

氮胁迫下不同黑木相思基因型综合评价

陈天笑^{1,2}, 白小刚¹, 何茜², 胡冰¹, 曾炳山¹, 陆钊华^{1*}

(1. 中国林业科学研究院热带林业研究所, 广东 广州 510520; 2. 华南农业大学林学与风景园林学院, 广东 广州 510642)

摘要: 【目的】探究不同黑木相思基因型对缺氮胁迫的生长、生理生化响应, 为黑木相思优良抗逆早期选育提供理论依据 【方法】本研究以 4 个黑木相思基因型(F1、SR3、SR14 和 SR17)幼苗为对象, 以改良霍格兰营养液为基础, 利用沙培盆栽试验方法, 设置 CK (16mmol·L⁻¹ N 素)和-N (0 mmol·L⁻¹ N 素)两个氮水平, 探究氮缺乏对 4 个黑木相思基因型幼苗的生长和生理生化特性的影响, 并用主成分分析结合隶属函数进行耐低氮能力综合评价。【结果】缺氮下, 4 个黑木相思基因型幼苗的苗高、地径、地上部干重和全株干重均被抑制, 地上部分干重和全株干重降幅最小的基因型是 F1, 最大的是 SR17; 根干重除 F1 提升外其余基因型均呈下降趋势; 全株的氮素积累量均显著降低, 其中 F1 基因型的降幅最小, 降低了 39%, SR17 降幅最大, 降低了 58.2%。缺氮下 4 个基因型的根冠比均显著升高, 根系中氮素积累量占全株比均较 CK 升高; 而叶绿素 a(Chla)含量、叶绿素 b(Chlb)含量、类胡萝卜素(Car)含量和叶绿素 a+b(Chla+b)含量均显著降低; 4 个基因型的净光合速率(P_n)均显著降低, 气孔导度(G_s)均呈下降趋势, 胞间 CO₂ 浓度(C_i)均显著上升, 气孔限制值(LS)下降, 这主要是非气孔因素, 其中 SR17 的 P_n 降幅最大, 降低了 76.8%; 缺氮下 SR17 的 F_v/F_m 显著降低, 并且低于 0.8, 而其它基因型无影响, F_v'/F_m' 在 F1、SR3 和 SR17 均显著降低, 而 SR14 无显著差异。缺氮下 4 个基因型的 POD、CAT 和 SOD 活性均显著提高, MDA 含量也显著升高; 通过对 20 个生长、生理生化指标进行主成分分析并结合隶属函数进行综合评价, 得到综合评价值 D 可知, 4 个基因型对缺氮胁迫的适应能力排序为 F1>SR3>SR14>SR17。【结论】缺氮胁迫下, 4 个黑木相思基因型幼苗的生长发育受到抑制, 全株氮素积累量显著降低, 光合色素含量降低、光合作用受到抑制; 缺氮会提高抗氧化相关酶, 但过量的活性氧仍给膜脂带来损害; F1 耐低氮能力最强, 胁迫对其影响较小, 而 SR17 耐低氮能力最弱, 表现在光合速率和全株氮素积累量降幅最大, 幼苗 PSII 中心受损程度较大。

关键词: 黑木相思; 基因型; 生长; 生理生化; 隶属函数; 综合评价

Comprehensive Evaluation in Different Genotypes of *Acacia melanoxylon* under Nitrogen Deficiency Stress

Abstract: 【Objective】To explore the growth, physiological and biochemical responses of different *Acacia melanoxylon* genotypes to nitrogen deficiency stress, and to provide a theoretical basis for early breeding of *Acacia melanoxylon* with excellent stress resistance.

【Method】In this study, 4 genotypes (F1, SR3, SR14 and SR17) seedlings of *Acacia melanoxylon* as objects, based on the improved Hoagland nutrient solution, using the sand culture pot test method, set CK (16mmol·L⁻¹ N) and -N (0 mmol·L⁻¹ N) two nitrogen levels to explore the effects of nitrogen deficiency on the growth and physiological and biochemical characteristics of four *Acacia melanoxylon* genotype seedlings, and use principal component analysis combined with membership function to comprehensively evaluate the low nitrogen tolerance ability. 【Result】Under nitrogen deficiency, the plant height, ground diameter, above-ground dry weight and whole plant dry weight of four *Acacia melanoxylon* genotype seedlings were all inhibited, and the genotype with the smallest decrease in above-ground dry weight and whole plant dry weight was F1, the biggest one is SR17; the root dry weight of other genotypes showed a downward trend except for the increase of F1; the nitrogen accumulation of the whole plant was significantly reduced, among which the F1 genotype had the smallest decrease of 39%, and the SR17 had the largest decrease. A reduction of 58.2%. Under nitrogen deficiency, the root-to-shoot ratios of the four genotypes were significantly increased, and the nitrogen accumulation in the root system was higher than that of CK; while the chlorophyll a (Chla) content, chlorophyll b (Chlb) content, (Car) content and chlorophyll a+b (Chla+b) content were significantly decreased; the net photosynthetic rate (P_n) of the four genotypes was significantly decreased, the stomatal conductance (G_s) showed a downward trend, and the intercellular CO₂ concentration (C_i) increased significantly, and the stomatal limit value (LS) decreased, which was mainly due to non-stomatal factors. Among them, the P_n of SR17 decreased the most, reducing by 76.8%; the F_v/F_m of SR17 decreased significantly under nitrogen deficiency, and was lower than 0.8, while other Genotype had no effect, and F_v'/F_m' was significantly reduced in F1, SR3 and SR17, while SR14 had no significant difference. Under nitrogen deficiency, the activities of POD, CAT and SOD of the four genotypes were significantly increased, and the content of MDA was also significantly increased; the comprehensive evaluation value was obtained by conducting principal

*陆钊华为通讯作者

component analysis on 20 indicators of growth, physiological and biochemical combined with membership function for comprehensive evaluation D shows that the order of adaptability of the four genotypes to nitrogen deficiency stress is F1>SR3>SR14>SR17.

【Conclusion】 Under nitrogen deficiency stress, the growth and development of the four genotype seedlings of *Acacia melanoxylon* were inhibited, the nitrogen accumulation in the whole plant was significantly reduced, the content of photosynthetic pigments was reduced, and photosynthesis was inhibited; nitrogen deficiency would increase antioxidant-related enzymes, However, excessive reactive oxygen species still caused damage to membrane lipids; F1 had the strongest ability to tolerate low nitrogen, and the stress had little effect on it, while SR17 had the weakest ability to tolerate low nitrogen, showing the largest decrease in photosynthetic rate and nitrogen accumulation in the whole plant, the PSII center of the seedlings was more damaged.

Keywords: *Acacia melanoxylon*; genotype; growth; physiology and biochemistry; membership function; comprehensive evaluation

在全球恶劣的气候变化下,非生物胁迫成为限制林木可持续生产的主要胁迫^[1],我国华南地区其土壤类型主要是红壤,土壤养分贫瘠,保肥能力差^[2],再加华南地区暴雨频发^[3],土壤矿质营养淋失严重,这使得林地土壤肥力退化,因此营养胁迫成为华南地区制约植物生长发育和林木生产力的主要因素之一。当今应对土壤养分匮乏的策略主要是化肥的使用和作物选育^[4]。但由于林地生产者缺少科学的施肥技术和方法,常常出现化肥施用过量的情况,这不仅增加了生产成本,而且会对植物产生毒害作用,并且会对环境造成污染^[5],所以通过营养学和遗传学的手段进行优良品种选育是一种行之有效的方法。

黑木相思(*Acacia melanoxylon*)是含羞草科金合欢属的常绿大乔木,原产于澳大利亚东部和东南部,因其具有生长迅速、木材材性优良、适应能力强、改土性能好、能够调整树种结构、改善生态功能等特点,近年来随着其优良无性系的成功选育,在华南地区栽培面积逐年增加,是兼顾生态效益、社会效益和经济效益的多功能树种。但因其速生性,在生长发育过程中对矿质营养的需求量大,在实际推广过程中发现黑木相思表现出明显缺氮的症状,进而制约黑木相思人工林生产力。由于不同黑木相思基因型的遗传特性存在差异,在应对氮缺乏生长形态表现不一,因此了解不同基因型应对缺氮胁迫的适应能力的差异,能够为黑木相思早期选育优良基因型提供理论基础。

氮素是植物生长发育过程中必需的大量元素之一,也是蛋白质、氨基酸、叶绿素和激素等物质的必需成分^[6-8]。氮素在核酸和蛋白质合成、光合作用、呼吸作用以及氮代谢等生理生化过程中发挥重要的作用^[7,9]。在氮素缺乏时,植株矮小、生长受到抑制,植株总生物量降低,植株会将资源更多分配给根系使得根系具有更强的养分吸收能力,根系生长受到促进,根冠比增加^[10]。缺氮会降低光合作用、降低了电子传递速率、光合相关酶的活性和含量,降低羧化作用,增加光能向热能转化^[11]。有研究表明,缺氮降低了咖啡幼苗的光合速率(Pn)、电子传递速率(ETR)、PS II 原初光能转化效率(F_m/F_v)和 PS II 实际光化学效率(F_m'/F_v'),且不同咖啡品种对胁迫下敏感度不同^[12]。在植物适应生长条件时,细胞期内的活性氧(ROS)水平较低,但在缺氮胁迫下,ROS 水平升高,植物细胞内 ROS 产生和消除间的平衡受到破坏,为了保护膜脂不被氧化破坏,植物体会产生一些抗氧化酶抵御其伤害,抗氧化酶主要有超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)、过氧化物酶(POD),因此抗氧化酶活性能够反映出植物的抗逆性程度^[13,14]。丙二醛(MDA)是膜脂被氧化的最终产物,能够反应脂质膜脂破坏程度^[15]。缺氮胁迫与抗氧化系统在很多植物都有研究,如米槁^[16]、光皮桦^[17]、杨树^[18]、连翘^[19]等。NUE 表示氮素利用效率,表示植物吸收到体内单位质量的氮素能够形成干物质量的多少,Iqbal 等^[20]表明不同的氮素利用效率的棉花品种在不同硝酸盐浓度下的响应在地上部干重、根系形态和氮代谢的酶活性等方面存在较大的差异。国内开展过黑木相思缺氮胁迫研究^[21],但未涉及抗逆性酶、荧光参数以及氮素利用效率和基于各项指标的综合评价。本研究以 4 个黑木相思优良无性系基因型幼苗(F1、SR3、SR14 和 SR17)为研究对象,利用沙培盆栽法人工模拟缺氮胁迫条件,研究缺氮对不同基因型生长和生理生化特性的影响,比较不同基因型之间响应策略的差异,并通过主成分分析结合隶属函数进行耐低氮综合评价,为林木氮素营养研究提供更多的数据支撑,也为林木抗逆性早期选育提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

本试验位于中国广东省中国林业科学研究院热带林业研究所实验苗圃(23°11'34"N, 113°22'40"E),属

南亚热带季风气候。根据广州市气象台发布的数据,广州市 2022 年的年均气温 23.2 °C, 7 月平均气温为 30.5 °C, 年平均降雨量为 1891.9 mm, 年均日照时数为 1780.9 h。

1.2 试验材料

供试材料为 4 种黑木相思基因型(F1、SR3、SR14 和 SR17)组培苗,由中国林业科学研究院热带林业研究所林木生物技术实验室提供。选用 1-2 mm 纯净石英砂的酸洗晾干后作为基质, 试验采用规格 15.7 cm×12.4 cm×16.5 cm(上口径×底部直径×高)的塑料花盆, 每盆装 2.6 kg 石英砂, 每盆种植 1 株, 盆地下放置滤纸防止石英砂流失。营养液采用改良后的 Hoagland 营养液, 设置 CK (16mmol·L⁻¹ N 素)和-N (0 mmol·L⁻¹ N 素)两个处理, PH 调至 5.8, 所有药品均为分析纯, 采用超纯水配置。

1.3 试验设计

2022 年 2 月中旬将供试基因型从培养瓶中各取出 300 株种植在土壤中进行炼苗, 2 个月后选取长势基本一致(苗高: 15cm±0.5cm)、生长健康的试验材进行缺氮胁迫试验, 试验处理为 4 个基因型与 2 种氮素处理的组合, 共 8 个处理, 每处理组合 30 株, 每株为 1 个重复。于 2022 年 5 月移栽到装有石英砂的塑料花盆中, 缓苗 2 周, 期间加盖 80% 遮阳网, 并用 1/4 的全素营养液培养, 待苗生长平稳并长出新叶后用超纯水培养饥饿处理 1 周, 2022 年 6 月试验正式开始, 前两周用 1/2 浓度量的营养液, 第三周后全剂量营养液进行培养。每隔 3 天浇 100 ml 营养液, 每天固定时间进行浇水, 浇水量可视天气和苗木生长状况进行适当调整。每隔 2 周配施 2% 的多菌灵或甲基托布津与超纯水一起灌入基质中预防霉菌并随机调整摆放位置以减少边缘效应。待 12 周幼苗出现明显的生长表型差异后, 测定表型数据后采集样本进一步测定。

1.4 试验方法

1.4.1 苗高、地径 2022 年 9 月对各处理全部植株进行苗高和地径测定, 苗高采用直尺测定, 地径采用游标卡尺测定。

1.4.2 生物量及根冠比 将植株分为根、茎和叶三部分, 再将各处理植物组织样品放入烘箱中 105°C 杀青 30 min, 在 70°C 下烘干至恒重, 然后用天平分别称根、茎、叶的重量, 即为各器官干重, 全株总干重为根、茎和叶干重之和, 根冠比采用根干重与地上部干重(叶干重+茎干重)比值表示。

1.4.3 氮素积累量及利用效率 取测定完生物量烘干的植株, 测定各处理下植株根、茎和叶的 N 含量, 氮元素含量测定采用凯氏定氮法(详见 NY/T 2017—2011)。各器官(根、茎、叶)元素 N 素积累量采用各器官(根、茎、叶)元素 N 素含量与各器官(根、茎、叶)生物量的乘积表示, 全株 N 素积累量为根、茎和叶 N 素积累量之和。全株 N 素利用效率以全株生物量与全株 N 素积累量的比值表示。

1.4.4 气体交换参数测定 净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)和胞间 CO₂ 浓度(C_i)使用 Li-6800 便携式光合测定仪(Li-Cor Inc. USA)测定。在 2022 年 9 月选择晴天上午 9:00-12:00 时段, 每个处理选择长势一致的 3 株, 每株选取靠近顶芽倒数第 5 至第 7 片成熟功能叶进行测定, 并做好标记, 共测定 9 片叶。样品室 CO₂ 浓度设置为 400 μmol·m⁻²·s⁻¹, 相对湿度设置为 50%, 流速设为 500 μmol·s⁻¹, 风扇转速 10000 rpm, 采用 LED 红蓝光源(90% 红光), 光强设置为 1000 μmol·m⁻²·s⁻¹, 测定时待 P_n 趋于稳定进行记录, 每片叶子记录 10 次, 取平均值^[22]。

1.4.5 荧光参数测定 选择上述已标记的叶片, 使用 Li-6800 便携式光合测定仪进行测定, 测定时间、叶室参数设定与测定气体交换参数的设定相同, 饱和脉冲光设为 8000 μmol·m⁻²·s⁻¹(100 Hz, 1000 ms), 测定前用锡箔纸包裹叶片进行暗适应至少 20 min, 测定初始荧光(F₀)和最大荧光(F_m)。随后打开活化光(1000 μmol·m⁻²·s⁻¹), 光适应 30 min 以上, 测定出光适应下初始荧光(F₀')和最大荧光(F_m')。计算 PS II 原初光能转化效率(F_v/F_m)、PS II 有效光化学量子产量(F_v'/F_m')^[22]。

1.4.6 叶绿素含量测定 选取上述已标记的叶片带回实验室, 将新鲜叶片剪碎混匀, 称取 0.1 g 植物叶片组织和 10 mL 80% 丙酮加入 15 mL 离心管, 在低温、黑暗条件下浸泡 24 h, 期间摇晃 2 次, 待植物组织完全变白取上层清液测定波长在 440nm、645 nm 和 663 nm 下的吸光度, 按照公式计算出叶绿素 a、叶绿素 b 及叶绿素 a+b 总量的含量^[23]。

$$\text{叶绿素 a 含量(Chla)}=(12.72 \times A_{663}-2.59 \times A_{645}) \times V/m;$$

叶绿素 b 含量(Chlb)=(22.88×A₆₄₅-4.68×A₆₆₃)×V/m;

类胡萝卜素含量(Car)=(4.7×A₄₄₀-0.27×(Ca+Cb))×V/m;

叶绿素 a+b 含量(Chla+b)=Chla+ Chlb

式中, A₄₄₀、A₆₆₃ 和 A₆₄₅ 分别为表示在波长 440、663 和 645nm 下测定的吸光度, V 为各样品色素提取液的总体积(L), m 为各样品的质量(g)。

1.4.7 抗氧化酶及 MDA 测定 SOD 活性、POD 活性、CAT 活性和 MDA 含量测定参考植物超氧化物歧化酶(SOD)酶联免疫分析试剂盒使用说明书、植物过氧化物酶(POD)酶联免疫分析试剂盒使用说明书、植物过氧化氢酶(CAT)酶联免疫分析试剂盒使用说明书和植物丙二醛(MDA)酶联免疫分析试剂盒使用说明书。

1.5 耐低氮能力综合评价

参考张雷^[24]的方法, 首先计算各个测定指标的耐低氮系数:

$$\text{耐低氮系数} = \frac{\text{缺氮处理下测定值}}{\text{对照测定值}} \quad (1)$$

然后对各指标的耐低氮系数进行主成分分析, 得各综合指标系数及贡献率, 求得综合指标值。

$$CI(m) = \sum_{i=1}^n [B_i \times Prin(m)_i], (i = 1,2,3,\dots,n) \quad (2)$$

式(2)中的 $CI(m)$ 为综合指标值, B_i 为各测定指标进行规范化的值, $Prin(m)_i$ 为综合指标的系数, 之后对各无性系的综合指标进行隶属函数分析:

$$u(X_i) = \frac{X_i - X_{min}}{X_{max} - X_{min}}, (i = 1,2,3,\dots, n) \quad (3)$$

式(3)中, X_i 表示低 i 个综合指标, X_{min} 表示第 i 个指标的最小值, X_{max} 表示第 i 个综合指标的最大值。根据综合指标的贡献度进行个综合指标权重计算:

$$W_i = P_i / \sum_{i=1}^n P_i, (i = 1,2,3,\dots, n) \quad (4)$$

式(4), W_i 表示第 i 个综合指标在所有综合指标中的重要程度, P_i 表示第 i 个综合指标的贡献率, 最后结合隶属函数值和权重计算各无性系的综合耐低氮能力:

$$D = \sum_{i=1}^n [u(X_i) \times W_i], (i = 1,2,3,\dots, n) \quad (5)$$

式(5), D 为各无性系在缺氮胁迫下的耐受性综合评价, D 值越大, 代表耐低氮能力越强。

1.6 数据处理与分析

本实验所有数据采用 Microsoft Office Excel 2016 进行平均数和标准差计算, 用 SPSS 22.0 软件进行数据处理分析, 使用单因素方差分析(One-way ANOVA)和 Duncan's 多重比较法检测样本间的显著性差异, N 积累量分配率比较采用独立样本 T 检验, 采用 Origin 2023 进行制图。

2 结果与分析

2.1 缺氮对不同黑木相思基因型幼苗苗高和地径的影响

由图 1 可知, 苗高和地径受基因型差异和缺氮处理影响极显著($P < 0.01$), 地径受基因型差异和缺氮处理交互作用影响显著($P < 0.05$)。F1、SR3、SR14 和 SR17 的苗高在缺氮条件下较对照(CK)均显著降低, 降幅分别为 20.7%、25.5%、19.1%和 13.6%。SR3、SR14 和 SR17 的地径在缺氮下较 CK 显著降低($P < 0.05$), 降幅分别为 17.7%、12.6%和 19.2%, 而 F1 变化不显著。

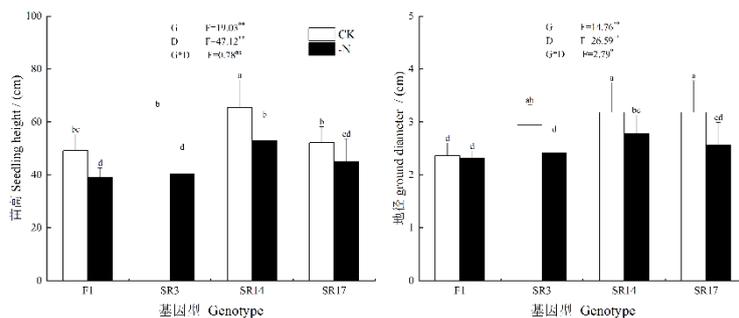


图 1 缺氮对不同黑木相思基因型的苗高和地径的影响

Fig. 1 Effects of nitrogen deficiency on seedling height and ground diameter in different genotypes of *Acacia melanoxylon*

注: G 表示基因型差异, D 表示缺氮处理。G*D 表示基因型和缺氮处理。* 和 ** 分别表示显著水平 ($P < 0.05$) 和极显著水平 ($P < 0.01$)。不同字母表示在不同处理间存在显著差异 ($P < 0.05$), 下同。

Note: G indicates genotype difference, D indicates nitrogen deficiency treatment, G*D indicates genotype and nitrogen deficiency treatment. *and ** represent respectively Significant level ($P < 0.05$) and extremely significant level ($P < 0.01$). Different letters indicates significant differences ($P < 0.05$) among different treatments. The same below.

2.2 缺氮对不同黑木相思基因型幼苗生物量和根冠比的影响

由图 2 可知, 全株干重和根冠比受基因型差异和缺氮处理影响显著 ($P < 0.05$), 根冠比受基因型差异、缺氮处理和两者交互作用影响显著 ($P < 0.05$)。与 CK 相比, 4 个黑木相思基因型的地上部干重和全株干重在缺氮均呈下降趋势。在缺氮下, F1、SR3、SR14 和 SR17 的地上部干重分别较 CK 降低了 30.9%、43.6%、44.9% 和 52.7%, 全株干重分别较 CK 降低了 27.3%、40.3%、42.7% 和 48.4%, 缺氮下 4 个黑木相思基因型的根冠比均显著升高 ($P < 0.05$), 而根干重均无显著变化。

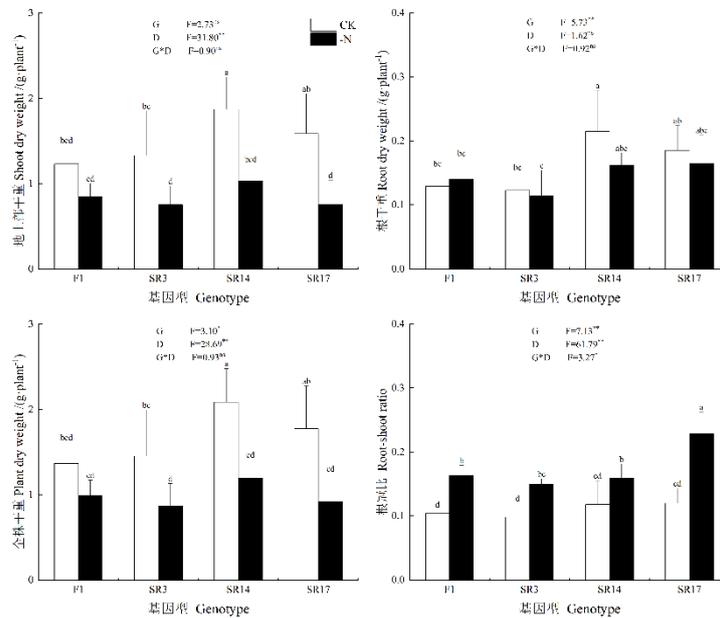


图 2 缺氮对不同黑木相思基因型的生物量和根冠比的影响

Fig. 2 Effects of nitrogen deficiency on the biomass and root-to-shoot ratio in different genotypes of *Acacia melanoxylon*

2.3 缺氮对不同黑木相思基因型幼苗光合色素含量的影响

由图 3 可知, 叶绿素 a (Chla) 含量、叶绿素 b (Chlb) 含量、类胡萝卜素 (Car) 含量和叶绿素 a+b (Chla+b) 含量受基因型差异、缺氮处理以及两者交互作用影响极显著 ($P < 0.01$), 表明缺氮对不同黑木相思基因型的光合色素含量表现不一。在缺氮下, 4 个黑木相思基因型幼苗的 Chla 含量、Chlb 含量、Car 含量和 Chla+b 含量较 CK 均显著降低 ($P < 0.05$), 其中这 4 个指标降幅最大的基因型是 SR17, 而 F1 的 Chla 含量和 Car 含量降幅最小, SR3 的 Chlb 和 Chla+b 含量降幅最小。

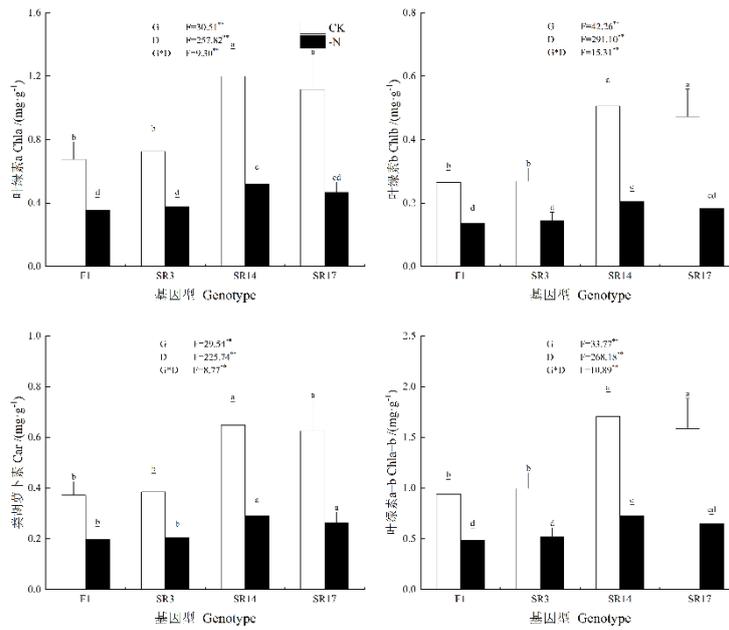


图 3 缺氮对不同黑木相思基因型的光合色素含量的影响

Fig. 3 Effects of nitrogen deficiency on the content of photosynthetic pigments in different genotypes of *Acacia melanoxylon*

2.4 缺氮对不同黑木相思基因型幼苗气体交换参数和叶绿素荧光参数的影响

由表 1 可知，净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、胞间 CO_2 浓度(C_i)、气孔限制值(LS)和 F_v/F_m 受缺氮处理影响极显著($P < 0.01$)， F_v/F_m 、净光合速率(P_n)、胞间 CO_2 (C_i)和气孔限制值(LS)受基因型差异影响显著($P < 0.05$)。 F_v/F_m 和 F_0/F_m 受基因型和缺氮处理两者交互作用影响显著($P < 0.01$)。在缺氮下，4 个黑木相思基因型幼苗的 P_n 均显著降低($P < 0.05$)，其中 SR17 降幅最大，降低了 76.8%，其中 F1 降幅最小，降低了 39.1%；缺氮下四个黑木相思基因型幼苗的 G_s 均呈下降趋势，其中 SR17 降幅最大，下降了 33.3%，F1 降幅最小，仅降低了 2.8%；在缺氮条件下，4 个黑木相思基因型幼苗的 C_i 较 CK 均显著升高($P < 0.05$)，而 LS 均显著下降。在缺氮下，SR17 的 F_v/F_m 显著降低($P < 0.05$)，而对其它基因型无显著影响；F1、SR3 和 SR17 的 F_v'/F_m' 较 CK 均显著降低，而对 SR14 号无显著影响。

表 1 缺氮对不同黑木相思基因型的气体交换参数和荧光参数的影响

Table 1 Effects of nitrogen deficiency on gas exchange parameters and fluorescence parameters in different genotypes of *Acacia melanoxylon*

基因型 Genotype	处理 Treatment	净光合速率 P_n ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	气孔导度 G_s ($\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	胞间 CO_2 浓度 C_i ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	气孔限制值 (LS)	F_v/F_m	F_v'/F_m'
F1	CK	8.55±1.39b	0.107±0.023a	254.7±21.2d	0.363±0.053a	0.826±0.003a	0.614±0.053ab
	-N	5.21±1.15d	0.104±0.016a	299.3±19.6b	0.252±0.049c	0.824±0.004a	0.476±0.046c
SR3	CK	10.14±1.56a	0.127±0.025a	255.7±11.2d	0.361±0.028a	0.824±0.006a	0.587±0.035b
	-N	5.51±1.07d	0.097±0.018ab	289.3±17.5bc	0.277±0.044bc	0.82±0.004a	0.44±0.043c
SR14	CK	9.06±1.15ab	0.122±0.025a	263±15.7d	0.342±0.039a	0.811±0.008a	0.555±0.069b
	-N	5.11±1.3d	0.096±0.042ab	290.1±19.9bc	0.275±0.05bc	0.823±0.006a	0.571±0.094b
SR17	CK	7.2±1.26c	0.105±0.025a	272.7±22.1cd	0.318±0.055ab	0.812±0.019a	0.671±0.035a
	-N	1.67±0.72e	0.07±0.033b	329.5±37.8a	0.176±0.094d	0.786±0.03b	0.402±0.072c
F	G	17.76**	2.37 ^{ns}	5.08*	5.08*	9.96**	1.34 ^{ns}
	D	168.67**	11.66**	52.96**	52.96**	2.01 ^{ns}	51.83**
	G*D	2.00 ^{ns}	1.18 ^{ns}	1.28 ^{ns}	1.28 ^{ns}	4.61**	9.70**

注：同列不同字母表示各处理间差异显著($P < 0.05$)，下同。

Note: Different letters in the same column indicate significant differences among treatments ($P < 0.05$), the same below.

2.5 缺氮对不同黑木相思基因型幼苗氮素积累量和利用效率的影响

由图 4 可知, 全株氮素积累量和全株氮素利用效率受缺氮处理影响极显著($P < 0.01$), 全株氮素积累量受基因型差异影响显著($P < 0.05$)。在缺氮下, 4 个黑木相思基因型幼苗的全株氮素积累量较 CK 均显著降低, 其中 SR17 降幅最大, 降低了 58.2%, F1 降幅最小, 降低了 39.0%; 缺氮下 4 个黑木相思基因型幼苗的全株氮素利用效率均呈上升趋势, 其中 SR17 增幅最大, 增加了 23.2%, 而 SR3 增幅最小, 仅增加了 4.4%。由图 5 可知, 缺氮下, 4 个基因型黑木相思幼苗的根系氮素积累量占比均呈上升趋势, 其中 F1、SR3 和 SR17 分别显著增加了 53.8%、40% 和 87.9%。

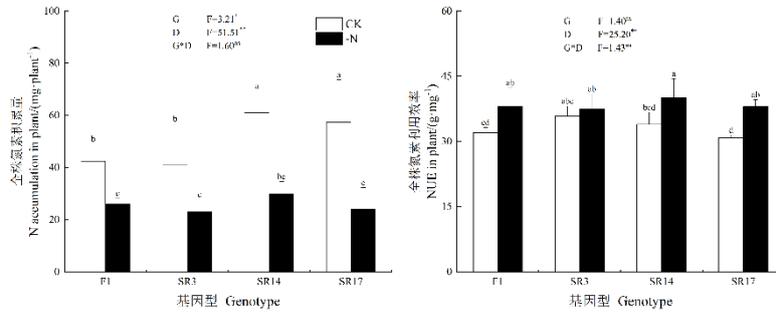


图 4 缺氮对不同黑木相思基因型的氮素积累量和利用效率的影响

Fig. 4 Effects of nitrogen deficiency on nitrogen accumulation and utilization efficiency in different genotypes of *Acacia melanoxylon*

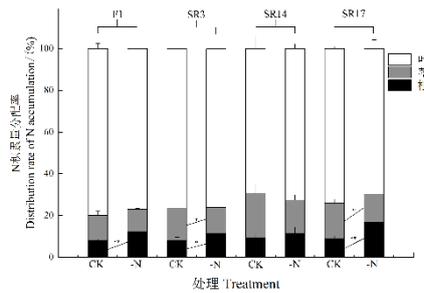


图 5 缺氮对不同黑木相思基因型的氮素积累量分配占比的影响

Fig.5 Effects of nitrogen deficiency on the distribution of nitrogen accumulation in different genotypes of *Acacia melanoxylon*

2.6 缺氮对不同黑木相思基因型幼苗叶片抗氧化酶和 MDA 的影响

由图 6 可知, SOD 活性、POD 活性和 CAT 活性受基因型差异影响极显著($P < 0.01$), SOD 活性、POD 活性、CAT 活性和 MDA 含量受缺氮处理影响极显著($P < 0.01$), SOD 活性、CAT 活性和 MDA 含量受基因型差异和缺氮处理两者交互作用影响极显著($P < 0.01$)。在缺氮下, 4 个黑木相思基因型幼苗叶片的 SOD 活性、POD 活性、CAT 活性和 MDA 含量均显著升高($P < 0.05$)。

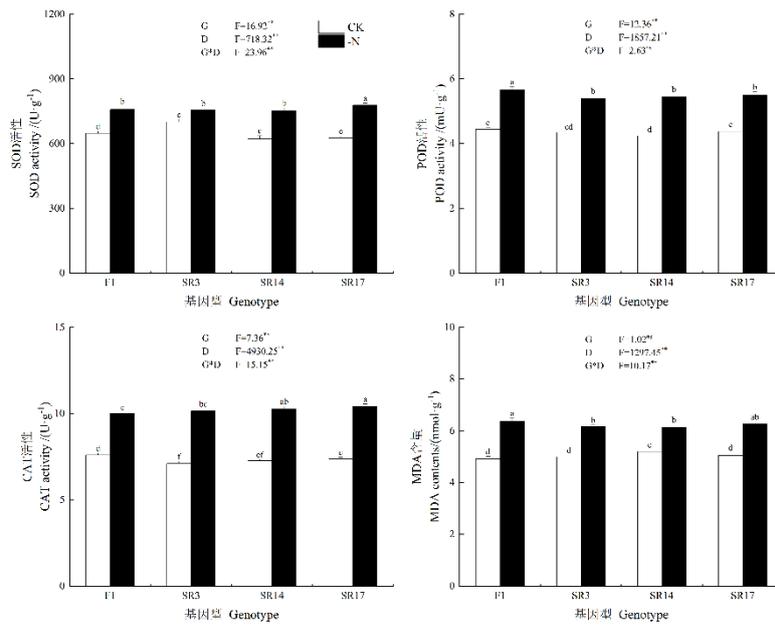


图 6 缺氮对不同黑木相思基因型的抗氧化酶和 MDA 的影响

Fig. 6 Effects of nitrogen deficiency on antioxidant enzymes and MDA in different genotypes of *Acacia melanoxylon*

2.7 缺氮下不同基因型黑木相思幼苗的综合评价

由表 2 可知，在缺氮下选出 20 个生长和生理生化指标(苗高、地径、地上部干重、地下干重、全株干重、叶绿素 a 含量、叶绿素 b 含量、类胡萝卜素含量、叶绿素 a+b 含量、净光合速率、气孔导度、胞间 CO₂ 浓度、 F_v/F_m 、 F_v'/F_m' 、MDA 含量、SOD 活性、POD 活性、CAT 活性、全株氮素积累量和全株氮素利用效率)作为耐低氮能力评价指标，并对不同基因型耐低氮能力进行分析，计算出各评价指标的耐低氮系数，依据贡献度≥75%的标准选取了 2 个主成分(综合指标)作为分析，由表 3 可知，前两个综合指标解释了 55.18%和 23.78%的贡献度，总贡献度达 78.96%，第一个主成了解释了地上干重、全株干重、叶绿素 a 含量、叶绿素 a+b 含量、类胡萝卜素含量、净光合速率、气孔导度、全株氮素积累量。第二个主成了解释了胞间 CO₂ 浓度和全株 NUE。由表 4 可知，通过结合隶属函数算出各基因型的综合评价价值并进行排名，其 D 值越大说明耐低氮能力越强，结果表明耐低氮能力从大到小依次是 F1>SR3>SR14>SR17，本研究发现 F1 耐低氮能力最强。

表 2 缺氮下不同黑木相思基因型各指标耐低氮系数

Table 2 Low-nitrogen tolerance coefficients of different *Acacia melanoxylon* genotypes under nitrogen deficiency

指标 Index	基因型 Genotype			
	F1	SR3	SR14	SR17
X1	0.795	0.745	0.809	0.864
X2	0.983	0.823	0.874	0.808
X3	0.691	0.564	0.551	0.473
X4	1.085	0.927	0.753	0.892
X5	0.727	0.597	0.573	0.516
X6	0.524	0.517	0.433	0.419
X7	0.509	0.535	0.403	0.388
X8	0.535	0.530	0.448	0.422
X9	0.520	0.522	0.424	0.410
X10	0.609	0.543	0.564	0.232
X11	0.972	0.764	0.787	0.667

X12	1.175	1.131	1.103	1.208
X13	0.998	0.995	1.015	0.968
X14	0.775	0.750	1.029	0.599
X15	1.297	1.234	1.181	1.240
X16	1.172	1.080	1.207	1.242
X17	1.277	1.239	1.283	1.259
X18	1.314	1.428	1.416	1.412
X19	0.610	0.560	0.490	0.418
X20	1.189	1.044	1.179	1.232

注: X1-X20 分别表示苗高、地径、地上部干重、地下干重、全株干重、叶绿素 a、叶绿素 b、类胡萝卜素、叶绿素 a+b、净光合速率、气孔导度、胞间 CO₂ 浓度、 F_v/F_m 、 F_v'/F_m' 、MDA、SOD、POD、CAT、全株 N 积累量和全株 NUE。下同。

Note: X1-X20 represent seedling height, ground diameter, aboveground dry weight, underground dry weight, whole plant dry weight, Chla, Chlb, Car, Chla+b, net photosynthetic rate, stomatal conductance, intercellular CO₂ concentration, F_v/F_m , F_v'/F_m' , MDA, SOD, POD, CAT, whole plant N accumulation and whole plant NUE. The same below.

表 3 缺氮下各综合指标的系数及贡献度

Table 3 Coefficient and contribution of each comprehensive index under nitrogen deficiency

综合指标 Comprehensive Index	CI(1)	CI(2)	综合指标 Comprehensive Index	CI(1)	CI(2)
X1	-0.761	0.621	X12	-0.219	0.856
X2	0.723	0.458	X13	0.457	-0.533
X3	0.929	0.244	X14	0.166	-0.531
X4	0.701	0.614	X15	0.591	0.726
X5	0.925	0.314	X16	-0.682	0.571
X6	0.957	-0.036	X17	-0.003	0.348
X7	0.897	-0.181	X18	-0.639	-0.723
X8	0.968	-0.097	X19	0.999	-0.025
X9	0.941	-0.084	X20	-0.485	0.756
X10	0.83	-0.347			
X11	0.869	0.301	贡献率	50.59%	30.10%

表 4 缺氮下各基因型耐低氮能力综合评价

Table 4 Comprehensive evaluation of low nitrogen tolerance of genotypes under nitrogen deficiency

基因型 Genotype	综合指标 Comprehensive Index		隶属函数值 Membership function value		权重 Weights		综合评价价值 Comprehensive evaluation value	排名 Ranking
	CI(1)	CI(2)	$\mu(1)$	$\mu(2)$	W1	W2		
F1	1.096	0.975	1.000	1.000	0.699	0.301	1.000	1
SR3	0.496	-1.004	0.736	0.000	0.699	0.301	0.514	2
SR14	-0.416	-0.706	0.334	0.151	0.699	0.301	0.279	3
SR17	-1.175	0.736	0.000	0.879	0.699	0.301	0.265	4

3 讨论

氮素是植物不可或缺的营养元素, 缺氮对植物生长发育及生产力产生不利影响^[25]。植物的生长指标能够直观反映植物的生长状况。本研究发现, 缺氮下 4 个黑木相思基因型幼苗的苗高、地径、地上部干重和全株干重产生了显著的抑制作用, 这是由于在氮供应不足, 植物无法吸收足够的氮素以满足自身生长需求^[18]。这与黄瓜^[26]、槟榔^[27]、构树^[28]的缺氮处理试验结论相一致。缺氮下, F1 的根系干重呈上升趋势, 而其它基因型呈下降趋势, 同时 F1 基因型全株积累量在缺氮下降幅最小, 这是由于 F1 基因型幼苗应对缺氮胁迫会促进根系生长以吸收更多的矿质营养。研究表明, 缺氮胁迫下植物会吸收的氮素更多分配到根系从而使得根冠比增加^[29], 本实验中缺氮下, 4 个基因型幼苗的根冠比均显著增加, 根系中氮素积累量占全株比均较 CK 升高, 这是植物应对氮缺乏胁迫的一个适应性策略, 这与光皮桦^[17]研究结果相似。缺氮下,

4 个基因型的全株 NUE 均升高,说明低氮处理能够提高植物的全株 NUE,这在前人研究也得到了证实^[30]。

叶绿素是植物光合作用的物质基础,其含量能够反映植物光合能力的强弱^[31],叶绿素含量是判定植物光合作用器官是否在逆境胁迫下受到伤害的重要指标^[32],Chla 和 Chlb 在光能的吸收和传递发挥重要作用,Car 除具备天线色素功能之外,还可以直接猝灭单线态氧,减少活性氧的产生,以减轻胁迫下植物所受的膜脂过氧化损伤^[22]。研究发现在缺氮下,4 个基因型的 Chla、Chlb、Car 和 Chla+b 的含量均显著降低,一方面是由于缺氮下叶片氮含量下降,从而抑制了 Chla、Chlb 和 Chla+b 的合成;另一方面缺氮下叶片通过蛋白水解酶使得叶绿素分解为氨基酸、酰胺和 NH_4^+ 以满足其它生理活动^[6]。光合参数能够反映一个植物的生长潜力, P_n 、 G_s 、 C_i 和 LS 能够反映植物光合生理应对胁迫的情况,是评价光合能力的重要指标^[33],判断 P_n 下降的主要原因是否是气孔因素还是非气孔因素,要看 C_i 和 LS,如果 C_i 降低和 LS 增大,才认为是气孔导度引起,即为气孔因素,如果 C_i 增加和 LS 降低,则认为是叶肉细胞羧化能力降低引起,即为非气孔因素^[34],本实验发现缺氮 4 个基因型幼苗的 P_n 和 G_s 均下降, C_i 增加,LS 降低,说明缺氮下 P_n 的下降是非气孔因素,有羧化能力降低所致,其原因可能是由于叶绿素含量降低、光合相关酶活降低等^[35]。叶绿素荧光参数是反映 PS II 光化学效率的重要指标^[36],对分析植物光能利用具有重要作用,植物正常生长情况下, F_v/F_m 的值一般在 0.8-0.83 范围内^[37],仅有 SR17 基因型幼苗在缺氮下 F_v/F_m 显著降低,并低于 0.8,而且其它都在 0.8 以上,说明在缺氮处理下,SR17 的黑木相思幼苗 PSII 中心受损程度较大,这可能是导致 SR17 的 P_n 降幅最大的的主要原因,而其它基因型不影响。 F_v'/F_m' 表明开放时 PS II 中心原初光能捕获效率,本研究中 F1、SR3 和 SR17 均显著降低,说明其 PS II 反应中心开放程度下降,但 SR14 无显著差异,这可能是由于 SR14 本身植物特性及试验环境有关。

植物在受到胁迫时,细胞内活性氧的产生增加,过量的活性氧会使植物的膜脂发生过氧化^[38],植物会提高 POD、CAT 和 SOD 等抗氧化酶以保护细胞膜脂免受活性氧的伤害。本实验发现在缺氮下 4 个基因型的 POD、CAT 和 SOD 活性均显著提高,这是植物应对氮缺乏的一种策略,这与前人在小麦^[39]、玉米^[40]和青杨^[18]的研究结果相似,MDA 是植物细胞膜过氧化反应的产物之一,其含量能够反映细胞内膜脂受损程度^[41],本实验中在缺氮下 4 个基因型幼苗的 MDA 含量均显著升高,尽管抗氧化酶活性维持着一个较高的水平,但在缺氮胁迫下细胞产生的活性氧仍对植物膜脂造成损害。

植物在非生物胁迫下的适应程度受多因素控制,不同评价指标在不同基因型具有差异^[42]。本文采用主成分分析和结合隶属函数进行分析,各个指标并采用耐受系数,第一可以消除无性系之间的固有差异,第二可以消除单一指标异常变化对评价造成的影响,该方法在耐旱性^[42]、耐热性^[44]、耐盐性^[45]等广泛使用。本实验参考前人研究^[17, 46, 47],并结合指标测定结果,选取了 20 个具有代表性的耐低氮指标,苗高、地径、地上部干重、地下干重、全株干重、Chla、Chlb、Car、Chla+b、净光合速率、气孔导度、胞间 CO_2 浓度、 F_v/F_m 、 F_v'/F_m' 、MDA 含量、SOD 活性、POD 活性、CAT 活性、全株氮素积累量和全株氮素利用效率。结果表明 4 个无性系的耐低氮能力从大到小依次是 F1>SR3>SR14>SR17, F1 的耐低氮能力最强,说明缺氮对 F1 的影响较小,耐胁迫能力强。

本研究没有针对氮浓度做梯度试验,只反映了在缺氮和全氮下不同黑木相思基因型的表现差异,且试验是在人工模拟缺素环境下进行,是否在大田中有相同的结论等待进一步验证。后续将开展不同氮梯度下的试验,并结合代谢组和基因组等手段,挖掘耐低氮基因,为黑木相思高效培育提供理论参考。

4 结论

缺氮胁迫下,4 个黑木相思基因型幼苗的生长发育受到抑制,全株氮素积累量显著降低,光合色素含量降低、光合作用受到抑制;缺氮会提高抗氧化相关酶,但过量的活性氧仍给膜脂带来损害;不同基因型黑木相思对缺氮胁迫的响应存在显著差异,通过主成分分析并结合隶属函数综合评价可知,4 个基因型的耐低氮能力由大到小依次为 F1>SR3>SR14>SR17。F1 耐低氮能力最强,表现在胁迫对其影响较小,而 SR17 耐低氮能力最弱。

参 考 文 献

- [1] HASANUZZAMAN M, BHUYAN M H M B, ZULFIQAR F, et al. Reactive oxygen species and antioxidant defense in plants under abiotic stress: Revisiting the crucial role of a universal defense regulator[J]. *Antioxidants*, 2020, 9(8): 681.
- [2] 杜衍红, 蒋恩臣, 刘传平, 等. 生物质炭对华南典型红壤水分渗透及持水性的影响[J]. *生态环境学报*, 2019, 28(2): 276-282.
- [3] WU S, CHAN T O, ZHANG W, et al. Increasing compound heat and precipitation extremes elevated by urbanization in South China[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2021, 9: 636777.
- [4] NIEVES-CORDONES M, RUBIO F, SANTA-MARÍA G E. Editorial: nutrient use-efficiency in plants: an integrative approach[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2020, 11: 623976.
- [5] LI X N, JIAO W T, XIAO R B, et al. Soil pollution and site remediation policies in China: A review[J]. *Environmental Reviews*, 2015, 23(3): 263-274.
- [6] DE BANG T C, HUSTED S, LAURSEN K H, et al. The molecular-physiological functions of mineral macronutrients and their consequences for deficiency symptoms in plants[J]. *New Phytologist*, 2021, 229(5): 2446-2469.
- [7] 黄雨轩, 叶媚, 熊静, 等. 不同氮水平下AM真菌对油茶幼苗生长、根系形态和光合特性的影响[J]. *经济林研究*, 2022, 40(4): 19-28.
- [8] 王胤, 姚瑞玲. 不同形态氮素配比对马尾松组培苗生长的影响[J]. *中南林业科技大学学报*, 2021, 41(3): 18-24, 71.
- [9] 任静, 刘小勇, 刘芬, 等. 核桃/大豆间作对氮素吸收利用及转移的影响[J]. *经济林研究*, 2022, 40(1): 1-10.
- [10] GRUBER B D, GIEHL R F H, FRIEDEL S, et al. Plasticity of the Arabidopsis root system under nutrient deficiencies[J]. *Plant Physiology*, 2013, 163(1): 161-179.
- [11] MU X, CHEN Y. The physiological response of photosynthesis to nitrogen deficiency[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2021, 158: 76-82.
- [12] DE SOUZA B P, MARTINEZ H E P, DE CARVALHO F P, et al. Gas exchanges and chlorophyll fluorescence of young coffee plants submitted to water and nitrogen stresses[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2020, 43(16): 2455-2465.
- [13] Nadarajah K K. ROS homeostasis in abiotic stress tolerance in plants[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2020, 21(15): 5208.
- [14] 徐一荻, 刘春花, 谢富, 等. 供磷水平对核桃实生苗生长生理特性及酶活性的影响[J]. *西南林业大学学报(自然科学)*, 2021, 41(4): 1-9.
- [15] FAROOQ T H, TIGABU M, MA X, et al. Nutrient uptake, allocation and biochemical changes in two Chinese fir cuttings under heterogeneous phosphorus supply[J]. *iForest - Biogeosciences and Forestry*, 2018, 11(3): 411-417.
- [16] 柳嘉佳, 刘济明, 王军才, 等. 不同氮素水平对米槁幼苗生长和生理特性的影响[J]. *南方农业学报*, 2017, 48(10): 1863-1869.
- [17] 程丽丽, 潘樱, 林艳, 等. 低氮胁迫对不同光皮桦基因型苗期生长及生理生化特征的影响[J]. *核农学报*, 2020, 34(11): 2435-2443.
- [18] ZHANG S, JIANG H, ZHAO H, et al. Sexually different physiological responses of *Populus cathayana* to nitrogen and phosphorus deficiencies[J]. *Tree Physiology*, 2014, 34(4): 343-354.
- [19] KOVÁČIK J, DRESLER S, PETERKOVÁ V, et al. Nitrogen nutrition modulates oxidative stress and metabolite production in *Hypericum perforatum*[J]. *Protoplasma*, 2020, 257(2): 439-447.
- [20] IQBAL A, QIANG D, ZHUN W, et al. Growth and nitrogen metabolism are associated with nitrogen-use efficiency in cotton genotypes[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2020, 149: 61-74.
- [21] 丁晓纲. 黑木相思苗期平茬与施肥技术研究[D]. 北京林业大学, 2011.
- [22] 铁得祥, 胡红玲, 喻秀艳, 等. 桢楠幼树光合特性对镉胁迫的响应[J]. *生态学报*, 2020, 40(11): 3738-3746.
- [23] 李芳兰, 包维楷, 吴宁. 白刺花幼苗对不同强度干旱胁迫的形态与生理响应[J]. *生态学报*, 2009, 29(10): 5406-5416.
- [24] 张雷. 青钱柳不同基因型对盐胁迫响应的生理及分子机制[D]. 南京林业大学, 2022.
- [25] LI L, LI Q, DAVIS K E, et al. Response of root growth and development to nitrogen and potassium deficiency as well as microRNA-mediated mechanism in peanut (*Arachis hypogaea* L.)[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2021, 12: 695234.
- [26] 于洪杰, 周新刚, 关颂娜, 等. 不同氮水平营养液对砂培黄瓜幼苗生长及根系形态的影响[J]. *北方园艺*, 2016, (7): 17-22.
- [27] 崔闯, 吴娇, 刘东峻, 等. 缺氮对槟榔幼苗叶片光合特性的影响[J]. *热带生物学报*. 2020, 11(4): 446-454.
- [28] NI J, SU S, LI H, et al. Distinct physiological and transcriptional responses of leaves of paper mulberry (*Broussonetia kazinoki* × *B. papyrifera*) under different nitrogen supply levels[J]. *Tree Physiology*, 2020, 40(5): 667-682.
- [29] 彭玲, 刘晶晶, 王芬, 等. 硝酸盐供应水平对平邑甜茶幼苗生长、光合特性与¹⁵N吸收、利用的影响[J]. *应用生态学报*,

- 2018, 29(2): 522-530.
- [30] THE S V, SNYDER R, TEGEDER M. Targeting nitrogen metabolism and transport processes to improve plant nitrogen use efficiency[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2021, 11: 628366.
- [31] HU W, LU Z, MENG F, et al. The reduction in leaf area precedes that in photosynthesis under potassium deficiency: the importance of leaf anatomy[J]. *New Phytologist*, 2020, 227(6): 1749-1763.
- [32] ERDAL S. Androsterone-induced molecular and physiological changes in maize seedlings in response to chilling stress[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2012, 57: 1-7.
- [33] ZHANG S, TANG D, KORPELAINEN H, et al. Metabolic and physiological analyses reveal that *Populus cathayana* males adopt an energy-saving strategy to cope with phosphorus deficiency[J]. *Tree Physiology*, 2019, 39(9): 1630-1645.
- [34] FENG Z, WANG X, ZHENG Q, et al. Response of gas exchange of rape to ozone concentration and exposure regime[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(3): 823-829.
- [35] WEI S, WANG X, SHI D, et al. The mechanisms of low nitrogen induced weakened photosynthesis in summer maize (*Zea mays* L.) under field conditions[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2016, 105: 118-128.
- [36] 石凯, 李泽, 张伟建, 等. 不同光照对油桐幼苗生长、光合日变化及叶绿素荧光参数的影响[J]. *中南林业科技大学学报*, 2018, 38(8): 35-42.
- [37] HAN S, CHEN L, JIANG H, et al. Boron deficiency decreases growth and photosynthesis, and increases starch and hexoses in leaves of citrus seedlings[J]. *Journal of Plant Physiology*, 2008, 165(13): 1331-1341.
- [38] TEWARI R K, YADAV N, GUPTA R, et al. Oxidative stress under macronutrient deficiency in plants[J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2021, 21(1): 832-859.
- [39] KONG L, WANG F, SI J, et al. Increasing in ROS levels and callose deposition in peduncle vascular bundles of wheat (*Triticum aestivum* L.) grown under nitrogen deficiency[J]. *Journal of Plant Interactions*, 2013, 8(2): 109-116.
- [40] 秦娟. “彩糯868”和“紫糯66”两种糯玉米适应低氮、磷营养胁迫及其机制研究[D]. 重庆三峡学院, 2017.
- [41] LIU J J, WEI Z, LI J H. Effects of copper on leaf membrane structure and root activity of maize seedling[J]. *Botanical studies*, 2014, 55(1): 1-6.
- [42] ASHRAF A, ABD EL-MOHSEN M A A E. Using different statistical procedures for evaluating drought tolerance indices of bread wheat genotypes[J]. *Advance in Agriculture and Biology*, 2015, 4(1): 19-30.
- [43] 李王胜, 王雪倩, 尹希龙, 等. 甜菜种质资源苗期耐旱性综合评价[J]. *作物杂志*, 2022(6): 54-60.
- [44] 陈中钊, 杜文丽, 许端祥, 等. 苦瓜苗期耐热性综合评价及其鉴定指标的筛选[J]. *江西农业学报*, 2022, 34(3): 1-7.
- [45] 王尧. 盐肤木和泰山盐肤木耐盐性比较研究[D]. 山东农业大学, 2020.
- [46] 李俊杰, 杜蒲芳, 石婷瑞, 等. 不同基因型小麦苗期耐低氮性评价及筛选[J]. *中国农业科技导报*, 2021, 23(7): 21-32.
- [47] 栗振义, 张绮芯, 全宗永, 等. 不同紫花苜蓿品种对低磷环境的形态与生理响应分析[J]. *中国农业科学*, 2017, 50(20): 3898-3907.