

doi:10.3969/j.issn.1006-8023.2024.01.002

## 磷肥对马尾松苗木根系及针叶内氮、磷、钾 生化计量特征的影响

周玮,王艺,苏春花

(贵州民族大学 生态环境工程学院, 贵阳 550025)

**摘要:**了解马尾松根系及针叶中的氮(N)、磷(P)、钾(K)生化计量特征,判断其养分的限制性及利用情况,为马尾松苗木培育过程中的施肥管理提供技术支持。采用马尾松苗木的施肥试验,使用的磷肥是钙镁磷肥(P有效率为14%)0、50、100、200 g/株(P1、P2、P3、P4)4个水平。分析磷肥对1年生马尾松苗木根系及针叶在不同季节的N、P、K质量分数的影响。结果表明,不同磷肥施用量对马尾松N、P、K及其计量特征影响不显著( $P>0.05$ ),不同季节的影响显著( $P<0.05$ )。施肥后次年春季针叶在P2处理下N:P=17.2,结果大于16,其余处理马尾松根系及针叶均N:P<14,后期(冬季、次年春季)施磷肥针叶N:P高于对照。N:K为2.83~29.30,均大于2.1,P:K为0.68~3.82,K:P均小于3.4,P2处理马尾松根系及针叶N:K小于对照,P3、P4处理针叶N:K均大于对照。不同处理表现出马尾松生长过程受N、K元素限制,施磷肥后由于磷素质量分数增加而加剧了N、K元素的限制,特别是高质量分数磷肥施用(P3、P4)。研究显示,大量的磷素添加(P3、P4)加剧马尾松生长中N、K元素的限制,马尾松苗木培育中N、P、K按照适合比例配合施用更能促进苗木生长,不同器官N、P、K计量特征对马尾松生长的限制性标准仍需进一步研究。

**关键词:**生化计量特征;根系;针叶;马尾松;磷肥

**中图分类号:**S723.7

**文献标识码:**A

**文章编号:**1006-8023(2024)01-0009-08

## Effect of Phosphate Fertilizer on N, P and K Ecological Stoichiometry of Roots and Needles of *Pinus massonana* Seedlings

ZHOU Wei, WANG Yi, SU Chunhua

(College of Eco-Environmental Engineering, Guizhou Minzu University, Guiyang 550025, China)

**Abstract:** In order to comprehend the root and needle N, P and K biochemical stoichiometry characteristics of *Pinus massonana*, judge its nutrient restriction and utilization, this results provide technical support for fertilization management in the process of *P. massonana* seedling cultivation. The fertilization experiment of *P. massonana* seedlings was carried out to analyze the effect of P fertilizer on the N, P and K mass fractions of roots and needles of one-year-old *P. massonana* seedlings in different seasons. The phosphorus fertilizer used calcium magnesium phosphorus fertilizer (P has an effective rate of 14%). Four levels of 0, 50, 100 and 200 (P1, P2, P3, P4) was designed in this experiment. The results showed that the content of N, P, K and their ecological stoichiometry were not significantly affected by different P application ( $P>0.05$ ), but it was significantly different in different seasons ( $P<0.05$ ). In the spring of the following year after fertilization, under P2 treatment N:P=17.2, which was greater than 16. The roots and needles of *P. massoniana* in other treatments had N:P<14, and the needles were treated with P fertilizer in the later stage (winter, spring of the following year) with N:P higher than the CK. The ratio of N:K was 2.83-29.30, both greater than 2.1, the ratio of P:K was 0.68-3.82 and K:P was less than 3.4. The ratio of N:K of roots and needles of *P. massoniana* in P2 treatment was less than the CK, and the ratio of N:K of needles in P3 and P4 treatments was higher than the CK. Different treatments showed that the growth process of *P. massonana* was limited by N and K elements, and the restriction of N and K elements was aggravated by the increase of P concentration after applying P fertilizer, especially when applying high concentration P fertilizer (P3, P4). The results of this study showed that a large amount of phosphorus (P3, P4) increased the restriction of N and K elements in the growth of *P. massonana*. In the cultivation of *P. massonana* seedlings, N, P, and K can be applied in a suitable proportion to promote seedling growth. Further research is needed on the limiting standards of N, P, and K measurement characteristics of different organs on the growth of *P. massonana*.

**Keywords:** Ecological stoichiometry; root; needles; *Pinus massonana*; P fertilizer

**收稿日期:**2023-03-08

**基金项目:**贵州省科技厅基础研究项目[黔科合基础[2018]1072];贵州省教育厅成长人才项目(黔教合KY字[2018]136);贵州省省级科技计划项目(ZK[2022]一般207);国家自然科学基金(31860178)。

**第一作者简介:**周玮,博士,副教授。研究方向为森林土壤和土壤营养。E-mail: 605466767@qq.com

**引文格式:**周玮,王艺,苏春花. 磷肥对马尾松苗木根系及针叶内氮、磷、钾生化计量特征的影响[J]. 森林工程, 2024, 40(1):9-16.

ZHOU W, WANG Y, SU C H. Effect of phosphate fertilizer on N, P and K ecological stoichiometry of roots and needles of *Pinus massonana* seedlings[J]. Forest Engineering, 2024, 40(1):9-16.

## 0 引言

氮(N)、磷(P)、钾(K)是植物生长发育的必需营养元素,植物对N、P、K的吸收具有一定的比例组成及协调关系<sup>[1]</sup>,其生态化学计量特征可以反映各营养元素在植物体内的分配状况及相互作用,对判断养分的限制性及利用情况具有重要作用<sup>[2-3]</sup>。不同器官中N、P、K的质量分数反映植物的生理活动和对不同环境的适应能力,植物的不同器官具有不同的生态化学计量特征,对环境变化的响应也不同<sup>[4]</sup>。植物叶片的N:P可以作为判断土壤对植物生长的养分供应状况的指标<sup>[5]</sup>,可表征植物生长过程中受N或P的限制作用情况<sup>[6]</sup>。马尾松林的针叶、根系和土壤养分之间的关系中,根系与土壤养分之间关系更为密切<sup>[7]</sup>,因为根系是植物吸收水分及养分的主要通道,为保证针叶具有较高的光合作用,根系会转运较多的N和P养分到针叶当中<sup>[8]</sup>。因此,植物根系及叶片生化计量特征是研究植物生长速度、植物氮和磷的利用效率的有效方法<sup>[9]</sup>。

马尾松耐干旱贫瘠,适应性较强,是我国南方的主要造林树种。研究表明<sup>[10-13]</sup>,马尾松生长的酸性土壤磷素有效性低,施磷肥对马尾松林及马尾松苗木均表现出促进作用。而施磷肥后马尾松对养分元素的吸收、分配情况,马尾松体内不同器官营养元素的重分配及相互作用情况,马尾松N、P、K元素的供应及协调作用,以上这些目前为止没有研究。植物的N、P、K的计量特征是研究元素间相互作用及协调关系的有效方法。已有研究表明,养分

增加情况下,植物体内的生化计量特征表现情况不一致,有正面<sup>[14]</sup>、中立<sup>[15]</sup>及负面响应<sup>[16]</sup>。因此,通过分析不同磷肥施用量对1年生马尾松苗根系及针叶内N、P、K及生化计量特征的影响,探讨增加土壤中磷元素质量分数后马尾松N、P、K元素供应状况及协调作用关系,为马尾松施肥及人工林培育提供理论基础及技术指导。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 试验设计

2016年12月在温室大棚内设置试验样地,将大棚内土壤混匀,用体积分数为5%甲醛溶液进行消毒,消毒后设计苗床,苗床规格为200 cm(长)×80 cm(宽)×30 cm(高),苗床间步道宽40 cm。设计磷肥4个不同水平的随机区组试验,将每个苗床用塑料薄膜分为4块(每1块为1个处理),每个处理3个重复,共3个苗床。2017年1月在苗床进行1年生苗木移栽(1年生苗木为凯里种苗园苗木),每个小区内种植苗木15株,选择生长均匀的马尾松苗,苗高20~30 cm,地径0.5~0.6 mm。按时进行浇水、除草等管理。待苗木成活并经过2个月缓苗期后进行施肥处理,分别施用不同量的P肥,试验所需磷肥为钙镁磷肥(P有效率为14%)0、50、100、200 g/株(P1、P2、P3、P4)4个水平,4个小区分别为4个不同的施肥量,施肥量根据前期的研究结果进行设定,每个处理3个重复。在上述设计好的苗床上取土,分析土壤基本性质,以便了解供试土壤的基本情况,具体土壤性质见表1。

表1 土壤基本性质

Tab. 1 Soil base character

pH	全氮(TN)/ (g·kg <sup>-1</sup> ) Total nitrogen (TN)	全磷(TP)/ (g·kg <sup>-1</sup> ) Total phosphorus (TP)	全钾(TK)/ (g·kg <sup>-1</sup> ) Total potassium (TK)	有机质(SOM)/ (g·kg <sup>-1</sup> ) Soil organic matter (SOM)	碱解氮(AN)/ (mg·kg <sup>-1</sup> ) Alkali hydrolyzed nitrogen (AN)	速效磷(AP)/ (mg·kg <sup>-1</sup> ) Available phosphorus (AP)	速效钾(AK)/ (mg·kg <sup>-1</sup> ) Available potassium (AK)
6.03±0.06	1.01±0.01	0.41±0.29	14.91±1.86	2.34±0.45	14.81±7.94	3.31±2.8	34.49±11.36

### 1.2 试验材料

按试验设计对苗木进行施肥处理后,用挖掘法每月取出整株苗木,分别于5—7月(夏季)、8—10月(秋季)、11至次年1月(冬季)及次年2—4月(春季)取出整株苗木,将根系冲洗干净后分别剪取苗木根系及针叶,将针叶置于105℃烘箱中杀青0.5 h后于85℃温度下烘干至恒重,苗木根系直接置于85℃烘箱中烘干至恒重,粉碎后将连续3个月

取出的苗木针叶及根系混匀,作一个季节马尾松样品,而后分析其全N、全P与全K质量分数。

### 1.3 实验方法

针叶及根系全N采用三酸消解-全自动定氮仪测定法(全自动凯氏定氮仪,UPT-K1600系列),全P采用三酸消解-钼锑抗比色法(7200型可见分光光度计),全K采用三酸消解-火焰光度计法(火焰分光光度计,FP6410型)。

土壤全 N 质量分数采用浓  $H_2SO_4-HClO_4$  消解-全自动定氮仪测定法(全自动凯氏定氮仪, UPT-K1600 系列), 碱解氮采用扩散法, 全 P 测定采用浓  $H_2SO_4-HClO_4$  消解-钼锑抗比色法(7200 型可见分光光度计), 速效磷采用  $H_2SO_4-HF$  浸提-钼锑抗比色法(7200 型可见分光光度计), 全 K 测定采用浓  $H_2SO_4-HF$  消解-火焰光度计法(火焰分光光度计, FP6410 型), 速效钾采用  $NH_4CHO_3$  浸提-火焰光度计法(火焰分光光度计, FP6410 型), pH 采用电位法(PHS-3C 型 pH 计), 有机质采用浓  $H_2SO_4-K_2CrO_4$  外加热法。

#### 1.4 数据处理

应用 Microsoft office 2019 进行分析数据整理及作图, 用 SPSS 19.0 对数据进行统计分析。用主体间效应的检验(Tests of Between-Subjects Effects)方差分析及多重比较法(Fisher's least significant difference, LSD)进行马尾松不同磷肥处理及不同季节马尾松 N、P、K 质量分数及其生化计量特征分析(0.05 水平下显著性检验), 用 Person 相关分析法分析马尾松根系及针叶间 N、P、K 质量分数及其生化计量特征的相关关系(0.05 显著水及 0.01 极显著水平)。

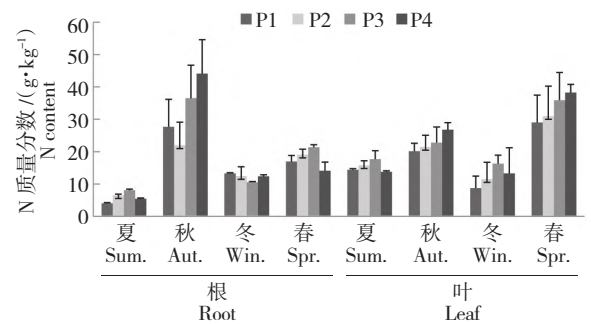
## 2 结果与分析

### 2.1 马尾松根系及针叶内的 N、P、K 质量分数的季节动态

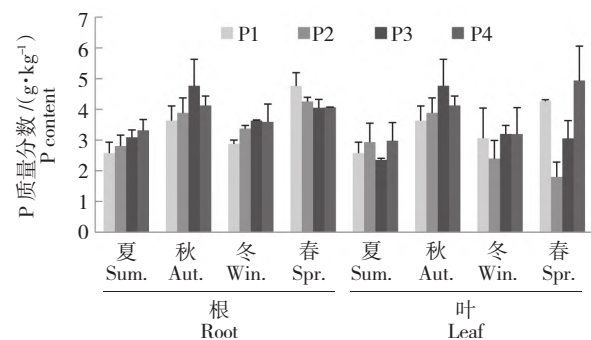
通过表 2 方差分析可知, 不同磷肥施用量对马尾松根系及针叶内 N、P、K 质量分数影响不显著( $P > 0.05$ ), 不同季节施磷肥后马尾松根系 N、P、K 质量分数以及针叶内 K 质量分数差异显著( $P < 0.05$ ), 磷肥及季节相互作用对马尾松根系及针叶 N、P、K 质量分数影响均不显著( $P > 0.05$ )。图 1 为马尾松根系及针 N、P、K 质量分数随季节变化图, 由图 1 可知, 随着磷肥施用量增加, 马尾松针叶秋季及春季表现为 N 质量分数逐渐增加, 夏季及冬季表现为先增加, 在 P4 处理时有下降的趋势。除冬季和秋季外, 针叶 N 质量分数均高于根系, 施磷肥处理针叶 N 质量分数高于对照(P1)。施磷肥后冬季马尾松根系 N 质量分数低于对照, 其余季节除秋季的 P2 处理及春季的 P4 处理低于对照外, 表现出施磷肥马尾松根系 N 素质量分数高于对照。

随着磷肥施用量的增加, 根系及针叶内 P、K 质

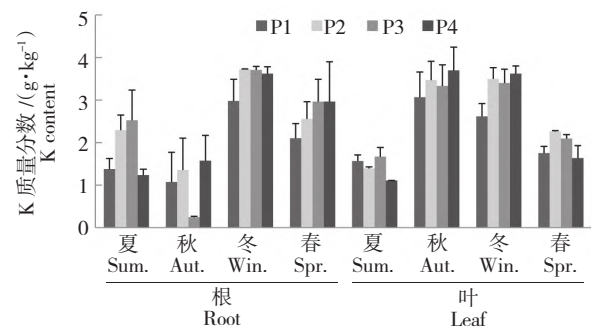
量分数表现出明显的变化趋势。秋季、春季根系 P 质量分数显著高于夏季及冬季。夏季针叶 P 质量分数显著低于其他季节( $P < 0.05$ ), 秋季针叶 P 质量分数最高, 到冬季又降低, 春季 P1 及 P4 处理又升高, P2、P3 处理仍保持下降趋势。除春季 P4 处理下针叶 P 质量分数高于根系, 其余各处理在相同季节均表现为根系 P 质量分数高于针叶。夏季、秋季及冬季表现出施磷肥处理根系 P 质量分数高于对照, 春季则施磷肥根系 P 质量分数低于对照。施磷肥处理在针叶未表现出明显的优势。



(a) N 质量分数的季节变化  
(a) Seasonal variation of N content



(b) P 质量分数的季节变化  
(b) Seasonal variation of P content



(c) K 质量分数的季节变化  
(c) Seasonal variation of K content

图 1 马尾松根系及针 N、P、K 质量分数

Fig. 1 The content of N, P and K in roots and needles of *Pinus massonana*

表2 马尾松根系及针叶 N、P、K 质量分数方差分析

Tab. 2 Analysis of variance of content of N, P and K in roots and needles of *Pinus massonana*

作用因素 Factors	针叶 Leaf			根 Root		
	N	P	K	N	P	K
磷肥 P fertilizer	0.652	0.637	0.543	0.878	0.562	0.498
季节 Seasons	0.064	0.173	0.000*	0.010*	0.015*	0.003*
磷肥×季节 P fertilizer×Seasons	0.996	0.897	0.876	0.960	0.953	0.162

注:表中数值为方差分析所得  $P$ ,  $P < 0.05$  表示差异显著,下同。

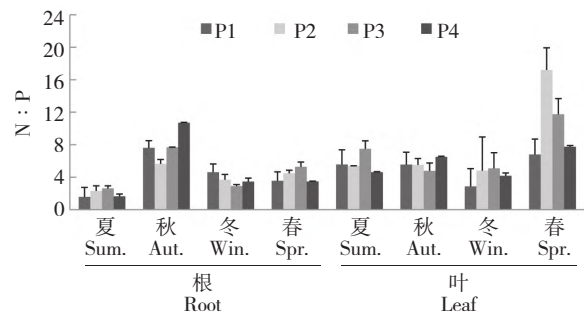
Note: The value in the table is  $P$  obtained from analysis of variance.  $P < 0.05$  indicates the difference is significant. The same below.

秋季根系 K 质量分数最低, P3 处理质量分数最低, 为 0.25 g/kg, 冬季时根系 K 质量分数最高, 其中 P2 处理根系 K 质量分数最高, 为 3.72 g/kg。秋季、冬季针叶 K 质量分数显著高于夏季及春季, 夏季针叶平均 K 质量分数最低, 平均值为 1.45 g/kg, 秋季针叶平均 K 质量分数最高, 平均值为 3.41 g/kg, 是夏季 K 质量分数的 2.1~3.3 倍。施磷肥对马尾松针叶及根系中 K 质量分数有一定的促进作用, 相同季节针叶 K 质量分数高于根系。

## 2.2 马尾松根系及针叶内的 N、P、K 计量特征季节动态

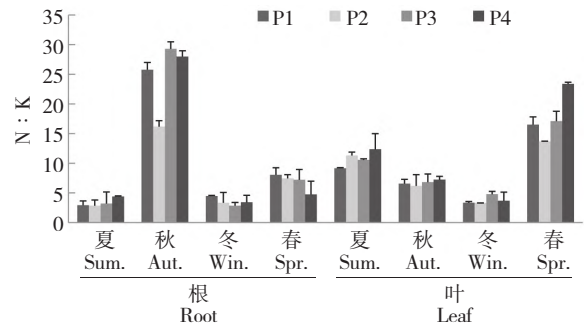
由表 3 方差分析表明, 不同磷肥施用量对马尾松根系及针叶 N:P、N:K、P:K 影响不显著 ( $P > 0.05$ ), 不同季节马尾松根系 N:P、N:K、P:K 及针叶 N:K 差异显著 ( $P < 0.05$ ), 磷肥施用量及季节交互作用对马尾松根系 P:K 影响显著 ( $P < 0.05$ )。图 2 为马尾松根系及针叶 N:K、N:P、P:K。由图 2 可知, 秋季马尾松根系 N:P 高于其他季节, 比值为 5.7~10.7, 夏季比值最低, 比值为 1.6~2.6, 春季针叶 N:P 最高, 比值介于 6.8~17.2, 显著高于其他季节 ( $P < 0.05$ ), 夏季、秋季及冬季马尾松针叶 N:P 差异不明显, 其中冬季最低, 比值在 2.9~5.1。春季、夏季施磷肥后马尾松根系 N:P 高于对照 (春季的 P4 处理除外), 冬季、春季施磷针叶 N:P 高于对照, P2 处理在春季表现最明显, 比值为 17.2。

秋季马尾松根系 N:K 显著高于其他季节, 比值介于 16.2~29.3, 其次是春季比值较高, 最低的是夏季及冬季。春季马尾松针叶 N:K 最高, 显著高于其他季节 ( $P < 0.05$ ), 冬季针叶 N:K 最低, 比值在 3.3~4.8。施磷肥短期内 (夏季、秋季) 对根系 N:K 有一定促进作用, 长期作用不明显, 施磷肥后对针叶 N:K 有一定促进作用, 高于对照。



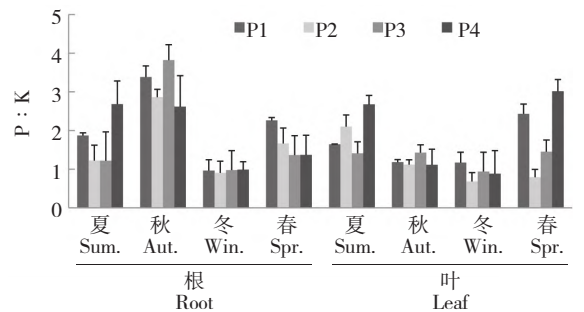
(a) 不同季节 N:P

(a) N:P in different seasons



(b) 不同季节 N:K

(b) N:K in different seasons



(c) 不同季节 P:K

(c) P:K in different seasons

图2 马尾松根系及针叶 N:K、N:P、P:K

Fig. 2 N:P, N:K and P:K in roots and needles of *Pinus massonana*

表 3 马尾松根系及针叶 N : K、N : P、P : K 方差分析

Tab. 3 Analysis of variance of N : P, N : K and P : K in roots and needles of *Pinus massoniana*

作用因素 Factors	针叶 Leaf			根 Root		
	N : K	N : P	P : K	N : K	N : P	P : K
磷肥 P fertilizer	0.642	0.646	0.351	0.113	0.931	0.013 *
季节 Seasons	0.005 *	0.394	0.066	0.025 *	0.007 *	0.003 *
磷肥×季节 P fertilizer×Seasons	0.972	0.914	0.637	0.066	0.892	0.001 *

秋季马尾松根系 P : K 高于其他季节,是冬季根系 P : K 的 2.6~3.8 倍,其次是春季和夏季。冬季马尾松针叶 P : K 与春、夏季比值差异较大,比值最低,在 0.68~1.17,夏季比值平均较高,在 1.4~2.7。随着磷肥施用量的增加,P : K 为表现出明显的规律性变化。

### 2.3 马尾松 N、P、K 质量分数与 N : K、N : P、P : K 相关性分析

根据马尾松根系及针叶分析 N、P、K 质量分数与 N : K、N : P、P : K 之间的相关性,见表 4,由表 4

可知,马尾松根系 P 质量分数与 N : K 影响不显著 ( $P > 0.05$ ),K 质量分数与 N : P 影响不显著 ( $P > 0.05$ ),其余均存在显著及极显著相关性 ( $P < 0.05$  或  $P < 0.01$ );马尾松针叶除 K 质量分数与 N : P 影响不显著外,其余均存在极显著相关性 ( $P < 0.01$ )。

通过马尾松根系及针叶间的相关性分析得出,马尾松针叶 K 质量分数与根系 N、P 质量分数及计量比相关性显著或极显著 ( $P < 0.05$  或  $P < 0.01$ ),针叶 N 质量分数与根系 P 质量分数显著相关 ( $P < 0.05$ ),其余相关性不显著 ( $P > 0.05$ )。

表 4 马尾松根系及针叶 N、P、K 质量分数、计量比之间的相关性分析

Tab. 4 Correlation analysis of the roots and needles of *Pinus massoniana* between the content of N、P、K and ratios

部位 Plants part	根 Root			叶 Leaf		
	N 质量分数 Content of N	P 质量分数 Content of P	K 质量分数 Content of K	N 质量分数 Content of N	P 质量分数 Content of P	K 质量分数 Content of K
N : K	0.846 **	0.307	-0.548 **	0.554 **	0.535 **	-0.481 **
N : P	0.724 **	0.427 *	-0.039	0.967 **	0.465 **	-0.001
P : K	0.205	0.692 **	-0.656 **	0.454 **	0.489 **	-0.580 **

注: \*\* 表示在 0.01 水平(双侧)上极显著相关; \* 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关,下同。

Note: \*\* means correlation is highly significant at the 0.01 level (2-tailed); \* means correlation is significant at the 0.05 level(2-tailed). The same below.

## 3 结论与讨论

### 3.1 施磷肥对马尾松根系及针叶内 N、P、K 质量分数的影响

植物器官在基本生理、组织结构等方面对 N、P 等矿质元素存在需求上的差异,这种差异影响植物器官的营养利用,如叶片、根系的养分分配<sup>[17]</sup>。叶片与根系对应着养分同化和矿质元素吸收,承担着不同的功能<sup>[18]</sup>。因此,植物根系及叶片内的 N、P、K 质量分数可以判断植物的营养状况与养分利用情

况,分析植物在生长过程中应对外界环境变化的能力。本研究分析了马尾松施磷肥处理后其根系及针叶内的 N、P、K 养分动态变化。马尾松根系及针叶内的 N、P、K 质量分数分别在 4.03~44.10、1.80~4.90、1.11~3.72 g/kg,秋季根系 N 质量分数,以及秋季、春季针叶质量分数高于我国陆生植物叶片中 N 的质量分数(19.090 g/kg),夏季及冬季 N 质量分数低于我国平均 N 质量分数水平。P 质量分数均高于我国陆生植物 P 质量分数水平(1.560 g/kg),K 质量分数均低于我国陆生植物 K 质量分数

(15.090 g/kg)<sup>[19]</sup>。马尾松根系及针叶中养分平均质量分数表现为 $N>P>K$ ,这与中国优势针叶树种叶片 $N>K>P$ 的变化规律存在差异<sup>[20]</sup>。

除冬季外,马尾松针叶中 $N$ 质量分数高于根系,因为植物不同器官营养元素的分布,除受土壤养分供应影响外,还与相应器官的生理功能密切相关<sup>[21]</sup>,冬季植物地上部分生长停止, $N$ 元素从地上转移至地下。植物生长期需要保持高的光合速率,此时作为光合器官的叶就需要保持高的 $N$ 质量分数以保证植物光合的正常进行<sup>[22]</sup>。冬季施磷肥后马尾松根系 $N$ 质量分数低于对照外,其余处理均表现出施磷肥处理高于对照,说明土壤中 $P$ 质量分数的增加一定程度促进植物对 $N$ 的吸收和利用。施磷肥后短期内促进马尾松根系 $P$ 素生物吸收(夏、秋、冬季),次年春季则作用效果减弱,磷肥对针叶吸收 $P$ 素的作用效果时间较根系短。已有研究表明<sup>[18,23]</sup>,部分植物叶片及根系 $P$ 质量分数对 $P$ 素添加响应显著,部分植物根系及叶片 $P$ 质量分数对 $P$ 素添加无显著响应,说明不同植物根系及叶片养分质量分数对磷添加具有差异性。施磷肥对根系、针叶 $K$ 质量分数的促进作用较缓慢,冬季及年春季表现明显,短期效果不明显。说明磷肥对马尾松不同部位养分元素的吸收具有时效性,且不同的器官对不同元素时效性存在差异。

### 3.2 施磷肥对马尾松根系及针叶的生化计量特征的影响

植物不同器官 $N$ 、 $P$ 、 $K$ 化学计量特征能反映植物体内养分的限制性。根据 Koerselman 等<sup>[24]</sup>的研究,植物叶片 $N:P$ 小于14时,植物生长受 $N$ 限制; $N:P$ 大于16时,受 $P$ 限制; $N:P$ 在14~16时,植物生长受 $N$ 和 $P$ 共同限制或既不受 $N$ 限制也不受 $P$ 限制。本研究中马尾松根系及针叶 $N:P$ 小于14,与盘金文等<sup>[25]</sup>对马尾松的研究结果一致,与皮发剑等<sup>[9]</sup>、旷远文等<sup>[26]</sup>对喀斯特地区不同森林类型研究结果相似。说明施磷肥后马尾松生长受 $N$ 限制,除冬季根系外其余均促进 $N$ 素的吸收, $N$ 质量分数增加,短期促进 $P$ 素质量分数增加,导致施磷肥后期(冬季、次年春季)针叶 $N:P$ 高于对照, $P_2$ 处理下次年春季 $N:P$ 高于16,生长过程受 $P$ 限制。但由于不同植物可能最佳 $N:P$ 不同<sup>[27-28]</sup>,因此准确评价马尾松 $N$ 、 $P$ 养分限制的最适值有待进一步验证。

施肥前期根系 $N:P$ 低于针叶,说明前期根系从土壤中吸收大量 $P$ 素供根系生长,地上部分 $P$ 素主要靠枝、叶的再利用,在次年春季随着磷肥的转化及代谢,土壤中 $N$ 、 $P$ 元素之间达到平衡状况,根系吸收的 $P$ 素转运至地上供植物生长所需。反映植物生长过程中不同器官对营养元素利用情况存在差异,与皮发剑等<sup>[9]</sup>对马尾松林的研究结果一致。目前对植物养分元素限制性及利用情况的研究多集中在叶片中计量特征的研究,因为叶片最能反映植物的营养元素状况。而针对根系、茎等其他器官的研究较少,没有统一认定的比值来衡量元素的限制性。仅用叶片的计量特征来衡量元素的利用情况存在一定的局限性,在以后的研究中应进行其他器官中养分元素的比较和研究。

根据对 $K$ 元素限制阈值的划分标准,当 $N:K>2.1$ , $K:P<3.4$ 时,植物的生长受 $K$ 元素限制<sup>[29]</sup>。本研究中不同处理下马尾松根系及针叶在不同季节 $N:K$ 均大于2.1, $P_2$ 处理马尾松根系 $N:K$ 低于对照, $P_3$ 、 $P_4$ 处理根系 $N:K$ 在前期内(夏季、秋季)高于对照,说明适当磷肥施用可缓解马尾松生长过程中 $K$ 的限制,但高质量分数磷肥施用则加剧 $K$ 限制。后期(冬季、次年春季)则低于对照,针叶 $N:K$ 则在 $P_3$ 、 $P_4$ 处理在施肥后1a内均高于对照,说明在本研究中马尾松的生长受 $K$ 元素限制,磷肥施用量较高时( $P_3$ 、 $P_4$ )马尾松生长中 $K$ 素限制越严重。 $P:K$ 在0.68~3.82,根系及针叶中 $K:P<3.4$ 。土壤中磷质量分数的增加导致 $N$ 的吸收量受限制,在马尾松生长过程中表现出 $N$ 、 $K$ 素受限制,因此在马尾松苗木培育过程中需对 $N$ 、 $P$ 、 $K$ 按照一定比例合理配施,更有利于马尾松苗木培育。

### 【参 考 文 献】

- [1] 罗绪强,张桂玲,杜雪莲,等. 茂兰喀斯特森林常见钙生植物叶片元素含量及其化学计量学特征[J]. 生态环境学报,2014,(7):1121-1129.  
LUO X Q, ZHANG G L, DU X L, et al. Characteristics of element contents and ecological stoichiometry in leaves of common calcicole species in Maplan Karst Forest[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2014, 23(7):1121-1129.
- [2] 孙雪娇,常顺利,宋成程,等. 雪岭云杉不同器官 $N$ 、 $P$ 、 $K$ 化学计量特征随生长阶段的变化[J]. 生态学杂志, 2018,37(5):1291-1298.  
SUN X J, CHANG S L, SONG C C, et al. Age-related

- N, P, and K stoichiometry in different organs of *Picea schrenkiana*[J]. Chinese Journal Ecology, 2018, 37(5): 1291-1298.
- [3] 牛得草,李茜,江世高,等.阿拉善荒漠区 6 种主要灌木植物叶片 C:N:P 化学计量比的季节变化[J].植物生态学报,2013,37(4):317-325.  
NIU D C, LI Q, JIANG S G, et al. Seasonal variations of leaf C:N:P stoichiometry of six shrubs in desert of China's Alxa Plateau[J]. Chinese Journal Plant Ecology, 2013, 37(4):317-325.
- [4] 崔浩,张前前,陈明月,等.鄱阳湖南矶湿地 22 种植物根系碳氮及其化学计量关系特征[J].生态学报,2020,40(3):864-873.  
CUI H, ZHANG Q, CHEN M, et al. Root C, N and C:N stoichiometry of 22 plant species in Nanji wetlands of Poyang Lake[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(3):864-873.
- [5] WASSEN M J, OLDE VENTERINK H G M, SWART E O A M. Nutrient concentrations in mire vegetation as a measure of nutrient limitation in mire ecosystems[J]. Journal of Vegetation Science, 1995, 6(1): 5-16.
- [6] HE J S, WANG L, FLYBNN D F, et al. Leaf nitrogen: Phosphorus stoichiometry across Chinese grassland biomass [J]. Oecologia, 2008, 155(2):301-310.
- [7] 梁月明,潘复静,马姜明,等.不同林龄和密度马尾松人工林针叶和根系的生态化学计量特征[J].广西植物, 2021,41(9):1497-1508.  
LIANG Y M, PAN F J, MA J M, et al. Ecological stoichiometry of needle leaves and roots in different age and density stands on *Pinus massoniana* plantations [J]. Guihaia, 2021, 41(9):1497-1508.
- [8] 韦明宝,杨正文,王汉敢,等.桂西北马尾松人工林养分积累及其分配特征[J].亚热带农业研究,2019,15(2): 80-84.  
WEI M B, YANG Z W, WANG H G, et al. Nutrient accumulation and its distribution characteristics of the *Pinus massoniana* plantation in northwest Guangxi[J]. Subtropical Agriculture Research, 2019, 15(2): 80-84.
- [9] 皮发剑,袁丛军,喻理飞,等.黔中天然次生林主要优势树种叶片生态化学计量特征[J].生态环境学报,2016, 25(5):801-807.  
PI F J, YUAN C J, YU L F, et al. Ecological stoichiometry characteristics of plant leaves from the main dominant species of natural secondary forest in the central of Guizhou [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2016, 25(5): 801-807.
- [10] 周运超,温佐吾,谢双喜,等.贵州马尾松幼林施肥试验研究[J].贵州林业科技,1999,27(4):28-33.  
ZHOU Y C, WEN Z W, XIE S X, et al. Study on the fertilizer test of *Pinus massoniana* in Guizhou[J] Guizhou Forestry Sciences and Technology, 1999, 27(4):28-33.
- [11] 周玮,周运超.施肥对马尾松幼苗及根系生长的影响[J].南京林业大学学报(自然科学版),2011,35(3): 70-74.  
ZHOU W, ZHOU Y C. Effect on the growth of *Pinus massoniana* seedlings and root under different fertilizer treatments[J] Journal of Nanjing Forest University (Natural Sciences Edition), 2011, 35(3):70-74.
- [12] 周玮,周运超,叶立鹏.中龄林马尾松细根固土作用的调控[J].中南林业科技大学学报,2015,35(1):18-23.  
ZHOU W, ZHOU Y C, YE L P. Regulation of fertilization treatment on fine root fixation in middle aged *Pinus massoniana* plantation[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2015, 35(1):18-23.
- [13] 周玮,曹岩.马尾松苗针叶氮磷代谢酶及积累量的动态变化[J].中南林业科技大学学报,2020,40(3):22-29.  
ZHOU W, CAO Y. Dynamic changes of the N, P metabolic enzymes and accumulation in the *Pinus massoniana* seedlings[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2020, 40(3):22-29.
- [14] 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特征的影响[J].植物生态学报,2014,38(3):231-237.  
ZHOU W, CAO Y. Dynamic changes of the N, P metabolic enzymes and accumulation in the *Pinus massoniana* seedlings[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2020, 40(3):22-29.
- [15] MORECROFT M D, SELLERS E K, LEE J A. An experimental investigation into the effects of atmospheric nitrogen deposition on two semi-natural grasslands [J]. Journal of Ecology, 1994, 82(3):475-483.
- [16] ROWE E C, SMART S M, KENNEDY V H, et al. Nitrogen deposition in creases the acquisition of phosphorus and potassium by heather *Calluna vulgaris*[J]. Environmental Pollution, 2008, 155(2):201-207.
- [17] YUAN Z, CHEN H, REICH P B. Global-scale latitudinal patterns of plant fine-root nitrogen and phosphorus [J]. Nature Communications, 2011, 2:344.
- [18] 高宗宝,王洪义,吕晓涛,等.氮磷添加对呼伦贝尔草甸草原 4 种优势植物根系和叶片 C:N:P 化学计量特征的影响[J].生态学杂志,2017,36(1):80-88.  
GAO Z B, WANG H Y, LÜ X T, et al. Effects of nitrogen and phosphorus addition on C:N:P stoichiometry in

- roots and leaves of four dominant plant species in a meadowsteppe of Hulunber [J]. Chinese Journal of Ecology, 2017, 36(1):80-88.
- [19] 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):2665-2673.  
REN S J, YU G R, TAO B, et al. Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 654 terrestrial plant species in NSTEC [J]. Environment Sciences, 2007, 28(12):2665-2673.
- [20] 邓博文,许瑶瑶,陈逸飞,等.中国针叶林优势树种叶片氮磷钾生态化学计量特征及内稳态分析[J].林业科学研究,2020,33(6):81-87.  
DENG B W, XU Y Y, CHEN Y F, et al. Stoichiometry and homeostasis of nitrogen, phosphorus and potassium in leaf of dominant tree species in China's coniferous forests [J]. Forest Research, 2020, 33(6):81-87.
- [21] KERKOFF A J, FAGAN W F, ELSER J J, et al. Phylogenetic and growth form variation in the scaling of nitrogen and phosphorus in the seed plants[J]. The American Naturalist, 2006, 168(4):E103-22.
- [22] 陈璐,王庆贵,闫国永,等.不同施氮水平对兴安落叶松化学计量特征的影响[J].森林工程,2019,35(2):1-10.  
CHEN L, WANG Q G, YUAN G Y, et al. Effect of long-term nitrogen deposition on the stoichiometric characteristics of *Larix gmelinii* [J]. Forest Engineering, 2019, 35(2):1-10.
- [23] 王洪义,丁睿,王智慧,等.氮、磷添加对草地不同冠层植物叶片和根系生态化学计量特征的影响[J].草业学报,2020,29(8):37-45.  
WANG H Y, DING R, WANG Z H, et al. Effects of nitrogen and phosphorus addition on C:N:P ecological stoichiometry in leaves and roots of different canopy species in Hulunbuir grassland[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2020, 29(8):37-45.
- [24] KOERSELMAN W, MEULEMAN A F M. The vegetation N:P ratio: A new tool to detect the nature nutrient limitation[J]. Journal of Application Ecology, 1996, 33(6):1441-1450.
- [25] 盘金文,郭其强,孙学广,等.不同林龄马尾松人工林碳、氮、磷、钾养分含量及其生态化学计量特征[J].植物营养与肥料学报,2020,26(4):746-756.  
PAN J W, GUO Q Q, SUN X G, et al. Contents and stoichiometric characteristics of C, N, P and K under different stand ages of *Pinus massoniana* plantations[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2020, 26(4):746-756.
- [26] 旷远文,温达志,闫俊华,等.贵州普定喀斯特森林 3 种优势树种叶片元素含量特征[J].应用与环境生物学报,2010,16(2):158-163.  
KUANG Y W, WEN D Z, YAN J H, et al. Characteristics of element contents in leaves of 3 dominant species in Karst forest in Puding, Guizhou, China [J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2010, 16(2):158-163.
- [27] 张欣影,宁秋蕊,李守中,等.亚热带红壤侵蚀区马尾松针叶生态化学计量特征[J].水土保持研究,2017,24(2):156-161.  
ZHANG X Y, NING Q R, LI S Z, et al. Stoichiometric characteristics of *Pinus massoniana* plantation in the subtropical red soil erosion region[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2017, 24(2):156-161.
- [28] CHAPIN F S, KEDROWSKI R A. Seasonal changes in nitrogen and phosphorous fractions and autumn retranslocation in evergreen and deciduous Taiga tree[J]. Ecology, 1983, 64(2):376-391.
- [29] 吴家森,蒋仲龙,吕爱华,等.不同年龄杨梅各器官氮、磷、钾化学计量特征[J].江西农业大学学报,2019,41(3):447-453.  
WU J S, JIANG Z L, LYU A H, et al. The ecological stoichiometry of N, P and K in organs of *Myrica rubra* of different ages[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2019, 41(3):447-453.