

DOI: 10.5846/stxb201811232545

林婉奇, 蔡金桓, 薛立. 不同密度樟树 (*Cinnamomum camphora*) 幼苗的生长和叶片性状对氮磷添加的响应. 生态学报, 2019, 39(18): - .
Lin W Q, Cai J H, Xue L. Responses of *Cinnamomum camphora* seedling growth and leaf traits to additions of nitrogen and phosphorous under different planting densities. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(18): - .

不同密度樟树 (*Cinnamomum camphora*) 幼苗的生长和叶片性状对氮磷添加的响应

林婉奇, 蔡金桓, 薛立*

华南农业大学林学与风景园林学院, 广州 510642

摘要: 人类活动改变了氮素从大气向陆地生态系统输入的方式和速率, 进而导致森林生态系统养分变化和失衡。研究氮磷添加对不同密度樟树 (*Cinnamomum camphora*) 幼苗生长和叶片性状的影响, 可以为全球氮磷沉降背景下亚热带地区樟树人工林的经营管理提供依据。本试验以 1 年生樟树幼苗为试验材料, 选择氯化铵 (NH_4Cl) 作为氮肥模拟大气氮沉降, 以二水合磷酸二氢钠 ($\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) 模拟磷添加。氮磷处理设置 CK、施 N、施 P 和施 N+P 4 个水平, 种植密度设置 10、20、40 和 80 株 $\cdot \text{m}^{-2}$ 4 个水平。实验数据表明: N、P 和 N+P 处理对樟树幼苗的苗高和地径均有促进作用, 且 N+P 处理对幼苗生长的促进效果最好。N、P 和 N+P 处理在整体上均能增加幼苗叶片的 SPAD 值, N 和 N+P 处理均增加了幼苗叶片的比叶面积 (SLA), 而 P 处理减少了幼苗的 SLA。随着种植密度的增大, N、P 和 N+P 处理下樟树平均单株幼苗的苗高、地径、SPAD 值呈现下降的趋势, 各施肥处理下叶片的 SLA 变化规律不明显。密度和氮磷添加对叶片的 SPAD 值产生显著的交互作用。

关键词: 氮添加; 磷添加; 种植密度; 樟树; 幼苗生长; 叶片性状

Responses of *Cinnamomum camphora* seedling growth and leaf traits to additions of nitrogen and phosphorous under different planting densities

LIN Wanqi, CAI Jinhuan, XUE Li*

South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China

Abstract: Human activities have changed the rate at, and the way in which nitrogen (N) is input from the atmosphere to terrestrial ecosystems, leading to changes in nutrients, and elemental imbalances in forest ecosystems. Many terrestrial ecosystems are currently experiencing increasing inputs of N and P from human activities. In recent years, increased N deposition in forests has occurred due to fossil fuel combustion, N-based fertilizer use, and other activities. It is predicted that N deposition will continue to increase worldwide. On the other hand, forest soils in southern China are more P-limited, because they are highly weathered and leached, and little P is released even from the weathering of primary P-bearing minerals. As a result, P fertilization is widely used in the subtropical forests of southern China. However, relatively little information is available about the effect of P addition on forest growth. Planting density is an important area of research in tree competition, which affects the utilization of plant resources and the acquisition of occupied space. Understanding the relationship between plant density and tree growth would help to estimate and quantify stand development patterns over time. As individual trees in a stand grow in size, individual competition for resources in high-density stands is more intense than in low-density stands. Although there are some studies about the effects of density or N and P additions on tree growth, no studies have systematically examined the effects of N and P additions on plant growth under different planting densities. In

基金项目: 中央财政林业科技推广示范项目 (2015-GDTK-07)

收稿日期: 2018-11-23; 网络出版日期: 2019-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: forxue@scau.edu.cn

this study, the effects of N and P additions on growth and leaf traits of *Cinnamomum camphora* seedlings under different planting densities were studied, in order to provide a basis for plantation ecosystem management in the subtropical region under global N and P deposition. In this study, NH_4Cl and $\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ were selected to simulate atmospheric N and P additions with 4 treatments (CK, N, P and N+P) and seedling density was set at 4 levels (10, 20, 40, and 80 seedlings $\cdot \text{m}^{-2}$). The results showed that N, P and N+P treatments all increased seedling height and ground diameter of *C. camphora* seedlings, and that the N+P treatment had the largest effect on seedling growth. N, P and N+P treatments increased the soil and plant analyzer development (SPAD), N and N+P treatments also increased the specific leaf area (SLA), whereas P treatment decreased the SLA. In seedlings treated with N, P, and N+P, seedling height, ground diameter, and SPAD decreased with increasing density, whereas the SLA of seedlings treated with different treatments changed irregularly. The interactive effect of density and N+P addition on SPAD of seedlings was significant.

Key Words: nitrogen addition; phosphorus addition; planting density; *Cinnamomum camphora*; seedling growth; leaf traits

工业革命以来,人类活动(如化石燃料燃烧,森林干扰和土地变换等)改变了氮素从大气向陆地生态系统输入的方式和速率,进而导致森林生态系统养分变化失衡^[1,2]。土壤中 N 和 P 的添加均能影响树木的生理代谢过程。氮素作为植物生长的必需元素,是构成植物各种光合酶、ATP 和 NADP+的重要成分^[3]。施 N 导致叶片氮含量的增加,从而促进了植物叶绿素浓度的升高以及生物量和光合碳的积累^[4]。相关研究指出,N 沉降增加了植物可利用 N 的含量,有助于植物的生长发育^[2,5,6]。

植物的生长主要由养分的吸收与利用决定,N 和 P 的吸收、同化和转运直接影响植物的生长发育^[7]。目前,国内外关于氮沉降对植物生长的影响已有较多研究。一般而言,N 添加在一定范围内能够促进植物的生长^[8,9],但是长期过量的 N 添加会抑制植物的生长速率,严重时还会导致植物死亡以及生态系统的衰退^[10]。Wang 等^[6]指出,幼苗生长主要取决于 N 沉降的速率。与 N 添加相比,P 添加在这方面的研究相对较少。杨晓霞等^[11]在研究氮磷添加对青藏高原高寒草甸植物的影响时发现,N 和 P 均促进了禾草的生长,但是 P 添加的促进作用更大。

种植密度是林分竞争的重要研究内容,影响着植物对环境资源的利用和所占有空间的获取^[12]。Xue 等^[13]报道密度影响尾叶桉的胸径生长,但是对树高生长的影响不明显。宿爱芝等^[14]的研究发现辣木(*Moringa oleifera*)的株高、地径和冠幅与种植密度之间表现出负相关关系。朱仕明等^[15]的研究也表明,高密度会抑制乐昌含笑(*Michelia chapensis*)的苗高和地径的生长,这主要是个体植株间对光照、水分和养分等资源竞争的结果^[16,17]。但是,肖玲玲等^[18]、黎磊和周道玮^[19]的研究却表明,高密度种植促进了樟树(*Cinnamomum camphora*)和红葱(*Allium cepa* var. *proliferum*)株高的生长。

樟树(*Cinnamomum camphora*)作为樟科樟属常绿乔木中经济价值最大的树种之一,是我国特有的珍费用材、芳香油类以及城镇园林绿化树种。有关学者对樟树的生长和光合^[20]、土壤氮矿化速率^[21]、土壤呼吸^[22]、凋落物及养分动态^[23]、生长和重量分配格局^[8]、繁殖方法^[24]以及逆境胁迫^[25,26]等进行了研究,但是尚未见到氮磷添加和种植密度的交互作用对樟树幼苗生长影响的报道。本研究选取樟树幼苗作为实验对象,对其生长形态进行了测定,旨在了解不同种植密度樟树幼苗对氮磷添加的响应机制,以期为全球背景下樟树人工林生态系统的经营管理提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验地位于广州市华南农业大学板栗园(113°21'E, 23°09'N),全年平均气温为 21.9℃,年降雨量约为 1736 mm,集中在 4 至 6 月,平均相对湿度 77%,水热同期,雨量充沛,属亚热带季风气候。土壤为花岗岩发育

而成的赤红壤。试验地环境光线充足,适合幼苗的生长。

1.2 试验设计

以广东省国森苗圃所提供的樟树 1 年生实生苗为试验材料,幼苗的平均苗高为 46.7 ± 3.38 cm,平均地径为 0.36 ± 0.07 cm。采用直径 35 cm,深 30 cm 的无纺布美植袋种植,基质为该试验地 0—20 cm 土层的土壤。

根据样地的氮沉降水平背景值以及参考同类研究方法^[27,28],大气氮沉降中近 3/4 为铵态氮,本试验选择氯化铵(NH_4Cl)模拟大气氮沉降,并且以二水合磷酸二氢钠($\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)模拟大气磷沉降。

试验时间为 2017 年 6 月至 9 月。试验采用 4×4 双因素析因设计 16 种组合(表 1)。氮磷沉降处理设置 4 个水平:不施肥(CK)、施 N 肥、施 P 肥和施 N+P 肥。N、P 和 N+P 施肥量分别为 $40 \text{ g m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ (NH_4Cl)、 $20 \text{ g m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ($\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)和 $40 \text{ g m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ (NH_4Cl) + $20 \text{ g m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ($\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)。种植密度设置 4 个水平:10、20、40 和 80 株/ m^2 (分别用密度 I、II、III 和 IV 表示),即在直径 35 cm 的美植袋中分别种植均匀 1、2、4 和 8 株幼苗,尽量保持每盆内的幼苗距离相近。N、P 和 N+P 施肥量分别为 NH_4Cl $3.84 \text{ g 袋}^{-1} \text{ a}^{-1}$ 、 $\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ $1.92 \text{ g 袋}^{-1} \text{ a}^{-1}$ 和 NH_4Cl $3.84 \text{ g 袋}^{-1} \text{ a}^{-1}$ + $\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ $1.92 \text{ g 袋}^{-1} \text{ a}^{-1}$ 。试验采用完全随机区组设计,4 个密度和 4 种施肥处理交叉共产生 16 个处理,每个处理 3 次重复,合计 48 个小区,每小区 16 株幼苗。根据处理水平的要求,模拟氮磷沉降时,将各处理每次所需质量的肥料溶于 12 升的水中,向每盆的土壤浇灌 200 ml 溶液,保证不会引起烧苗的现象,不施肥处理的只施等量的水。自 6 月起每月月初和中旬分 2 次向幼苗施肥直至收获,共施肥 8 次。

表 1 樟树幼苗氮磷和密度处理水平

Table 1 Levels of N and P treatments as well as density of *Cinnamomum camphora* seedlings ($n=3$)

密度 Density	处理 Treatments / ($\text{g m}^{-2} \text{ a}^{-1}$)			
	CK	NH_4Cl	$\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	$\text{NH}_4\text{Cl} + \text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
I (10 seedlings/ m^2)	0	40	20	40+20
II (20 seedlings/ m^2)	0	40	20	40+20
III (40 seedlings/ m^2)	0	40	20	40+20
IV (80 seedlings/ m^2)	0	40	20	40+20

1.3 地径和苗高测定

在 2017 年 5 月初测定幼苗的地径和苗高,作为初始值。在 2017 年 9 月底再测定一次幼苗的地径和苗高。每个处理随机选取 10 株长势一样的幼苗,每株幼苗选取 30 片健康无病虫害的叶片,采用便携式叶绿素 SPAD 仪测定各处理叶片的叶绿素相对含量,并测量其叶面积,以便求出比叶面积 SLA(比叶面积=叶面积/叶干重)。

1.4 数据处理

用 SAS 9.3 统计分析软件对生长形态进行 Duncan 多重比较,Microsoft Excel 2003 对数据进行平均值、标准偏差分析和作图。

2 结果与分析

2.1 氮磷添加下不同种植密度樟树幼苗的生长状况

2.1.1 平均单株幼苗苗高

N 和 N+P 处理的各密度幼苗的苗高均大于 CK,在密度 I 和 II 幼苗中,P 处理的幼苗苗高小于 CK,而密度 III 和 IV 的幼苗苗高相反。密度 III 幼苗的 N+P 处理苗高显著大于 CK($P < 0.05$)(图 1)。随着密度的增大,CK、N 和 P 处理的樟树幼苗苗高均呈现下降的趋势,除了 P 处理外,其余处理的苗高显著减小($P < 0.05$),N+P 处理的变化规律不明显。

2.1.2 平均单株幼苗地径

与 CK 相比,密度 I、II 和 III 幼苗中,N 和 N+P 处理均能促进樟树幼苗地径的增长,密度 I 和 II 幼苗中 N+

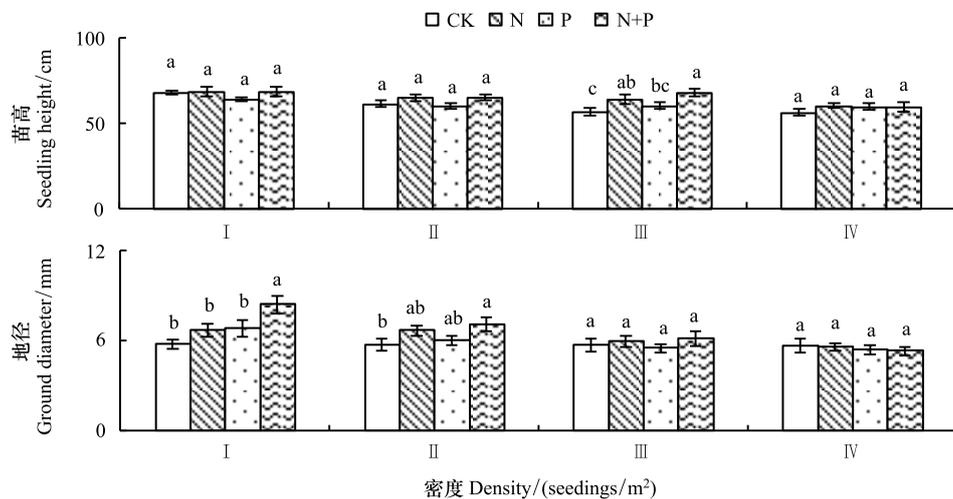


图1 不同处理和密度的樟树幼苗的苗高和地径

Fig. 1 Seedling height and Ground diameter of *Cinnamomum camphora* seedlings under different treatments and densities

同一测定内容用不同小写字母表示 0.05 水平上的显著差异

P 处理的地径显著增加 ($P < 0.05$)。密度 IV 幼苗中 N 和 N+P 处理的均抑制了幼苗地径的增长; 密度 I 和 II 幼苗中, P 处理促进幼苗地径的增长, 密度 III 和 IV 的幼苗则相反。随着密度的增大, N、P 和 N+P 处理的樟树幼苗地径均显著下降 ($P < 0.05$) (图 1)。

2.2 氮磷添加下不同种植密度樟树幼苗叶片性状

2.2.1 幼苗叶片的 SPAD 值

与 CK 相比, 除了密度 II 幼苗的 P 处理外, N、P 和 N+P 均增大了各密度的幼苗叶片的 SPAD 值, 其中密度 I 和 V 的三种处理、密度 II 和 III 的 N+P 处理达到显著水平 ($P < 0.05$) (图 2)。随着种植密度的增大, CK、N、P 和 N+P 处理的幼苗叶片 SPAD 值均呈现下降的趋势, 多达到显著差异 ($P < 0.05$)。

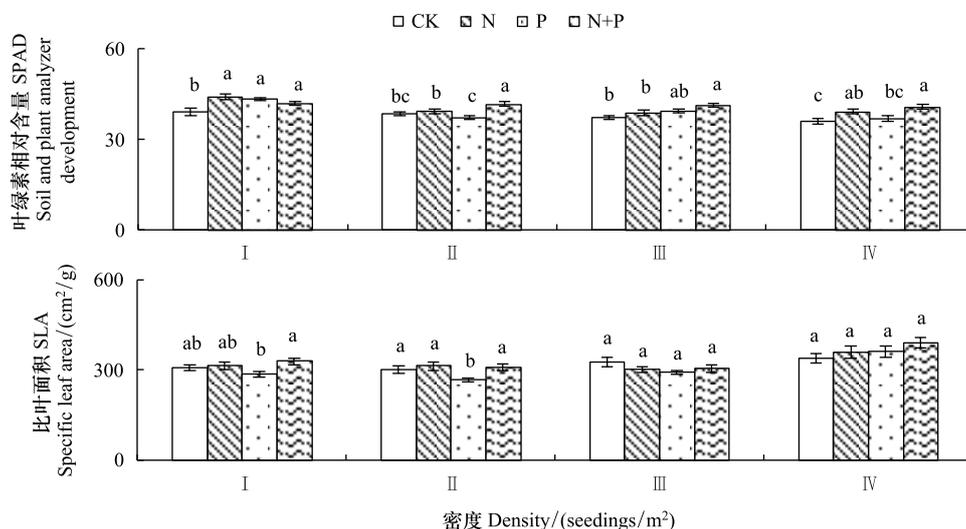


图2 不同处理和密度的樟树幼苗的 SPAD 值和比叶面积

Fig. 2 SPAD and SLA of *Cinnamomum camphora* seedlings under different treatments and densities

2.2.2 不同处理下幼苗叶片的比叶面积 SLA

与 CK 相比, 密度 I 和 II 幼苗中 N 和 N+P 处理的幼苗 SLA 增加, 密度 I、II 和 III 幼苗的 P 处理的幼苗 SLA 减少。密度 III 幼苗各处理的 SLA 减少, 而密度 IV 幼苗各处理的 SLA 增加, 但除了密度 I 和 II 幼苗的 P

处理外,各处理的幼苗 SLA 差异不显著(图 2)。随着种植密度的增加,各施肥处理下樟树幼苗的 SLA 变化规律不明显,但在密度 IV 幼苗中各处理的 SLA 均显著大于其他密度相同处理的幼苗($P<0.05$)。

2.3 氮磷添加与密度对樟树幼苗生长和叶片性状的交互作用

施肥和密度处理对樟树幼苗的苗高、地径和 SPAD 值均有显著影响($P<0.05$),对 SLA 没有显著影响,密度和氮磷添加对叶片 SPAD 值产生显著的交互作用($P<0.05$)(表 2)。

表 2 不同密度和施肥处理对樟树幼苗生长和叶片性状的交互作用

Table 2 Interaction between density and NP treatments on growth and leaf traits of *Cinnamomum camphora* seedlings

指标 Parameter	NP 处理 NP treatments		密度 Density		密度与 NP 处理的交互作用 Interaction between density and NP treatments	
	F	P	F	P	F	P
苗高 Seedling height	5.125	0.002	10.124	0.000	1.138	0.340
地径 Ground diameter	4.743	0.003	9.615	0.000	1.831	0.067
SPAD	16.300	0.000	18.328	0.000	3.149	0.001
比叶面积 SLA	0.385	0.765	1.953	0.141	0.144	0.998

3 讨论

3.1 氮磷添加对不同种植密度樟树幼苗生长状况的影响

幼苗是植物生长历程中最敏感的阶段,其生长指标在适应环境因子的变化过程中能表现出一定的可塑性,对于研究植物在氮磷沉降等养分环境下的适应机制具有指示性^[29]。本研究结果显示,N、P 和 N+P 处理对樟树平均单株幼苗的苗高和地径整体上有促进作用。N 作为植物生长阶段中最重要的养分限制元素,可以通过影响植物体内叶绿素和可溶性蛋白含量以及光合酶的合成与活性,进而引起光合作用的变化,最终导致植物的生长发育和形态构建发生改变^[30,31]。适量的 N 输入通过降低硝化菌、反硝化菌和植物对矿质氮的竞争,增加土壤 N 的有效性,从而促进植物的生长^[32]。其他氮添加实验也有相似的结果,如吴茜等^[30]还发现,施氮显著促进了秃瓣杜英(*Elaeocarpus glabripetalus*)、枫香(*Liquidambar formosana*)和木荷(*Schima superba*)的苗高和地径生长,但是对青冈(*Quercus glauca*)和马尾松(*Pinus massoniana*)的苗高促进作用却不显著。这可能是因为不同树种对 N 的利用和分配不同,因而对氮添加的响应也不相同^[9]。肖迪等^[8]研究三个种源的五角枫(*Acer mono*)幼苗对氮添加的响应时发现,苗高和地径在中高氮水平下达到最大值。王晓荣等^[33]的研究发现,氮添加亦能促进麻栎(*Quercus acutissima*)和栓皮栎(*Quercus variabilis*)的株高和地径增长。

本研究中,P 处理对幼苗生长的促进效果较弱,N+P 处理下的效果最好。这可能是因为土壤中的 Ca、Fe、Al 和土壤粘粒等通过沉淀、吸附、固定以及微生物吸收作用,将有效 P 转化为 Al-P、Fe-P、Ca₂-P 和 Ca₈-P 等闭合形态的难溶性磷,没有大幅增加 P 的有效性,故对幼苗的促进作用相对较弱^[34]。Elser 等^[35]和 Harpole^[36]等的研究也发现,N 和 P 共同添加对植物生长的促进效果优于单一添加,这是因为植物光合作用需要大量的酶(主要为 Rubisco 酶,N 为其主要组分)参与,而这类酶由核糖体(P 为其主要组分)合成。Agren 等^[37]指出,植物体内 N 和 P 在吸收和利用上相互依赖,并且 P 添加有利于促进生态系统中 N 利用效率的提高^[36,38],且本试验地为南方红壤地区,普遍缺磷,氮磷添加共同作用下给土壤大量输入了 N 和 P,使幼苗能够充分吸收养分,并把多余的 N 分配给磷酸酶以增强其活性,同时缓解 P 限制,故长势优于单一的 P 处理。N 和 P 对植物生理生态特性的影响还与树种类型、群落组成和土壤养分本底有关^[39]。刘双娥等^[40]的研究发现 N 添加促进了马占相思、木荷和马尾松幼苗的生长。庞丽等^[41]的研究表明,N 添加增加了马尾松和木荷的地上部分生长量,严重抑制了杉木幼苗的生长。庞丽等^[42]的研究发现,氮处理增加了马尾松根系有机酸和酸性磷酸酶的分泌,使植株极度缺磷,抑制了幼苗的生长。

本结果表明,随着种植密度的增加,樟树平均单株幼苗的苗高和地径均呈现下降的趋势。李洁等^[12]研究

不同种植密度对银合欢 (*Leucaena leucocephala*) 生长的影响发现, 高密度种植下银合欢的侧枝生长空间小, 枝叶重叠, 邻体干扰强, 叶片的光合速率减弱, 抑制了树木的生长^[43,44]。朱仕明等^[15]的研究也发现, 高种植密度抑制了乐昌含笑 (*Michelia chapensis*) 的地径和苗高的增长。因为种植密度会影响种群内个体可获取的资源量, 种植密度越大, 植物间距离越小, 相邻间植物对有限的光照、水分和养分的竞争愈加激烈, 因而幼苗的生长受抑制。本研究中, 在高种植密度下, N+P 处理下幼苗的生长状况优于 CK 处理。这可能是因为氮磷添加中 N 和 P 的大量输入缓解了高种植密度下幼苗间对养分的竞争程度。

3.2 氮磷添加对不同种植密度樟树幼苗 SPAD 和 SLA 的影响

外源性 N 或 P 的输入对植物叶片的生长和生理机能的影响主要体现在促进或抑制叶片生长、改变叶绿素含量从而促进或抑制光合速率以及改变叶片形态结构和养分状况^[45]。叶片是植物进行生理活动和发挥生态功能作用的主要器官^[17]。叶片中光合色素含量是反映植物光合能力的一个重要参数, 光合色素中的叶绿素对光能的吸收、传递、利用和光化学反应具有重要作用^[46]。叶片 SPAD 值表示的是叶绿素的相对含量, 与叶绿素含量呈正相关关系, 在一定程度上能够反映植物叶绿素含量的变化^[47,48]。本研究结果表明, 与 CK 处理相比, N、P 和 N+P 处理在整体上促进了幼苗叶片 SPAD 值的上升, 其中 N 和 N+P 处理的效果更好, 这是因为 N 是构成叶绿素的主要成分, 光合产物的运输离不开 P 的参与, 叶中的氮和磷的含量与光合速率密切相关, 氮磷添加处理有利于改善土壤养分状况, 促进叶片叶绿素含量的增加。随着密度的减少, 个体的空间逐渐增大, 幼苗对 N、P 及其他叶绿素合成元素的吸收量增加, 最终导致叶绿素含量水平的提高, 因此氮磷添加和低密度对叶片 SPAD 值产生显著的交互作用^[49]。

3.3 氮磷添加和种植密度樟树幼苗的交互作用

本研究中, 氮磷添加对幼苗高生长和地径所长具有显著正效应, 密度则具有显著负效应, 而氮磷添加和密度的交互作用对幼苗生长没有显著影响, 说明密度消除了氮磷添加对幼苗生长的正效应。氮磷添加促进了根系生长发育, 而增加的种植密度减少了幼苗根系生长发育的空间, 抑制了幼苗细根生长, 消除了因土壤养分增加而促进根系生长发育的正效应。叶片的 SPAD 可以反映叶片的光合能力。氮磷添加、密度及氮磷添加和密度的交互作用对叶片 SPAD 均产生显著影响。尽管氮磷添加对幼苗具有显著正效应, 但是密度为显著负效应, 前者正效应大于后者的负效应, 所以氮磷添加和密度的交互作用仍然显著促进了 SPAD 的增加。

参考文献 (References):

- [1] Chen F S, Niklas K J, Liu Y, Fang X M, Wan S Z, Wang H M. Nitrogen and phosphorus additions alter nutrient dynamics but not resorption efficiencies of Chinese fir leaves and twigs differing in age. *Tree Physiology*, 2015, 35(10): 1106-1117.
- [2] Wang M, Shi S, Lin F, Hao Z Q, Jiang P, Dai G H. Effects of soil water and nitrogen on growth and photosynthetic response of Manchurian Ash (*Fraxinus mandshurica*) seedlings in Northeastern China. *PLoS One*, 2012, 7(2): e30754.
- [3] 郭淑青, 李文金, 张仁懿, 王刚. 氮磷添加对金露梅叶片化学计量及光合特征的影响. *广西植物*, 2014, 34(5): 629-634.
- [4] Zhang Y X, Han Q Q, Guo Q X, Zhang S. Physiological and proteomic analysis reveals the different responses of *Cunninghamia lanceolata* seedlings to nitrogen and phosphorus additions. *Journal of Proteomics*, 2016, 146: 109-121.
- [5] Lu X K, Mo J M, Gilliam F S, Zhou G Y, Fang Y T. Effects of experimental nitrogen additions on plant diversity in an old-growth tropical forest. *Global Change Biology*, 2010, 16(10): 2688-2700.
- [6] Wang M, Zhang W W, Li N, Liu Y Y, Zheng X B, Hao G Y. Photosynthesis and growth responses of *Fraxinus mandshurica* Rupr. seedlings to a gradient of simulated nitrogen deposition. *Annals of Forest Science*, 2018, 75: 1.
- [7] Broadley M R, Escobar-Gutiérrez A J, Burns A, Burns I G. What are the effects of nitrogen deficiency on growth components of lettuce? *New Phytologist*, 2010, 147(3): 519-526.
- [8] 肖迪, 王晓洁, 张凯, 康峰峰, 何念鹏, 侯继华. 模拟氮沉降对五角枫幼苗生长的影响. *北京林业大学学报*, 2015, 37(10): 50-57.
- [9] 刘修元, 杜恩在, 徐龙超, 沈海花, 方精云, 胡会峰. 落叶松原始林树木生长对氮添加的响应. *植物生态学报*, 2015, 39(5): 433-441.
- [10] 王建宇, 王庆贵, 闫国永, 姜思领, 刘博奇, 邢亚娟. 原始云冷杉、红松林树木生长对氮沉降的响应. *北京林业大学学报*, 2017, 39(4): 21-28.
- [11] 杨晓霞, 任飞, 周华坤, 贺金生. 青藏高原高寒草甸植物群落生物量对氮、磷添加的响应. *植物生态学报*, 2014, 38(2): 159-166.
- [12] 李洁, 列志吻, 许松葵, 薛立, 黄威龙. 不同密度的银合欢林生长分析. *中南林业科技大学学报*, 2016, 36(6): 70-74.
- [13] Xue L, Pan L, Zhang R, Xu P P. Density effects on the growth of self-thinning *Eucalyptus urophylla* stands. *Trees*, 2011, 25(6): 1021-1031.
- [14] 宿爱芝, 郑益兴, 吴疆翀, 张燕平. 不同栽培密度对辣木人工林分枝格局及生物量的影响. *生态学杂志*, 2012, 31(5): 1057-1063.

- [15] 朱仕明, 肖玲玲, 薛立, 何霞, 王欣朵, 胡天成. 密度对乐昌含笑幼苗的生长和生物量的影响. 中南林业科技大学学报, 2015, 35(8): 77-80.
- [16] Xue L, Feng H F, Chen F X. Time-trajectory of mean component weight and density in self-thinning *Pinus densiflora* stands. European Journal of Forest Research, 2010, 129(6): 1027-1035.
- [17] Xue L, Jacobs D F, Zeng S C, Yang Z Y, Guo S H, Liu B. Relationship between above-ground biomass allocation and stand density index in *Populus × euramericana* stands. Forestry, 2012, 85(5): 611-619.
- [18] 肖玲玲, 朱仕明, 胡继文, 薛立, 何霞, 王欣朵. 不同密度条件下樟树幼苗生长和幼苗重量分配格局. 安徽农业大学学报, 2015, 42(3): 353-356.
- [19] 黎磊, 周道玮. 红葱种群地上和地下构件的密度制约调节. 植物生态学报, 2011, 35(3): 284-293.
- [20] 陈卓梅, 陈英旭, 杜国坚. 二氧化亚氮对樟树幼苗生长及光合作用的影响. 应用生态学报, 2009, 20(7): 1650-1656.
- [21] 赵大勇, 闫文德, 田大伦, 王光军, 郑威, 梁小翠. 不同施肥量对樟树与湿地松土壤氮矿化速率的影响. 中南林业科技大学学报, 2012, 32(5): 129-133.
- [22] 郑威, 闫文德, 王光军, 梁小翠, 张徐源. 施氮对亚热带樟树林土壤呼吸的影响. 生态学报, 2013, 33(11): 3425-3433.
- [23] 李忠文, 闫文德, 郑威, 梁小翠, 王光军, 朱凡. 亚热带樟树-马尾松混交林凋落物量及养分动态特征. 生态学报, 2013, 33(24): 7707-7714.
- [24] 邵孜裘. 香樟树的快速繁殖方法. 林业与生态, 2017, (6): 35-35.
- [25] 王卓敏, 郑欣颖, 薛立. 樟树幼苗对干旱胁迫和种植密度的生理响应. 生态学杂志, 2017, 36(6): 1495-1502.
- [26] Lie Z Y, Liu L Y, Xue L. Effects of drought stress on physiological characteristics of *Cinnamomum camphora* seedlings under different planting densities. International Journal of Agriculture & Biology, 2018, 20: 1437-1441.
- [27] 郑丹楠, 王雪松, 谢绍东, 段雷, 陈东升. 2010 年中国大气氮沉降特征分析. 中国环境科学, 2014, 34(5): 1089-1097.
- [28] 陈微微, 寇亮, 蒋蕾, 高文龙, 杨浩, 王辉民, 李胜功. 亚热带湿地松叶片多元素化学计量与养分回收对氮添加的短期响应. 应用生态学报, 2017, 28(4): 1094-1102.
- [29] Elberse I A M, Van Damme J M M, Van Tienderen P H. Plasticity of growth characteristics in wild barley (*Hordeum spontaneum*) in response to nutrient limitation. Journal of Ecology, 2003, 91(3): 371-382.
- [30] 吴茜, 丁佳, 闫慧, 张守仁, 方腾, 马克平. 模拟降水变化和土壤施氮对浙江古田山 5 个树种幼苗生长和生物量的影响. 植物生态学报, 2011, 35(3): 256-267.
- [31] 王建波, 钟海秀, 付小玲, 王继丰, 倪红伟. 氮沉降对小叶章光合生理特性的影响. 中国农学通报, 2013, 29(7): 45-49.
- [32] Lu X K, Mao Q G, Gilliam F S, Luo Y Q, Mo J M. Nitrogen deposition contributes to soil acidification in tropical ecosystems. Global Change Biology, 2014, 20(12): 3790-3801.
- [33] 王晓荣, 潘磊, 庞宏东, 郑京津, 王瑞文. 模拟氮沉降对亚热带栎属树种幼苗生长、生物量累积及光合特性的影响. 中南林业科技大学学报, 2016, 36(1): 78-85.
- [34] 王金路, 陈永忠, 张党权, 陈隆升, 彭邵锋. 不同磷源对油茶幼苗生长的影响. 中南林业科技大学学报, 2014, 34(5): 47-50.
- [35] Elser J J, Bracken M E S, Cleland E E, Gruner D S, Harpole W S, Hillebrand H, Ngai J T, Seabloom E W, Shurin J B, Smith J E. Global analysis of nitrogen and phosphorus limitation of primary producers in freshwater, marine and terrestrial ecosystems. Ecology Letters, 2007, 10(12): 1135-1142.
- [36] He J S, Wang L, Flynn D F B, Wang X P, Ma W H, Fang J Y. Leaf Nitrogen: Phosphorus Stoichiometry across Chinese grassland biomes. Oecologia, 2008, 155(2): 301-310.
- [37] Ågren G I, Wetterstedt J Å M, Billberger M F K. Nutrient limitation on terrestrial plant growth-modeling the interaction between nitrogen and phosphorus. New Phytologist, 2012, 194(4): 953-960.
- [38] Marklein A R, Houlton B Z. Nitrogen inputs accelerate phosphorus cycling rates across a wide variety of terrestrial ecosystems. New Phytologist, 2012, 193(3): 696-704.
- [39] 白雪, 程军回, 郑淑霞, 詹书侠, 白永飞. 典型草原建群种羊草对氮磷添加的生理生态响应. 植物生态学报, 2014, 38(2): 103-115.
- [40] 刘双娥, 李义勇, 方熊, 黄文娟, 龙凤玲, 刘菊秀. 不同氮添加量和添加方式对南亚热带 4 个主要树种幼苗生长的影响. 植物生态学报, 2015, 39(10): 950-961.
- [41] 庞丽, 周志春, 张一, 丰忠平. 三种南方主要造林树种苗木生长响应模拟 N 沉降的种间差异. 生态学杂志, 2016, 35(2): 300-307.
- [42] 庞丽, 张一, 周志春, 丰忠平, 储德裕. 模拟氮沉降对低磷胁迫下马尾松生长和磷效率的影响. 应用生态学报, 2014, 25(5): 1275-1282.
- [43] Xue L, Hagihara A. Density effects on organs in self-thinning *Pinus densiflora* Sieb. et Zucc. stands. Ecological Research, 2008, 23(4): 689-695.
- [44] Fang Y R, Zou X J, Lie Z Y, Xue L. Variation in organ biomass with changing climate and forest characteristics across Chinese forests. Forests, 2018, 9(9): 521.
- [45] Warren C R, Dreyer E, Adams M A. Photosynthesis-Rubisco relationships in foliage of *Pinus sylvestris* in response to nitrogen supply and the proposed role of Rubisco and amino acids as nitrogen stores. Trees, 2003, 17(4): 359-366.
- [46] 毛晋花, 邢亚娟, 马宏宇, 王庆贵. 氮沉降对植物生长的影响研究进展. 中国农学通报, 2017, 33(29): 42-48.
- [47] 姜丽芬, 石福臣, 王化田, 祖元刚. 叶绿素计 SPAD-502 在林业上应用. 生态学杂志, 2005, 24(12): 1543-1548.
- [48] 王强, 金则新, 彭礼琼. 氮沉降对乌药幼苗生理生态特性的影响. 应用生态学报, 2012, 23(10): 2766-2772.
- [49] 李林锋. 氮磷钾配方施肥对鸦胆子幼苗光合特性的影响. 江西农业大学学报, 2010, 32(6): 1136-1141.