

引文格式: 李庆玺, 刘莉, 尹亚敏, 等. 外源褪黑素对铝胁迫下紫花苜蓿生长状况和质膜透性的影响[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2023, 38(6): 1059–1066. DOI: [10.12101/j.issn.1004-390X\(n\).202301016](https://doi.org/10.12101/j.issn.1004-390X(n).202301016)

外源褪黑素对铝胁迫下紫花苜蓿 生长状况和质膜透性的影响*

李庆玺¹, 刘莉¹, 尹亚敏², 尹俊³, 李启娇¹, 郑立文¹, 崔东毅⁴, 马向丽^{1**}

- (1. 云南农业大学 动物科学技术学院, 云南 昆明 650201;
2. 云南农业大学 水利学院, 云南 昆明 650201;
3. 云南省草原监督管理站, 云南 昆明 650202;
4. 迪庆州畜牧兽医科学研究所, 云南 迪庆 674499)

摘要:【目的】探讨不同浓度褪黑素对紫花苜蓿 (*Medicago sativa* L.) 幼苗铝毒害的缓解作用, 以期应用褪黑素在酸铝土壤上种植紫花苜蓿提供理论依据。【方法】以耐铝性差异显著的紫花苜蓿品种 WL525HQ (耐受型) 和三得利 (敏感型) 为材料, 采用水培法育苗, 在不同浓度褪黑素 (0、5、10、20、50 和 100 $\mu\text{mol/L}$) 预处理后进行铝胁迫, 测定紫花苜蓿幼苗地上部和地下部生物量、根系伸长率、根尖铝含量以及质膜透性。【结果】铝胁迫下, 2 份材料的生长都受到严重抑制, 其根系伸长率、地上部和地下部干质量显著下降 ($P < 0.05$); 与单独铝胁迫相比, 外源褪黑素预处理下上述 3 个指标值显著增大 ($P < 0.05$), 且其随褪黑素浓度的增加呈先升高后降低的变化趋势, 并在 20 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素预处理下达到最大值, WL525HQ 和三得利的相对根系伸长率分别增加 55% 和 59%, 地上部干质量分别增加 14% 和 33%, 地下部干质量分别增加 47% 和 54%。铝胁迫下, WL525HQ 和三得利的根尖铝含量、相对电导率和 MDA 含量显著增加 ($P < 0.05$); 随着褪黑素浓度的增加, 上述 3 个指标呈先下降后上升的变化趋势, 并在 20 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素预处理下达到最低, 此时 WL525HQ 和三得利的根尖铝含量较铝单独处理分别降低 20% 和 24%, 相对电导率分别降低 14% 和 21%, MDA 含量分别降低 30% 和 40%, 且 WL525HQ 的变化趋势较三得利更为明显。【结论】外源褪黑素可有效缓解铝毒对紫花苜蓿造成的损伤, 且褪黑素浓度为 20 $\mu\text{mol/L}$ 时缓解效果最好。

关键词: 铝胁迫; 紫花苜蓿; 褪黑素; 生长发育; 质膜透性

中图分类号: S963.223.3

文献标志码: A

文章编号: 1004-390X (2023) 06-1059-08

Effects of Exogenous Melatonin on Alfalfa Growth and Plasma Membrane Permeability under Aluminum Stress

LI Qingxi¹, LIU Li¹, YIN Yamin², YIN Jun³, LI Qijiao¹,
ZHENG Liwen¹, CUI Dongyi⁴, MA Xiangli¹

- (1. Faculty of Animal Science and Technology, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China;
2. College of Water Conservancy, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China;

收稿日期: 2023-01-17

修回日期: 2023-11-19

网络首发日期: 2023-12-16

*基金项目: 云南省农业基础研究联合专项 (202301BD070001-163); 洱源县饲草产业科技特派团 (202304BI090008)。

作者简介: 李庆玺 (1999—), 男, 云南曲靖人, 在读硕士研究生, 主要从事牧草资源及育种研究。

E-mail: Overricenoodle@163.com

**通信作者 Corresponding author: 马向丽 (1980—), 女, 湖北襄阳人, 博士, 教授, 主要从事牧草资源及育种研究。E-mail: xfmxiangli@126.com

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/53.1044.S.20231214.1610.001>



3. Yunnan Grassland Supervision and Management Station, Kunming 650202, China;

4. Diqing Prefecture Institute of Animal Husbandry and Veterinary Science, Diqing 674499, China)

Abstract: [**Purpose**] To explore the alleviating effect of different concentrations of melatonin on aluminum toxicity in alfalfa (*Medicago sativa* L.) seedlings, providing a theoretical basis for planting alfalfa and the application of melatonin on acid-aluminum soil. [**Methods**] Two alfalfa varieties named WL525HQ (tolerant type) and Suntory (sensitive type) were used as materials, and the seedlings were cultivated using hydroponics at different concentrations (0, 5, 10, 20, 50, 100 $\mu\text{mol/L}$) melatonin pretreatment followed by aluminum stress, and the changes of aboveground and underground biomass, root elongation, root tip aluminum content and plasma membrane permeability of alfalfa seedlings were measured. [**Results**] Under aluminum stress, the growth of both materials was severely inhibited, and the root elongation rate and the dry weight of aboveground and underground of materials decreased significantly ($P<0.05$); compared with the only aluminum stress treatment, the above-mentioned three indexes of the treatment with melatonin pretreated increased significantly ($P<0.05$), and showed a trend of first increasing and then decreasing with the increase of melatonin concentration, reaching the maximum at 20 $\mu\text{mol/L}$ melatonin treatment, the relative root elongation rate of WL525HQ and Suntory increased by 55% and 59%, respectively; the aboveground dry weight increased by 14% and 33%, respectively; and the underground dry weight increased by 47% and 54%, respectively. Under aluminum stress, the root tip aluminum content, relative conductivity and MDA content of WL525HQ and Suntory increased significantly ($P<0.05$); with the increase of melatonin concentration, the above-mentioned three indexes decreased first and then increased, reaching the minimum with 20 $\mu\text{mol/L}$ melatonin treatment. At this time, compared with the only aluminum stress treatment, the aluminum content in the root tips of WL525HQ and Suntory decreased by 20% and 24%, respectively; the relative conductivity decreased by 14% and 21%, respectively; the MDA content decreased by 30% and 40%, respectively, and the change trend of WL525HQ was more obvious than that of Suntory. [**Conclusion**] Exogenous melatonin can effectively alleviate the damage of aluminum toxicity to alfalfa, and the melatonin concentration is 20 $\mu\text{mol/L}$ with the best relief effect.

Keywords: aluminum stress; alfalfa; melatonin; growth and development; plasma membrane permeability

紫花苜蓿 (*Medicago sativa* L.) 是世界上栽培历史最悠久、利用价值最高、种植面积最广的优质牧草^[1], 享有“牧草之王”的美誉。近年来, 随着中国畜牧业的快速发展, 对优质紫花苜蓿的需求逐渐增大, 其种植面积不断扩展, 但仍集中在北方地区, 南方的栽培面积相对较小。究其原因 是紫花苜蓿对土壤酸性十分敏感^[2], 而南方 15 个省、区、市遍布面积较广的酸化土壤, 总面积达 $2.03 \times 10^6 \text{ hm}^2$ ^[3], 约占中国总耕地面积的 21%^[4-5], 不适宜种植紫花苜蓿^[6]。

铝是自然界含量最高的金属元素, 在酸性土壤中会大量溶解^[7]。近年来, 由于大量施用农业化肥以及受酸雨影响, 大部分地区土壤酸化严

重, 导致土壤中的铝含量上升^[8]。铝离子在微摩尔浓度级水平下就可对植物产生毒害作用, 且在 pH 5.0 及以下时毒害作用更强^[9]。根系是遭受铝毒害最严重的器官^[8]。汤霞等^[10]对铝胁迫下燕麦种子幼苗的萌发及生长研究发现: 当铝浓度超过燕麦幼苗根尖适应性阈值时, 根尖铝含量会随着铝浓度的升高而升高。植物遭受铝毒害的主要表现为植物根尖膨大, 根系活力降低^[11], 植物生长发育受到抑制。植物处于铝胁迫时, 细胞质膜选择透性功能损坏, 膜透性增大, 细胞内的部分电解质外渗^[12]。陈志刚等^[13]发现: 铝处理下的黑麦草质膜透性明显增大, 相对电导率升高, 且与铝浓度呈剂量效应。黄巧云等^[14]研究表明: 铝离子

不仅会抑制小麦根系对其他营养元素的吸收,导致植物缺素症,而且会使根系分泌物收集液的电导率上升,特别是电解质外渗百分率增加。有研究证实:当处于铝胁迫时,植物体内的MDA含量显著增加,且随着铝浓度的升高MDA含量也逐渐增加^[9]。周小华等^[15]研究发现:铝胁迫下水稻幼苗根尖氧化损伤程度随铝浓度的增加而上升,此时MDA含量及抗氧化系统活性显著提升,以抵抗氧化胁迫。已有研究表明:铝胁迫会抑制紫花苜蓿的生长发育^[16-17]。

褪黑素(N-乙酰-5-甲氧基色胺)是一种天然吲哚类化合物,普遍存在于植物体内^[18]。研究发现:褪黑素不仅可以作为植物生长调节物促进植物生长发育,还可以作为植物激素增强植物的逆境耐受能力^[19]。褪黑素还可以作为高效的抗氧化剂,通过调节抗坏血酸—谷胱甘肽循环清除过多活性氧,降低MDA积累,提高渗透调节物质的合成能力,保持渗透平衡和细胞壁结构的完整性^[20]。近年来,褪黑素在植物逆境胁迫中的作用研究越来越多。已有研究表明:外源褪黑素能够有效减缓干旱胁迫对植株造成的负面影响^[20];可有效增强马铃薯幼苗的抗氧化防御系统活性^[21],显著提高棉花根系伸长量^[22],促进萝卜生长^[23];还能够调节植物的光周期,降低水分胁迫下冬小麦的MDA含量,阻止因水分亏缺造成的细胞膜损伤^[24];在干旱胁迫下保护小麦的光合系统免遭氧化损伤^[25]。此外,褪黑素在植物耐铝性中的作用也逐渐引起关注。徐道坤^[26]研究发现:褪黑素可以通过调控NO含量和细胞壁成分来缓解铝对拟南芥根伸长的抑制作用;吕婷^[27]研究发现:褪黑素可以缓解铝胁迫对小麦根系的毒害作用。在对小麦抗铝毒的研究中发现,褪黑素可通过增强抗氧化系统的响应来消除活性氧,从而达到减轻植物遭受铝毒害的目的^[28]。

可见,土壤酸铝毒害严重制约着紫花苜蓿的生长,而褪黑素在植物逆境响应中的作用已有研究报道,但主要集中在干旱、温度、盐和水分等方面,在铝毒胁迫中的研究较少,褪黑素在紫花苜蓿铝毒逆境下的调控机制尚不清楚。本研究以2份耐铝性具有明显差异的紫花苜蓿为材料,通过外源褪黑素处理,研究铝胁迫下供试紫花苜蓿幼苗根系伸长率、根尖铝含量和质膜透性的变化,以期揭示褪黑素在缓解紫花苜蓿铝毒中的作

用及其生理机制,为紫花苜蓿在西南地区的种植和推广提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试材料为课题组前期筛选的对铝毒耐性有显著差异的2份紫花苜蓿材料:耐受型材料WL525HQ和敏感型材料三得利。供试苜蓿种子购自云南绿盛美地园林景观有限公司。

1.2 试验设计与方法

1.2.1 试验设计

紫花苜蓿种子经1.5%硫酸铜浸泡消毒20 min后,用磁力搅拌器清洗种子包衣,再用蒸馏水把包衣冲洗干净,用适量去离子水浸泡过夜。消毒完成后播种在铺有1层滤纸的培养皿中,每皿播种100粒,置于人工智能温箱中,于25℃黑暗条件下催芽12 h,之后便转为正常光照培养(白天12 h、25℃,夜晚12 h、22℃,相对湿度为70%),每天用1/5 Hoagland 营养液使种子保持湿润,待根长至1 cm后(约2 d)用于后续试验。先分别用含0、5、10、20、50和100 μmol/L褪黑素的0.5 mmol/L CaCl₂溶液(pH 4.5)预处理紫花苜蓿幼苗12 h,再用含0.5 mmol/L AlCl₃的0.5 mmol/L CaCl₂溶液(pH 4.5)继续处理24 h,设置为6个处理组,并以不含褪黑素和AlCl₃的处理为对照组(CK)。每处理重复3次。

1.2.2 测定指标及方法

生物量参照付靖雯^[29]的方法测定,按每皿计;相对根系伸长率参照李文静^[30]的方法测定;根尖铝含量参照GB 5009.268—2016^[31]测定;MDA含量采用硫代巴比妥酸比色法^[32]测定;相对电导率采用电导法^[33]测定。

1.3 数据处理

1.3.1 数据统计与分析

采用Excel 2019和SPSS 23.0进行数据统计及作图,并进行单因素和双因素方差分析。

1.3.2 紫花苜蓿的耐铝性综合评价

采用模糊综合评判方法中的隶属函数公式对试验原始数据进行定量转换,以综合评价不同浓度褪黑素对提高紫花苜蓿耐铝程度的影响,其中,与耐铝性呈正相关的指标用公式(1)计算,与之呈负相关的指标用公式(2)计算;隶属函数的平均值越大,耐铝性越强。

$$\text{隶属函数} = \frac{X_i - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (1)$$

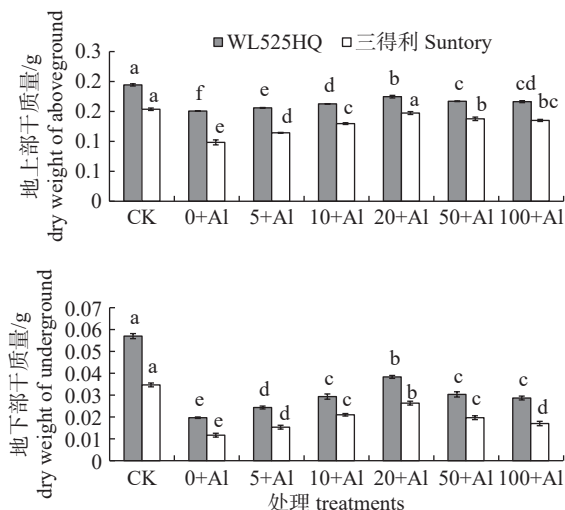
$$\text{反隶属函数} = 1 - \frac{X_i - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (2)$$

式中: X_i 为指标测定值, $X_{\min}$ 和 $X_{\max}$ 分别为全部参试材料某一指标的最小值和最大值。

2 结果与分析

2.1 褪黑素对铝胁迫下紫花苜蓿生物量的影响

由图 1 可知: 与对照相比, 单独铝胁迫下 2 份紫花苜蓿材料的地上部和地下部干质量均显著降低, 其中, WL525HQ 的地上部和地下部干质量分别降低了 22% 和 36%, 三得利的地上部和地下部干质量分别降低了 66% 和 65%。随着褪黑素浓度的升高, 供试材料地上部和地下部干质量呈先升高后降低的变化趋势。与单独铝胁迫相比, 5 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素处理下, WL525HQ 的地上部和地下部干质量分别显著升高 3% 和 17%, 三得利的地上部和地下部干质量分别显著升高 2% 和 14%。20 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素处理下, 2 份材料的地上部和地下部干质量均显著高于其他褪黑素



注: CK 表示对照处理; 0、5、10、20、50 和 100 分别为褪黑素的浓度, 单位: $\mu\text{mol/L}$; Al 表示 0.5 mmol/L 铝胁迫; 不同小写字母表示同一材料在不同处理下差异显著 ($P < 0.05$); 下同。

Note: CK indicates control treatment; 0, 5, 10, 20, 50 and 100 is melatonin concentration, respectively, unit: $\mu\text{mol/L}$; Al indicates 0.5 mmol/L aluminum stress; different lowercase letters indicate significant differences among different treatments in the same material ($P < 0.05$); the same as below.

图 1 不同浓度褪黑素对铝胁迫下紫花苜蓿地上部和地下部干质量的影响

Fig. 1 Effects of different melatonin concentrations on the dry weight of aboveground and underground of alfalfa under aluminum stress

处理, 其中, WL525HQ 较单独铝胁迫处理分别增加 14% 和 47%, 三得利较单独铝胁迫处理分别增加 33% 和 54%。

2.2 褪黑素对铝胁迫下紫花苜蓿相对根系伸长率的影响

由图 2 可知: 随着褪黑素浓度的升高, 铝胁迫下 2 份材料的相对根系伸长率呈先增加后降低的趋势, 且三得利的根系相对伸长率低于 WL525HQ。与对照相比, 单独铝胁迫下 WL525HQ 和三得利的相对根系伸长率分别显著降低 64% 和 68%。与单独铝胁迫相比, 5 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素处理下, WL525HQ 和三得利的相对根系伸长率分别显著增加 36% 和 37%; 20 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素处理下, WL525HQ 和三得利的相对根系伸长率分别显著增加 55% 和 59%, 且显著高于其他褪黑素处理, 但 10 和 100 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素处理下, 2 份材料的相对根系伸长率无显著差异。

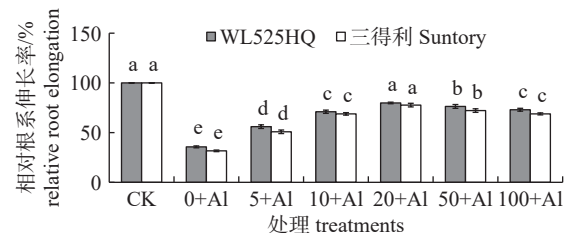


图 2 不同浓度褪黑素对铝胁迫下紫花苜蓿相对根系伸长率的影响

Fig. 2 Effects of different melatonin concentrations on the relative root elongation of alfalfa under aluminum stress

2.3 褪黑素对铝胁迫下紫花苜蓿根尖铝含量的影响

由图 3 可知: 对照处理中, WL525HQ 和三得利的根尖铝含量分别为 12.67 和 26.60 g/kg; 单独铝胁迫下, 两者的根尖铝含量分别显著升高 69% 和 57%, 分别为 41.23 和 54.27 g/kg; 外源褪黑素预处理下, 2 份材料根尖铝含量均下降, 且随着褪黑素浓度的升高呈先下降后升高的趋势。20 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素处理下, WL525HQ 和三得利的根尖铝含量均显著低于其他褪黑素处理, 分别为 32.83 和 41.43 g/kg, 较单独铝胁迫分别显著降低 20% 和 24%。50 和 100 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素处理下, 2 份材料的根尖铝含量无显著差异。

2.4 褪黑素对铝胁迫下紫花苜蓿相对电导率的影响

由图 4 可知: 与对照相比, 单独铝胁迫下

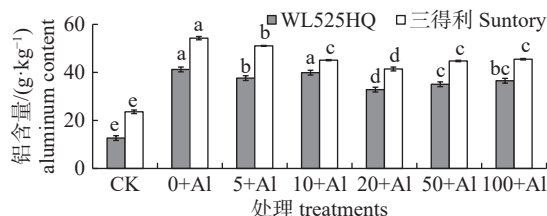


图3 不同浓度褪黑素对铝胁迫下紫花苜蓿根尖铝含量的影响

Fig. 3 Effects of different melatonin concentrations on the aluminum content in root tips of alfalfa under aluminum stress

WL525HQ 和三得利的相对电导率分别显著增加 65% 和 61%，达到 55% 和 61%。随着褪黑素浓度的升高，相对电导率呈先下降后上升的趋势，且三得利的相对电导率高于 WL525HQ。与单独铝胁迫相比，5 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素处理下，WL525HQ 和三得利的相对电导率分别显著降低 5% 和 7%；20 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素处理下，两者的相对电导率分别显著下降 14% 和 21%，达到 44% 和 48%，且显著低于其他褪黑素处理。10、50 和 100 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素处理下，2 份材料的相对电导率无显著差异。

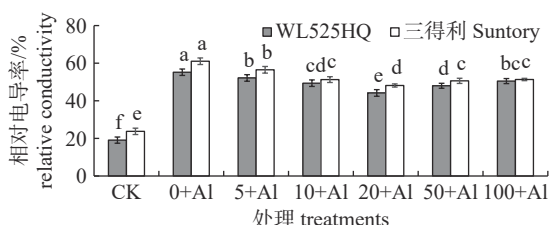


图4 不同浓度褪黑素对铝胁迫下紫花苜蓿根尖相对电导率的影响

Fig. 4 Effects of different melatonin concentrations on the relative permeability of root tips of alfalfa under aluminum stress

2.5 褪黑素对铝胁迫下紫花苜蓿 MDA 含量的影响

由图5可知：单独铝胁迫下，WL525HQ 和三得利的 MDA 含量达到最高，分别为 6.45 和 7.81 mmol/g，较对照分别显著增加 46% 和 53%。与单独铝胁迫相比，5 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素处理下，WL525HQ 和三得利的 MDA 含量分别显著降低 9% 和 21%；20 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素处理下，两者的 MDA 含量分别显著下降 30% 和 40%，达到 4.50 和 4.70 mmol/g，且显著低于其他褪黑素处理。10、50 和 100 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素处理下，2 份材料的 MDA 含量无显著差异。

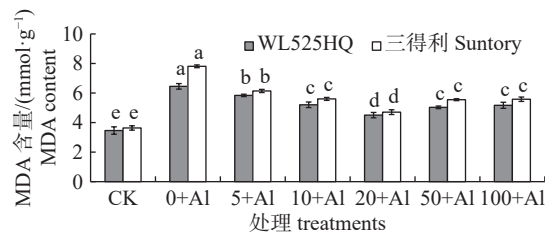


图5 不同浓度褪黑素对铝胁迫下紫花苜蓿根尖 MDA 含量的影响

Fig. 5 Effects of different melatonin concentrations on the MDA content in root tips of alfalfa under aluminum stress

2.6 褪黑素对铝胁迫下不同品种紫花苜蓿生长及生理的交互作用

由表1可知：品种和处理的交互作用对各相关指标均无显著影响 ($P>0.05$)；品种对地上部和地下部干质量、根尖铝含量以及 MDA 含量有极显著影响 ($P<0.01$)；不同浓度褪黑素对各相关指标有极显著影响 ($P<0.01$)。

2.7 褪黑素对缓解紫花苜蓿铝胁迫的效应评价

由表2可知：不同处理条件下，WL525HQ 各指标的综合得分从大到小为 CK>20+Al>50+Al>10+Al>100+Al>5+Al>Al，除去对照后，20+Al 处理的综合得分最高，为 0.62，即 20 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素缓解铝胁迫的效果最好，此时 WL525-HQ 的耐铝能力最强。不同处理条件下，三得利各指标的综合得分从大到小为 CK>20+Al>50+Al>100+Al>10+Al>5+Al>Al，除去对照后，20+Al 处理的综合得分最高，为 0.50，即 20 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素缓解铝胁迫的效果最好，此时三得利的耐铝能力最强。

3 讨论

3.1 不同浓度褪黑素处理对铝胁迫下紫花苜蓿生长发育的影响

植物遭受铝毒害时的主要表现为植物外部形态改变，如表现为生长受限以及叶片卷曲、枯黄等症[34-35]，可用植物生长指标反映其是否受胁迫。铝胁迫时，植物根系生长受抑制，可用相对根系伸长率衡量植物耐铝性差异。本研究表明：铝胁迫下，2 份紫花苜蓿材料的根系相对伸长率以及地上部和地下部干质量均显著低于对照。苟本富[36]研究发现：铝胁迫下，蚕豆幼苗的根长、株高和根系活力均明显下降；石贵玉[34]研究发

表 1 不同浓度褪黑素对铝胁迫下不同品种紫花苜蓿生长及生理的交互作用

Tab. 1 Interaction among different concentrations of melatonin treatment on the growth and physiology of different alfalfa varieties under aluminum stress

指标 index	品种 variety	褪黑素浓度 melatonin concentration	品种×褪黑素浓度 variety×melatonin concentration
地上部干质量 dry weight of aboveground	**	**	ns
地下部干质量 dry weight of underground	**	**	ns
相对根系伸长率 relative root elongation	ns	**	ns
根尖铝含量 root tip aluminum content	**	**	ns
相对电导率 relative conductivity	ns	**	ns
MDA含量 MDA content	**	**	ns

注：“*”表示影响显著 ($P<0.05$), “***”表示影响极显著 ($P<0.01$), ns表示无显著影响 ($P>0.05$)。
Note: “*” indicates significant effect ($P<0.05$), “***” indicates extremely significant effect ($P<0.05$), ns indicates no significant effect ($P>0.05$).

表 2 不同浓度褪黑素处理对铝胁迫下紫花苜蓿幼苗的各指标隶属函数值

Tab. 2 Membership function values of indexes of alfalfa seedlings treated with different concentrations of melatonin under aluminum stress

品种 varieties	处理 treatments	地上部干质量 dry weight of aboveground	地下部干质量 dry weight of underground	相对根系伸长率 relative root elongation	根尖铝含量 root tip aluminum content	相对电导率 relative conductivity	MDA含量 MDA content	综合得分 composite score	排名 ranking
WL525HQ	CK	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1
	0+Al	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.00	7
	5+Al	0.29	0.16	0.28	0.10	0.12	0.40	0.23	6
	10+Al	0.57	0.41	0.54	0.30	0.26	0.53	0.43	4
	20+Al	0.89	0.64	0.67	0.42	0.35	0.74	0.62	2
	50+Al	0.71	0.35	0.59	0.31	0.28	0.54	0.46	3
	100+Al	0.66	0.23	0.54	0.29	0.26	0.53	0.42	5
三得利 Suntory	CK	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1
	0+Al	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.00	7
	5+Al	0.12	0.12	0.32	0.13	0.08	0.20	0.16	6
	10+Al	0.27	0.26	0.55	0.05	0.16	0.42	0.28	5
	20+Al	0.55	0.50	0.69	0.29	0.31	0.65	0.50	2
	50+Al	0.37	0.29	0.63	0.22	0.20	0.47	0.36	3
	100+Al	0.36	0.24	0.58	0.16	0.13	0.43	0.32	4

注: CK表示对照处理; 0、5、10、20、50和100分别为褪黑素的浓度, 单位: $\mu\text{mol/L}$; Al表示0.5 mmol/L铝胁迫。
Note: CK indicates control treatment; 0, 5, 10, 20, 50 and 100 is melatonin concentration, respectively, unit: $\mu\text{mol/L}$; Al indicates 0.5 mmol/L aluminum stress.

现: 铝可导致水稻幼苗的株高、根长、干质量和鲜质量降低, 与本研究结果一致。铝和干旱、盐等胁迫同属于非生物胁迫, 谢丰璞等^[19]研究发现: 非生物胁迫会影响植物的生长发育, 而褪黑素可以增强植物对非生物胁迫的耐受性。对供试紫花苜蓿施加褪黑素后, 其相对根系伸长率以及地上部和地下部干质量显著升高, 且随着褪黑素浓度的升高呈先升高后降低的变化趋势, 这与孟长军^[37]、石光达等^[20]和曹新龙^[38]的研究结果一致。当褪黑素浓度为 20 $\mu\text{mol/L}$ 时, 2 份紫花苜

蓿材料的相对根系伸长率以及地上部和地下部干质量均高于单独铝胁迫和其他褪黑素处理, 这与赵丽娟等^[39]对盐胁迫下紫花苜蓿幼苗施加外源褪黑素的研究结果一致。相同处理条件下, WL525HQ 的相对根系伸长率以及地上部和地下部干质量均高于三得利, 表明敏感型品种所遭受的铝毒害比耐受型更严重。

3.2 不同浓度褪黑素对紫花苜蓿根尖铝含量的影响

植物在遭受铝胁迫时根系先受到损害, 大量

铝离子累积在植物根部^[40]。刘鹏等^[41]研究认为:植物对铝毒害的反应首先表现在根系上,根尖铝含量可间接反应植物受铝毒害的程度。姜娜等^[3]研究表明:根尖铝含量会随着铝胁迫时间的延长而不断升高。本研究发现:铝胁迫下,2份紫花苜蓿材料的根尖铝含量较对照显著升高,而经褪黑素预处理的根尖铝含量有所下降,铝胁迫得到缓解;外源施加20 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素处理的根尖铝含量下降程度最明显,表明20 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素可有效缓解紫花苜蓿所受的铝毒害,减少根尖铝含量的积累。SUN等^[42]研究表明:通常耐铝型小麦品种的根尖铝含量低于敏感型品种;杨正禹^[11]研究发现:相同铝处理下,耐受型品种阿尔刚金比敏感型品种UC-1465的根尖铝含量低。以上研究均与本研究结果一致,即耐铝型品种WL525HQ的根尖铝含量始终低于敏感型品种三得利。

3.3 不同浓度褪黑素处理对铝胁迫下紫花苜蓿幼苗根尖质膜透性的影响

植物受到铝胁迫时,细胞透性增大,膜稳定性降低,影响植物代谢^[43]。植物细胞膜受损伤导致活性氧清除和产生之间的平衡遭到破坏^[44],活性氧大量积累并攻击膜脂,诱导植物细胞产生大量MDA^[45],故MDA含量可反映植物体内的氧化胁迫水平。随着细胞膜被破坏,相对透性功能逐渐减少甚至丧失,导致细胞内电解质和某些小分子有机物外渗,使得植物组织浸出液内的相对电导率升高^[46]。本研究中,铝胁迫下紫花苜蓿根尖相对电导率和MDA含量较对照显著增加,且耐铝型品种的增幅小于敏感型品种,表明铝胁迫下耐铝型紫花苜蓿的膜脂过氧化程度和膜透性始终小于敏感型,这与张景云等^[47]的研究结果类似。本研究还发现:不同浓度褪黑素处理对紫花苜蓿根尖相对电导率和MDA含量的缓解作用不同,且随着褪黑素浓度的升高,上述2个指标值呈先降低后升高的变化趋势,这与苏立娜等^[48]和褚晶等^[49]的研究结果一致。外源施加20 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素处理的相对电导率和MDA含量降到最小值,表明褪黑素处理能有效缓解膜脂过氧化,提高耐铝性,这与张婷^[50]的研究结果一致。综上所述,褪黑素能抑制植物根尖膜脂过氧化水平,通过降低相对电导率和MDA含量来缓解铝毒害,提升植物的质膜透性以缓解植物根系生长所受到的抑制。

4 结论

褪黑素可有效缓解铝毒害对紫花苜蓿根系生长和根尖细胞造成的损害,加强其对铝毒害的耐受性,且以20 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素处理的综合评价得分最高,缓解毒害效果较好。

[参考文献]

- [1] 李文晓,张岁岐,丁圣彦,等.干旱胁迫下紫花苜蓿根系形态变化及与水分利用的关系[J].生态学报,2010,30(19): 5140.
- [2] 李智燕,邢学峰,唐华,等.铝和酸胁迫对苜蓿根瘤菌生长和抗氧化酶系的影响[J].草业学报,2013,22(3): 146. DOI: 10.11686/cyxb20130319.
- [3] 姜娜,任健,罗富成,等.铝胁迫对不同耐铝基因型紫花苜蓿根尖及细胞壁氧化酶活性的影响[J].中国草地学报,2020,42(6): 15. DOI: 10.16742/j.zgdxsb.20200007.
- [4] 李剑峰,师尚礼,张淑卿.环境酸度对紫花苜蓿早期生长和生理的影响[J].草业学报,2010,19(2): 47. DOI: 10.11686/cyxb20100207.
- [5] STOUT D G. Growth of alfalfa on acid soils when established with pre-inoculated coated seed[R]. Agriculture and Agri-Food Canada, 1994.
- [6] 郭奇梅.酸和铁胁迫对紫花苜蓿根系质膜酶活性的影响[D].兰州:甘肃农业大学,2008.
- [7] 张云.吡啶乙酸及褪黑素对菊芋铝毒响应的调控作用[D].金华:浙江师范大学,2021.
- [8] 杨丹娜,骆夜烽,谢家琪,等.酸、铝胁迫对苜蓿种子发芽和幼苗生长的影响[J].草业学报,2015,24(8): 103. DOI: 10.11686/cyxb2014362.
- [9] 何龙飞,沈振国,刘友良,等.植物铝毒害机理的研究[J].广西农业生物科学,2002,21(3): 188.
- [10] 汤霞,陈仕勇,周青平.铝胁迫对燕麦种子萌发及幼苗生长的影响[J].种子,2022,41(9): 91. DOI: 10.16590/j.cnki.1001-4705.2022.09.091.
- [11] 杨正禹.贵州地区紫花苜蓿引种适应性研究及耐酸铝胁迫评价[D].贵阳:贵州大学,2021.
- [12] 刘鹏,应小芳,徐根娣,等.铝对大豆质膜透性和POD、CAT活性的影响[J].浙江师范大学学报(自然科学版),2005,28(3): 300. DOI: 10.3969/j.issn.1001-5051.2005.03.016.
- [13] 陈志刚,张红蕊,周晓红,等.铝胁迫对黑麦草种子萌发和幼苗生长的影响[J].水土保持研究,2011,18(4): 207.
- [14] 黄巧云,李学垣,徐凤琳.铝对小麦幼苗生长和根的某些生理特性的影响(简报)[J].植物生理学通讯,1994(2): 97.
- [15] 周小华,周泽仪,李昆志.铝胁迫下外源抗坏血酸对水稻幼苗抗氧化性能的影响[J].核农学报,2020,34(10): 2368. DOI: 10.11869/j.issn.100-8551.2020.10.2368.
- [16] 许文花,杨蔚,段新慧,等.铝胁迫对紫花苜蓿生长及根系发育的影响[J].草原与草坪,2020,40(6): 71. DOI: 10.13817/j.cnki.cyyyp.2020.06.011.
- [17] 姜娜,唐敏,韩博,等.铝胁迫对紫花苜蓿不同种质材料的影响及综合评价[J].草地学报,2019,27(3): 620.

- DOI: [10.11733/j.issn.1007-0435.2019.03.014](https://doi.org/10.11733/j.issn.1007-0435.2019.03.014).
- [18] 赵燕, 王东华, 赵曦阳. 植物中褪黑素的研究进展[J]. 西北植物学报, 2014, 34(1): 196. DOI: [10.7606/j.issn.1000-4025.2014.01.0196](https://doi.org/10.7606/j.issn.1000-4025.2014.01.0196).
- [19] 谢丰璞, 徐蓉蓉, 高静, 等. 褪黑素对扁茎黄芪种子萌发和幼苗生长的影响[J]. 中国农学通报, 2022, 38(25): 60.
- [20] 石光达, 康鹏, 潘雅清, 等. 干旱复水条件下外源褪黑素对玉米幼苗生长及生理特性的影响[J]. 安徽农业科学, 2021, 49(24): 60. DOI: [10.3969/j.issn.0517-6611.2021.24.014](https://doi.org/10.3969/j.issn.0517-6611.2021.24.014).
- [21] 和秋兰, 张航, 王正维, 等. 外源褪黑素对低温胁迫下马铃薯幼苗抗氧化系统的影响[J]. 华北农学报, 2022, 37(1): 103. DOI: [10.7668/hbxb.20192429](https://doi.org/10.7668/hbxb.20192429).
- [22] 段文静, 孟妍君, 江丹, 等. 外源褪黑素对盐胁迫下棉花幼苗形态及抗氧化系统的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2022, 30(1): 92. DOI: [10.12357/cjea.20210411](https://doi.org/10.12357/cjea.20210411).
- [23] 黄佳璟, 林立金, 陈发波, 等. 喷施褪黑素对萝卜生长及镉积累的影响[J]. 四川农业大学学报, 2017, 35(3): 375. DOI: [10.16036/j.issn.1000-2650.2017.03.014](https://doi.org/10.16036/j.issn.1000-2650.2017.03.014).
- [24] 孟祥萍. 褪黑素引发种子对冬小麦水分胁迫下生长及生理的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
- [25] 叶君, 邓西平, 王仕稳, 等. 干旱胁迫下褪黑素对小麦幼苗生长、光合和抗氧化特性的影响[J]. 麦类作物学报, 2015, 35(9): 1275. DOI: [10.7606/j.issn.1009-1041.2015.09.15](https://doi.org/10.7606/j.issn.1009-1041.2015.09.15).
- [26] 徐道坤. 氢气和褪黑素缓解铝胁迫下水稻种子萌发和拟南芥根伸长抑制的分子机理[D]. 南京: 南京农业大学, 2017.
- [27] 吕婷. 褪黑素对小麦铝毒的缓解作用及其机理研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- [28] 黄邦全, 白景华, 薛小桥. 植物铝毒害及遗传育种研究进展[J]. 植物学通报, 2001, 18(4): 385. DOI: [10.3969/j.issn.1674-3466.2001.04.001](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-3466.2001.04.001).
- [29] 付靖雯. 褪黑素调节镉胁迫下苘麻幼苗生理与生化功能的机制[D]. 兰州: 西北师范大学, 2021.
- [30] 李文静. 外源复合有机酸对菊芋耐铝的调控作用[D]. 金华: 浙江师范大学, 2021.
- [31] GB 5009.268—2016. 食品安全国家标准 食品中多元素的测定[S].
- [32] 孙群, 胡景江. 植物生理学研究技术[M]. 杨凌: 西北农林科技大学出版社, 2006.
- [33] 宋凤鸣, 葛秀春, 郑重. 活性氧及膜脂过氧化与棉花对枯萎病抗性的关系[J]. 植物病理学报, 2001, 31(2): 110. DOI: [10.3321/j.issn:0412-0914.2001.02.003](https://doi.org/10.3321/j.issn:0412-0914.2001.02.003).
- [34] 石贵玉. 铝对水稻幼苗生长和生理的影响[J]. 广西植物, 2004, 24(1): 77. DOI: [10.3969/j.issn.1000-3142.2004.01.019](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-3142.2004.01.019).
- [35] 何龙飞, 刘友良, 沈振国, 等. 铝对小麦根细胞质膜ATP酶活性和膜脂组成的影响[J]. 中国农业科学, 2001, 34(5): 526. DOI: [10.3321/j.issn:0578-1752.2001.05.012](https://doi.org/10.3321/j.issn:0578-1752.2001.05.012).
- [36] 苟本富. 铝胁迫对蚕豆幼苗生理的影响[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(16): 6643. DOI: [10.3969/j.issn.0517-6611.2008.16.018](https://doi.org/10.3969/j.issn.0517-6611.2008.16.018).
- [37] 孟长军. 铝胁迫对白苦瓜幼苗生长状况和生理特性的影响[J]. 中国农业科技导报, 2018, 20(8): 23. DOI: [10.13304/j.nykjdb.2018.0191](https://doi.org/10.13304/j.nykjdb.2018.0191).
- [38] 曹新龙. 干旱胁迫下紫花苜蓿对外源褪黑素的生理响应[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2020.
- [39] 赵丽娟, 麻冬梅, 王文静, 等. 外源褪黑素对盐胁迫下紫花苜蓿幼苗抗氧化能力以及光合作用效率的影响[J]. 西北植物学报, 2021, 41(8): 1355. DOI: [10.7606/j.issn.1000-4025.2021.08.1355](https://doi.org/10.7606/j.issn.1000-4025.2021.08.1355).
- [40] 王鑫月, 张梅娟, 熊炳霖, 等. 铝胁迫对水稻膜脂组分和含量的影响[J]. 植物生理学报, 2016, 52(4): 461. DOI: [10.13592/j.cnki.ppj.2015.0607](https://doi.org/10.13592/j.cnki.ppj.2015.0607).
- [41] 刘鹏, YANG Y S, 徐根娣, 等. 铝胁迫对大豆幼苗根系形态和生理特性的影响[J]. 中国油料作物学报, 2004, 26(4): 49. DOI: [10.3321/j.issn:1007-9084.2004.04.010](https://doi.org/10.3321/j.issn:1007-9084.2004.04.010).
- [42] SUN C L, LIU L J, YU Y, et al. Nitric oxide alleviates aluminum-induced oxidative damage through regulating the ascorbate-glutathione cycle in roots of wheat[J]. Journal of Integrative Plant Biology, 2015, 57(6): 550. DOI: [10.1111/jipb.12298](https://doi.org/10.1111/jipb.12298).
- [43] 肖祥希, 杨宗武, 肖晖, 等. 铝胁迫对龙眼叶片活性氧代谢及膜系统的影响[J]. 林业科学, 2003, 39(S1): 52.
- [44] GIANNAKOULA A, MOUSTAKAS M, SYROS T, et al. Aluminum stress induces up-regulation of an efficient antioxidant system in the Al-tolerant maize line but not in the Al-sensitive line[J]. Environmental and Experimental Botany, 2010, 67(3): 487. DOI: [10.1016/j.envexpbot.2009.07.010](https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2009.07.010).
- [45] 彭尽晖, 龚雯, 陈海霞, 等. 铝胁迫对八仙花离体植株质膜透性与抗氧化系统的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2013, 39(S1): 42. DOI: [10.13331/j.cnki.jhau.2013.s1.027](https://doi.org/10.13331/j.cnki.jhau.2013.s1.027).
- [46] 高晓宁, 赵冰, 刘旭梅, 等. 4个杜鹃花品种对干旱胁迫的生理响应及抗旱性评价[J]. 浙江农林大学学报, 2017, 34(4): 597. DOI: [10.11833/j.issn.2095-0756.2017.04.005](https://doi.org/10.11833/j.issn.2095-0756.2017.04.005).
- [47] 张景云, 吴凤芝. 盐胁迫对黄瓜不同耐盐品种膜脂过氧化及脯氨酸含量的影响[J]. 中国蔬菜, 2007(7): 12. DOI: [10.3969/j.issn.1000-6346.2007.07.005](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-6346.2007.07.005).
- [48] 苏立娜, 麻冬梅, 李嘉文, 等. 外源褪黑素对盐胁迫下两种紫花苜蓿生理及光合特性的影响[J]. 草地学报, 2023, 31(3): 726. DOI: [10.11733/j.issn.1007-0435.2023.03.012](https://doi.org/10.11733/j.issn.1007-0435.2023.03.012).
- [49] 褚晶, 田晓芹, 陈世华, 等. 外源褪黑素对小麦幼苗生理及光合荧光特性的影响[J]. 广西植物, 2023, 43(4): 723. DOI: [10.11931/guihaia.gxzw202111059](https://doi.org/10.11931/guihaia.gxzw202111059).
- [50] 张婷. 盐碱胁迫下7种百合的生理响应及外源褪黑素对百合耐盐碱性的影响[D]. 重庆: 西南大学, 2021.

责任编辑: 何馨成