

不同土壤 pH 和铵硝态氮比对杉木和木荷幼苗叶片 C、N、P 化学计量的影响

程聪, 王立冬, 梁海燕, 王燕茹, 全小强, 李小玉, 闫小莉*

(福建农林大学林学院, 福建, 福州 350002)

摘要: 【目的】研究不同土壤 pH 和铵硝态氮配比环境下对杉木和木荷幼苗叶片 C、N、P 化学计量特征的影响, 探讨适合杉木和木荷生长的最佳 pH 和铵硝态氮配比环境, 为提高杉木木荷混交林林地生产力提供理论依据。【方法】本研究以一年生杉木和木荷实生苗为研究对象, 设置 3 个栽培基质 pH 水平: pH=4.5、pH=5.5、pH=6.5, 在 N 素总量相等的条件下设置 5 个铵硝配比 ($\text{NH}_4^+\text{-N}:\text{NO}_3^-\text{-N}$) 处理: 10:0、7:3、3:7、0:10、5:5 (对照: 均一分布组), 共计 15 个处理, 由此模拟构建不同 pH 条件和铵硝配比的养分逆境。【结果】(1) 不同的铵硝配比和土壤 pH 条件对杉木和木荷叶片的 C、N 和 P 含量产生了显著影响。(2) 杉木的 C/N 整体上随着 pH 的升高而下降, 木荷的 C/P 整体在 pH=6.5 水平下较低。木荷的 N/P 整体在 pH=5.5 水平下显著高于 pH=4.5 和 pH=6.5 水平。(3) pH=4.5 水平下, 杉木和木荷的 C/N 随着硝态氮浓度的升高先上升后下降, pH=5.5 水平下, 杉木的 C/N 在不同配比处理下没有显著差异, 而木荷的 C/N 在 10:0 和 3:7 配比下显著高于其他配比。pH=6.5 水平下, 不同配比处理对两个树种的 C/N 没有显著影响, 但杉木的 C/N 在 3:7 配比下最高, 而木荷的 C/N 在 10:0 配比下最高。【结论】杉木在相对较高铵态氮浓度的环境下生长更好, 而木荷在相对较高硝态氮浓度的环境下生长更好, 在土壤 pH 值为 4.5~5.5 的环境下, 为杉木增施铵态氮, 为木荷增施硝态氮, 最终提高针阔混交林林地生产力。**关键词:** 杉木, 木荷, 铵硝配比, C、N、P 化学计量特征

Effects of different soil pH and ammonium nitrate nitrogen ratio on C, N and P stoichiometry in leaves of *Cunninghamia lanceolata* and *Schima superba* seedlings

Abstract: 【Objective】The effects of different soil pH and ammonium nitrate nitrogen ratio on the C, N and P stoichiometric characteristics of leaves of *Cunninghamia lanceolata* and *Schima superba* seedlings were studied, and the optimal pH and ammonium nitrate nitrogen ratio environment suitable for the growth of *C. lanceolata* and *S. superba* seedlings was discussed, providing a theoretical basis for improving the forest productivity of *C. lanceolata* and *S. superba* mixed forest. 【Method】In this study, annual *C. lanceolata* and *S. superba* seedlings were selected as the research objects, and pH levels of three cultivation substrates were set: pH=4.5, pH=5.5, pH=6.5. Under the condition of equal total N content, five ammonium and nitrate ratios ($\text{NH}_4^+\text{-N}:\text{NO}_3^-\text{-N}$) were set for treatment: 10:0, 7:3, 3:7, 0:10, 5:5 (control group: uniform distribution group), a total of 15 treatments, so as to simulate the nutrient stress of different pH conditions and ammonium nitrate ratio. 【Results】(1) The contents of C, N and P in leaves of *C. lanceolata* and *S. superba* were significantly affected by different ammonium and nitrate ratios and soil pH conditions. (2) As a whole, the C/N of *C. lanceolata* decreased with the increase of pH, and the C/P of *S. superba* was lower at the pH=6.5 level. The N/P of *S. superba* at pH=5.5 was significantly higher than that at pH=4.5 and pH=6.5. (3) At pH=4.5, the C/N of *C. lanceolata* and *S. superba* first increased and then decreased with the increase of nitrate nitrogen concentration. At pH=5.5, there was no significant difference in the C/N of *C. lanceolata* under different ratio treatments, while the C/N of *S. superba* under 10:0 and 3:7 ratio treatments was significantly higher than other ratios. At pH=6.5, the C/N of the two tree species was not significantly affected by different ratio treatments, but the C/N of *C. lanceolata* was the highest at 3:7 ratio, while that of *S. superba* was the highest at 10:0 ratio. 【Conclusion】*C. lanceolata* grows better under relatively high ammonium nitrogen concentration, while *S. superba* grows better under relatively high nitrate nitrogen concentration. In the soil pH value of 4.5~5.5, the increased application of ammonium nitrogen for *C. lanceolata* and ammonium nitrogen for *S. superba* ultimately improves the forest productivity.

Key words: *Cunninghamia lanceolata*; *Schima superba*; ammonium and nitrate ratio; stoichiometric characteristics.

目前我国亚热带地区红壤土壤酸化严重。土壤偏酸性或偏碱性, 都会不同程度地影响植物的生长发育 (Suh Jong-Taek 等, 2006)。土壤的 pH 值对氮素的形态转化、有效性和可利用性产生影响, 进而影响植物对 N 素的吸收和利用能力。而 N 素是植物体内构建蛋白质、核酸和其他生物分子所必需的关键元素之一, 影响着植物的生长、发育、代谢和适应环境的能力 (赵平等, 1998)。而土壤总氮匮乏且成异质性分

布, 铵态氮 ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) 和硝态氮 ($\text{NO}_3^-\text{-N}$) 是最常见的两种 N 素形态, 它们在植物体内的吸收和利用方式不同 (张玉波等, 2014)。单一施加一种形态的氮素对植物生长发育影响有限, 施加合理的氮素配比肥料能够促进植物生理生化特性 (Weston Anna K 等, 2023; Dong Libing 等, 2023; 杜英东等, 2023)。因此, 通过设置不同的 pH 和铵硝态氮配比环境来研究杉木和木荷的化学计量特征有助于筛选出适宜杉木和木荷生长的最佳 pH 和铵硝态氮配比环境。

生态化学计量学这个概念由 Elser 第一次提出 (Elser J J 等, 1996), 植物生态化学计量学是生态化学计量学的重要分支, 主要研究植物器官元素含量的计量特征以及它们与环境因子、生态系统功能之间的关系 (田地等, 2021)。其中对碳 (C)、氮 (N)、磷 (P) 含量及计量比的分析是研究的重点 (张志山等, 2022; 王春燕等, 2022; Rahman Mujibur 等, 2022)。其中, C:N、C:P 能够反映植物生长过程同化 C 的能力 (刘万德等, 2010)、生长速率 (屠晶等, 2022) 和对 N、P 的利用效率 (田地等, 2021), N:P 可反映生态系统的养分限制状况。而叶片是植物进行光合作用和养分转化的主要器官, 其化学计量特征相比根和茎对土壤养分的变化会更加敏感。近年来, 研究者们对不同土壤 pH 条件和铵硝配比对植物化学计量的影响进行了广泛的研究 (喻苏琴等, 2023; 钟小璞等, 2023; 张静静等, 2021)。目前, 很多学者对杉木人工林的土壤以及细根的化学计量方面做了相关研究 (何佳豪等, 2022; 徐睿等, 2022; 刘青青等, 2022), 但关于杉木和木荷的化学计量特征的相关研究较少。

杉木是我国亚热带地区的主要造林树种, 它对生态系统的稳定性和功能具有重要影响。木荷在营林中常被用于与杉木进行混交造林, 构建针阔混交林分。因杉木和木荷自身生理特性的不同, 其化学计量对土壤中元素含量特别是 N 素的含量变化的响应有显著差异。而目前对于杉木和木荷在不同 pH 和铵硝配比下幼苗叶片化学计量特征的研究鲜有报道。因此, 研究亚热带主要的两种针叶和阔叶树种, 杉木和木荷, 对不同土壤 pH 和铵硝配比条件下的幼苗叶片 C、N、P 化学计量进行研究, 以明确它们在 N 素吸收和利用方面的差异, 为杉木和木荷幼苗的培育提供合理的 pH 和 N 素配比环境, 为杉木和木荷混交造林的可行性以及在混交造林中合理施用不同形态的 N 肥提供科学依据。

1 研究区概况

试验地点设置在福建省林业科学研究所的试验苗圃, 地理位置为 E 119 ° 30 ' , N 26 ° 15 ' , 海拔 50 m, 温暖湿润, 阳光充足, 雨量充沛, 无霜期 326 d, 属于典型的亚热带季风气候。年平均日照时数为 1700~1980 h, 年平均降水量为 900~2100 mm, 年平均气温为 20~25 °C。

2 研究方法

2.1 试验材料

以一年生未经施肥处理的杉木和木荷幼苗作为试验材料, 供试幼苗购自福建省漳平五一国有林场。2021 年 4 月, 挑选生长状况良好且基本一致的杉木和木荷幼苗, 将基质袋去除, 用自来水洗净根部后用纯水冲洗, 用电子天平测量幼苗初始鲜重, 挑选鲜重、苗高基本一致的幼苗移栽至调节好 pH 值的花盆中进行缓苗。缓苗期间 2~3 d 浇一次纯水, 每次 50~80 mL, 此外不作其他处理, 幼苗缓苗 10 d 后进行试验处理。

2.2 基质 pH 设置和调节方法

本研究盆栽实验采用河砂作为幼苗的培育基质。将河砂用自来水清洗 3 遍后用纯水清洗 2 遍。将洗净的河砂铺开晾至 40% 湿度左右后装盆, 本试验施用的花盆规格为: 20 cm×20 cm (内径×高), 每个花盆中装入约 5650 cm³ 洗净的河砂 (装至距离花盆顶部盆口 2cm 处)。本研究设置 3 个基质 pH 水平, 分别为: pH=4.5、pH=5.5、pH=6.5, 采用 H₂SO₄ 溶液和 NaOH 溶液调节基质 pH, 用注射器吸入稀释后的

H₂SO₄ 溶液和 NaOH 溶液从距离幼苗茎部 2cm 的距离开始绕幼苗顺时针均匀滴施 pH 调节剂, 0.5 h 后用土壤 pH 计测定土壤 pH 值, 然后继续用相同的方法调节基质 pH 值直至达到试验设计的 pH 值。

2.3 试验方法

试验设置 3 个 pH 水平: pH=4.5、pH=5.5、pH=6.5, 5 个不同形态 N 素配比 (NH₄⁺-N:NO₃⁻-N) 处理: 10:0、7:3、5:5、3:7、0:10。其中, 10:0 (纯铵态氮) 和 0:10 (纯硝态氮) 为单一形态 N 素处理, 7:3 (较高铵态氮浓度) 和 3:7 (较高硝态氮浓度) 为铵硝比例不相等的铵硝混合处理, 5:5 为铵硝比例相等的混合处理, 每个处理 6 个重复, 具体设计见表 1。

以 (NH₄)₂SO₄ 和 NaNO₃ 作为 N 源, 各处理营养液中除 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 的浓度配比不同外, 其他大量元素 (Hoagland 配方) 和微量元素 (Amon 配方) 浓度保持一致。根据张建国的研究将营养液总 N 浓度设置为 2 mmol/L, 用 HCl 和 NaOH 调节 pH 至 5.5 左右, 加入 7 μmol/L 的 C₂H₄N₄ 防止 NH₄⁺硝化。由于本试验以 NaNO₃ 作为硝态氮源, 会影响不同处理的营养液中 Na⁺ 的浓度, 因此在定容前用 NaCl 进行调节以保持各处理营养液中 Na⁺ 浓度相等。幼苗每 5 d 浇 1 次营养液, 每次 50 mL, 每 2~3 d 浇 1 次水, 每次 50~100 mL (各幼苗浇等量水)。处理从 2021 年 4 月上旬开始, 到 2021 年 9 月底结束, 共 6 个月, 共浇灌营养液 33 次。苗木在处理期间除施肥外, 其他管理保持一致。

表 1 试验设计

Tab. 1 Experiment design

处理 Treatments	pH	铵硝配比 (NH ₄ ⁺ -N:NO ₃ ⁻ -N)	总 N 浓度 (mmol/L)	营养液 N 浓度 (mg/L)	
				(NH ₄) ₂ SO ₄	NaNO ₃
T1	4.5	10:0	2	132.140	0.000
T2		7:3	2	92.498	50.997
T3		5:5	2	66.070	84.995
T4		3:7	2	39.642	118.993
T5		0:10	2	0.000	169.990
T6	5.5	10:0	2	132.140	0.000
T7		7:3	2	92.498	50.997
T8		5:5	2	66.070	84.995
T9		3:7	2	39.642	118.993
T10		0:10	2	0.000	169.990
T11	6.5	10:0	2	132.140	0.000
T12		7:3	2	92.498	50.997
T13		5:5	2	66.070	84.995
T14		3:7	2	39.642	118.993
T15		0:10	2	0.000	169.990

2.4 指标测定

将烘干后的幼苗叶片样品用磨粉机磨成粉末状, 将所得粉末过筛, 细筛孔径为 0.149 mm, 将过筛后的样品装入自封袋保存, 用于碳 (C)、氮 (N)、磷 (P)、钾 (K) 等营养元素含量的测定。C 和 N 的测定采用全自动元素分析仪 (微量碳氮) 进行测定, P、K 等其他营养元素采用电感耦合等离子体发射光谱仪进行测定。

2.5 数据处理

利用 Microsoft Excel 2019 整理数据和制表, 利用 SPSS 24.0 软件进行数据分析, 采用双因素分析检验不同 pH 条件和铵硝配比的交互作用对化学计量特征的影响, 采用单因素 ANOVA 检验分别对 2 个树种在不同处理间的差异进行分析, 以 $P < 0.05$ 作为显著性判断标准。采用隶属函数对 2 个树种在不同 pH 条件下的生长和生理指标进行评价。采用皮尔森相关性分析对各处理下 2 个树种的生长和生理生态指标间的相关性进行检验, 以 $P < 0.05$ 作为显著性判断标准, 以 $P < 0.01$ 作为极显著性判断标准。利用 ORIGIN 2019 进行绘图。

3 结果与分析

3.1 不同 pH 条件和铵硝比对杉木和木荷幼苗化学计量的影响

表 2 可见, 土壤 pH 对杉木的叶 C 含量、叶 N 含量有极显著 ($P < 0.01$) 影响, 对木荷的叶 C 含量、叶 N 含量、叶 P 含量均有极显著影响; 铵硝比对杉木的叶 C 含量有显著 ($P < 0.05$) 影响, 对木荷的叶 C 含量、叶 P 含量有极显著影响; 土壤 pH 和铵硝比对杉木的叶 C 含量、叶 N 含量、叶 P 含量无交互作用影响, 对木荷的叶 C 含量、叶 N 含量、叶 P 含量有显著交互作用影响。

表 2 土壤 pH 和铵硝比对杉木和木荷叶片元素含量影响的双因素方差分析

Tab. 2 Two-Way ANOVA of the effects of soil pH and ammonium to nitrate ratios on element content in leaves of *C. lanceolata* and *S.*

树种 Tree species	因素 Factor	<i>superba</i>					
		叶 C 含量 Leaf C content		叶 N 含量 Leaf N content		叶 P 含量 Leaf P content	
		F	P	F	P	F	P
杉木 <i>C. lanceolata</i>	pH	48.064	<0.001**	6.924	0.002**	0.391	0.678
	铵硝配比	3.380	0.013*	1.131	0.349	1.387	0.247
	pH×铵硝配比	1.104	0.370	0.890	0.530	1.101	0.372
木荷 <i>S. superba</i>	pH	59.468	<0.001**	5.044	0.009**	8.262	0.001**
	铵硝配比	7.397	<0.001**	0.844	0.502	4.684	0.002**
	pH×铵硝配比	5.976	<0.001**	2.732	0.011*	4.319	<0.001**

注: *, $P < 0.05$; **, $P < 0.01$ 。

Note: *, $P < 0.05$; **, $P < 0.01$ 。

根据图 1 的结果显示, 在 5 个铵硝配比下, 杉木叶片的 C 含量在 pH=4.5 条件下较 pH=5.5 和 pH=6.5 条件下分别显著降低了 3.8%至 6.6%。而木荷叶片的 C 含量整体在 pH=6.5 条件下显著低于 pH=4.5 和 pH=5.5 条件。另外, 杉木叶片的 N 含量整体上随着土壤 pH 升高而增加, 而木荷叶片的 N 含量整体在 pH=5.5 条件下高于 pH=4.5 和 pH=6.5 条件。在 0:10 配比下, 杉木叶片的 P 含量在 pH=6.5 条件下显著高于 pH=4.5 和 pH=5.5 条件, 而其他四个配比下杉木叶片的 P 含量在不同 pH 条件下没有显著差异。对于木荷叶片, 在 5:5 配比下, 其 P 含量在 pH=6.5 条件下显著高于 pH=4.5 和 pH=5.5 条件; 而在 0:10 配比下, 木荷叶片的 P 含量在 pH=5.5 条件下显著低于 pH=4.5 和 pH=6.5 条件。对于其他三个配比, 木荷叶片的 P 含量在不同 pH 条件下没有显著差异。

根据图 1(a)的观察结果, 可以看出在 pH=4.5 和 pH=6.5 水平下, 杉木叶片的 C 含量在 5 个铵硝配比下的差异不显著。总体上, 随着硝态氮浓度的升高, 杉木叶片的 C 含量呈现先上升后下降的趋势。在 pH=4.5 水平下, 叶片的 C 含量在 7:3 配比下达到最高值, 在 pH=6.5 水平下, 5:5 配比下的 C 含量最高。而在 pH=5.5 水平下, 杉木叶片的 C 含量在 10:0 配比下最高, 为 43.06mg/g, 其次为 5:5 配比。与其他四

个配比相比, 10:0 配比下的叶片 C 含量显著高出 0.6%至 4.1%。从图 1(b)可以看出, 在 pH=4.5 和 pH=6.5 水平下, 木荷叶片的 C 含量整体上随着硝态氮浓度的升高呈先上升后下降的趋势。在这两个 pH 水平下, 叶片的 C 含量在 7:3 配比下达到最高值, 分别比其他四个配比高出 2.2%至 3.8%和 0.5%至 4.1%。在 pH=5.5 水平下, 木荷叶片的 C 含量在 10:0 配比下最高, 但与 3:7 和 0:10 配比之间的差异不显著。

根据图 1(c)的观察结果, 可以看出在 pH=4.5 水平下, 杉木叶片的 N 含量在不同铵硝配比下的差异不显著。而在 pH=5.5 和 pH=6.5 水平下, 杉木叶片的 N 含量整体上表现为随着铵态氮浓度的升高先上升后下降的趋势。与高硝态氮浓度的 3:7 和 0:10 配比相比, 高铵态氮浓度的 10:0 和 7:3 配比提高了杉木叶片的 N 含量。图 1(d)显示, 在 pH=4.5 条件下, 除了 10:0 配比外, 木荷叶片的 N 含量随着硝态氮含量的升高而上升。在 pH=5.5 条件下, 5 个配比之间的差异不显著, 木荷叶片的 N 含量在 5:5 配比下达到最高。而在 pH=6.5 条件下, 木荷叶片的 N 含量随着硝态氮浓度的升高先上升后下降, 铵硝混合处理显著高于单一形态 N 素处理。

根据图 1(e)的观察结果, 可以看出在 pH=4.5 和 pH=5.5 条件下, 杉木叶片的 P 含量在 5 个铵硝配比下的差异不显著, 而在 pH=6.5 条件下, 杉木叶片的 P 含量在 0:10 配比下显著高于其他 4 个配比, 差异范围为 40.3%至 53.2%。整体上, 杉木叶片的 P 含量随着硝态氮浓度的升高而增加。图 1(f)显示, 在 pH=5.5 和 pH=6.5 条件下, 不同的铵硝配比显著影响木荷叶片的 P 含量。在 pH=5.5 条件下, 相比于其他 3 个配比, 高铵态氮浓度的 3:7 和 0:10 配比使杉木叶片的 P 含量分别降低了 15.2%至 26.4%和 19.3%至 30.0%。在 pH=6.5 条件下, 杉木叶片的 P 含量整体上随着硝态氮浓度的升高先上升后下降, 其中 5:5 配比下的 P 含量最高, 相较于其他 4 个配比高出 71.3%至 96.1%。

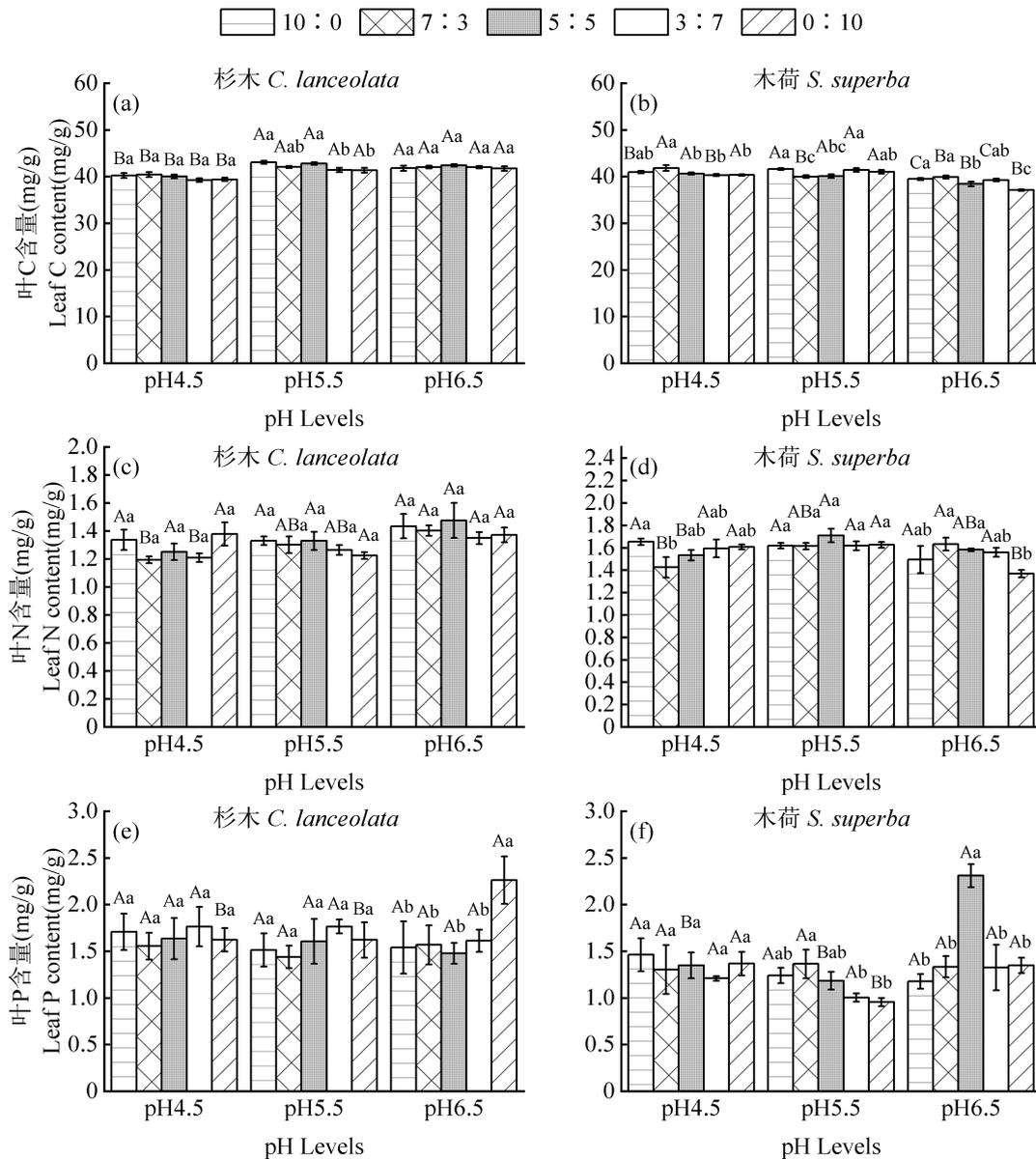


图 1 不同 pH 条件和铵硝配比下杉木和木荷的 C、N、P 含量

Fig.1 C, N and P contents in *C. lanceolata* and *S. superba* under different pH conditions and ammonium to nitrate ratios

注：不同大写字母表示在同一铵硝配比处理下不同 pH 水平之间差异显著，小写字母表示在同一 pH 水平不同铵硝配比处理之间差异显著 ($p < 0.05$)。

Note: Different uppercase letters indicate significant differences between different pH levels under the same ammonium to nitrate ratio treatment, while lowercase letters indicate significant differences between treatments under different ammonium to nitrate ratios at the same pH level ($p < 0.05$).

3.2 不同 pH 条件和铵硝配比对杉木和木荷幼苗叶片 C、N、P 化学计量比的影响

表 2 可见，土壤 pH 对杉木的 C/N 有显著 ($P < 0.05$) 影响，对木荷的 C/P、N/P 有极显著 ($P < 0.01$) 影响；铵硝配比对木荷的 N/P 有显著影响；土壤 pH 和铵硝配比对杉木的化学计量比无交互作用影响，对木荷的 C/N、C/P、N/P 均有显著影响。

表 2 土壤 pH 和铵硝配比对杉木和木荷化学计量比影响的双因素方差分析

Tab. 2 Two-Way ANOVA of the effects of soil pH and ammonium to nitrate ratios on stoichiometric ratio in *C. lanceolata* and

		<i>S. superba</i>					
树种 Tree species	因素 Factor	C/N		C/P		N/P	
		F	P	F	P	F	P
杉木 <i>C. lanceolata</i>	土壤 pH	4.519	0.014*	0.894	0.413	1.472	0.236
	铵硝配比	0.588	0.673	1.496	0.212	1.838	0.13
	土壤 pH×铵硝配比	0.898	0.523	0.527	0.833	0.868	0.547
木荷 <i>S. superba</i>	土壤 pH	2.496	0.089	7.33	0.001**	13.439	<0.001**
	铵硝配比	1.04	0.393	2.451	0.053	2.925	0.026*
	土壤 pH×铵硝配比	3.12	0.004**	2.584	0.015*	2.814	0.009**

注: *, $P < 0.05$; **, $P < 0.01$ 。

Note: *, $P < 0.05$; **, $P < 0.01$.

根据表 3 的结果显示, 杉木的 C/N 整体上随着 pH 的升高而下降。在 pH=6.5 水平下, 10:0 和 0:10 配比下, 木荷的 C/N 显著高于 pH=4.5 和 pH=5.5 水平。而在 pH=4.5 水平下, 7:3 和 5:5 配比下, 木荷的 C/N 显著高于 pH=5.5 和 pH=6.5 水平。在 3:7 配比下, 木荷的 C/N 在 3 个 pH 水平之间没有显著差异。杉木的 C/P 在 3 个 pH 水平之间没有显著差异, 整体上在 pH=4.5 水平下最低。木荷的 C/P 整体上在 pH=6.5 水平下低于其他两个 pH 水平。杉木的 N/P 在 3 个 pH 水平之间没有显著差异, 在 pH=6.5 水平下高于其他两个 pH 水平。木荷的 N/P 整体上在 pH=5.5 水平下显著高于 pH=4.5 和 pH=6.5 水平。

在 pH=4.5 水平下, 杉木和木荷的 C/N 随着硝态氮浓度的升高先上升后下降, 且在 7:3 配比下最高, 在 0:10 配比下最低。两个树种的 C/P 和 N/P 在不同铵硝配比之间没有显著差异, 两个树种的 C/P 在 7:3 配比下最高, 杉木的 N/P 在 0:10 配比下最高, 木荷的 N/P 在 3:7 配比下最高。

在 pH=5.5 水平下, 杉木的 C/N 在 5 个配比处理下没有显著差异; 木荷的 C/N 在 10:0 和 3:7 配比下显著高于其他配比。杉木的 C/P 和 N/P 在 10:0 配比下最高, 但不同铵硝配比之间没有显著差异; 木荷的 C/P 和 N/P 在 0:10 配比下显著高于其他 4 个配比。

在 pH=6.5 水平下, 不同铵硝配比之间, 两个树种的 C/N 没有显著差异, 杉木的 C/N 在 3:7 配比下最高, 木荷的 C/N 在 10:0 配比下最高。杉木的 C/P 和 N/P 随着处理中硝态氮浓度的升高呈下降趋势, 不同配比之间杉木的 C/P 差异不显著, N/P 在 10:0 配比下显著高于其他 4 个配比; 木荷的 C/P 和 N/P 在 5:5 配比下显著低于其他 4 个配比, 而其他 4 个配比之间的差异则不显著。

综上所述, 根据表 3 的结果, 在不同 pH 水平下, 铵硝比对杉木和木荷的养分含量比例 (C/N、C/P 和 N/P) 产生了一定的影响。第一, 杉木的 C/N 整体上随着 pH 的升高而下降, 而木荷的 C/N 在不同 pH 水平下表现出一定的变化趋势。第二, 杉木的 C/P 在 3 个 pH 水平之间没有显著差异, 而木荷的 C/P 整体在 pH=6.5 水平下较低。第三, 杉木的 N/P 在 3 个 pH 水平之间没有显著差异, 而木荷的 N/P 整体在 pH=5.5 水平下显著高于 pH=4.5 和 pH=6.5 水平。

此外, 不同的铵硝比对杉木和木荷的养分含量比例也产生了一定的影响, 第一, 在 pH=4.5 水平下, 杉木和木荷的 C/N 随着硝态氮浓度的升高先上升后下降, 且在不同配比下存在显著差异。第二, 在 pH=5.5 水平下, 杉木的 C/N 在不同配比处理下没有显著差异, 而木荷的 C/N 在 10:0 和 3:7 配比下显著高于其他配比。第三, 在 pH=6.5 水平下, 不同配比处理对两个树种的 C/N 没有显著影响, 但杉木的 C/N 在 3:7 配比下最高, 而木荷的 C/N 在 10:0 配比下最高。

表 3 不同土壤 pH 和铵硝配比对杉木和木荷幼苗叶片化学计量比的影响
Tab. 3 Effects of different soil pH and ammonium to nitrate ratios on the stoichiometric ratios in leaves of *C. lanceolata* and *S. superba* seedlings

树种 Tree species	铵硝配比 NH ₄ ⁺ : NO ₃ ⁻	C/N						N/P					
		pH4.5	pH5.5	pH6.5	pH4.5	pH5.5	pH6.5	pH4.5	pH5.5	pH6.5	pH4.5	pH5.5	pH6.5
杉木 <i>C. lanceolata</i>	10 : 0	30.56±1.83Aab	32.47±0.84Aa	29.70±1.91Aa	25.21±3.04Aa	31.34±5.01Aa	32.58±6.28Aa	0.82±0.07Aa	0.96±0.14Aa	1.11±0.21Aa	0.81±0.09Aa	0.93±0.06Aa	1.02±0.19Aab
	7 : 3	33.97±1.06Aa	32.67±1.53ABa	30.05±0.82Ba	27.73±3.81Aa	30.32±2.62Aa	30.28±5.40Aa	0.82±0.09Aa	0.92±0.13Aa	1.02±0.10Aab	0.73±0.07Aa	0.73±0.05Aa	0.86±0.06Aab
	5 : 5	32.36±1.70Aab	32.56±1.47Aa	29.61±2.06Aa	26.57±3.17Aa	30.65±5.46Aa	29.38±1.77Aa	0.88±0.09Aa	0.82±0.11Aa	0.65±0.08Ab	1.23±0.16Aa	1.33±0.09Abc	1.27±1.92Aa
	3 : 7	32.56±0.71Aab	32.94±1.24Aa	31.30±1.04Aa	23.78±2.65Aa	23.69±1.05Aa	26.74±1.84Aa	1.28±0.19Aa	1.25±0.09Ac	1.25±0.09Ac	1.18±0.10Ba	1.48±0.11Aabc	0.70±0.05Cb
木荷 <i>S. superba</i>	10 : 0	24.80±0.44Ab	25.74±0.40Aa	27.30±2.23Aa	30.49±4.18Aa	34.39±2.53Abc	34.35±2.52Aa	1.33±0.09Abc	1.33±0.09Abc	1.27±1.92Aa	1.23±0.12Ba	1.72±0.08Aa	1.03±0.06Ba
	7 : 3	29.93±1.89Aa	24.81±0.55Bab	24.55±0.70Ba	39.69±7.92Aa	31.22±3.52Ac	30.72±1.97Aa	1.25±0.09Ac	1.25±0.09Ac	1.25±0.09Ac	1.18±0.10Ba	1.48±0.11Aabc	0.70±0.05Cb
	5 : 5	26.65±0.84Ab	23.62±0.88Bb	24.29±0.11Ba	31.60±2.93Aa	35.14±3.18Aabc	16.95±1.18Bb	1.33±0.09Aa	1.33±0.09Aa	1.33±0.09Aa	1.62±0.06Aab	1.62±0.06Aab	1.33±0.18Aa
	3 : 7	25.61±1.31Ab	25.68±0.76Aa	25.27±0.74Aa	33.42±0.76Aa	41.68±2.06Aab	33.89±5.09Aa	1.23±0.12Ba	1.23±0.12Ba	1.23±0.12Ba	1.23±0.12Ba	1.23±0.12Ba	1.23±0.12Ba

注：不同大写字母表示在同一铵硝配比处理下不同 pH 水平之间差异显著，小写字母表示在同一 pH 水平不同铵硝配比处理之间差异显著 ($p < 0.05$)。
Note: Different uppercase letters indicate significant differences between different pH levels under the same ammonium to nitrate ratio treatment, while lowercase letters indicate significant differences between treatments under different ammonium to nitrate ratios at the same pH level ($p < 0.05$)

4 讨论

4.1 不同 pH 条件和铵硝对比对杉木和木荷幼苗化学计量的影响

图 1 结果显示, 不同的铵硝配比和土壤 pH 条件对杉木和木荷叶片的 C、N 和 P 含量产生了显著影响。这些差异可能与植物对不同形态的氮素吸收偏好和土壤 pH 对养分供应的影响有关。在三个 pH 水平下, 杉木和木荷叶片整体上表现出随着铵态氮浓度配比的增加而增加的趋势, 特别是叶片的 C 含量。这表明植物对于铵态氮的吸收和利用可能与其 C 含量的积累有关。与此相比, 杉木叶片的 N 含量更容易受到铵态氮浓度的影响, 而木荷叶片的 N 含量在不同形态氮素配比下显示出差异。另一方面, 对于杉木而言, 增加硝态氮浓度有助于提高 P 的吸收和积累。然而, 木荷在不同的土壤 pH 条件下, 铵硝配比的变化对 P 的吸收和积累具有显著影响。这些研究结果有助于更深入地理解植物对不同形态氮素和土壤 pH 的响应机制。

一般来说, 植物的化学计量特征不仅由植物本身的遗传特性决定, 更与周遭环境息息相关, 尤其是土壤环境, 土壤养分的多少直接决定了植物各器官吸收利用的多少。陈蓉(陈蓉等, 2023)等人发现, 土层深度显著影响马尾松和杉木人工林细根 N、P 浓度, 对 C 浓度无影响, 细根 N、P 浓度随土壤深度的增加呈指数下降。何文祥(何文祥等, 2023)等人发现, 栎树生物量、C、N、P 含量及其化学计量比在不同环境下的响应差异显著。国外也有研究(Chen J 等, 2016)发现, 增温对土壤微生物生物量碳、氮、磷的影响也会因生长季而异。在本研究中, 我们观察到不同 pH 水平对杉木和木荷叶片化学计量特征的显著影响。具体而言, pH=4.5 水平显著降低了杉木叶片的碳含量, 而 pH=6.5 水平则显著降低了木荷叶片的碳含量。杉木叶片的氮含量整体上随着 pH 的升高而增加, 可能是 pH 影响了土壤中氮的有效性, 在酸性土壤(低 pH)中, 氮的有效性可能较低, 因为氮元素会与其他元素结合形成难溶性化合物, 限制植物的氮吸收。而当土壤 pH 升高时, 土壤中的氮形态可能更容易被植物吸收利用, 从而提高了植物叶片中的氮含量。David L. Jones(David L. Jones 等, 1994)等人研究发现, 较高 pH 值下, 根系分泌的有机酸增加, 从而促进了土壤中氮的解离和植物对氮的吸收。而 pH=5.5 相较于 pH=4.5 和 pH=6.5 水平, 提高了木荷叶片的氮含量, 促进了木荷叶片中氮的积累。可能是当 pH=5.5 时, 为土壤微生物提供了较为适宜的生长环境, 促进了氮的转化和供应过程, 从而增加了土壤中的有效氮含量, 并提高了木荷植物叶片中的氮含量。

4.2 不同 pH 条件和铵硝对比对杉木和木荷幼苗叶片 C、N、P 化学计量比的影响

表 3 结果显示, 在不同 pH 水平和铵硝配比下, 杉木和木荷叶片 C/N、C/P 和 N/P 均发生了变化。杉木的 C/N 整体上随着 pH 的升高而降低, 而木荷的 C/N 在 pH=5.5 水平下最低, 这表明在一定范围内, 提高土壤 pH 值可以促进杉木和木荷叶片中氮的积累, 而土壤 pH 值为 5.5 时对木荷叶片的氮积累最为有利。土壤 pH 的变化对杉木的 C/P 没有显著影响, 然而土壤 pH 的升高却降低了木荷的 C/P。此外, pH=6.5 和 pH=5.5 分别提高了杉木和木荷叶片中 N/P, 促进了这两种树种叶片中氮素的积累。综上所述, 这些结果揭示了土壤 pH 变化对杉木和木荷叶片化学计量特征的影响。不同 pH 水平下, 土壤中的 pH 值对植物叶片中的碳、氮和磷含量以及它们之间的比例具有显著的影响。这些发现表明, 土壤 pH 是调控植物养分吸收和元素积累的重要环境因素。

不同植物对氮素吸收与利用的偏好也不尽相同, 那么对于人工培育植物来说, 向植物施加的营养直接决定它对营养的吸收利用及生长状况。杨婷(杨婷等, 2022)等人发现铵硝比 5:5 处理配施对刨花楠叶片

的氮(LN)和磷含量(LP)的影响较为明显。叶莉莎(叶莉莎等, 2016)等人研究发现同硝铵比显著影响着雷竹叶片和细根 C、N、P 的化学计量特征, 合理的硝铵混合比例可促进雷竹对 C 的固定和 N、P 吸收, 其中以硝铵比为 1:1、1:2 较适宜雷竹生长与养分积累。还有学者研究(Fu Youqiang 等, 2023)发现在 75:25 铵硝氮水平下水稻的株高、生长率以及地上生物量达到最高。在我们的研究中, 无论在哪个 pH 水平下, 整体趋势都是: 高铵态氮浓度的铵硝配比提高了杉木叶片中氮、磷的含量, 降低了 C/N, 提高了 N/P。这可能是因为高铵态氮浓度有助于杉木根系对氮素的吸收和利用。首先, 当土壤中铵态氮浓度较高时, 杉木根系可以更充分地吸收和利用铵态氮(陈雅敏等, 2018; 李常诚等, 2016), 从而增加了叶片中的氮含量。其次, 有研究表明, 适宜的铵态氮浓度可以促进磷的吸收和转运, 从而提高叶片中磷的含量(纪德智等, 2014)。最后, 铵态氮的利用可能会影响植物的碳分配, 使碳在生长过程中被更多地用于合成有机氮化合物(Britto DT 等, 2002; Bloom AJ 等, 1992), 从而降低了 C/N。同时, 氮素和磷素的吸收和利用之间存在相互作用(Jonathan P. Lynch 等, 2005)。在高铵态氮浓度条件下, 氮素的供应相对较充足, 可能促进杉木对磷的吸收和利用, 导致氮磷比升高。而高硝态氮浓度的铵硝配比提高了木荷叶片中氮、磷的含量, 降低了 C/N, 提高了 N/P。这些结果表明不同铵硝配比对于杉木和木荷体内氮、磷元素的积累具有促进作用。

因此, 我们可以得出结论, 植物叶片的化学计量特征能够反映植物对土壤中氮素的吸收情况以及土壤中氮素供应的状态。不同植物对不同形态氮素的选择性吸收机制可能导致它们在化学计量特征上的差异。进一步研究可以深入探讨不同植物对氮素吸收的机制和调控过程, 为植物养分管理和土壤肥力提供科学依据。

5 结论

4.5 的酸性 pH 环境显著降低杉木和木荷的叶片 N 含量, 5.5 的土壤 pH 显著提高木荷的叶片 N 含量。较高铵态氮浓度的铵硝配比提高了杉木的 N、P 含量, 降低了杉木的 C/N, 提高了杉木的 N/P, 而高硝态氮浓度的铵硝配比提高了木荷的 N、P 含量, 降低了木荷的 C/N, 提高了木荷的 N/P, 分别促进了 2 个树种体内 N 素的积累。

参考文献

- Suh Jong-Taek, Yoo Dong-Lim, Lee Hyeon-Suk, Nam Chun-Woo, Kim Soo-Jeong. Effects of Soil Reaction (pH) of Culture Soil on the Growth of *Sedum kamtschaticum* in Pot Cultivation[J]. Korean Journal of Plant Resources, 2006, 19(4).
- 赵平, 孙谷畴, 彭少麟. 植物氮素营养的生理生态学研究[J]. 生态科学, 1998(02):39-44.
- 张玉波, 李玉萍. 植物对不同氮营养生境的生理生态响应[J]. 林业科技情报, 2014, 46(04):1-6.
- Weston Anna K., Dodgson Jolyon L. A., Marks David J., Wilkinson Sally. Novel, high-yielding lettuce phenotype generated by urea amine nitrogen nutrition displays contrasting traits to those of nitrate- or ammonium-fertilized plants[J]. Journal of Plant Nutrition, 2023, 46(9).
- Dong Libing, Li Yingchun, Li Ping, Liu Ying, Ma Fen, Hao Xingyu, Guo Liping. Growth Response of Wheat and Maize to Different Nitrogen Supply Forms under the Enrichment of Atmospheric CO₂ Concentrations[J]. Agronomy, 2023, 13(2).
- 杜英东, 袁相洋, 冯兆忠. 不同形态氮对杨树光合特性及生长的影响[J]. 植物生态学报, 2023, 47(03):348-360.
- Elser J J, Dobberfuhl D R, Mackay N A, et al. Organism Size, Life History, and N:P Stoichiometry[J]. Bioscience, 1996, 46(9):674-684.
- 田地, 严正兵, 方精云. 植物生态化学计量特征及其主要假说[J]. 植物生态学报, 2021, 45(07):682-713.
- 张志山, 杨贵森, 吕星宇等. 荒漠生态系统 C、N、P 生态化学计量研究进展[J]. 中国沙漠, 2022, 42(01):48-56.
- 王春燕, 杨冲, 宋成刚, 王文颖. 三江源区高寒草地根系-土壤 C、N、P 生态化学计量特征[J]. 草原与草坪, 2022, 42(05):8-20. DOI:10.13817/j.cnki.cyyep.2022.05.002.
- Rahman Mujibur, Wang Yanhui, Zhang Kebin, Ahmad Bilal, Ali Ashfaq, Ahamd Adnan, Muhammad Dost, Afzaal Muhammad, Zhang Ziyu, Bohnett Eve. Variations in Soil C, N, P Stocks and Stoichiometry With Soil Depth and Forest Types in Qilian Mountains of Northwest China[J]. Frontiers in Environmental Science, 2022.

- 刘万德,苏建荣,李帅锋等.云南普洱季风常绿阔叶林演替系列植物和土壤 C、N、P 化学计量特征[J].生态学报,2010,30(23):6581-6590.
- 屠晶,栗忠飞,孙靖等.滇南 3 种不同类型热带森林优势种幼树树干生态化学计量特征[J].林业科学研究,2022,35(05):146-155.DOI:10.13275/j.cnki.lykxyj.2022.005.016.
- 喻苏琴,李凤娇,胡冬南等.不同氮水平条件下油茶苗养分积累及化学计量特征[J].中南林业科技大学学报, 2023, 43(04):1-9.DOI:10.14067/j.cnki.1673-923x.2023.04.001.
- 钟小瑛,任奕炜,衣华鹏.狗尾草叶片 N、P、K 养分重吸收与化学计量比的偶联关系[J].植物科学学报, 2023, 41(02):193-203.
- 张静静,刘尊驰,鄢创,王云霞,刘凯,时新荣,袁志友.土壤 pH 值变化对 3 种草原类型土壤碳氮磷生态化学计量特征的影响[J].草业学报, 2021, 30(02):69-81.), 以估计植物的生长速率,有助于深入了解氮水平及不同 pH 对植物生长的影响机制。
- 何佳豪,王方超,张绿水等.氮磷添加对亚热带杉木林植物-凋落物-土壤化学计量特征的影响[J].江西农业大学学报,2023,45(01):134-145.DOI:10.13836/j.jjau.2023015.
- 徐睿,刘静,王利艳等.不同地理种源杉木根叶功能性状与碳氮磷化学计量分析[J].生态学报,2022,42(15):6298-6310.
- 刘青青,黄智军,马祥庆等.遮阴条件下杉木幼苗生长和 C、N、P 化学计量特征的变化[J].南京林业大学学报(自然科学版),2022,46(03):74-82.
- 陈蓉,王伟伟,曹丽荣等.马尾松和杉木人工林细根碳氮磷化学计量特征随土层深度的变化[J].生态学报, 2023, 43(09):3709-3718.
- 何文祥,施翔,汪阳东等.栎树幼苗化学计量特征对尾矿库环境的响应[J/OL].生态学杂志 :1-14[2023-06-21].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1148.Q.20230620.1450.002.html>.
- Chen J, Luo Y, Xia J, et al. Warming effects on ecosystem carbon fluxes are modulated by plant functional types[J]. 2016. DOI:10.13140/RG.2.1.3538.8406.
- David L. Jones, Peter R. Darrah. Role of root derived organic acids in the mobilization of nutrients from the rhizosphere[J]. Plant and Soil, 1994, 166(2).
- 杨婷,钟全林,李宝银等.短期铵态氮与硝态氮配施对刨花楠幼苗生长及叶片性状的影响[J].应用生态学报, 2022, 33(01):25-32.DOI:10.13287/j.1001-9332.202201.026.
- 叶莉莎,陈双林.硝态氮和铵态氮供应比例对雷竹碳、氮、磷化学计量的影响[J].植物营养与肥料学报, 2016, 22(06):1672-1678.
- Fu Youqiang, Zhong Xuhua, Lu Chusheng, Liang Kaiming, Pan Junfeng, Hu Xiangyu, Hu Rui, Li Meijuan, Ye Qunhuan, Liu Yanzhuo. Growth, nutrient uptake and transcriptome profiling of rice seedlings in response to mixed provision of ammonium- and nitrate-nitrogen.[J]. Journal of plant physiology, 2023, 284.
- 陈雅敏. 亚热带主要造林树种的氮吸收偏好及其调控因子[D].福建师范大学, 2018.
- LI Changcheng 李常诚, LI Qianru 李倩茹, XU Xingliang 徐兴良, OUYANG Hua 欧阳华. Nitrogen acquisition strategies of *Cunninghamia lanceolata* at different ages[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(9).
- 纪德智,王端,赵京考,张鑫,王迪,徐凤花.不同氮肥形式对玉米氮、磷、钾吸收及氮素平衡的影响[J].水土保持学报, 2014, 28(04):104-109.DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2014.04.019.
- Britto DT, Kronzucker HJ. NH₄⁺ toxicity in higher plants: a critical review [Review][J]. Journal of Plant Physiology, 2002, 159(6).
- Bloom A J, Sukrapanna S S, Warner R L. Root respiration associated with ammonium and nitrate absorption and assimilation by barley.[J]. Plant physiology, 1992, 99(4).
- Jonathan P. Lynch, Melissa D. Ho. Rhizoeconomics: Carbon costs of phosphorus acquisition[J]. Plant and Soil, 2005, 269(1/2).