

# 不同土壤 pH 和铵硝态氮配比对杉木和木荷幼苗生理特性及各器官氮含量的影响

余佳翔, 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, 福州, 350002)

**摘要:** 【目的】在土壤酸化和氮(N)亏缺及异质性分布环境加剧的背景下, 探究不同土壤 pH 和铵硝态氮配比的栽培环境对亚热带主要针叶树杉木和阔叶树木荷幼苗生理特性和根茎叶氮含量的影响及差异, 可为筛选适宜 2 个树种生长的最佳土壤 pH 和氮形态配比环境提供科学依据。【方法】本研究以杉木和木荷幼苗为研究对象, 设置 2 个 pH 水平 (pH<sub>1</sub>=4.5 和 pH<sub>2</sub>=6.5) 和 5 个铵硝态 N 配比 (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N : NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 分别为 10 : 0、7 : 3、3 : 7、0 : 10、5 : 5), 模拟和构建不同 pH 条件和铵硝态 N 配比的养分环境, 分析和比较 2 个树种幼苗的生理特性和 N 素吸收利用效率的差异。【结果】(1) 2 个 pH 处理下, 杉木叶片的 MDA 含量、SOD、POD 和 CAT 活性以及木荷幼苗叶片的 POD 活性均表现为 pH=4.5 高于 pH=6.5 水平。在 5 个铵硝 N 配比处理下, 杉木的 SOD、POD 和 CAT 活性随着处理中硝态氮浓度的升高而升高, 木荷的 SOD、POD 和 CAT 活性随着处理中铵态氮浓度的升高而升高。(2) 2 个 pH 处理下, pH=4.5 较 pH=6.5 显著抑制了杉木和木荷的氮代谢关键酶 GS、GOGAT、NR 和 NiR 活性, 抑制了杉木幼苗对铵态氮的同化利用和对硝态氮的吸收, 抑制了木荷幼苗对硝态氮和铵态氮的吸收; 降低了 2 个树种幼苗器官的总氮积累量。在铵硝态氮的配比为 10 : 0、0 : 10 和 5 : 5 的 3 个处理下, 单一的铵态氮处理较单一的硝态氮处理整体上显著提高了杉木叶片的 GS、GOGAT、NR 和 NiR 活性。pH=4.5 水平下, 木荷的 GS、GOGAT、NR 和 NiR 活性在单一的铵态氮处理下较高, pH=6.5 水平下, 单一的铵态氮处理提高了木荷的 GS 活性, 单一的硝态氮处理提高了木荷的 NiR 活性。杉木叶片的铵态氮含量在较高硝态氮浓度的配比下高于较高铵态氮浓度的配比, 硝态氮含量在不同配比下无显著差异; 木荷叶片的铵态氮和硝态氮含量整体上表现为在较高铵态氮浓度的配比下高于较高硝态氮浓度的配比。(3) 杉木幼苗器官的氮素积累量在较高铵态氮浓度的配比下较大, 而木荷各器官的氮素积累量在较高硝态氮浓度的配比下较大。【结论】栽培基质的 pH=4.5 的环境不利于杉木和木荷幼苗的生长, 且 2 树种幼苗在培育过程中表现出了不同的氮素吸收偏好, 即高铵态氮配比适合杉木幼苗生长, 高硝态氮配比适合木荷幼苗生长。

**关键词:** 土壤 pH; 铵硝态氮配比; 生理特性; 氮含量; 杉木; 木荷

## Effects of Different Soil pH and Ratios of Ammonium to Nitrate on the Physiological Characteristics and Nitrogen Contents of Various Organs in *Cunninghamia lanceolata* and *Schima superba* Seedlings

YU Jia-xiang, WANG Li-dong, LIANG Hai-yan, WANG Yan-ru, QUAN Xiao-qiang, LI Xiao-yu, YAN Xiao-li\*

(College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China)

**Abstract:** 【Objective】In the context of soil acidification and nitrogen (N) deficiency and the intensification of heterogeneous distribution environment, to investigate the effects and differences of different soil pH and ratios of ammonium to nitrate on the physiological characteristics and root, stalk, and leaf N content of seedlings of the subtropical major coniferous tree, *Cunninghamia lanceolata*, and broadleaf tree, *Schima superba*, which can provide a scientific basis for the screening of the optimal environment for the growth of the two species in soil pH and nitrogen form ratios. 【Methods】In this study, two pH levels (pH<sub>1</sub>=4.5 and pH<sub>2</sub>=6.5) and five ratios of ammonium to nitrate (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N : NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N : 10 : 0, 7 : 3, 3 : 7, 0 : 10, 5 : 5) were used in the simulation of the nutrient environments with different pH and ratios of ammonium to nitrate for the seedlings of *C. lanceolata* and *S. superba*. In order to analyze and compare the differences in physiological characteristics and N uptake and utilization efficiency of the seedlings of the two species, we used the following methods. 【Results】(1) Under the 2 pH treatments, the MDA content, SOD, POD, and CAT activities of *C. lanceolata* leaves and POD activities of leaves of *S. superba* seedlings showed higher levels at pH=4.5 than at pH=6.5. Under the five ratios of ammonium to nitrate treatments, SOD, POD, and CAT activities increased with increasing nitrate-N concentration in the treatments for *C. lanceolata*, and with increasing ammonium-N concentration in the treatments for *S. superba*. (2) Under the two pH

treatments, pH=4.5 significantly inhibited the activities of the key enzymes of nitrogen metabolism GS, GOGAT, NR and NiR in *C. lanceolata* and *S. superba*, inhibited the assimilation and utilization of ammonium nitrogen and uptake of nitrate nitrogen by *C. lanceolata* seedlings, and inhibited nitrate nitrogen and ammonium nitrogen uptake by *S. superba* seedlings; and reduced the total nitrogen accumulation in the organs of the seedlings of the two tree species. Under the three treatments with the ratios of ammonium-nitrate nitrogen of 10 : 0, 0 : 10, and 5 : 5, the single ammonium nitrogen treatment significantly increased the GS, GOGAT, NR, and NiR activities of *C. lanceolata* leaves as a whole compared to the single nitrate nitrogen treatment. pH=4.5 level, the GS, GOGAT, NR, and NiR activities of *S. superba* were higher in the single ammonium nitrogen treatment, and pH=6.5 level, the single ammonium nitrogen treatment increased GS activity and single nitrate nitrogen treatment increased NiR activity of woodhorn. The ammonium nitrogen content of *C. lanceolata* leaves was higher than that of higher ammonium nitrogen concentrations at the higher nitrate nitrogen concentration ratios, and the nitrate nitrogen content did not differ significantly among ratios; the ammonium nitrogen and nitrate nitrogen contents of *S. superba* leaves as a whole were higher than those of higher nitrate nitrogen concentrations at higher ammonium nitrogen concentration ratios. (3) Nitrogen accumulation in the organs of *C. lanceolata* seedlings was greater at higher ammonium nitrogen concentration ratios, while nitrogen accumulation in the organs of *S. superba* was greater at higher nitrate nitrogen concentration ratios. **[Conclusion]** The pH=4.5 of the cultivation substrate was unfavorable to the growth of *C. lanceolata* and *S. superba* seedlings, and the seedlings of the two species showed different nitrogen uptake preferences during cultivation, i.e., the high ammonium nitrogen ration was suitable for the growth of *C. lanceolata* seedlings, and the high nitrate nitrogen ration was suitable for the growth of *S. superba* seedlings.

**Key words:** Soil pH; Ammonium-nitrate-nitrogen ratio; Physiological properties; Nitrogen content; *C. lanceolata* ,*S. superba*;

## 引言

土壤 pH 是土壤理化性质中的重要因子之一，不同的土壤 pH 会影响和改变土壤养分的分布及转换情况（张静静等，2021），从而影响到植物根系的发育和植株对营养元素的吸收与利用，大量研究表明适宜的土壤 pH 是植物良好生长的必要条件（丁京晶等，2022）。适合植物生长的土壤大多呈弱酸性或弱碱性，如马尾松适合在 pH 为 4.0 和 5.0 的土壤中生长（李小永等，2019），毛枝五针松幼苗最适宜在 pH=7.69~8.42 的土壤中生长（康洪梅等，2016）。然而，近年来，在长期自然及人为不合理因素的开发利用的影响下，我国大部分地区的土壤质量不断退化，特别是土壤酸化的现象日趋严峻（谢渊等，2023），其中在我国南方地区土壤酸化现象尤为严重（张宗祥等 2022），已严重影响和制约了南方地区林木的生长发育和林地的生产力。因此，研究土壤不同 pH 值环境对林木养分吸收和生长发育的影响，探究林木在酸性土壤环境（酸胁迫）中的适应性及其生理生态响应策略，可明确适宜林木生长的最佳土壤 pH 环境，从而在土壤酸化日益严重的背景下，有效促进林木的生长发育和林地生产力的提高。

氮（N）素不仅是植物体内最重要的结构物质，也是植物所必需的重要营养元素之一，对调节植物形态和生理代谢方面具有重要作用（赵平等，1998）。硝态氮（NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N）和铵态氮（NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N）是氮素最常见的无机形态，植物通常通过根系吸收并将其用于代谢活动（Sikder R K 等，2020）。由于铵态氮和硝态氮具有不同的理化性质，植物吸收、运输、同化利用这两种氮素形态的原理也不相同，导致二者对植物生长发育和生理代谢的影响存在差异（张秦泽等，2022）。与此同时，前人研究表明，NH<sub>4</sub><sup>+</sup>和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>对植物生长和生物活性物质的影响取决于 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>/NH<sub>4</sub><sup>+</sup>的比例（Qin J 等，2021），还与植物种类（La Gui-Xiao 等，2013）、植物所处的环境有关（邢瑶等，2015），如杉木在全铵处理下根系伸长生长极显著，从而可促进其对铵态氮的吸收，从而表现出对铵态氮的偏好性（叶义全等，2018）；龙眼在低温（10~15℃）时偏好吸收铵态氮，而在中高温（20~35℃）时对氮素吸收的偏好不明显（朱陆伟等，2022）。但单独施入一种形态氮素对林木的生长发育影响较为有限，合理的氮素配比施肥则对植物生长特性和生理指标有更为明显的促进作用（常笑超等，2018）。此外，大量研究表明，植物对土壤中不同形态氮素的吸收与利用不仅受植物自身的遗传因素的影响，还受其生长环境因子的影响，特别是土壤的 pH 的影响较为显著。然而，目前关于不同铵硝比对植物抗逆生理的影响研究大多集中在农作物上，而在林木方面与此相关的研究相对较少。

同时,在南方热带和亚热带森林土壤氮素分配不均和氮素养分胁迫问题日益凸显,林木生理生态特性对氮素养分胁迫的响应研究多集中在模拟单一形态氮素供应的环境来开展,而模拟与自然界实际土壤环境中铵态氮和硝态氮的在时间和空间分布上的高度异质性,即氮素含量上的不同配比性的研究相对甚少,也未将土壤酸化现象对林木吸收利用不同形态氮素的影响同步考虑进去。因此,科学地揭示不同土壤 pH 环境下,林木对土壤不同氮素形态配比的异质养分环境的响应特性,可为筛选林木适宜栽植的土壤 pH 和氮素环境,以及主要树种集约经营管理中合理施用氮肥提供理论依据。

植物受到胁迫后其细胞内的稳态环境会被破坏,表现为细胞内活性氧含量增加,产生大量丙二醛,从而增加抗氧化酶活性的表达来抵御胁迫。超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT)是植物应对胁迫时的重要酶,能减轻植物在应对环境胁迫时受到的伤害(杨舒贻等,2016)。如随着闽楠幼苗受到的干旱胁迫加剧,其过氧化物酶、过氧化氢酶及超氧化物歧化酶活性呈现先升高后降低的趋势,表明在胁迫前期,闽楠幼苗不断增强抗氧化酶活性来抵御胁迫,而随着胁迫加剧,抗氧化酶表达受到了抑制(肖小辉等,2023)。菠萝幼苗在高 pH(8~9)的丙二醛含量显著高于低 pH(3~7)条件,且在在高 pH 条件下 POD、CAT 和 APX 活性显著升高,而 SOD 活性没有明显变化,这可能是由于在高 pH 胁迫下,POD、CAT 和 APX 在清除各种活性氧基团的过程中发挥了主要作用(丁京晶等,2022)。氮代谢与植物的生长发育以及产量等方面有着密切的联系,谷氨酰胺合成酶(GS)、谷氨酸合成酶(GOGAT)、硝酸还原酶(NR)和亚硝酸还原酶(NiR)是植物体内与氮代谢密切相关的重要酶,它们对作物的生长发育、氮素同化与积累、应对逆境等情况都起着调控作用(徐洪超等,2022)。有研究表明,铵硝混合处理下雷竹叶片的 NR 和 GS 活性显著高于单一铵态氮或硝态氮营养的叶片,表明铵硝混合处理增强了雷竹叶片的氮同化能力(叶莉莎等 2016)。由此可见,在不同的环境条件下,植物的抗氧化酶活性和氮代谢关键酶活性有不同的响应机制。

杉木是我国人工林培育中占据重要地位的树种,约占我国人工林面积的 24%(Liu B 等 2018),也是我国南方特有的速生用材树种,具有生长快,材质好的特点(闫丽飞等,2020)。然而,近年来,对杉木进行的一系列不合理的营林措施如单作、连栽、轮伐期缩短等导致土壤养分耗竭和酸化严重,严重制约了林地生产力(Hu Y 等,2020)。木荷是山茶科的常绿乔木,是我国亚热带常绿阔叶林的主要建群种,同时还是珍贵优质阔叶用材造林树种(李明月等,2013),也是我国南方主栽的生态防护树种和珍贵用材树种,具有造林成效好,优质速生,丰产性显著等特点(张蕊等,2015)。杉木常与阔叶树种木荷混种来优化林分结构,提高生产力(Liu B 等,2018)。但是,杉木和木荷主要分布在我国南方的热带和亚热带酸性红壤地区,由于酸沉降和过量施用氮肥等因素的影响使这些区域土壤退化的趋势逐渐明显,特别是土壤酸化现象和氮亏缺日趋严重(徐仁扣等,2018),已成为限制杉木和木荷树种生长的主要因素。目前,针对亚热带主要针叶树杉木和落叶树木荷在不同土 PH 和氮素形态配比环境下的研究较少,尤其是是 2 个树种的生理特性和各器官氮含量的影响。

因此,本研究以亚热带主要针叶树种杉木和阔叶树种木荷为研究对象,在土壤酸化和氮亏缺及异质性分布环境加剧的背景下,探究不同土壤 pH 和铵硝态氮配比的栽培环境对亚热带主要针叶树杉木和阔叶树木荷幼苗生理特性和根茎叶氮含量的影响及差异,可为筛选适宜 2 个树种生长的最佳土壤 pH 和氮形态配比环境提供科学依据。

## 1. 材料与方法

### 1.1 试验材料

试验于 2021 年福建省林业科学研究所的试验苗圃进行,选取长势一致的一年生杉木和木荷幼苗作为试验材料。幼苗的培育基质为洗净的河沙。

### 1.2 试验设计

试验采用双因素随机组合设计,本试验设置两个 pH 水平,分别为 pH=4.5 和 pH=6.5,通过配制 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 溶液和 NaOH 溶液调节沙培基质的 pH。设置五个不同形态的氮素配比(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N:NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N)处理:10:0、7:3、5:5、3:7、0:10。共计 10 个处理,每个处理设置 6 次重复。试验从 2021 年 4 月上旬开始,缓苗后每 5 d 浇 1 次营养液,每次 50 mL(梁海燕等,2022);每 2~3 d 浇 1 次水,每次 50~100 mL(各幼苗

浇等量水)。于 2021 年 9 月底结束, 历时 6 个月。苗木在处理期间除施肥外, 其他因素均保持一致。

### 1.3 测定指标与方法

#### 1.3.1 丙二醛含量和抗氧化酶活性的测定

采用南京建成生物工程研究所的试剂盒测定 2 个树种幼苗叶片的丙二醛含量和抗氧化酶活性。各试剂盒测定方法为: 丙二醛 (MDA) 含量采用 TBA 法测定; 超氧化物歧化酶 (SOD) 活性采用氮蓝四唑 (Nitro-blue tetrazolium, NBT) 还原法测定; 过氧化物酶 (POD) 活性采用愈创木酚比色法测定; 过氧化氢酶 (CAT) 活性采用紫外吸收法测定。

#### 1.3.2 氮素吸收与同化关键酶活性的测定

2 个树种幼苗叶片的硝酸还原酶 (NR)、谷氨酸合成酶 (GOGAT)、亚硝酸还原酶 (NiR)、谷氨酰胺合成酶 (GS) 活性采用酶联免疫吸附测定法测定。

#### 1.3.3 植物铵态氮、硝态氮含量的测定

采用苏州科铭生物技术有限公司试剂盒测定 2 个树种幼苗根、茎、叶的铵态氮、硝态氮含量和氮素总积累量。铵态氮含量测定: 称取约 0.1 g 新鲜植物样本, 加入 1 mL 提取液 (样本质量: 提取液体积为 1:10), 室温匀浆后, 于 12000 g, 4℃ 离心 10 min, 取上清液, 用酶标仪调节波长至 625 nm 进行测定。硝态氮含量测定: 称取约 0.1 g 新鲜植物样本, 加入 1 mL 蒸馏水 (样本质量: 蒸馏水体积为 1:10), 室温匀浆后置于 90℃ 恒温水浴锅中浸提 30 min, 期间不断晃动或者置于 90℃ 恒温摇床中振荡提取 30 min, 待冷却后于 25℃, 于 12000 g 离心 15 min, 取上清液, 用酶标仪调节波长至 410 nm 进行测定。

### 1.4 数据分析

采用 SPSS 软件进行双因素方差分析, 检验不同 pH 条件和铵硝配比的交互作用对苗木的代谢生理指标和氮素吸收利用的影响, 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, 应用 Microsoft Excel 2019 和 ORIGIN 2019 进行数据整理和图表绘制。采用隶属函数对 2 个树种在不同 pH 条件下的生理指标进行评价。

## 2. 结果与分析

### 2.1 不同 pH 条件和铵硝态氮配比对杉木和木荷幼苗叶片丙二醛含量的影响

由表 1 可知, 不同土壤 pH 处理下杉木的丙二醛 (MDA) 含量之间差异显著, 而木荷的 MDA 含量之间无显著差异; 不同的铵硝配比处理下木荷的 MDA 含量之间差异显著, 而杉木的 MDA 含量之间无显著差异; 土壤 pH 和铵硝配比的交互作用均对杉木和木荷的 MDA 含量无显著影响。

表 1 不同土壤 pH 和铵硝态氮配比对杉木和木荷幼苗叶片 MDA 含量影响的双因素分析

Tab.1 Two-Way ANOVA of the effects of different soil pH and ammonium to nitrate ratios on MDA content in *C. lanceolata* and *S. superba*

因素 Factor	杉木 <i>C. lanceolata</i>		木荷 <i>S. superba</i>	
	F	P	F	P
	pH	20.922	<0.001**	0.177
铵硝态氮配比	0.710	0.589	6.275	<0.001**
pH×铵硝态氮配比	0.244	0.912	0.650	0.630

注: \*,  $P < 0.05$ ; \*\*,  $P < 0.01$ 。

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

图 1(a)可见, 杉木的 MDA 含量在 pH=4.5 水平下显著高于 pH=6.5。2 个 pH 水平下, 杉木的 MDA 含量总体上表现为高硝态氮浓度配比处理高于高铵态氮浓度配比处理, 纯硝态 N 处理的 0:10 配比和较高硝态 N 浓度的 3:7 配比下杉木的 MDA 含量分别比其他 3 个配比高出 5.5%~27.1%和 5.1%~26.7%。

图 1(b)可见, 木荷的 MDA 含量在两个 pH 水平下无显著差异。两个 pH 水平下, 木荷的 MDA 含量均表现为在较高铵态 N 浓度的 10:0 和 7:3 配比下高于较高硝态 N 浓度的 0:10 和 3:7 配比。木荷的 MDA 含量均在 3:7 配比下最低。

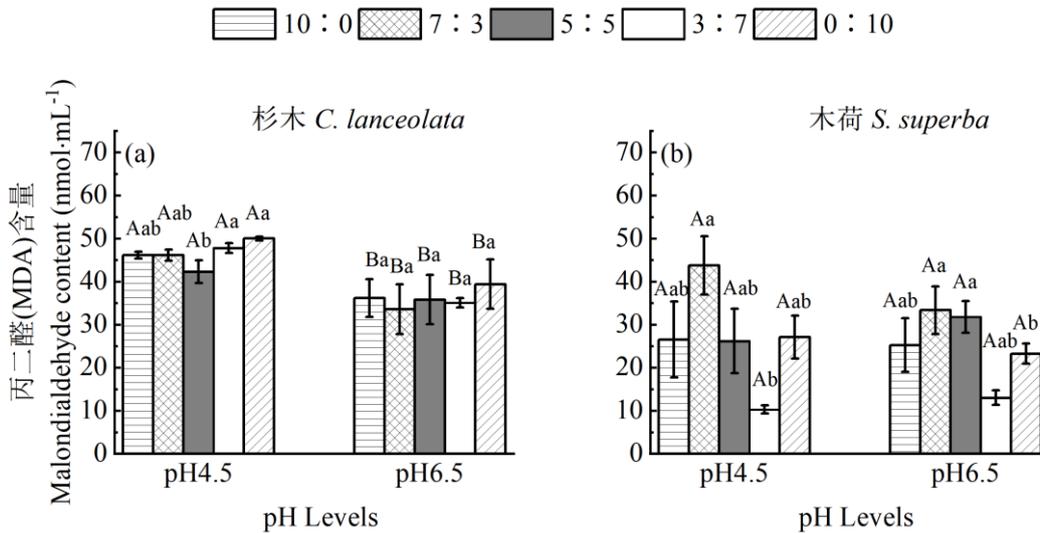


图 1 不同 pH 条件和铵硝态氮配比下杉木和木荷幼苗叶片的丙二醛含量

Fig. 1 Malondialdehyde content in leaves of *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 ( $p < 0.05$ ).

图 2(a)可见, 在不同的 pH 条件和铵硝态氮配比处理下杉木的 MDA 含量整体上均高于木荷的 MDA 含量, 在 3:7 和 0:10 配比下两树种之间的 MDA 含量差异显著。

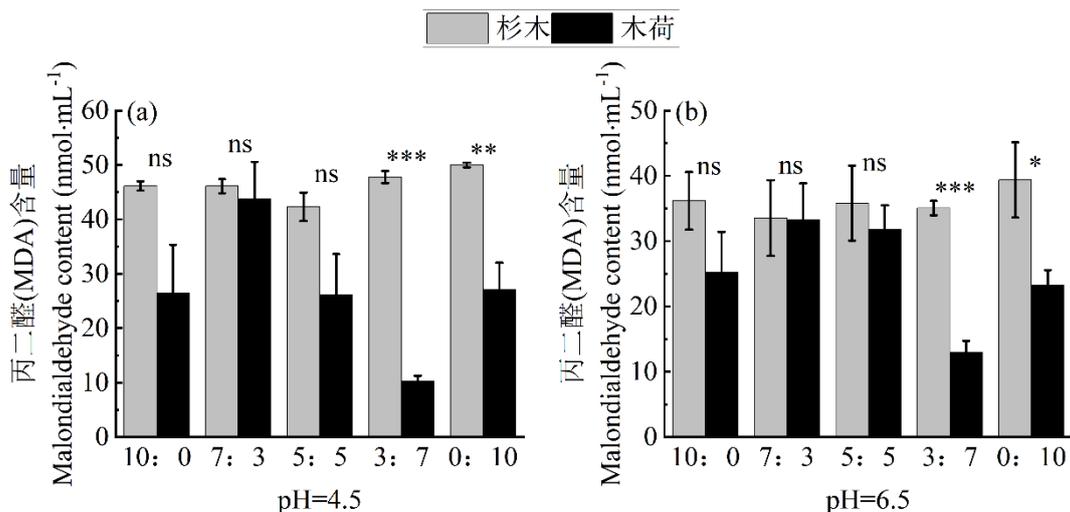


图 2 不同 pH 条件和铵硝态氮配比下叶片的丙二醛含量在杉木和木荷间的差异分析

Fig. 2 Analysis of malondialdehyde content of leaves under different pH conditions and ammonium-nitrate-nitrogen ratios between *C. lanceolata* and *S. superba*

## 2.2 不同 pH 条件和铵硝态氮配比对杉木和木荷幼苗抗氧化酶活性的影响

表 2 可见, 土壤 pH 对杉木的 SOD、POD 和 CAT 活性均有极显著 ( $P<0.01$ ) 影响, 对木荷的 SOD 和 CAT 活性无显著影响, 对木荷的 POD 活性有极显著 ( $P<0.01$ ) 影响; 铵硝配比对杉木的 POD 和 CAT 活性有极显著影响, 对木荷的 POD 活性有显著影响; 土壤 pH 和铵硝配比对杉木的 POD 和 CAT 活性有极显著交互作用影响, 对木荷的 SOD 和 POD 活性有显著交互作用影响。

表 2 不同土壤 pH 和铵硝态氮配比对杉木和木荷抗氧化酶影响的双因素分析

Tab. 2 Two-Way ANOVA of the effects of different soil pH and ammonium to nitrate ratios on antioxidant enzymes of *C. lanceolata* and *S. superba*

树种 Tree species	参数 Parameter	土壤 pH		铵硝配比		土壤 pH×铵硝配 比	
		F	P	F	P	F	P
杉木 <i>C. lanceolata</i>	超氧化物歧化酶 SOD	22.463	<0.01**	1.844	0.135	0.700	0.596
	过氧化物酶 POD	109.515	<0.01**	14.091	<0.01**	10.500	<0.01**
	过氧化氢酶 CAT	148.925	<0.01**	26.927	<0.01**	3.975	<0.01**
木荷 <i>S. superba</i>	超氧化物歧化酶 SOD	0.124	0.727	0.856	0.497	3.372	0.016*
	过氧化物酶 POD	25.620	<0.01**	6.061	<0.01**	11.922	<0.01**
	过氧化氢酶 CAT	0.949	0.335	0.393	0.812	1.397	0.248

注: \*,  $P<0.05$ ; \*\*,  $P<0.01$ 。

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

### 2.2.1 不同 pH 条件和铵硝态氮配比对杉木和木荷幼苗抗氧化酶活性的影响

图 3(a、c、e)可见, 五个铵硝配比处理下杉木的 SOD、POD、CAT 活性均在 pH=4.5 时最高, 在 pH=4.5 水平下杉木的 SOD、POD、CAT 活性均在 0:10 配比下最高, 分别比其他 4 个配比显著高出 13.3%~88.1%其中 POD 和 CAT 活性均表现为随着硝态氮浓度的升高而升高。6.5 的 pH 水平下, 杉木的 CAT 活性在不同铵硝配比处理下表现为随着硝态氮浓度的升高而升高。

图 3(b、d、f)可见, 2 个 pH 水平下较高硝态氮浓度的 3:7 和 0:10 配比下木荷的 POD 活性在 pH=4.5 处理下较高, 其余配比在不同 pH 水平之间差异不显著。4.5 的 pH 水平下, 木荷的 SOD、POD、CAT 活性整体上表现为随着硝态氮浓度的上升而上升。6.5 的 pH 水平下, 木荷的 SOD 和 CAT 活性整体上表现为随着硝态氮浓度的上升而下降, 10:0 配比下木荷的 SOD 活性比其他 4 个配比高出 6.8%~21.0%。木荷的 POD 活性在较高硝态 N 浓度的 0:10 和 3:7 配比下较低, 分别比其他 3 个配比显著低 31.8%~41.1%和 47.3%~54.4%。

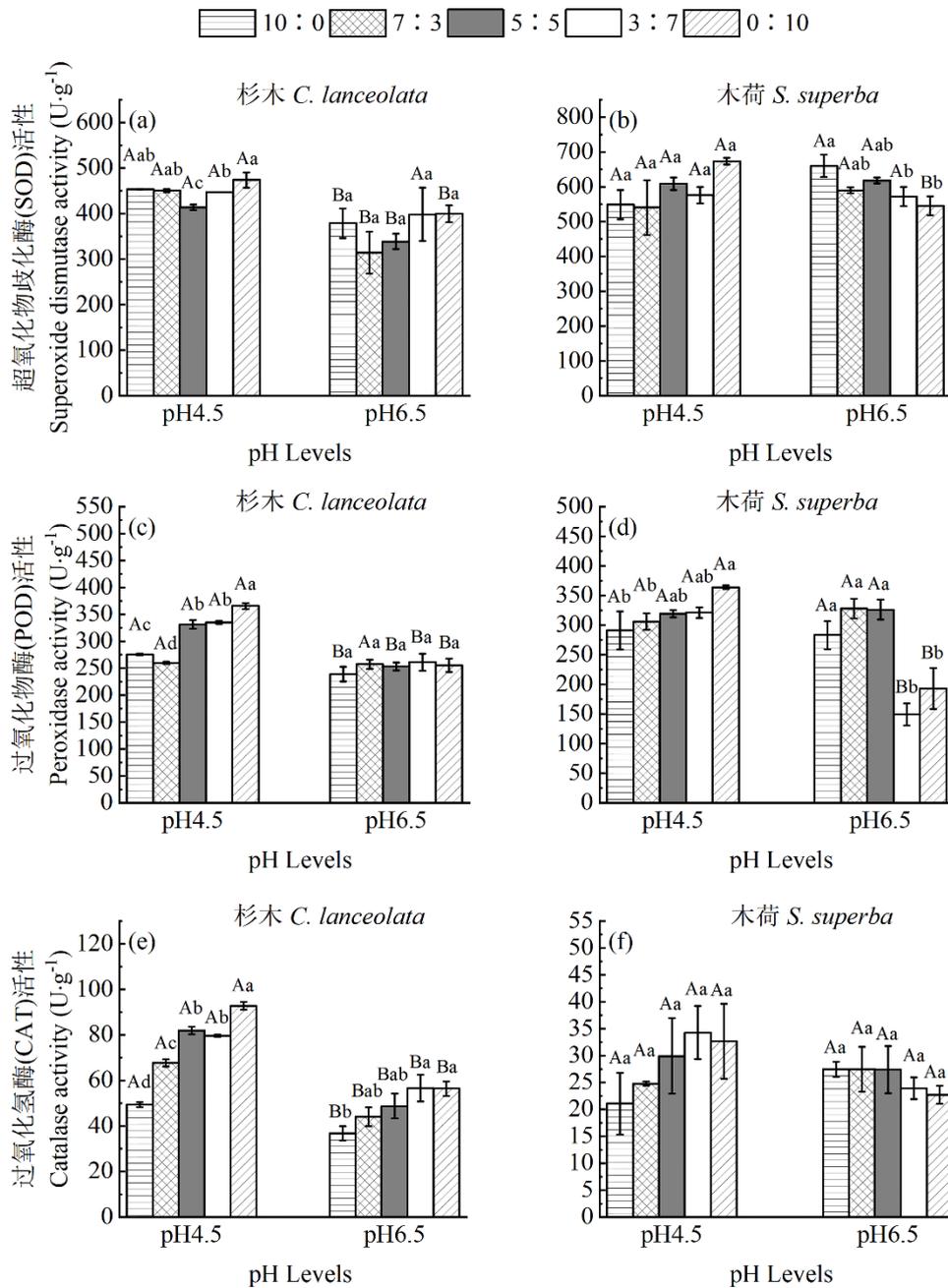


图 3 不同 pH 条件和铵硝态氮配比对杉木和木荷幼苗叶片的 SOD、POD、CAT 活性的影响

Fig.3 SOD, POD, and CAT contents in leaves of *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态氮配比处理下不同 pH 水平之间差异显著，小写字母表示在同一 pH 水平不同铵硝态氮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 ( $p < 0.05$ ).

### 2.2.2 不同 pH 条件和铵硝态氮配比下杉木和木荷幼苗抗氧化酶活性的差异分析

由图 3 可见，木荷的 SOD 活性在两个 pH 水平下均高于杉木的 SOD 活性；两树种的 POD 活性在 pH=4.5 水平下无显著差异，在 pH=6.5、铵硝态氮配比为 10: 0、7: 3、5: 5 的处理下表现为杉木的 POD 活性大

于木荷，在 pH=6.5、铵硝态氮配比为 3: 7、0: 10 的处理下表现为木荷的 POD 活性大于杉木；杉木的 CAT 活性在两个 pH 水平下均显著高于木荷的 CAT 活性。

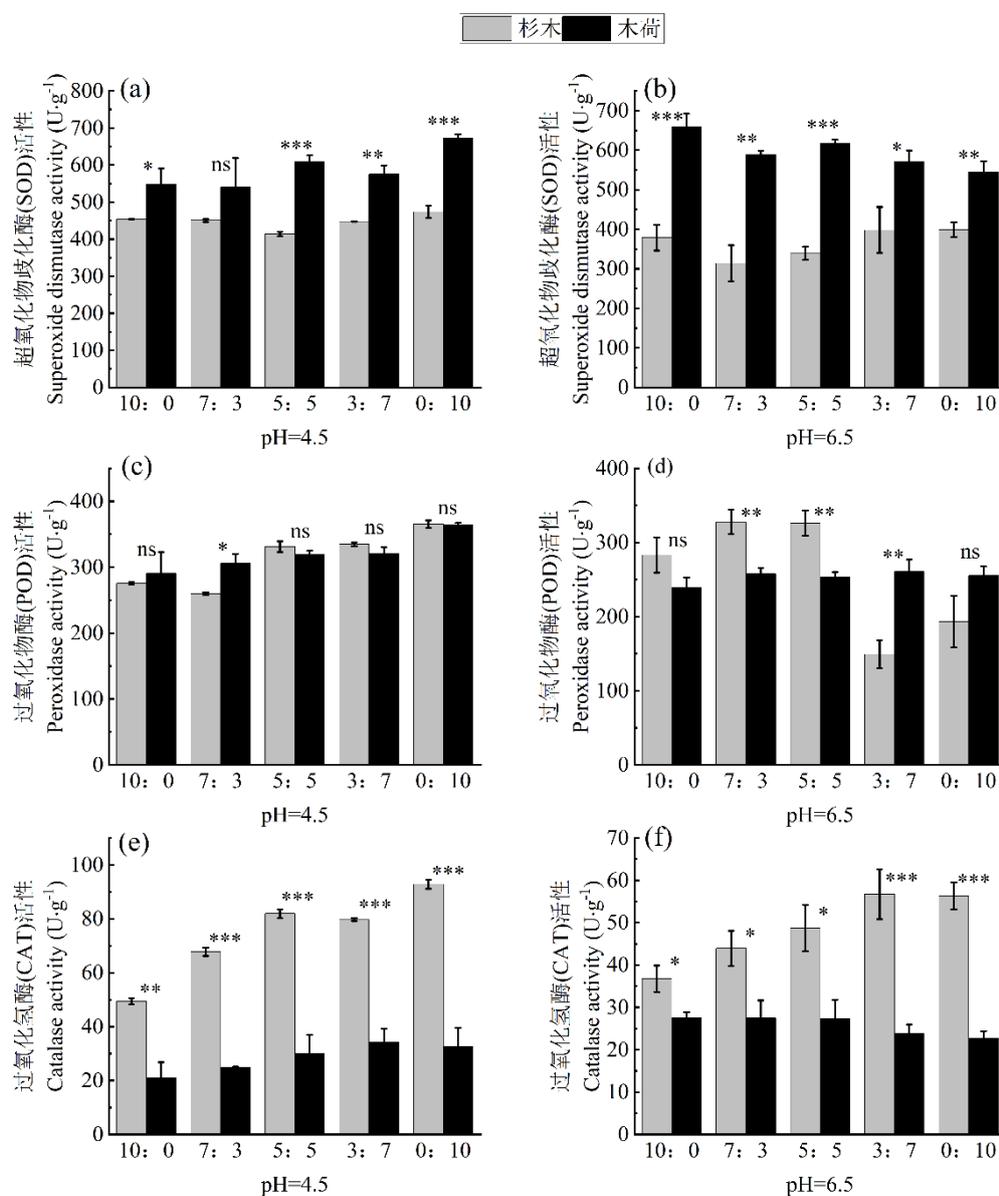


图 4 不同 pH 条件和铵硝态氮配比下叶片 POD、SOD、CAT 活性在杉木和木荷幼苗间的差异分析

Fig.4 Differential analysis of leaf POD, SOD and CAT activities between *C. lanceolata* and *S. superba* seedlings under different pH conditions and ammonium-nitrate ratios

### 2.3 不同 pH 条件和铵硝态氮对比对杉木和木荷幼苗氮代谢关键酶活性的影响

由表 3 可见，土壤 pH 对杉木和木荷幼苗的谷氨酸合成酶（GOGAT）、硝酸还原酶（NR）和亚硝酸还原酶（NiR）活性均有极显著影响，对杉木幼苗的谷氨酰胺合成酶（GS）活性有极显著影响，对木荷幼苗的 GS 活性有显著影响；铵硝对比对杉木和木荷幼苗的 GS、NR 和 NiR 活性均有极显著影响，对杉木幼苗的 GOGAT 活性无显著影响，对木荷幼苗的 GOGAT 活性有极显著影响；土壤 pH 和铵硝对比对杉木幼苗的 GS、GOGAT 和 NR 活性具有显著的交互作用，对木荷幼苗的 GOGAT、NR 和 NiR 具有极显著的交互作用。

表 3 不同土壤 pH 和铵硝态氮比对杉木和木荷氮代谢关键酶活性影响的双因素分析

Tab. 3 Two-Way ANOVA of the effects of different soil pH and ammonium to nitrate ratios on key enzymes in nitrogen metabolism in *C. lanceolata* and *S. superba*

树种 Tree species	参数 Parameter	土壤 pH		铵硝配比		土壤 pH×铵硝配比	
		F	P	F	P	F	P
杉木 <i>C. lanceolata</i>	谷氨酰胺合成酶 GS	8.740	0.006**	24.187	<0.001**	3.651	0.038*
	谷氨酸合成酶 GOGAT	41.480	<0.001**	2.357	0.112	3.599	0.040*
	硝酸还原酶 NR	65.170	<0.001**	15.893	<0.001**	4.726	0.016*
	亚硝酸还原酶 NiR	18.911	<0.001**	14.983	<0.001**	1.767	0.188
木荷 <i>S. superba</i>	谷氨酰胺合成酶 GS	7.185	0.012*	17.024	<0.001**	3.214	0.054
	谷氨酸合成酶 GOGAT	24.067	<0.001**	10.057	<0.001**	5.928	0.007**
	硝酸还原酶 NR	56.472	<0.001**	33.321	<0.001**	24.091	<0.001**
	亚硝酸还原酶 NiR	56.981	<0.001**	8.448	0.001**	23.652	<0.001**

注: \*,  $P < 0.05$ ; \*\*,  $P < 0.01$ 。Note: \*,  $P < 0.05$ ; \*\*,  $P < 0.01$ .

### 2.3.1 不同土壤 pH 和铵硝态氮比对杉木和木荷叶片谷氨酰胺合成酶 (GS)、谷氨酸合成酶 (GOGAT)、硝酸还原酶 (NR)、亚硝酸还原酶 (NiR) 活性的影响

图 5 可见, 5:5 配比处理下杉木和木荷的 GS 活性在 pH=4.5 水平下均显著低于 pH=6.5 水平, 10:0 和 0:10 配比下 2 个树种的 GS 活性在 2 个 pH 水平之间差异不显著。

图 5(a、c、e、g)可见, 2 个 pH 水平下的各铵硝配比处理中, 杉木的 GS、NR、NiR 活性整体上均表现为: 10:0 > 0:10 > 5:5, 其中, pH=4.5 水平下, 杉木的 GS 活性在 10:0 配比处理下比其他 2 个配比高出 15.1%~55.4%, 杉木的 GOGAT 活性在 10:0 配比最高, 分别比 5:5 和 0:10 配比显著高出 12.8%和 7.2%。pH=6.5 水平下, 杉木的 GS 活性在 10:0 配比下较其他 2 个配比高出 9.8%~19.3%。

图 5(b) (d) (f) (h)可见, 土壤 pH 对 10:0 配比处理下的木荷幼苗叶片氮代谢关键酶活性无显著影响, 5:5 和 0:10 的铵硝配比处理下木荷的氮代谢关键酶活性在 pH=6.5 水平下较高。pH=4.5 水平下, 木荷幼苗叶片的 4 种氮代谢关键酶活性均表现为 10:0 配比显著高于其他配比; pH=6.5 水平下, 木荷幼苗叶片的 GS 活性随着处理中铵态氮浓度的升高而升高, 而 NiR 活性则随着处理中硝态氮浓度的升高而升高。GOGAT 和 NR 活性在不同铵硝配比处理下无显著差异。

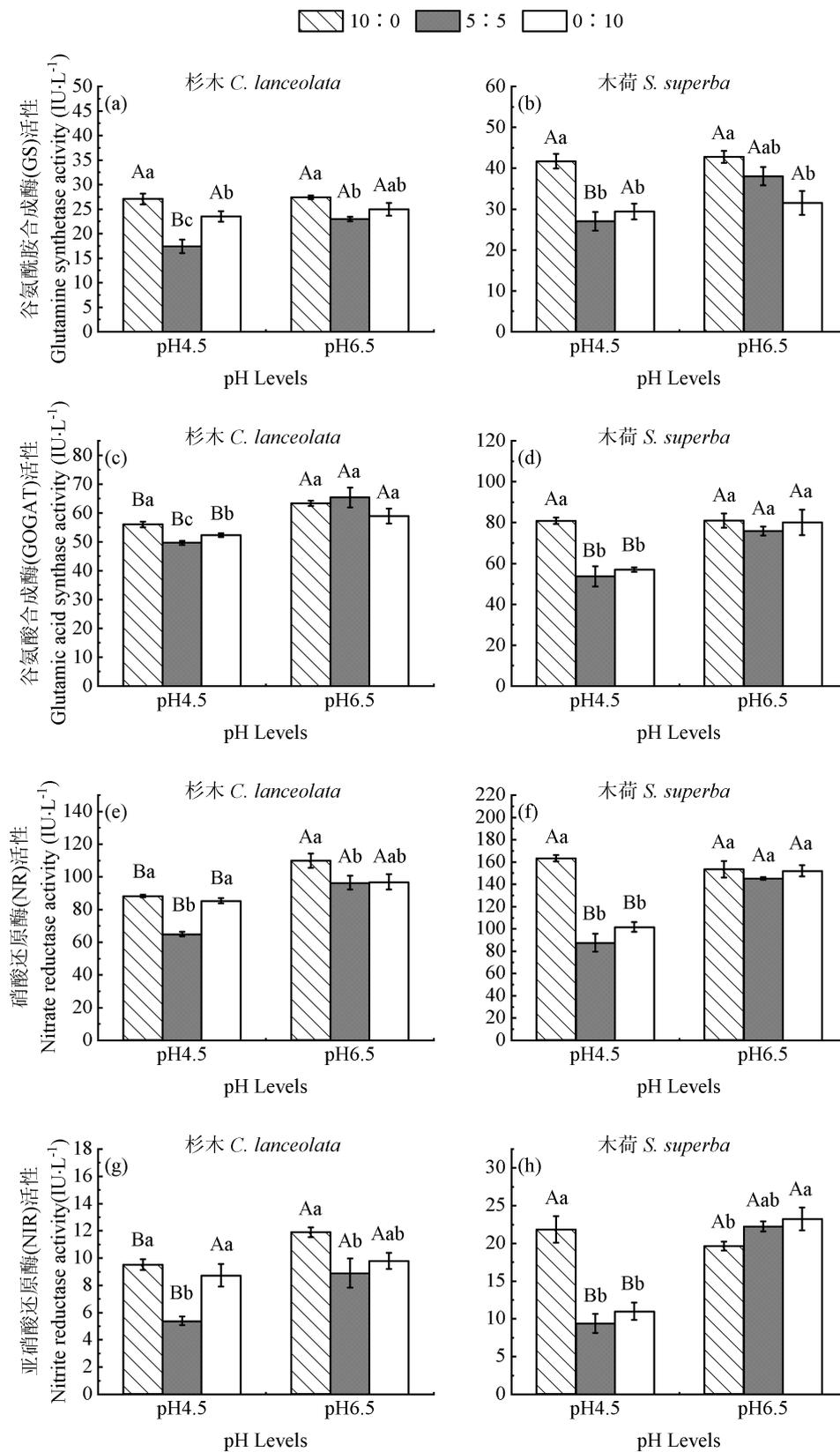


图 5 不同 pH 条件和铵硝态氮配比下杉木和木荷的氮代谢关键酶活性

Fig. 5 Key enzymatic activities of nitrogen metabolism in *C. lanceolata* and *S. superba* different pH conditions and ammonium-nitrate nitrogen 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 ( $p < 0.05$ ).

2.3.2 不同 pH 条件和铵硝态氮配比下杉木和木荷幼苗氮代谢关键酶活性的差异分析

由图 6 可见，木荷幼苗叶片的谷氨酰胺合成酶（GS）、谷氨酸合成酶（GOGAT）、硝酸还原酶（NR）和亚硝酸还原酶（NiR）活性在不同 pH 条件和铵硝态氮配比处理下均大于杉木幼苗。

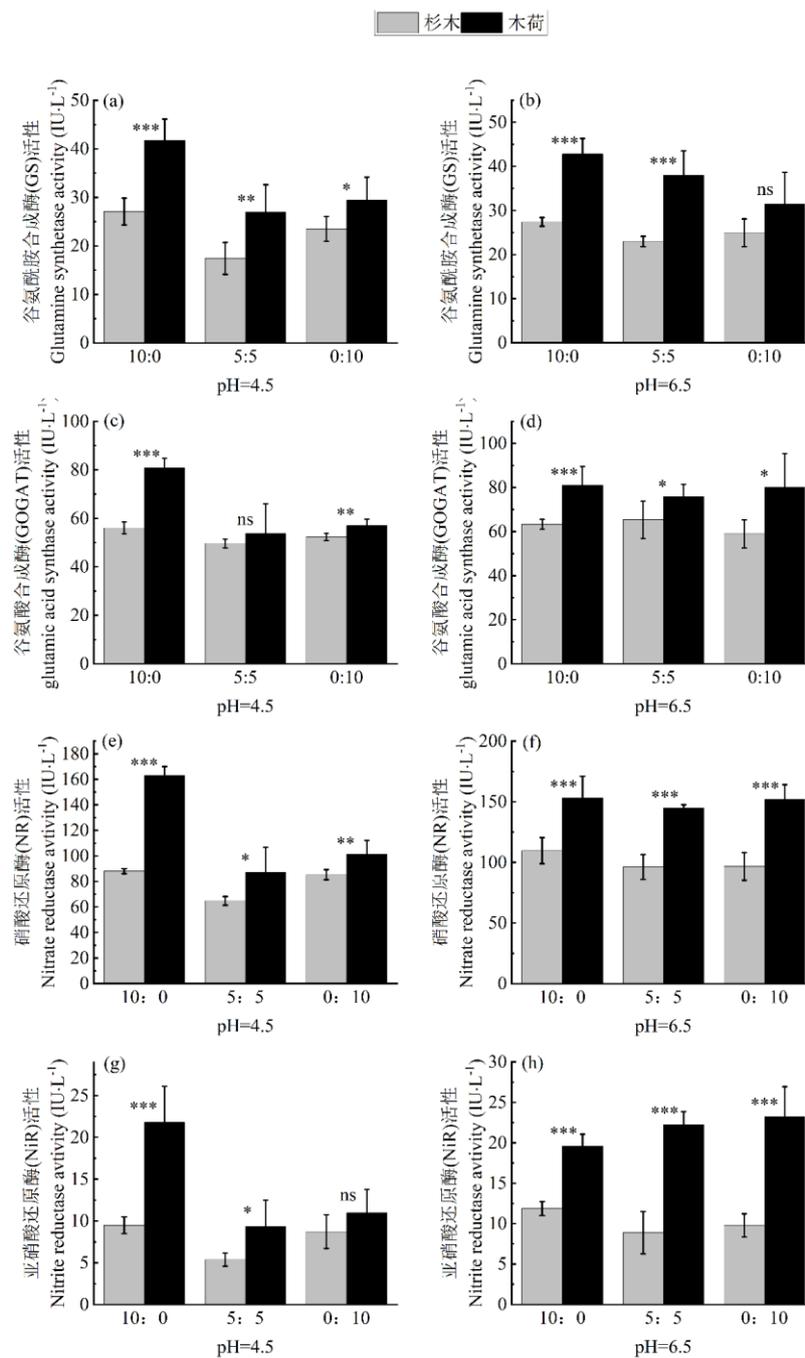


图 6 不同 pH 条件和铵硝态氮配比下叶片氮代谢关键酶活性在杉木和木荷幼苗间的差异分析

Fig.6 Differences in the activities of key enzymes of leaf nitrogen metabolism between *C. lanceolata* and *S. superba* seedlings under different pH conditions and ammonium-nitrate ratios

2.4 不同 pH 条件和铵硝比对杉木和木荷幼苗氮含量的影响

2.4.1 不同 pH 条件和铵硝比对杉木和木荷幼苗铵态氮含量的影响

表 6 可见，不同土壤 pH 处理下杉木根、茎、叶的铵态氮 (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N) 含量之间有极显著 (P<0.01) 差异，木荷根和叶的 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 含量之间有显著差异；不同铵硝配比处理下杉木叶的 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 含量差异显著 (P<0.05)，木荷根的 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 含量有显著差异；土壤 pH 和铵硝比对木荷根的 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 含量有极显著的交互作用影响。

表 4 可见，2 个 pH 水平下，杉木各器官的 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 含量均表现为 pH=4.5 水平显著高于 pH=6.5 水平；木荷的茎和叶 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 含量在不同 pH 处理下无显著差异，10:0 和 7:3 配比下的根 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 含量表现为 pH=6.5 水平显著高于 pH=4.5。3:7 和 0:10 配比下的木荷的根 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 含量在 pH=4.5 处理下较高，10:0 和 7:3 配比下的木荷的根 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 含量在 pH=6.5 处理下较高。

pH=4.5 水平下，不同铵硝配比处理对杉木幼苗根、茎以及木荷幼苗的根、茎、叶 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 含量无显著影响，杉木幼苗叶 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 含量在 0:10 配比下最高，在 5:5 配比下最小；pH=6.5 水平下，不同铵硝配比处理对杉木幼苗的根、叶以及木荷幼苗的茎、叶 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 含量无显著影响，杉木幼苗茎 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 含量在单一形态 N 素处理的 10:0 和 0:10 配比下较高，木荷幼苗的根 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 含量整体上在 10:0 配比下最高。

表 4 不同土壤 pH 和铵硝态氮比对杉木和木荷幼苗器官铵态氮含量的影响

Tab. 4 Effect of different soil pH and ammonium to nitrate ratios on ammonium nitrogen content in organs of *C. lanceolata* and *S. superba* seedlings

树种 Tree species	土壤 pH	铵硝配比	铵态氮含量 (mg·kg <sup>-1</sup> )		
			根 Root	茎 Stem	叶 Leaf
<i>C. lanceolata</i>	4.5	10:0	74.61±1.46 Aa	89.45±7.91 Aa	95.90±4.16 Aab
		7:3	74.54±3.30 Aa	87.07±9.19 Aa	90.81±6.94 Aab
		5:5	75.04±1.41 Aa	90.85±5.47 Aa	85.42±1.27 Ab
		3:7	68.72±2.26 Aa	97.47±2.64 Aa	97.18±3.22 Aab
		0:10	71.20±2.21 Aa	90.36±4.92 Aa	102.08±4.85 Aa
	6.5	10:0	63.55±2.50 Ba	67.72±1.5 Ba	74.89±2.47 Ba
		7:3	61.42±1.22 Ba	64.02±0.66 Bb	75.07±1.54 Ba
		5:5	62.70±1.55 Ba	65.63±0.73 Bab	74.89±2.01 Ba
		3:7	61.68±0.92 Ba	64.72±1.07 Cb	75.04±1.47 Ba
		0:10	61.41±0.70 Ca	68.27±0.29 Ba	80.20±2.70 Ba
<i>S. superba</i>	4.5	10:0	73.01±2.63 Ba	82.27±2.50 Aa	79.95±2.47 Aa
		7:3	76.83±1.80 Ba	96.78±15.83 Aa	76.44±1.52 Aa
		5:5	78.15±0.12 Aa	89.09±6.94 ABa	78.84±1.70 Aa
		3:7	78.24±1.83 ABa	78.30±3.32 Aa	79.17±2.76 Aa
		0:10	76.28±0.71 Aa	76.98±1.15 Aa	79.88±2.06 Aa
	6.5	10:0	92.90±8.45 Aa	76.41±1.24 Aa	74.60±1.37 Aa
		7:3	87.96±1.41 Aab	106.48±17.86 Aa	78.03±1.81 Aa
		5:5	78.64±1.23 Abc	97.91±4.17 Aa	79.84±1.94 Aa
		3:7	76.22±2.92 Bbc	92.86±17.33 Aa	78.62±1.50 Aa
		0:10	68.55±0.61 Cbc	78.59±3.16 Aa	78.36±2.14 Aa

注：不同大写字母表示在同一铵硝态氮配比处理下不同 pH 水平之间差异显著，小写字母表示在同一 pH 水平不同铵硝态氮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).

2.4.2 不同 pH 条件和铵硝态氮配比对杉木和木荷幼苗硝态氮含量的影响

表 6 可见，不同土壤 pH 处理下，杉木的根硝态氮 (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N) 含量之间差异显著 (P<0.01)；不同铵硝配比处理下，木荷的根 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量之间差异显著；土壤 pH 和铵硝配比对木荷根的 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量有显著交互作用影响。

表 5 可见，两个 pH 水平下，杉木的根 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量在同一铵硝配比处理下表现为 pH=6.5 水平大于 pH=4.5；杉木的茎 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量在 10：0 和 5：5 配比下表现为 pH=6.5 水平下最高，在 7：3 配比下表现为 pH=4.5 水平下最高，其他 2 个配比在不同 pH 水平下差异不显著；除 7：3 配比外，杉木的叶 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量整体在 pH=6.5 水平下高于 pH=4.5 水平。木荷的根 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量在 10：0 配比下表现为 pH=6.5 水平大于 pH=4.5，在 5：5 和 3：7 配比下表现为 pH=4.5 水平大于 pH=6.5，其他 2 个配比在不同 pH 水平下差异不显著；木荷的茎、叶 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量整体在 pH=6.5 水平下高于 pH=4.5 水平。

pH=4.5 水平下，不同铵硝配比处理对杉木幼苗根、茎、叶以及木荷幼苗叶的 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量无显著影

表 5 土壤 pH 和铵硝态氮配比对杉木和木荷幼苗器官硝态氮含量的影响

Tab. 5 Effect of soil pH and ammonium to nitrate ratios on nitrate nitrogen content in organs of *C. lanceolata* and *S. superba* seedlings

树种 Tree species	土壤 pH	铵硝配比	硝态氮含量 (mg·kg <sup>-1</sup> )		
			根 Root	茎 Stem	叶 Leaf
<i>C. lanceolata</i>	4.5	10：0	61.95±8.44 Ca	139.86±27.17 Ba	357.35±20.66 Ba
		7：3	76.02±7.69 Ca	189.29±30.52 Aa	357.35±35.25 ABa
		5：5	54.44±2.92 Ca	157.25±12.82 Ba	343.27±43.93 Ba
		3：7	69.74±4.08 Ca	174.05±11.59 Aa	363.88±18.99 Aa
		0：10	64.07±8.35 Ca	155.71±23.50 Aa	336.59±18.54 Aa
	6.5	10：0	154.49±20.65 Aa	171.35±29.22 ABab	402.86±44.32 ABa
		7：3	163.73±10.01 Aa	134.05±20.14 Bb	329.70±33.20 Ba
		5：5	186.99±20.47 Aa	219.32±25.64 Aa	419.07±25.21 Aa
		3：7	181.58±18.20 Aa	138.67±27.86 Aab	348.39±35.8 Aa
		0：10	190.25±23.13 Aa	195.91±19.97 Aab	370.82±68.45 Aa
<i>S. superba</i>	4.5	10：0	64.93±2.70 Cc	119.92±17.07 Aab	506.48±80.16 Aa
		7：3	132.13±17.75 Ab	91.12±9.19 Bb	445.40±44.55 ABa
		5：5	145.30±2.62 Aab	137.36±9.19 Aa	447.58±44.55 Ba
		3：7	173.74±12.27 Aa	132.10±9.82 Aa	457.29±62.55 ABa
		0：10	73.52±2.49 Bc	106.60±9.82 ABab	532.47±66.64 Aa
	6.5	10：0	156.22±19.76 Aa	134.72±13.56 Aa	503.45±42.85 Aa
		7：3	118.02±18.24 Aab	112.72±10.62 Aa	513.71±51.61 Aa
		5：5	76.35±6.08 Bc	132.08±19.71 Aa	522.36±12.85 Aa
		3：7	100.24±6.06 Cbc	129.30±16.08 Aa	496.61±39.89 Aa
		0：10	72.06±4.92 Bc	118.27±8.64 Aa	582.86±38.18 Aa

响，木荷幼苗的根 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量在铵硝混合的 7：3、5：5、3：7 配比下显著高于单一形态 N 素处理的

10:0、0:10 配比, 在 3:7 配比下最高, 茎 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量在 5:5 和 3:7 配比下显著高于其他 3 个配比, 叶 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量在 5 个配比下无显著差异。pH=6.5 水平下, 不同铵硝配比处理对杉木幼苗的根、叶以及木荷幼苗的茎、叶 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量无显著影响, 杉木幼苗茎 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量在 5:5 配比下最高, 在 7:3 配比下最小; 木荷幼苗的根 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量整体上表现为随着处理中铵态 N 浓度的升高而升高, 在 10:0 配比下最高。

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

表 6 土壤 pH 和铵硝态氮对比对杉木和木荷幼苗器官硝态氮含量影响的双因素方差分析

Tab. 6 Two-Way ANOVA of the effects of soil pH and ammonium to nitrate ratios on ammonium nitrogen content in organs of *C. lanceolata* and *S. superba* seedlings

树种 Tree species	器官 Organ	参数 Parameter	土壤 pH		铵硝配比		土壤 pH×铵硝配比	
			F	P	F	P	F	P
杉木 <i>C. lanceolata</i>	根 Root	铵态氮含量	77.971	<0.001**	1.550	0.213	0.787	0.543
		硝态氮含量	148.939	<0.001**	0.545	0.704	0.967	0.440
	茎 Stem	铵态氮含量	73.305	<0.001**	0.381	0.820	0.488	0.745
		硝态氮含量	0.331	0.569	0.713	0.589	2.315	0.080
	叶 Leaf	铵态氮含量	67.848	<0.001**	2.714	0.049*	1.035	0.405
		硝态氮含量	0.904	0.349	0.406	0.803	0.668	0.619
木荷 <i>S. superba</i>	根 Root	铵态氮含量	4.834	0.036*	3.756	0.014*	6.247	<0.001*
		硝态氮含量	3.408	0.075	8.927	<0.001**	17.023	<0.001*
	茎 Stem	铵态氮含量	0.861	0.361	2.073	0.109	0.329	0.856
		硝态氮含量	0.912	0.347	2.163	0.097	0.383	0.819
	叶 Leaf	铵态氮含量	15.098	<0.001**	1.273	0.303	1.723	0.171
		硝态氮含量	2.119	0.156	0.908	0.472	0.190	0.942

注: \*,  $P < 0.05$ ; \*\*,  $P < 0.01$ 。

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

### 2.5 不同 pH 条件和铵硝态氮对比对杉木和木荷幼苗各器官氮素积累量的影响

表 7 可见, 土壤 pH 对杉木各器官的 N 素积累量及总 N 素积累量均有显著影响, 对木荷根、叶 N 素积累量及总 N 素积累量有显著影响; 铵硝对比对杉木的茎、叶 N 素积累量有显著影响, 对木荷根、叶 N

素积累量及总 N 素积累量有显著影响；土壤 pH 和铵硝比对杉木的叶 N 素积累量有交互作用影响，对木荷根 N 素积累量有显著影响。

表 7 土壤 pH 和铵硝态氮对比对杉木和木荷幼苗器官氮素积累量影响的双因素方差分析

Tab. 7 Two-Way ANOVA of the effects of soil pH and ammonium nitrate ratios on Nitrogen accumulation in organs of *C. lanceolata* and *S. superba* seedlings

树种 Tree species	因素 Factor		器官氮素积累量 Nitrogen accumulation in organs			总氮素积累量 Total nitrogen accumulation
			根 Root	茎 Stem	叶 Leaf	
<i>C. lanceolata</i>	土壤 pH	F	206.924	43.003	121.829	189.175
		P	<0.001**	<0.001**	<0.001**	<0.001**
	铵硝配比	F	1.933	2.646	7.281	3.928
		P	0.121	0.046*	<0.001**	0.008**
	土壤 pH×铵硝配比	F	3.149	1.423	7.113	3.428
	P	0.023*	0.242	<0.001**	0.016*	
<i>S. superba</i>	土壤 pH	F	0.184	2.622	1.379	0.632
		P	0.670	0.113	0.244	0.431
	铵硝配比	F	1.743	2.016	5.762	3.033
		P	0.158	0.109	<0.001**	0.027*
	土壤 pH×铵硝配比	F	2.754	1.364	0.457	0.388
	P	0.040*	0.262	0.767	0.816	

注：\*， $P<0.05$ ；\*\*， $P<0.01$ 。

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

表 8 可见，2 个 pH 水平下，杉木的根、茎、叶的 N 素积累量整体上表现为 pH=6.5 水平大于 pH=4.5；木荷的根、茎、叶 N 素积累量在不同 pH 处理之间差异不显著。

pH=4.5 水平下，杉木的根 N 素积累量在 7:3 配比下最高，茎、叶 N 素积累量及总 N 素积累量在 5:5 配比下最高，但各配比之间差异不显著；木荷根、叶 N 素积累量及总 N 素积累量在 5:5 配比下最高，茎 N 素积累量在 7:3 配比下最高但各配比之间无显著差异。pH=6.5 水平下，杉木的根 N 素积累量在 0:10 配比下显著高于其他 4 个配比，茎、叶 N 素积累量及总 N 素积累量在 10:0 配比下显著高于其他 4 个配比，茎和总氮素积累量随着硝态氮浓度的升高而下降；木荷的根 N 素积累量在 10:0 配比下显著高于其他 4 个配比，茎 N 素积累量在 7:3 配比下显著高于其他 4 个配比，叶 N 素积累量和总 N 素积累量均在 5:5 配比下最高。

表 8 不同土壤 pH 和铵硝态氮对比对杉木和木荷幼苗器官氮素积累量的影响

Tab. 8 Effect of different soil pH and ammonium nitrate ratios on Nitrogen accumulation in organs of *C. lanceolata* and *S. superba* seedlings

树种 Tree species	pH	铵硝配比 NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> :NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	器官氮素积累量 (mg)			总氮素积累量 (mg)
			根 Root	茎 Stem	叶 Leaf	
<i>C. lanceolata</i>	4.5	10:0	1.12±0.16 Ba	1.49±0.33 Ba	4.14±0.40 Ca	6.76±0.66 Ca
		7:3	1.59±0.18 Aa	1.16±0.11 Ca	4.16±0.21 Ca	6.92±0.45 Aa
		5:5	1.21±0.20 Ca	1.56±0.15 Ba	4.51±0.16 Ba	7.27±0.27 Ba
		3:7	1.37±0.15 Ba	1.34±0.36 Aa	3.97±0.24 Ca	6.69±0.64 Ba
		0:10	1.38±0.23 Ca	1.10±0.19 Ba	4.03±0.26 Aa	6.51±0.42 Ba
	6.5	10:0	2.75±0.38 Ab	3.14±0.23 Aa	8.28±0.24 Aa	14.18±2.13 Aa

		7 : 3	2.51±0.45 Ab	2.64±0.18 Aab	7.64±0.42 Aa	12.79±0.73 Aab
		5 : 5	3.05±0.43 Aab	2.37±0.22 Aab	6.03±0.43 Ab	11.45±0.73 Abc
		3 : 7	2.68±0.29 Ab	1.98±0.20 Ab	6.18±0.13 Ab	10.84±1.35 Abc
		0 : 10	3.37±0.23 Aa	1.97±0.24 Ab	4.98±0.47 Ab	10.33±0.67 Ac
		10 : 0	0.52±0.21 ABa	0.56±0.12 Aa	2.45±0.53 Aa	3.52±0.65 Aa
		7 : 3	0.64±0.06 Aa	0.63±0.08 Aa	2.81±0.50 Ba	4.08±0.48 Ba
	4.5	5 : 5	0.75±0.18 Aa	0.43±0.08 Aa	4.03±0.63 Ba	5.21±0.87 Ba
		3 : 7	0.68±0.14 Aa	0.59±0.11 ABa	3.07±0.47 Ba	4.34±0.57 Ba
木荷		0 : 10	0.46±0.08 Aa	0.56±0.09 Aa	3.14±0.26 Ba	4.17±0.39 Aa
<i>S. superba</i>		10 : 0	0.90±0.07 Aa	0.35±0.02 Ac	2.54±0.17 Ac	3.78±0.21 Ab
		7 : 3	0.71±0.04 Ab	0.64±0.05 Aa	3.03±0.13 Bb	4.38±0.17 Ba
	6.5	5 : 5	0.45±0.03Ac	0.50±0.04 Ab	3.90±0.21 Ba	4.85±0.19 Ba
		3 : 7	0.67±0.05 Ab	0.44±0.04 Bbc	3.39±0.11 Bb	4.50±0.16 Ba
		0 : 10	0.48±0.01 Ac	0.48±0.02 ABb	3.87±0.13 Aa	4.82±0.13 Aa

注：不同大写字母表示在同一铵硝态氮配比处理下不同 pH 水平之间差异显著，小写字母表示在同一 pH 水平不同铵硝态氮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).

### 2.6 基于生理特性和氮素吸收利用的隶属函数评价

对杉木和木荷生理特性和各器官氮含量的隶属函数分析如表 9。由隶属值排序可知，在所有处理中，最有利于杉木生长的处理是 T11 (pH=6.5, 10 : 0 配比)，最有利于木荷生长的处理是 T10 (pH=6.5, 0 : 10 配比)。pH=4.5 条件下最有利于杉木和木荷生长的处理均是 T3 (pH=4.5, 5 : 5 配比)。pH=6.5 条件下最有利于杉木生长的处理是 T6 (pH=6.5, 10 : 0 配比)，最有利于木荷生长的处理是 T10 (pH=6.5, 0 : 10 配比)。

表 9 杉木和木荷生理特征和各器官氮含量的隶属函数综合评价

Tab. 9 Comprehensive evaluation of physiological characteristics and nitrogen uptake and utilization in *C. lanceolata* and *S. superba* using membership functions

树种 Tree species	处理 Treatments	MDA	SOD	POD	CAT	叶片 氮素 积累 量	总氮素 积累量 TN-A	隶属值 Membership value	组内 排序 Sort within group	种内排 序 Sort within species
		MDA- C	SOD- A	POD- A	CAT- A	LN- A				
<i>C. lanceolata</i>	T1	0.195	0.872	0.733	0.776	0.039	0.032	0.280	3	8
	T2	0.198	0.855	0.849	0.447	0.044	0.053	0.285	2	7
	T3	0.391	0.623	0.327	0.194	0.124	0.099	0.295	1	6
	T4	0.113	0.835	0.300	0.234	0.000	0.023	0.202	4	9
	T5	0.000	1.000	0.078	0.000	0.014	0.000	0.150	5	10
	T6	0.704	0.596	1.000	1.000	1.000	1.000	0.815	1	1
	T7	0.837	1.000	0.864	0.872	0.851	0.819	0.796	2	2
	T8	0.721	0.846	0.896	0.787	0.478	0.645	0.679	3	3
	T9	0.759	0.475	0.839	0.644	0.513	0.565	0.615	4	4
	T10	0.540	0.466	0.879	0.651	0.234	0.497	0.474	5	5
木荷	T1	0.515	0.388	0.660	0.428	0.000	0.000	0.248	5	9

<i>S. superba</i>	T2	0.000	0.346	0.730	0.583	0.128	0.202	0.294	4	8
	T3	0.525	0.682	0.790	0.799	0.560	0.612	0.515	1	3
	T4	1.000	0.521	0.800	0.982	0.219	0.296	0.462	2	4
	T5	0.499	1.000	1.000	0.913	0.247	0.234	0.461	3	5
	T6	0.555	0.066	0.377	0.304	0.032	0.095	0.198	5	10
	T7	0.312	0.411	0.169	0.305	0.208	0.312	0.301	4	7
	T8	0.358	0.272	0.176	0.306	0.514	0.481	0.429	3	6
	T9	0.918	0.500	1.000	0.453	0.335	0.356	0.531	2	2
	T10	0.613	0.629	0.796	0.504	0.504	0.473	0.637	1	1

### 3. 讨论

#### 3.1 不同土壤 pH 条件和铵硝态氮比对杉木和木荷幼苗生理特性的影响

丙二醛是植物在遭受逆境胁迫后其细胞膜脂过氧化的产物，丙二醛含量越高则植物细胞受氧化损害程度越严重（张泽锟等，2023）。超氧化物歧化酶（SOD）、过氧化物酶（POD）和过氧化氢酶（CAT）被认为是活性氧清除酶（Sikder R K 等，2020）。植物受到胁迫后可诱发活性氧（ROS）的过量积累，其中主要包括过氧化氢（ $H_2O_2$ ）、超氧自由基、单线态氧等，可攻击植物细胞膜系统，对植物生长造成不良影响。为了应对氧化应激，植物通常通过增强超氧化物歧化酶（SOD）、过氧化物酶（POD）、过氧化氢酶（CAT）的活性，来产生非酶抗氧化剂来消除过量的 ROS，进而保护植物免受氧化应激（Liu D 等，2022）。本研究中，杉木的 MDA 含量在 4.5 的 pH 水平下显著高于 6.5 的 pH 水平，杉木的 SOD、POD 和 CAT 活性整体上均表现为在 pH=4.5 水平下显著高于 pH=6.5，表明在 pH=4.5 的条件下杉木幼苗受到了一定的伤害，从而加强抗氧化酶活性表达来抵御胁迫。木荷的 MDA 含量、SOD 和 CAT 活性在两个 pH 处理下无显著差异，木荷 POD 活性整体在 pH=4.5 水平下较高，这可能表明木荷在两个 pH 水平下受到胁迫的程度无显著差异，POD 在清除各种活性氧基团的过程中发挥了主要作用。

本研究中，在 5 个铵硝态氮配比处理下，杉木的 MDA 含量均表现为在高硝态氮配比的 3: 7 和 0: 10 配比下较高，说明杉木在高硝态氮配比的条件下受到了胁迫，并加强了 SOD、POD、CAT 活性来抵御胁迫；木荷的 MDA 含量在高铵态氮的 10: 0 和 7: 3 配比下较高，且在高硝态氮的 3: 7 和 0: 10 配比下木荷的 MDA 含量显著低于杉木，说明木荷在高铵态氮配比的条件下受到了胁迫，而在 pH=4.5 的处理下木荷的 SOD、POD、CAT 活性在高铵态氮配比处理下较弱，在 pH=6.5 水平时活性增强，这可能是由于 pH=4.5 的栽培条件以及高铵态氮处理的交互作用对木荷产生的伤害较为严重，抑制了木荷幼苗抗氧化酶的活性，随着 pH 的升高，木荷幼苗受到的胁迫程度减弱，抗氧化酶活性逐渐恢复。

此外，有研究发现，木荷幼苗比枫香幼苗对酸雨的抗性更强，表现为酸雨处理下木荷幼苗的 MDA 含量低于枫香幼苗，以及 SOD 含量高于枫香幼苗（Chen J 等，2013）。本研究中，杉木和木荷幼苗的丙二醛含量和抗氧化酶活性对胁迫的响应也具有很大的差异，木荷幼苗的 MDA 含量在同一 pH 和铵硝态氮配比处理下显著低于杉木幼苗，说明木荷受到的损伤程度低于杉木，这与以上的研究结果一致。木荷幼苗的 SOD 活性在同一处理下显著高于杉木，而 CAT 活性却显著低于杉木，说明木荷幼苗主要通过增加 SOD 活性来抵御胁迫，而杉木幼苗则主要通过增加 CAT 活性来抵御胁迫。POD 活性在 pH=4.5 整体上无显著差异，在 pH=6.5 时表现为高铵态氮配比下杉木大于木荷，高硝态氮配比下则为木荷大于杉木。

综上所述，过低的土壤 pH 对杉木和木荷均会造成酸胁迫。较高硝态氮浓度的铵硝配比会对杉木形成氮素养分胁迫，杉木的抗氧化酶表达水平加强，活性提高。而 4.5 的土壤 pH 和较高铵态氮浓度的配比形成的酸胁迫和氮素养分胁迫抑制了木荷的抗氧化酶活性，提高硝态氮比例能够提高木荷的抗氧化酶活性，减轻其在胁迫下受到的伤害，在 pH=6.5 条件下，木荷在较高铵态氮浓度的配比下受到氮素养分胁迫，其抗氧化酶的表达水平提高，抗氧化酶活性升高。

#### 3.2 不同土壤 pH 条件和铵硝态氮比对杉木和木荷幼苗氮素吸收利用的影响

植物从土壤中吸收的无机氮源主要是铵盐（ $NH_4^+$ ）和硝酸盐（ $NO_3^-$ ）， $NH_4^+$ 和  $NO_3^-$ 在相关酶的作用下合成谷氨酰胺和谷氨酸，然后经过转氨作用形成不同的氨基酸，再合成蛋白质等含氮的有机化合物，影响

植物的生长发育(徐洪超等, 2022)。硝酸还原酶(NR)是植物氮素同化步骤中的第1个酶, NR利用NADH供氢体将 $\text{NO}_3^-$ 还原为 $\text{NO}_2^-$ , 亚硝酸还原酶(NiR)再将 $\text{NO}_2^-$ 还原为 $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ 进入氮同化途径后, 首先由谷氨酰胺合成酶(GS)催化合成谷氨酰胺, 然后由谷氨酸合酶(GOGAT)将谷氨酰胺和2-戊二酸转变为两分子谷氨酸(张华珍等, 2011)。

土壤pH会影响植物根系对土壤中矿质元素的吸收, 进而影响到植物体对氮素的吸收利用(陈常瑜等, 2020)。植物体内铵态氮和硝态氮的含量通常能够反映植物对土壤氮素的吸收情况和植物体内的氮素转化和利用情况(王梦柳等, 2021)。本研究发现, 杉木幼苗吸收的铵态氮含量在pH=4.5的处理下较高, 但诱导铵同化的GS和GOGAT酶活性较低, 导致pH=4.5的处理下杉木幼苗器官的铵态氮含量显著升高并在叶片内大量积累, 无法被植物吸收利用, 有研究发现, 柏拉木在吸收了大量硝态氮后, 硝酸还原酶NR活性加强, 进而更多硝态氮被同化, 所以叶片硝态氮含量降低(吴淑华等, 2019), 说明本研究中在pH=4.5的处理下杉木的GS和GOGAT酶同化铵态氮的途径受到阻碍。杉木幼苗器官的硝态氮含量在pH=4.5的处理下较低, 且在该pH处理下杉木叶片的NR和NiR酶活性较低, 这可能是杉木幼苗在pH=4.5的处理下对硝态氮的吸收能力较弱, 相对应的同化酶的表达也较弱。木荷幼苗各器官的铵态氮和硝态氮含量整体在pH=4.5的处理下较低, 氮同化的关键酶GS、GOGAT、NR、NiR活性也较低, 可能原因是pH=4.5的栽培环境影响了木荷对不同形态氮素的吸收。此外, 木荷的氮同化关键酶GS、GOGAT、NR、NiR活性在同一处理下均大于杉木幼苗, 同样证明了木荷幼苗比杉木幼苗具有更强的抵御胁迫的能力。

土壤中的铵硝配比会影响植物体内铵态氮和硝态氮的含量(王瑞等, 2022)。本研究中, 2个pH水平下, 杉木叶片的铵态氮含量在较高硝态氮浓度的配比下高于较高铵态氮浓度的配比, 硝态氮含量在不同配比下无显著差异; 木荷叶片的铵态氮和硝态氮含量整体上表现为在较高铵态氮浓度的配比下高于较高硝态氮浓度的配比。杉木的器官N素积累量和总氮素积累量整体上表现为随着pH的升高而升高, 木荷的器官N素积累量和总氮素积累量在不同pH水平下无显著差异。较高铵态氮浓度的配比提高了杉木的器官N素积累量和总氮素积累量, 较高硝态氮浓度的配比提高了木荷的器官N素积累量和总氮素积累量。

综上所述, pH=4.5的栽培环境会影响杉木和木荷对铵态氮和硝态氮的吸收同化。较高铵态氮浓度的铵硝配比能促进杉木对铵态氮的吸收和各器官的氮素积累, 促进杉木生长发育。木荷对氮素的吸收则表现出与杉木相反的习性, 较高硝态氮浓度的铵硝配比能促进木荷各器官的氮素积累, 促进木荷生长发育。

#### 4. 总结:

pH=4.5的栽培环境会对杉木和木荷造成一定的逆境胁迫, 树种会通过增加抗氧化酶活性来抵御胁迫, pH=4.5显著抑制杉木和木荷的氮代谢关键酶活性和各器官氮素积累量, 抑制杉木和木荷幼苗对硝态氮和铵态氮的吸收和同化。较高硝态氮浓度的铵硝对比对杉木形成氮素养分胁迫, 较高铵态氮浓度的铵硝对比对木荷形成氮素养分胁迫, 在胁迫下2个树种增强抗氧化酶表达, 提高抗氧化酶活性抵御胁迫。较高铵态氮浓度的铵硝对比提高了杉木的GS、GOGAT、NR和NiR活性, 较高硝态氮浓度的铵硝对比提高了木荷的NiR活性。整体上较高铵态氮浓度的铵硝对比促进杉木各器官N素积累, 较高硝态氮浓度的铵硝对比促进木荷各器官N素积累。通过隶属函数的分析表明, 杉木适宜在土壤pH=6.5, 铵硝态氮配比为10:0的环境下生长, 木荷适宜在土壤pH=6.5, 铵硝态氮配比为0:10的环境下生长。

#### 参考文献

张静静, 刘尊驰, 鄢创, 等. 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(2): 69-81.

(Zang JJ, Liu ZC, Yan C, et al. Effects of soil pH on soil carbon, nitrogen, and phosphorus ecological stoichiometry in three types of steppe[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2021, 30(2): 69-81. [in Chinese])

丁京晶, 罗嘉腾, 黄家权. 不同pH对菠萝幼苗根系生长和叶片生理特性的影响[J/OL]. 分子植物育种, 2022:1-13. . .

(Ding JJ, Luo JT, Huang JQ\*. Effect of Different pH on Root Growth and Leaf Physiological Characteristics of Pineapple Seedlings[J/OL]. Molecular Plant Breeding. 2022:1-13. [in Chinese])

- 李小永, 周运超. 不同 pH 环境条件马尾松幼苗的生理生态适应性[J]. 黑龙江农业科学, 2019(8): 43 - 46.  
( Li XY, Zhou YC. Physiological and Ecological Adaptability of Pinus massoniana Seedlings Under Different pH Conditions[J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2019(8): 43-46. [in Chinese])
- 康洪梅, 张珊珊, 杨文忠, 等. 土壤 pH 值对极小种群毛枝五针松生理特性的影响[J]. 东北林业大学学报, 2016, 44(6): 4-6+10.  
(Kang HM, Zhang SS, Yang WZ, Li YQ Effects of Soil pH on Physiological Characteristics of Pinus wangii[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2016, 44(6): 4-6+10. [in Chinese])
- 谢渊, 纪梦雅, 付学治, 等. 福建省土壤酸化现状与治理对策——以福建省 18 个县(市、区)为例[J]. 集美大学学报(自然科学版), 2023, 28(1): 26 - 33.  
(Xie Y, Ji MY, Fu XZ et al. Current Situation of Soil Acidification and Treatment Measures in Fujian Province: Take 18 Counties (Cities, Districts) in Fujian Province as an Example[J]. Journal of Jimei University( Natural Science), 2023, 28(1): 26-33. [in Chinese])
- 张宗祥, 黄峥嵘, 吴雪凡, 等. 土壤酸化对玉米产量、氮代谢及相关基因表达的影响[J]. 华北农学报, 2022, 37(3): 94 - 103.  
(Zhang ZX, Huang ZR, Wu XF et al. Effects of Soil Acidification on Yield, Nitrogen Metabolism, and Related Gene Expression of Maize[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2022, 37(3): 94-103. [in Chinese])
- 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(2): 39 - 44.  
(Zhao P, Sun GC, Peng SL, Ecophysiological Research on Nitrogen Nutrition of Plant[J]. Ecologic Science, 1998(2): 39-44. [in Chinese])
- Sikder R K, Wang X, Zhang H, 等. Nitrogen Enhances Salt Tolerance by Modulating the Antioxidant Defense System and Osmoregulation Substance Content in Gossypium hirsutum[J]. Plants, 2020, 9(4): 450.
- 张秦泽, 郝广, 李洪远. 外源输入氮的有效性及其对植物生长与生理影响的研究进展[J]. 生态学杂志, : 1 - 13.  
(Zhang QZ, Hao G, Li HY, Effects of availability and form of exogenous nitrogen on plant growth and physiology[J]. Chinese Journal of Ecology, : 1-13. [in Chinese])
- Qin J, Yue X, Ling Y, 等. Nitrogen form and ratio impact phenolic accumulation and relative gene expression in Cyclocarya paliurus[J]. Trees, 2021, 35(2): 685-696.
- La Gui-Xiao et al. Effect of NH<sub>4</sub><sup>+</sup>/NO<sub>3</sub><sup>-</sup> ratios on the growth and bolting stem glucosinolate content of chinese kale ('Brassica alboglabra' L.H. bailey)[J]. Australian Journal of Crop Science, 2013, 7(5): 618-624.
- 邢瑶, 马兴华. 氮素形态对植物生长影响的研究进展[J]. 中国农业科技导报, 2015, 17(2): 109 - 117.  
(Xing Y, Ma XH, Research Progress on Effect of Nitrogen Form on Plant Growth[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2015, 17(2): 109-117. [in Chinese])
- 叶义全, 罗红艳, 李茂, 等. 氮素形态对杉木幼苗侧根生长和叶片光合特性的影响[J]. 西北植物学报, 2018, 38(11): 2036 - 2044.  
(Ye YQ, Luo HY, Li M et al. Effects of Nitrogen Forms on Lateral Roots Development and Photosynthetic Characteristics in Leaves of Cunninghamia lanceolata Seedlings[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2018, 38(11): 2036-2044. [in Chinese])
- 朱陆伟, 张智钧, 白翠华, 等. 温度和供氮形态对龙眼吸收氮素动力学的影响[J]. 热带作物学报, 2022, 43(2): 337 - 345.  
(Zhu LW, Zhang ZI, Bai CH, Yao LX, Nitrogen Uptake Dynamics for Longan as Affected by Temperature and Nitrogen Form[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2022, 43(2): 337-345. [in Chinese])
- 常笑超, 刘勇, 李进宇, 等. 不同形态氮素配比对雄性毛白杨苗木生长的影响[J]. 北京林业大学学报, 2018, 40(9): 63 - 71.  
(Chang XC, Liu Y, Li JY, et al. Effects of different nitrogen forms and ratios on growth of male Populus tomentosa seedlings[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2018, 40(9): 63-71. [in Chinese])
- 杨舒怡, 陈晓阳, 惠文凯, 等. 逆境胁迫下植物抗氧化酶系统响应研究进展[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2016, 45(5): 481 - 489.  
(Yang SY, Chen XY, Hui WK et al. Progress in responses of antioxidant enzyme systems in plant to environmental stresses[J].

- Journal of Fujian Agriculture and Forestry University ( Natural Science Edition). 2016, 45(5): 481–489. [in Chinese])
- 肖小辉, 李天成, 周湘林, 等. 干旱胁迫对闽楠幼苗的生长及生理特性的影响[J]. 中国农业文摘-农业工程, 2023, 35(3): 17–21. (Xiao XH, Li TC, Zhou XL, et al. Effects of drought stress on growth and physiological characteristics of *Phoebe bournei* seedlings[J]. China Agricultural Abstracts · Agricultural Engineering, 2023, 35(3): 17–21. [in Chinese])
- 徐洪超, 商靖, 刘铭荟, 等. 氮代谢相关酶的研究进展[J]. 安徽农业科学, 2022, 50(4): 17–20. (Xu HC, Shang J, Liu MH et al. Research Progress of Enzymes Related to Nitrogen Metabolism[J]. Anhui Agric.Sci, 2022, 50(4): 17–20 [in Chinese])
- 叶莉莎, 陈双林. 氮素形态及配比对雷竹光合特性和氮代谢酶活性的影响[J]. 生态学杂志, 2016, 35(9): 2355–2360. (Ye LS, Chen SL\*. Effects of nitrogen forms and ratios on photosynthetic characters and enzyme activities in nitrogen metabolism of *Phyllostachys violascens*[J]. Chinese Journal of Ecology. 2016, 35(9): 2355–2360. [in Chinese])
- Liu B, Liu Q, Daryanto S, 等. Implications for the restoration of mixed broadleaf-conifer forests from Chinese fir monocultures[J]. Forest Ecology and Management, 2018.
- 闫鹏飞, 杨庆朋, 郑文辉, 等. 杉木幼苗非结构性碳水化合物对遮阴及恢复光照的响应[J]. 西北植物学报, 2020, 40(2): 311–318. (Yan LF, Yang QP, Zeng WH et al. Responses of Non-structural Carbohydrates in Above-ground Tissues/organs and Root to Shading and Light Restoration in *Cunninghamia lanceolata* Saplings[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2020, 40(2): 311–318. [in Chinese])
- Hu Y. Response of Bacterial and Fungal Soil Communities to Chinese Fir (*Cunninghamia lanceolata*) Long-Term Monoculture Plantations[J]. Frontiers in Microbiology, 2020, 11.
- 李明月, 王健, 王振兴, 等. 模拟氮沉降条件下木荷幼苗光合特性、生物量与 C、N、P 分配格局[J]. 生态学报, 2013, 33(5): 1569–1577. (Li M Y, Wang J, Wang Z X et al. Photosynthetic characteristics, biomass allocation, C, N and P distribution of *Schima superba* seedlings in response to simulated nitrogen deposition[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(5): 1569–1572. [in Chinese])
- 张蕊, 王艺, 金国庆, 等. 模拟氮沉降对低磷胁迫下 3 个种源木荷幼苗生长及叶片氮磷含量的影响[J]. 林业科学, 2015, 51(4): 36–43. (Zhang R, Wang Y, Jin GQ, Zhou ZC, Effects of simulated N deposition on growth and Leaf N and P Content in Seedlings of Three Provenances of *Schima superba* under Phosphorous Deficit Stress[J]. SCIENTIA SILVAE SINICAE, 2015, 51(4): 36–43. [in Chinese])
- 徐仁扣, 李九玉, 周世伟, 等. 我国农田土壤酸化调控的科学问题与技术措施[J]. 中国科学院院刊, 2018, 33(2): 160–167. (Xu RK, Li JY, Zhou SW et al. Scientific Issues and Controlling Strategies of Soil Acidification of Croplands in China[J]. Soil and Sustainable Development, 2018, 33(2): 160–167. [in Chinese])
- 梁海燕, 林智熠, 杨佳玉等. 酸胁迫下氮配比对杉木生长和砂培基质氮素的影响[J]. 森林与环境学报, 2022, 42(06): 569–575. (Liang HY, Lin ZY, Yang JY et al. Effects of the ratios of different nitrogen forms under acid stress on growth of Chinese fir and nitrogen content in sand culture medium[J]. Journal of Forest and Environment, 2022, 42(06): 569–575. [in Chinese])
- 张泽锟, 张辰阳, 汪洋, 等. 不同质量分数生长素对 Cd 胁迫的香樟幼苗生理生化特性的影响[J]. 东北林业大学学报, 2023, 51(5): 41–47. (Zhang ZK, Zhang CY, Wang Y et al. Effects of Different Auxin Content on Physiological and Biochemical Characteristics of *Cinnamomum camphora* Seedlings in Cd Polluted Soil[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2023, 51(5): 41–47. [in Chinese])
- Liu D, Ma Y, Rui M, 等. Is High pH the Key Factor of Alkali Stress on Plant Growth and Physiology? A Case Study with Wheat (*Triticum aestivum* L.) Seedlings[J]. Agronomy, 2022, 12(8): 1820.
- Chen J, Wang W-H, Liu T-W, 等. Photosynthetic and antioxidant responses of *Liquidambar formosana* and *Schima superba* seedlings to sulfuric-rich and nitric-rich simulated acid rain[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2013, 64: 41–51.
- 张华珍, 徐恒玉. 植物氮素同化过程中相关酶的研究进展[J]. 北方园艺, 2011(20): 180–183. (Zhang HZ, Xu HY. Research Progress on the Enzymes During Plant Nitrogen Assimilation[J]. Northern Horticulture, 2011(20): 180–183. [in Chinese])

陈常瑜, 窦玉青, 沈晗, 等. 土壤 pH 对烤烟氮代谢酶活性及化学成分的影响[J]. 分子植物育种, 2020, 18(11): 3736 - 3742.

(Chen CY, Dou YQ, Shen H et al. Effects of Soil pH on Nitrogen Metabolism Enzyme Activity and Chemical Composition of Flue-cured Tobacco[J]. Molecular Plant Breeding, 2020, 18(11): 3736-3742. [in Chinese])

王梦柳, 樊卫国, 官纪元, 等. 营养液 pH 变化对刺梨苗吸收硝态氮和铵态氮的影响[J]. 中国农学通报, 2021, 37(9): 28 - 34.

(Wang ML, Fan WG, Guan JY et al. Effect of Nutrient Solution pH on Nitrate-N and Ammonium-N Uptake of Rosa roxburghii Seedlings[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2021, 37(9): 28-34. [in Chinese])

吴淑华, 王佳新, 张世柯, 等. 模拟氮沉降对常绿阔叶林 6 种植物氮同化的影响[J]. 生态环境学报, 2019, 28(2): 262 - 269.

(Wu SH, Wang JX, Zhang SK et al. Effects of simulated nitrogen deposition on nitrogen assimilation of six plants in evergreen broad-leaved forest [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2019,28(2): 262-269. [in Chinese])

王瑞, 李刘泽木, 张震, 等. 氨基酸态氮对油茶幼苗生长和吸收氮素的影响[J]. 经济林研究, 2022, 40(2): 10 - 16.

(Wang R, Li LZM, Zhang Z et al. Effects of amino acid nitrogen on plant growth and nitrogen absorption of Camellia oleifera seedlings[J]. Non-wood Forest Research, 2022, 40(2): 10-16. [in Chinese])