

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.08.032

引用格式:董博文,王怡然,曲善民.褪黑素对荫蔽环境下燕麦生理生化特性的影响[J].草地学报,2026,34(8):3103–3112
DONG Bo-wen, WANG Yi-ran, QU Shan-min. Effects of Melatonin on Physiological and Biochemical Characteristics of Oats in Shading Environment[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34 (8):3103–3112

褪黑素对荫蔽环境下燕麦生理生化特性的影响

董博文,王怡然,曲善民*

(黑龙江省寒区饲料资源高效利用与营养调控重点实验室,黑龙江八一农垦大学动物科技学院,
黑龙江 大庆 163319)

摘要:本实验针对光伏板间荫蔽寡照的生长逆境抑制燕麦(*Avena sativa* L.)生长的问题,以‘科纳’(‘Kona’)燕麦和植物生长调节剂褪黑素(Melatonin, MT)为材料,通过盆栽试验设正常光照对照(CK-Z)、荫蔽胁迫对照(CK-F)及荫蔽下喷施20, 40, 60, 80, 100 mg·L⁻¹褪黑素(MT)处理,测定出苗后30 d、50 d的生长与生理指标,结合相关性分析和隶属函数评价调控效果。与CK-Z相比,CK-F显著降低燕麦茎粗、干重及抗氧化酶活性,增加株高、鲜重和丙二醛(Malondialdehyde, MDA)含量($P<0.05$);喷施MT可改善其生长生理指标,茎粗与鲜重、干重等显著正相关($P<0.01$),超氧化物歧化酶(Superoxide dismutase, SOD)活性与株高正相关($r=0.075, P<0.05$),MDA与干重负相关;隶属函数表明80 mg·L⁻¹MT处理50 d时综合评价价值($D=0.89$)最高。外源MT可增强抗氧化系统,从而缓解荫蔽胁迫,80 mg·L⁻¹MT处理50 d为最优组合,本研究可为燕麦耐荫性改良及光伏区牧草栽培提供坚实的理论依据。

关键词:燕麦;褪黑素;荫蔽条件;生理生化

中图分类号:S544.9

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)08-3103-10

Effects of Melatonin on Physiological and Biochemical Characteristics of Oats in Shading Environment

DONG Bo-wen, WANG Yi-ran, QU Shan-min*

(Key Laboratory of Efficient Utilization of Feed Resources and Nutrition Regulation in Cold Regions of Heilongjiang Province, College of Animal Science and Technology, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing, Heilongjiang Province 163319, China)

Abstract: This experiment aimed to address the problem of growth inhibition of *Avena sativa* L. under shading and low light conditions between photovoltaic panels. Using ‘Kona’ oats and plant regulator melatonin (MT) as materials, treatments, including a normal light control (CK-Z), a shading stress control (CK-F), and treatments with 20, 40, 60, 80, and 100 mg·L⁻¹ melatonin (MT) sprayed under shade a pot experiment were conducted. The growth and physiological indicators at 30 and 50 days after emergence were measured, and the regulatory effect was evaluated by correlation analysis and membership function. Compared with CK-Z, CK-F significantly reduced oat stem thickness, dry weight, and antioxidant enzyme activity, while increasing plant height, fresh weight, and MDA (Malondialdehyde) content ($P<0.05$); Spraying MT could improve its growth physiological indicators, with a significant positive correlation between stem thickness and fresh weight, dry weight, etc. ($P<0.01$), a positive correlation between SOD (Superoxide dismutase) and plant height ($r=0.075, P<0.05$), and a negative correlation between MDA and dry weight; The membership function indicated that the comprehensive evaluation value ($D=0.89$) was the highest when treated with 80 mg·L⁻¹ MT for 50 days. Exogenous MT enhanced the antioxidant system and alleviated shade stress. The optimal combination of 80 mg·L⁻¹ MT treatment for 50 days provided a solid theoretical basis for improving oat shade tolerance

收稿日期:2025-07-24;修回日期:2025-10-24

基金项目:大庆市新能源领域“揭榜挂帅”科技攻关项目(2021BD05);黑龙江省科技厅省院合作项目(YS16B12);黑龙江八一农垦大学学成引进人才科研启动计划项目(XDB202104)资助

作者简介:董博文(1999-),男,汉族,黑龙江大庆人,硕士研究生,主要从事调节剂对牧草增产机理研究,E-mail:956276423@qq.com;

*通信作者 Author for correspondence, E-mail:64311742@qq.com

and grass cultivation in photovoltaic areas.

Key words: Oats; Melatonin; Shade conditions; Physiological and biochemical

燕麦(*Avena sativa* L.)作为重要粮食与饲料作物,在我国经济发展中具有不可替代的作用^[1]。研究表明,燕麦为一年生禾本科燕麦属草本植物,是粮饲兼用型作物^[1]。其叶鞘松弛,叶片扁平微粗糙,圆锥花序开展呈金字塔形^[2],主产区在北半球温带地区,包括中国、俄罗斯、加拿大、美国及德国等^[3]。燕麦在我国种植历史悠久,具有抗逆性强、营养价值高的特点,还具备降血脂、降糖、调节血压、抗氧化、抗炎症、调节肠道菌群、增强免疫力、抑制肿瘤增殖等多种功效^[4]。同时燕麦在我国的市场需求量逐年增加,衍生制品的开发也形成化妆品、药品等多元化产业^[5-6]。

近年来草原等区域布局的光伏设施占用了大量土地,导致植物长期处于光伏组件造成的荫蔽环境中,从而引发植株生长逆境^[7]。遮荫作为一种典型的光照不足型逆境,不仅出现于光伏场区,也常见于城市楼宇间隙、林地边缘等场所。此外,果园套种、玉米(*Zea mays* L.)/燕麦套作以及高密度种植等农作模式,也会使燕麦长期处于弱光条件下,导致植株徒长、茎秆纤细、叶片薄而黄化、光合效率下降、根系发育不良,进而引发严重倒伏与产量大幅降低。长期荫蔽环境会降低植物的光合效率与抗病能力,最终对其产量和品质造成不利影响。

为缓解此类生长逆境导致的减产问题,植物生长调节剂(Plant growth regulators, PGRs)在农业生产中广泛应用。这类人工合成的物质具有植物激

素活性^[8],在低浓度下即可对植物生长实现广泛、快速、高效的调控,且因其残留低而符合农业现代化的发展需求^[9]。褪黑素(Melatonin, MT)是植物生长调节剂之一,它广泛存在于动植物体内,能够促进根茎生长、加厚叶片、加深叶色,并增强植物耐旱涝、抗倒伏、抗盐碱的能力^[10]。作为外源抗氧化剂,MT可通过调节酶活性与基因表达来增强植物对逆境的耐受性并激发防御反应^[11-13]。徐令旗等^[14]研究也表明,植物生长调节剂能够提升低温条件下水稻的光合作用与干物质积累,维持水稻生物量稳定。

本研究通过模拟荫蔽生长环境,探讨荫蔽对燕麦生长的影响,并通过叶面喷施MT筛选其适宜浓度,以提高燕麦在弱光条件下的产量,从而为荫蔽环境下植物生产提供理论依据与技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 供试燕麦 黑龙江八一农垦大学草业科学实验室提供的燕麦,种子类型为‘科纳’(‘Kona’),收获时间为2022年9月,种子质量达到国家一级标准,发芽率约为97.3%。

1.1.2 供试植物生长调节剂及土壤指标 MT由麦克林公司生产,货号为M813985,有效成分98%,整体呈白色粉末状,溶于有机溶剂。供试土壤及土壤地理位置如表1所示。

表1 供试土壤及土壤地理位置
Table 1 Test soil and soil geographical position

土壤基础背景 Soil background	采样地点 Sampling site	黑龙江省大庆市大同区国家光伏电站光伏板下大田 Datian under the photovoltaic panels of the National Photovoltaic Power Station in Datong District, Daqing City, Heilongjiang Province	
	地理位置 Geographical location	46°55'N, 125°15'E	
	土壤类型 Soil type	草甸黑钙土 Meadow chernozem	
土壤指标 Soil indicators	全氮 Total nitrogen	1.903 g·kg ⁻¹	
	全磷 Total phosphorus	0.656 g·kg ⁻¹	
	全钾 Total potassium	19.2 g·kg ⁻¹	
	有效磷 Available phosphorus	25.2 g·kg ⁻¹	
	有效钾 Available potassium	25 g·kg ⁻¹	
	pH 值 pH value	7.86	

1.2 试验方法

1.2.1 试验设计 试验于黑龙江八一农垦大学盆栽场进行。选取籽粒饱满、表面完好的燕麦种子,

将40粒燕麦种子均匀播种于花盆中(盆内尺寸为长×宽×高=45 cm×35 cm×13 cm,土重13.5 kg),在楼宇背阴面打造与光伏场区光照一致的荫

蔽环境,采用全光谱LED灯(30~50 W, 30 000~50 000 Lux)补光,每天8 h光照,若背阴面自身有2 h光照,则补光6 h并隐藏于遮阳棚、藤蔓中,配合智能定时补足时长;盆栽用贴近环境的容器,借藤本植物、角落遮挡融入景观;线路藏于暗处,用太阳能供电,避开遮挡过厚,实现光照匹配与荫蔽。待种子萌发后生长至7 d时每盆定苗20株,在一片真叶的幼苗期,采用完全随机试验设计,分别对燕麦叶面喷施不同浓度MT(浓度设置为20, 40, 60, 80, 100 mg·L⁻¹),每周一次共四次,并设置对照组(CK)喷施等量蒸馏水(正常光照下CK-Z, 荫蔽胁迫下CK-F),共7个处理,每个处理重复三次,共计21个处理。待生长至30 d和50 d时进行生长生理指标测定。

1.2.2 测定指标及方法 生长指标:在每个处理中选取长势基本一致的燕麦植株10株进行测定。每个处理选取长势基本一致的燕麦植株10株进行测定。使用卷尺、游标卡尺、天平等工具,测定植株的株高、茎粗、倒二叶的叶长与叶宽、节间数、节间长、干重和鲜重。每个指标重复测定3次,取平均值。

生理指标:采用愈创木酚法测定过氧化物酶(Peroxidase, POD)活性;采用氮蓝四唑法测定超氧化物歧化酶(Superoxide dismutase, SOD)活性;采用紫外吸收法测定过氧化氢酶(Catalase, CAT)活性;采用硫代巴比妥酸法测定丙二醛(Malondialdehyde, MDA)含量;采用酸性茚三酮比色法测定脯氨酸(Proline, Pro)含量;采用紫外吸收法测定抗坏血酸过氧化物酶(Ascorbate peroxidase, APX)活性^[15]。

1.3 数据分析

试验数据采用Excel 2019软件进行统计整理,利用SPSS 26.0进行数据处理及单因素方差分析,使用Duncan法进行多重比较后利用Origin软件进行图表绘制。

隶属函数值(W_j)、隶属函数值 $U(X_{ja})$ 和生产性能及生理指标综合评价 D_a 的计算公式如下:

$$W_j = P_j \sum_{i=1}^n P_i$$

$$U(X_{ja}) = (X_{ja} - X_{j\min}) / (X_{j\max} - X_{j\min})$$

$$D_a = \sum_{j=1}^n [(X_{ja}) \times W_j]$$

式中: D_a 表示第 a 个浓度在盐碱条件处理下燕麦的生产性能及生理指标综合评价。该值越高,代表该MT浓度处理下燕麦的整体生长与生理表现越优。 P_i 为第 j 个主成分的贡献率;权重系数 W_j 表示第 j 个主成分的权重,代表其在综合评价中的重要程度; X_{ja} 为第 a 个浓度剂的第 j 个主成分值; $X_{j\min}$ 和 $X_{j\max}$ 分别为第 j 个主成分的最小值和最大值; $U(X_{ja})$ 为主成分值转换的隶属函数值。

2 结果与分析

2.1 喷施MT对荫蔽燕麦生长指标的影响

2.1.1 喷施MT对荫蔽燕麦株高、茎粗、节间数及节间长度的影响 不同浓度MT处理对荫蔽条件下燕麦株高、茎粗、节间数和节间长度的影响如图1所示。在株高方面(图A),与正常光照对照组(CK-Z)相比,荫蔽胁迫对照组(CK-F)在喷施100 mg·L⁻¹ MT后30 d时与CK-Z有显著差异($P < 0.05$);在喷施80 mg·L⁻¹ MT后50 d时与CK-Z有显著差异($P < 0.05$)且达到最大值。在茎粗方面(图B),荫蔽胁迫对照组(CK-F)的茎粗在30 d和50 d时均显著低于正常光照对照组(CK-Z)($P < 0.05$)。其中,浓度为80 mg·L⁻¹的处理组效果最为显著,其茎粗显著高于其他所有MT处理组及CK-F组($P < 0.05$)。在节间长度方面(图C),荫蔽胁迫对照组(CK-F)的节间长度显著高于正常光照对照组(CK-Z)($P < 0.05$)。叶面喷施MT后,20 mg·L⁻¹与40 mg·L⁻¹处理组的节间长度与CK-F组相比无显著差异。80 mg·L⁻¹处理组节间长度显著高于其他处理组($P < 0.05$)。在节间数方面(图D),60 mg·L⁻¹处理组节间数显著低于其他处理组,其他不同浓度MT处理与荫蔽胁迫对照组(CK-F)相比,对燕麦的节间数均未产生显著影响。

2.1.1 喷施MT对荫蔽燕麦干重和鲜重的影响 由图2可知,CK-F组在30 d和50 d时干重显著低于CK-Z组($P < 0.05$),鲜重显著高于CK-Z组($P < 0.05$)。在叶喷不同浓度的MT后,干重和鲜重随着MT浓度升高而缓慢增长,并在80 mg·L⁻¹达到最大值,显著高于其他处理组($P < 0.05$)。

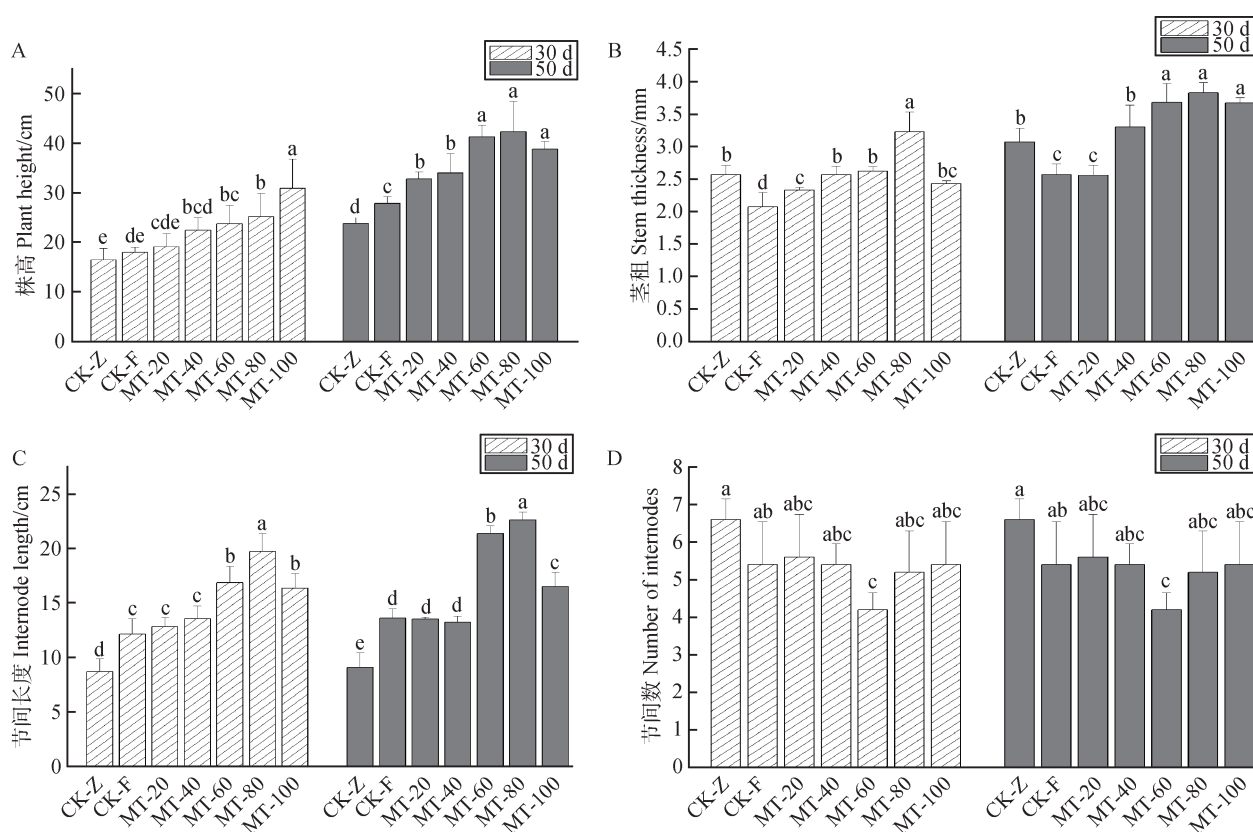


图1 喷施MT对荫蔽燕麦茎高(A)、茎粗(B)、节间数(C)及节间长度(D)的影响

Fig. 1 Effects of MT spraying on shaded oat plants' stem height (A), stem diameter (B), internode count (C), and internode length (D)

注:CK-Z表示正常光照+喷施蒸馏水;CK-F表示遮荫处理+喷施蒸馏水;不同小写字母表示同一时间点不同处理间在0.05水平差异显著

Note: CK-Z stands for normal light+spraying distilled water; CK-F stands for shading treatment+spraying distilled water; different lowercase letters indicate the difference between different treatments at the same time point at the 0.05 level

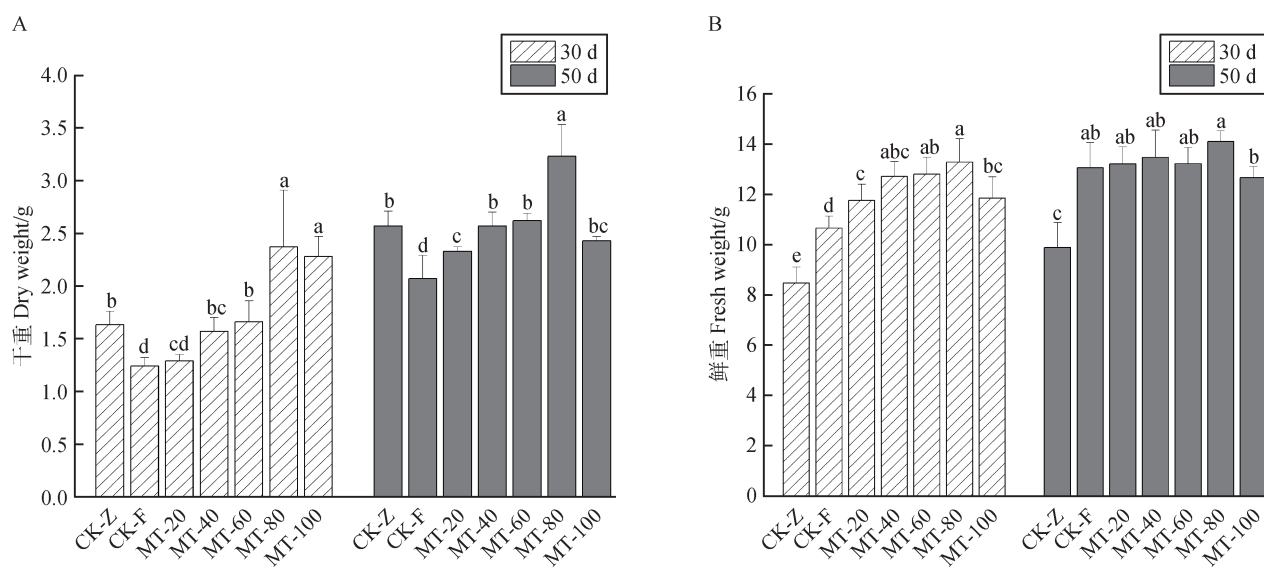


图2 喷施MT对荫蔽燕麦干重(A)和鲜重(B)的影响

Fig. 2 Effects of spraying MT on dry weight (A) and fresh weight of shaded oats (B)

2.2 喷施MT对荫蔽燕麦生理指标的影响

2.2.1 喷施MT对荫蔽燕麦抗氧化酶活性的影响

不同浓度MT处理对遮荫下燕麦叶片SOD活

性及MDA含量的影响如图3所示。在SOD活性方面(图A),在处理30 d时,正常光照对照组(CK-Z)的SOD活性显著高于遮荫对照组(CK-F)($P < 0.05$);

至 50 d 时,两者之间无显著差异。在 POD 活性方面(图 B),在处理 30 d 时,与 CK-F 相比,喷施 MT 后 POD 活性呈缓慢上升趋势,并在 MT-60 处理时达到最高;至 50 d 时,CK-Z 的 POD 活性显著低于 CK-F ($P < 0.05$)。在 CAT 活性方面(图 C),在处理 30 d

时,CK-Z 的 CAT 活性显著低于 CK-F ($P < 0.05$);至 50 d 时,喷施 MT 处理组的 CAT 活性在浓度为 40 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时达到最大值,且显著高于 CK-F ($P < 0.05$)。在 MDA 含量方面(图 D),在处理 30 d 时,CK-Z 的 MDA 含量显著低于 CK-F ($P < 0.05$)。

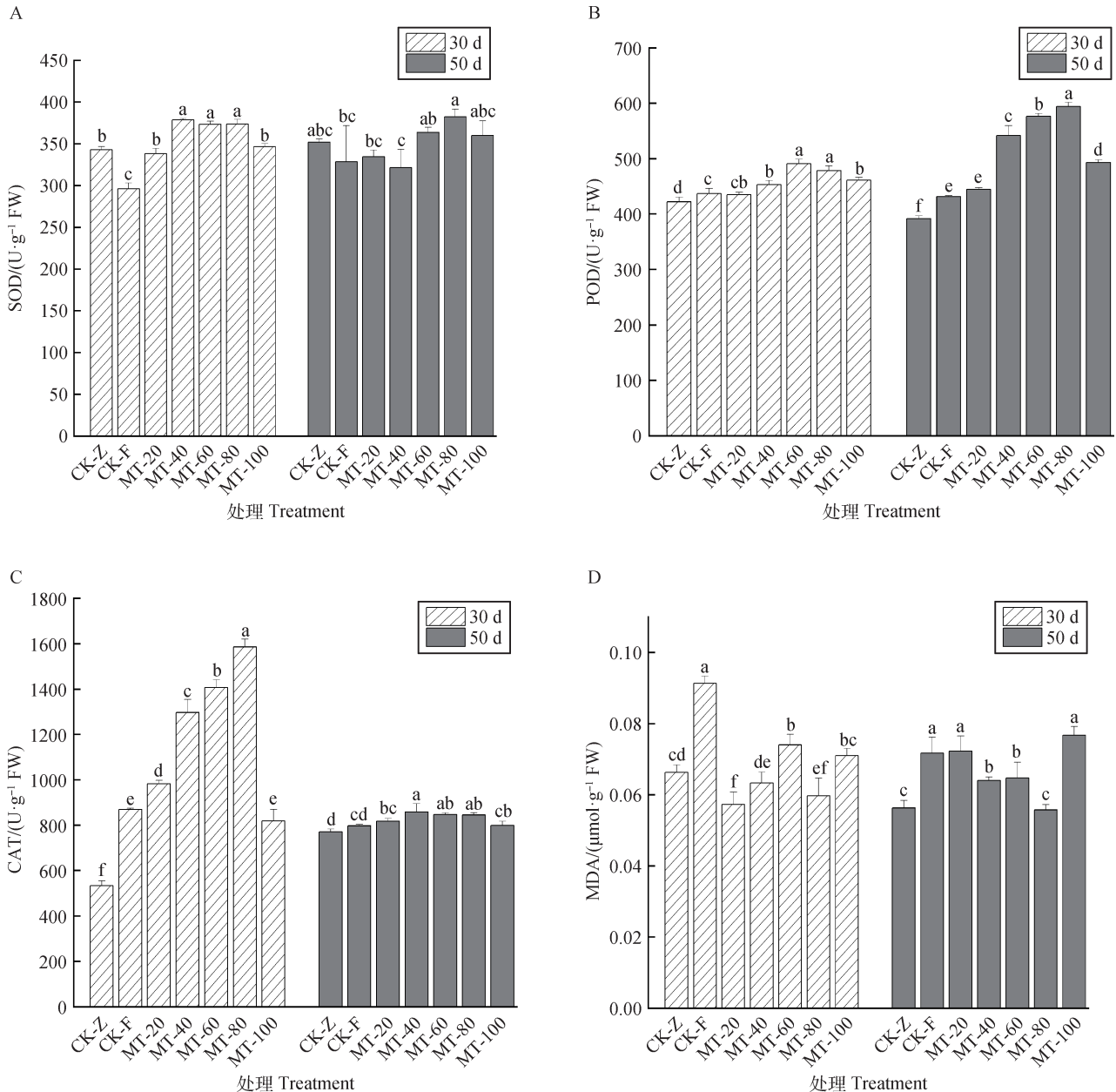


图 3 喷施 MT 对荫蔽燕麦 SOD(A), POD(B), CAT(C) 活性及 MDA 含量(D) 的影响

Fig. 3 Effects of spraying MT on SOD(A), POD(B), CAT(C) and MDA(D) of shaded oats

2.2.1 喷施 MT 对荫蔽燕麦叶片 Pro 含量与 APX 活性的影响 不同浓度 MT 处理对遮荫条件下燕麦叶片 Pro 含量与 APX 活性的影响如图 4 所示。在 APX 含量方面(图 A),在处理 30 d 时,叶面喷施 MT 后 APX 含量呈现缓慢上升趋势,并在 MT-100 处理时达到最大值。至 50 d 时,正常光照对照

组(CK-Z)的 APX 含量显著低于遮荫对照组(CK-F) ($P < 0.05$)。在 Pro 活性方面(图 B),喷施 MT 后,Pro 含量随浓度增加呈先升高后下降的趋势,同样在 MT-80 处理时达到峰值。在处理 30 d 时,正常光照对照组(CK-Z)的 Pro 活性显著低于遮荫对照组(CK-F) ($P < 0.05$)。至 50 d 时,CK-Z 的

APX 活性仍显著低于 CK-F ($P<0.05$)。叶面喷施 MT 能进一步提高 Pro 活性,在浓度为 80

$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时活性达到最大,且显著高于 CK-F ($P<0.05$)。

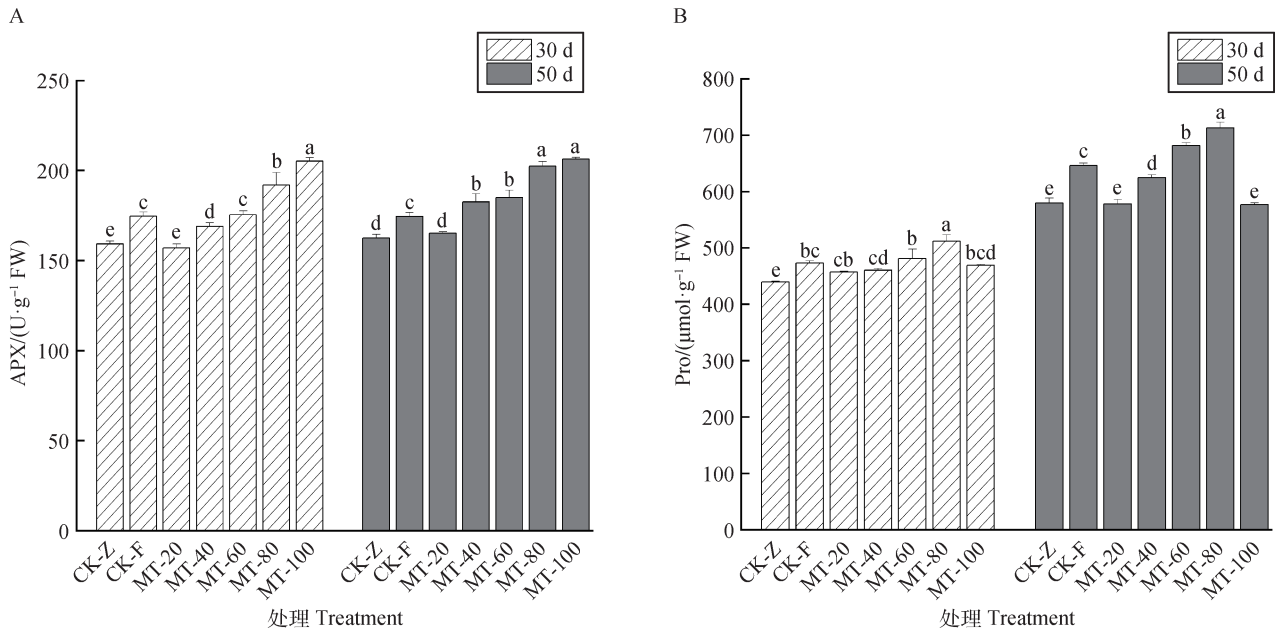


图 4 喷施 MT 对荫蔽燕麦 Pro(A),APX(B)的影响

Fig. 4 Effects of MT on Pro(A) and APX (B) of shaded oats

2.3 喷施 MT 对荫蔽燕麦各项指标相关性分析

为探究不同浓度 MT 处理下燕麦各测量指标间的内在关系,对各指标进行了相关性分析。结果

(表 2)显示,不同指标间的相关性存在显著差异,反映了植物在生长发育过程中形态与生理指标的复杂交互作用。

表 2 测试指标之间的相关性系数矩阵

Table 2 The correlation coefficient matrix between the test indicators

	Ph	St	SDW	SDW	NI	IL	SOD	MDA	POD	Pro	CAT	APX
Ph	1	**	*	**	*	**	*		**	**		*
St	0.040	1	***	***	***	***	***	**	***	***		***
SFW	0.066	0.003	1	**	***	***	***	***	***	**		***
SDW	0.017	0.008	0.022	1	**	**	**	**	***	***		**
NI	0.082	0.009	0.001	0.033	1	***	***	***	**	**	*	***
IL	0.048	0.000	0.002	0.012	0.006	1	***	**	***	***		***
SOD	0.075	0.007	0.001	0.030	0.000	0.004	1	***	***	**	*	***
MDA	0.106	0.016	0.005	0.045	0.002	0.012	0.004	1	**	**	*	***
POD	0.032	0.001	0.006	0.007	0.012	0.002	0.009	0.022	1	***		***
Pro	0.016	0.006	0.018	0.002	0.027	0.009	0.023	0.041	0.003	1		**
CAT	0.318	0.144	0.104	0.213	0.084	0.130	0.091	0.065	0.157	0.202	1	
APX	0.068	0.004	0.000	0.024	0.001	0.002	0.000	0.005	0.007	0.019	0.100	1

注:***,**,*分别代表 1%,5%,10% 的显著性水平,Ph 为株高,St 为茎粗,SDW 为干重,SFW 为鲜重,NI 为节间数,IL 为节间长度,SOD 为超氧化物歧化酶,MDA 为丙二醛,POD 为过氧化物酶,Pro 为脯氨酸,CAT 为过氧化氢酶,APX 为抗坏血酸过氧化物酶

Note: ***, **, and * represent significance levels at 1%, 5%, and 10%, respectively. Ph denotes plant height, St represents stem thickness, SDW indicates shoot dry weight, SFW represents shoot fresh weight, NI stands for internode number, IL represents internode length, SOD is superoxide dismutase, MDA is malondialdehyde, POD is peroxidase, Pro is proline, CAT is catalase, and APX is ascorbate peroxidase

在生长指标方面,株高(Ph)仅与超氧化物歧化酶(SOD)活性呈显著正相关($r=0.075,P<0.05$),而与茎粗(SD)、干重(DW)等多数指标无显著相关,表明株高主要受遗传背景及环境因子的综合调

控,其线性变化规律并未在多数指标中明显体现。茎粗(SD)则与多个生长及生理指标呈显著正相关,例如与干重(DW)、鲜重(FW)、节间长度(IL)、SOD 活性的相关系数分别为 $r=0.666,r=0.071$,

$r=0.082$, $r=0.071$ ($P<0.1$)。在生理指标方面, SOD 活性除与株高正相关外, 还与茎粗等指标相关联, 表明其可能对植株发育具有正向调节作用。丙二醛(MDA)含量与干重等生长指标也表现出一定的关联性($P<0.1$), 暗示膜脂过氧化程度与生长进程之间存在内在联系。此外, 部分指标组间未呈现显著线性相关, 可能受样本量、非线性关系或其他因素影响。

2.4 喷施 MT 对荫蔽燕麦各项指标隶属函数分析

为探究不同浓度 MT 处理下燕麦各测量指标间的内在关系, 对各指标进行了隶属函数分析。结果(表 3)显示, 不同指标间的相关性存在显著差异,

反映了植物在生长发育过程中形态与生理指标的复杂交互作用。燕麦对 MT 各浓度的处理涉及 15 项生长生理指标, 但是单一指标无法全面反映 MT 的综合调控效果。因此, 本研究采用隶属函数法量化指标表现, 隶属函数值越大, 代表 MT 对该指标的调控效应越优; 同时借助综合评价 D 值整合多指标信息。由表 3 可知, 本研究测定 30 d 和 50 d 两个时期对照组 CK-Z 和 CK-F 与 MT-20, MT-40, MT-60, MT-80, MT-10 处理组下指标隶属函数值, 并依据 D 值开展综合排序。30 d 时 MT-80 和 MT-100 展现明显的生理调控优势。50 d 时整体展现调控优势, 其中 MT-80 多项指标隶属函数值趋近 1, D 值达 0.89, 效果最佳。

表 3 MT 对荫蔽燕麦各项指标隶属函数分析

Table 3 Analysis of the membership function of MT for the indexes of shaded oats

处理天数 Processing days	编号 Number	各项指标隶属函数值 Membership function value of each indicator												D 值 D values	排序 Sort
		Ph	St	SDW	SDW	NI	IL	SOD	MDA	POD	Pro	CAT	APX		
30 d	CK-Z	0.00	0.28	0.00	0.20	1.00	0.00	0.54	0.70	0.15	0.00	0.00	0.05	0.24	13
	CK-F	0.06	0.00	0.39	0.00	0.50	0.25	0.00	0.00	0.22	0.12	0.32	0.36	0.18	14
	MT-20	0.10	0.15	0.58	0.02	0.58	0.30	0.49	0.95	0.21	0.06	0.43	0.00	0.32	12
	MT-40	0.23	0.28	0.75	0.17	0.50	0.35	0.96	0.79	0.30	0.08	0.73	0.24	0.45	8
	MT-60	0.28	0.31	0.77	0.21	0.00	0.59	0.90	0.49	0.49	0.15	0.83	0.37	0.45	7
	MT-80	0.34	0.66	0.85	0.57	0.42	0.79	0.90	0.89	0.43	0.26	1.00	0.71	0.65	3
	MT-100	0.56	0.20	0.60	0.52	0.50	0.55	0.58	0.57	0.34	0.11	0.27	0.98	0.48	6
50 d	CK-Z	0.28	0.57	0.25	0.67	1.00	0.03	0.65	0.98	0.00	0.51	0.23	0.11	0.44	11
	CK-F	0.44	0.29	0.81	0.42	0.50	0.35	0.38	0.55	0.20	0.75	0.25	0.35	0.44	10
	MT-20	0.63	0.28	0.84	0.55	0.58	0.35	0.44	0.53	0.26	0.51	0.27	0.17	0.45	9
	MT-40	0.68	0.70	0.89	0.67	0.50	0.33	0.29	0.77	0.74	0.68	0.31	0.52	0.59	5
	MT-60	0.96	0.91	0.84	0.69	0.00	0.91	0.78	0.75	0.91	0.88	0.30	0.57	0.71	2
	MT-80	1.00	1.00	1.00	1.00	0.42	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.30	0.92	0.89	1
	MT-100	0.86	0.90	0.74	0.60	0.50	0.56	0.74	0.41	0.50	0.50	0.25	1.00	0.63	4

3 讨论

寡照荫蔽通过干扰光合作用与生长进程, 显著影响植物生长进程与生物量积累^[16]。荫蔽条件下, 燕麦为争夺更多光照资源, 会启动“避荫反应”, 通过快速伸长茎秆实现株高显著增加。这一过程受植物体内光信号传导及赤霉素等激素调控, 燕麦会优先分配光合产物用于茎秆纵向生长, 以突破遮荫环境。但需注意, 株高的增加多为“徒长型”增长, 茎秆木质化程度低, 抗倒伏能力较弱, 有限的产物会优先供给株高增长, 导致分配给茎秆横向加粗的资源不足, 进而使茎秆显著变细。同时, 低光照抑制茎秆细胞壁木质素和纤维素的合成, 使茎秆组织疏松, 直径明显小于正常光照条件下的燕麦, 这也是其抗逆性(如抗倒伏、抗病虫害)下降的重要原

因^[17]。长期荫蔽会因光合产物供应不足, 抑制燕麦的营养生长进程, 导致部分节间分化受阻, 节间数减少, 且节间发育一致性下降, 出现粗细不均的现象。同时燕麦的节间会表现出明显的“伸长效应”, 促进节间细胞的纵向分裂与伸长, 使单个节间长度显著增加, 进一步加剧了茎秆细弱的问题^[18]。鲜重受植株含水量和干物质积累的共同影响: 荫蔽条件下燕麦蒸腾作用减弱, 植株含水量相对较高; 光合效率下降导致干物质合成减少^[19], 限制了鲜重的增长^[20-21]。荫蔽环境会降低燕麦叶绿素含量和光合速率, 抑制光合作用的光反应和暗反应过程, 导致碳水化合物等有机物质的合成总量减少; 同时, 燕麦为适应荫蔽而进行的徒长(株高增加、茎秆细弱)会消耗更多光合产物, 进一步加剧干物质积累的匮乏。荫蔽对燕麦生长指标的影响核心是优先保障

株高和节间长的增长以应对弱光,却导致茎粗、干重等体现生长质量的指标下降,最终影响燕麦的抗逆性和产量潜力^[22-24]。

本研究围绕荫蔽胁迫对燕麦生理指标的影响展开,鉴于光环境对植物生长发育的关键作用,探究该影响对揭示植物荫蔽适应机制、提升燕麦产量品质具有重要意义^[25]。结果显示,荫蔽胁迫30 d和50 d的燕麦,其SOD, POD, CAT, APX活性及Pro含量较对照显著升高,这与张渝洁^[26]、张亚楠等^[27]的研究一致。同时胡世莲等研究发现^[28],青花菜幼苗在外源喷施MT后SOD, POD活性随时间推移显著上升。谭英等^[29]研究发现100 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ MT显著提高紫花苜蓿叶绿素含量及上述抗氧化酶活性,均与本研究结果一致。植物在进化中形成了光环境适应机制,可通过感知、传递和整合光信号调节生长发育,面临遮荫时能借光受体(如感知红/远红光比值变化的光敏色素)识别信号并启动避荫反应,其耐荫性作为复合性状,会从形态(如叶片变大变薄)和生理生化(如叶绿素a/b值变小、降低能量消耗)层面调整以适应弱光^[29-33]。此外,植物激素在避荫反应中至关重要,生长素、赤霉素等内源激素参与遮荫应答时,会促使抗氧化酶活性提升。本研究中喷施MT的燕麦随荫蔽时间增长抗氧化酶活性上升,与冯丽燕等^[33]的研究一致,说明MT等激素可能通过调节激素平衡、激活信号通路诱导抗氧化酶活性增强,与其他激素共同构成植物适应荫蔽环境的生理调节网络^[34]。

本研究采用相关性分析与隶属函数综合评价法,深入剖析了荫蔽胁迫下褪黑素(MT)处理对燕麦生长生理指标的交互作用及调控机制。结果显示,燕麦茎粗(St)与地上部鲜重(SFW)、地上部干重(SDW)、节间数(NI)及超氧化物歧化酶(SOD)活性等指标呈显著正相关($P<0.1$),这表明燕麦茎秆发育与生物量积累、抗氧化防御系统之间存在协同提升的效应;而株高(Ph)仅与SOD活性呈显著正相关(相关系数 $r=0.075$, $P<0.05$),说明在荫蔽环境中,燕麦的“避荫反应”,与生物量积累有线性关联。从生理指标层面来看,SOD可通过清除活性氧减轻氧化损伤,进而促进株高增长;而丙二醛(MDA,脂质过氧化标志物)与地上部干重(SDW)的关联则会抑制干物质合成,这一结果进一步印证了MT处理可通过提高抗氧化酶活性、缓解细胞膜损伤,从而促进燕麦生长的作用机制。

4 结论

本研究结果表明:荫蔽胁迫下,外源喷施植物调节剂褪黑素可提高燕麦的茎粗、生物量,同时增强燕麦的抗氧化系统,从而缓解荫蔽胁迫。其中,于燕麦出苗后每隔7天喷施一次80 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的褪黑素溶液效果最佳,该结果可为燕麦耐荫性改良及光伏区牧草栽培管理提供参考。

参考文献

- [1] 孙怀恩,谭旭良,张俊超,等. 施氮量和植物生长调节剂对青引2号燕麦抗倒能力及产量品质的影响[J]. 草学,2022(3): 24-30
SUN H E, TAN X L, ZHANG J C, et al. Effects of nitrogen application rate and plant growth regulator on lodging resistance, yield and quality of Qingyin No. 2 oats[J]. Journal of Grassland and Forage Science, 2022(3): 24-30
- [2] 车玉芬. 大通县春麦田主要草害的发生及防除[J]. 黑龙江农业科学, 2011(7): 64-66
CHE Y F. Occurrence and control of main weeds in spring wheat field of Datong County[J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2011(7): 64-66
- [3] 路长喜,周素梅,王岸娜. 燕麦的营养与加工[J]. 粮油加工, 2008(1): 89-92
LU C X, ZHOU S M, WANG A N. Nutrition and processing of oats[J]. Cereals and Oils Processing, 2008(1): 89-92
- [4] 冯莉. 冲调方便杂粮产品研制及品质评价[D]. 南京:南京农业大学, 2013: 79-92
FENG L. Instant reconstituted food made from coarse grains and its quality evaluation[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2013: 79-92
- [5] 李春花,梅春光. 燕麦的营养成分及营养保健价值的研究进展[J]. 现代农业, 2010(5): 134-135
LI C H, MEI C G. Research progress on nutritional components and nutritional and health value of oats[J]. Modern Agriculture, 2010(5): 134-135
- [6] 刘善鑫. 冠突散囊菌发酵燕麦主要功能性成分及燕麦功效分析[D]. 长沙:湖南农业大学, 2019: 13-25
LIU S X. Analysis on main functional components and oat efficacy of oat fermented by *Eurotium cristatum*[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2019: 13-25
- [7] 胡新中,任长忠. 中国燕麦荞麦产业“十三五”发展报告(2016-2020)出版[R]. 西安:陕西科学技术出版社, 2021: 19-35
HU X Z, REN C Z. The 13th Five-Year Development Report of China's Oat and Buckwheat Industry (2016-2020) was published[R]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 2021: 19-35
- [8] 郁永辉,刘柯杉,王静. 燕麦蒽酰胺生理功能研究进展[J]. 食品科学技术学报, 2020, 38(6): 21-28

- YU Y H, LIU K S, WANG J. Research progress on physiological function of oat avenanthramides [J]. Journal of Food Science and Technology, 2020, 38(6): 21-28
- [9] 詹圆, 崔琪, 虞应乾, 等. 花后干旱胁迫对燕麦穗部器官光合生理及糖代谢的影响[J]. 草地学报, 2026, 34(2): 415-423
ZHAN Y, CUI Q, YU Y Q, et al. Effects of drought stress on the photosynthetic physiology and sugar metabolism in oat ear organs after flowering [J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(2): 415-423
- [10] MEYDANI M. Potential health benefits of avenanthramides of oats [J]. Nutrition Reviews, 2009, 67(12): 731-735
- [11] MUSA-VELOSO K, NOORI D, VENDITTI C, et al. A systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials on the effects of oats and oat processing on postprandial blood glucose and insulin responses [J]. The Journal of Nutrition, 2021, 151(2): 341-351
- [12] SINGH R, DE S, BELKHEIR A. *Avena sativa* (Oat), a potential nutraceutical and therapeutic agent: an overview [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2013, 53(2): 126-144
- [13] 张天俊, 张永亮, 李威, 等. 植物生长延缓剂对羊草非结构性碳水化合物含量及产量的影响[J]. 草地学报, 2021, 29(2): 407-411
ZHANG T J, ZHANG Y L, LI W, et al. Effect of growth retardants on content of non-structural carbohydrate and products of *Leymus chinensis* [J]. Acta Agrestia Sinica, 2021, 29(2): 407-411
- [14] 徐令旗, 杜晓东, 蔡永盛, 等. 外源褪黑素对不同生育时期低温处理水稻光合特性、抗氧化系统及产量的影响[J]. 山东农业科学, 2025, 57(9): 64-71
XU L Q, DU X D, CAI Y S, et al. Effects of exogenous melatonin on photosynthetic characteristics, antioxidant system and yield of rice under low temperature stress in different periods [J]. Shandong Agricultural Sciences, 2025, 57(9): 64-71
- [15] 罗妮星. 植物生长调节剂对云南松幼苗生理特性的影响[J]. 农业技术与装备, 2025(8): 123-125
LUO N X. The influence of plant growth regulators on the physiological characteristics of *Pinus yunnanensis* [J]. Agricultural Technology & Equipment, 2025(8): 123-125
- [16] 盛明, 傅恒. 植物抗逆性研究进展[J]. 内蒙古林业, 2011(9): 22-23
SHENG M, FU H. Research progress of plant stress resistance [J]. Inner Mongolia Forestry, 2011(9): 22-23
- [17] 陶雷, 李诚, 吴双, 等. 叶面喷施褪黑素对淹水胁迫下贡菊幼苗生长的影响[J]. 现代农业科技, 2024(1): 87-90
TAO L, LI C, WU S, et al. Effects of foliar spraying of melatonin on growth of gongju seedlings under waterlogging stress [J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2024(1): 87-90
- [18] 褚需宇, 王欢, 贾景瑞, 等. 根施褪黑素对低温胁迫下大豆幼苗根系形态和生理的影响[J/OL]. <https://link.cnki.net/urlid/46.1068.S.20231220.1404.006>, 2023-12-21/2025-07-23
CHU P Y, WANG H, JIA J R, et al. Effects of root application of melatonin on root morphology and physiology of soybean seedlings under low temperature stress [J/OL]. <https://link.cnki.net/urlid/46.1068.S.20231220.1404.006>, 2023-12-21/2025-07-23
- [19] 杨利云, 王丽特, 徐照丽, 等. 4种化学调控剂对烟草幼苗耐弱光性及光合特性的影响[J]. 西北植物学报, 2018, 38(1): 121-130
YANG L Y, WANG L T, XU Z L, et al. Effects of four chemical regulators on low light tolerance and photosynthetic characteristics of *Nicotiana tabacum* seedlings [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2018, 38(1): 121-130
- [20] 陈秀晨, 熊冬金. 植物抗逆性研究进展[J]. 湖北农业科学, 2010, 49(9): 2253-2256
CHEN X C, XIONG D J. Research progress in plant stress resistance [J]. Hubei Agricultural Sciences, 2010, 49(9): 2253-2256
- [21] PETROVA A, KATEROVA Z, SERGIEV I, et al. Effect of exogenous plant growth regulators on antioxidant defense in zucchini cotyledons under different light regimes [J]. Agriculture, 2025, 15(12): 1258
- [22] 刘欣欣, 李笑非, 孟汇然, 等. 低温胁迫对4种竹子生理生化特性的影响及其耐寒性综合评价[J]. 山东农业科学, 2025, 57(8): 42-50
LIU X X, LI X F, MENG H R, et al. Effects of low temperature stress on physiological and biochemical characteristics of four species of bamboo and comprehensive evaluation on their cold tolerance [J]. Shandong Agricultural Sciences, 2025, 57(8): 42-50
- [23] 徐向东, 孙艳, 孙波, 等. 高温胁迫下外源褪黑素对黄瓜幼苗活性氧代谢的影响[J]. 应用生态学报, 2010, 21(5): 1295-1300
XU X D, SUN Y, SUN B, et al. Effects of exogenous melatonin on active oxygen metabolism of cucumber seedlings under high temperature stress [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(5): 1295-1300
- [24] 刘婷婷, 卫旭阳, 翟锡蛟, 等. 外源褪黑素对盐渍环境下黄瓜幼苗生长的影响[J]. 华北农学报, 2021, 36(3): 125-132
LIU T T, WEI X Y, ZHAI X J, et al. Effect of exogenous melatonin on growth of cucumber seedlings in saline environment [J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2021, 36(3): 125-132
- [25] 张娜, 蒋庆, 李殿波, 等. 外源施加褪黑素对NaCl胁迫下狼尾草种子萌发及相关生理指标的影响[J]. 中国农业大学学报, 2014, 19(4): 54-60
ZHANG N, JIANG Q, LI D B, et al. Effect of exogenous melatonin on germination of *Pennisetum alopecuroides* under NaCl stress [J]. Journal of China Agricultural University, 2014, 19(4): 54-60
- [26] 张渝洁. 番茄在低温弱光下生理特性的变化研究[J]. 北方园艺, 2008(3): 38-39
ZHANG Y J. Studies on the physiological characteristic of *Lycopersicon esculentum* mill at low temperture under low irradiance [J]. Northern Horticulture, 2008(3): 38-39

- [27] 张亚楠,张津铨,王君. 外源褪黑素对于旱胁迫下多年生黑麦草幼苗生理特性的影响[J]. 黑龙江畜牧兽医,2024(3):86-92,117
ZHANG Y N,ZHANG J Q,WANG J. Effects of exogenous melatonin on physiological characteristics of *Lolium perenne* seedlings under drought stress [J]. Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine,2024(3):86-92,117
- [28] 胡世莲,颀建明,张婧,等. 外源褪黑素对碳酸钠胁迫下青花菜幼苗生长及生理特性的影响[J]. 甘肃农业大学学报,2025,60(1):86-96
HU S L,XIE J M,ZHANG J,et al. Effect of exogenous melatonin on growth and physiological characteristics of broccoli seedlings under sodium carbonate stress[J]. Journal of Gansu Agricultural University,2025,60(1):86-96
- [29] 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 stresss[J]. Acta Prataculturae Sinica,2024,33(6):64-75
- [30] 王雁,苏雪痕,彭镇华. 植物耐荫性研究进展[J]. 林业科学研究,2002,15(3):349-355
WANG Y,SU X H,PENG Z H. Review of studies on plant shade-tolerance[J]. Forest Research,2002,15(3):349-355
- [31] KELLER M M,JAILLAIS Y,PEDMALE U V,et al. Cryptochrome 1 and phytochrome B control shade-avoidance responses in *Arabidopsis* via partially independent hormonal cascades[J]. The Plant Journal,2011,67(2):195-207
- [32] 张玉娟,崔林雨,张佳能,等. 褪黑素处理对草地早熟禾抗盐性的影响[J]. 草原与草坪,2025,45(2):196-205
ZHANG Y J,CUI L Y,ZHANG J N,et al. Effect of melatonin treatment on salt resistance of *Poa pratensis* [J]. Grassland and Turf,2025,45(2):196-205
- [33] 冯丽燕,王国强,李鹏,等. 高温胁迫下外源褪黑素对番茄幼苗生长及生理特性的影响[J]. 中国蔬菜,2025(6):162-167
FENG L Y,WANG G Q,LI P,et al. Regulation of exogenous melatonin on the growth and physiological characteristics of tomato seedlings under high temperature stress[J]. China Vegetables,2025(6):162-167
- [34] 王强. 外源褪黑素对盐碱胁迫下燕麦种子萌发和幼苗生长的影响[D]. 成都:成都大学,2024:86-92
WANG Q. Effect of exogenous melatonin on seed germination and seedling growth of oat under saline-alkali stress [D]. Chengdu:Chengdu University,2024:86-92

(责任编辑 闵芝智)