

崔 亮,付雪娇,万 博,等. 外源褪黑素对干旱胁迫下马铃薯幼苗生长和产量的影响[J]. 江苏农业学报, 2025, 41(2): 251-257.
doi:10.3969/j.issn.1000-4440.2025.02.005

外源褪黑素对干旱胁迫下马铃薯幼苗生长和产量的影响

崔 亮¹, 付雪娇¹, 万 博¹, 周桦楠¹, 杨 宇², 贾景丽²

(1.辽宁省农业科学院作物研究所, 辽宁 沈阳 110161; 2.沈阳农业大学, 辽宁 沈阳 110866)

摘要: 本研究以马铃薯品种辽薯6号为试验材料, 设置正常水分对照(CK)及20%聚乙二醇-6000(PEG)干旱胁迫(T1)、30 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素+20%PEG干旱胁迫(T2)、60 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素+20%PEG干旱胁迫(T3)、90 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素+20%PEG干旱胁迫(T4)和120 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素+20%PEG干旱胁迫(T5)5个处理, 通过叶面喷施褪黑素, 研究干旱胁迫条件下马铃薯幼苗形态、光合特性及产量对外源褪黑素的响应机理。结果表明: 与CK相比, 20%聚乙二醇-6000干旱胁迫处理显著降低了马铃薯幼苗的株高、茎粗、光合特性参数和单株结薯重。干旱胁迫条件下, 喷施适宜浓度的褪黑素可有效改善马铃薯幼苗的生长状况及生理生化特性。60 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素+20%聚乙二醇-6000干旱胁迫处理下, 马铃薯幼苗株高和茎粗分别比T1处理提高了15%和29%, 净光合速率、气孔导度和蒸腾速率分别比T1处理提高了21%、28%和16%, 最大光化学量子效率、表观电子传递速率、光化学猝灭系数分别比T1处理提高了8%、6%、14%, 超氧化物歧化酶活性、过氧化氢酶活性和抗坏血酸过氧化物酶活性分别比T1处理提高了8%、39%和9%, 单株结薯数、平均单薯重和单株结薯重分别比T1处理提高了12.5%、7.1%和22.8%。综合分析认为, 在20%聚乙二醇-6000干旱胁迫下, 叶片喷施60 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素处理有利于促进马铃薯幼苗生长, 增强光合能力和抗氧化性, 提高产量。

关键词: 褪黑素; 干旱胁迫; 马铃薯; 生长; 产量

中图分类号: S532 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2025)02-0251-07

Effects of exogenous melatonin on growth and yield of potato seedlings under drought stress

CUI Liang¹, FU Xuejiao¹, WAN Bo¹, ZHOU Huanan¹, YANG Yu², JIA Jingli²

(1. Institute of Crop Research, Liaoning Academy of Agricultural Sciences, Shenyang 110161, China; 2. Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China)

Abstract: In this study, the potato variety Liaoshu 6 was used as the experimental material. Control and five treatments were set up: normal water (CK), 20% polyethylene glycol-6000 (PEG) drought stress (T1), 30 $\mu\text{mol/L}$ melatonin + 20% PEG drought stress (T2), 60 $\mu\text{mol/L}$ melatonin + 20% PEG drought stress (T3), 90 $\mu\text{mol/L}$ melatonin + 20% PEG drought stress (T4) and 120 $\mu\text{mol/L}$ melatonin + 20% PEG drought stress (T5). The response mechanism of potato seedling morphology, photosynthetic characteristics and yield to exogenous melatonin under drought stress was studied by spraying

melatonin on leaves. The results showed that the plant height, stem diameter, photosynthetic characteristics and tuber weight per plant of potato seedlings under 20% polyethylene glycol-6000 drought stress were significantly reduced compared with CK. Under drought stress, spraying appropriate concentration of melatonin could effectively improve the growth and physiological and biochemical characteristics of potato seedlings. Compared with T1 treatment,

收稿日期: 2024-11-01

基金项目: 中国-爱沙尼亚马铃薯联合育种实验室基金项目(2019L-HSYS02); 沈阳农业大学引进人才专项(2022Y001)

作者简介: 崔 亮(1983-), 男, 辽宁沈阳人, 博士, 助理研究员, 主要从事马铃薯育种与高产栽培技术研究。(E-mail) cuiliang2832@126.com

通讯作者: 贾景丽, (E-mail) jiajingli1999@163.com

the plant height and stem diameter of potato seedlings under 60 $\mu\text{mol/L}$ melatonin + 20% polyethylene glycol-6000 drought stress were increased by 15% and 29%, the net photosynthetic rate, stomatal conductance and transpiration rate were increased by 21%, 28% and 16%, the maximum photochemical quantum efficiency, apparent electron transport rate and photochemical quenching coefficient were increased by 8%, 6% and 14%, the activities of superoxide dismutase, catalase and ascorbate oxidase were increased by 8%, 39% and 9%, and the tuber number per plant, average tuber weight and tuber weight per plant were increased by 12.5%, 7.1% and 22.8%, respectively. The results of comprehensive analysis indicated that under 20% polyethylene glycol-6000 drought stress, spraying 60 $\mu\text{mol/L}$ melatonin on leaves was beneficial to promote the growth of potato seedlings, enhance photosynthetic capacity and antioxidant capacity, and increase yield.

Key words: melatonin; drought stress; potato; growth; yield

马铃薯是世界第四大粮食作物,因其具有高产稳产、营养丰富及适应性广等特点,在全世界范围内被广泛种植^[1-2]。它不仅是人类食用的粮蔬兼用作物,同时也是重要的工业原料^[3]。为保障中国粮食安全,促进农民持续增收,中国提出了马铃薯主粮化战略^[4],因此,马铃薯成为粮食供给侧结构性改革中重要的替代作物之一。

中国的马铃薯种植面积和总产量位居世界首位,主要生产区域多分布在干旱与半干旱的贫瘠地区^[5-6]。近年来,随着全球气候变暖,水资源短缺已成为全球最严峻的危机,严重影响着农作物的产量和品质^[7]。在中国,干旱胁迫已成为制约马铃薯生产的主要因素^[8]。已有研究表明,干旱胁迫会抑制马铃薯从苗期到块茎形成期的株高、茎粗、根系长度以及干物质积累,并且影响单株块茎数和单株块茎重量^[9-10]。此外,马铃薯的光合系统对干旱胁迫非常敏感,水分不足会妨碍叶绿素在作物体内的合成,影响后续光能的传递和分配过程,引起叶绿素荧光参数的显著变化^[11]。余凌翔等^[12]的研究结果表明,增加干旱胁迫程度,降低了光化学猝灭系数和最大光化学量子效率,提高了非光化学猝灭系数。王立为等^[13]研究发现,在干旱胁迫条件下,马铃薯叶片的净光合速率和气孔导度在块茎关键生长期呈显著降低的变化趋势。韩海霞等^[14]通过比较干旱胁迫下不同马铃薯品种抗氧化酶活性发现,干旱胁迫显著提升了马铃薯超氧化物歧化酶、过氧化氢酶和过氧化物酶的活性,激活了马铃薯的防御机制,增强了抗旱能力。

利用外源激素调节植物的抗逆反应,是最有效且容易实现的途径之一。其中,褪黑素作为一种色胺类激素,不仅可以直接或间接清除植物体内的活性氧,还可以调控其他激素水平,进而参与作物遭受逆境胁迫的一系列代谢过程,降低作物生长对干旱胁迫的损

伤响应程度,减轻干旱胁迫对作物生长的负面影响,提高其产量和品质^[15-16]。相关研究结果表明,干旱胁迫下,通过对小麦根部施用褪黑素,可有效改善幼苗的水分分布情况和氧化损伤,有助于提高光合能力,从而增强抗旱性和恢复生长的能力^[17]。刘婷婷等^[18]研究发现,通过施加褪黑素,可以显著促进盐渍胁迫条件下黄瓜幼苗的生长发育。Li 等^[19]研究发现,可以通过喷施褪黑素提高西瓜幼苗叶片的气孔导度,改善光系统II的光能吸收和电子传递,进而缓解盐胁迫对其光合性能的抑制作用。杨小龙等^[20]的研究结果表明,施加褪黑素不但能够显著提升干旱胁迫下番茄叶片的净光合速率和蒸腾速率,而且能增强光合系统I和光合系统II的光合电子传递速率,提高三磷酸腺苷酶的活性,使类囊体膜免受干旱胁迫引起的损伤。尽管已有大量研究结果表明,褪黑素在改善逆境胁迫下作物生长及光合性能方面具有显著效果,然而,关于褪黑素在提升马铃薯抗旱能力和产量方面的研究较少。因此,本研究拟以马铃薯幼苗为试验材料,测定不同浓度褪黑素对干旱胁迫下马铃薯幼苗生长和光合生理指标的影响,解析褪黑素提高马铃薯幼苗抗旱增产能力的机制,筛选最佳的褪黑素浓度,以期为干旱和半干旱地区马铃薯的种植提供技术指导。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试马铃薯品种为辽薯 6 号,由辽宁省农业科学院自主选育。

1.2 试验设计

本试验于 2023 年 4-7 月在辽宁省农业科学院温室内进行,采用盆栽的方法,设置正常水分对照(CK)及 20% 聚乙二醇-6000(PEG)干旱胁迫(T1)、30 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素(MT)+20%PEG 干旱胁迫(T2)、60 $\mu\text{mol/L}$ MT+20%PEG 干旱胁迫(T3)、90 $\mu\text{mol/L}$

MT+20%PEG 干旱胁迫 (T4)、120 $\mu\text{mol/L}$ MT+20% PEG 干旱胁迫 (T5) 处理。采用不同浓度的褪黑素,通过手持喷雾器均匀喷洒于幼苗叶片的正反面,以确保叶面不滴流,CK 喷施等量清水,连续喷施 3 d,1 d 喷 1 次;然后用 300 mL 20%PEG 浇灌根部进行干旱胁迫处理,每 3 d 处理 1 次,共处理 4 次,以正常水分管理为 CK。每个处理设置 3 次重复。4 月 5 日将催芽后的马铃薯栽植于塑料盆中,处理 14 d 后取马铃薯幼苗倒四叶进行试验,7 月 2 日块茎成熟后收获。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 形态指标 选取长势一致的植株,采用直尺测量株高 (cm),用游标卡尺测量茎粗 (cm)。

1.3.2 气体交换参数 采用美国 LI-COR 公司 LI-6400 便携式光合测定系统,在晴天上午 8:30–11:30,对马铃薯幼苗倒四叶的净光合速率 (P_n)、气孔导度 (G_s) 及蒸腾速率 (T_r) 进行测定。测定时所使用的光照度为 $1\,200\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,二氧化碳摩尔分数设定为 $400\ \mu\text{mol}/\text{mol}$,叶片温度保持在 $25\ ^\circ\text{C}$,相对湿度保持在 25%,每个处理设 3 次重复。

1.3.3 叶绿素荧光参数 采用 PAM-2100 便携式调制叶绿素荧光仪 (Walz 公司产品),对每株马铃薯幼苗倒四叶完全展开的功能叶进行最大光化学量子效率 (F_v/F_m)、表观电子传递速率 (ETR)、光化学猝灭系数 (qP) 和非光化学猝灭系数 (NPQ) 等荧光参数的测定。

1.3.4 抗氧化酶活性 采用 Tan 等^[21]的方法,将马

铃薯幼苗倒四叶放入液氮中处理 30 min,随后储存在 $-20\ ^\circ\text{C}$ 的冰箱中,用于后续测定超氧化物歧化酶 (SOD)、过氧化物酶 (POD) 和过氧化氢酶 (CAT) 等抗氧化酶的活性,抗坏血酸过氧化物酶 (APX) 活性的测定采用 Nakano 等^[22]的方法。

1.3.5 产量及产量构成因素 在马铃薯成熟期测定每个处理的单株结薯数、平均单薯重和单株结薯重,以单株结薯重作为实际产量指标。

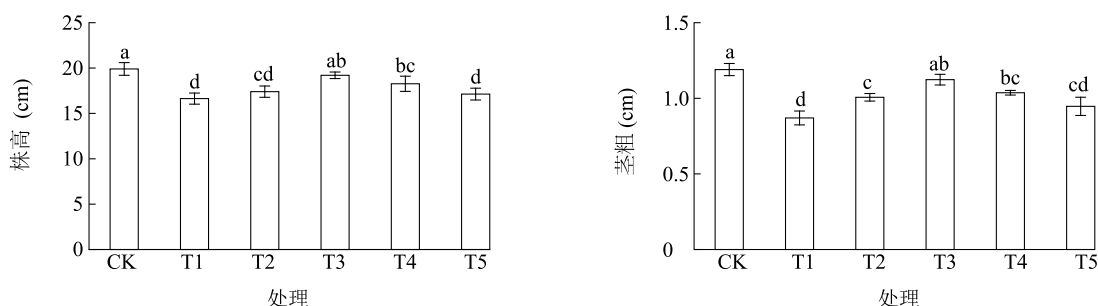
1.4 数据分析

采用 Microsoft Excel 2021 进行数据统计,利用 SPSS 19.0 软件进行方差分析,用 Duncan's 多重比较法进行差异显著性检验,用 Origin 9.0 作图。

2 结果与分析

2.1 外源褪黑素对干旱胁迫下马铃薯生长的影响

图 1 显示,T1 处理下马铃薯的株高和茎粗比 CK 显著降低了 17% 和 27% ($P<0.05$),干旱胁迫对马铃薯的株高和茎粗产生了显著的抑制效应。与 T1 处理相比,T3、T4 处理可显著改善干旱胁迫下马铃薯幼苗生长性状 ($P<0.05$)。其中,T3 处理马铃薯幼苗的株高、茎粗分别比 T1 处理显著增加了 15% 和 29%,缓解效果最为明显。随着褪黑素浓度的继续增加,其对干旱胁迫下马铃薯幼苗生长的缓解作用减弱。可见,适宜浓度的褪黑素在一定程度上能够缓解干旱胁迫对马铃薯生长的抑制。



CK: 正常水分; T1: 20% 聚乙二醇-6000 干旱胁迫; T2: 30 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素+20% 聚乙二醇-6000 干旱胁迫; T3: 60 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素+20% 聚乙二醇-6000 干旱胁迫; T4: 90 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素+20% 聚乙二醇-6000 干旱胁迫; T5: 120 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素+20% 聚乙二醇-6000 干旱胁迫。图中不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P<0.05$)。

图 1 外源褪黑素对干旱胁迫下马铃薯幼苗生长的影响

Fig.1 Effects of exogenous melatonin on the growth of potato seedlings under drought stress

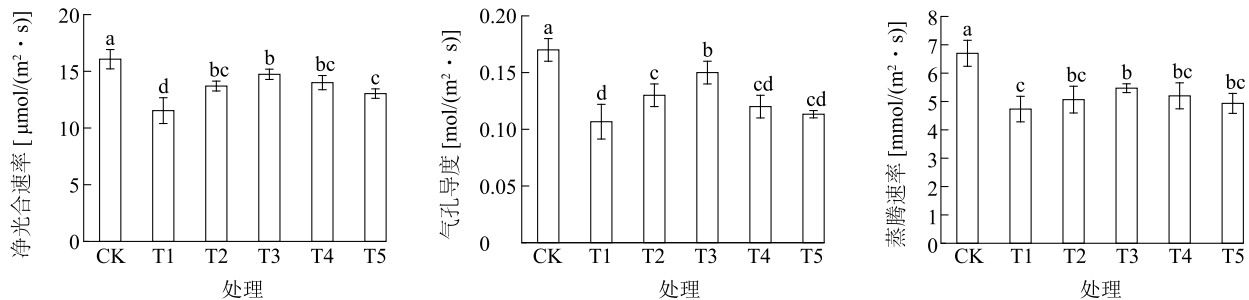
2.2 外源褪黑素对干旱胁迫下马铃薯光合参数的影响

图 2 显示,干旱胁迫降低了马铃薯幼苗的光合

参数。与 CK 相比,T1 处理的净光合速率、气孔导度和蒸腾速率显著降低了 28%、35% 和 29% ($P<0.05$)。干旱胁迫下喷施适宜浓度褪黑素可以显著

改善马铃薯幼苗的光合特性。与 T1 处理相比, T2、T3、T4、T5 处理下净光合速率显著增加了 15%、21%、17%、11%, T2、T3 处理下气孔导度分别显著增加了 17%、28%, T3 处理下蒸腾速率显著增加了

16%。综上, T3 处理对干旱胁迫下马铃薯幼苗光合性能的降低起到了较好的缓解作用, 加速了光合产物的合成, 说明喷施适宜浓度的褪黑素能够有效减轻干旱胁迫对植物光合特性造成的负面影响。



CK: 正常水分; T1: 20% 聚乙二醇-6000 干旱胁迫; T2: 30 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素+20% 聚乙二醇-6000 干旱胁迫; T3: 60 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素+20% 聚乙二醇-6000 干旱胁迫; T4: 90 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素+20% 聚乙二醇-6000 干旱胁迫; T5: 120 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素+20% 聚乙二醇-6000 干旱胁迫。图中不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

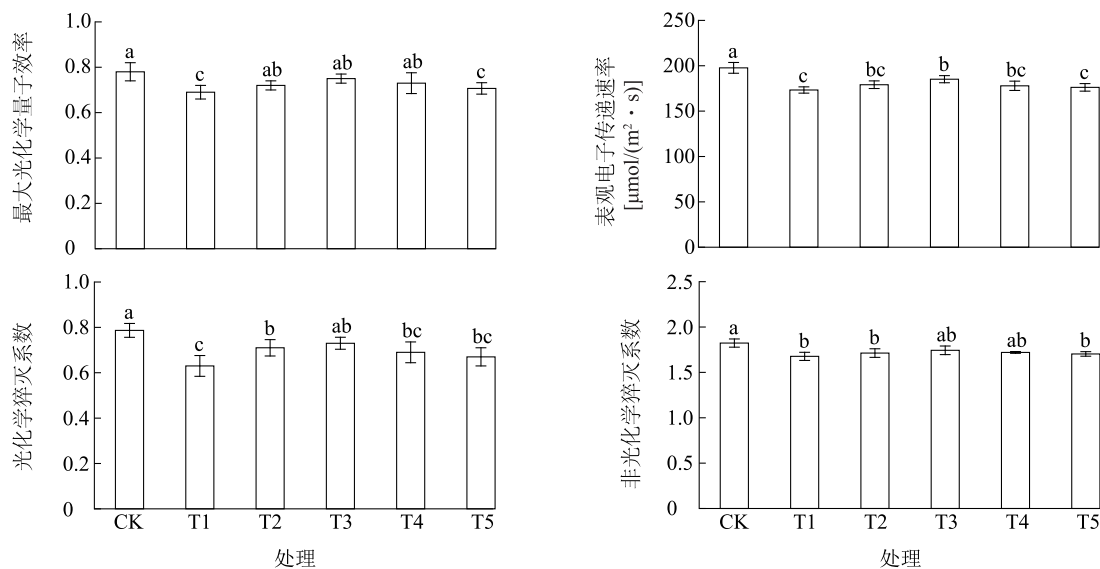
图 2 外源褪黑素对干旱胁迫下马铃薯幼苗光合特性的影响

Fig.2 Effects of exogenous melatonin on photosynthetic characteristics of potato seedlings under drought stress

2.3 外源褪黑素对干旱胁迫下马铃薯叶绿素荧光参数的影响

叶绿素荧光参数直接反映了叶绿素在光合作用中的光能合成与利用效率。图 3 显示, 与 T1 处理相比, 随着褪黑素浓度的增加, T2、T3、T4、T5 处理下的叶绿素荧光参数呈先升高后降低的变化趋势。其中, T2、T3、T4 处理下的最大光化学量子效率

(F_v/F_m) 比 T1 处理增加了 4%、8%、5%, T3 处理下的表观电子传递速率 (ETR) 比 T1 处理增加了 6%, T2、T3 处理下光化学猝灭系数 (qP) 比 T1 处理增加了 11%、14%, T2~T5 处理的非光化学猝灭系数 (NPQ) 与 T1 处理相比, 无显著变化。可见, 适宜浓度的褪黑素可在一定程度上缓解干旱胁迫对光合系统造成的伤害, 且 T3 处理的效果最为明显。



CK: 正常水分; T1: 20% 聚乙二醇-6000 干旱胁迫; T2: 30 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素+20% 聚乙二醇-6000 干旱胁迫; T3: 60 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素+20% 聚乙二醇-6000 干旱胁迫; T4: 90 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素+20% 聚乙二醇-6000 干旱胁迫; T5: 120 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素+20% 聚乙二醇-6000 干旱胁迫。图中不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

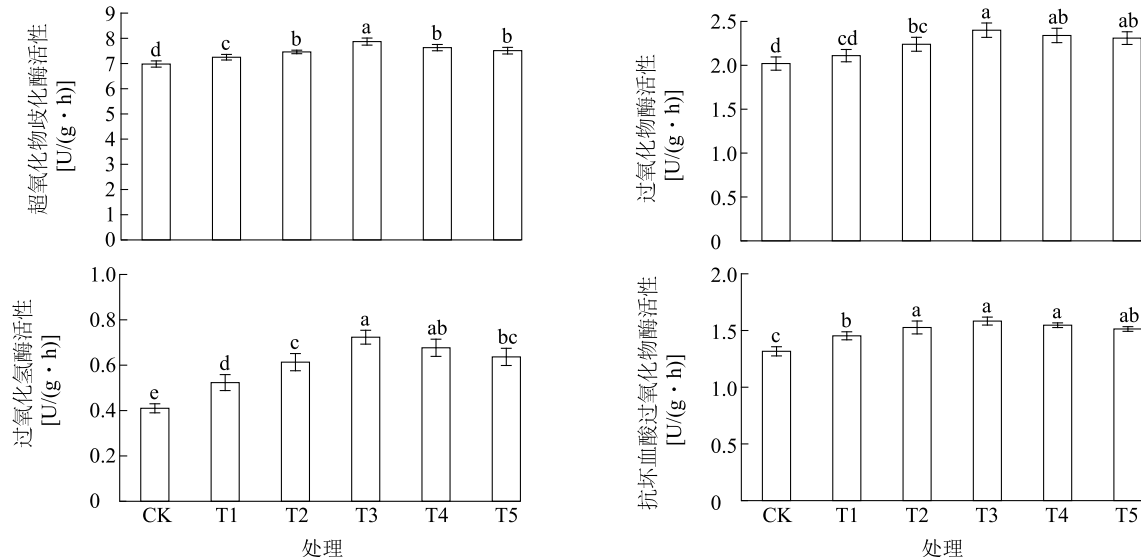
图 3 外源褪黑素对干旱胁迫下马铃薯幼苗叶绿素荧光参数的影响

Fig.3 Effects of exogenous melatonin on chlorophyll fluorescence parameters of potato seedlings under drought stress

2.4 外源褪黑素对干旱胁迫下马铃薯抗氧化酶活性的影响

图4显示,干旱胁迫下马铃薯幼苗叶片的超氧化物歧化酶、过氧化氢酶、抗坏血酸过氧化物酶活性均显著高于CK ($P<0.05$)。喷施适宜浓度褪黑素后显著提升了马铃薯的抗氧化酶活性,与T1处理相比,T2、T3、T4、T5处理下的超氧化物歧化酶活性显

著增加了2%、8%、5%和3%,过氧化氢酶活性显著增加了17%、39%、28%和21%。T2、T3、T4处理下的抗坏血酸过氧化物酶活性较T1处理显著增加了5%、9%、6%。综上,干旱胁迫下喷施适宜浓度褪黑素可以激活马铃薯的抗氧化保护机制,且T3处理效果最佳。



CK:正常水分;T1:20%聚乙二醇-6000 干旱胁迫;T2:30 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素+20%聚乙二醇-6000 干旱胁迫;T3:60 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素+20%聚乙二醇-6000 干旱胁迫;T4:90 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素+20%聚乙二醇-6000 干旱胁迫;T5:120 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素+20%聚乙二醇-6000 干旱胁迫。图中不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P<0.05$)。

图4 外源褪黑素对干旱胁迫下马铃薯幼苗抗氧化酶活性的影响

Fig.4 Effects of exogenous melatonin on antioxidant enzyme activities of potato seedlings under drought stress

2.5 外源褪黑素对干旱胁迫下马铃薯产量构成因素的影响

表1显示,与CK相比,T1处理下马铃薯的单株结薯数、平均单薯重和单株结薯重显著降低了17.9%、9.4%和25.0%。与T1处理相比,T2、T3、T4、T5处理显著提高了马铃薯的平均单薯重,平均单薯重分别提高了2.7%、7.1%、4.9%和3.3%。与T1处理相比,T3、T4处理下单株结薯数分别显著提高了12.5%、9.4%,单株结薯重分别显著提高了22.8%、14.7%。可见,通过外源喷施褪黑素可以减少马铃薯的产量损失。

3 讨论与结论

光合作用通过同化二氧化碳及合成碳水化合物,直接影响作物的生长发育及产量的形成,干旱胁迫会对作物的光合能力产生抑制作用,而且也会影

表1 外源褪黑素对干旱胁迫下马铃薯产量构成因素的影响

Table 1 Effects of exogenous melatonin on yield components of potato under drought stress

处理	单株结薯数 (个)	平均单薯重 (g)	单株结薯重 (g)
CK	3.90±0.20a	89.80±0.40a	350.30±18.83a
T1	3.20±0.15c	81.40±1.15e	262.90±8.73d
T2	3.40±0.10bc	83.60±0.89d	284.20±5.53cd
T3	3.60±0.10b	87.20±0.85b	322.80±10.53b
T4	3.50±0.15b	85.40±0.83c	301.60±11.61bc
T5	3.30±0.21bc	84.10±1.56cd	280.40±16.53cd

CK:正常水分;T1:20%聚乙二醇-6000 干旱胁迫;T2:30 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素+20%聚乙二醇-6000 干旱胁迫;T3:60 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素+20%聚乙二醇-6000 干旱胁迫;T4:90 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素+20%聚乙二醇-6000 干旱胁迫;T5:120 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素+20%聚乙二醇-6000 干旱胁迫。同列数据后不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P<0.05$)。

响叶绿素的荧光特性,最终导致产量降低^[23-24]。有研究结果表明,不同干旱水平可显著降低马铃薯的

光合特性^[25],通过喷施适宜浓度褪黑素可以缓解干旱胁迫对植物光合作用产生的抑制作用^[26]。本研究发现,干旱胁迫显著降低了马铃薯幼苗的净光合速率、气孔导度和蒸腾速率,喷施适宜浓度褪黑素后,各个光合参数值均有所增加,并在 60 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素处理下表现最优。说明喷施适宜浓度褪黑素能够改善气孔的状态,减轻干旱胁迫引起的水分流失,从而保持作物正常的光合进程,不仅有助于促进光合产物的运输和积累,还能减轻干旱胁迫对作物造成的损害^[27]。此外,本研究结果表明,马铃薯的最大光化学量子效率、表观电子传递速率、光化学猝灭系数和非光化学猝灭系数在干旱胁迫下明显降低,喷施适宜浓度褪黑素后有所改善,其中,在 60 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素处理下改善效果最佳,说明该处理更能激发光化学 PS II 活性的保护作用,提高光合作用对干旱胁迫的耐受性,增加作物对光能的转换效率与光合电子传递能力,进而加速光合色素的合成与积累,增强马铃薯的光合作用。这与前人对于适宜浓度褪黑素可以缓解干旱胁迫下光合机制损伤的研究结果^[28]一致。

干旱胁迫会导致作物细胞内活性氧的产生与清除之间的失调,进而破坏细胞膜的结构,造成作物的氧化损伤^[29]。相关研究表明,马铃薯叶片的抗氧化酶活性与其抗旱能力之间存在着密切关系,在受到适度的干旱胁迫时,其体内超氧化物歧化酶、过氧化物酶、过氧化氢酶和抗坏血酸过氧化物酶等抗氧化酶活性增强,提高了植物的抗逆性^[30]。本研究结果表明,与正常水分处理相比,干旱胁迫下马铃薯幼苗的超氧化物歧化酶、过氧化氢酶和抗坏血酸过氧化物酶的活性均不同程度上升,通过提升体内抗氧化酶活性,降低干旱胁迫对马铃薯造成的损伤。本试验设置的褪黑素浓度以 60 $\mu\text{mol/L}$ 最佳,该处理条件下马铃薯幼苗的超氧化物歧化酶、过氧化物酶、过氧化氢酶和抗坏血酸过氧化物酶的活性最高,随着施加褪黑素浓度的继续升高,马铃薯抗氧化酶活性的提高幅度有所降低,这可能是由于高浓度的褪黑素降低了渗透调节物质的积累速率,进而降低了逆境胁迫下作物的抗氧化作用^[31]。表明喷施适宜浓度褪黑素可以通过提高超氧化物歧化酶、过氧化物酶、过氧化氢酶和抗坏血酸过氧化物酶的活性来消除干旱胁迫下马铃薯产生的过量活性氧(ROS),维持 ROS 的平衡,这与前人研究得出的褪

黑素具有清除活性氧且增强抗氧化酶活性作用的结果^[32]基本一致。

干旱胁迫是限制作物生产力的主要因素之一,通过抑制作物的光合作用,阻碍碳水化合物的合成,导致过量活性氧产生,从而破坏细胞内离子的动态平衡,此过程引发了形态结构的变化以及生物量的重新分配,进而影响植株的营养生长,最终导致产量下降^[33-34]。马铃薯对水分敏感,缺水会影响马铃薯的生长发育和产量形成^[35]。已有研究结果表明,干旱胁迫阻碍了作物有机物的合成与积累,抑制了初级生产能力,喷施适宜浓度褪黑素处理能够显著提高作物在干旱胁迫条件下的株高、茎粗及生物量^[36-37]。本研究发现,与对照相比,干旱胁迫处理显著降低了马铃薯的株高、茎粗、单株结薯数、平均单薯重及单株结薯重。喷施适宜浓度褪黑素处理后显著改善了干旱胁迫下马铃薯的生长发育状态和产量水平,这是由于褪黑素作为一种强力的生长调节剂和抗氧化剂,通过提高作物体内的抗氧化酶活性,导致具有抗氧化调节和抗氧化特性的低分子量有机化合物的积累,维持干旱胁迫下作物细胞内离子之间的平衡,减少氧化应激效应,增加了马铃薯的胁迫耐受性,促进了碳水化合物的合成。

综上所述,干旱胁迫对马铃薯幼苗的生长发育和最终产量起到了抑制作用。干旱胁迫下喷施 60 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素可以促进马铃薯幼苗的生长发育,提升抗氧化酶活性,改善光合作用,提高产量。本研究结果可以为褪黑素在马铃薯绿色高产生技术上的应用提供一定的参考。

参考文献:

- [1] 张泽生,刘素稳,郭宝芹,等. 马铃薯蛋白质的营养评价[J]. 食品科技,2007,32(11):219-221.
- [2] 卢肖平. 马铃薯主粮化战略的意义、瓶颈与政策建议[J]. 华中农业大学学报(社会科学版),2015(3):1-7.
- [3] SU W, WANG J. Potato and food security in China[J]. American Journal of Potato Research,2019,96(2):100-101.
- [4] 庞文录. 马铃薯主粮化战略的意义与实施[J]. 粮食加工,2019,44(2):59-61.
- [5] 李峰云,吕春娜,王 舰,等. 干旱胁迫下马铃薯的生理响应及相关性分析[J]. 江苏农业科学,2023,51(24):50-59.
- [6] 余 斌,杨宏羽,王 丽,等. 引进马铃薯种质资源在干旱半干旱区的表型性状遗传多样性分析及综合评价[J]. 作物学报,2018,44(1):63-74.
- [7] LOBELL D B, BURKE M B, TEBALDI C, et al. Prioritizing cli-

- mate change adaptation needs for food security in 2030[J]. Science, 2008, 319(5863): 607-610.
- [8] 张瑞美, 彭世彰, 徐俊增, 等. 作物水分亏缺诊断研究进展[J]. 干旱地区农业研究, 2006, 24(2): 205-210.
- [9] 史田斌, 刘 震, 李志涛, 等. 不同生育期干旱胁迫对马铃薯生长特性、块茎产量和水分利用效率的影响[J]. 江苏农业学报, 2024, 40(2): 193-202.
- [10] 白江平, 王晓斌, 高慧娟, 等. 干旱和盐胁迫对马铃薯试管苗亚细胞结构及生理生化指标的影响[J]. 西北植物学报, 2016, 36(11): 2233-2240.
- [11] 张丽莉, 石 瑛, 祁 雪, 等. 干旱胁迫对马铃薯叶片超微结构及生理指标的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33(2): 75-80.
- [12] 余凌翔, 朱 勇, 钟 楚, 等. 生态环境对烟草农艺性状和叶绿素荧光特性的影响[J]. 中国农业气象, 2015, 36(2): 149-154.
- [13] 王立为, 谭 月, 张峻铖, 等. 开花期与块茎膨大期干旱胁迫及旱后复水对马铃薯影响的差异[J]. 中国农业气象, 2023, 44(1): 13-24.
- [14] 韩海霞, 刘亚婷, 梁 婷, 等. 干旱胁迫下2个品种马铃薯抗氧化酶活性的对比[J]. 南方农业, 2020, 14(24): 163-165.
- [15] KOSAR F, AKRAM N A, ASHRAF M, et al. Impact of exogenously applied trehalose on leaf biochemistry, achene yield and oil composition of sunflower under drought stress[J]. Physiologia Plantarum, 2021, 172(2): 317-333.
- [16] WEI W, LI Q T, CHU Y N, et al. Melatonin enhances plant growth and abiotic stress tolerance in soybean plants[J]. Journal of Experimental Botany, 2015, 66(3): 695-707.
- [17] 李春雨, 陈春宇, 毛浩田, 等. 干旱胁迫下外源褪黑素对小麦生长和光系统活性的影响[J]. 麦类作物学报, 2022, 42(7): 846-856.
- [18] 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.
- [19] LI H, CHANG J J, CHEN H J, et al. Exogenous melatonin confers salt stress tolerance to watermelon by improving photosynthesis and redox homeostasis[J]. Frontiers in Plant Science, 2017, 8: 295.
- [20] 杨小龙, 须 晖, 李天来, 等. 外源褪黑素对干旱胁迫下番茄叶片光合作用的影响[J]. 中国农业科学, 2017, 50(16): 3186-3195.
- [21] TAN W, LIU J, DAI T, et al. Alterations in photosynthesis and antioxidant enzyme activity in winter wheat subjected to post-anthesis water-logging[J]. Photosynthetica, 2008, 46(1): 21-27.
- [22] NAKANO Y, ASADA K. Hydrogen peroxide is scavenged by ascorbate-specific peroxidase in spinach chloroplasts[J]. Plant and Cell Physiology, 1981, 22(5): 867-880.
- [23] DA ROS L, ELFERJANI R, SOOLANAYAKANAHALLY R, et al. Drought-induced regulatory cascades and their effects on the nutritional quality of developing potato tubers[J]. Genes, 2020, 11(8): 864.
- [24] 赵成凤, 杨 梅, 李红杰, 等. 叶面喷施褪黑素对干旱及复水下玉米光合特性和抗氧化系统的影响[J]. 西北植物学报, 2021, 41(9): 1526-1534.
- [25] 李 鑫, 孙 超, 毕真真, 等. 不同干旱水平对马铃薯光合特性和耐旱性的影响[J]. 植物生理学报, 2019, 55(8): 1197-1210.
- [26] 张金政, 张起源, 孙国峰, 等. 干旱胁迫及复水对玉簪生长和光合作用的影响[J]. 草业学报, 2014, 23(1): 167-176.
- [27] LIU J L, WANG W X, WANG L Y, et al. Exogenous melatonin improves seedling health index and drought tolerance in tomato[J]. Plant Growth Regulation, 2015, 77(3): 317-326.
- [28] 陈忠诚, 金喜军, 李 贺, 等. 外源褪黑素对红小豆生长、光合荧光特性及产量构成因素的影响[J]. 作物杂志, 2021(6): 88-94.
- [29] YIN C Y, DUAN B L, WANG X, et al. Morphological and physiological responses of two contrasting poplar species to drought stress and exogenous abscisic acid application[J]. Plant Science, 2004, 167(5): 1091-1097.
- [30] 尹智宇, 封永生, 肖关丽. 干旱胁迫对马铃薯不同生育时期生理生化指标的影响[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2018, 33(1): 26-33.
- [31] 左佳琦, 谢佳恒, 薛宇轩, 等. 褪黑素对缓解植物逆境胁迫作用的研究进展[J]. 基因组学与应用生物学, 2014, 33(3): 709-715.
- [32] KABIRI R, HATAMI A, OLOUMI H, et al. Foliar application of melatonin induces tolerance to drought stress in Moldavian balm plants (*Dracocephalum moldavica*) through regulating the antioxidant system[J]. Folia Horticulturae, 2018, 30(1): 155-167.
- [33] ABDELAZIZ M E, ATIA M A M, ABDELSATTAR M, et al. Unravelling the role of *Piriformospora indica* in combating water deficiency by modulating physiological performance and chlorophyll metabolism-related genes in *Cucumis sativus* [J]. Horticulturae, 2021, 7(10): 399.
- [34] 邓 珍, 徐建飞, 段绍光, 等. PEG-8000模拟干旱胁迫对11个马铃薯品种的组培苗生长指标的影响[J]. 华北农学报, 2014, 29(5): 99-106.
- [35] 闫文渊, 秦军红, 段绍光, 等. 水分胁迫对不同熟性马铃薯生理特性的影响[J]. 中国蔬菜, 2022(5): 44-52.
- [36] 高 昆, 张明阳. 干旱胁迫对番茄种子萌发和幼苗生长的影响[J]. 山西大同大学学报(自然科学版), 2017, 33(6): 56-59.
- [37] LIU M C, LIU X L, HAO J, et al. Effect of simulated drought stress on plant growth, yield and fruit properties of tomato[J]. Acta Horticulturae, 2010(856): 193-202.

(责任编辑:王 妮)