

外源褪黑素对甜瓜坐果后叶片衰老的缓解效应

郑海强, 刘梦泽, 刘海河, 张彦萍, 曹艳霞, 朱立保

(河北农业大学园艺学院 河北保定 071001)

摘要:为探讨外源褪黑素对厚皮甜瓜叶片衰老的影响,以厚皮甜瓜品种农大 103 为试材,在春季大棚甜瓜雌花开放时叶面喷施 100、200、300、400 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 外源褪黑素溶液,以喷施清水作对照,对比分析甜瓜坐果节位的叶片叶绿素含量、活性氧代谢及氮代谢等生理指标。结果表明,第一次处理 14~35 d,与对照相比,200 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 褪黑素处理使叶绿素含量显著提高 37.21%~77.36%,叶绿素荧光值 F_v/F_m 、ETR 分别显著提高 11.97%~18.36%、38.41%~44.63%,抗氧化酶 SOD、POD、CAT 活性分别显著提高 12.54%~29.30%、18.28%~38.92%、67.05%~207.69%,氮代谢酶 NR、GS 活性分别显著提高 20.63%~60.00%、6.34%~11.84%, $\text{O}_2^{\cdot-}$ 产生速率显著降低 34.75%~47.81%。综上,外源褪黑素可通过提高抗氧化酶活性,加速活性氧清除,延缓叶片衰老,进而增强叶片光合性能和氮代谢,促进植株生长。在本试验条件下,以 200 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 褪黑素延缓叶片早衰的效果最佳。

关键词:甜瓜;褪黑素;衰老;生理特性

中图分类号:S652

文献标志码:A

文章编号:1673-2871(2025)10-091-07

Alleviating effects of exogenous melatonin on leaf senescence of muskmelon after fruit setting

ZHENG Haiqiang, LIU Mengze, LIU Haihe, ZHANG Yanping, CAO Yanxia, ZHU Libao

(College of Horticulture, Hebei Agricultural University, Baoding 071001, Hebei, China)

Abstract: To investigate the effects of exogenous melatonin on leaf senescence in muskmelon, the variety Nongda 103 was used as the test material. During the flowering period of female flowers in spring greenhouse conditions, exogenous melatonin solutions of 100, 200, 300, and 400 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ were sprayed on the leaves, with distilled water as the control. Physiological indicators of chlorophyll, reactive oxygen species metabolism, and nitrogen metabolism in leaves at the fruiting node were compared and analyzed. The results showed that from 14 to 35 days after the first treatment, compared with the control, the 200 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ melatonin treatment significantly increased the chlorophyll content by 37.21%-77.36%, the chlorophyll fluorescence value F_v/F_m and ETR by 11.97%-18.36% and 38.41%-44.63%, the activities of antioxidant enzymes SOD, POD, and CAT by 12.54%-29.30%, 18.28%-38.92%, and 67.05%-207.69%, the activities of nitrogen metabolism enzymes NR and GS by 20.63%-60.00% and 6.34%-11.84%, respectively, while the $\text{O}_2^{\cdot-}$ production rate was significantly reduced by 34.75%-47.81%. In conclusion, exogenous melatonin can enhance antioxidant enzyme activity, accelerate reactive oxygen species scavenging, thereby delaying leaf senescence, and further improve leaf photosynthetic performance and nitrogen metabolism capacity, promoting plant growth. Under the conditions of this experiment, the 200 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ melatonin treatment showed the best effect in delaying early leaf senescence.

Key words: Muskmelon; Melatonin; Aging; Physiological characteristics

厚皮甜瓜为一年生草本植物,是世界范围内重要的园艺作物之一^[1],果实富含大量维生素 C、胡萝卜素及钾元素,具有较高的营养价值。甜瓜生产实践表明,由于坐果后果实生长吸收大量养分,因此

出现叶片早衰的情况,即叶片失绿黄化,光合功能显著下降,严重阻碍植株的生长发育,从而对甜瓜产业造成巨大的经济损失^[2]。因此,延缓厚皮甜瓜坐果节位的叶片衰老逐渐成为研究的热点。

收稿日期:2025-03-24;修回日期:2025-06-12

基金项目:国家西甜瓜产业技术体系(CARS-26-25);河北省现代种业科技创新专项(21326306D);河北省农业科技成果转化资金专项(冀科农函(2024)1号)

作者简介:郑海强,男,在读硕士研究生,主要从事甜瓜栽培及生理研究。E-mail:1522924280@qq.com

通信作者:刘海河,男,教授,主要从事蔬菜栽培生理研究。E-mail:13733381068@163.com

褪黑素是一种广泛存在于动植物体内的无害活性物质,具有抗氧化、提高作物抗逆性的作用^[3]。研究表明,褪黑素可以使叶片内叶绿素含量保持较高水平,提高植物叶片叶绿素荧光参数,延长叶片功能期,从而促进光合作用^[4]。褪黑素可提高植物叶片内抗氧化酶活性、活性氧清除效率,从而延缓叶片衰老^[5]。褪黑素还可介导植物氮代谢,通过提高硝酸还原酶、谷氨酰胺合成酶活性,加速对无机氮的吸收利用,从而保证植物的生长发育^[6]。但有关褪黑素对甜瓜坐果后叶片早衰的研究尚未见报道。鉴于此,笔者于2024年在春季大棚甜瓜雌花开放时,采用叶面喷施不同浓度褪黑素溶液的方法,测定和分析了不同时期坐果节位的叶片抗氧化系统、光合特性和氮代谢等生理指标,探讨了外源褪黑素对延缓甜瓜叶片衰老的影响,以期利用褪黑素延缓甜瓜坐果节位的叶片早衰提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 材料

供试甜瓜品种为农大103,属厚皮甜瓜类型,由河北农业大学甜瓜育种和栽培实验室提供;药剂为褪黑素(MT),由上海源叶生物科技公司提供。

1.2 试验设计

试验于2024年2—6月在保定市清苑区张登镇甜瓜生产基地进行。2月20日于温室播种育苗,待幼苗4~5片真叶展开时定植,株行距33 cm×100 cm,田间管理严格按照当地标准化生产规程实施。试验设4个褪黑素浓度处理,即100 μmol·L⁻¹(T1)、200 μmol·L⁻¹(T2)、300 μmol·L⁻¹(T3)、400 μmol·L⁻¹(T4),以喷施清水作为对照(CK)。采用随机区组试验设计,每个处理20株,3次重复。在雌花开放当天傍晚(17:30—18:00),采用不同浓度褪黑素溶液及清水喷施植株叶片,液滴微落为宜。每7 d喷施1次,共喷施4次。参照本实验室前期的研究方法^[7],处理当天和处理后每隔7 d取样调查,随机采集植株坐果节位的叶片,每处理采集3片,置于冰盒带回实验室测定各生理指标。

1.3 测定指标与方法

采用分光光度法测定叶绿素含量^[8],利用便携式叶绿素荧光仪测定叶绿素荧光参数,采用氮蓝四唑法测定超氧化物歧化酶(SOD)活性,采用愈创木酚法测定过氧化物酶(POD)活性,采用分光光度法测定过氧化氢酶(CAT)活性,采用硫代巴比妥酸法测定丙二醛(MDA)含量^[9]。采用李玲等^[10]的方法测

定超氧阴离子(O₂·⁻)产生速率,采用李合生^[9]的方法测定硝酸还原酶(NR)、谷氨酰胺合成酶(GS)活性及硝态氮、铵态氮含量。

1.4 数据分析

采用Excel 2016整理试验数据及作图,采用IBM SPSS 25进行差异显著性分析。

2 结果与分析

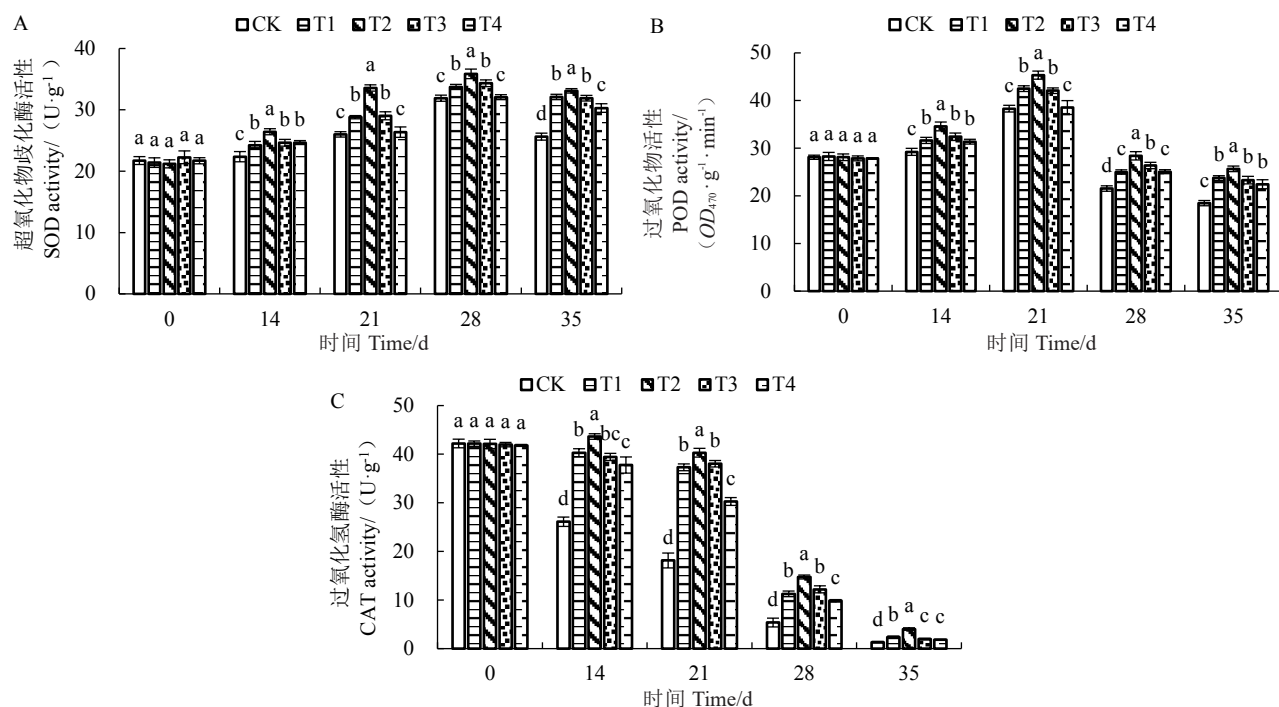
2.1 褪黑素对坐果节位叶片活性氧及清除系统的影响

2.1.1 褪黑素对坐果节位叶片抗氧化酶活性的影响 由图1可知,第一次处理14~35 d,与CK相比,T2处理提升SOD活性幅度最大,较CK分别显著提高17.86%、29.23%、12.54%、29.30%,其次为T1和T3处理,较CK分别显著提高8.04%和9.82%、10.77%和11.54%、5.64%和7.52%、25.39%和24.61%。第一次处理14~35 d,T2处理提升POD活性的效果最优,较CK分别显著提高18.49%、18.28%、32.09%、38.92%,其次为T3处理,较CK分别显著提高10.96%、9.92%、22.79%、25.95%。第一次处理14~35 d,褪黑素处理均极大程度延缓了叶片CAT活性降低的趋势,以T2处理的延缓效果最为显著,使CAT活性较CK分别显著提高67.05%、122.65%、172.22%、207.69%。以上结果表明,适宜浓度的褪黑素处理可以提高叶片内抗氧化酶活性,从而提高对活性氧的清除效率。

2.1.2 褪黑素对坐果节位叶片丙二醛含量和超氧阴离子产生速率的影响 由图2可知,与CK相比,第一次处理14~35 d,褪黑素处理均显著降低丙二醛含量和超氧阴离子的产生速率(除28 d的T4处理外),且均以T2处理降低幅度最为明显,丙二醛含量较CK分别显著降低49.51%、51.77%、49.02%、21.48%;超氧阴离子的产生速率较CK分别显著降低34.75%、45.47%、47.81%、44.28%,其次为T1和T3处理。以上结果表明,适宜浓度的褪黑素处理有效减缓了超氧阴离子及丙二醛的积累,减轻了活性氧对叶片膜质的伤害程度。

2.2 褪黑素对坐果节位叶片叶绿素含量及叶绿素荧光参数的影响

2.2.1 褪黑素对叶片叶绿素含量的影响 由图3可知,与CK相比,T2处理提升叶片叶绿素含量的效果最优,第一次处理14~35 d,较CK分别显著提高37.21%、64.10%、55.69%、77.36%,T3和T4处理次之,较CK分别显著提高24.03%和23.26%、



注:不同小写字母表示同一时期的不同处理间差异显著($P < 0.05$)。下同。

Note: Different lowercase letters indicate significant difference among different treatments of the same time ($P < 0.05$). The same below.

图1 褪黑素对坐果节位叶片抗氧化酶活性的影响

Fig. 1 Effects of melatonin on antioxidant oxidase activity in leaf at fruit-setting node

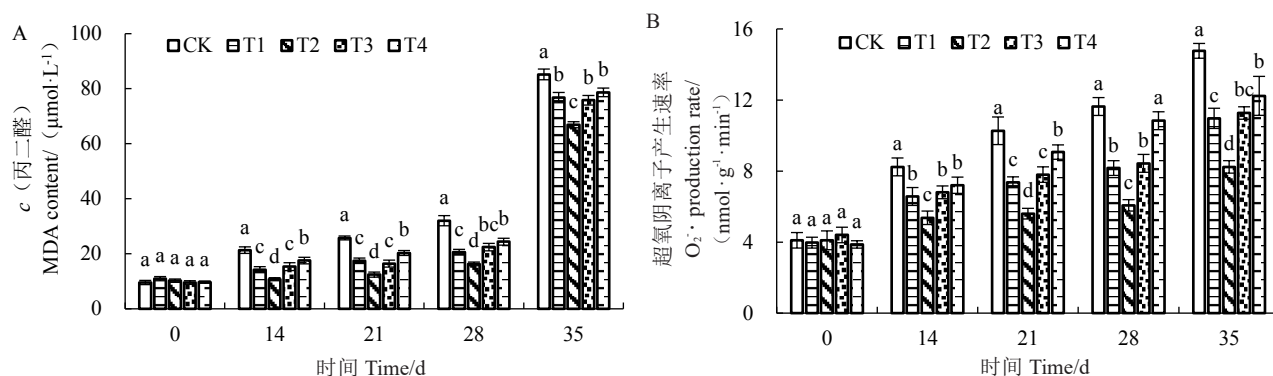


图2 褪黑素对坐果节位叶片丙二醛含量和超氧阴离子产生速率的影响

Fig. 2 Effects of melatonin on malondialdehyde content and superoxide anion production rate in leaf at fruit-setting node

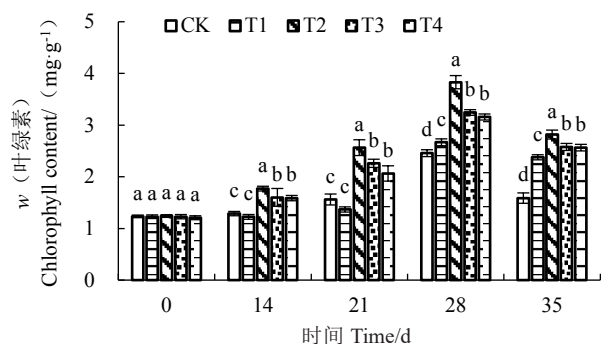


图3 褪黑素对坐果节位叶片叶绿素含量的影响

Fig. 3 Effects of melatonin on chlorophyll content in leaf at fruit-setting node

44.87% 和 32.05%、31.71% 和 28.46%、62.26% 和 61.01%。以上结果表明,褪黑素处理可以提高甜瓜植株坐果节位的叶片叶绿素含量。

2.2.2 褪黑素对坐果节位叶片叶绿素荧光参数的影响 由图4可知,第一次处理14~35 d, T2处理的叶片 F_v 下降最为明显,较CK分别显著降低36.94%、28.43%、9.76%、23.90%,其次为T1处理。第一次处理14~35 d,与CK相比,褪黑素处理均使叶片ETR显著升高,其中T2处理较对照分别显著提高44.17%、44.63%、38.41%、42.34%;除第14天T4处理的 F_v/F_m 略低于对照外,其他均高于对照,其

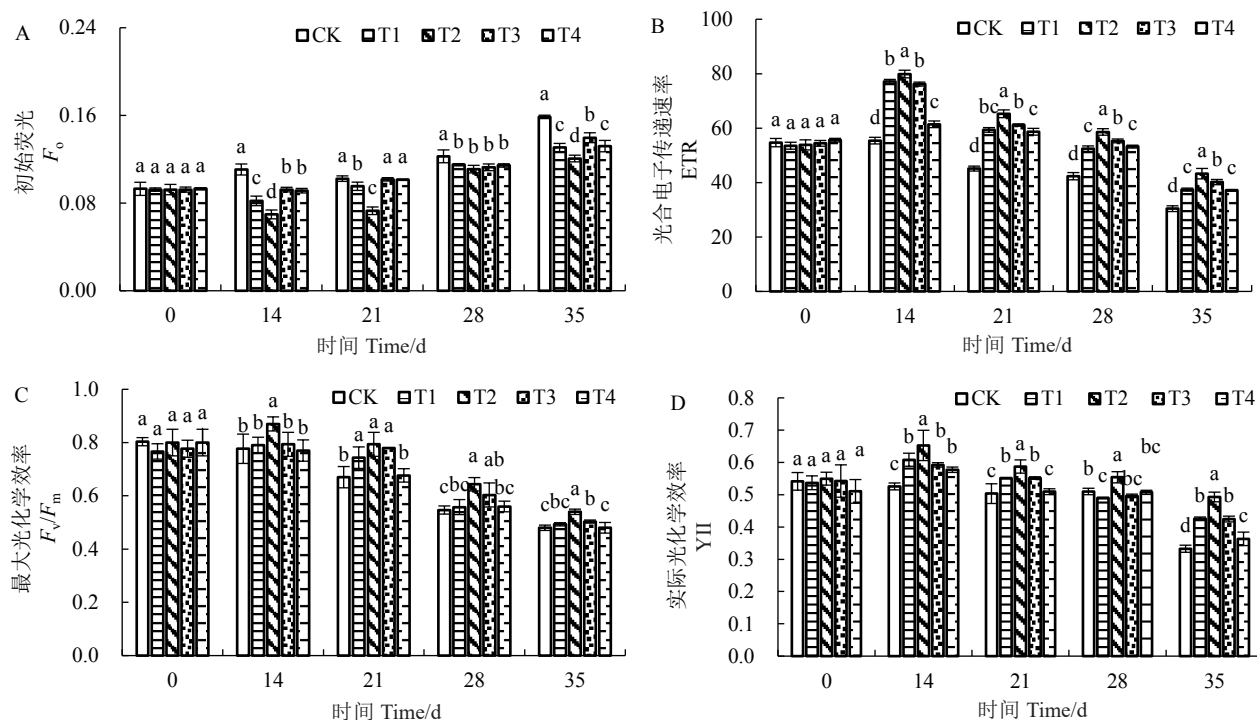


图4 褪黑素对坐果节位叶片叶绿素荧光参数的影响

Fig. 4 Effects of melatonin on chlorophyll fluorescence parameters of leaf at fruit-setting node

中 T2 处理延缓 F_v/F_m 下降的幅度最大,较 CK 分别显著提高 11.97%、18.36%、17.55%、12.50%,其次为 T3 处理;除第 28 天 T1、T3、T4 处理的 YII 均降低外,其他处理均提高 YII,以 T2 处理效果最优,在 14~35 d,较 CK 分别显著提高 24.14%、16.70%、8.63%、48.05%。以上结果表明,适宜浓度的褪黑素处理可以降低 F_0 ,提高叶片光系统 ETR、 F_v/F_m 、YII,以增强光系统活性,从而提高光合效能。

2.3 褪黑素对坐果节位叶片氮代谢的影响

2.3.1 褪黑素对坐果节位叶片 NR、GS 活性的影响

由图 5 可知,第一次处理 14~35 d,褪黑素处理叶片 NR、GS 活性均高于对照,其中 T2 处理的效果最佳,NR 活性较 CK 分别显著提高 60.00%、20.63%、25.33%、51.62%;GS 活性较 CK 分别显著提高 11.22%、11.84%、11.67%、6.34%。以上结果表明,适宜浓度的褪黑素处理可以提高坐果节位叶片内 NR、GS 活性。

2.3.2 褪黑素对坐果节位叶片硝态氮、铵态氮含量的影响 由图 6 可知,第一次处理 14~35 d,褪黑素处理的硝态氮含量均显著低于 CK,其中 T2 处理的

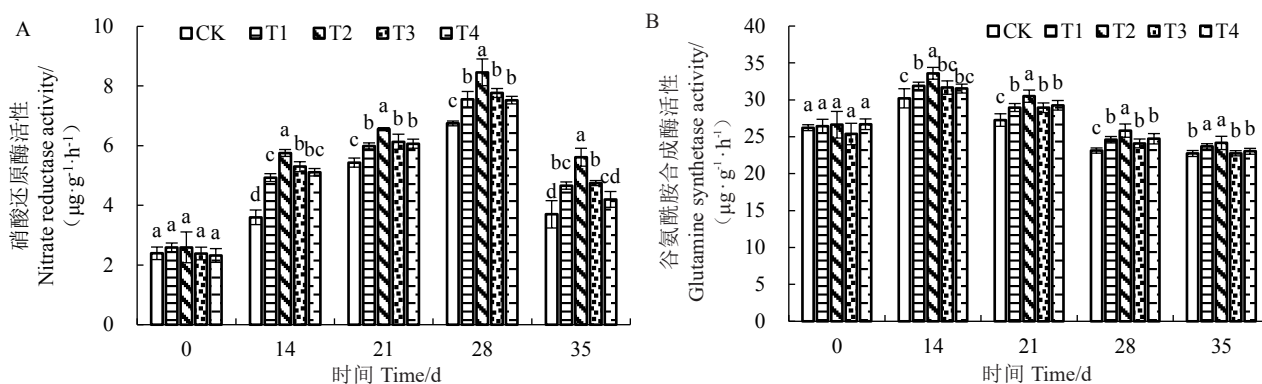


图5 不同浓度褪黑素对坐果节位叶片氮代谢酶活性的影响

Fig. 5 Effects of different concentrations of melatonin on the activity of nitrogen metabolizing enzyme in leaf at fruit-setting node

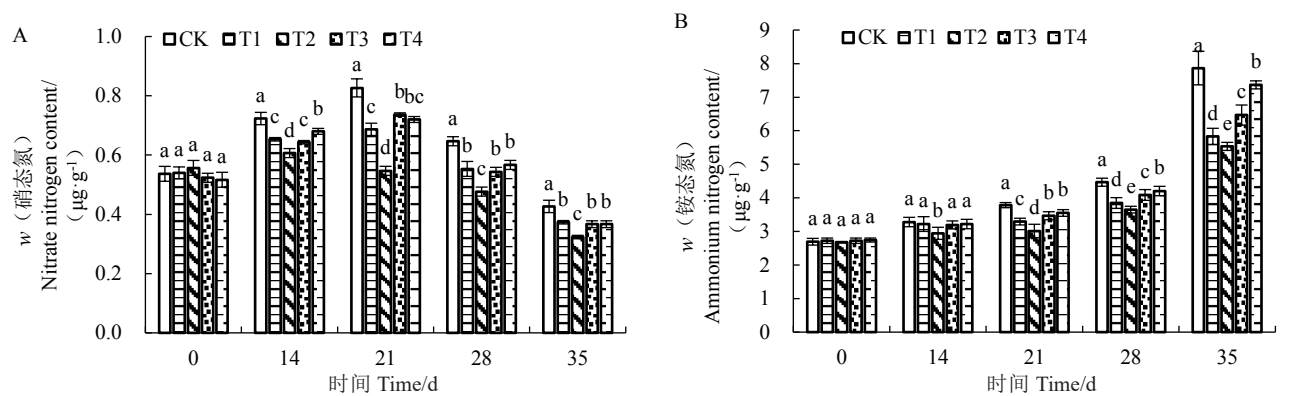


图 6 不同浓度褪黑素对坐果节位叶片硝态氮、铵态氮含量的影响

Fig. 6 Effects of different concentrations of melatonin on nitrate nitrogen and ammonium nitrogen content in leaf at fruit setting node

硝态氮含量降低幅度最大,较 CK 分别显著降低 15.28%、33.73%、26.15%、25.58%。第一次处理 21~35 d,褪黑素处理的坐果节位叶片内铵态氮含量较 CK 显著降低,其中 T2 处理降低幅度最大,较 CK 分别显著降低 20.37%、18.34%、29.73%,其次为 T1 处理,较 CK 分别显著降低 12.96%、13.87%、25.92%。以上结果表明,适宜浓度的褪黑素处理可以提高对硝态氮、铵态氮的利用效率。

2.4 相关性分析

由表 1 可知,叶绿素含量与 SOD 活性、NR 活性呈极显著正相关,与 CAT 活性呈极显著负相关,与 GS 活性呈显著负相关;ETR、 F_v/F_m 、YII 与 POD 活性、CAT 活性、GS 活性呈极显著正相关,与超氧阴离子产生速率和丙二醛含量呈极显著负相关;初始荧光与超氧阴离子产生速率和丙二醛含量呈极显著正相关,与 POD 活性、CAT 活性、GS 活性呈极

表 1 叶绿素含量、光系统与抗氧化酶、活性氧及氮代谢酶之间相关性分析

Table 1 Correlation analysis between chlorophyll content, photosystem and antioxidant enzyme, active oxygen and nitrogen metabolizing enzyme

指标 Index	抗氧化酶指标 Antioxidant enzyme index			活性氧指标 Active oxygen species index		氮代谢酶指标 Nitrogen metabolism enzyme index	
	6	7	8	9	10	11	12
1	0.930**	-0.193	-0.652**	0.380	0.305	0.794**	-0.428*
2	0.394	-0.693**	-0.896**	0.833**	0.859**	0.081	-0.800**
3	-0.237	0.608**	0.763**	-0.652**	-0.765**	0.165	0.881**
4	-0.636**	0.631**	0.971**	-0.837**	-0.837**	-0.318	0.817**
5	-0.244	0.620**	0.784**	-0.755**	-0.850**	0.130	0.810**

注:1~12 分别代表叶绿素含量、初始荧光、电子传递速率、最大光化学效率、实际光化学效率、超氧化物歧化酶活性、过氧化物酶活性、过氧化氢酶活性、超氧阴离子产生速率、丙二醛含量、硝酸还原酶活性、谷氨酰胺合成酶活性。*表示在 0.05 水平显著相关;**表示在 0.01 水平极显著相关。

Note: 1-12 represent chlorophyll content, F_0 , ETR, F_v/F_m , YII, SOD activity, POD activity, CAT activity, superoxide anion production rate, MDA content, NR activity, GS activity, respectively. * represents significant correlation at 0.05 level; ** represents extremely significant correlation at 0.01 level.

显著负相关。

3 讨论与结论

植株叶片开始衰老后,体内 ROS 含量显著升高^[11],使生物高分子受损,导致膜脂过氧化,产生 MDA^[12]。研究表明,细胞内的抗氧化酶系统能够消除活性氧积累,减少膜质过氧化产物的产生^[13]。外

源褪黑素可以显著提高抗氧化酶 SOD、POD、CAT 活性,增强对 ROS 的清除能力,进而减少 MDA 过度积累^[14]。在本研究中,与 CK 相比,适宜浓度的褪黑素处理显著提高了叶片内抗氧化酶 SOD、POD、CAT 活性,降低活性氧含量。该研究结果与王雅楠^[15]对番茄的研究结果一致。这表明褪黑素通过提高叶片内抗氧化酶 SOD、POD、CAT 活性,提高对活

性氧的清除效率,从而缓解叶片衰老。

叶绿素是叶片光合作用的主要色素,叶片衰老的显著特征为叶片失绿黄化^[16]。植物光合作用会受到 PSII 和 PSI 反应中心活性的影响^[17]。前人研究发现,衰老逆境会对植株造成明显的光抑制现象,导致光系统遭到不同程度的破坏,使叶片中电子传递速率和光化学效率显著降低^[18]。研究表明,喷施褪黑素可以增加叶片叶绿素含量,从而提高叶片对光能的利用率,降低光系统的损伤程度^[19]。在本研究中,适宜浓度的褪黑素处理提高了叶片的叶绿素含量及叶绿素荧光重要动力学参数 F_v/F_m 、YII、ETR,这与刘昆^[20]在黄瓜上的研究结果基本一致。这可能是适宜浓度的褪黑素处理提高了叶片内叶绿素含量,维持坐果节位叶片发育后期 PSII 和 PSI 的较高活性,保证了叶片对光能的吸收转化,提高叶片内营养物质含量,从而延缓叶片早衰。

大多数植物可以利用硝态氮和铵态氮作为氮源,适当水平的硝态氮可以促进氮代谢,从而有利于植物生长^[21]。硝态氮和铵态氮广泛存在于自然界,是植物可吸收利用的两种无机氮源^[22],硝态氮通过 NR 还原才能被作物吸收并利用,NR 活性直接影响植物对硝态氮的利用效率^[23],GS 参与铵离子的回收并形成谷氨酰胺^[24],以维持氮素循环高效运行,因此,NR 与 GS 活性是衡量氮素同化代谢水平高低的重要因子。相关研究表明,褪黑素可以提高植物叶片 NR、GS 活性,降低硝态氮、铵态氮含量^[25],加速对氮素的转化利用。在本研究中,适宜浓度的褪黑素处理显著提高了坐果节位叶片氮代谢酶活性,提高了对硝态氮、铵态氮的利用效率,进而增强植物对氮素吸收和利用的能力,缓解植株因早衰对氮代谢系统的抑制程度,这与 Xu 等^[26]在黄瓜中的研究结果基本一致。

研究发现,当植物遭受环境胁迫时,叶片光合重要动力学参数下降,与 ROS 积累显著相关,而抗氧化酶活性和氮同化关键基因(GS2)的上调协同缓解了光合损伤^[27-28]。本研究结果表明,叶绿素含量与 SOD 活性、NR 活性呈极显著正相关,ETR、 F_v/F_m 、YII 与 POD 活性、CAT 活性、GS 活性呈极显著正相关,说明叶绿素荧光、抗氧化酶与氮代谢酶有协同作用。喷施褪黑素溶液后,通过提升光系统 PSII 和 PSI 活性,提高光合效能;通过提升抗氧化酶活性,提高对活性氧的清除效率;通过促进对氮素的吸收,保证对植株的能量供应,从而缓解叶片的衰老进程。

综上所述,在厚皮甜瓜植株雌花开放时,叶面喷施适宜浓度的外源褪黑素可提高叶片的抗氧化酶活性及活性氧的清除效率,并通过提高叶片内叶绿素含量、氮代谢酶活性、PSII 和 PSI 反应中心的活性及电子转移效率,提高叶片对光能、氮素的吸收利用率,从而缓解叶片的衰老进程。在本试验条件下,以 $200 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 褪黑素溶液延缓甜瓜植株叶片衰老的效果最佳。

参考文献

- [1] XU L L, HE Y H, TANG L L, et al. Genetics, genomics, and breeding in melon[J]. *Agronomy*, 2022, 12(11): 2891.
- [2] 李田, 刘海河, 张彦萍, 等. 叶面喷施磷酸二氢钾对厚皮甜瓜坐果节位叶片早衰机理调控的研究[J]. *河北农业大学学报*, 2018, 41(3): 61-66.
- [3] 刘松虎, 王贺贺, 张州, 等. 外源褪黑素对高温胁迫下黄瓜幼苗生长的影响[J]. *中国瓜菜*, 2025, 38(1): 109-114.
- [4] ZHANG J, LI H, XU B, et al. Exogenous melatonin suppresses dark-induced leaf senescence by activating the superoxide dismutase-catalase antioxidant pathway and down-regulating chlorophyll degradation in excised leaves of perennial ryegrass (*Lolium perenne* L.)[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2016, 7: 1500.
- [5] 李荣, 焦志阳, 银珊珊, 等. 喷施褪黑素对黄瓜幼苗耐盐效应研究[J]. *中国瓜菜*, 2023, 36(1): 53-58.
- [6] ZHANG R M, SUN Y K, LIU Z Y, et al. Effects of melatonin on seedling growth, mineral nutrition, and nitrogen metabolism in cucumber under nitrate stress[J]. *Journal of Pineal Research*, 2017, 62(4): e12403.
- [7] 周铎航, 陈艳丽, 王敏, 等. 外源抗坏血酸对网纹甜瓜抗早衰和果实品质的影响[J]. *种子*, 2022, 41(6): 84-88.
- [8] 李田. 外源赤霉素和抗坏血酸对厚皮甜瓜坐果节位叶片早衰的调控机理研究[D]. 河北保定: 河北农业大学, 2018.
- [9] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [10] 李玲, 何国振. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 2021.
- [11] 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.
- [12] MOLLER I M, JENSEN P E, HANSSON A. Oxidative modifications to cellular components in plants[J]. *Annual Review of Plant Biology*, 2007, 58: 459-481.
- [13] 徐宁, 孙晓慧, 曹娜, 等. 外源褪黑素对硝酸盐胁迫下番茄幼苗生长及渗透调节物质的影响[J]. *中国瓜菜*, 2020, 33(9): 23-27.
- [14] 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.
- [15] 王雅楠. 褪黑素缓解番茄叶片衰老的生理和分子机制[D]. 山东泰安: 山东农业大学, 2023.
- [16] 周海月, 刘维信, 陈熙, 等. 高温胁迫下外源褪黑素对胶州大白菜幼苗生理特性的影响[J]. *中国瓜菜*, 2023, 36(11): 50-56.

- [17] 朱波,徐绮雯,马淑敏,等.干旱缺钾对油菜内源激素、光合作
用和叶绿素荧光特性的影响[J].中国油料作物学报,2022,44
(3):570-580.
- [18] 朱立保,刘海河,张彦萍,等.芸薹素内酯对厚皮甜瓜坐果节位
叶片衰老及叶绿素荧光特性的影响[J].河北农业大学学报,
2014,37(4):58-62.
- [19] ZHANG X W, FENG Y Q, JING T T, et al. Melatonin promotes
the chilling tolerance of cucumber seedlings by regulating anti-
oxidant system and relieving photoinhibition[J]. *Frontiers in
Plant Science*, 2021, 12: 789617.
- [20] 刘昆.外源褪黑素对黄瓜叶片衰老的调控机制研究[D].山东
泰安:山东农业大学,2022.
- [21] CUI G, ZHANG Y, ZHANG W J, et al. Response of carbon and
nitrogen metabolism and secondary metabolites to drought
stress and salt stress in plants[J]. *Journal of Plant Biology*, 2019,
62(6):387-399.
- [22] 王乾,王康才,郑晨曦,等.不同形态氮对掌叶半夏生长及块茎
主要化学成分的影响[J].植物营养与肥料学报,2014,20(4):
1038-1043.
- [23] 甄骏超,张彦萍,刘海河,等.外源镁对厚皮甜瓜结果期氮代谢
的影响[J].河北农业大学学报,2022,45(3):63-68.
- [24] 牛超,刘关君,曲春浦,等.谷氨酸合成酶基因及其在植物氮代
谢中的调节作用综述[J].江苏农业科学,2018,46(9):10-16.
- [25] 赵佳冰,杜常健,马长明,等.板栗燕山早丰幼苗光合与碳氮代
谢对干旱胁迫的响应[J].应用生态学报,2020,31(11):
3674-3680.
- [26] XU Y, XU R, LI S H, et al. The mechanism of melatonin promo-
tion on cucumber seedling growth at different nitrogen levels[J].
Plant Physiology and Biochemistry, 2024, 206: 108263.
- [27] PARVATHI M S, DHANYALAKSHMI K H, NATARAJA K N.
Molecular mechanisms associated with drought and heat toler-
ance in plants and options for crop improvement for combined
stress tolerance[J]. *Agronomic Crops*, 2020, 10: 481-502.
- [28] REDDY A R, CHAITANYA K V, VIVEKANANDAN M.
Drought- induced responses of photosynthesis and antioxidant
metabolism in higher plants[J]. *Journal of Plant Physiology*,
2004, 161(11): 1189-1202.