

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.02.025

引用格式:何蓉,南丽丽,郭佳雨,等.外源褪黑素对低磷胁迫下紫花苜蓿生长及生理特性的影响[J].草地学报,2026,34(2):632—642

HE Rong, NAN Li-li, GUO Jia-yu, et al. Effects of Exogenous Melatonin on the Growth and Physiological Characteristics of Alfalfa under Low Phosphorus Stress[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(2):632—642

外源褪黑素对低磷胁迫下紫花苜蓿生长及生理特性的影响

何蓉,南丽丽*,郭佳雨,田戈,杨丽丽

(甘肃农业大学草业学院/草业生态系统教育部重点实验室/农业农村部饲草种质创新与新品种选育重点实验室,
甘肃兰州730070)

摘要:为研究外源褪黑素(Melatonin, MT)对低磷胁迫下紫花苜蓿(*Medicago sativa*)生长及生理特性的影响,以种质‘7890’和‘15578’为材料,采用营养液砂培法进行常磷(Normal phosphorus, NP 1.0 mmol·L⁻¹ KH₂PO₄)和低磷(Low phosphorus, LP 0.01 mmol·L⁻¹ KH₂PO₄)胁迫,对LP胁迫下苜蓿幼苗根灌5种不同浓度MT,测定其形态及生理指标。结果表明:90 μmol·L⁻¹ MT缓解苜蓿低磷胁迫效果最佳,其株高、叶面积、地上及地下生物量、相对含水量、根系活力、蒸腾速率、气孔导度、净光合速率、叶绿素a、叶绿素b、类胡萝卜素、叶绿素、脯氨酸、可溶性糖和可溶性蛋白含量及超氧化物歧化酶、过氧化物酶、过氧化氢酶活性均显著升高,丙二醛和胞间CO₂浓度显著降低。主成分分析表明,叶绿素含量、可溶性糖含量、叶片气孔导度可作为MT对低磷胁迫下苜蓿生长发育的关键指标。综上,外源MT能增强LP胁迫下苜蓿幼苗抗氧化酶活性和渗透调节物质含量,提高其耐低磷性。

关键词:苜蓿;褪黑素;低磷胁迫;过氧化物酶

中图分类号:S551⁺.7;Q945.78

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)02-0632-11

Effects of Exogenous Melatonin on the Growth and Physiological Characteristics of Alfalfa under Low Phosphorus Stress

HE Rong, NAN Li-li*, GUO Jia-yu, TIAN Ge, YANG Li-li

(College of Pratacultural Science/ Gansu Agricultural University/ Key Laboratory of Grassland Ecosystem, Ministry of Education/ Key Laboratory of Forage Gerplasm Innovation and New Variety Breeding of Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Lanzhou, Gansu Province 730070, China)

Abstract: To investigate the effects of exogenous Melatonin (MT) on the growth and physiological characteristics of alfalfa (*Medicago sativa*) under low phosphorus stress, germplasms ‘7890’ and ‘15578’ were used as materials. The normal phosphorus (NP, 1.0 mmol·L⁻¹ KH₂PO₄) and low phosphorus (LP, 0.01 mmol·L⁻¹ KH₂PO₄) stresses were imposed by nutrient solution sand culture method. Five different concentrations of MT were applied to the roots of alfalfa seedlings under LP stress to determine their morphology and physiological indicators. The results show that: 90 μmol·L⁻¹ MT has the best effect in alleviating low phosphorus stress in alfalfa. The plant height, leaf area, aboveground and underground biomass, relative water content, root vitality, transpiration rate, stomatal conductance, net photosynthetic rate, contents of chlorophyll a, chlorophyll b, carotenoids, chlorophyll, proline, soluble sugar and soluble protein, as well as the activities of superoxide dismutase, peroxidase and catalase were all significantly increased. The concentrations of malondialdehyde and intercellular CO₂ were significantly reduced. Principal component analysis indicated that chlorophyll content,

收稿日期:2025-01-14;修回日期:2025-05-03

基金项目:国家自然科学基金(32160327);财政部和农业农村部:国家现代农业产业技术体系(CARS-34)资助

作者简介:何蓉(1999-),女,汉族,贵州龙里人,硕士研究生,主要从事牧草栽培与育种研究,E-mail:1015268173@qq.com;*通信作者
Author for correspondence, E-mail: nanll@gsau.edu.cn

soluble sugar content, and leaf stomatal conductance could be used as key indicators for the growth and development of alfalfa under low phosphorus stress by MT. In conclusion, exogenous MT can enhance the activity of antioxidant enzymes and the content of osmotic regulatory substances in alfalfa seedlings under LP stress, and improve their tolerance to low phosphorus.

Key words: Alfalfa; Melatonin; Low phosphorus stress; Peroxidase

紫花苜蓿(*Medicago sativa*)是全球范围内广泛栽培的优质多年生豆科牧草,因其蛋白质含量高、营养价值丰富,被誉为“牧草之王”。紫花苜蓿不仅干草产量高、生态适应性广,为畜牧业可持续发展提供重要支持,而且其发达的根系能有效改良土壤结构,对草地生态环境保护具有重要作用^[1]。2018年以来,我国苜蓿种植主要分布在西北地区,形成了包括甘肃河西走廊、内蒙古科尔沁草原、宁夏河套灌区在内的多个集中连片的优质苜蓿种植基地^[2]。磷(Phosphorus, P)是有限的、不可再生的矿质营养元素,也是生物大分子的重要构成部分,对植物的光合作用、能量代谢及信号转导等生长发育过程具有重要作用^[3]。西北地区土壤养分特征表现为全钾和全磷含量较高^[4],虽然全磷含量丰富,但由于磷酸盐离子易与钙、镁等金属离子结合形成难以溶解的化合物^[5],致使土壤有效磷短缺,阻碍植物的正常生长发育。此外,为提高作物产量,农业生产中大量施用磷肥造成了水体富营养化、土地污染等环境问题,对自然生态系统造成严重危害。因此,研究缓解紫花苜蓿低磷的胁迫方法并揭示其调控机理尤为重要。

褪黑素(Melatonin, MT)又称松果体素,是一种广泛存在于植物种子、叶片、果实和根系等组织中的吲哚类植物激素^[6],在植物生长发育、生理调节以及提高植物对非生物胁迫响应等过程中具有重要作用。作为信号分子,MT可以调节植物的种子萌发、根系发育、叶片衰老、开花、果实成熟等生长发育过程^[7];作为抗氧化剂,MT能够通过提高抗氧化酶的活性,有效清除胁迫诱导在植物体内产生的大量活性氧(Reactive oxygen species, ROS),保护植物免受过度氧化损害,从而增强植物抵抗逆境胁迫的能力^[8]。目前,关于褪黑素对植物影响的研究主要集中在干旱胁迫^[9]、盐碱胁迫^[10]、冷害^[11]、镉胁迫^[12]等非生物逆境胁迫方面。王慧等^[13]研究表明,干旱胁迫下施用外源MT,不仅能调节黑麦草(*Lolium perenne*)和苜蓿的养分吸收,而且能改善植物的抗氧化能力;王胜永等^[14]研究表明,盐胁迫下添加MT,有助于提高紫花苜蓿的超氧化物歧化酶

(Superoxide dismutase, SOD)、过氧化氢酶(Catalase, CAT)、过氧化物酶(Peroxidase, POD)活性,减缓膜系统损伤,增加其耐盐性;尉欣荣等^[15]研究表明,低温胁迫下添加MT,能够增强黑麦草抗氧化酶活性,提高脯氨酸含量,降低ROS含量,提高黑麦草的抗寒性。但外源MT对低磷胁迫下紫花苜蓿的生长发育是否起到缓解作用尚不明确。因此,本试验以紫花苜蓿为试验材料,通过根灌不同浓度MT探究其对低磷胁迫下苜蓿幼苗生长发育的影响,从生理生化的角度初步探讨MT缓解紫花苜蓿幼苗低磷胁迫的作用机制,筛选出可以有效缓解苜蓿低磷胁迫的最佳MT施用浓度,以期为MT提高苜蓿耐低磷机制提供理论基础,为缺磷地区苜蓿的栽培种植提供技术参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

以前期筛选的耐低磷(材料 zxy2008p-7890)和磷敏感(材料 zxy2010p-15578)苜蓿为试验材料,2份材料均为农业部全国畜牧兽医总站牧草种质资源搜集保护项目协作组从俄罗斯瓦维洛夫植物基因库引进。

1.2 试验方法

1.2.1 幼苗种植与培养 选取完整、颗粒饱满的紫花苜蓿种子,用10%NaClO溶液进行消毒,用蒸馏水冲洗5~6次,种子晾干后均匀撒播于盛有高温杀菌砂土的塑料杯(杯高14 cm,底径6 cm)内并覆沙2~3 cm,将其表面喷湿,移至植物生长室(每天光照14 h,光通量密度 $400 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,昼夜温度分别为 (25 ± 1) 和 $(20\pm 1)^{\circ}\text{C}$,相对湿度60%)。出苗后间苗,每杯保留长势一致、分布均匀的幼苗15株,每隔2 d浇灌70 mL Hoagland营养液。待幼苗长至15 cm时,参考夏静等^[16]的试验设计,以仅浇灌Hoagland营养液的幼苗作为对照(常磷: $1.0 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1} \text{KH}_2\text{PO}_4$, NP),以浇灌含 $0.01 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1} \text{KH}_2\text{PO}_4$ 的Hoagland营养液的幼苗作为低磷胁迫处理(LP),用

KCl平衡调整 K^+ 。胁迫20 d后,对其进行不同浓度MT根灌处理(表1)。外源添加MT于18:00后进行,MT每2 d根灌一次,每次70 mL;共根施6次,12 d后测定相关指标,筛选出外源MT缓解苜蓿低磷胁迫的最佳浓度。

表1 试验处理

Table1 Experimental treatment

处理 Treatment	成分 Composition
NP	1.0 mmol·L ⁻¹ KH ₂ PO ₄
LP	0.01 mmol·L ⁻¹ KH ₂ PO ₄ +0 μmol·L ⁻¹ MT
T ₁	0.01 mmol·L ⁻¹ KH ₂ PO ₄ +30 μmol·L ⁻¹ MT
T ₂	0.01 mmol·L ⁻¹ KH ₂ PO ₄ +60 μmol·L ⁻¹ MT
T ₃	0.01 mmol·L ⁻¹ KH ₂ PO ₄ +90 μmol·L ⁻¹ MT
T ₄	0.01 mmol·L ⁻¹ KH ₂ PO ₄ +120 μmol·L ⁻¹ MT
T ₅	0.01 mmol·L ⁻¹ KH ₂ PO ₄ +150 μmol·L ⁻¹ MT

1.3 测定指标及方法

1.3.1 形态指标 株高:每杯随机选取10株幼苗用卷尺测量株高并取平均值。叶面积:取从植株顶端依次向下数的第3个叶片,采用LI-3000C叶面积仪测定,重复10次。生物量:每杯选取3株植株,蒸馏水洗净砂土,用剪刀将地上与地下部交界处分离,分别称量地上生物量和地下生物量。

1.3.2 生理指标 参考邹琦^[17]的方法进行生理指标的测定。用丙酮乙醇混合液提取法测定叶绿素a(Chlorophyll a, Chl a)、叶绿素b(Chlorophyll b, Chl b)、叶绿素(Chlorophyll, Chl)和类胡萝卜素(Carotenoid, Car)含量。采用饱和称重法测定叶片相对含水量(Leaf relative water content),氯化三苯基四氮唑(TTC)法测定根系活力(Root activity),硫代巴比妥酸法测定丙二醛(Malondialdehyde, MDA)含量,高锰酸钾滴定法测定CAT活性,愈创木酚法测定POD活性,氮蓝四唑法测定SOD活性,可溶性糖(Soluble sugar, SS)含量的测定采用蒽酮比色法,可溶性蛋白质(Soluble protein, SP)含量的测定采用考马斯亮蓝法,脯氨酸(Proline, Pro)含量的测定采用酸性茚三酮法。每个指标重复3次。

1.3.3 光合参数 采用GFS-3000便携式光合仪(Heinz-Walz, Effeltrich, Germany)在晴天上午(9:00—11:00)测定光合参数,仪器为开放式气路,设置400 μmol·mol⁻¹的空气CO₂浓度,设置1200 μmol·m⁻²·s⁻¹的光合有效辐射强度,每个处理选取从顶端数第3片完全展开的复叶,测量叶片蒸腾速率(Transpiration rate, T_r)、净光合速率(Net photosynthetic rate, P_n)、气孔导度(Stomatal conductance,

G_s)和胞间CO₂浓度(Intercellular CO₂ concentration, C_i)等光合参数。

1.4 数据统计分析

使用Excel 2021进行数据整理,SPSS 27.0进行单因素ANOVA分析、Duncan多重比较($P < 0.05$)以及主成分分析,Origin 2021绘制图形。

采用隶属函数法进行综合评价,得到最适MT浓度。与低磷胁迫呈正相关的指标,计算公式为 $F_{ij} = (X_{ij} - X_{jmin}) / (X_{jmax} - X_{jmin})$;与低磷胁迫呈负相关的指标,计算公式为 $F_{ij} = 1 - (X_{ij} - X_{jmin}) / (X_{jmax} - X_{jmin})$ ^[18]。式中, F_{ij} 为*i*材料的*j*性状测定的具体隶属值; X_{ij} 为*i*材料的*j*性状测定值; X_{jmin} 为*j*性状中最小测定值; X_{jmax} 为*j*性状中最大测定值。

采用客观赋权法计算各指标权重,计算公式为: $W_j = I_j / \sum I_j$ 。与低磷胁迫呈正相关的指标为 $I_j = C_j / S_j$,与低磷胁迫呈负相关的指标为 $I_j = S_j / C_j$ 。其中 I_j 为测定值与对照组的比值, C_j 为对照组第*j*个指标的测定值, S_j 为处理组第*j*个测定指标的平均值。耐低磷性综合评价值为 $D = \sum (F_{ij} \times W_j)$ ^[19]。

2 结果与分析

2.1 外源褪黑素对低磷胁迫下苜蓿生长的影响

由表2可知,与NP相比,LP下‘7890’和‘15578’的株高、叶面积、地上生物量、地下生物量、叶片相对含水量及根系活力均显著降低($P < 0.05$),‘7890’分别下降了19.67%, 33.33%, 31.99%, 53.10%, 9.91%, 68.59%;‘15578’分别下降了25.69%, 34.21%, 38.25%, 53.24%, 17.18%, 66.90%。与LP相比,随外源MT浓度的增加,2份材料的株高、叶面积、地上及地下生物量、叶片相对含水量、根系活力均呈先上升后下降趋势,且以T₃处理效果最佳。其中,‘7890’分别显著上升16.55%, 34.62%, 32.41%, 86.78%, 7.58%, 206.61% ($P < 0.05$),‘15578’分别显著增加26.75%, 32.00%, 44.88%, 108.91%, 20.24%, 193.53% ($P < 0.05$)。在T₁处理下,‘7890’的株高、叶面积、地下生物量以及叶片相对含水量较LP分别提升5.17%, 5.77%, 28.10%, 1.42%;在T₅处理下,‘7890’的株高和地上生物量均低于LP处理;‘15578’的叶面积在T₁和T₂处理下较LP增幅仅为4.00%和16.00%。

表 2 外源褪黑素对低磷胁迫下苜蓿幼苗生长的影响

Table 2 Effects of exogenous melatonin on the growth of alfalfa seedlings under low phosphorus stress

材料 Material	处理 Treatment	株高 Plant height/ cm	叶面积 Leaf area/ cm ²	地上生物量 Above ground biomass/ [g·(3plant) ⁻¹]	地下生物量 Under ground biomass/ [g·(3plant) ⁻¹]	叶片相对含水量 Leaf relative water content/%	根系活力 Root activity/ (μg·g ⁻¹ ·h ⁻¹)
7890	NP	36.1±1.44 ^a	0.78±0.08 ^a	3.72±0.27 ^a	2.58±0.41 ^a	89.04±2.13 ^a	599.01±3.86 ^a
	LP	29.0±1.63 ^d	0.52±0.10 ^c	2.53±0.19 ^{de}	1.21±0.14 ^c	80.22±4.26 ^b	188.13±2.79 ^g
	T ₁	30.5±2.11 ^{cd}	0.55±0.16 ^c	3.05±0.14 ^{bc}	1.55±0.06 ^{bc}	81.36±2.21 ^b	226.90±4.38 ^f
	T ₂	31.1±1.63 ^c	0.65±0.06 ^{bc}	3.15±0.14 ^b	1.78±0.08 ^b	82.15±2.62 ^b	415.32±3.79 ^e
	T ₃	33.8±2.10 ^b	0.70±0.08 ^{ab}	3.35±0.28 ^b	2.26±0.05 ^a	86.30±0.01 ^{ab}	576.82±2.73 ^b
	T ₄	31.0±2.66 ^c	0.69±0.14 ^{ab}	2.79±0.15 ^{cd}	1.54±0.16 ^{bc}	85.96±2.47 ^{ab}	529.27±2.95 ^c
	T ₅	26.4±3.00 ^e	0.61±0.09 ^b	2.22±0.14 ^e	1.34±0.22 ^c	82.46±0.34 ^b	437.65±7.80 ^d
15578	NP	32.7±1.77 ^a	0.76±0.10 ^a	3.32±0.14 ^a	2.16±0.13 ^a	87.06±3.28 ^a	565.82±5.88 ^a
	LP	24.3±2.71 ^e	0.50±0.07 ^c	2.05±0.19 ^d	1.01±0.11 ^e	72.10±0.42 ^c	187.30±5.08 ^g
	T ₁	27.6±3.49 ^{cd}	0.52±0.08 ^c	2.72±0.12 ^b	1.24±0.03 ^{cd}	79.62±1.53 ^b	317.87±6.79 ^e
	T ₂	28.6±3.21 ^{bc}	0.58±0.10 ^{bc}	2.91±0.27 ^{ab}	1.64±0.03 ^b	81.81±2.40 ^{ab}	385.13±5.31 ^d
	T ₃	30.8±2.90 ^{ab}	0.66±0.10 ^b	2.97±0.43 ^{ab}	2.11±0.15 ^a	86.69±0.27 ^a	549.78±6.36 ^b
	T ₄	27.8±2.83 ^{cd}	0.64±0.10 ^b	2.58±0.47 ^{bc}	1.40±0.08 ^c	84.24±2.62 ^{ab}	490.56±5.25 ^c
	T ₅	25.5±2.71 ^{de}	0.58±0.07 ^{bc}	2.10±0.05 ^{cd}	1.16±0.21 ^{de}	80.41±5.17 ^{ab}	275.37±1.17 ^f

注:同列不同小写字母表示处理间的差异显著($P<0.05$),下同

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

2.2 外源褪黑素对低磷胁迫下苜蓿叶绿素和光合参数的影响

由表 3 可知,LP 胁迫下 Chl a, Chl b, Chl 及 Car 含量均显著降低($P<0.05$)。外源添加 MT 后,各叶绿素指标随 MT 浓度不断增加呈先升后降趋势,除 T₅ 处理下‘15578’的 Chl b 外,各浓度 MT 处理下叶绿素含量均高于 LP。在 T₃ 处理下,与 LP 相比,‘7890’和‘15578’的 Chl a, Chl b, Chl 及 Car 分别上升 20.69%, 61.22%, 42.11%, 33.14% 和 19.47%, 50.00%, 23.81%, 28.66% ($P<0.05$)。以上表明 MT 可以有效缓解叶绿素的分解, T₃ 处理效果最为显著。

与 NP 相比,LP 胁迫下 T_r, P_n 和 G_s 均显著下降($P<0.05$)。其中,‘7890’分别下降了 66.22%, 58.35% 和 29.46%; ‘15578’分别下降了 72.30%, 75.24% 和 52.60%。添加 MT 后,2 份材料的 T_r, P_n, G_s 均随 MT 浓度不断增加呈先上升后下降趋势,且在 T₃ 处理下达最大值,‘7890’较 LP 分别提高 177.53%, 80.47% 和 28.26%, ‘15578’较 LP 分别提高 153.37%, 268.49% 和 109.01%, 但均小于 NP。而 C_i 则随 MT 浓度的增加呈现先下降后上升趋势,且在 T₃ 处理下有最小值,‘7890’和‘15578’较 LP 分别降低了 15.54% 和 15.70%。在 T₅ 处理下,与 LP 胁迫相比,‘7890’的 T_r, P_n 和 G_s 分别降低了

21.59%, 10.21%, 48.01%; ‘15578’的 Chl b, G_s 分别降低 2.17%, 42.65%。这说明 MT 浓度过高对苜蓿的生长起抑制作用。

2.3 外源褪黑素对低磷胁迫下苜蓿丙二醛含量及抗氧化酶活性的影响

由图 1 可知,与 NP 相比,LP 胁迫下‘7890’和‘15578’的 MDA 含量均显著升高($P<0.05$)。与单独 LP 胁迫相比,外源添加 MT 显著减少了 2 份材料的 MDA 含量。随着 MT 浓度的升高,苜蓿的 MDA 含量均呈先下降后上升趋势,且在 90 μmol·L⁻¹ MT 时 MDA 含量达到最小值,分别较 LP 降低了 43.86%, 30.81%。在 T₄, T₅ 处理下,‘7890’和‘15578’的 MDA 含量均显著高于 NP。

LP 胁迫时,2 份材料的 POD, SOD, CAT 酶活性与 NP 相比均显著上升($P<0.05$)。其中,‘7890’的酶活性分别上升 44.92%, 1.92%, 49.14%; ‘15578’的酶活性分别上升 37.19%, 9.97%, 65.94%。外源添加不同浓度 MT 后,三种酶的活性均随 MT 浓度的升高呈先上升后下降趋势,且在 T₃ 处理下最高。‘7890’和‘15578’的 SOD, POD, CAT 活性分别显著增加 16.95%, 134.05%, 36.69% 和 35.48%, 104.18%, 24.82% ($P<0.05$)。另外, T₁, T₂ 处理下‘15578’的 CAT 活性与 LP 差异不显著。

表 3 外源褪黑素对低磷胁迫下苜蓿叶绿素和光合参数的影响

Table 3 The effects of exogenous melatonin on chlorophyll and photosynthetic parameters of alfalfa under low phosphorus stress

材料 Material	处理 Treatment	叶绿素 a Chlorophyll a/ (mg·g ⁻¹)	叶绿素 b Chlorophyll b/ (mg·g ⁻¹)	类胡萝卜素 Carotenoid/ (mg·g ⁻¹)	叶绿素 Chlorophyll/ (mg·g ⁻¹)	蒸腾速率 Transpiration rate/ (mmol·m ⁻² ·s ⁻¹)	净光合速率 Net photosynthetic/ (mol·m ⁻² ·s ⁻¹)	胞间 CO ₂ 浓度 Intercellular CO ₂ concentration/ (μmol·mol ⁻¹)	气孔导度 Stomatal conductance/ (mmol·m ⁻² ·s ⁻¹)
7890	NP	1.71±0.02 ^a	0.67±0.07 ^{bc}	0.33±0.03 ^a	2.44±0.07 ^a	13.44±0.00 ^a	16.23±0.10 ^a	330.05±2.58 ^f	391.54±0.14 ^a
	LP	1.16±0.01 ^g	0.49±0.02 ^e	0.19±0.03 ^d	1.69±0.02 ^e	4.54±0.02 ^f	6.76±0.03 ^f	389.31±1.22 ^a	276.19±0.80 ^e
	T ₁	1.25±0.01 ^f	0.64±0.02 ^c	0.20±0.01 ^d	1.95±0.04 ^d	5.77±0.01 ^d	8.21±0.18 ^e	385.91±0.73 ^b	338.59±0.29 ^d
	T ₂	1.35±0.02 ^c	0.70±0.03 ^b	0.21±0.02 ^{cd}	2.12±0.04 ^c	8.48±0.00 ^b	8.75±0.04 ^d	364.24±0.23 ^c	348.33±0.25 ^c
	T ₃	1.40±0.01 ^b	0.79±0.01 ^a	0.27±0.02 ^b	2.25±0.02 ^b	12.06±0.00 ^b	12.20±0.02 ^b	328.81±0.01 ^f	354.25±0.71 ^b
	T ₄	1.33±0.02 ^d	0.70±0.02 ^{bc}	0.25±0.01 ^b	2.09±0.01 ^c	5.16±0.01 ^e	9.31±0.04 ^c	339.84±0.27 ^e	273.4±0.41 ^f
	T ₅	1.29±0.01 ^e	0.56±0.01 ^d	0.24±0.01 ^{bc}	1.91±0.01 ^d	3.56±0.00 ^g	6.07±0.01 ^g	356.78±2.71 ^d	143.6±0.20 ^g
15578	NP	1.56±0.02 ^a	0.57±0.01 ^b	0.35±0.01 ^a	2.18±0.03 ^a	12.85±0.03 ^a	12.56±0.01 ^a	292.73±1.10 ^g	336.87±0.09 ^a
	LP	1.13±0.01 ^d	0.46±0.02 ^d	0.21±0.01 ^d	1.64±0.02 ^g	3.56±0.04 ⁱ	3.11±0.03 ^g	387.58±0.17 ^a	159.68±0.55 ^e
	T ₁	1.23±0.01 ^c	0.55±0.02 ^{bc}	0.23±0.01 ^{bcd}	1.82±0.01 ^e	3.93±0.01 ^e	3.76±0.02 ^c	369.71±0.22 ^b	240.73±0.26 ^d
	T ₂	1.30±0.03 ^b	0.61±0.04 ^b	0.24±0.02 ^{bcd}	1.97±0.03 ^c	4.38±0.02 ^c	8.33±0.15 ^f	362.67±0.54 ^c	246.01±0.11 ^e
	T ₃	1.35±0.05 ^b	0.69±0.05 ^a	0.26±0.02 ^b	2.11±0.01 ^b	9.02±0.02 ^b	11.46±0.06 ^b	326.72±0.18 ^f	333.74±0.44 ^b
	T ₄	1.33±0.05 ^b	0.51±0.04 ^{cd}	0.25±0.02 ^{bc}	1.88±0.02 ^d	4.32±0.04 ^d	7.42±0.05 ^d	330.6±0.87 ^e	105.50±1.07 ^f
	T ₅	1.24±0.03 ^c	0.45±0.04 ^d	0.23±0.01 ^{cd}	1.73±0.02 ^f	3.56±0.01 ^f	5.33±0.01 ^e	335.0±0.30 ^d	91.57±0.05 ^g

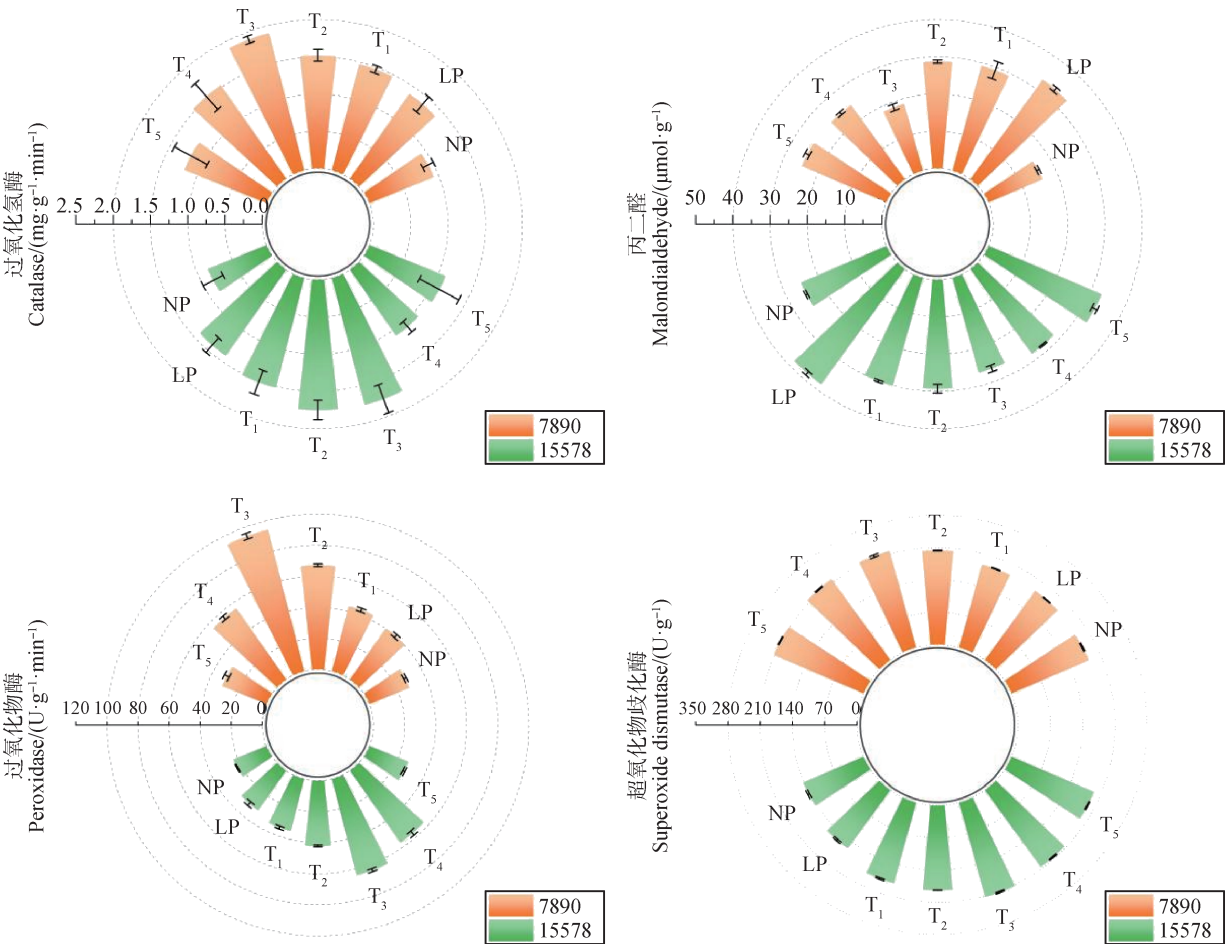


图 1 外源褪黑素对低磷胁迫下苜蓿丙二醛含量及抗氧化酶活性的影响

Fig. 1 Effects of exogenous melatonin on malondialdehyde and antioxidant enzyme activities of alfalfa under low phosphorus stress

注:不同小写字母表示处理间的差异显著($P<0.05$)

Note: Different lowercase letters indicate significant differences between treatments ($P<0.05$)

2.4 外源褪黑素对低磷胁迫下苜蓿渗透调节物质的影响

由图2可知,与NP相比,LP胁迫下‘7890’和‘15578’的Pro含量均显著上升($P<0.05$),增幅分别达28.21%和34.24%,但SS和SP含量上升不显著,增幅仅为5.03%,3.53%和5.52%,7.27%。与LP相比,外源添加不同浓度MT后,‘7890’和

‘15578’的SS,Pro,SP含量均随着MT浓度的升高而增加,均在 $90\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时含量最高,而后呈下降趋势。与LP相比,在 $90\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,‘7890’和‘15578’的SS,SP,Pro分别显著增加51.36%,37.15%,197.14%和38.14%,37.59%,185.88%($P<0.05$)。在 T_1 , T_2 处理下,2份材料的SP含量与LP差异不显著。

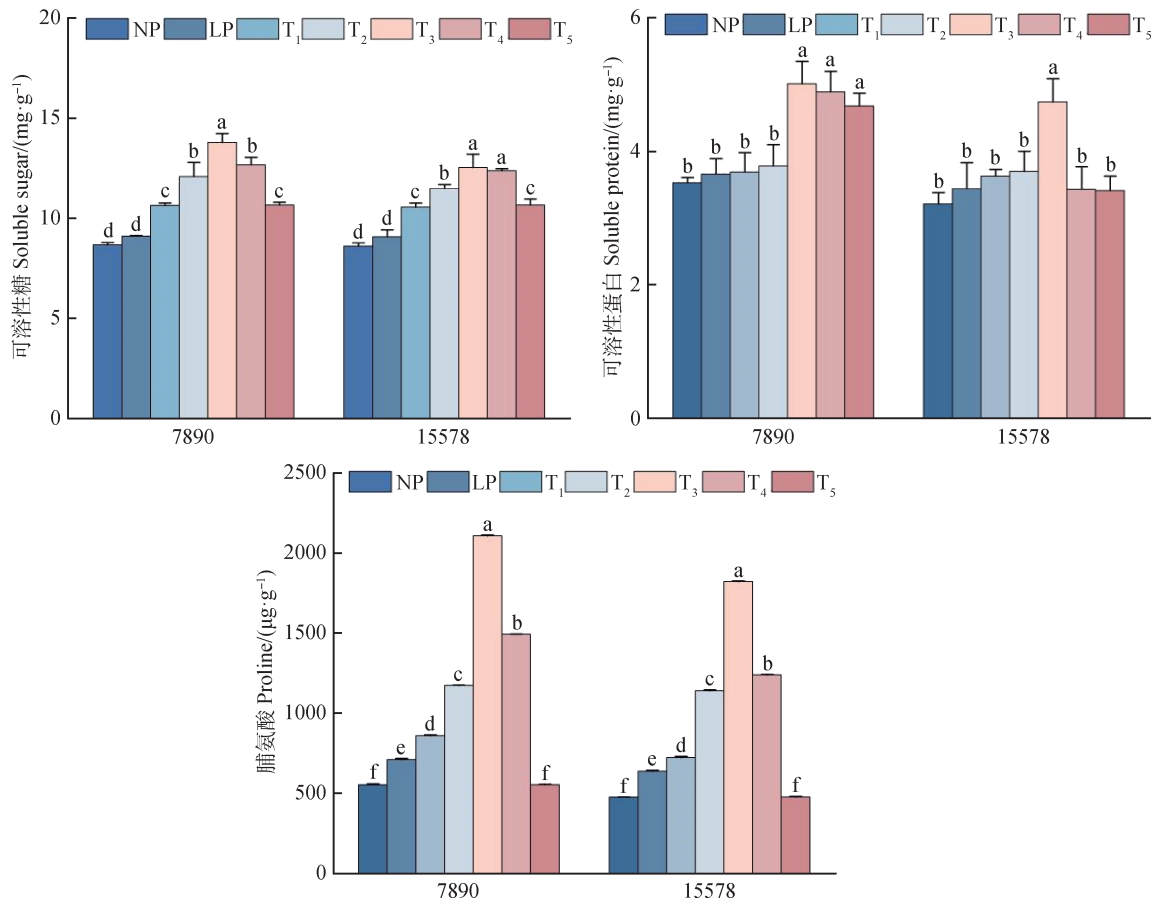


图2 外源褪黑素对低磷胁迫下苜蓿渗透调节物质的影响

Fig. 2 Effect of exogenous melatonin on osmotic adjustment substances of alfalfa under low phosphorus stress

注:不同小写字母表示处理间的差异显著($P<0.05$)

Note: Different lowercase letters indicate significant differences between treatments ($P<0.05$)

2.5 隶属函数综合评价

将21项指标进行隶属函数加权平均,对各处理下苜蓿的生长发育情况进行综合评价,比较不同处理对苜蓿植株耐低磷性影响的大小。由表4可知,各处理对苜蓿植株低磷胁迫下的缓解效果由大到小排序为 $T_3(0.712)>T_2(0.471)>T_4(0.440)>T_1(0.319)>T_5(0.227)>LP(0.148)$ 。 T_3 处理下D值最高,表明该MT浓度最适宜,外源添加 $90\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ MT能够有效缓解低磷胁迫对苜蓿的损伤。

2.6 主成分分析

主成分分析可利用降维提取关键因子。如表5所示,对各项测定指标进行主成分分析,提取特征值大于1的主成分共3个,累计贡献率达到90.896%,能够反映出21项指标的大多数信息。第一主成分贡献率为58.282%,占比最高的因子是Chl;第二主成分贡献率为23.808%,占比最高的特征向量是SS,第三主成分贡献率为8.806%,载荷最高的是 G_s 。因此,这3个指标可以作为MT对低磷胁迫下苜蓿调控的关键指标。

表 4 低磷胁迫下外源褪黑素对苜蓿的耐低磷性综合评价

Table 4 Comprehensive evaluation of low phosphorus tolerance of exogenous melatonin to alfalfa under low phosphorus stress

指标 Index	LP		T ₁		T ₂		T ₃		T ₄		T ₅	
	<i>F_{ij}</i>	<i>W_j</i>	<i>F_{ij}</i>	<i>W_j</i>	<i>F_{ij}</i>	<i>W_j</i>	<i>F_{ij}</i>	<i>W_j</i>	<i>F_{ij}</i>	<i>W_j</i>	<i>F_{ij}</i>	<i>W_j</i>
X ₁	0.199	0.040	0.405	0.043	0.473	0.048	0.677	0.054	0.434	0.047	0.142	0.043
X ₂	0.041	0.046	0.125	0.052	0.427	0.052	0.639	0.058	0.591	0.046	0.341	0.042
X ₃	0.240	0.036	0.495	0.040	0.583	0.045	0.850	0.052	0.767	0.041	0.551	0.035
X ₄	0.001	0.096	0.207	0.080	0.517	0.061	0.913	0.053	0.784	0.046	0.411	0.055
X ₅	0.142	0.048	0.502	0.044	0.587	0.049	0.664	0.057	0.379	0.052	0.063	0.052
X ₆	0.061	0.066	0.240	0.062	0.443	0.058	0.745	0.055	0.292	0.064	0.150	0.061
X ₇	0.024	0.044	0.187	0.048	0.338	0.052	0.422	0.060	0.338	0.049	0.234	0.041
X ₈	0.085	0.040	0.432	0.038	0.621	0.040	0.865	0.043	0.457	0.042	0.170	0.040
X ₉	0.070	0.052	0.172	0.057	0.216	0.064	0.465	0.066	0.385	0.054	0.274	0.047
X ₁₀	0.035	0.043	0.311	0.044	0.506	0.048	0.678	0.054	0.431	0.046	0.225	0.041
X ₁₁	0.050	0.101	0.131	0.101	0.291	0.095	0.706	0.065	0.120	0.111	0.000	0.119
X ₁₂	0.139	0.099	0.219	0.096	0.414	0.071	0.665	0.062	0.400	0.069	0.197	0.081
X ₁₃	0.991	0.025	0.881	0.030	0.732	0.036	0.363	0.048	0.440	0.037	0.550	0.029
X ₁₄	0.421	0.054	0.660	0.046	0.685	0.052	0.842	0.054	0.326	0.091	0.087	0.103
X ₁₅	0.384	0.029	0.557	0.032	0.692	0.035	0.968	0.038	0.924	0.031	0.816	0.026
X ₁₆	0.181	0.022	0.226	0.024	0.446	0.020	0.788	0.017	0.468	0.018	0.084	0.028
X ₁₇	0.524	0.020	0.616	0.022	0.750	0.023	0.932	0.025	0.438	0.028	0.281	0.025
X ₁₈	0.115	0.056	0.381	0.056	0.409	0.063	0.698	0.057	0.527	0.054	0.416	0.047
X ₁₉	0.095	0.029	0.386	0.030	0.615	0.031	0.880	0.034	0.758	0.027	0.397	0.026
X ₂₀	0.188	0.029	0.248	0.033	0.294	0.038	0.924	0.035	0.526	0.033	0.464	0.027
X ₂₁	0.122	0.024	0.193	0.024	0.417	0.019	0.912	0.013	0.545	0.015	0.024	0.032
D 值 D vaule	0.148		0.319		0.471		0.712		0.440		0.227	
排序 Order	6		4		2		1		3		5	

注: X₁为株高; X₂为叶面积; X₃为相对含水量; X₄为根系活力; X₅为地上生物量; X₆为地下生物量; X₇为叶绿素 a; X₈为叶绿素 b; X₉为类胡萝卜素; X₁₀为叶绿素; X₁₁为蒸腾速率; X₁₂为净光合速率; X₁₃为胞间 CO₂ 浓度; X₁₄·叶片气孔导度; X₁₅为超氧化物歧化酶; X₁₆为过氧化物酶; X₁₇为过氧化氢酶; X₁₈为丙二醛; X₁₉为可溶性糖; X₂₀为可溶性蛋白; X₂₁为脯氨酸。下同。 *F_{ij}*为隶属值; *W_j*为权重赋值

Note: X₁ represents plant height; X₂ represents leaf area; X₃ represents relative water content; X₄ represents root activity; X₅ represents aboveground biomass; X₆ represents subsurface biomass; X₇ represents chlorophyll a; X₈ represents chlorophyll b; X₉ represents carotenoid; X₁₀ represents chlorophyll; X₁₁ represents transpiration rate; X₁₂ represents net photosynthetic rate; X₁₃ represents intercellular CO₂ concentration; X₁₄ represents leaf stomatal conductance; X₁₅ represents superoxide dismutase; X₁₆ represents peroxidase; X₁₇ represents catalase; X₁₈ represents malondialdehyde; X₁₉ represents soluble sugar; X₂₀ represents soluble protein; X₂₁ represents proline. The same as below. *F_{ij}* represents subordinate value; *W_j* represents weight assignment

3 讨论

3.1 外源褪黑素处理对低磷胁迫下苜蓿形态特征的影响

植物在苗期对磷元素的缺失尤为敏感,LP胁迫会显著影响其生长发育。苜蓿是喜磷植物,苗期缺磷会明显抑制其生长,表现为植株矮化、叶片呈现暗绿色且缺乏光泽、根系发育不良等^[20]。本研究发现,LP胁迫降低了2份苜蓿材料的株高、叶面积及地上、地下生物量,施加MT后,不同程度缓解了LP胁迫对苜蓿幼苗生长的抑制作用。这是因为MT作为植物生长调节剂,能够促进植株营养器官的发育,协调地上部与地下部之间的生长,调节同化物的分配,有利于有机物的积累,使植物的株高、叶面积、生物量增加^[10]。赵东豪^[21]研究表明,盐胁迫下施加MT可促进苜蓿生长,株高、叶面积等指标随

MT浓度增大呈现先升高再降低趋势。本研究中,外源添加MT后,各形态指标均在T₃处理下增至最大值,T₁和T₂处理下增幅较小,说明90 μmol·L⁻¹ MT能有效改善其形态特征,而低浓度MT作用不明显;在90 μmol·L⁻¹ MT处理下,‘15578’的株高、地上地下生物量及相对含水量的增幅均大于‘7890’,MT对磷敏感材料的效果更明显。

根系活力反映了植物吸收水分和养分的能力,是一项重要的抗逆性生理指标^[20]。相对含水量能够反映植物保水能力的强弱^[22]。本研究中,LP胁迫下,2份苜蓿幼苗的叶片相对含水量、根系活力均下降,添加外源MT后两项指标均有所回升。‘7890’的根系活力增幅大于‘15578’,说明其根系更为发达,活力更高;经MT处理后2份材料的相对含水量均在90 μmol·L⁻¹ MT下达到最大值,此时MT有效促进渗透调节物质的积累,提高其叶片含水量。

表 5 各因子载荷矩阵和累计贡献率
Table 5 Loading matrix of each factor and cumulative contribution rate

指标 Index	主成分 Principal component		
	1	2	3
X ₁	0.932	-0.074	0.291
X ₂	0.926	-0.199	-0.248
X ₃	0.911	-0.025	-0.244
X ₄	0.898	0.028	-0.382
X ₅	0.886	-0.099	0.394
X ₆	0.965	-0.108	0.141
X ₇	0.885	-0.427	-0.074
X ₈	0.806	0.485	0.247
X ₉	0.757	-0.522	-0.260
X ₁₀	0.979	-0.046	0.071
X ₁₁	0.897	-0.240	0.211
X ₁₂	0.953	-0.159	0.089
X ₁₃	-0.700	0.248	0.553
X ₁₄	0.731	0.025	0.651
X ₁₅	0.214	0.794	-0.364
X ₁₆	0.407	0.831	0.060
X ₁₇	0.005	0.866	0.361
X ₁₈	-0.916	-0.002	0.133
X ₁₉	0.260	0.880	-0.277
X ₂₀	0.364	0.751	-0.200
X ₂₁	0.453	0.828	-0.026
特征值 Eigenvalue	12.239	5.000	1.849
贡献率 Proportion/%	58.282	23.808	8.806
累计贡献率	58.282	82.090	90.896
Cumulative contribution rate/%			

3.2 外源褪黑素处理对低磷胁迫下苜蓿叶绿素和光合参数的影响

叶绿素是植物进行光合作用的关键色素,其含量直接影响光合速率,进而反映植物的生长态势和抗逆性强弱^[23]。LP胁迫会破坏叶绿体结构,导致气孔部分关闭和光合速率降低,从而导致叶片内叶绿素含量降低^[24]。本研究中,受LP胁迫影响,供试紫花苜蓿幼苗的Chl,Chl a,Chl b和Car含量均显著降低,说明LP胁迫会加速叶绿素的降解,严重影响苜蓿叶片的光合作用。MT作为抗氧化剂可调节Chl代谢,提高光合效率进而延缓叶片衰老^[25]。本研究中,根灌 90 μmol·L⁻¹ MT可显著增加供试苜蓿的Chl,Chl a,Chl b和Car含量,这说明外源MT通过保护叶绿体的结构完整性,使Chl不易被降解,从而提高光合色素的含量和稳定性。但高浓度(120,150 μmol·L⁻¹)MT会降低供试苜蓿的光合色素含量。

研究表明,MT可通过抑制叶绿素降解、提高光化学效率、改善光合作用系统,进而缓解逆境胁迫对光合作用的抑制^[6]。谭英等^[26]研究表明,盐胁迫下外施MT能提高叶绿素含量和荧光参数,促进光合作用。陈倩云等^[27]研究表明,外源MT处理可以显著提高甜瓜(*Cucumis melo*)幼苗光合色素含量、P_n,T_r,G_s。在本研究中,根施不同浓度的外源MT后,2份材料的T_r,P_n,G_s均随MT浓度的增加呈现先增后减趋势,且‘15578’相较于‘7890’在光合参数上的变化幅度相对较大。这表明MT可以调节气孔的开闭,优化气体交换,提高光合碳同化能力,改善其光合作用适应低磷环境的能力,‘15578’更为敏感。此外,T₅处理下,‘7890’和‘15578’的C_i,G_s均显著低于LP处理,可见适宜浓度的MT能够提高植物光合效率,但高浓度的MT则会加剧苜蓿损伤程度。

3.3 外源褪黑素对低磷胁迫下苜蓿叶片丙二醛和抗氧化酶的影响

LP胁迫会产生大量的ROS,严重破坏细胞膜的稳定性,对植物造成严重损伤。细胞膜的损伤程度与植株体内MDA含量相关^[28],MDA含量越高,植物细胞膜受到的损伤就越严重。本研究中,LP胁迫下‘15578’的MDA含量大于‘7890’,表明磷敏感材料的细胞膜受到的损伤更为严重。SOD,POD,CAT作为酶促系统的主要代谢酶,在清除植物体内超氧阴离子自由基、延缓植株衰老方面发挥重要作用^[29]。本研究中,LP胁迫显著提高了苜蓿叶片的MDA含量,同时SOD,POD,CAT酶活性增强,说明ROS激活了自身的抗氧化酶系统,一定程度上清除了体内的有害自由基,但未能彻底缓解由低磷胁迫引发的氧化损伤,细胞膜结构被破坏,这与张文献等^[30]关于大豆的研究结果一致。本研究中,随着MT浓度升高,苜蓿的POD,SOD,CAT酶活性呈现先上升后下降的趋势,在T₃处理时达最大值,且材料‘15578’的SOD,CAT活性增幅大于‘7890’,说明T₃处理可以有效缓解氧化损伤,减少植物体内ROS的积累,提高苜蓿的酶活性,而高浓度(120,150 μmol·L⁻¹)MT会降低抗氧化酶活性。此外,姜瑛等^[31]发现干旱胁迫下,50 μmol·L⁻¹ MT是缓解玉米(*Zea mays*)抗旱性的最佳浓度,与本研究中MT浓度不一致,这可能是因为不同作物对不同逆境的生理响应机制不同,所以最适浓度有差异。

3.4 外源褪黑素对低磷胁迫下苜蓿叶片渗透调节物质的影响

LP胁迫会影响渗透调节物质的合成与积累,造成细胞结构损伤,改变渗透势。渗透调节是植物应对逆境胁迫而开启的一种重要响应机制,通过调节细胞内的渗透物质来维持细胞膨压,从而保证正常的生理功能^[32]。SS,SP,Pro作为重要的渗透调节物质,不仅在植物遭受非生物胁迫时能维持渗透平衡,而且会参与到植物的代谢与能量调节过程中,以此维持细胞生理稳定^[33]。本研究中,LP胁迫下两份苜蓿材料的Pro含量显著上升,而SS,SP增幅不显著,这表明‘7890’与‘15578’主要依赖提高Pro含量来适应低磷胁迫。周丹等^[34]研究表明,干旱胁迫下施用适宜浓度的外源MT能够促进银杏(*Ginkgo biloba*)幼苗生长,提高抗氧化酶活性,但高浓度(0.5 mmol·L⁻¹)MT会进一步加剧氧化胁迫和渗透胁迫。本研究发现,施用外源MT后,SS,SP,Pro含量随MT浓度增加而呈现先上升后降低的趋势,其中施用90 μmol·L⁻¹ MT处理效果最佳。这与佟莉蓉等^[35]研究干旱胁迫下喷施外源MT后达乌里胡枝子(*Lespedeza davurica*)幼苗的渗透调节物质均提高的结论相一致。这表明紫花苜蓿幼苗处于LP胁迫时叶片渗透调节失衡会引发自身防御机制,施加MT能有效缓解LP胁迫对苜蓿幼苗细胞膜系统的损伤,通过提高渗透调节物质含量来维持细胞膜结构的稳定性,从而减轻LP胁迫对苜蓿幼苗的伤害,提高苜蓿的耐低磷性。

4 结论

低磷胁迫会显著抑制紫花苜蓿幼苗的生长发育,外源添加适宜浓度的MT可有效改善低磷胁迫下苜蓿的形态特征、光合参数和生理特性,提高抗氧化酶活性及渗透调节物质含量,减少MDA的积累,且90 μmol·L⁻¹ MT缓解效果最佳,磷敏感材料‘15578’比耐低磷材料对MT的响应更为显著。主成分分析筛选出Chl,SS和G_s是MT对低磷胁迫下苜蓿调控的关键指标。

参考文献

- [1] 吴世文,南丽丽,陈孝善,等. 不同紫花苜蓿-禾草混播方式对于干草产量及土壤养分的影响[J]. 草地学报, 2025, 33(3): 975-983
- WU S W, NAN L L, CHEN X S, et al. Effects of different

- alfalfa-grass mixed sowing methods on hay yield and soil nutrients[J]. Acta Agrestia Sinica, 2025, 33(3): 975-983
- [2] 王瑞港,徐伟平. 我国苜蓿产业发展特征与趋势分析[J]. 中国农业科技导报, 2021, 23(12): 7-12
- WANG R G, XU W P. Development characteristics and trend of alfalfa industry in China[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2021, 23(12): 7-12
- [3] 蒋鹏,李家庆,郭竞选,等. 低植酸作物遗传改良途径与磷资源高效利用[J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(9): 1636-1647
- JIANG P, LI J Q, GUO J X, et al. Genetic approaches to lower grain phytic acid for high phosphorus use efficiency in crops[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2021, 27(9): 1636-1647
- [4] 赵禹,赵寒森,刘拓,等. 西北地区土地质量地球化学调查进展与主要成果[J]. 西北地质, 2022, 55(3): 140-154
- ZHAO Y, ZHAO H S, LIU T, et al. Progresses and main achievements of geochemical survey of land quality in northwest China[J]. Northwestern Geology, 2022, 55(3): 140-154
- [5] 冶康康,俄胜哲,陈政宇,等. 土壤中磷的存在形态及分级方法研究进展[J]. 中国农学通报, 2023, 39(1): 96-102
- YE G K, E S Z, CHEN Z Y, et al. The forms and classification methods of phosphorus in soil: research progress[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2023, 39(1): 96-102
- [6] AFREEN F, ZOBAYED S M A, KOZAI T. Melatonin in *Glycyrrhiza uralensis*: response of plant roots to spectral quality of light and UV-B radiation[J]. Journal of Pineal Research, 2006, 41(2): 108-115
- [7] 张昭,聂宇婷,崔凯伦,等. 褪黑素调控草类植物生长发育及抗逆性功能研究进展[J]. 草地学报, 2023, 31(9): 2571-2581
- ZHANG Z, NIE Y T, CUI K L, et al. Research progress on the function of melatonin in regulating growth, development and stress resistance in herbaceous species [J]. Acta Agrestia Sinica, 2023, 31(9): 2571-2581
- [8] MANCHESTER L C, COTO-MONTES A, BOGA J A, et al. Melatonin: an ancient molecule that makes oxygen metabolically tolerable[J]. Journal of Pineal Research, 2015, 59(4): 403-419
- [9] 张荣,刘淋茹,付凯霞,等. 干旱胁迫下外源褪黑素对冬小麦小花发育及碳营养代谢的调控[J]. 中国农业科学, 2024, 57(23): 4644-4657
- ZHANG R, LIU L R, FU K X, et al. Regulatory of exogenous melatonin on floret development and carbon nutrient metabolism in winter wheat under drought stress[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2024, 57(23): 4644-4657
- [10] 赵长延,柳延涛,贾秀苹,等. 盐碱胁迫下褪黑素对作物生理机制影响的研究进展[J]. 生物技术通报, 2025, 41(2): 18-29
- ZHAO C Y, LIU Y T, JIA X P, et al. Research progress in the effect of melatonin on crop physiological mechanism under saline-alkali stress[J]. Biotechnology Bulletin, 2025, 41(2): 18-29
- [11] 潘喜鹏,李军宏,张要朋,等. 外源物浸种对苗期遭遇冷害棉

- 花生长发育、产量及品质的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2024, 42(5):147-156
- PAN X P, LI J H, ZHANG Y P, et al. Effects of seed soaking with exogenous substances on the growth, development, yield and quality of cotton exposed to cold damage at the seedling stage[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2024, 42(5):147-156
- [12] 殷佳慧, 宁巍, 李奥, 等. 褪黑素对锯条柳抗氧化系统及叶肉细胞超微结构的影响[J]. 西北林学院学报, 2024, 39(4):1-14
- YIN J H, NING W, LI A, et al. Effects of melatonin on antioxidant system and mesophyll cell ultra-microstructure in *Salix viminalis* under cadmium stress[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2024, 39(4):1-14
- [13] 王慧, 王冬梅, 张泽洲, 等. 外源褪黑素对干旱胁迫下黑麦草和苜蓿抗氧化能力及养分吸收的影响[J]. 应用生态学报, 2022, 33(5):1311-1319
- WANG H, WANG D M, ZHANG Z Z, et al. Effects of exogenous melatonin on antioxidant capacity and nutrient uptake of *Lolium perenne* and *Medicago sativa* under drought stress[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, 33(5):1311-1319
- [14] 王胜永, 孙治国, 田浩, 等. 外源褪黑素对盐胁迫下紫花苜蓿光合作用和生理指标的影响[J]. 黑龙江畜牧兽医, 2023(5):12-16, 21
- WANG S Y, SUN Z G, TIAN H, et al. Effects of exogenous melatonin on photosynthesis and physiological indexes of alfalfa under salt stress[J]. Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine, 2023(5):12-16, 21
- [15] 尉欣荣, 张智伟, 周雨, 等. 褪黑素对低温和干旱胁迫下多年生黑麦草幼苗生长和抗氧化系统的调节作用[J]. 草地学报, 2020, 28(5):1337-1345
- YU X R, ZHANG Z W, ZHOU Y, et al. Effects of melatonin on growth and antioxidant system of perennial ryegrass seedlings under cold and drought stresses[J]. Acta Agrestia Sinica, 2020, 28(5):1337-1345
- [16] 夏静, 南丽丽, 陈洁, 等. 低磷胁迫下不同根型苜蓿形态及生理响应[J]. 中国草地学报, 2023, 45(10):58-67
- XIA J, NAN L L, CHEN J, et al. Morphological and physiological responses of different root types of alfalfa under low phosphorus stress[J]. Chinese Journal of Grassland, 2023, 45(10):58-67
- [17] 邹琦. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 中国农业出版社, 2003:110-174
- ZOU Q. Laboratory guide to plant physiology [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2003:110-174
- [18] 李悦, 师尚礼. 秋水仙素处理对根茎型清水紫花苜蓿抗旱性的影响[J]. 草原与草坪, 2015, 35(4):70-74
- LI Y, SHI S L. The preliminary research of different colchicine concentration treatments on the drought resistance of Rhizomatous *Medicago sativa* cv. Qingshui[J]. Grassland and Turf, 2015, 35(4):70-74
- [19] 江海慧, 汪堃, 陈洁, 等. 低磷胁迫对红豆草新品系幼苗生长及生理特性的影响[J]. 草原与草坪, 2020, 40(6):95-101
- JIANG H H, WANG K, CHEN J, et al. Effect of low-phosphorus stress on growth and physiological characteristics of new sainfoin lines at seedling stage[J]. Grassland and Turf, 2020, 40(6):95-101
- [20] 夏静, 南丽丽, 陈洁, 等. 低磷胁迫对不同根型苜蓿光合及叶绿素荧光特性的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2024, 42(1):169-176
- XIA J, NAN L L, CHEN J, et al. Effects of low phosphorus stress on photosynthetic and chlorophyll fluorescence characteristics of alfalfa with different root types [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2024, 42(1):169-176
- [21] 赵东豪. 外源脱落酸和褪黑素对盐胁迫下紫花苜蓿生理特性的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2023:22-23
- ZHAO D H. Effects of exogenous abscisic acid and melatonin on physiological characteristics of alfalfa under salt stress[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2023:22-23
- [22] PATANÈ C, SCORDIA D, TESTA G, et al. Physiological screening for drought tolerance in Mediterranean long-storage tomato[J]. Plant Science, 2016, 249:25-34
- [23] 南思睿, 罗永忠, 于思敏, 等. 干旱胁迫后复水对新疆大叶苜蓿幼苗光合和叶绿素荧光的影响[J]. 草地学报, 2022, 30(5):1141-1149
- NAN S R, LUO Y Z, YU S M, et al. Effects of rewatering after drought stress on photosynthesis and chlorophyll fluorescence of *Medicago sativa* cv. xingjiangdaye seedlings[J]. Acta Agrestia Sinica, 2022, 30(5):1141-1149
- [24] 王枫, 王玉凤, 许晓萱, 等. 低磷胁迫下玉米幼苗生理响应及相关基因表达研究[J]. 玉米科学, 2021, 29(1):77-84
- WANG F, WANG Y F, XU X X, et al. Physiological response and related genes expression of maize seedlings under low phosphorus stress[J]. Journal of Maize Sciences, 2021, 29(1):77-84
- [25] 徐芳, 周海鹏, 郭早霞, 等. 植物褪黑素及其抗逆性研究[J]. 基因组学与应用生物学, 2013, 32(2):260-266
- XU F, ZHOU H P, GUO Z X, et al. The melatonin and its resistance to stress in plants[J]. Genomics and Applied Biology, 2013, 32(2):260-266
- [26] 谭英, 尹豪. 盐胁迫下根施AMF和褪黑素对紫花苜蓿生长、光合特征以及抗氧化系统的影响[J]. 草业学报, 2024, 33(6):64-75
- TAN Y, YIN H. Effects of root application of an arbuscular mycorrhizal fungus and melatonin on the growth, photosynthetic characteristics, and antioxidant system of *Medicago sativa* under salt stress[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2024, 33(6):64-75
- [27] 陈倩云, 刘海河, 张彦萍, 等. 外源褪黑素对高温胁迫下厚皮甜瓜幼苗光合及抗氧化特性的影响[J]. 河北农业大学学报, 2019, 42(1):33-37
- CHEN Q Y, LIU H H, ZHANG Y P, et al. Effects of exogenous melatonin on photosynthesis and antioxidant activities of muskmelon seedlings under high temperature stress[J]. Journal

- of Hebei Agricultural University, 2019, 42(1): 33-37
- [28] ULLAH A, SUN H, YANG X Y, et al. Drought coping strategies in cotton: increased crop per drop[J]. Plant Biotechnology Journal, 2017, 15(3): 271-284
- [29] 卢静君, 多立安, 刘祥君. 盐胁迫下两草种 SOD 和 POD 及脯氨酸动态研究[J]. 植物研究, 2004, 24(1): 115-119
- LU J J, DUO L A, LIU X J. Changes in SOD and POD activity and free proline content of *Lolium perenne* and *Festuca elata* leaves under different levels of salt stress[J]. Bulletin of Botanical Research, 2004, 24(1): 115-119
- [30] 张文献, 李增强, 胡亚丽, 等. 不同浓度磷胁迫对大豆幼苗生长及根系 DNA 甲基化水平的影响[J]. 中国农业大学学报, 2020, 25(12): 9-18
- ZHANG W X, LI Z Q, HU Y L, et al. Effects of different concentrations of phosphorus stresses on soybean (*Glycine max* L.) seedling growth and DNA methylation in root system[J]. Journal of China Agricultural University, 2020, 25(12): 9-18
- [31] 姜瑛, 张辉红, 魏畅, 等. 外源褪黑素对干旱胁迫下玉米幼苗根系发育及生理生化特性的影响[J]. 草业学报, 2023, 32(9): 143-159
- JIANG Y, ZHANG H H, WEI C, et al. Effects of exogenous melatonin on root development and physiological and biochemical characteristics of maize seedlings under drought stress[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2023, 32(9): 143-159
- [32] 熊海琳, 田小霞, 毛培春, 等. 褪黑素浸种对干旱胁迫下白三叶种子萌发和幼苗生长的影响[J]. 中国草地学报, 2024, 46(5): 23-32
- XIONG H L, TIAN X X, MAO P C, et al. Effects of melatonin soaking on seed germination and seedling growth of *Trifolium repens* under drought stress[J]. Chinese Journal of Grassland, 2024, 46(5): 23-32
- [33] 李平平, 张永清, 张萌, 等. 褪黑素浸种对混合盐碱胁迫下藜麦生长及生理的影响[J]. 江苏农业科学, 2023, 51(4): 77-84
- LI P P, ZHANG Y Q, ZHANG M, et al. Influences of seed soaking with melatonin on growth and physiology of quinoa under mixed salt-alkali stress [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2023, 51(4): 77-84
- [34] 周丹, 李海燕, 王秀军, 等. 外源褪黑素对盐胁迫下银杏幼苗渗透调节和抗氧化能力的影响[J]. 应用生态学报, 2024, 35(2): 431-438
- ZHOU D, LI H Y, WANG X J, et al. Effects of exogenous melatonin on the osmotic regulation and antioxidant capacity of *Ginkgo biloba* seedlings under salt stress [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2024, 35(2): 431-438
- [35] 佟莉蓉, 倪顺刚, 任星远, 等. 褪黑素对干旱胁迫下达乌里胡枝子幼苗生长及叶片水分生理的影响[J]. 草地学报, 2021, 29(8): 1682-1688
- TONG L R, NI S G, REN X Y, et al. Effects of melatonin on seedling growth and leaf water physiology of *Lespedeza davurica* under drought stress [J]. Acta Agrestia Sinica, 2021, 29(8): 1682-1688

(责任编辑 闵芝智)