

氮磷添加对刨花楠幼苗叶片N、P化学计量特征的影响*

李曼^{1,2} 靳冰洁^{1,2} 钟全林^{1,2,3} 马玉珠^{1,2} 卢宏典^{1,2} 郭炳桥^{1,2} 郑媛^{1,2} 程栋梁^{1,2,3**}

¹福建师范大学地理科学学院 福州 350007

²湿润亚热带山地生态国家重点实验室培育基地 福州 350007

³福建省植物生理生态重点实验室 福州 350007

摘要 以刨花楠 (*Machilus pauhoi*) 幼苗为研究对象, 通过盆栽施肥试验, 探讨不同氮 (N)、磷 (P) 供应水平下刨花楠叶片N、P元素含量的动态变化及与土壤养分的相关性。N、P处理各设定4个梯度, N1、N2、N3、N4及P1、P2、P3、P4, N、P肥施加量分别是初始土壤的2倍、4倍、8倍和16倍, 不同N、P处理共用一组对照 (CK), 共9种处理, 每组处理3个重复, 并分别于3月、7月、11月对成熟叶片及土壤进行采样分析。结果显示: 刨花楠幼苗叶片N、P含量及N:P值分别为14.63–26.53 mg/g、0.64–1.84 mg/g和10.04–23.21。施N肥叶片N含量及N:P随季节变化呈现出低 (3月份) —高 (7月份) —低 (11月份) 的变化趋势, 叶片P含量呈现高—低—高的趋势; 施P肥叶片P含量也随季节变化呈现出先升高后降低的变化趋势。施N或施P显著增加了刨花楠幼苗土壤及叶片的N、P含量, 分别增加或降低土壤及叶片的N:P值 ($P < 0.05$); 施N或施P也显著影响了土壤pH ($P < 0.05$) 及叶片N、P含量与土壤养分的关系。综上表明土壤中N、P供应量影响刨花楠叶片中的N、P含量。(图3 表2 参43)

关键词 刨花楠幼苗; 施肥; 生态化学计量学; 叶片养分; 土壤养分; N:P

CLC Q945.79

Effect of nitrogen and phosphorus fertilization on leaf N and P stoichiometric characteristics of *Machilus pauhoi* seedlings*

LI Man^{1,2}, JIN Bingjie^{1,2}, ZHONG Quanlin^{1,2,3}, MA Yuzhu^{1,2}, LU Hongdian^{1,2}, GUO Bingqiao^{1,2}, ZHENG Yuan^{1,2} & CHENG Dongliang^{1,2,3**}

¹College of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China

²State Key Laboratory Breeding Base of Humid Subtropical Mountain Ecology, Fuzhou 350007, China

³Fujian Provincial Key Laboratory of Plant Ecophysiology (Fujian Normal University), Fuzhou 350007, China

Abstract For a comprehensive understanding of the nutrient conservation mechanism of *Machilus pauhoi* in the subtropical zone, we need to know the response of leaf nutrient contents to fertilizers. This paper aimed to study the effect of nitrogen and phosphorus fertilization on leaf N and P stoichiometric characteristics of *M. pauhoi* seedlings. A microcosm experiment with N and P fertilization was designed to observe the dynamic change of leaf N, P content and their correlation with soil nutrients. The treatments included 5 levels of N addition of 0, 2, 4, 8, 16 times of initial soil, respectively, as control (CK), N1, N2, N3, and N4; P addition of the same gradients as CK, P1, P2, P3, and P4; we did three replicates for each treatment. The result showed a range of 14.63–26.53 mg/g for leaf N, 0.64–1.84 mg/g for P content and 10.04–23.21 for the N:P ratio of *M. pauhoi* seedlings. By N fertilization, a low–high–low pattern was observed in the leaf N content and N:P ratio, but an opposite pattern in the leaf P content; by P fertilization, the leaf P content first decreased then increased with the season. N or P fertilization significantly increased the leaf and soil N or P content respectively, and both significantly affected the soil pH ($P < 0.05$), the leaf N, P content and soil nutrient relationship. N addition improved the stoichiometric ratio, while P addition reduced it ($P < 0.05$). The results indicated that the N and P content in soil would affect the leaf N and P content of *Machilus pauhoi* seedlings.

Keywords *Machilus pauhoi* seedlings; fertilization; ecological stoichiometry; leaf nutrients; soil nutrients; N:P

收稿日期 Received: 2015-06-20 接受日期 Accepted: 2015-09-01

*国家自然科学基金项目 (31170374, 31370589, 31170596)、福建省重大科技项目 (2014N5008)、福建省教育厅新世纪优秀人才支持计划项目 (JA12055) 和福建省杰出青年基金项目 (2013J06009) 资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (31170374, 31370589, 31170596), the Key Technologies Program of Fujian Province (2014N5008), the Program for New Century Excellent Talents in the Education Department of Fujian Province (JA12055), and the Distinguished Young Scholars Foundation of Fujian, China (2013J06009)

**通讯作者 Corresponding author (E-mail: chengdl02@aliyun.com)

生态化学计量学 (Ecological stoichiometry) 是研究生态系统能量平衡和多重化学元素平衡的科学^[1], 主要强调活的有机体主要组成元素间的关系, 特别是碳 (C)、氮 (N)、磷 (P) 等重要生命元素间的计量关系, 有助于揭示植物生长的养分分配和限制因子状况, 以及植物与土壤的作用关系^[2-3].

植物体内N、P元素含量及N:P能充分反映土壤养分供应与植物养分需求的动态平衡^[4]. 相关研究表明, 当土壤中N含量相对丰富、P含量相对缺乏时, 植物N:P相对较高; 反之, 则植物N:P相对较低^[5-6]. 植物叶片的N、P含量及N:P, 特别N:P的临界值还被认为可以作为土壤对植物生长养分供应状况的指标^[7-8], 并且N:P值还被广泛用来诊断植物在个体、群落、生态系统及全球尺度上N、P养分的限制格局^[9-12]. 一般植物在自然生态系统中, 其生长都表现为N限制或者P限制或者N、P共同限制^[13-14]. 宾振钧等^[15]和Lü等^[16]就施N处理对青藏高原高寒草甸和内蒙古典型草原优势物种叶片化学计量特征及其作用机制开展过研究, 但这些研究都集中在单一元素添加, 而分别添加N、P元素对植物幼苗叶片N和P生态化学计量特征、响应机制及土壤和植物养分间的关系产生何种影响, 还都有待深入研究.

刨花楠 (*Machilus pauhoi*) 是亚热带地区优良的常绿阔叶乔木树种, 不仅外形美观, 用途广泛, 还兼有自然生态价值和生产经济价值. 近年来, 随着国际市场需求量增加, 该树种资源已日益短缺, 供不应求, 已为市场与相关学者所关注^[17]. 因此我们以刨花楠幼苗为研究对象, 采用人工受控试验方法, 设置不同浓度梯度的N、P添加试验, 揭示不同N、P浓度下刨花楠幼苗叶片N、P分配的化学计量特征及幼苗生长的养分限制状况, 旨在为提高刨花楠幼苗生产力, 进行合理施肥和养分调控等提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 试验区概况

实验区设立在福建师范大学仓山校区长安山公园气象站苗木试验区 (26°05'41"N, 118°08'47"E), 海拔约为100 m, 属于亚热带海洋性季风气候, 气候温暖湿润, 冬短夏长. 年均降水量约为900-2 100 mm, 多集中于3-10月份, 年均温度约为19.6 °C, 1月最冷月均温10.5 °C, 7月最热月均温28.6 °C. 年均日照时间约为1 840-1 980 h, 无霜期为326 d, ≥ 10 °C年积温6 100-6 300 °C. 盆栽实验土壤采自本试验区距地表6 m的深层红壤. 原始土壤的全N含量为0.518 mg/g, 速效P含量为5.417 mg/kg, pH均值为4.78, 有机质含量为0.40%. 土壤养分整体含量较低, 处全国中下水平.

1.2 实验设计

2013年4月, 将生长良好的一年生刨花楠幼苗移入试验盆栽内进行预培植, 花盆为底径12 cm的塑料盆, 每盆基质土重3 kg. 于2013年11月中旬选取长势良好的刨花楠幼苗, 实施N、P添加试验, 基于基本营养状况, N、P处理各设定4个梯度, N1、N2、N3、N4及P1、P2、P3、P4, N、P肥施加量分别是初始土壤的2倍、4倍、8倍和16倍, 不同氮、磷浓度处理共用一组对照 (CK), 共9种处理 (含对照). 每组处理设置3个重复, 每个重复4盆. 根据基质土壤的全N、全P浓度和施肥梯度计算应添加 NH_4NO_3 、 NaH_2PO_4 的量, 将称好的 NH_4NO_3 、

NaH_2PO_4 溶解于水中, 用移液枪均匀地喷洒在盆栽容器土壤中, 试验前控制水分以利于养分在盆土中的扩散. 对照只做浇水处理, 不施加任何肥料. 完成N、P添加处理后, 分别于2014年3月、7月、11月初, 定期采集苗木未受病虫害影响的叶片, 按照不同的施肥处理分组装入袋中归类. 将鲜叶洗净晾干后装入信封袋, 放置于105 °C烘箱中杀青30 min, 再置于65 °C恒温下烘干至恒重, 磨碎过筛 (<0.25 mm) 备用. 每次采样时, 取N、P处理组内相同处理下的表层土样 (0-5 cm) 混合, 带回实验室, 经自然风干、磨碎、过筛, 装入密封袋备存.

1.3 室内测定

植物叶片全N和土壤全N含量利用碳氮元素分析仪 (Elemental Analyzer Vario EL III) 测定; 植物全P含量及土壤全P含量用 (H_2SO_4 - H_2O_2 消煮) 连续流动分析仪 (荷兰SKALAR) 测定; 土壤pH值用玻璃电极测定.

1.4 数据处理

土壤及植物叶片中N、P含量采用mg/g表示, 采用Microsoft Excel 2013和SPSS19.0软件对实验数据进行整理分析, 用LSD多重比较进行显著性检验, 并采用Origin9.0制作图表. 图表中数据为平均值 $\pm$ 标准差.

2 结果与分析

2.1 叶片N、P元素含量及N:P的动态变化

苗木叶片N、P含量及N:P在不同生长期和不同处理内均呈现一定程度的变化 (图1). 从不同生长季的动态变化来看, N处理组内, 叶片N含量在生长季 (7月份) 较高, 达到21.9 mg/g, 11月份叶片衰老含量下降, 低至20.18 mg/g, 整体上则呈现出先上升再下降的趋势; P含量呈现高一低一高的趋势, 最低0.66 mg/g, 最高1.1 mg/g. N:P也表现出明显的季节性, 生长初期较小, 仅为16.28 mg/g, 生长旺季随供N水平的提高而显著增加, 生长末期则趋于稳定 (图1).

P处理组中, 叶片N含量在不同生长期差异较小; 叶片P含量在生长季则显著增高, 且高P (P4) 有利于增加叶片中P含量. N:P在不同季差异较小, 低P (P1) 和高P (P4) 处理下差异显著 ($P < 0.05$), 但普遍低于对照组 (图1).

2.2 N、P添加对土壤及叶片N、P含量的影响

如表1所示, 施N或施P处理对土壤及叶片P或N含量均没有显著影响 ($P > 0.05$). 施N处理对土壤及叶片N含量、N:P影响显著 ($P < 0.05$), 土壤N含量及N:P、叶片N含量及N:P均随着施N量的增加而逐渐增大. 随着施P量的增加, 土壤及叶片P含量显著增加, 土壤及叶片N:P则逐渐降低, 施P处理对土壤及叶片P含量影响显著 ($P < 0.05$).

2.3 N、P添加对土壤pH的影响

如图2所示, 随着施N或施P量的增加, 土壤pH值逐渐降低, 施N或施P处理均对土壤pH影响显著 ($P < 0.05$).

2.4 土壤N、P含量与叶片N、P含量的关系

相关分析结果 (表3) 表明, 施N处理中, 土壤N含量与叶片N含量及N:P分别呈极显著和显著正相关 ($P < 0.001$, $P < 0.05$), 土壤P含量与叶片P含量呈显著正相关 ($P < 0.05$), 土壤N:P与叶片N、P含量均呈显著正相关 ($P < 0.05$). 施P处理中, 土壤P含量与叶片P含量及N:P分别呈极显著正相关和显著负相关 ($P < 0.001$), 土壤N:P与叶片P含量及N:P分别呈

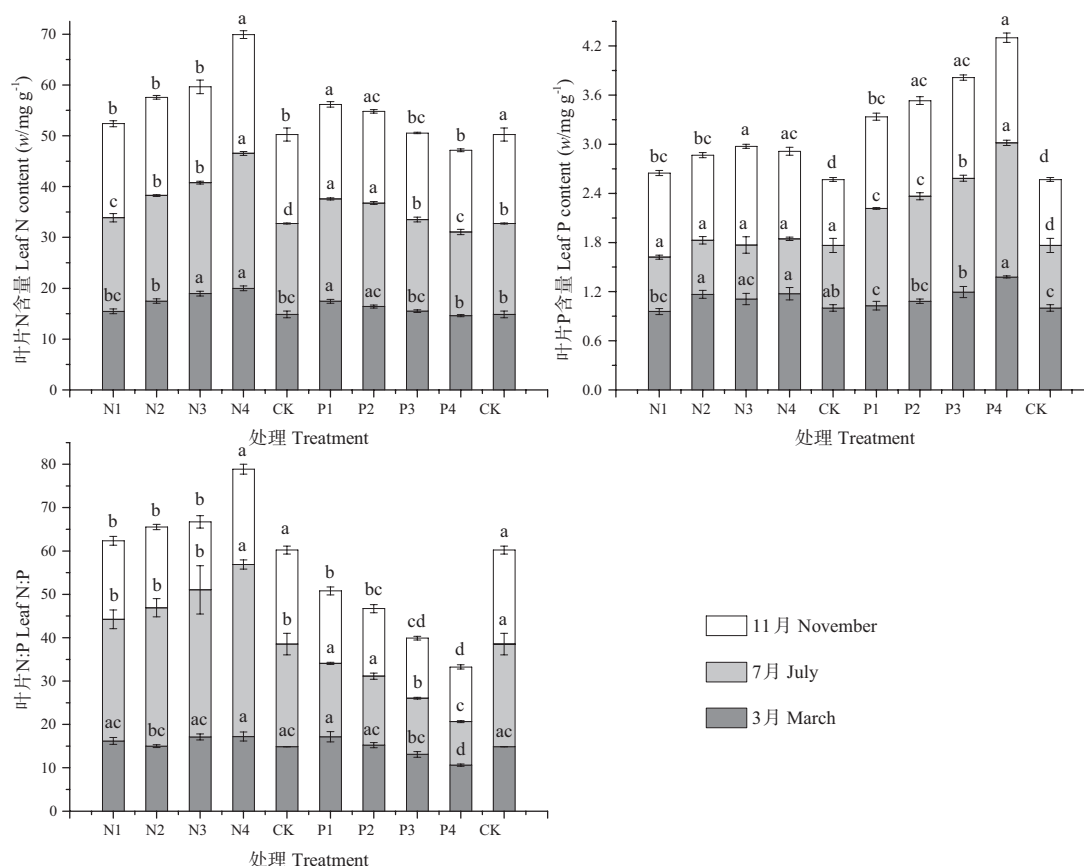


图1 刨花楠苗木叶片N、P含量及N:P的季节动态。

Fig. 1 Seasonal fluctuation of leaf N, P contents and N:P ratio in *Machilus pauhoi* seedlings.

表1 不同N、P添加处理后土壤及叶片N、P含量 ($w/mg\ g^{-1}$, $N=3$)

Table 1 Leaf and soil N and P contents after long-term soil N and P addition ($w/mg\ g^{-1}$, $N=3$)

处理 Treatment	土壤N含量 Soil N content	土壤P含量 Soil P content	土壤N:P Soil N:P ratio	叶片N含量 Leaf N content	叶片P含量 Leaf P content	叶片N:P Leaf N:P ratio
CK	$0.7 \pm 0.11a$	$0.53 \pm 0.29a$	$1.31 \pm 0.1a$	$16.75 \pm 0.97a$	$0.86 \pm 0.07b$	$20.08 \pm 0.7ab$
N ₁	$0.99 \pm 0.51a$	$0.69 \pm 0.29a$	$1.44 \pm 0.47a$	$17.80 \pm 2.0a$	$0.89 \pm 0.18b$	$16.99 \pm 0.99b$
N ₂	$1.07 \pm 0.41a$	$0.73 \pm 0.27a$	$1.68 \pm 1.08a$	$19.19 \pm 1.65a$	$0.98 \pm 0.22b$	$17.20 \pm 1.93b$
N ₃	$1.22 \pm 0.45a$	$0.73 \pm 0.24a$	$1.91 \pm 1.24a$	$19.88 \pm 1.69ab$	$0.99 \pm 0.30b$	$16.94 \pm 1.18b$
N ₄	$1.49 \pm 0.26b$	$0.76 \pm 0.14a$	$1.96 \pm 0.21a$	$23.30 \pm 3.27b$	$0.99 \pm 0.24b$	$20.80 \pm 3.17a$
P ₁	$0.68 \pm 0.14a$	$0.71 \pm 0.23ab$	$1.01 \pm 0.22b$	$18.54 \pm 1.41a$	$1.11 \pm 0.08ab$	$16.93 \pm 0.22c$
P ₂	$0.48 \pm 0.07bc$	$0.65 \pm 0.17ab$	$0.75 \pm 0.09c$	$17.93 \pm 2.11a$	$1.18 \pm 0.10ab$	$15.57 \pm 0.36c$
P ₃	$0.37 \pm 0.02b$	$0.86 \pm 0.16bc$	$0.44 \pm 0.1d$	$16.54 \pm 1.32a$	$1.29 \pm 0.14ac$	$13.31 \pm 0.49d$
P ₄	$0.58 \pm 0.16ac$	$1.11 \pm 0.20c$	$0.52 \pm 0.06d$	$16.19 \pm 1.15a$	$1.50 \pm 0.30cd$	$11.09 \pm 1.35e$

不同字母代表同一测量时期不同处理组之间差异显著 ($P < 0.05$)。

Lowercase letters indicate significant differences between treatments in the same measurement period ($P < 0.05$).

显著负相关和显著正相关 ($P < 0.05$)。

如图3所示, 施N或施P, 叶片N含量和叶片N:P均呈显著正相关 ($P < 0.05$), 土壤N含量和土壤N:P在施N处理下呈显著正相关 ($P < 0.05$), 土壤N:P与叶片P含量在施P处理下呈显著负相关 ($P < 0.05$)。

3 讨论与结论

3.1 植物叶片N、P含量的动态变化

本研究结果表明, 刨花楠叶片平均N含量18.67 mg/g, 明

显低于全国尺度的20.24 mg/g^[8]及全球植被水平的20.10 mg/g^[10], 但高于中国东部南北样带 654 种植物叶片的平均N含量 (17.55 mg/g)^[18]; 叶片平均P含量为1.12 mg/g, 低于全球^[10]、中国东部南北样带的叶片P含量^[18] (1.77 mg/g、1.28 mg/g), 也低于Wu等对中国东南部42种植物叶片的研究结果 (2.24 mg/g)^[19]。刨花楠苗木叶片N:P 的均值为16.10, 明显高于Han等对我国753种植物种研究得出的平均值 (14.40)^[8]和全球植物的平均值 (13.80)^[10]。

植物叶片营养元素含量和自身结构特点与生长节律密切相关^[20], 本研究表明不同施肥处理下刨花楠苗木叶片N、P含

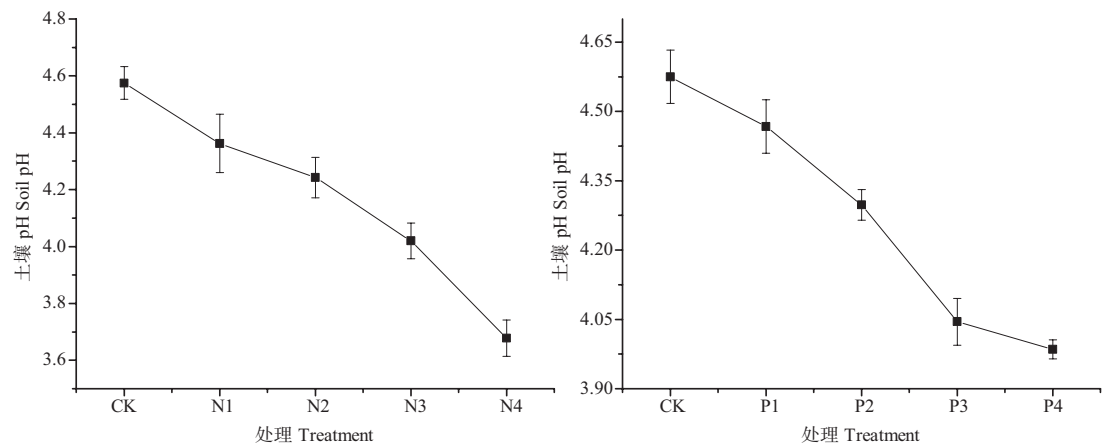


图2 N、P处理下土壤pH值变化。
Fig. 2 The soil pH variation with N or P addition.

表3 N、P处理下土壤与刨花楠叶片N、P化学计量特征关系
Table 3 Relationship of N, P stoichiometry of soil and *Machilus pauhoi* leaves with N and P treatments

处理 Treatment	土壤养分含量 leaf nutrients content	叶片N含量 Leaf N content	叶片P含量 Leaf P content	叶片N:P Leaf N content
N处理 N treatment	土壤N含量 Soil N content	0.2564**	-0.1365	0.2065*
	土壤P含量 Soil P content	0.0099	0.5285*	0.0937
	土壤N:P Soil N:P ratio	0.2033*	0.3486*	0.1251
P处理 P treatment	土壤N含量 Soil N content	0.0929	0.0533	0.058
	土壤P含量 Soil P content	-0.0402	0.4019**	-0.4226**
	土壤N:P Soil N:P ratio	0.0827	-0.2454*	0.3267*

** $P < 0.01$; * $P < 0.05$.

量随着季节改变而不断变化. 在不同季节施N肥或P肥, 叶片N或P含量都呈现先上升再下降的趋势(图1). 施肥开始到次年三月, 苗木处于萌芽前期, 生物量较小, 且处于冬季, 气温低, 施加养分不能完全吸收, 叶片N、P含量最低; 在7月份, 植物生长速率逐渐加快, 体内储存的功能性物质向幼嫩组织转移, 而施肥满足了植物对养分的需求, N、P含量较高^[21]; 而到了生长末期, 叶片开始衰老, 营养元素回流, 因此, 11月份N、P含量降低^[22]. 刨花楠叶片N、P含量的季节动态变化和Orgeas等对橡树的研究结果^[23]基本相同. 此外, N处理组中, 叶片P含量在生长期显著降低(图1), 可能是由于土壤中施加N元素对P元素造成相对稀释的作用并抑制了植物对P元素的吸收^[24-26].

3.2 叶片N、P含量相关性及其与土壤养分的关系

在自然生态系统中, 植物对于营养元素的吸收按一定比例进行, 叶片内营养元素间存在显著的线性关系, 即动态平衡关系. Wright等认为, N、P是协同元素, 一般呈正相关关系^[27]. 这是高等陆生植物最基本的特性之一. 任书杰等就中国东部南北样带各功能群叶片N、P含量的相关性进行比较, 发现除蕨类和裸子植物外, 其他不同功能型的叶片N、P含量均有显著相关性^[18]. 但叶片生态化学计量学特征也因物种、生长策略及土壤环境而不断变化^[12, 28-29]. 本研究中, 刨花楠叶片N、P含量间的相关性不显著(图3), 说明本试验区内可能存在某一元素供应过量或不足的现象, 从而影响了植物体内N、P含量的平衡; 也可能是由于本研究主要针对单一物种施肥, 而生态化学计量学表明种间与种内可能存在显著差异.

土壤作为植物养分的主要来源, 其N、P元素含量直接影响植物对养分的吸收利用及各功能器官的N、P化学计量特征^[30-32]. Garnier的研究表明, 如果植物生长受某种元素限制, 那么植物叶片内该元素浓度就会与土壤中该元素的供应能力呈显著正相关^[33]. 也就是说, 植物生存的土壤养分状况能直接反应植物的营养状况. 诸多研究表明, 土壤N或P含量与叶片N或P含量有一定的相关性^[8, 34]. 本研究发现, 土壤中添加N、P元素改变了刨花楠幼苗叶片中的N、P含量(表1), 同时也显著影响了土壤与叶片N:P(表1)及N、P养分间的动态平衡关系(图3). 施N肥显著提高了叶片N含量及N:P比值, 缓解了土壤中N素缺乏对植物生长的限制作用; 随着施P量的增多, 叶片P含量逐渐增加而N:P逐渐降低(表2). 这与Aerts和Malmer^[35]、Graciano^[36]及Gsewell和Koerselman^[37]的研究结果相同. 此外, 本研究也发现, 氮、磷添加均显著促进了刨花楠幼苗株高、地径的生长(待发表). 由此可见, 本研究中刨花楠幼苗生长和叶片N、P含量及N:P均受土壤养分的影响.

3.3 植物生长限制因子的判断

生态化学计量学应用的一个重要方面是可根据植物叶片的N:P判断环境因子对植物生长的养分供应的状况^[3], 陆地植物器官中相对恒定的N:P是植物在地球上生存的重要适应机制^[38]. Koerselman和Meuleman^[39]通过对沼泽、欧石楠荒原和湿草地等生态系统施肥实验的总结表明, 当N:P > 16时, 植物生长受P元素限制, 当N:P < 14时, 植物生长受N元素限制^[6], 这个结论被广泛地应用于生态系统限制因子的判断. Güsewell^[10]、曾德慧和陈广生^[3]则认为, N:P临界值因研究区

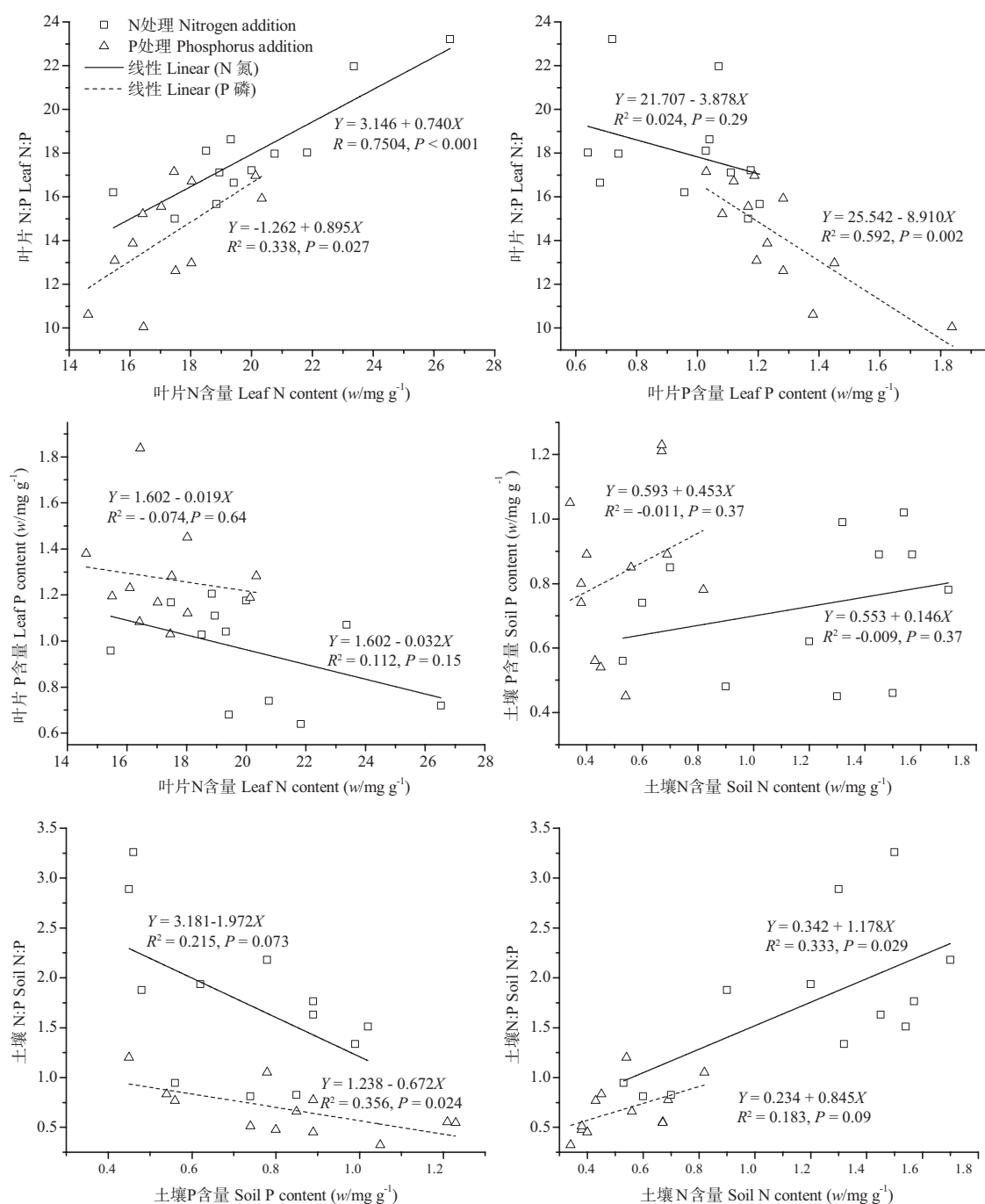


图3 土壤与刨花楠叶片N、P含量及N:P的关系。

Fig. 3 N, P contents, the N:P ratio, and their relations in the soil and leaves of *Machilus pauhoi*.

域、生长阶段、植物种类及土壤养分的不同而有很大差异。但大多数学者认为,较高的N:P意味着植物受到P限制,较低的N:P则受N限制。而这需要结合试验区的植被、土壤进行综合研究来评判。

N、P是细胞结构与功能十分重要的生命元素,其元素含量及元素间的化学计量比往往随植物的生长而发生变化^[40]。本研究中,N、P含量及N:P主要受土壤养分的影响(表1),在不同生长阶段也表现出较大差异(图1)。由于本研究所取样品在同一试验区,取样环境的空间异质性可以忽略不计,这

进一步突显了土壤养分和生长阶段对刨花楠叶片养分含量的影响。同时,由于物种的生物学特性,不同生长阶段树木生长所需元素差异较大,这也导致了N、P含量及其化学计量比在不同生长阶段间存在一定波动^[41]。本研究中,刨花楠叶片N:P总平均值为16.1,同时,施N肥叶片N浓度和土壤全氮显著正相关,施P肥叶片P浓度和土壤全磷呈极显著正相关(表2),表明在本实验区内植物生长受到N、P元素的共同限制。此外,在不同生长时期,植物养分限制状况也存在差异。3月份,刨花楠叶片N:P小于16,7月份和11月份,刨花楠叶片N:P均大于

16, 这表明试验区内刨花楠幼苗在生长初期受N、P元素的共同限制, 而生长长期和生长末期, 刨花楠幼苗生长则受P限制。这与Wardle等^[42]、Reich & Oleksyn^[10]及Aerts等^[43]就亚热带常绿林和热带雨林地区植物生长主要受P限制的研究结果不一致, 这可能是由于不同植物种对N、P养分的需求不同, 也可能是供试土壤为深层红壤, 土壤N含量相对偏低造成的。

参考文献 [References]

- Elser JJ, Sterner RW, Corokhova E, Fngan WF, Markow TA, Conter JB, Hanrison JF, Hobbie SE, Odell GM, Weider LW. Biological stoichiometry from genes to eco-systems [J]. *Ecol Lett*, 2000, **3** (6): 540-550
- 贺金生, 韩兴国. 生态化学计量学: 探索从个体到生态系统的统一化理论[J]. 植物生态学报, 2010, **34** (1): 2-6 [He JS, Han XG. Ecological stoichiometry: searching for unifying principles from individuals to ecosystems [J]. *J Plant Ecol*, 2010, **34** (1): 2-6]
- 曾德慧, 陈广生. 生态化学计量学: 复杂生命系统奥秘的探索[J]. 植物生态学报, 2005, **29** (6): 1007-1019 [Zeng DH, Chen GS. Ecological stoichiometry: a science to explore the complexity of living systems[J]. *Acta Phytoecol Sin*, 2005, **29** (1): 1007-1019]
- 荣钺钺, 刘京涛, 夏江宝, 陆兆华, 郭彩虹. 莱州湾湿地桤柳叶片N、P生态化学计量学特征[J]. 生态学杂志, 2012, **31** (12): 3032-3037 [Rong QQ, Liu JT, Xia JB, Lu ZH, Guo CH. Leaf N and P stoichiometry of *Tamarix chinensis* L. in Laizhou Bay wetland, Shandong Province of East China [J]. *Chin J Ecol*, 2012, **31** (12): 3032-3037]
- 林志斌, 严平勇, 杨智杰, 万晓华, 陈光水. 福建万木林 101 种常见木本植物叶片N、P化学计量学特征[J]. 亚热带资源与环境学报, 2011, **6** (1): 32-38 [Lin ZB, Yan PY, Yang ZJ, Wan XH, Chen GS. Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 101 woody species in Wanmulin, Fujian Province [J]. *J Subtrop Resour Environ*, 2011, **6** (1): 32-38]
- 阎恩荣, 王希华, 郭明, 仲强, 周武. 浙江天童常绿阔叶林、常绿针叶林与落叶阔叶林的C:N:P化学计量特征[J]. 植物生态学报, 2010, **34** (1): 48-57 [Yan ER, Wang XH, Guo M, Zhong Q, Zhou W. C:N:P stoichiometry across evergreen broad-leaved forests, evergreen coniferous forests and deciduous broad-leaved forests in the Tiantong region, Zhejiang Province, eastern China [J]. *J Plant Ecol*, 2010, **34** (1): 48-57]
- Güsewell S, Koerselman W, Verhoeven JTA. Biomass N:P ratios as indicators of nutrient limitation for plant populations in wetlands [J]. *Ecol Appl*, 2003, **13** (2): 372-384
- Han WX, Fang JY, Guo DL, Zhang Y. Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 753 terrestrial plant species in China [J]. *New Phytol*, 2005, **168** (2): 377-385
- Tessier JT, Raynal DJ. Use of nitrogen to phosphorus ratios in plant tissue as an indicator of nutrient limitation and nitrogen saturation [J]. *J Appl Ecol*, 2003, **40** (3): 523-534
- Oleksyn J, Reich PB. Global patterns of plant leaf N and P in relation to temperature and latitude [J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2004, **101** (30): 11001-11006
- Gallardo A, Covelo F. Spatial pattern and scale of leaf N and P concentration in a *Quereus robur* population [J]. *Plant Soil*, 2005, **273** (1): 269-277
- Güsewell S. N:P ratios in terrestrial plants: variation and functional significance [J]. *New Phytol*, 2004, **164** (2): 243-266
- Elser JJ, Bracken ME, Cleland EE, Gruner DS, Harpole WS, Hillebrand H, Ngai JT, Seabloom EW, Shurin JB, Smith JE. Global analysis of nitrogen and phosphorus limitation of primary producers in freshwater, marine and terrestrial ecosystems [J]. *Ecol Lett*, 2007, **10** (12): 1135-1142
- Vitousek PM, Porder S, Houlton BZ, Chadwick OA. Terrestrial phosphorus limitation: mechanisms, implications, and nitrogen-phosphorus interactions [J]. *Ecol Appl*, 2010, **20** (1): 5-15
- 宾振钧, 王静静, 张文鹏, 徐当会, 程雪寒, 李柯杰, 曹德昊. 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 ZJ, Wang JJ, Zhang WP, Xu DH, Cheng XH, Li KJ, Cao DH. Effects of N addition on ecological stoichiometric characteristics in six dominant plant species of alpine meadow on the Qinghai-Xizang Plateau, China [J]. *J Plant Ecol*, 2014, **38** (3): 231-237]
- Lü XT, Reed S, Yu Q, He NP, Wang W, Han XG. Convergent responses of nitrogen and phosphorus resorption to nitrogen inputs in a semiarid grassland [J]. *Global Change Biol*, 2013, **19** (9): 2775-2784
- 钟全林, 程栋梁, 胡松竹, 贺利中, 唐承财, 文雅香, 邱剑飞, 李秀花. 刨花楠和华东润楠叶绿素含量分异特征及与净光合速率的关系[J]. 应用生态学报, 2009, **20** (2): 271-276 [Zhong QL, Cheng DL, Hu SZ, He LZ, Tang CC, Wen YX, Qiu JF, Li XH. Chlorophyll content and net photosynthetic rate of *Machilus pauhoi* and *M. leptophyll* [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2009, **20** (2): 271-276]
- 任书杰, 于贵瑞, 陶波, 王绍强. 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 SJ, Yu GR, Tao B, Wang SQ. Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 654 terrestrial plant species in NSTEC [J]. *Chin J Envir Sci*, 2007, **28** (12): 2665-2673]
- Wu TG, Yu MK, Wang GG, Dong Y, Cheng YR. Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across forty-two woody species in Southeast China [J]. *Biochem Syst Ecol*, 2012, **44**: 255-263
- Baldwin DS, Rees GN, Mitchell AM, Watson G, Williams J. The short-term effects of salinization on anaerobic nutrient cycling and microbial community structure in sediment from a freshwater wetland [J]. *Wetlands*, 2006, **26** (2): 455-464
- 刘广全, 赵士洞, 王浩, 土小宁, 龚立群. 锐齿栎林个体光合器官生长与营养季节动态[J]. 生态学报, 2001, **21** (6): 883-889 [Liu GQ, Zhao SD, Wang H, Tu XN, Gong LQ. Seasonal variation of growth and nutrient contents for photosynthetic organ of the sharp-tooth oak stands [J]. *Acta Ecol Sin*, 2001, **21** (6): 883-889]
- Lin Y, Sternberg L, da silveira L. Nitrogen and phosphorus dynamics and nutrient resorption of *Rhizophora mangle* leaves in south Florida, USA [J]. *Bull Mar Sci*, 2007, **80** (1): 159-169
- Orgeas J, Ourcival JM, Bonin. Seasonal and spatial patterns of foliar nutrients in cork oak (*Quercus suber* L.) growing on siliceous soils in Provence (France) [J]. *Vegetatio*, 2003, **164** (2): 201-211
- 弓晓静, 余明泉, 胡小飞, 郭恢财, 陈伏生. 氮磷添加对红壤区域城郊湿地松林凋落叶分解的影响[J]. 生态学杂志, 2010, **29** (12): 2327-2333 [Gong XJ, Yu MQ, Hu XF, Guo HC, Chen FS. Effects of nitrogen and phosphorus addition on leaf litter decomposition in a suburban slash pine plantation in red soil region of China [J]. *Chin J Ecol*, 2010, **29** (12): 2327-2333]
- 彭少麟. 热带亚热带恢复生态学研究与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 177-180 [Peng SL. Study and Application of Restoration Ecology in Tropical and Subtropical China. Beijing: Science Press, 2003: 177-

- 180]
- 26 刘洋, 张健, 陈亚梅, 陈磊, 刘强. 氮磷添加对巨桉幼苗生物量分配和C:N:P化学计量特征的影响[J]. 植物生态学报, 2013, **37** (10): 933-941 [Liu Y, Zhang J, Chen YM, Chen L, Liu Q. Effect of nitrogen and phosphorus fertilization on biomass allocation and C:N:P stoichiometric characteristics of *Eucalyptus grandis* seedlings [J]. *J Plant Ecol*, 2013, **37** (10): 933-941]
 - 27 Wright IJ, Reich PB, Cornelissen JHC. Assessing the generality of global leaf trait relationship [J]. *New Phytol*, 2005, **166** (2): 485-496
 - 28 Sterner RW, Elser JJ. Ecological Stoichiometry: the biology of elements from molecules to the biosphere[M]. Princeton University Press, 2002: 2-3
 - 29 平川, 王传宽, 全先奎. 环境变化对兴安落叶松氮磷化学计量特征的影响[J]. 生态学报, 2014, **34** (8): 1965-1974 [Ping C, Wang CK, Quan XK. Influence of environmental changes on stoichiometric traits of nitrogen and phosphorus for *Larix gmelinii* trees [J]. *Acta Ecol Sin*, 2014, **34** (8): 1965-1974]
 - 30 Wan GH. Plant traits and soil chemical variable during a secondary vegetation succession in abandoned fields on the Loess Plateau [J]. *Acta Bot Sin*, 2002, **44** (8): 990-998
 - 31 李化山, 汪金松, 法蕾, 赵秀海. 模拟氮沉降对油松幼苗生长的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2013, **19** (5): 774-780 [Li HS, Wang JS, Fa L, Zhao XH. Effects of simulated nitrogen deposition on seedling growth of *Pinus tabulaeformis* [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2013, **19** (5): 774-780]
 - 32 杨阔, 黄建辉, 董丹, 马文红, 贺金生. 青藏高原草地植物群落冠层叶片氮磷化学计量学分析[J]. 植物生态学报, 2010, **34** (1): 17-22 [Yang K, Huang JH, Dong D, Ma WH, He JS. Canopy leaf N and P stoichiometry in grassland communities of Qinghai-Tibetan Plateau, China [J]. *J Plant Ecol*, 2010, **34** (1): 17-22]
 - 33 Garnier E. Interspecific variation in plasticity of grasses in response to nitrogen supply population biology of grasses [J]. Cambridge University Press, 1998: 155-181
 - 34 朱秋莲, 邢肖毅, 张宏, 安韶山. 黄土丘陵沟壑区不同植被区土壤生态化学计量特征[J]. 生态学报, 2013, **33** (15): 4674-4682 [Zhu QL, Xing XY, Zhang H, An SS. Soil ecological stoichiometry under different vegetation area on loess hilly-gully region [J]. *Acta Ecol Sin*, 2013, **33** (15): 4674-4682]
 - 35 Aerts R, Malmer N. Growth-limiting nutrients in Sphagnum-dominated bogs subject to low and high atmospheric nitrogen supply [J]. *J Ecol*, 1992, **80** (1): 131-140
 - 36 Graciano C, Goya JF, Frangi JL, Guamet JJ. Fertilization with phosphorus increases soil nitrogen absorption in young plants of *Eucalyptus grandis* [J]. *For Ecol Manage*, 2006, **236** (2): 202-210
 - 37 Güsewell S, Koerselman W. Variation in nitrogen and phosphorus concentrations of wetland plants [J]. *Perspect Plant Ecol Evol Syst*, 2002, **5** (1): 37-61
 - 38 曾昭霞, 王克林, 刘孝利, 曾馥平, 宋同清, 彭晚霞, 张浩, 杜虎. 桂西北喀斯特森林植物-凋落物-土壤生态化学计量特征[J]. 植物生态学报, 2015, **39** (7): 682-693 [Zeng SX, Wang KL, Liu XL, Zeng FP, Song TQ, Peng WX, Zhang H, Du H. Stoichiometric characteristics of plants, litter and soils in karst plant communities of North-west Guangxi [J]. *J Plant Ecol*, 2015, **39** (7): 682-693]
 - 39 Koerselman W, Meuleman AFM. The vegetation N:P ratio: a new tool to detect the nature of nutrient limitation [J]. *J App Ecol*, 1996, **33** (6): 1441-1450
 - 40 Kerkhoff AJ, Enquist BJ, Elser JJ, Fagan WF. Plant allometry, stoichiometry and the temperature-dependence of primary productivity [J]. *Global Ecol Biogeogr*, 2005, **14** (6): 585-598
 - 41 刘万德, 苏建荣, 李帅锋, 郎学东, 张志钧, 黄小波. 云南普洱季风常绿阔叶林优势物种不同生长阶段叶片碳、氮、磷化学计量特征[J]. 植物生态学报, 2015, **39** (1): 52-62 [Liu WD, Su JR, Li SF, Lang XD, Zhang ZJ, Huang XB. Leaf carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometry at different growth stages in dominant tree species of a monsoon broad-leaved evergreen forest in Pu'er, Yunnan Province, China [J]. *J Plant Ecol*, 2015, **39** (1): 52-62]
 - 42 Wardle DA, Walker LR, Bardgett RD. Ecosystem properties and forest decline in contrasting long-term chronosequences [J]. *Science*, 2004, **305** (5683): 509-513
 - 43 Aerts R, de Caluwe H, Beltman B. Is the relation between nutrient supply and biodiversity co-determined by the type of nutrient limitation [J]? *Oikos*, 2003, **101** (3): 489-498