

DOI: 10.5846/stxb201809041884

余明, 蔡金桓, 薛立. 樟树 (*Cinnamomum camphora*) 幼苗细根形态对氮磷添加和幼苗密度的响应. 生态学报, 2019, 39(20): - .
Yu M, Cai J H, Xue L. Responses of fine root morphology of *Cinnamomum camphora* seedlings to nitrogen and phosphorus additions and planting density. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(20): - .

樟树 (*Cinnamomum camphora*) 幼苗细根形态对氮磷添加和幼苗密度的响应

余 明, 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: 全球氮沉降对森林生态系统结构和功能的影响已成为现代生态学研究热点之一, 我国华南地区氮沉降的增长引起了土壤酸化和磷限制加剧等一系列生态问题。密度制约着植物个体对环境资源的吸收利用, 是自然界中十分重要的选择压力之一。因此研究樟树 (*Cinnamomum camphora*) 幼苗的细根形态对氮磷添加和密度的响应, 有利于了解亚热带树木根系对氮沉降和磷添加与林分密度的响应过程和机制, 并为全球变化背景下樟树林生态系统的管理提供依据。本研究以 1 年生樟树幼苗为试验材料, 选择氯化铵 (NH_4Cl) 作为氮肥以模拟大气氮沉降, 并且以二水合磷酸二氢钠 ($\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) 模拟磷添加, 氮磷处理设置 4 个水平, 即对照、施 N、施 P 和施 N+P; 种植密度设置 10、20、40 和 80 株/ m^2 4 个水平。测定各处理樟树幼苗细根的根长、表面积、体积和根尖数, 分析氮磷添加、密度和两者交互作用对樟树幼苗细根的影响。研究表明, 与对照处理相比, N、P 和 N+P 处理促进了幼苗细根长度、表面积、体积以及根尖数的增加。低密度条件下的 N 添加对幼苗根系形态的促进效果强于 P 添加。N+P 处理对 10、20、40 株/ m^2 幼苗根系形态的促进效果最佳, 而各处理对 80 株/ m^2 幼苗根系形态的促进效果均无显著性差异。随着种植密度的增大, 幼苗细根长度、表面积、体积和根尖数均减少。樟树幼苗的细根长度、表面积、体积和根尖数在各密度间和不同氮磷添加处理间均有显著性差异, 密度和氮磷处理间的交互作用对根系形态各指标均无显著影响。

关键词: 模拟氮磷沉降; 密度; 樟树; 幼苗; 根系形态

Responses of fine root morphology of *Cinnamomum camphora* seedlings to nitrogen and phosphorus additions and planting density

YU Ming, CAI Jinhuan, XUE Li*

South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China

Abstract: With the continuing deposition of atmospheric N and wide application of P fertilizer, N and P have become a major factor affecting the ecosystem C balance. Fine root morphological characteristics, such as the root length, surface area, volume, and tips, play a critical role in many functions, including nutrient absorption. Global N deposition and P addition induce changes in root morphology. Seedling density is an important factor affecting root morphology because of the enhanced resource competition among high density seedlings, which reflects the allocation ratio of photosynthetic C in the roots, and ultimately affects the overall plant C allocation balance. Understanding the effects of N and P additions and planting density on the fine root morphology is important to be able to improve fine root health. However, knowledge regarding the effects of N and P additions on the root morphology is limited, and it is still unclear how N and P additions and seedling density alter the fine root morphology of *Cinnamomum camphora* seedlings. In this study, the root morphology of *C. camphora* seedlings planted at different densities was evaluated, along with the root length, surface area, volume, and

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: 2018-09-04; 网络出版日期: 2019-00-00

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

tips, in order to reveal the effects of N and P additions and plant density on the fine root morphological characteristics of this species. One-year-old *C. camphora* seedlings were used as test materials, and NH_4Cl and $\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ were selected to simulate N deposition and P addition, respectively. N and P additions were performed with four different levels of treatment (control, N, P, and N+P), and seedlings were planted at four different densities (10, 20, 40, and 80 seedlings/ m^2). The results showed that the N, P, and N+P treatments increased the root length, surface area, volume, and tips of seedlings compared to those of the control treatment. The effect of N addition on root morphology was stronger than that of P addition under low planting densities. The N+P treatment had the greatest effect on the fine root morphology at densities of 10, 20, and 40 seedlings/ m^2 , while there was no significant difference in the effect of each treatment at 80 seedlings/ m^2 . With increased planting density, the length, surface area, volume, and tips of the seedling roots tended to decrease. The effects of different densities or treatments on the fine root length, surface area, volume, and tips of the seedlings were significantly different, but the interactive effect of density and N and P additions on the fine root morphology of the seedlings was not significant.

Key Words: Nitrogen and phosphorus additions; planting density; *Cinnamomum camphora*; root morphology

根系是植物吸收水分和养分的主要器官^[1],具有固定植物、保障其生长发育和维持生态系统养分循环等重要功能^[2]。根系形态与功能之间的密切联系能够反映植物适应土壤环境的策略,而细根形态,如根表面积、根长和根半径决定了植物争夺土壤养分的能力,这不仅与植株自身的遗传因素有关,且受到生境、外界干扰和土壤养分水平等因素的影响^[3]。人类活动使得氮沉降在过去的一个世纪显著增加^[4]。我国南方地区是氮沉降的一个重点区域^[5],另一方面,亚热带陆地生态系统通常受磷限制,苗圃地经常施磷肥以缓解磷元素的缺乏,因此氮沉降和磷添加会对幼苗根系形态产生重要影响。一些研究表明,土壤 N 的可利用性增加能够改变细根形态,如增加细根长度和表面积等,从而促进植物细根生长^[6,7],但也有不同的研究结果^[8]。此外,有报道称 P 流失会影响植物细根的形态结构^[9]。

林分密度能够影响植物个体可获取的资源数量,所以植物的生长特征极易受到密度的制约^[10]。目前对植物生理生态与种植密度的研究大多集中在地上部分,对植物根系部分的研究较少^[11]。此外,营养元素与林分密度的交互作用对植物影响的研究大多集中在氮素与密度的交互作用方面^[12-13],关于植物根系形态对氮添加^[14-15]及磷添加^[16]的响应也已有少量研究,但尚未见到磷添加和氮磷添加与密度交互作用对植物根系形态影响的报道。

樟树(*Cinnamomum camphora*)是亚热带地区广泛种植的常绿乔木。前人对樟树的研究主要集中在生理^[17-18]、凋落物量^[19-20]及分解^[21]和土壤特性^[22]等领域。作者以一年生樟树幼苗为实验材料,研究氮磷添加和密度对樟树幼苗根系形态的影响,旨在了解樟树根系对氮沉降、磷添加和林分密度的响应过程和机制,以期为全球变化背景下樟树林生态系统的管理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于广东省广州市华南农业大学板栗园(113°21'E, 23°09'N),属亚热带季风气候,全年水热同期,降雨量丰富。平均气温为 21.9℃,平均相对湿度 77%,年降雨量约为 1736 mm,4 至 6 月为雨季,7 至 9 月天气炎热,3 月、10 月和 11 月气温适中,12 至 2 月为温暖冬季。试验地光线充足,适合幼苗的生长,土壤类型为砂页岩发育的酸性红壤,土壤的磷含量较低^[23]。

1.2 试验设计

试验材料为广东省国森苗圃提供的 2016 年 3 月播种的樟树实生苗,幼苗平均株高为 0.47 m,平均地径为 0.36 cm,平均冠幅为 11.1 cm。采用直径 35 cm,深 30 cm 无纺布美植袋种植,基质为该试验地 0—20 cm 土层

的土壤。由于大气氮沉降中近 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($\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)模拟磷添加。我国华南地区氮沉降量约为 $4 \text{ g m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ [5,24],由于未来的 N 沉降持续增加,本研究的氮和磷添加量根据样地的氮沉降水平背景值以及参考同类研究方法 [25,26],模拟饱和 N 沉降水平,添加 NH_4Cl $40 \text{ g m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,磷添加量为 $\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ $20 \text{ g m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。

试验时间为 2017 年 6 到 9 月,采用 4×4 双因素析因设计。氮磷处理设置 4 个水平:不加 N 和 P(ck),加 N,加 P,加 N 和 P。N、P 及 N+P 的添加量分别为 NH_4Cl $40 \text{ g m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, $\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ $20 \text{ g m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, NH_4Cl $40 \text{ g m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ + $\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ $20 \text{ g m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。种植密度设置 4 个水平:10 株/ m^2 (密度 I)、20 株/ m^2 (密度 II)、40 株/ m^2 (密度 III)和 80 株/ m^2 (密度 IV)。相同种植密度的试验采用完全随机区组设计,共 16 个处理,3 次重复,48 个小区,每个小区 16 株幼苗。根据处理水平的要求,氮磷添加时,将各处理每次所需质量的肥料溶于 12 升的水中,向每袋的幼苗浇灌 200 ml 溶液,保证不会引起烧苗的现象。不施肥处理的只浇灌相同量的水。自 6 月起每月月初和月中分 2 次向幼苗施肥直至收获,共施肥 8 次。处理前后的土壤 pH 值及养分状况见表 1。

表 1 处理前和处理后的土壤 pH 值及养分状况(平均值 $\pm$ 标准差)
Table 1 Soil pH and nutrient content before and after treatment (means $\pm$ SD)

处理 Treatment		指标 Parameter				
		pH	有机质(g/kg) Organic matter	碱解氮(mg/kg) Alkalized N	有效磷(mg/kg) Available P	速效钾(mg/kg) Rapidly available K
处理前 Before treatment		4.02 $\pm$ 0.01	14.27 $\pm$ 0.04	57.40 $\pm$ 0.67	0.1 $\pm$ 0.01	38.56 $\pm$ 0.27
密度 I	ck	4.52 $\pm$ 0.07	16.28 $\pm$ 0.99	54.01 $\pm$ 3.08	1.95 $\pm$ 0.18	30.89 $\pm$ 2.52
Density I	N	4.10 $\pm$ 0.20	16.66 $\pm$ 0.57	60.19 $\pm$ 2.15	1.90 $\pm$ 0.37	15.62 $\pm$ 1.36
	P	4.36 $\pm$ 0.03	17.22 $\pm$ 1.45	58.59 $\pm$ 6.15	3.29 $\pm$ 0.37	24.93 $\pm$ 1.93
	N+P	4.11 $\pm$ 0.05	13.64 $\pm$ 0.97	52.75 $\pm$ 2.72	2.42 $\pm$ 0.16	18.50 $\pm$ 1.47
密度 II	ck	4.50 $\pm$ 0.04	14.62 $\pm$ 0.43	59.50 $\pm$ 4.67	2.40 $\pm$ 0.15	31.46 $\pm$ 5.93
Density II	N	4.20 $\pm$ 0.02	12.98 $\pm$ 0.56	50.35 $\pm$ 1.55	2.20 $\pm$ 0.37	14.81 $\pm$ 1.73
	P	4.41 $\pm$ 0.02	14.49 $\pm$ 0.40	52.75 $\pm$ 2.11	4.20 $\pm$ 0.21	26.75 $\pm$ 3.58
	N+P	4.32 $\pm$ 0.03	13.20 $\pm$ 0.71	48.52 $\pm$ 1.87	4.15 $\pm$ 0.32	25.05 $\pm$ 2.82
密度 III	ck	4.46 $\pm$ 0.06	14.47 $\pm$ 0.55	53.67 $\pm$ 2.13	2.55 $\pm$ 0.09	38.30 $\pm$ 5.67
Density III	N	4.31 $\pm$ 0.04	14.45 $\pm$ 0.15	53.78 $\pm$ 2.95	2.81 $\pm$ 0.25	25.72 $\pm$ 3.99
	P	4.49 $\pm$ 0.03	15.17 $\pm$ 0.15	58.59 $\pm$ 3.10	4.62 $\pm$ 0.17	26.54 $\pm$ 1.84
	N+P	4.19 $\pm$ 0.05	13.30 $\pm$ 0.66	52.06 $\pm$ 2.53	4.40 $\pm$ 0.17	24.74 $\pm$ 2.40
密度 IV	ck	4.74 $\pm$ 0.06	13.20 $\pm$ 0.73	46.23 $\pm$ 1.90	2.92 $\pm$ 0.07	48.88 $\pm$ 4.37
Density IV	N	4.41 $\pm$ 0.07	13.20 $\pm$ 0.87	56.87 $\pm$ 1.06	3.04 $\pm$ 0.23	29.32 $\pm$ 1.67
	P	4.66 $\pm$ 0.01	11.51 $\pm$ 0.36	41.77 $\pm$ 1.32	4.80 $\pm$ 0.42	46.83 $\pm$ 1.37
	N+P	4.14 $\pm$ 0.09	13.26 $\pm$ 0.32	52.41 $\pm$ 1.36	4.68 $\pm$ 0.06	24.03 $\pm$ 2.01

1.3 试验方法

试验结束时,各处理分别选取 4 株幼苗,将根系与地上部分分离,用去离子水将根系表面上的土壤颗粒及其他杂质清洗干净,将幼苗的完整根系放入已编号密封袋里,立即将其放置在温度为 -4°C 的冰箱内保存。

处理前,将根系样品从冰盒中取出。用根系扫描仪(中晶 ScanMaker i800 Plus)对根系进行扫描成像,利用图像分析软件(万深 LA-S,)和植物根系分析系统(杭州万深检测科技有限公司)对微细根(根茎 $\leq 2 \text{ mm}$)的形态特征进行分析,得到细根总长度、根系表面积、根系体积和根尖数等数据。

1.4 数据处理

用 SAS 9.3 统计分析软件对植物根系形态进行 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 结果分析

2.1 幼苗的细根长度

在达到 10 株/ m^2 (密度 I) 的种植密度后,随着种植密度增加,幼苗细根长度呈现下降趋势(图 1)。在同一密度下,N、P、N+P 处理对幼苗细根长度的整体表现为促进作用。与 ck 相比,N、P 和 N+P 处理的种植密度 I 幼苗的细根长度分别增加了 56.53%、24.12%、93.90%,种植密度 II 的幼苗分别增加了 40.61%、40.24%、144.41%,种植密度 III 的幼苗分别增加了 165.68%、222.38%、304.57%,种植密度 IV 的幼苗下分别增加了 267.62%、319.16%、267.93%。总体而言,N+P 处理对幼苗细根的促进效果最佳。

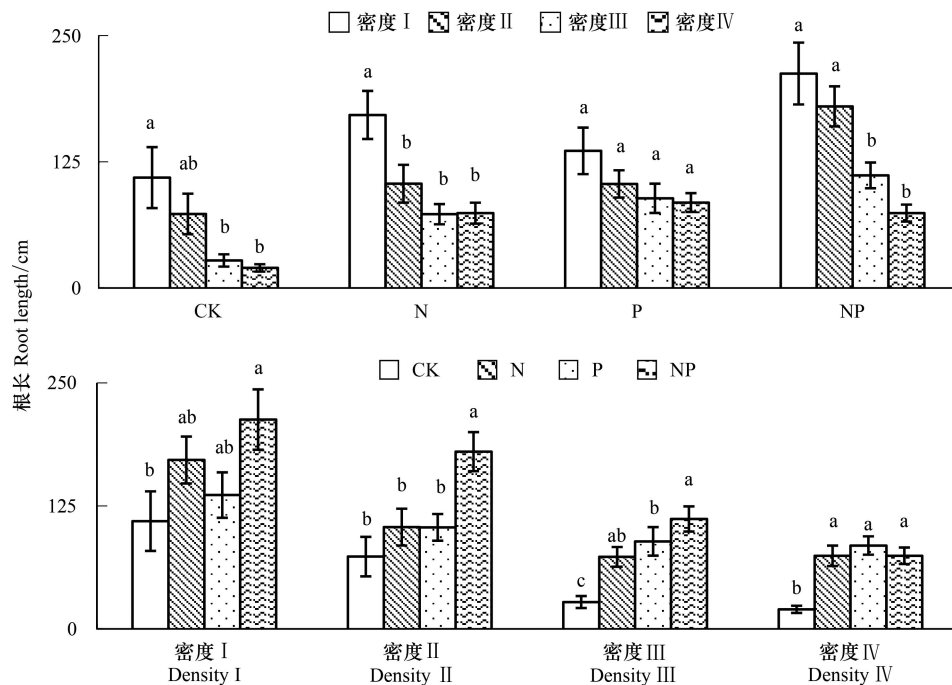


图 1 不同密度和处理下樟树幼苗的细根长度

Fig.1 Root length of *Cinnamomum camphora* seedlings under different densities and treatments

不同小写字母表示差异显著, $P < 0.05$

2.2 幼苗的细根表面积

在达到 10 株/ m^2 的种植密度后,幼苗的细根表面积随着种植密度的增加而减小(图 2)。与 ck 相比,N、P 和 N+P 处理的种植密度 I 幼苗的细根表面积分别增加了 56.07%、26.51%、87.26%,种植密度 II 的幼苗分别增加了 40.25%、44.47%、135.62%,种植密度 III 的幼苗分别增加了 165.90%、220.12%、303.05%,种植密度 IV 的幼苗分别增加了 199.54%、213.31%、207.97%。整体上,氮磷添加处理促进了幼苗细根表面积的增加,其中 N+P 的效果最好。

2.3 幼苗的细根体积

达到 10 株/ m^2 (密度 I) 的种植密度后,细根体积随着幼苗种植密度的增加而减小(图 3)。相同密度的 N、P 和 N+P 处理与 ck 相比,种植密度 I 的幼苗细根体积分别增加了 55.16%、28.43%、82.16%,种植密度 II 的幼苗分别增加了 39.70%、48.48%、128.25%,种植密度 III 的幼苗分别增加了 168.35%、220.10%、305.06%,种植密度 IV 的幼苗分别增加了 211.35%、202.98%、229.24%。总体而言,N、P 和 N+P 处理均有利于幼苗细根体积的增大,其中 N+P 处理对幼苗细根体积的促进作用较强。

2.4 幼苗的细根根尖数

在达到 10 株/ m^2 (密度 I) 的种植密度后,幼苗细根根尖数随着种植密度的增大而减少(图 4)。N、P、N+P

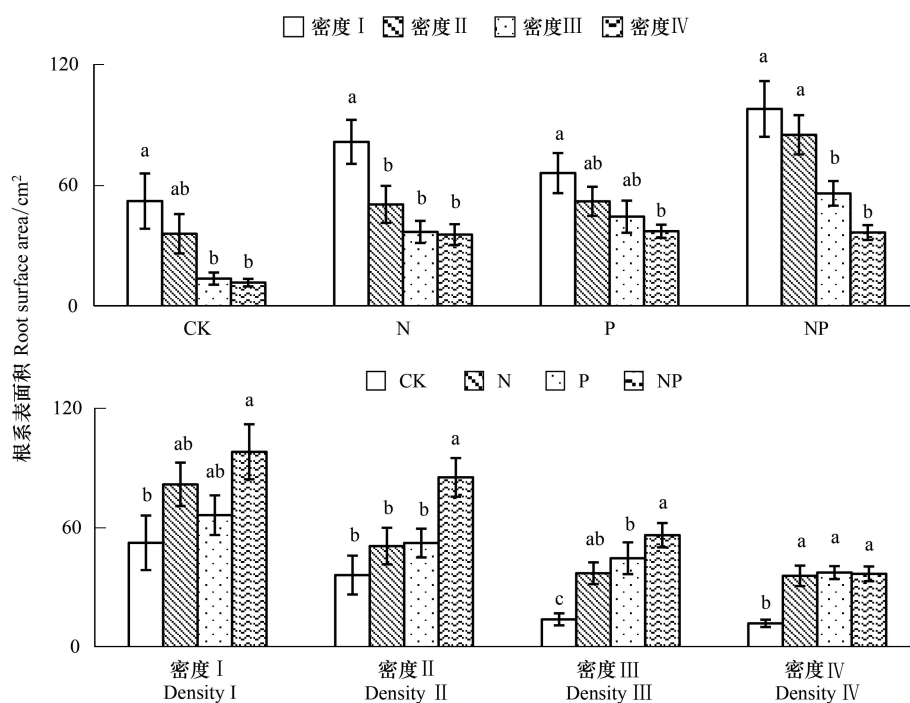


图2 不同密度和处理下樟树幼苗的细根表面积

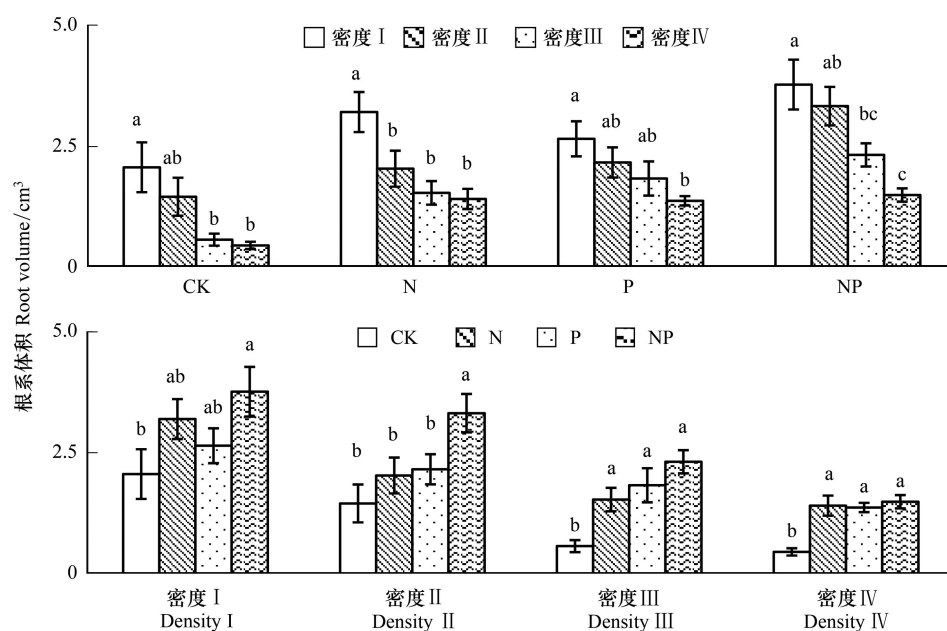
Fig.2 Root surface area of *Cinnamomum camphora* seedlings under different densities and treatments

图3 不同密度和处理下樟树幼苗的细根体积

Fig.3 Root volume of *Cinnamomum camphora* seedlings under different planting densities and treatments

处理对同一密度幼苗的细根根尖数的整体表现为促进作用。与ck相比,N、P和N+P处理的种植密度I的幼苗细根根尖数分别增加了68.20%、42.40%、69.35%,种植密度II的幼苗分别增加了81.7%、75.61%、150.00%,种植密度III的幼苗分别增加了132.14%、144.05%、255.36%,种植密度IV的幼苗分别增加了108.73%、145.78%、139.76%。除了高密度外,N+P处理的幼苗细根根尖数最多。

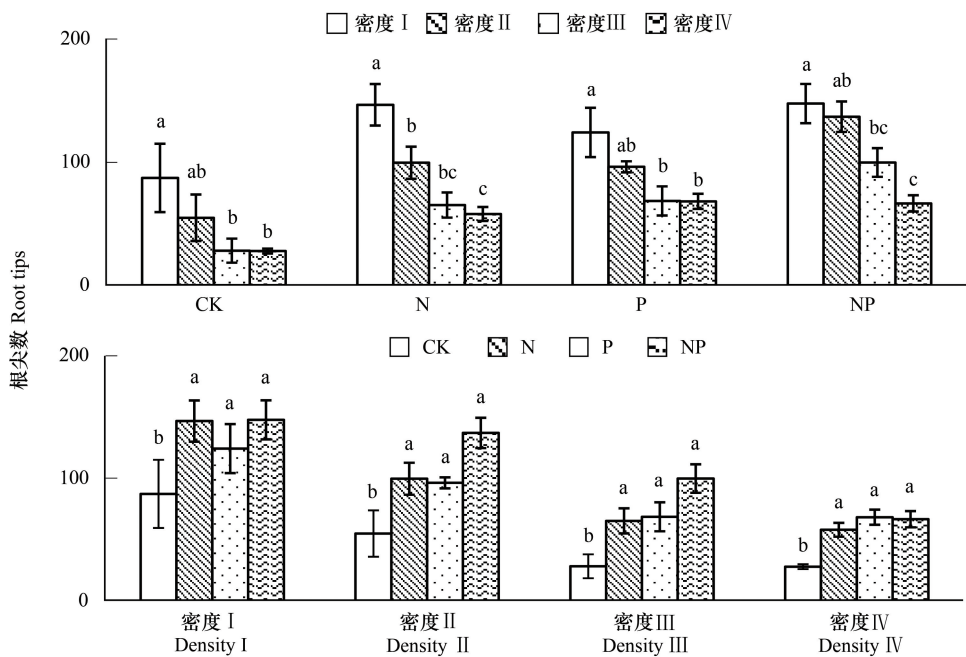


图 4 不同密度和处理下樟树幼苗的细根根尖数

Fig.4 Root tips of *Cinnamomum camphora* seedlings under different densities and treatments

2.5 密度和氮磷处理交互作用对细根各项指标的影响

由表 2 可知,樟树幼苗的细根长度、表面积、体积和根尖数在各密度间和不同氮磷添加处理间均有显著性差异,密度和氮磷处理间的交互作用对根形形态各指标均没有显著影响。

表 2 不同处理和密度对幼苗细根形态的交互作用

Table 2 Interaction between density and treatment of fine root morphology

指标 Parameter	密度 Density		N+P 处理间 N+P treatment		密度与处理交互作用 Interaction between density and treatment	
	F	P	F	P	F	P
细根长度 Root length	14.757	0.000	10.287	0.000	0.787	0.630
细根表面积 Root surface	9.709	0.000	12.329	0.000	0.663	0.738
细根体积 Root volume	4.266	0.010	7.422	0.000	0.938	0.502
细根根尖数 Root tips	8.230	0.000	4.617	0.007	1.409	0.212

3 讨论

土壤氮磷含量是植物生长的限制因素,施加氮磷肥能够维持和促进植物的快速生长^[7]。也有研究认为 N 沉降会引起土壤酸化以及重金属离子的活化,导致植物细根形态特征受到危害^[27,28],抑制植物细根的生长。而另一些研究则认为氮磷添加对细根形态未产生显著影响^[6,29,30]。这可能是因为氮沉降往往通过改变土壤状况来影响根系特征,且并存多种影响机制,这导致了不同物种和不同区域植被根系对 N 沉降响应的差异。另外,N 添加对根系形态的影响还可能取决于土壤环境对 N 添加的响应强度^[31]。在本研究中,氮浓度与根系生长之间关系密切,磷添加对樟树幼苗细根形态也有明显的促进效果。相比于对照,氮和磷添加均能促进植物的细根显著伸长,并且能使植物获得更大的细根长度、细根表面积、细根体积和根尖数。这可能是因为 N 的输入提高了土壤养分水平^[32]和植物净初级生产力^[33],有利于植物生物量的积累^[34],进而对幼苗细根形态各参数产生促进作用。试验地土壤中的磷素较为缺乏,磷添加处理有利于促进土壤的氮磷平衡,缓解土壤磷

的限制并提高氮素的利用效率,从而促进根系生长发育。

细根长度能够反映植物根系吸收养分的效率^[35]。普遍认为,外源性 N 和 P 会改变植物的根系系统的生长形态、生物量及生理活性以适应土壤养分的变化^[31],是植物获取土壤有效养分资源的生存策略^[36]。Noguchi^[37]的研究结果显示,与对照组相比,施氮肥促进了植物细根伸长率。陈海波等^[38]的研究也发现,N 添加增加了水曲柳(*Fraxinus mandschurica*)苗木细根长度的生长。也有研究认为模拟氮沉降会降低细根的生物量,因为植物根系要获取氮必须消耗大量的碳来进行交换^[39]。本研究中,模拟氮磷沉降处理促进了幼苗细根长度的增长,其中 N+P 处理优于其余处理。这可能是因为樟树幼苗处于旺盛生长期,对土壤氮的需求较大,所以施氮处理促进了根系的生长^[40]。此外,在土壤养分较为缺乏的情况下,通过促进土壤有效养分的增加可以加快细根的生长速率,从而产生不同的分支结构以适应环境变化^[41],且 N+P 处理能同时向土壤中输入 N 和 P,有效的缓解幼苗所受的 N 和 P 限制,从而促进植物根系的生长以吸收更多的养分。植物细根长度越大表明其不仅侧根水平穿插范围广,还可以往土壤更深处扎根,从而吸收更大范围的土壤表层和更深层的养分^[32]。

根系的表面积是植物细根的重要指标,根尖具有吸收功能,而根的体积与维持植物生长相关^[6],均反映根系的发达程度,且能够影响植物对养分和水分的吸收利用,是保证植物健康生长的重要因素之一^[42]。闫小莉等^[43]的研究报道,施肥能够促进欧美 108 杨(*Populus × euramericana* cv. 'Guariento')的细根表面积和体积的增长。本研究中,氮磷添加处理也促进了樟树幼苗细根体积、表面积和根尖数的增大,且 N+P 处理的效果优于单一 N 或 P 处理。因为外源性养分输入能够提高土壤养分有效性,从而影响细根的生产 and 生物量的累积,并且 N 和 P 共同输入有利于土壤有效养分的平衡,促进细根的生长,进一步增大其吸收利用水分和养分范围。根尖数的明显增加可能是根中的细胞分裂素增加而产生的结果^[44]。

植物根系部分对地下土壤养分资源的竞争是自然界中的普遍现象,甚至比地上部分的竞争更激烈^[45]。有研究表明,种植密度对北京侧柏(*Platycladus orientalis*)人工林根系形态产生显著影响^[34]。本研究表明,随着种植密度的增加,N、P 和 N+P 处理的幼苗细根长度、表面积、体积和根尖数呈现下降趋势。由此可见,幼苗间的竞争情况随着种植密度的增加而愈加激烈,高种植密度缩小了幼苗获取养分资源的空间,从而导致单株幼苗的养分吸收不足,抑制了幼苗细根的生长。此外,由于氮磷添加处理可以向幼苗土壤提供养分,在一定程度上缓解了株间竞争强度,所以 N、P 和 N+P 处理的幼苗细根形态指标在高密度时优于 ck。也有研究表明,植物根系的生长与分布状况受土壤 N 的影响较大^[33]。但是本研究中,只有在低种植密度下,N 和 N+P 处理的幼苗细根生长形态优于 P 处理,在高种植密度下其优势不明显。这可能是因为高种植密度幼苗对养分的竞争更加激烈,而本试验地区土壤的磷含量较低,不足以维持和促进幼苗的生长发育,而补充的氮素进一步加剧了 P 的匮乏程度^[46],从而限制了根系的生长。

本研究表明,氮磷添加对细根形态具有显著正效应,密度对细根形态具有显著负效应,而氮磷添加和密度的交互作用对细根形态没有显著影响,说明密度消除了氮磷添加对细根形态的正效应。华南地区的土壤缺磷,植物的生长和发育通常受到磷的限制,氮和磷的添加处理增加了土壤有效 P 的含量,促进了根系生长发育。随着种植密度的增大,ck、N 和 N+P 处理下幼苗土壤有机质呈现下降的趋势,且高种植密度减少了幼苗根系生长发育的空间,抑制了幼苗细根的生长,消除了因土壤养分增加而促进根系生长发育的正效应。

参考文献 (References):

- [1] Wells C E, Glenn D M, Eissenstat D M. Changes in the risk of fine-root mortality with age: a case study in peach, *Prunus persica* (Rosaceae). *American Journal of Botany*, 2002, 89(1): 79-87.
- [2] Guo D L, Mitchell R J, Withington J M, Fan P P, Hendricks J J. Endogenous and exogenous controls of root life span, mortality and nitrogen flux in a longleaf pine forest: root branch order predominates. *Journal of Ecology*, 2008, 96(4): 737-745.
- [3] 邓磊, 关晋宏, 张文辉. 辽东栋幼苗根系形态特征对环境梯度的响应. *生态学报*, 2018, 38(16): 5739-5749.
- [4] Galloway J N, Dentener F J, Capone D G, Boyer E W, Howarth R W, Seitzinger S P, Asner G P, Cleveland C C, Green P A, Holland E A, Karl

- D M, Michaels A F, Porter J H, Townsend A R, Vörösmarty C J. Nitrogen cycles: Past, present, and future. *Biogeochemistry*, 2004, 70(2): 153-226.
- [5] Chen H, Zhang W, Gilliam F, Liu L, Huang J, Zhang T, Wang W, Mo J. Changes in soil carbon sequestration in *Pinus massoniana* forests along an urban-to-rural gradient of southern China. *Biogeosciences*, 2013, 10(10): 6609-6616.
- [6] Meinen C, Hertel D, Leuschner C. Biomass and morphology of fine roots in temperate broad-leaved forests differing in tree species diversity: is there evidence of below-ground overyielding? *Oecologia*, 2009, 161(1): 99-111.
- [7] Razaq M, Salahuddin, Shen H L, Sher H, Zhang P. Influence of biochar and nitrogen on fine root morphology, physiology, and chemistry of *Acer mono*. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 5367.
- [8] 刘金梁, 梅莉, 谷加存, 全先奎, 王政权. 内生法研究施氮肥对水曲柳和落叶松细根生物量和形态的影响. *生态学杂志*, 2009, 28(1): 1-6.
- [9] Henry A, Kleinman P J A, Lynch J P. Phosphorus runoff from a phosphorus deficient soil under common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) and soybean (*Glycine max* L.) genotypes with contrasting root architecture. *Plant and Soil*, 2009, 317(1/2): 1-16.
- [10] 雷占兰, 周华坤, 刘泽华, 黄瑞灵, 姚步青, 王文颖, 赵新全. 密度氮肥交互处理下高寒地区燕麦的生长特性与生殖分配. *草业科学*, 2014, 31(6): 1110-1119.
- [11] 周伟, 陈信力, 李瑞霞, 闵建刚, 徐梅, 卢雯, 关庆伟. 林分密度对侧柏人工林细根形态的影响. *林业工程学报*, 2012, 26(4): 35-38.
- [12] 王君杰, 王海岗, 陈凌, 曹晓宁, 田翔, 乔治军. 密度-氮肥交互对糜子光合特性及干物质积累的影响. *西北农业学报*, 2014, 23(12): 83-89.
- [13] 燕亚飞, 田野, 方升佐, 宋浩, 匡兴建. 不同密度杨树人工林的外源无机氮输入及土壤无机氮库研究. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2015, 39(4): 69-74.
- [14] 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. *应用与环境生物学报*, 2013, 19(5): 774-780.
- [15] 宋平, 张蕊, 张一, 周志春, 丰忠平. 模拟氮沉降对低磷胁迫下马尾松无性系细根形态和氮磷效率的影响. *植物生态学报*, 2016, 40(11): 1136-1144.
- [16] 韦如萍, 胡德活, 陈金慧, 施季森. 低磷胁迫下杉木无性系根系形态及养分利用响应研究. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2018, 42(2): 1-8.
- [17] 张赐成, 韩广, 关华德, 鲍程辉, 章新平. 樟树和桂花树光合最适温度对环境温度改变的响应. *生态学杂志*, 2014, 33(11): 2980-2987.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 徐旺明, 闫文德, 李洁冰, 赵晶, 王光军. 亚热带4种森林凋落物量及其动态特征. *生态学报*, 2013, 33(23): 7570-7575.
- [21] 赵晶, 闫文德, 郑威, 李忠文. 樟树人工林凋落物养分含量及归还量对氮沉降的响应. *生态学报*, 2016, 36(2): 350-359.
- [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] 许松葵, 薛立. 6种阔叶树幼林的林地土壤特性. *华南农业大学学报*, 2010, 31(4): 76-81.
- [24] 陈瑶, 王法明, 莫其锋, 李钦禄, 邹碧, 李应文, 李晓波, 吴靖滔, 李志安. 氮磷添加对华南热带森林尾叶桉木质残体分解和养分动态的影响. *应用与环境生物学报*, 2015, 21(4): 747-753.
- [25] Aerts R, Van Logtestijn R S P, Karlsson P S. Nitrogen supply differentially affects litter decomposition rates and nitrogen dynamics of sub-arctic bog species. *Oecologia*, 2006, 146(4): 652-658.
- [26] 余汉基, 郑欣颖, 薛立, 蔡金桓. 外源性氮和磷对尾叶桉凋落叶分解的影响. *安徽农业大学学报*, 2017, 44(3): 409-414.
- [27] Huang J, Mo J M, Zhang W, Lu X K. Research on acidification in forest soil driven by atmospheric nitrogen deposition. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(6): 302-310.
- [28] Tian D S, Niu S L. A global analysis of soil acidification caused by nitrogen addition. *Environmental Research Letters*, 2015, 10(2): 024019.
- [29] Li W B, Jin C J, Guan D X, Wang Q K, Wang A Z, Yuan F H, Wu J B. The effects of simulated nitrogen deposition on plant root traits: A meta-analysis. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, 82: 112-118.
- [30] Kou L, Chen W W, Gao W L, Yang H, Wang H M, Li S G. Effects of mixture of branch order-based roots and nitrogen addition on root decay in a subtropical pine plantation. *Biology and Fertility of Soils*, 2015, 51(8): 947-957.
- [31] 陈冠陶, 郑军, 彭天驰, 李顺, 邱细容, 陈雨琴, 马豪宇, 涂利华. 扁刺栲不同根序细根形态和化学特征及其对短期氮添加的响应. *应用生态学报*, 2017, 28(11): 3461-3468.
- [32] 邱权, 潘昕, 李吉跃, 何茜, 苏艳, 董蕾. 速生树种尾巨桉和竹柳幼苗的光合特性和根系特征比较. *中南林业科技大学学报*, 2014, 34(1): 53-59.
- [33] Domenicano S, Coll L, Messier C, Berninger F. Nitrogen forms affect root structure and water uptake in the hybrid poplar. *New Forests*, 2011, 42

- (3): 347-362.
- [34] 徐程扬, 张华, 贾忠奎, 薛康, 杜鹏志, 王京国. 林分密度和立地类型对北京山区侧柏人工林根系的影响. 北京林业大学学报, 2007, 29(4): 95-99.
- [35] Gordon W S, Jackson R B. Nutrient concentrations in fine roots. *Ecology*, 2000, 81(1): 275-280.
- [36] Pregitzer K S, King J S, Burton A J, Brown S E. Responses of tree fine roots to temperature. *New Phytologist*, 2000, 147(1): 105-115.
- [37] Noguchi K, Nagakura J, Konôpka B, Sakata T, Kaneko S, Takahashi M. Fine-root dynamics in sugi (*Cryptomeria japonica*) under manipulated soil nitrogen conditions. *Plant and Soil*, 2013, 364(1/2): 159-169.
- [38] 陈海波, 卫星, 王婧, 王政权. 水曲柳苗木根系形态和解剖结构对不同氮浓度的反应. 林业科学, 2010, 46(2): 61-66.
- [39] Norby R J, Jackson R B. Root dynamics and global change: seeking an ecosystem perspective. *New Phytologist*, 2000, 147(1): 3-12.
- [40] 陈云玉, 熊德成, 邓飞, 许辰森, 冯建新, 史顺增, 钟波元, 陈光水. 土壤增温与氮添加对杉木幼苗细根径级根长分布的影响. 应用生态学报, 2016, 27(4): 1009-1014.
- [41] 郭伟, 宫浩, 韩士杰, 金阳, 王译焱, 冯圆, 王存国. 氮、水交互对长白山阔叶红松林细根形态及生产量的影响. 北京林业大学学报, 2016, 38(4): 29-35.
- [42] 李晓清, 代仕高, 龙汉利, 张炜, 辜云杰. 桢楠种源幼苗细根形态和生物量研究. 热带亚热带植物学报, 2016, 24(2): 208-214.
- [43] 闫小莉, 戴腾飞, 邢长山, 贾黎明, 张龙宁. 水肥耦合对欧美 108 杨幼林表土层细根形态及分布的影响. 生态学报, 2015, 35(11): 3692-3701.
- [44] 樊卫国, 葛慧敏, 吴素芳, 杨婷婷, 罗燕等. 氮素形态及对比对铁核桃苗生长及营养吸收的影响. 林业科学, 2013, 49(5): 77-84.
- [45] 王君龙, 王辉民, 付晓莉, 杨风亭, 陈伏生. 种内竞争和残落物覆盖对杉木和榿木细根形态特征的影响. 生态学杂志, 2015, 34(3): 596-603.
- [46] 苏波, 韩兴国, 渠春梅, 李贵才. 森林土壤氮素可利用性的影响因素研究综述. 生态学杂志, 2002, 21(2): 40-46.