.39B	0.71±0.53A	18.46±0.59A	36.12±2.17C	1.96±0.88C
山杨林 *Populus davidiana* forest	0~5	35.54±1.67Aa	2.26±0.28Aa	0.39±0.09Da	15.74±0.27Da	90.51±2.26Aa	5.74±0.59Aa
	5~10	22.26±0.64Bb	1.64±0.79Ab	0.33±0.20Cb	13.58±0.58Cb	68.36±1.01Ab	5.03±0.27Ab
	10~20	14.74±0.96Bc	1.22±0.62Ac	0.24±0.53Cc	12.25±0.57Cc	62.72±5.18Ab	5.12±0.44Ab
	0~20	24.18±1.49B	1.71±0.77A	0.32±0.38D	13.89±0.64C	77.19±4.67A	5.26±0.62A

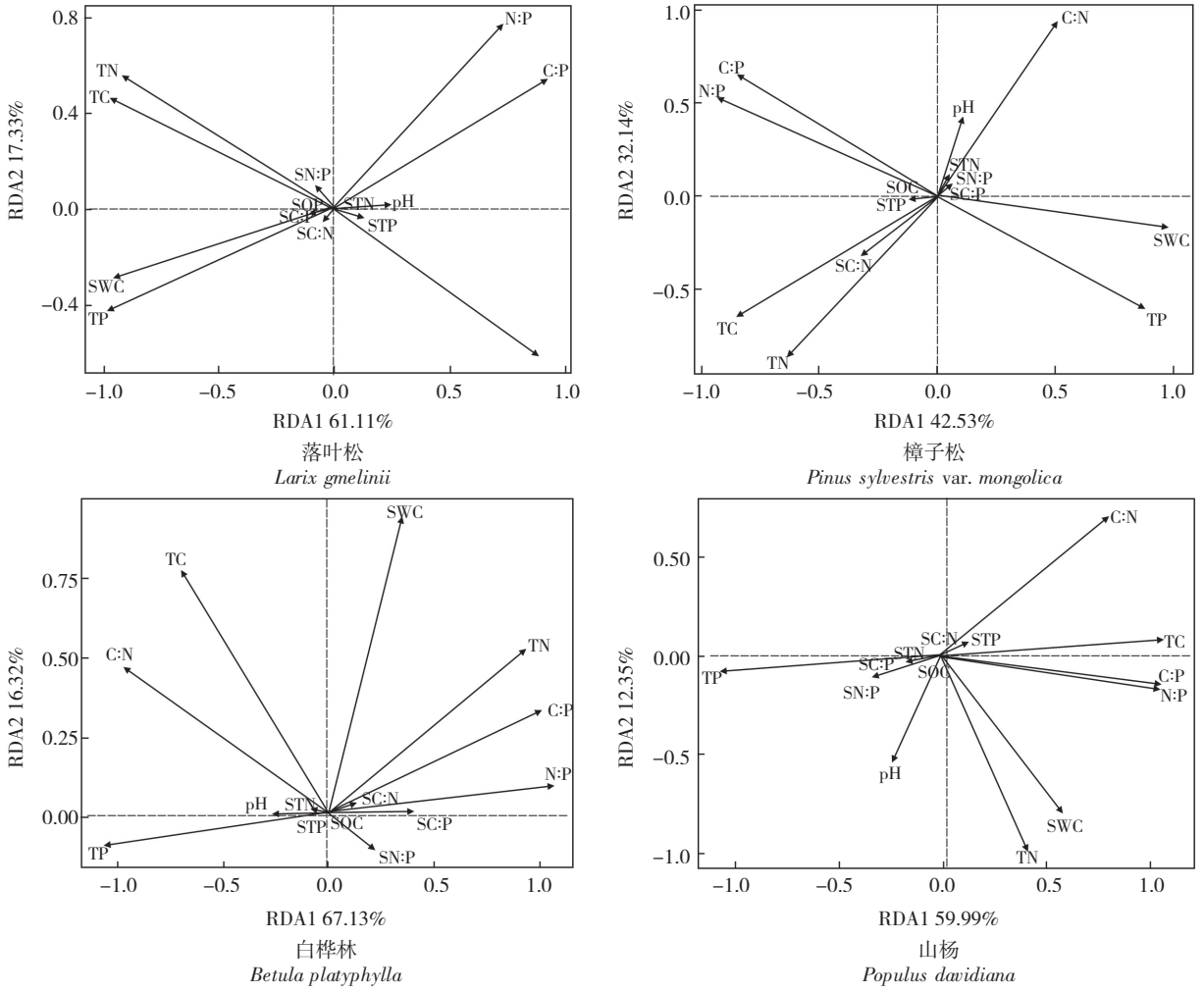
注:同列数字后不同小写字母表示同一群落类型不同土层之间差异显著($P<0.05$),不同大写字母表示不同群落类型同一土层间差异显著($P<0.05$),表中数据为平均数±标准差。

Note: Different lowercase letters after the numbers in the same column indicate significant differences between different soil layers of the same community type ($P<0.05$), and different uppercase letters indicate significant differences between different community types and the same soil layer ($P<0.05$). The data in the table are mean ± standard deviation.

2.3　叶片化学计量特征与土壤因子之间的关系

为更深入地揭示大兴安岭地区主要树种叶片化学计量特征与土壤因子之间的相互关系,本研究采用冗余分析(RDA)方法进行分析。RDA 分析能够在一张图上同时对叶片化学计量特征和土壤因子进行排序,更能直观显示二者之间的关系,二者夹角为锐角则为正相关,夹角为钝角则为负相关。锐角越小,正相关性越大。钝角越大,则负相关越大。同时,土壤因子箭头越长,说明其对叶片化学计量影响越明显。

由图 1 可知,落叶松林、樟子松林、白桦林和山杨林所测得的 0~20 cm 土壤因子分别对其叶片化学计量前两轴的总解释信息量分别为 78.44%、74.67%、83.45%和 72.34%。落叶松和樟子松叶片 TC 均与土壤 TP、C∶P 和 N∶P 显著正相关,而白桦和山杨叶片 TC 与 C∶P 和 N∶P 显著负相关。4 种乔木叶片 TN 与土壤 C∶N 和 C∶P 显著正相关。白桦叶片 TP 与 C∶N、C∶P、N∶P 显著负相关,其余 3 种乔木 TP 与 C∶N、C∶P、N∶P 呈显著正相关。落叶松和山杨叶片 C∶N、C∶P 和 N∶P 与土壤 C∶N、C∶P 和 N∶P 显著负相关。樟子松和白桦 C∶N 与土壤 C∶N、C∶P 和 N∶P 显著负相关。土壤 pH 与 4 种乔木叶片 C、N、P 大多呈显著负相关。



SOC:土壤有机碳;STN:土壤全氮;STP:土壤全磷;SC∶N:土壤碳氮比;SC∶P:土壤碳磷比;SN∶P:土壤氮磷比;SWC:土壤含水量

SOC: soil organic carbon; STN: soil total nitrogen; STP: soil total phosphorus; SC∶N: soil C:N ratio; SC∶P: soil C∶P ratio; SN∶P: soil N∶P ratio; SWC: soil moisture content

图 1　叶片化学计量特征与土壤因子的冗余分析

Fig. 1 Redundancy analysis of leaf stoichiometric traits and soil factors

3 讨论

3.1 不同乔木叶片 C、N、P 含量及化学计量特征

植物体内 C、N、P 相互耦合,共同调控植物的生长发育[21]。本研究表明,大兴安岭地区 4 种乔木叶片 C 含量(455.53~487.00 g/kg)高于我国暖温带(451 g/kg)[22]、温带(438 g/kg)[23]和热带(452.3 g/kg)[24],而叶片 TN 含量(9.88~18.99 g/kg)和 TP 含量(0.81~1.43 g/kg)均低于我国植物叶片 TN 含量均值 19.7 g/kg 和 TP 含量均值 2.0 g/kg[19]。植物养分含量及其吸收利用和效率在不同温度[25]、湿度[26]和海拔[27]条件下均表现出差异。因此,本研究 4 种乔木在大兴安岭地区独特的低温环境下,产生了与其他地区不同的养分吸收利用策略。本研究中樟子松叶片 TC 含量(473.33 g/kg)高于兴安落叶松和山杨叶片,其主要原因在于常绿树种叶片更新速度较慢,大量 C 素被光合作用所固定并积累储存在叶片中[28]。相比之下,白桦叶片 TC 含量(487 g/kg)最高,说明在大兴安岭地区,白桦叶片具有较高的 C 储能力。有研究结果表明,较高的叶片 TN 使其具有更快的光合速率,加速植物生长[29],而针叶树种与阔叶树种由于叶片结构的差异产生了不同的叶片生理功能,导致针叶树种向光合器官中分配的氮素比例较低[30],同时,常绿植物吸收的氮素大多用于构建生长所必需的结构蛋白[31],从而 N 含量由小到大表现为樟子松叶片、兴安落叶松、2 种阔叶树种。

植物 C∶N 和 C∶P 通常能表示植物对 N、P 的利用效率[32]。本研究中 4 种乔木树种 C∶N(13.89~18.46)和 C∶P(35.43~77.19)高于全球植物平均 C∶N(22.5)和 C∶P(233.2)[19],说明研究区 4 种乔木叶片具有较高的 P 利用效率,而 N 利用效率较低。由于针叶树种叶片氮素周转较阔叶树种更慢,且淋洗过程中氮素损失量更低[33],使樟子松和落叶松叶片氮利用效率显著高于山杨和白桦叶片。陆地植物在 N∶P<10 时受 N 限制,在大于 20 时受 P 限制[11],山杨叶片 N∶P 为 20.59,说明山杨生长可能受 P 素限制,然而植物叶片化学计量特征由环境与遗传因子共同决定,具有种内变异且生态策略趋异性[34],因此大兴安岭北部地区山杨生长是否受 P 素限制还需开展进一步研究。白桦叶片 C、N 最高,兴安落叶松叶片 TP 含量最高,樟子松叶片 C∶N 和 C∶P 最高,山杨叶片 N∶P 最高,这也反映了不同树种对养分分配及其利用效率存在差异[35]。

3.2 不同群落类型土壤 C、N、P 含量及化学计量特征

大兴安岭地区 4 种典型森林类型土壤 SOC 和 TN 含量均表现为随土层深度的增加而降低,而 TP 含量在不同土层间差异不明显,这是因为土壤 SOC、TN 和 TP 含量在垂直分布上主要是由于 C、N、P 来源不同所决定的。土壤 N 来源途径多样,主要包括植物凋落物归还和大气沉降补充[36-37],而 P 来源相对单一,主要由岩石风化和淋洗补充,这些过程相对困难[38]。因此,表层土壤 N 含量较高,而 P 在垂直分布中均一性较好。土壤 SOC、TN 和 TP 主要来源于凋落物分解,然后被植物吸收[39],这些元素经过淋溶后向下层土壤迁移,同时也受植物根系的吸收和利用影响[40]。依据全国第二次土壤普查养分分级标准,山杨林土壤 TN 含量处于二级水平,兴安落叶松林和白桦林属于三级,而樟子松林则属于四级。白桦林 TP 含量为三级,兴安落叶松林和樟子松林为四级,山杨林仅为五级水平。大兴安岭地区森林土壤 N 和 P 含量较低,在一定程度上影响了植物生长[41],比如 P 素缺乏可能对山杨生长产生了限制。

土壤 C、N、P 化学计量比是反映土壤养分和土壤养分有效性的关键性指标[4]。在本研究中,4 种林型土壤 C∶N 在土壤剖面中随深度增加而降低。同一土层中土壤 C∶N 值越低,意味着土壤矿化作用越快,土壤中速效氮含量也较高[42-43]。然而,这 4 种林型 C∶N 均高于中国土壤 C∶N 的平均值(11.9)[44],这可能是由于本研究位于大兴安岭北部,冬季漫长而寒冷,导致凋落物分解速率相对较慢,归还土壤的 N 素量相对较低[45]。土壤 C∶P 会显著影响到土壤微生物的 C 和 P,当 C∶P>200 时微生物进行磷净固持,当 C∶P<200 时进行磷净矿化[46]。此外,土壤 C∶P 也可以表示土壤磷的有效性,二者之间呈负相关[42]。兴安落叶松林、白桦林和樟子松林土壤 C∶P 均低于我国平均值 61[44],而山杨林高于平均值,这表明山杨林土壤磷有效性相对较低,可能受 P 素限制。作为诊断土壤氮磷养分限制饱和度的指标,土壤 N∶P 能够反映植物生长过程中土壤养分的供给情况[16],本研究中,山杨土壤 N∶P(5.26)显著高于其余 3 种群落类型(1.96~2.55),同时高于我国平均值 5.1[44],并且其 N 含量在 4 个群落类型中最高,说明土壤磷元素可能是山杨生长的一个重要限制因素,即土壤中 N 素有效性较高,而磷素的有效性不足以与之平衡,因此会影

响树木生长发育和生理功能[47]。

3.3　叶片化学计量与土壤因子之间的关系

大兴安岭北部 4 种群落类型土壤 C、N、P 对叶片化学计量特征变化的贡献较低,说明在植物生长过程中 C、N、P 之间相互耦合,共同影响植物发育[48]。土壤因子中土壤含水对叶片化学计量特征变化的贡献最大,落叶松林和樟子松林土壤含水与叶片 TP 呈正相关,与叶片 C∶P 和 N∶P 显著负相关,这是由于土壤水分通过影响土壤微生物[49-50]的活性与种类进而间接影响植物对磷素的吸收和利用。土壤 pH 上升,硝化细菌活性被抑制,矿化氮有向氨化转变的趋势,从而提高植物氮利用效率[51],使落叶松林和樟子松林土壤 pH 与叶片 C∶N 正相关。樟子松林土壤 C∶N 与叶片 C∶N 正相关,白桦林土壤 C∶N 和 C∶P 均与叶片 C∶P 呈正相关,这与部分研究中,在养分匮乏的环境下,植物的养分利用效率较高的观点一致[52]。而樟子松林和白桦林土壤 C∶N 与叶片 C∶N 负相关,这可能是由于土壤中氮含量超过植物的最大吸收量,氮含量下降会对植物生长发育产生负面影响[53]。

4　结论

本研究深入分析了大兴安岭北部 4 种乔木叶片和土壤生态化学计量特征,结果表明,4 种乔木叶片 C∶N>25,兴安落叶松叶片显著高于其他 3 个树种,白桦叶片最低,叶片 C∶P>600,但 4 种乔木间差异不显著,叶片 N∶P 在 10.21~20.59,兴安落叶松最低,山杨叶片 N∶P 最高,且>20,表明其生长可能受到磷限制。4 种林型土壤 C∶N 均高于我国土壤 C∶N 的平均值(11.9)。兴安落叶松林、白桦林和樟子松林土壤 C∶P 均低于我国平均值(61),而山杨林高于平均值。同时山杨土壤 N∶P(5.26)显著高于其余 3 种群落类型(1.96~2.55),说明土壤磷元素可能是山杨生长一个重要的限制因素。樟子松林土壤 C∶N 与叶片 C∶N 正相关,白桦林土壤 C∶N 和 C∶P 均与叶片 C∶P 呈正相关,樟子松林和白桦林土壤 C∶N 与叶片 C∶N 负相关,说明植物养分利用效率主要受土壤中养分含量所影响,且不同植物对环境会作出相应的适应策略。

【参　考　文　献】

[1] 张继辉,蔡道雄,卢立华,等. 不同林龄柚木人工林土壤生态化学计量特征[J]. 生态学报,2020,40(16):5718-5728.
ZHANG J H, CAI D X, LU L H, et al. Soil ecological stoichiometry of different aged Teak (*Tectona grandis*) plantations[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(16): 5718-5728.

[2] 拓卫卫,范家伟,周雅洁,等. 毛乌素沙地樟子松林植物-土壤生态化学计量特征演变关系[J]. 水土保持研究,2023,30(6):177-186.
TUO W W, FAN J W, ZHOU Y J, et al. Evolutionary relationship of ecological stoichiometric characteristics between soil and plant of *Pinus sylvestris* forest in Mu Us sandy land[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(6): 177-186.

[3] 周念清,吴延浩,蔡奕,等. 湿地关键带中磷与氮、碳循环联动耦合机制[J]. 地球科学与环境学报,2022,44(1):91-101.
ZHOU N Q, WU Y H, CAI Y, et al. Coupling mechanism of phosphorus and nitrogen, carbon cycles in critical zone of wetland[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2022, 44(1): 91-101.

[4] 孙连伟,陈静文,邓琦. 全球变化背景下陆地植物 N/P 生态化学计量学研究进展[J]. 热带亚热带植物学报,2019,27(5):534-540.
SUN L W, CHEN J W, DENG Q. Research progress of terrestrial plants N/P ecological stoichiometry under global change[J]. Journal of Tropical and Subtropical Botany, 2019, 27(5): 534-540.

[5] LIU J, FANG L C, QIU T Y, et al. Disconnection between plant-microbial nutrient limitation across forest biomes[J]. Functional Ecology, 2023, 37(8): 2271-2281.

[6] HE Y Q, ZHANG Q C, JIANG C Y, et al. Mixed planting improves soil aggregate stability and aggregate-associated C-N-P accumulation in subtropical China[J]. Frontiers in Forests and Global Change, 2023, 6: 1141953.

[7] LI J N, NIU X M, WANG P, et al. Soil degradation regulates the effects of litter decomposition on soil microbial nutrient limitation: evidence from soil enzymatic activity and stoichiometry[J]. Frontiers in Plant Science, 2023, 13: 1090954.

[8] QIU L J, LI Y J, ZHONG Q, et al. Adaptation mechanisms of the soil microbial community under stoichiometric imbalances and nutrient-limiting conditions in a subtropical nitrogen-saturated forest[J]. Plant and Soil, 2023, 489(1): 239-258.

[9] 俞月凤,彭晚霞,宋同清,等. 喀斯特峰丛洼地不同森林类型植物和土壤 C、N、P 化学计量特征[J]. 应用生报,2014,25(4):947-954.
YU Y F, PENG W X, SONG T Q, et al. Stoichiometric characteristics of plant and soil C, N and P in different forest types in depressions between Karst hills, southwest

China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(4): 947-954.

[10] JIANG J, WANG Y P, YANG Y H, et al. Interactive effects of nitrogen and phosphorus additions on plant growth vary with ecosystem type[J]. Plant and Soil, 2019, 440(1): 523-537.

[11] 郁国梁,王军强,马紫荆,等. 博斯腾湖湖滨湿地优势植物叶片碳、氮、磷化学计量特征的季节动态及其影响因子[J]. 植物资源与环境学报,2022,31(5):9-18.
YU G L, WANG J Q, MA Z J, et al. Seasonal dynamics of carbon, nitrogen, and phosphorus stoichiometric characteristics of leaves of dominant plants in the lakeside wetland of Bosten Lake and their influencing factors[J]. Journal of Plant Resources and Environment, 2022, 31(5): 9-18.

[12] 冀盼盼,张健飞,张玉珍,等. 不同林龄华北落叶松人工林生态化学计量特征[J]. 南京林业大学学报(自然版),2020,44(3):126-132.
JI P P, ZHANG J F, ZHANG Y Z, et al. Ecological stoichiometry characteristics of *Larix principis-rupprechtii* plantations at different ages[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2020, 44(3): 126-132.

[13] 宋语涵,张鹏,金光泽. 阔叶红松林不同演替阶段灌木叶片碳氮磷化学计量特征及其影响因素[J]. 植物生报,2021,45(9):952-960.
SONG Y H, ZHANG P, JIN G Z. Characteristics of shrub leaf carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometry and influencing factors in mixed broadleaved-Korean pine forests at different successional stages[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2021, 45(9): 952-960.

[14] 李红琴,张法伟,仪律北. 高寒草甸表层土壤和优势植物叶片的化学计量特征对降水改变和氮添加的响应[J]. 报,2023,47(7):922-931.
LI H Q, ZHANG F W, YI L B. Stoichiometric responses in topsoil and leaf of dominant species to precipitation change and nitrogen addition in an alpine meadow[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2023, 47(7): 922-931.

[15] 张萍,章广琦,赵一娉,等. 黄土丘陵区不同森林类型叶片-凋落物-土壤生态化学计量特征[J]. 生态学报,2018,38(14):5087-5098.
ZHANG P, ZHANG G Q, ZHAO Y P, et al. Ecological stoichiometry characteristics of leaf-litter-soil interactions in different forest types in the loess hilly-gully region of China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(14): 5087-5098.

[16] 王振宇,王涛,邹秉章,等. 不同生长阶段杉木人工林土壤C∶N∶P化学计量特征与养分动态[J]. 应用生报,2020,31(11):3597-3604.
WANG Z Y, WANG T, ZOU B Z, et al. Soil C: N: P stoichiometry and nutrient dynamics in *Cunninghamia lanceolata* plantations during different growth stages[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(11): 3597-3604.

[17] GÜSEWELL S, KOERSELMAN W, VERHOEVEN J T A. Biomass N:P ratios as indicators of nutrient limitation for plant populations in wetlands[J]. Ecological Applications, 2003, 13(2): 372-384.

[18] CAMENZIND T, HATTENSCHWILER S, TRESEDER K K, et al. Nutrient limitation of soil microbial processes in tropical forests[J]. Ecological Monographs, 2018, 88(1): 4-21.

[19] EOSTERTAG R, DIMANNO N M. Detecting terrestrial nutrient limitation: a global meta-analysis of foliar nutrient concentrations after fertilization[J]. Frontiers in Earth Science, 2016, 4: 23.

[20] ABIS L, LOUBET B, CIURARU R, et al. Reduced microbial diversity induces larger volatile organic compound emissions from soils[J]. Scientific Reports, 2020, 10(1): 6104.

[21] ZHANG W, LIU W C, XU M P, et al. Response of forest growth to C: N: P stoichiometry in plants and soils during *Robinia pseudoacacia* afforestation on the Loess Plateau, China[J]. Geoderma, 2019, 337: 280-289.

[22] 韩文轩,吴漪,汤璐瑛,等. 北京及周边地区植物叶的碳氮磷元素计量特征[J]. 北京大学学报(自然科学版),2009,45(5):855-860.
HAN W X, WU Y, TANG L Y, et al. Leaf carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometry across plant species in Beijing and its periphery[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2009, 45(5): 855-860.

[23] 郑淑霞,上官周平. 黄土高原地区植物叶片养分组成的空间分布格局[J]. 自然科学进展,2006,16(8):965-973.
ZHENG S X, SHANGGUAN Z P. The spatial distribution pattern of nutrient composition in plant leaves in the Loess Plateau region[J]. Progress in Natural Science, 2006, 16(8): 965-973.

[24] 张亚兴,朱丽薇,刘楠. 海南不同生活型植物叶片和根系C、N、P化学计量特征[J]. 热带亚热带植物学报,2020,28(2):131-135.
ZHANG Y X, ZHU L W, LIU N. C, N, and P concentrations and their stoichiometry of leaves and roots with different life forms in Hainan Province[J]. Journal of Tropical and Subtropical Botany, 2020, 28(2): 131-135.

[25] 胡星,刘庆,赵春章,等. 不同增温模式对西南亚高山针叶林云杉养分及其化学计量特征的影响[J/OL]. 应用与环境生物学报,2023:1-12.

HU X, LIU Q, ZHAO C Z, et al. Effects of different warming patterns on nutrients and stoichiometric characteristics of *Spruce* in alpine coniferous forests of Southwest Asia[J/OL]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2023:1-12.

[26] 卢同平,王艳飞,王黎明,等. 西双版纳热带雨林土壤与叶片生态化学计量特征的干湿度效应[J]. 生态学报,2018,38(7):2333-2343.
LU T P, WANG Y F, WANG L M, et al. Effect of the humidity/aridity gradient on the ecological stoichiometry of soil and leaves in Xishuangbanna tropical rainforest [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(7): 2333-2343.

[27] 吴欣阳,邵静,陈晓萍,等. 武夷山不同海拔阔叶树叶片养分含量及再吸收效率[J]. 应用生态学报,2023,34(9):2305-2313.
WU X Y, SHAO J, CHEN X P, et al. Nutrient content and resorption efficiency of leaves of broad-leaved trees along altitudes in Wuyi Mountains, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2023, 34(9): 2305-2313.

[28] 蔡艳,张毅,刘辉,等. 峨眉山常绿阔叶林常绿和落叶物种叶片 C、N、P 研究[J]. 浙江林业科技,2009,29(3):9-13.
CAI Y, ZHANG Y, LIU H, et al. Study on C, N, P content in leaf of evergreen and deciduous trees in evergreen broad-leaved forest at E´mei Mountain[J]. Journal of Zhejiang Forestry Science and Technology, 2009, 29(3): 9-13.

[29] 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.
HU Q W, NIE L Q, ZHENG Y M, et al. Effects of desertification intensity and stand age on leaf and soil carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometry in *Pinus elliottii* plantation[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(9): 2246-2255.

[30] BYTNEROWICZ T A, FUNK J L, MENGE D N L, et al. Leaf nitrogen affects photosynthesis and water use efficiency similarly in nitrogen-fixing and non-fixing trees [J]. Journal of Ecology, 2023, 111(11): 2457-2471.

[31] LI R S, YU D, ZHANG Y K, et al. Investment of needle nitrogen to photosynthesis controls the nonlinear productivity response of young Chinese fir trees to nitrogen deposition[J]. The Science of the Total Environment, 2022, 840: 156537.

[32] 李鸿博,陈诗,黄耀华,等. 横断山脉亚高山带高山栎叶片生态化学计量及内稳性特征[J]. 植物研究,2023,43(6):923-931.
LI H B, CHEN S, HUANG Y H, et al. Ecological stoichiometry and homeostasis of alpine *Quercus semicarpifolia* leaves in subalpine zone of Hengduan Mountains[J]. Bulletin of Botanical Research, 2023, 43(6): 923-931.

[33] GURMESA G A, ZHANG S S, WANG A, et al. Within-site difference in nitrogen status between mixed forests and larch plantations: evidence from multiple indicators [J]. Ecosphere, 2023, 14(1): e4358.

[34] XU R, CHENG S D, ZHOU J, et al. Intraspecific variations in leaf functional traits of *Cunninghamia lanceolata* provenances[J]. BMC Plant Biology, 2023, 23(1): 92.

[35] 张楠,杨智杰,胥超,等. 中亚热带森林转换对凋落物养分归还及养分利用效率的影响[J]. 应用生态学报,2022,33(2):321-328.
ZHANG N, YANG Z J, XU C, et al. Effects of forest conversion on litterfall nutrient return and nutrient use efficiency in Mid-subtropical China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, 33(2): 321-328.

[36] 陈立新,姜一,段文标,等. 红松混交林凋落物氮储量及分解释放对土壤氮的影响[J]. 生态学杂志,2015,34(1):114-121.
CHEN L X, JIANG Y, DUAN W B, et al. Effect of litter nitrogen storage and nitrogen release of litter decomposition on soil nitrogen in *Pinus koraiensis* mixed forests[J]. Chinese Journal of Ecology, 2015, 34(1): 114-121.

[37] DUAN L, CHEN X, MA X X, et al. Atmospheric S and N deposition relates to increasing riverine transport of S and N in southwest China: implications for soil acidification[J]. Environmental Pollution, 2016, 218: 1191-1199.

[38] HERRERA D, MYLAVARAPU R S, HARRIS W G, et al. Soil phosphorus sources and their relative water solubility and extractability[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2022, 53(12): 1445-1455.

[39] 刘姝萱,安慧,张馨文,等. 氮磷添加对荒漠草原植物-凋落物-土壤生态化学计量特征的影响[J]. 生态学报,2022,42(21):8773-8783.
LIU S X, AN H, ZHANG X W, et al. Effects of nitrogen and phosphorus addition on the ecological stoichiometry of plant-litter-soil in desert grassland[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(21): 8773-8783.

[40] 张英鹏,孙明,李彦,等. 根系调控对设施西葫芦产量、品质及土壤氮磷淋溶损失的影响[J]. 山东农业科学,2020,52(11):90-94.
ZHANG Y P, SUN M, LI Y, et al. Effects of different root regulation on yield and quality of summer squash and soil nitrogen and phosphorus leaching loss in greenhouse [J]. Shandong Agricultural Sciences, 2020, 52(11): 90-94.

[41] 林秋燕,钟全林,李宝银,等. 氮磷添加对刨花楠幼林

生长与叶性状及土壤养分关系影响[J/OL]. 应用与环境生物学报,2023:1-13.
LIN Q Y, ZHONG Q L, LI B Y, et al. Effect of nitrogen and phosphorus addition on the relationship between leaf traits-soil nutrients and the growth of *Machilus pauhoi* young plantation[J/OL]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2023:1-13.

[42] 曹娟,闫文德,项文化,等. 湖南会同3个林龄杉木人工林土壤碳、氮、磷化学计量特征[J]. 林业科学,2015,51(7):1-8.
CAO J, YAN W D, XIANG W H, et al. Stoichiometry characterization of soil C, N, and P of Chinese fir plantations at three different ages in Huitong, Hunan Province, China[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2015, 51(7): 1-8.

[43] 周士锋,赵敏娟. 粗枝云杉根系及树冠中的碳氮磷化学计量特征研究[J]. 西部林业科学,2022,51(1):42-48.
ZHOU S F, ZHAO M J. Stoichiometric characteristics of carbon, nitrogen and phosphorus in different root and crown of *Picea crassifolia*[J]. Journal of West China Forestry Science, 2022, 51(1): 42-48.

[44] 刘婕,勾晓华,刘建国,等. 甘南黄河流域4种典型林分土壤C、N、P化学计量特征[J]. 生态学报,2023,43(13):5627-5637.
LIU J, GOU X H, LIU J G, et al. The stoichiometric characteristics of soil C, N and P in four typical forest stands in the Yellow River Basin in Gannan[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(13): 5627-5637.

[45] 梁蕾,马秀枝,韩晓荣,等. 模拟增温下凋落物对大青山油松人工林土壤温室气体通量的影响[J]. 生态环报,2022,31(3):478-486.
LIANG L, MA X Z, HAN X R, et al. Effects of litter on soil greenhouse gas flux of *Pinus tabulaeformis* plantation in Daqing Mountain under simulated warming[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2022, 31(3): 478-486.

[46] 何高迅,王越,彭淑娴,等. 滇中退化山地不同植被恢复下土壤碳氮磷储量与生态化学计量特征[J]. 生态报,2020,40(13):4425-4435.
HE G X, WANG Y, PENG S X, et al. Soil carbon, nitrogen and phosphorus stocks and ecological stoichiometry characteristics of different vegetation restorations in degraded mountainous area of central Yunnan, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(13): 4425-4435.

[47] ZHAO C T, LIN Q H, TIAN D, et al. Nitrogen addition promotes conservative resource-use strategies via aggravating phosphorus limitation of evergreen trees in subtropical forest[J]. The Science of the Total Environment, 2023, 889: 164047.

[48] MA X M, ZHOU Z, CHEN J, et al. Long-term nitrogen and phosphorus fertilization reveals that phosphorus limitation shapes the microbial community composition and functions in tropical montane forest soil[J]. The Science of the Total Environment, 2023, 854: 158709.

[49] 张静,温仲明,李鸣雷,等. 外来物种刺槐对土壤微生物功能多样性的影响[J]. 生态学报,2018,38(14):4964-4974.
ZHANG J, WEN Z M, LI M L, et al. Effects of the exotic black locust on the functional diversity of soil microorganisms[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(14): 4964-4974.

[50] 王泽西,陈倩妹,黄尤优,等. 川西亚高山森林土壤呼吸和微生物生物量碳氮对施氮的响应[J]. 生态学报,2019,39(19):7197-7207.
WANG Z X, CHEN Q M, HUANG Y Y, et al. Response of soil respiration and microbial biomass carbon and nitrogen to nitrogen application in subalpine forests of western Sichuan[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(19): 7197-7207.

[51] 杨楚童,邹显花,孙雪莲,等. 不同磷利用效率杉木在低磷胁迫下的形态及养分分配差异[J]. 西北林学院报,2021,36(4):94-102.
YANG C T, ZOU X H, SUN X L, et al. Differences in morphology and nutrient distribution of Chinese fir with different phosphorus use efficiency under low phosphorus stress[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2021, 36(4): 94-102.

[52] 雷泽勇,白津宁,周凤艳,等. 辽宁章古台地区不同年龄樟子松固沙林对土壤pH值的影响[J]. 生态学杂志,2019,38(11):3264-3272.
LEI Z Y, BAI J N, ZHOU F Y, et al. Effects of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* sand-fixation plantations with different ages on soil pH in Zhanggutai, Liaoning Province[J]. Chinese Journal of Ecology, 2019, 38(11): 3264-3272.

[53] 刘俊英,回金峰,孙梦瑶,等. 施磷水平和接种AMF与解磷细菌对苜蓿产量及磷素利用效率的影响[J]. 农报,2020,36(19):142-149.
LIU J Y, HUI J F, SUN M Y, et al. Effects of phosphorus application and inoculation arbuscular mycorrhizae fungi(AMF) and phosphate solubilizing bacteria on dry matter yield and phosphorus use efficiency of alfalfa[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(19): 142-149.