

DOI: 10.5846/stxb201809141987

林婉奇, 蔡金桓, 薛立. 氮磷添加与不同栽植密度交互对樟树幼苗土壤化学性质的短期影响. 生态学报, 2019, 39(24): 9162-9170.

Lin W Q, Cai J H, Xue L. Short-term interactive effects of nitrogen and phosphorus additions and different planting densities on soil chemical properties of *Cinnamomum camphora* seedlings. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(24): 9162-9170.

氮磷添加与不同栽植密度交互对樟树幼苗土壤化学性质的短期影响

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: 研究氮磷添加对不同密度樟树 (*Cinnamomum camphora*) 幼苗土壤化学性质的影响, 以期为全球背景下樟树人工林生态系统的土壤养分管理提供依据。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, 其中 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 , 试验时间为 2017 年 6 月至 9 月。研究表明, 在各密度幼苗土壤中, N 和 N+P 处理引起 pH 值的显著下降, N、P 和 N+P 处理的土壤有机质和碱解 N 含量的变化规律不明显, P 处理的幼苗土壤全 P 含量上升, P 和 N+P 处理的土壤有效 P 含量增加, N+P 处理的土壤全 K 含量以及 N、P 和 N+P 处理的土壤速效 K 含量均下降。在 10、20 和 40 株/ m^2 幼苗的土壤中, P 处理的土壤全 N 含量高于 N 和 N+P 处理的, 而 80 株/ m^2 幼苗的土壤全 N 含量低于其他密度幼苗。随着种植密度的增加, 各施肥处理的土壤 pH、全 P、有效 P、全 K 和速效 K 含量均呈现上升趋势, 而施 N 和施 P 处理的土壤有机质呈现下降趋势, 各施肥处理的土壤碱解 N 含量变化规律不明显。施肥和密度处理对樟树幼苗土壤有机质、碱解氮和速效钾含量有显著的交互作用。

关键词: 氮添加; 磷添加; 种植密度; 樟树; 土壤化学性质

Short-term interactive effects of nitrogen and phosphorus additions and different planting densities on soil chemical properties of *Cinnamomum camphora* seedlings

LIN Wanqi, CAI Jinhuan, XUE Li*

South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China

Abstract: The functions of terrestrial ecosystems can be influenced by anthropogenic disturbances and global climate change, such as nitrogen (N) deposition and application of phosphorus (P) fertilizer. Atmospheric N compounds have increased sharply due to fossil fuel combustion, fertilizer use, and livestock husbandry development, which caused the atmospheric N deposition to increase. China has become the third largest N deposition area in the world followed by the United States and Europe. With further development of the economy, N deposition will be increasingly serious in China, especially in the developed southern China. An excess of N deposition can cause forest ecosystem N saturation, soil acidification, phosphorus limitation in the forest ecosystems. The acidic soils suffer from severe phosphorus deficiency in southern China. Thus P fertilizer is often applied in forestry production. But there are few reports on the effect of P addition or N+P addition on forest soils. The soil chemical properties were also influenced by N deposition and P fertilizer in forest ecosystem. Planting density can affect soil fertility by tree growth, completion of soil resource, and nutrient return from litter

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: 2018-09-14; 网络出版日期: 2019-09-17

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

and root secretion. However, the responses of soil chemical properties to the N and P additions and planting density remain unclear. To date, no studies focused on the interactive effects of N and P additions and planting density on soil chemical properties in the southern China. The effects of N and P additions on soil chemical property were investigated in different densities of *Cinnamomum camphora* seedlings in order to provide a basis for the forest soil nutrient management. The study was conducted from June to September in 2017 using one-year-old *C. camphora* seedlings as test materials. We selected NH_4Cl and $\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ to simulate atmospheric N and P additions with four treatments including CK (without nutrient added), N ($40 \text{ g NH}_4\text{Cl m}^{-2} \text{ a}^{-1}$), P ($20 \text{ g NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O m}^{-2} \text{ a}^{-1}$), and N+P ($40 \text{ g NH}_4\text{Cl m}^{-2} \text{ a}^{-1} + 20 \text{ g NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O m}^{-2} \text{ a}^{-1}$). The seedling density was set at 4 levels (10, 20, 40, and 80 seedlings/ m^2). The results showed that in all density seedlings, N and N+P treatments significantly decreased soil pH, whereas soil organic matter and alkaline N treated with N, P, and N+P treatments changed irregularly. At the same time, soil total P content treated with P and available P content treated with P and N+P increased, and soil total K treated with N+P and available K content treated with N, P, and N+P decreased. The soil total N content treated with P was higher than that of N and N+P treatments in the density 10, 20, and 40 seedlings $\cdot \text{m}^{-2}$, whereas it was lower than other density seedlings in the density 80 seedlings/ m^2 . The soil pH and the contents of total P, available P, total K, and available K treated with different fertiliser treatments increased with increasing seedling density. The content of soil organic matter treated with N or P decreased with increasing seedling density. The soil alkaline N treated with different fertiliser treatments changed irregularly. The interactive effects of density and N and P additions on soil organic matter, alkaline N and available K of seedlings were significant.

Key Words: N addition; P addition; planting density; *Cinnamomum camphora*; soil chemical property

氮(N)和磷(P)是植物生长发育的主要限制性元素,两者之间的动态平衡影响着生态系统的碳循环过程,对全球气候调节具有重要意义^[1-2]。由于化石燃料的燃烧和化学氮肥的广泛使用,大气中的氮越来越多地沉积到土壤中,我国已成为继欧洲、北美之后的第三大氮沉降区^[3-4]。磷沉降主要来源于生物质燃烧、花粉和工业生产等产生的气溶胶和颗粒^[5]。土壤中的磷素输入除了大气磷沉降之外,磷肥的广泛使用、植物凋落物降解和岩石风化也是其输入的重要方式^[6]。氮磷添加可以通过影响土壤微生物的活性、土壤酸碱度以及植物生长状况使土壤的养分含量发生变化。由于N和P的生物化学循环紧密耦合,大量的氮沉降使得土壤的磷限制进一步加剧^[7]。目前,国内外关于氮磷沉降对森林土壤的影响已有一定的研究,例如,赵阳等^[8]的研究表明,氮添加使土壤硝化速率下降,氨化速率上升;Lu等^[9]报道了氮沉降对半干旱草原氮磷吸收的影响。亚热带林的红壤具有缺磷的特点,因而磷添加能促进林木生长,增加对土壤有效氮的吸收而引起土壤全氮下降^[10]。董喜光等^[11]发现P添加通过增加土壤微生物数量和促进了凋落物分解而提高了土壤养分含量;外源性P也增加了地中海西班牙冷杉(*Abies fabri*)的土壤氮含量^[12]。朱仕明等^[13]报道了氮磷交互作用对藜蒴(*Castanopsis fissa*)人工林土壤养分及生化特性的影响;郑欣颖等^[14]研究了氮磷交互作用对马尾松(*Pinus massoniana*)凋落叶分解及土壤特性的影响;Mao等^[15]探讨了长期氮磷交互作用对热带森林土壤酸化的影响;Meyer等^[16]对氮磷交互作用控制热带土壤表土和底土的有机碳矿化进行了研究。

种植密度可以通过影响光照和土壤微环境来改变土壤有机碳的输入和输出^[17]。不同的种植密度会造成土壤根系的分布、代谢和吸收能力及土壤疏松程度的差异,进而对土壤的理化性质产生影响。目前有关种植密度的研究主要集中在农作物^[18-20]以及人工林^[21-23],如赵汝东等^[24]的研究发现,适宜的种植密度有利于提高马尾松林下土壤有机物质的降解、土壤有机氮向有效态氮的转化和土壤中芳香类物质的分解,从而提高土壤养分含量,但是鲜有幼苗种植密度对土壤特性影响的报道^[13, 25]。

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,是我国特有的珍贵用材和经济树种,以及亚热带地区植被恢复和城镇园林绿化的重要树种^[26]。有关学者对樟树进行了一定的研究,例如王卓敏等^[27]研究了干旱胁迫和种植密度对樟树幼苗生理特性的影响,肖玲玲等^[28]报道了不同密度

下樟树幼苗的生长和重量分配格局,赵晶等^[29]发现了樟树林凋落物对氮沉降响应的规律,赵大勇等^[30]报道了氮添加对樟树群落土壤氮矿化速率的影响,郑威等^[31]研究了施氮对亚热带樟树林土壤呼吸的影响,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土壤特性影响的报道。本研究选取樟树幼苗作为实验对象,对其土壤化学性质进行了测定,旨在了解樟树幼苗土壤化学性质对氮磷添加和林分密度的响应过程和机制,以期为全球背景背景下樟树人工林生态系统的养分管理提供依据。

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植物园(113°21'E, 23°09'N),属亚热带季风气候,水热同期,雨量充沛,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%。土壤为花岗岩发育的赤红壤。试验环境光线充足,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,幼苗平均株高为 0.47 m,平均地径为 0.36 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。

根据样地的氮沉降水平背景值以及参考同类研究方法^[32-33],大气氮沉降中近 3/4 为铵态氮,本试验选择氯化铵(NH₄Cl)模拟大气氮沉降,并且以二水合磷酸二氢钠(NaH₂PO₄·2H₂O)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,共 16 种组合。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 NH₄Cl₄₀ g m⁻² a⁻¹、NaH₂PO₄·2H₂O 20 g m⁻² a⁻¹和 NH₄Cl 40 g m⁻² a⁻¹+NaH₂PO₄·2H₂O 20 g m⁻² a⁻¹。种植密度设置 4 个水平:10、20、40 和 80 株/m²(分别以密度 I、II、III 和 IV 表示),即在直径为 35 cm 的 4 个美植袋中分别均匀种植 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 NH₄Cl 3.84 g 袋⁻¹ a⁻¹、NaH₂PO₄·2H₂O 1.92 g 袋⁻¹ a⁻¹和 NH₄Cl 3.84 g 袋⁻¹ a⁻¹+NaH₂PO₄·2H₂O 1.92 g 袋⁻¹ 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,不施肥处理的只施对应量的水。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。本试验的全过程均在野外同一个试验地点,确保了各处理的环境条件包括光、温度、湿度、降水一致。采集试验地点 0—20 cm 一个土层的土壤,充分混合后装入无纺袋,故各处理前幼苗的土壤基本理化性质没有显著性差异。樟树幼苗处理前的土壤基本理化性质见表 1。

表 1 樟树幼苗处理前土壤基本理化性质(平均值±标准差)

Table 1 Soil chemical property of *Cinnamomum camphora* seedlings before treatments (mean±standard deviation)

pH	有机质 Organic matter/ (g/kg)	全氮 Total N/ (g/kg)	全磷 Total P/ (g/kg)	全钾 Total K/ (g/kg)	碱解氮 Alkaline N/ (mg/kg)	有效磷 Available P/ (mg/kg)	速效钾 Available K/ (mg/kg)
4.02±0.01	14.27±0.04	0.62±0.01	0.17±0.01	3.23±0.02	57.40±0.67	0.1±0.01	38.56±0.27

1.3 土壤样品采集和测定

试验结束时,不同处理的幼苗土壤各随机确定 5 袋,用直径 3 cm 的土钻采集土壤样品,取土深度为 0—30 cm,将土壤样品混合均匀,剔除植物残根和大于 2 mm 的石子等杂物,装入密封塑料袋,标记挂签,带回实验室测量土壤理化性质,指标包括 pH、有机质、全氮、碱解氮、全磷、速效磷、全钾和速效钾。

将水和土样以 2.5:1 混合后用 pH 计测定土壤 pH 值;有机质用重铬酸钾容量法测定,全 N 用半微量凯氏法测定;用氢氧化钠碱熔法将土壤样品熔融后提取待测液,用钼蓝比色法测全 P,火焰光度计测全 K。碱解 N 用碱解扩散法测定;用 0.5 mol/L 的碳酸氢钠提取土壤样品后,用钼蓝比色法测速效 P;用 1 mol/L 的中性醋

酸钠提取土壤样品后,用火焰光度计测速效 K^[34]。

1.4 数据处理

用 SAS 9.3 统计分析软件对土壤理化性质进行 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 不同处理幼苗的土壤 pH 和有机质

与 CK 相比,N 和 N+P 处理引起各密度幼苗土壤的 pH 值的显著下降($P<0.05$),而 P 处理的 pH 值与 CK 处理无显著差异。此外,除了密度 IV,土壤 pH 值随着密度的增加而呈上升趋势($P<0.05$) (图 1)。

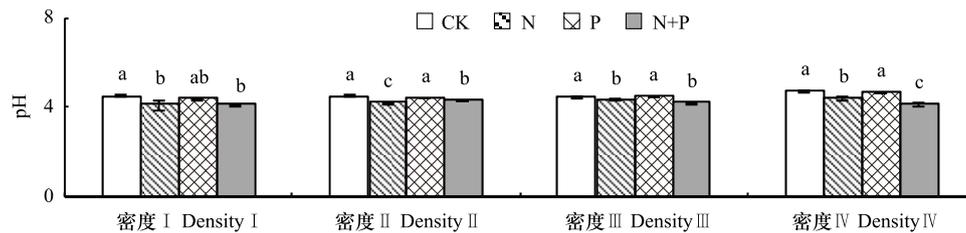


图 1 不同处理和密度的樟树幼苗土壤 pH

Fig.1 Soil pH 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

与 CK 相比,密度 I 和 III 幼苗土壤的 N+P 处理的有机质显著减少($P<0.05$),而各密度幼苗土壤的 N 和 P 处理及密度 II 和 IV 幼苗土壤的 N+P 处理与 CK 无显著差异。随着密度的增大,CK、N 和 P 处理的土壤有机质呈现下降的趋势,而 N+P 处理的则变化幅度不大(图 2)。

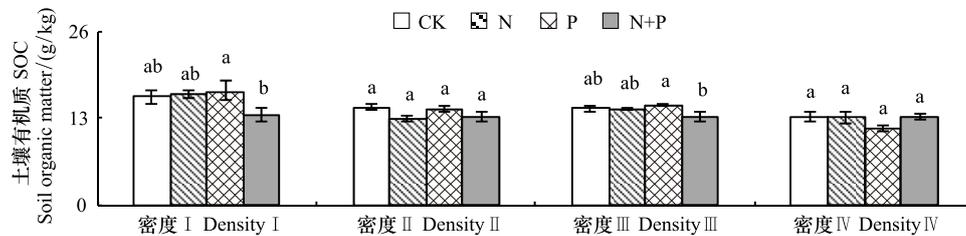


图 2 不同处理和密度的樟树幼苗的土壤有机质含量

Fig.2 Soil organic matter content of *Cinnamomum camphora* seedlings under different treatments and densities

2.2 不同处理下幼苗的土壤 N、P 和 K 含量

与 CK 相比, N+P 处理的密度 I 幼苗的土壤全 N 含量显著降低($P<0.05$),其余密度幼苗的 N、P 和 N+P 处理的与 CK 无显著差异。在密度 I、II、III 幼苗的土壤中,P 处理的土壤全 N 含量高于 N 和 N+P 处理的。密度 IV 幼苗土壤的全 N 含量低于其他密度幼苗(图 3)。

与 CK 相比,N 和 P 处理的密度 I 幼苗土壤的碱解 N 含量增加,N、P 和 N+P 处理的密度 II 幼苗的土壤碱解 N 含量显著下降($P<0.05$),P 处理的密度 III 幼苗土壤碱解 N 含量上升,N 和 N+P 处理的密度 IV 幼苗土壤碱解 N 含量显著上升($P<0.05$),P 处理的下降。总体来看,随着密度的增大,各施肥处理的土壤碱解 N 规律不明显(图 4)。

与 CK 对比,N 处理的密度 I 和 II 幼苗土壤的全 P 含量下降,密度 III 和 IV 幼苗土壤的全 P 含量上升,P 处理的各密度幼苗土壤的全 P 含量上升。随着密度的增大,幼苗土壤全 P 含量呈现上升的趋势(图 5)。

与 CK 相比,P 和 N+P 处理的各密度幼苗的土壤有效 P 含量显著增加($P<0.05$)。随着种植密度的增加,

各施肥处理的土壤有效 P 含量呈现上升的趋势(图 6)。

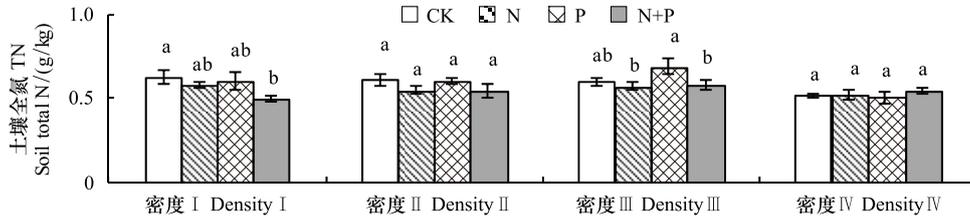


图 3 不同处理和密度的樟树幼苗的土壤全氮含量

Fig.3 Soil total N content of *Cinnamomum camphora* seedlings under different treatments and densities

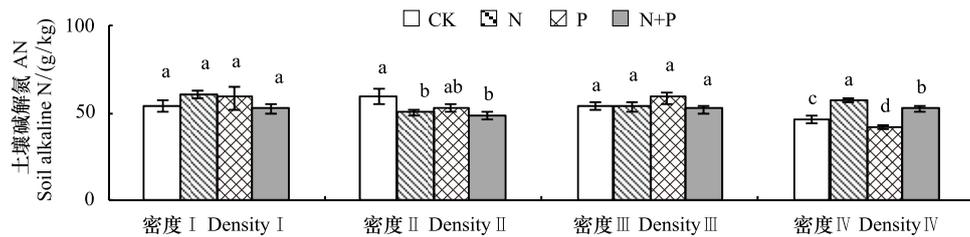


图 4 不同处理和密度的樟树幼苗的土壤碱解氮含量

Fig.4 Soil alkaline N content of *Cinnamomum camphora* seedlings under different treatments and densities

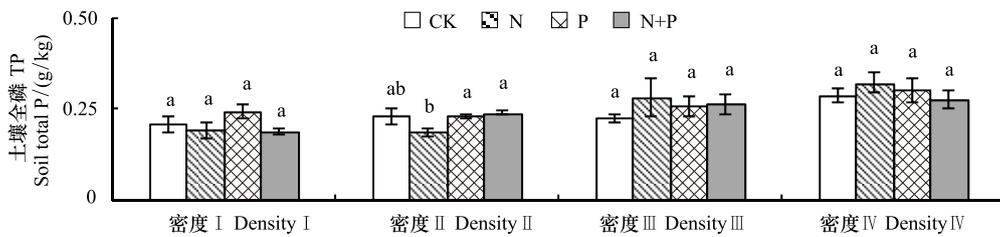


图 5 不同处理和密度的樟树幼苗的土壤全磷含量

Fig.5 Soil total P content of *Cinnamomum camphora* seedlings under different treatments and densities

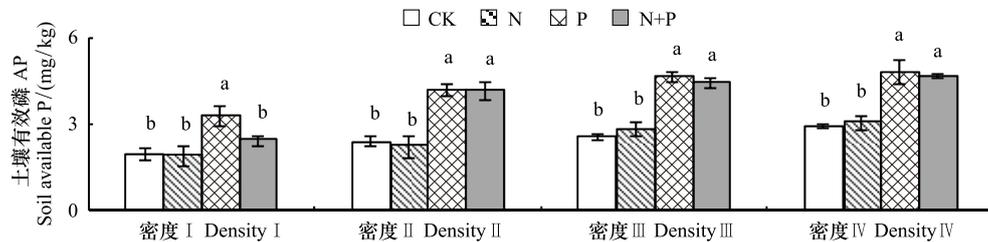


图 6 不同处理和密度的樟树幼苗的土壤有效磷含量

Fig.6 Soil available P content of *Cinnamomum camphora* seedlings under different treatments and densities

与 CK 相比,N 和 P 处理的各密度幼苗土壤的全 K 含量变化无规律,N+P 处理的土壤全 K 含量下降。随着幼苗密度的增加,各施肥处理的土壤全 K 含量呈现上升趋势(图 7)。

与 CK 组相比,N、P 和 N+P 处理的各密度幼苗的土壤速效 K 含量显著减少($P < 0.05$)。各施肥处理的土壤速效 K 含量随幼苗密度的增大而上升(图 8)。

2.3 氮磷添加与密度对樟树幼苗土壤化学性质的交互作用

由表 2 可知,施肥除了对土壤全磷和碱解氮没有显著影响外,对 pH 和其他养分指标均有显著影响($P <$

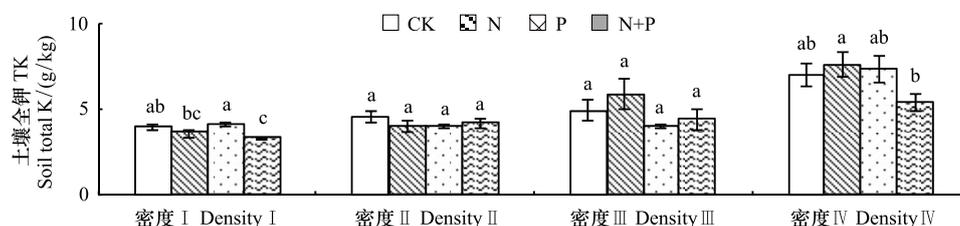


图 7 不同处理和密度的樟树幼苗的土壤全钾含量

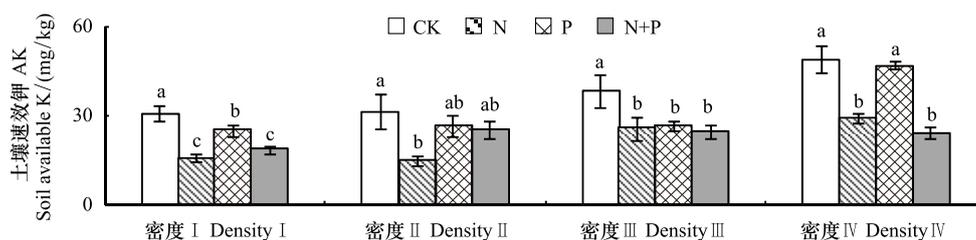
Fig.7 Soil total K content of *Cinnamomum camphora* seedlings under different treatments and densities

图 8 不同处理和密度的樟树幼苗的土壤速效钾含量

Fig.8 Soil available K content of *Cinnamomum camphora* seedlings under different treatments and densities

0.05); 密度处理对樟树幼苗土壤的 pH 和所有的养分指标均有显著影响 ($P < 0.05$), 施肥和密度处理的交互作用对樟树幼苗土壤有机质、碱解氮和速效钾含量产生显著的负效应 ($P < 0.05$), 对幼苗土壤的 pH 和其他养分指标没有显著影响。

表 2 施肥处理和密度对樟树幼苗土壤化学性质的交互作用

Table 2 Interaction between NP treatments and density in soil chemical properties of *Cinnamomum camphora* seedlings

指标 Parameter	NP 处理 NP treatments		密度 Density		密度与处理交互作用 Interaction between density and NP treatments	
	F	P	F	P	F	P
pH	25.165	0.000	6.301	0.001	1.894	0.069
有机质 SOC	2.940	0.040	13.951	0.000	2.092	0.043
全氮 TN	3.320	0.025	5.278	0.003	1.632	0.125
全磷 TP	0.609	0.611	11.028	0.000	1.035	0.423
全钾 TK	3.103	0.033	32.979	0.000	1.714	0.104
碱解氮 AN	1.256	0.297	4.483	0.006	3.223	0.003
有效磷 AP	55.287	0.000	26.152	0.000	1.547	0.151
速效钾 AK	22.495	0.000	17.381	0.000	2.329	0.024

3 讨论

3.1 氮磷添加对不同种植密度樟树幼苗土壤 pH 和有机质的影响

土壤酸碱度是土壤重要的基本理化性质, 而 pH 值是表征酸碱性的一个重要指标, 对土壤养分的储存、转化和有效性有重要的影响^[35]。本研究中 N 和 N+P 处理均能使樟树幼苗土壤的 pH 显著降低, 这与苏渝钦等^[36]报道的氮磷添加降低中亚热带常绿阔叶林土壤 pH 的结果一致。土壤的 pH 值与铵态氮和硝态氮输入与输出平衡状态有着重要联系, 本研究中氮添加所输入的铵态氮产生的硝化作用是导致土壤酸化的主要原因, 土壤硝化作用产生的 H^+ 和 NO_3^- 大量淋溶, 带走 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 Na^+ 等碱性盐基离子, 可以导致土壤 pH 值下降。

森林土壤碳库占陆地生态系统土壤碳库的 70% 以上,是植物生长发育和光合作用的重要影响因子^[37]。土壤有机碳的矿化作用能够直接对土壤养分的供给和释放、土壤质量的维持、温室气体以及土壤微生物、酶活性等造成影响^[38]。氮沉降对土壤有机碳的影响较为复杂,目前的研究发现氮沉降对土壤有机碳含量有促进作用^[39]、抑制作用^[40]和无明显作用^[41]。Danielaf 等^[42]指出,土壤有机碳对氮磷添加的响应与植被类型、土壤类型和氮磷添加的形式、水平以及时间长短有关。本研究中,与 CK 相比,N+P 处理会引起土壤有机质含量下降。这可能是因为 N+P 处理对土壤大量输入了限制性养分 N 和 P,刺激了土壤微生物和酶活性,使其对土壤有机质的分解速率加快,从而导致土壤有机质含量减少^[43]。另外,本试验时期处于雨季,降雨量大可能导致了 C 的淋溶流失^[44]。

3.2 氮磷添加对不同种植密度樟树幼苗土壤 N、P 和 K 含量的影响

氮是组成植物遗传物质和蛋白质的重要元素,植物营养主要来源于土壤氮素,氮的有效性有利于森林生态系统结构和功能的调节。大气氮素主要以无机态的形式沉降,无机态主要由硝态氮和铵态氮组成^[45]。本研究 N 和 N+P 处理引起了幼苗土壤中全 N 含量的下降,与赵阳等^[8]和李琛琛等^[46]的研究结果不一致。这可能是因为 N 和 N+P 处理能给土壤输入大量的 NH_4^+ ,氨化作用增强,由于华南地区降雨量大,铵态氮的淋溶损失大于 N 添加量,导致 N 的流失^[39]。

土壤中磷素是森林生态系统生产力的限制性养分元素,主要来源于矿物岩石(钙磷灰石和氟磷灰石)的缓慢风化^[12]。本研究中,与 CK 处理相比,P 处理有利于幼苗土壤全 P 含量的升高。孟范平等^[47]发现,P 处理能为土壤提供充足的 P,增加的土壤有效性 P 很容易被因土壤酸化而活化的 Al^{3+} 结合成低溶性化合物,有利于全 P 的增加。另外,华南地区赤红壤富含 Fe,易与有效性 P 结合而增加全 P 含量。速效 P 是指土壤中被植物直接吸收利用的磷组分,是土壤 P 养分供应水平高低的指标^[48]。土壤有效 P 包括可以被植物直接利用的无机形态(主要为 $\text{H}_2\text{P}_2\text{O}_7^{4-}$ 、 HPO_4^{2-} 和 PO_4^{3-})和小分子有机磷,主要来源于磷酸盐矿物的溶解和吸附固定态磷的释放,包括无机磷的溶解、吸附态磷的解吸、有机磷的矿化以及磷在迁移过程中与其他土壤组分的反应等。本研究中,P 和 N+P 处理能够促进幼苗土壤有效 P 含量的增加,这与朱仕明等^[13]的研究结果一致,可能是因为华南地区酸性土壤对磷的吸附作用较强,磷的大量沉降导致土壤吸附率达到饱和状态,因而土壤磷吸附率下降,饱和后多余的无机磷便留在土壤中^[27]。陈美领等^[12]的研究也发现,P 和 N+P 处理能够向土壤中输入大量的 P,有助于促进有效 P 含量的升高。

K 是植物生长发育过程所必需的大量元素之一,在植物的生长代谢过程中具有重要作用^[40]。全 K 包括矿物 K、缓效态 K 和速效 K 三种形态,矿物 K 和缓效 K 难以被植物吸收,而速效 K 则可以直接被作物吸收利用,是衡量土壤供钾水平的重要指标^[49],速效 K 在土壤中易淋溶流失。本研究表明,各密度林分 N+P 处理的土壤全 K 含量的降低,可能是因为土壤中的 K^+ 极易受到 H^+ 和 Al^{3+} 浓度的影响,并与其竞争吸附点,在 pH 升高时土壤固 K 能力较强^[50]。由于 N+P 处理下的 N 添加所造成的土壤酸化会使土壤的固 K 能力下降,导致土壤全 K 含量的降低。另外,N+P 处理中过量的 N 输入导致土壤中的 K^+ 伴随着土壤中多余的 N(NO_3^- 形式)从土壤中淋溶并流失,从而引起速效 K 含量的下降^[51]。

本结果表明,随着种植密度的增大,各施肥处理幼苗土壤的 pH 值呈现上升趋势,CK、N 和 N+P 处理的幼苗土壤有机质呈现下降的趋势,而全 P 和有效 P、全 K 和速效 K 含量表现出上升的趋势。因为种植密度越高,单位面积根系越密集,其覆盖土壤的面积越大,而根系分泌物中的糖类和氨基酸及维生素等可以为植物根际微生物提供充足的养分,从而引起微生物的大量繁殖,根际微生物数量的增加和活性的提高能够促进酶活性,进而促进土壤有机化质的分解和矿化作用,最终提高土壤有效养分含量,所以表现出土壤有机质含量下降,其余养分含量升高的现象^[52]。

3.3 氮磷添加和密度对樟树幼苗土壤化学性质的交互作用

本研究中,氮磷添加和密度均对幼苗土壤有机质含量具有显著负效应,因而二者的交互作用对幼苗土壤有机质含量产生负作用。N+P 处理为土壤输入了大量的限制性养分 N 和 P,提高了土壤微生物活性和多样

性,有助于土壤有机质的分解和释放,引起有机质含量的下降。同时随着种植密度增加,土壤单位面积的根系越密集,根系分泌糖类、氨基酸和维生素等养分越多,养分的增加刺激了土壤微生物和酶的活性,使其对土壤有机质的分解速率加快,故氮磷添加、密度及氮磷添加和密度的交互作用均引起幼苗土壤有机质含量的减少。氮磷添加对土壤碱解氮含量没有显著影响,而密度显著减少了土壤碱解氮含量,其中密度的作用大于氮磷添加,因而二者的交互作用显著减少了幼苗土壤的碱解氮含量。氮磷添加显著减少了幼苗土壤的速效钾含量,密度显著增加了幼苗土壤的速效钾含量,其中氮磷添加的作用大于密度,因而二者的交互作用对幼苗土壤的速效钾含量具有显著负效应。

本试验研究氮磷添加和林分密度对樟树幼苗土壤化学性质的短期影响,旨在为全球化背景下樟树人工林生态系统的养分管理提供参考。由于试验时间较短,施肥对森林生态系统的影响具有滞后性,施肥和密度处理的交互作用包含许多物理生物化学反映,并受凋落物和土壤微生物等因素影响,且本试验只是基于 1 年生的樟树幼苗,因而存在一定的局限性。有关施肥和密度处理对林分土壤的长期影响需要结合凋落物和土壤微生物深入研究。

参考文献 (References):

- [1] Wang R, Goll D, Balkanski Y, Hauglustaine D, Boucher O, Ciais P, Janssens I, Penuelas J, Guenet B, Sardans J, Bopp L, Vuichard N, Zhou F, Li B G, Piao S L, Peng S S, Huang Y, Tao S. Global forest carbon uptake due to nitrogen and phosphorus deposition from 1850 to 2100. *Global Change Biology*, 2017, 23(11): 4854-4872.
- [2] Chen H, Chen M L, Li D J, Mao Q G, Zhang W, Mo J M. Responses of soil phosphorus availability to nitrogen addition in a legume and a non-legume plantation. *Geoderma*, 2018, 322: 12-18.
- [3] Lü C Q, Tian H Q. Spatial and temporal patterns of nitrogen deposition in China: synthesis of observational data. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2007, 112(D22): D22S05.
- [4] Hietz P, Turner B L, Wanek W, Richter A, Nock C A, Wright S J. Long-term change in the nitrogen cycle of tropical forests. *Science*, 2011, 334(6056): 664-666.
- [5] Mahowald N, Jickells T D, Baker A R, Artaxo P, Benitez-Nelson C R, Bergametti G, Bond T C, Chen Y, Cohen D D, Herut B, Kubilay N, Losno R, Luo C, Maenhaut W, McGee K A, Okin G S, Siefert R L, Tsukuda S. Global distribution of atmospheric phosphorus sources, concentrations and deposition rates, and anthropogenic impacts. *Global Biogeochemical Cycles*, 2008, 22(4): GB4026.
- [6] 陈立新, 乔璐, 段文标, 黄兰英, 马海娟. 温带森林磷沉降-水系统输出-迁移动态特征及对土壤磷影响. *土壤学报*, 2012, 49(3): 454-464.
- [7] 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.
- [8] 赵阳, 张驰, 赵竑绯, 徐小牛. 氮磷添加对亚热带常绿阔叶林土壤氮素矿化的影响. *生态学杂志*, 2013, 32(7): 1690-1697.
- [9] Lü X T, Reed S, Yu Q, He N P, Wang Z W, Han X G. Convergent responses of nitrogen and phosphorus resorption to nitrogen inputs in a semiarid grassland. *Global Change Biology*, 2013, 19(9): 2775-2784.
- [10] 李洁, 薛立. 氮磷沉降对森林土壤生化特性影响研究进展. *世界林业研究*, 2017, 30(2): 14-19.
- [11] 董喜光, 张越, 薛立, 肖玲玲, 朱仕明, 曾曙才. 火力楠林的土壤特性对外源性 N 和 P 的响应. *中南林业科技大学学报*, 2016, 36(9): 104-108, 113-113.
- [12] 陈美领, 陈浩, 毛庆功, 朱晓敏, 莫江明. 氮沉降对森林土壤磷循环的影响. *生态学报*, 2016, 36(16): 4965-4976.
- [13] 朱仕明, 董喜光, 薛立, 肖玲玲, 张越. 外源性氮和磷添加对藜蒴林土壤养分及生化特性的影响. *安徽农业大学学报*, 2015, 42(3): 347-352.
- [14] 郑欣颖, 余汉基, 薛立, 蔡金桓. 外源性氮和磷添加对马尾松凋落叶分解及土壤特性的影响. *生态环境学报*, 2017, 26(10): 1710-1718.
- [15] Mao Q G, Lu X K, Zhou K J, Chen H, Zhu X M, Mori T, Mo J M. Effects of long-term nitrogen and phosphorus additions on soil acidification in an N-rich tropical forest. *Geoderma*, 2017, 285: 57-63.
- [16] Meyer N, Welp G, Rodionov A, Borchard N, Martius C, Amelung W. Nitrogen and phosphorus supply controls soil organic carbon mineralization in tropical topsoil and subsoil. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, 119: 152-161.
- [17] 邵英男, 刘延坤, 李云红, 陈瑶, 田松岩. 不同林分密度长白落叶松人工林土壤养分特征. *中南林业科技大学学报*, 2017, 37(9): 27-31.
- [18] 李鹏程, 董合林, 刘爱忠, 刘敬然, 孙森, 王国平, 刘绍东, 赵新华, 李亚兵. 种植密度氮肥互作对棉花产量及氮素利用效率的影响. *农业工程学报*, 2015, 31(23): 122-130.
- [19] 张向前, 陈欢, 赵竹, 李玮, 杜世州, 乔玉强, 曹承富. 密度和行距对早播小麦生长、光合及产量的影响. *麦类作物学报*, 2015, 35(1): 86-92.
- [20] 邵扬, 曾建兵, 郭延平, 郭青范, 王同朝, 卫丽. 高密度条件下种植方式对夏玉米叶绿素、荧光特性及其产量的影响. *干旱地区农业研究*, 2016, 34(5): 85-90.

- [21] Xue L, Pan L, Zhang R, Xu P B. Density effects on the growth of self-thinning *Eucalyptus urophylla* stands. *Trees*, 2011, 25(6): 1021-1031.
- [22] 肖兴翠, 李志辉, 唐作钧, 曾琴, 王海风. 林分密度对湿地松人工林养分循环速率和利用效率的影响. *生态学杂志*, 2013, 32(11): 2871-2880.
- [23] 杨振意, 薛晔, 薛立, 许鹏波, 郭淑红, 张柔. 不同密度大叶相思人工林林下植物和土壤特性. *水土保持通报*, 2013, 33(3): 154-158.
- [24] 赵汝东, 樊剑波, 何园球, 宋春丽, 屠人凤, 谭炳昌. 林分密度对马尾松林下土壤养分及酶活性的影响. *土壤*, 2012, 44(2): 297-301.
- [25] 周玮, 周运超, 叶立鹏. 种植密度及土壤养分对马尾松苗木根系的影响. *中南林业科技大学学报*, 2014, 34(11): 18-22.
- [26] 田大伦, 付晓萍, 方晰, 项文化. 模拟酸雨对樟树幼苗光合特性的影响. *林业科学*, 2007, 43(8): 29-35.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] 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.
- [31] 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.
- [32] 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.
- [33] 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.
- [34] 鲍士旦. *土壤农化分析* (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000: 30-34, 106-108.
- [35] Slessarev E W, Lin Y, Bingham N L, Johnson J E, Dai Y, Schimel J P, Chadwick O A. Water balance creates a threshold in soil pH at the global scale. *Nature*, 2016, 540(7634): 567-569.
- [36] 苏渝钦, 刘何铭, 郑泽梅, 林莉, 李彬彬, 王希华. 氮磷添加对中亚热带常绿阔叶林土壤有效氮和pH值的影响. *生态学杂志*, 2016, 35(9): 2279-2285.
- [37] 张秀兰, 王方超, 方向民, 何平, 张宇飞, 陈伏生, 王辉民. 亚热带杉木林土壤有机碳及其活性组分对氮磷添加的响应. *应用生态学报*, 2017, 28(2): 449-455.
- [38] 苏丹, 张凯, 陈法霖, 李睿达, 郑华. 施氮对不同有机碳水平桉树林土壤微生物群落碳代谢的影响. *生态学报*, 2015, 35(18): 5940-5947.
- [39] 向元彬, 周世兴, 肖永翔, 胡庭兴, 涂利华, 黄从德. 模拟氮沉降和降雨量改变对华西雨屏区常绿阔叶林土壤有机碳的影响. *生态学报*, 2017, 37(14): 4686-4695.
- [40] 黄锦妮, 程煜, 杨红玉, 郑凯舟, 王家骏. 模拟N沉降下三种林分土壤营养动态分析. *生态学报*, 2017, 37(1): 63-73.
- [41] Lu M, Zhou X H, Luo Y Q, Yang Y H, Fang C M, Chen J K, Li B. Minor stimulation of soil carbon storage by nitrogen addition: a meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2011, 140(1/2): 234-244.
- [42] Cusack D F, Torn M S, McDowell W H, Silver W L. The response of heterotrophic activity and carbon cycling to nitrogen additions and warming in two tropical soils. *Global Change Biology*, 2010, 16(9): 2555-2572.
- [43] 涂利华, 胡庭兴, 张健, 李仁洪, 戴洪忠, 雒守华. 模拟氮沉降对华西雨屏区苦竹林土壤有机碳和养分的影响. *植物生态学报*, 2011, 35(2): 125-136.
- [44] 鄂馨卉, 汪亚峰, 高扬, 陈利顶, 陈世博, 陈维梁. 黄土高原降雨驱动下流域碳输移特征及其碳流失评估: 以羊圈沟坝系流域为例. *环境科学*, 2017, 38(8): 3264-3272.
- [45] Kaye J P, Binkley D, Rhoades C. Stable soil nitrogen accumulation and flexible organic matter stoichiometry during primary floodplain succession. *Biogeochemistry*, 2003, 63(1): 1-22.
- [46] 李琛琛, 刘宁, 郭晋平, 张芸香, 杨三红, 白晋华. 氮沉降对华北落叶松叶特性和林下土壤特性的短期影响. *生态环境学报*, 2014, 23(12): 1924-1932.
- [47] 孟范平, 李桂芳. 酸雨对土壤元素化学行为的影响. *中南林学院学报*, 1998, 18(1): 27-34.
- [48] 王永壮, 陈欣, 史奕. 农田土壤中磷素有效性及影响因素. *应用生态学报*, 2013, 24(1): 260-268.
- [49] 谢佳贵, 侯云鹏, 尹彩侠, 孔丽丽, 秦裕波, 李前, 王立春. 施钾和秸秆还田对春玉米产量、养分吸收及土壤钾素平衡的影响. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(5): 1110-1118.
- [50] 占丽平, 李小坤, 鲁剑巍, 王瑾, 廖志文. 土壤钾素运移的影响因素研究进展. *土壤*, 2012, 44(4): 548-553.
- [51] Mi N, Wang S Q, Liu J Y, Yu G R, Zhang W J, Jobbágy E. Soil inorganic carbon storage pattern in China. *Global Change Biology*, 2008, 14(10): 2380-2387.
- [52] 王华, 王辉, 赵青云, 庄辉发, 宋应辉, 朱自慧. 槟榔不同株行距间作香草兰对土壤养分和微生物的影响. *植物营养与肥料学报*, 2013, 19(4): 988-994.