

引用格式: 吴志达, 蔡欧祈, 林月扬, 等. 外源褪黑素与施氮量对自然高温胁迫下甘薯产量及品质的影响[J]. 浙江农林大学学报, 2026, 43(4): 803–815. WU Zhida, CAI Ouqi, LIN Yueyang, *et al.* Effects of exogenous melatonin and nitrogen application rate on yield and quality of sweet potatoes under natural high-temperature stress[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2026, 43(4): 803–815.

外源褪黑素与施氮量对自然高温胁迫下 甘薯产量及品质的影响

吴志达¹, 蔡欧祈², 林月扬³, 刘志良¹, 段毅⁴

(1. 浙江省泰顺县农业农村局, 浙江 泰顺 325500; 2. 浙江省泰顺县蔡欧祈家庭农场, 浙江 泰顺 325500; 3. 浙江省泰顺县雪堡农业专业合作社, 浙江 泰顺 325500; 4. 中国林业科学研究院 亚热带林业实验中心, 江西 新余 336600)

摘要: 【目的】探明外源褪黑素与施氮量协同作用缓解甘薯 *Ipomoea batatas* 高温胁迫、调控产量与品质形成的机制, 为浙南丘陵山区甘薯抗高温栽培提供理论依据。【方法】于 2023—2025 年设 3 个外源褪黑素浓度 [0 (M0)、100 (M1)、200 (M2) $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$] 和 4 个施氮水平 [0 (N0)、75 (N1)、150 (N2)、225 (N3) $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$], 探究高温胁迫下不同处理对甘薯叶片抗氧化酶活性、膜脂过氧化程度、光合特性、碳氮代谢、根系形态生理、产量品质及经济效益的影响。【结果】高温胁迫下, 甘薯叶片超氧化物歧化酶 (SOD)、过氧化物酶 (POD) 活性、净光合速率 (P_n)、最大光化学效率 (F_v/F_m) 及硝酸还原酶 (NR)、蔗糖磷酸合成酶 (SPS) 和块根蔗糖合成酶 (SS) 活性均随胁迫时间延长呈下降趋势, 而丙二醛 (MDA) 质量摩尔浓度持续上升。以胁迫 20 d 为例, 相较于 M0N0 处理, M1N2 可提升 SOD、POD 抗氧化酶活性, 有效提高 P_n 和 F_v/F_m , 还可上调 NR、SPS、SS 相关酶活性, 降低植株体内 MDA 质量摩尔浓度。高温胁迫解除后, 与 M0N0 处理相比, M1N2 可使植株根长、根系活力明显提升, 进而有效改善作物产量与品质, 提升种植经济效益。相关性分析表明: 产量、品质与 MDA 呈极显著负相关, 与其他指标均呈极显著正相关 ($P<0.01$); 隶属函数确定 M1N2 为最优处理。【结论】喷施 100 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 外源褪黑素, 配施 150 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 氮肥, 可有效增强甘薯叶片抗氧化能力, 缓解膜脂过氧化损伤和维持光合功能, 进而协同调控碳氮代谢平衡, 促进根系发育, 提升产量与品质, 有效提高经济效益, 可在浙南丘陵山区甘薯种植中推广应用。图 9 表 7 参 36

关键词: 高温胁迫; 褪黑素; 施氮量; 甘薯; 品质; 产量

中图分类号: S531 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2026)04-0803-13

Effects of exogenous melatonin and nitrogen application rate on yield and quality of sweet potatoes under natural high-temperature stress

WU Zhida¹, CAI Ouqi², LIN Yueyang³, LIU Zhiliang¹, DUAN Yi⁴

(1. Taishun County Agriculture and Rural Bureau, Taishun 325500, Zhejiang, China; 2. Cai Ouqi Family Farm of Taishun County, Taishun 325500, Zhejiang, China; 3. Taishun County Xuebao Agricultural Professional Cooperative, Taishun 325500, Zhejiang, China; 4. Experimental Center of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Xinyu 336600, Jiangxi, China)

Abstract: [Objective] To investigate the synergistic regulatory mechanism of exogenous melatonin and nitrogen application rate under high-temperature stress in sweet potatoes (*Ipomoea batatas*) and enhancing yield and quality formation, thereby providing a theoretical basis for heat-resistant sweet potato cultivation in the hilly

收稿日期: 2025-11-17; 修回日期: 2026-05-15

基金项目: 浙江省农业农村厅 2023—2025 年粮油产业技术项目 (浙农科发〔2023〕13 号)

作者简介: 吴志达 (ORCID: 0009-0002-5293-2718), 从事农业技术推广应用研究。E-mail: lingyin160730@163.com。

通信作者: 刘志良 (ORCID: 0009-0004-7128-1193), 高级农艺师, 从事农业技术推广研究。E-mail: lzliang213@163.com

and mountainous regions of southern Zhejiang. [Method] From 2023 to 2025, 3 exogenous melatonin concentrations with 0 (M0), 100 (M1), 200 (M2) $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ and 4 nitrogen application levels with 0 (N0), 75 (N1), 150 (N2), 225 (N3) $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ were established to investigate the effects of different treatments on antioxidant enzyme activities, membrane lipid peroxidation, photosynthetic characteristics, carbon and nitrogen metabolism, root morphology and physiology, yield, quality, and economic benefits of sweet potato leaves under high-temperature stress. [Result] Under high-temperature stress, the activities of superoxide dismutase (SOD) and peroxidase (POD), net photosynthetic rate (P_n), maximum photochemical efficiency (F_v/F_m), as well as the activities of nitrate reductase (NR), sucrose phosphate synthase (SPS), and sucrose synthase (SS) in sweet potatoes leaves all exhibited a decreasing trend with the prolongation of stress duration, while the malondialdehyde (MDA) content continuously increased. Taking the 20th day of stress as an example, compared with M0N0, the M1N2 treatment significantly increased SOD and POD activities, thereby enhancing P_n and F_v/F_m , promoting the activities of NR, SPS, and SS, while reducing MDA content. After the cessation of high-temperature stress, compared with M0N0, the M1N2 treatment significantly increased root length and root activity. Ultimately, it significantly improved yield, quality, and economic benefits. Correlation analysis indicated that yield and quality were extremely significantly negatively correlated with MDA, and extremely significantly positively correlated with all other indicators ($P<0.01$). Membership function analysis identified M1N2 as the optimal treatment. [Conclusion] Foliar spraying of 100 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ melatonin along with 150 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ nitrogen effectively enhances leaf antioxidant capacity, alleviates membrane lipid peroxidation, and sustains photosynthesis of sweet potatoes under high-temperature stress. This synergistic regulation improves carbon-nitrogen metabolic balance, root development, yield, quality, and economic returns, supporting its application in the hilly areas of southern Zhejiang. [Ch, 9 fig. 7 tab. 36 ref.]

Key words: high-temperature stress; melatonin; nitrogen application rate; sweet potatoes; quality; yield

甘薯 *Ipomoea batatas* 作为全球重要的粮食、饲料和工业原料兼用作物,其生产的稳定对于保障粮食安全具有重要作用。中国浙南丘陵山区的泰顺县,素有“浙南薯仓”之称,甘薯种植面积达 0.8 万 hm^2 , 占全县旱地作物面积的 60%。然而,受全球气候变化的影响,该地区夏季高温频发且日趋严重。气象资料表明:2020 年以来,该地区 7—9 月 35 $^{\circ}\text{C}$ 以上高温逐年增多,2022 年夏季高温天数达 22 d,2023 年夏季出现持续近 20 d 的极端高温^[1]。持续高温环境会严重抑制甘薯块根生长发育,易造成薯块形态畸形,致使产量与品质大幅降低,已对区域甘薯安全生产及农户经济收益造成严峻威胁^[2]。因此,探明高温胁迫下甘薯产量品质形成的限制因素并寻求有效调控途径,对稳定区域甘薯产量和保障种植经济效益具有重要现实意义。

高温胁迫会多方面抑制作物的生理代谢与产量形成^[3]。当温度持续超过作物适宜范围时,光合系统结构会受损,导致净光合速率 (P_n) 和 PS II 最大光化学效率 (F_v/F_m) 下降,光合产物积累减少^[4]。同时,高温引发活性氧 (ROS) 代谢失衡,造成丙二醛 (MDA) 升高和细胞膜透性增大^[5]。作物虽可通过提高抗氧化酶活性以清除过量 ROS,但持续胁迫会超出作物自我调节能力,导致抗氧化系统功能衰退、植株衰老进程加快,最终造成产量与品质降低^[6]。外源植物生长调节物质是缓解高温胁迫的有效途径之一。研究表明:喷施适宜浓度褪黑素可作为抗氧化剂直接清除 ROS,并能上调抗氧化酶基因表达,减轻膜脂过氧化,维持细胞膜完整性^[7]。褪黑素还能改善高温下的光合性能,延缓叶绿素降解,并通过调节蔗糖磷酸合成酶 (SPS) 和蔗糖合成酶 (SS) 等碳氮代谢关键酶活性,促进光合产物向贮藏器官转运与分配,从而提升作物产量和品质^[8]。氮素营养在增强作物耐热性方面同样关键。合理施氮可缓解高温对保护酶活性的抑制,减缓叶绿素与光合参数的下降,维持光合生产能力^[9]。适量氮肥还能增强抗氧化防御、延缓叶片衰老,并通过促进蔗糖合成酶活性增强库器官竞争能力,进而提高经济产量^[10]。

目前,关于褪黑素与氮素协同缓解高温胁迫的研究多以三大粮食作物为主,针对甘薯花后高温缓解

措施的报道较为缺乏。因此,本研究以浙南主栽甘薯品种‘浙薯 13 号’‘Zheshu 13’为材料,设置不同褪黑素浓度与施氮量的双因素裂区试验,研究高温胁迫下甘薯抗氧化特性、光合性能、碳氮代谢酶活性、根系形态生理及产量品质的响应,重点阐明褪黑素与氮素协同调控甘薯耐热性的生理机制与互作效应,以期为浙南丘陵区甘薯抗高温栽培提供理论依据。

1 研究区与方法

1.1 研究区概况

试验于 2023 年 5 月至 2025 年 10 月在浙江省温州市泰顺县蔡欧祈家庭农场 (27°33'N, 119°42'E) 进行。该农场位于浙南丘陵山区,属亚热带季风气候,试验期间年均气温为 18.5℃,年降水量约 1 900.0 mm。7—9 月为高温胁迫关键期,月平均最高气温为 33.0~35.0℃,极端最高气温可达 38.5℃。研究区土壤为丘陵坡地红壤,是浙南山区典型的甘薯种植土壤,肥力均匀,属中等偏下水平,研究区 0~40 cm 土层的土壤基础理化性质如表 1 所示。

表 1 研究区土壤基础理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of soil in the study area

土层/cm	pH	有机质/(g·kg ⁻¹)	全氮/(g·kg ⁻¹)	碱解氮/(mg·kg ⁻¹)	速效磷/(mg·kg ⁻¹)	速效钾/(mg·kg ⁻¹)
0~20	6.32	16.82	1.38	92.54	18.60	105.28
20~40	6.45	14.36	1.02	68.75	12.49	84.62

1.2 试验设计

试验品种为‘浙薯 13 号’,小垄单行种植,垄距为 0.75 m,垄高为 25.00~30.00 cm,株距约 0.30 m。采用双因素裂区设计,因素 1 为外源褪黑素: 0 (M0)、100 (M1)、200 (M2) $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$;因素 2 为施氮水平: 0 (N0)、75 (N1)、150 (N2)、225 (N3) $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,试验共计 12 个处理,每处理 3 次重复,小区面积为 60 m² (10 m×6 m),小区间设 1 m 保护行,随机排列。于移栽后 30 d 开始启动持续 21 d 的高温胁迫,在每日 10:00—16:00 通过智能温控系统维持棚内温度 35~38℃,当棚内温度超过 38℃时,自动开启棚体两侧通风口辅助降温,棚内悬挂自动温湿度记录仪,隔 30 min 采集并存储 1 组数据(表 2)。外源褪黑素(纯度≥99%)在避光环境下配置,用少量无水乙醇溶解褪黑素粉末,再将其加入含有体积分数为 0.05% Tween-80 的表面活性剂水溶液中,搅拌至完全澄清,最后用去离子水定容至目标浓度,于胁迫开始当天及之后每 7 d 傍晚喷施叶片正反面,共喷 3 次,喷施量为 100 mL·m⁻²。移栽前一次性基施过磷酸钙(五氧化二磷质量分数为 16%)和氯化钾(氧化钾质量分数为 50%),用量分别为 120、90 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,在移栽前和移栽后 45 d(胁迫后期)分别施入等量尿素(氮质量分数为 46%)。

表 2 高温胁迫期间气温变化

Table 2 Changes of air temperature during the period of high-temperature stress

年份	平均气温/℃			
	0 d	7 d	14 d	21 d
2023	35.28	36.81	36.82	36.95
2024	35.57	37.25	37.85	37.15
2025	35.84	37.64	36.42	37.68

1.3 测定指标与方法

1.3.1 样品采集 ①叶片采集。于高温胁迫第 10 天和第 20 天 08:00—10:00 在每小区随机选取 5 株长势一致的植株,采集 3~4 片功能叶,用于抗氧化系统、膜系统稳定性和相关酶活性测定。②根系采集。于高温胁迫结束 10 d 后,每小区选取 3 株植株,以茎为中心,挖半径为 10 cm,高为 40 cm 的近似圆柱体^[11],小心挖掘完整根系,轻轻抖落大块土壤,用清水冲洗干净,用于根系指标测定。③块根采集。于收获期,在每小区随机选取 10 个大小均匀、无损伤的块根,洗净、擦干后,切取块根中部组织,混合粉碎,用于品质测定。

1.3.2 抗氧化系统与膜系统稳定性 于高温胁迫第 10 天和第 20 天,采用试剂盒分别测定甘薯叶片的超氧化物歧化酶(SOD)活性、过氧化物酶(POD)活性和丙二醛(MDA)质量摩尔浓度^[12]。

1.3.3 光合性能 于高温胁迫第 10 天和第 20 天,使用 Li-6400XT 便携式光合仪测定净光合速率(P_n),

采用脉冲振幅调制 (PAM) 叶绿素荧光仪测定 PS II 最大光化学效率 (F_v/F_m)。

1.3.4 碳氮代谢关键酶活性 于高温胁迫第 10 天和第 20 天, 采用试剂盒分别测定硝酸还原酶 (NR) 活性、蔗糖磷酸合成酶 (SPS) 活性和块根蔗糖合成酶 (SS) 活性^[13]。

1.3.5 根系形态与生理 于高温胁迫结束后 10 d, 采用根系扫描分析系统获取根总长, 采用氯化三苯基四氮唑还原法 (TTC) 测定根系活力。

1.3.6 产量形成与品质构建 在收获期, 采用蒽酮-硫酸法测定淀粉质量分数, 采用 3,5-二硝基水杨酸法测定可溶性糖质量分数, 测定单薯质量和产量, 并计算总投入、总收入、净利润。

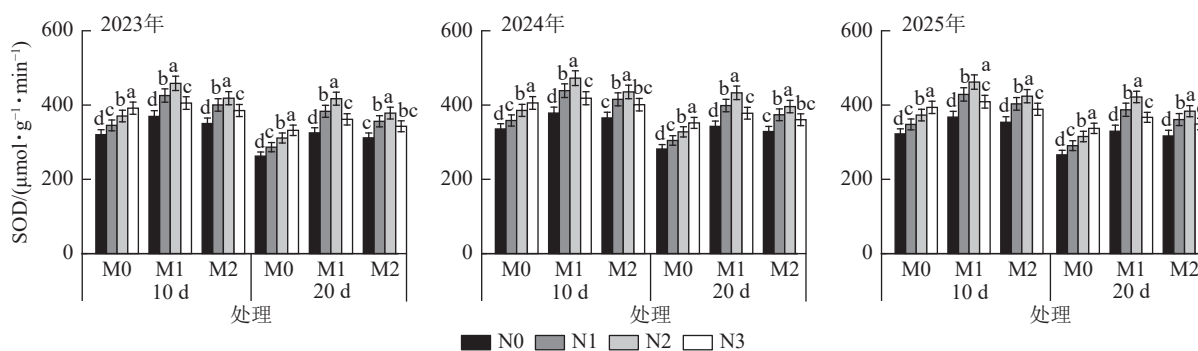
1.4 数据处理

采用 Excel 2022 对数据进行整理和隶属函数分析; 采用 SPSS 22 进行双因素方差分析 (two-way ANOVA) 和 Duncan 法多重比较分析 ($\alpha=0.05$); 采用 Origin 2025 进行绘图和 Pearson 相关性分析。

2 结果与分析

2.1 高温胁迫下褪黑素与施氮量对甘薯抗氧化系统和膜系统稳定性的影响

2.1.1 超氧化物歧化酶 (SOD) 由图 1 可知: 随着高温胁迫持续, 所有处理在 20 d 时的 SOD 活性均较 10 d 时有所降低。10 d 时, 相同褪黑素处理下 N2 效果最佳, 相同施氮量下 M1 效果最佳, 20 d 时规律一致, 且整体以 M1N2 处理效果最优。

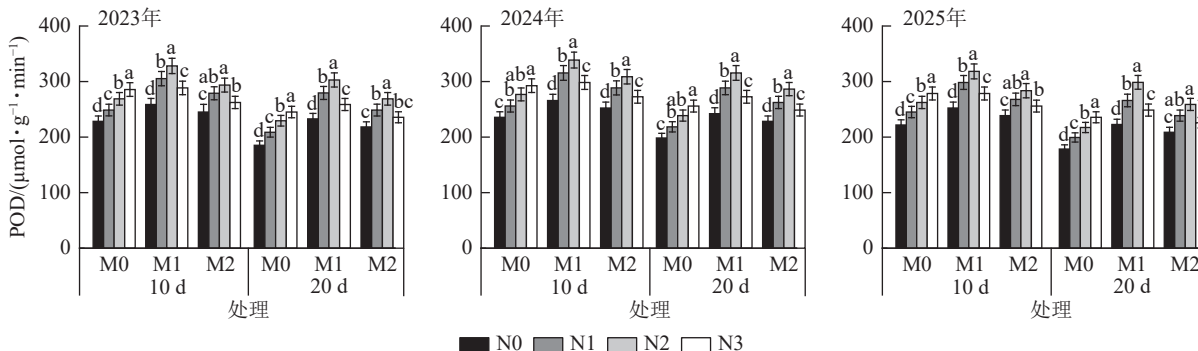


不同小写字母表示相同褪黑素处理下各施氮量处理间差异显著 ($P<0.05$)。

图 1 褪黑素与施氮量对甘薯超氧化物歧化酶 (SOD) 活性的影响

Figure 1 Effects of melatonin and nitrogen application rate on superoxide dismutase (SOD) activity in *I. batatas*

2.1.2 过氧化物酶 (POD) 由图 2 可知: 随着高温胁迫持续, 所有处理在 20 d 时的 POD 活性均较 10 d 时明显降低。10 d 时, 相同褪黑素处理下 N2 处理效果最佳, 相同施氮量处理下 M1 处理效果最佳, 20 d 时趋势相同, 且整体以 M1N2 处理效果最佳。



不同小写字母表示相同褪黑素处理下各施氮量处理间差异显著 ($P<0.05$)。

图 2 褪黑素与施氮量对甘薯过氧化物酶 (POD) 活性的影响

Figure 2 Effects of melatonin and nitrogen application rate on peroxidase (POD) activity in *I. batatas*

2.1.3 丙二醛 (MDA) 由图 3 可知: 所有处理在 20 d 时的 MDA 质量摩尔浓度均较 10 d 时有所提升。10 和 20 d 时的结果一致, 相同褪黑素处理下 N2 效果最佳, 相同施氮量处理下 M1 处理最佳, 整体以 M1N2 处理最佳。

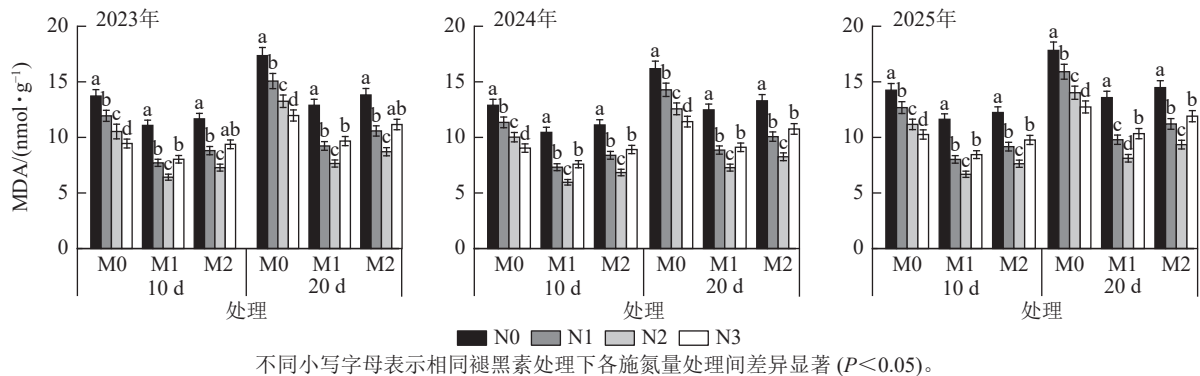
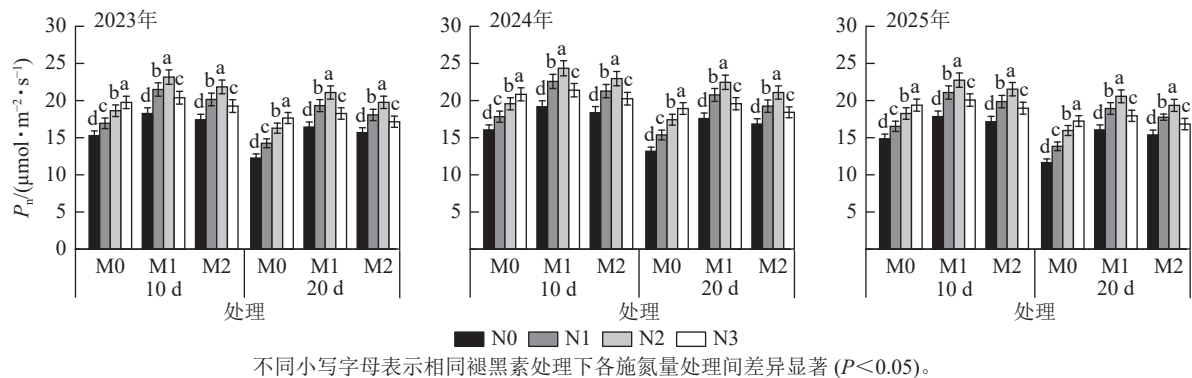


图 3 褪黑素与施氮量对甘薯丙二醛 (MDA) 质量摩尔浓度的影响

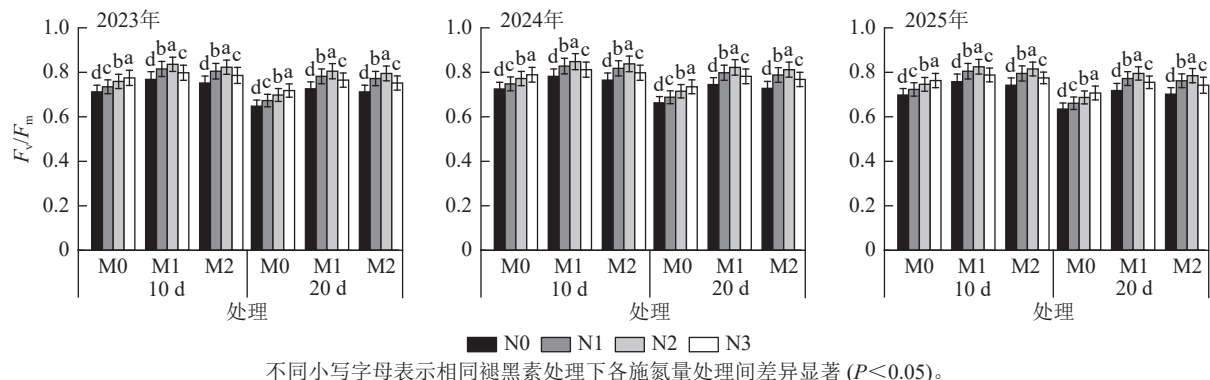
Figure 3 Effects of melatonin and nitrogen application rate on malondialdehyde (MDA) content in *I. batatas*

2.2 高温胁迫下褪黑素与施氮量对甘薯光合性能的影响

2.2.1 净光合速率 (P_n) 由图 4 可知：随着高温胁迫持续，所有处理在 20 d 时的 P_n 均较 10 d 时明显降低。10 和 20 d 时，均表现出相同褪黑素处理下 N2 效果最佳，相同施氮量处理下 M1 效果最佳，整体均以 M1N2 效果最佳。

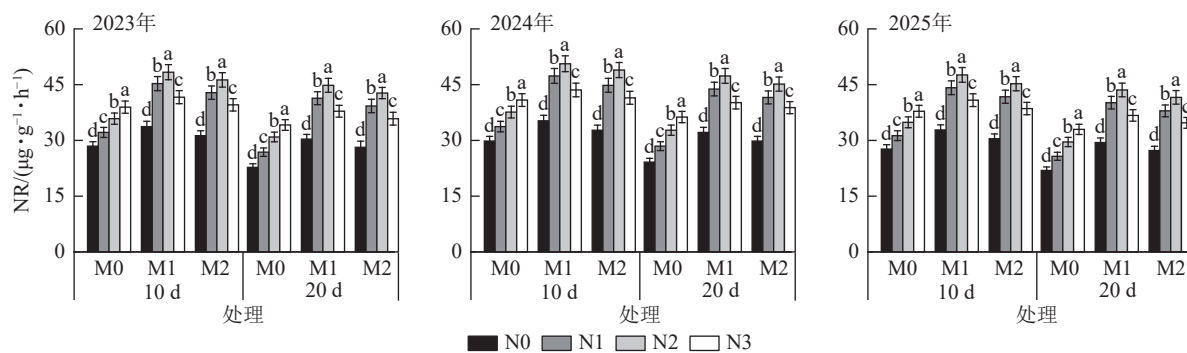
图 4 褪黑素与施氮量对甘薯净光合速率 (P_n) 的影响Figure 4 Effects of melatonin and nitrogen application rate on net photosynthetic rate (P_n) in *I. batatas*

2.2.2 最大光化学效率 (F_v/F_m) 由图 5 可知：随着高温胁迫持续，所有处理在 20 d 时的 F_v/F_m 均较 10 d 时明显降低。10 和 20 d 时的处理效果相同，相同褪黑素处理下 N2 效果最佳，相同施氮量处理下 M1 效果最佳，整体均以 M1N2 处理最佳。

图 5 褪黑素与施氮量对甘薯最大光化学效率 (F_v/F_m) 的影响Figure 5 Effects of melatonin and nitrogen application rate on maximum photochemical efficiency (F_v/F_m) in *I. batatas*

2.3 高温胁迫下褪黑素与施氮量对甘薯碳氮代谢关键酶活性的影响

2.3.1 硝酸还原酶 (NR) 由图 6 可知：随着高温胁迫持续，所有处理在 20 d 时的 NR 活性均较 10 d 时有所降低。10 和 20 d 时的处理效果相同，相同褪黑素处理下 N2 效果最佳，相同施氮量处理下 M1 效果最佳，整体均以 M1N2 效果最佳。

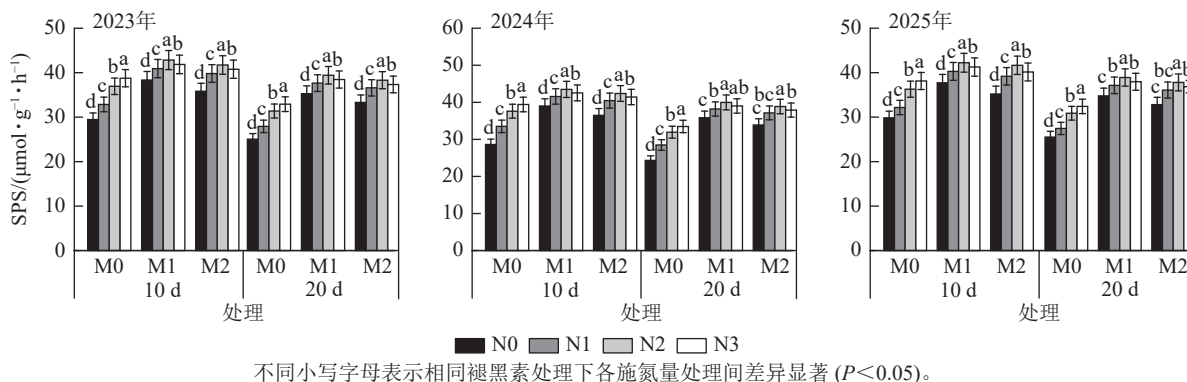


不同小写字母表示相同褪黑素处理下各施氮量处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

图6 褪黑素与施氮量对甘薯硝酸还原酶 (NR) 活性的影响

Figure 6 Effects of melatonin and nitrogen application rate on nitrate reductase (NR) activity in *I. batatas*

2.3.2 蔗糖磷酸合成酶 (SPS) 由图7可知: 随着高温胁迫持续, 所有处理在20 d时的SPS活性均较10 d时明显降低。10和20 d时的趋势基本相同, 即在相同褪黑素处理下N2效果最佳, 相同施氮量处理下M1效果最佳, 整体均以M1N2效果最佳。

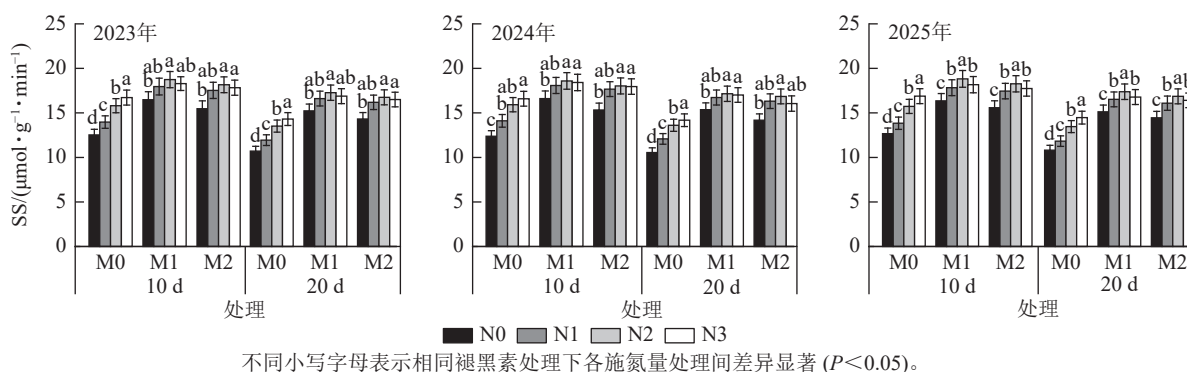


不同小写字母表示相同褪黑素处理下各施氮量处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

图7 褪黑素与施氮量对甘薯蔗糖磷酸合成酶 (SPS) 活性的影响

Figure 7 Effects of melatonin and nitrogen application rate on sucrose phosphate synthase (SPS) activity in *I. batatas*

2.3.3 蔗糖合成酶 (SS) 由图8可知: 随着高温胁迫持续, 所有处理在20 d时的SS活性均较10 d时明显降低。10和20 d时的处理效果基本相同, 即在相同褪黑素处理下N2效果最佳, 相同施氮量处理下M1效果最佳, 整体均以M1N2效果最佳。



不同小写字母表示相同褪黑素处理下各施氮量处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

图8 褪黑素与施氮量对甘薯蔗糖合成酶 (SS) 活性的影响

Figure 8 Effects of melatonin and nitrogen application rate on sucrose synthase (SS) activity in *I. batatas*

2.4 高温胁迫下褪黑素与施氮量对甘薯根形态及生理的影响

由表3可知: 高温结束后, 相同褪黑素处理下, 根长和根系活力均以N2处理最佳; 相同施氮量处理下, 以M1处理最佳; 整体来看, 以M1N2处理最佳。

2.5 高温胁迫下褪黑素与施氮量对甘薯品质及产量的调控效应

2.5.1 品质 由表4可知: 高温结束后, 相同褪黑素处理下, 淀粉和可溶性糖质量分数均以N2处理最

表 3 褪黑素与施氮量对甘薯根长及根系活力的影响

Table 3 Effects of melatonin and nitrogen application rate on root length and root activity in <i>I. batatas</i>							
褪黑素处理	施氮量处理	根长/cm			根系活力/($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$)		
		2023年	2024年	2025年	2023年	2024年	2025年
M0	N0	287.63±14.38 d	275.84±13.79 d	295.27±14.76 c	368.42±18.42 d	354.67±17.73 d	371.86±18.59 d
	N1	331.27±16.56 c	326.49±16.32 c	315.84±15.79 b	405.83±20.29 c	398.24±19.96 c	389.45±19.45 c
	N2	372.59±18.63 b	351.83±17.59 b	369.46±18.47 ab	445.16±22.26 b	438.59±21.83 b	447.28±22.36 b
	N3	396.84±19.84 a	394.27±19.72 a	379.53±18.98 a	468.73±23.52 a	465.38±23.27 a	476.59±23.84 a
M1	N0	385.92±19.30 c	366.45±18.32 c	387.64±19.36 c	458.26±22.91 c	460.82±23.04 c	472.16±23.61 c
	N1	438.47±21.42 b	422.86±20.59 b	434.82±21.24 b	511.38±25.07 b	513.17±25.16 b	502.74±24.65 b
	N2	453.82±22.69 a	435.64±21.78 a	451.27±22.56 a	537.59±26.87 a	545.28±27.26 a	533.84±26.69 a
	N3	434.16±21.71 b	418.93±20.95 b	431.59±21.58 b	509.74±25.49 b	511.46±25.57 b	496.68±24.97 b
M2	N0	354.38±17.72 c	348.96±17.29 c	337.45±16.87 c	428.45±21.42 c	441.83±22.09 c	435.64±21.78 c
	N1	422.63±20.63 b	405.28±19.76 b	418.72±20.66 b	494.92±24.25 bc	497.59±24.38 bc	492.59±24.13 bc
	N2	441.28±22.06 a	425.46±21.27 a	436.84±21.84 a	514.67±25.73 a	516.74±25.86 a	511.27±25.56 a
	N3	419.54±20.98 b	404.82±20.24 b	415.38±20.26 b	492.38±24.62 b	495.27±24.95 b	490.45±24.52 b

说明：不同小写字母表示相同褪黑素处理下各施氮量处理间差异显著 ($P<0.05$)。

表 4 褪黑素与施氮量对甘薯品质的影响

Table 4 Effects of melatonin and nitrogen application rate on quality of <i>I. batatas</i>							
褪黑素处理	施氮量处理	淀粉质量分数/($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)			可溶性糖质量分数/($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)		
		2023年	2024年	2025年	2023年	2024年	2025年
M0	N0	153.4±7.6 c	154.2±7.0 c	152.7±8.5 c	43.1±2.6 b	44.8±2.2 b	43.7±2.4 b
	N1	168.2±8.4 b	167.8±8.4 b	168.5±9.2 b	46.8±2.7 b	46.2±2.3 b	46.5±2.5 b
	N2	184.6±9.2 ab	185.7±9.3 ab	184.2±9.6 ab	51.4±2.1 ab	52.7±2.6 a	51.8±2.8 ab
	N3	194.1±9.8 a	194.5±9.7 a	193.6±8.7 a	54.6±3.2 a	53.9±2.7 a	54.3±2.7 a
M1	N0	188.9±10.8 c	188.3±10.5 c	189.1±9.3 c	55.3±2.8 b	54.7±2.5 c	54.8±3.0 b
	N1	204.7±10.2 b	203.6±10.9 b	205.2±10.3 b	58.4±2.6 ab	57.1±2.9 b	57.9±3.1 ab
	N2	217.3±8.5 a	218.2±11.6 a	216.5±10.6 a	61.8±3.5 a	63.2±3.1 a	62.2±2.9 a
	N3	199.5±10.6 bc	198.5±8.7 bc	199.8±12.1 bc	56.9±1.9 b	55.8±2.8 bc	56.1±2.2 b
M2	N0	176.2±9.4 d	176.9±10.5 d	175.6±8.6 d	52.9±3.1 b	53.4±2.6 b	52.5±2.3 b
	N1	198.5±9.9 b	197.3±9.3 b	198.7±7.5 b	56.2±2.8 ab	54.9±2.8 b	55.6±3.2 ab
	N2	209.6±7.5 a	210.7±10.2 a	209.4±11.2 a	59.6±2.5 a	60.4±2.9 a	59.2±2.8 a
	N3	187.6±6.9 c	186.4±8.9 c	187.9±8.6 c	54.4±2.0 b	53.1±2.7 b	54.2±2.6 b

说明：不同小写字母表示相同褪黑素处理下各施氮量处理间差异显著 ($P<0.05$)。

佳；相同施氮量处理下，淀粉和可溶性糖质量分数均以 M1 处理最佳；整体来看，以 M1N2 处理最佳。

2.5.2 产量及其构成 由表 5 可知：高温结束后，相同褪黑素处理下，单薯质量和产量均以 N2 处理最佳；相同施氮量处理下，单薯质量和产量均以 M1 处理最佳；整体来看，以 M1N2 处理最佳。

2.5.3 经济效益 由表 6 可知：相同褪黑素处理下，总投入以 N3 处理最高，总收入和净利润以 N2 处理最高，较 N0 处理分别提高 23.93%、25.97%、29.49%；相同施氮量处理下，总投入以 M2 处理最高，总收入和净利润以 M1 处理最高，较 M0 处理分别提高 17.63%、20.14%、33.55%；整体来看，总投入以 M2N3 处理最高，总收入和净利润以 M1N2 处理最佳。综上所述，外源喷施 $100\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 褪黑素配合 $150\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 氮肥能够在保证增产提质的同时，通过优化资源配置实现投入产出效率最大化，提升甘薯生产的经济效益。

2.6 高温胁迫下甘薯对褪黑素与氮素互作的综合响应分析

2.6.1 相关性分析 从图 9 可知：产量与抗氧化酶 (SOD、POD)、光合特性 (P_n 、 F_v/F_m)、氮代谢 (NR)、

表 5 褪黑素与施氮量对甘薯产量及其构成的影响

Table 5 Effects of melatonin and nitrogen application rate on yield and its components in *I. batatas*

褪黑素处理	施氮量处理	单薯质量/g			产量/(kg·hm ⁻²)		
		2023年	2024年	2025年	2023年	2024年	2025年
M0	N0	158.65±7.92 c	161.35±8.07 c	164.15±8.21 b	28 482.50±1 509.27 d	28 721.95±1 436.58 c	28 908.62±1 483.57 d
	N1	175.86±8.79 b	182.71±9.12 b	171.45±8.58 b	31 295.83±1 564.46 c	32 228.63±1 615.39 b	29 668.71±1 727.42 c
	N2	193.94±9.71 ab	195.57±9.78 ab	198.28±9.92 a	33 829.17±1 691.12 b	34 038.75±1 701.96 a	34 548.75±1 935.23 b
	N3	201.76±10.09 a	198.43±9.93 a	202.57±9.64 a	35 397.62±1 719.65 a	34 307.92±1 715.43 a	35 742.92±1 881.25 a
M1	N0	194.35±9.73 c	193.86±9.70 c	200.52±10.03 c	32 386.28±1 669.56 d	33 678.50±1 687.32 c	34 578.13±1 622.06 d
	N1	213.92±11.30 ab	221.10±11.06 b	223.35±11.67 b	37 629.87±1 891.23 b	35 684.85±1 852.91 b	37 728.52±1 879.35 b
	N2	225.84±10.45 a	236.29±11.53 a	237.19±11.82 a	38 654.52±1 932.46 a	38 807.45±1 656.82 a	39 542.13±1 681.42 a
	N3	207.93±10.15 b	213.24±10.67 bc	214.32±9.29 bc	35 795.81±1 789.54 c	35 338.2±1 794.57 b	36 842.3±1 457.82 c
M2	N0	182.57±9.79 c	187.90±9.42 c	185.76±10.86 c	32 425.31±1 622.06 d	33 123.72±1 873.42 c	31 574.89±1 672.49 d
	N1	202.81±10.18 b	205.43±10.27 b	217.86±11.91 ab	35 474.53±1 753.15 b	35 887.37±1 963.78 b	36 498.54±1 783.25 b
	N2	217.70±8.32 a	228.91±11.45 a	225.09±10.35 a	37 591.67±1 879.35 a	37 612.43±1 784.65 a	37 318.08±1 784.28 a
	N3	195.63±9.57 bc	199.95±10.82 bc	204.13±8.66 b	33 671.82±1 682.37 c	35 426.84±1 852.93 b	34 857.36±1 682.57 c

说明：不同小写字母表示相同褪黑素处理下各施氮量处理间差异显著 ($P<0.05$)。

表 6 褪黑素与施氮量对甘薯经济效益的影响

Table 6 Effects of melatonin and nitrogen application rate on economic benefits in *I. batatas*

褪黑素处理	施氮量处理	总投入/(元·hm ⁻²)	总收入/(元·hm ⁻²)	净利润/(元·hm ⁻²)
M0	N0	19 583.28±979.85 c	46 772.42±2 329.52 c	27 189.14±1 354.29 d
	N1	22 596.40±1 063.57 b	51 951.26±2 563.87 b	29 354.86±1 563.75 c
	N2	23 699.98±1 147.28 a	56 589.73±2 772.43 ab	32 889.74±1 625.82 b
	N3	23 818.28±1 231.56 a	57 267.39±2 856.49 a	33 449.11±1 753.91 a
M1	N0	21 420.45±1 018.75 d	55 067.84±2 768.95 d	33 647.39±2 135.48 d
	N1	22 433.83±1 186.92 c	65 141.67±3 102.72 b	42 707.84±1 864.79 b
	N2	24 276.93±1 270.63 b	71 378.60±3 586.42 a	47 101.67±1 657.46 a
	N3	25 148.15±1 018.49 a	63 806.75±3 270.19 c	38 658.60±2 135.48 c
M2	N0	19 812.23±1 186.72 d	52 218.98±2 618.48 d	32 406.75±2 329.76 d
	N1	23 034.66±1 129.66 c	61 793.64±2 952.76 b	38 758.98±2 468.58 b
	N2	25 348.25±1 135.46 b	66 101.89±3 336.12 a	40 753.64±1 975.45 a
	N3	26 403.37±1 342.52 a	59 785.26±3 274.98 c	33 381.89±2 103.51 c

说明：不同小写字母表示相同褪黑素处理下各施氮量处理间差异显著 ($P<0.05$)；总投入包含农药、种苗、人工、地膜、滴灌设备、起垄作业、褪黑素、氮肥、磷钾肥等；收入按市场价格计算；数据为 3 a 经济效益均值。

碳代谢 (SPS、SS)、根系发育 (根长、根系活力) 及库强 (单薯质量) 均呈极显著正相关, 与 MDA 呈极显著负相关 ($P<0.01$), 表明甘薯产量的形成依赖于抗氧化系统对光合机构的有效保护、碳氮代谢的高效协调以及根系发育与库强调控的协同促进。可溶性糖、淀粉与上述指标均呈极显著正相关, 与 MDA 呈极显著负相关 ($P<0.01$), 表明可溶性糖和淀粉的积累与合成, 是甘薯植株碳氮代谢优化、光合效能提升、根系发育增强及库强增大的综合体现, 同时也依赖于抗氧化系统对膜脂过氧化的缓解作用。

2.6.2 隶属函数分析 由表 7 可知：在相同褪黑素水平下, 各处理的综合评分均随施氮量的增加呈先升后降的趋势, 其中 N2 处理最大, 与 N0 相比提高了 1.44; 在相同施氮水平下, 外源褪黑素的施用明显提升了综合评分, M1 处理最高, M0 处理最低; 褪黑素与氮肥表现出较强的交互作用, M1N2 处理在所有处理中综合评分最高, 综合分值为 1.00。可见, 高温胁迫下外源喷施 100 μmol·L⁻¹ 褪黑素配合 150 kg·hm⁻² 氮肥通过增强抗氧化系统活性和维持光合机构稳定性, 进而协同调控碳氮代谢关键酶活性并促进根系发育, 显著改善了植株的物质合成与吸收能力, 最终将生理优势高效转化为产量与品质的提升。

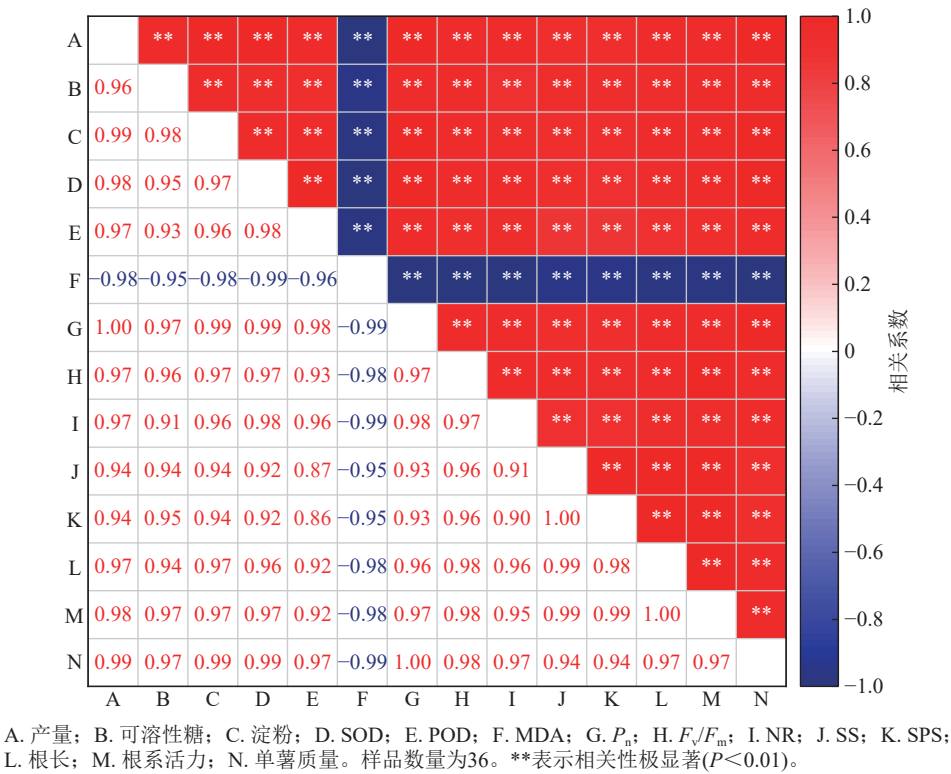


图 9 高温胁迫下产量、品质与各指标的相关性分析

Figure 9 Correlation analysis of yield, quality and various indicators under high-temperature stress

表 7 高温胁迫下各处理隶属函数分析

		评分值														综合 分值	排名
褪黑素 处理	施氮量 处理	产量	可溶性糖	淀粉	SOD	POD	MDA	P_n	F_v/F_m	NR	SS	SPS	根长	根系活力	单薯质量		
M0	N0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	12
	N1	0.23	0.14	0.23	0.17	0.20	0.22	0.22	0.17	0.18	0.21	0.23	0.24	0.19	0.21	0.20	11
	N2	0.53	0.44	0.49	0.34	0.38	0.41	0.45	0.35	0.37	0.48	0.50	0.49	0.45	0.48	0.44	10
	N3	0.63	0.56	0.64	0.48	0.53	0.55	0.60	0.48	0.52	0.61	0.62	0.65	0.61	0.55	0.57	7
M1	N0	0.47	0.60	0.55	0.37	0.35	0.40	0.43	0.49	0.31	0.67	0.69	0.58	0.57	0.49	0.50	8
	N1	0.81	0.75	0.80	0.77	0.77	0.82	0.80	0.85	0.84	0.89	0.87	0.91	0.83	0.81	0.82	3
	N2	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1
	N3	0.71	0.67	0.72	0.63	0.61	0.78	0.67	0.73	0.67	0.94	0.93	0.88	0.81	0.70	0.75	4
M2	N0	0.36	0.49	0.36	0.27	0.22	0.31	0.34	0.38	0.20	0.51	0.53	0.38	0.40	0.33	0.36	9
	N1	0.70	0.63	0.70	0.60	0.52	0.68	0.65	0.78	0.73	0.83	0.79	0.80	0.75	0.66	0.70	5
	N2	0.85	0.86	0.88	0.74	0.69	0.88	0.85	0.93	0.90	0.92	0.93	0.92	0.86	0.87	0.86	2
	N3	0.58	0.54	0.53	0.50	0.39	0.61	0.54	0.64	0.58	0.86	0.85	0.79	0.73	0.54	0.62	6

3 讨论

3.1 褪黑素与氮素协同增强抗氧化系统防御与膜稳定性

高温胁迫对作物抗氧化系统的干扰是引起作物减产的重要原因之一^[13]。研究表明：环境因素会激起马铃薯 *Solanum tuberosum* 植株合成抗氧化物质进行自我保护，在施加外源褪黑素后，抗氧化酶活性进一步增强^[14]。在高温条件下，马铃薯叶片 SOD 和 POD 活性均明显下降，而适宜的氮素供应能显著缓解高温胁迫危害^[15]。本研究也得出了相似的结果，即在高温胁迫中期，不添加褪黑素和氮肥处理的 SOD 和 POD 活性维持在相对较低但合理的水平，表明该处理下甘薯仍保留一定的基础防御能力。随着

胁迫持续至后期,不添加褪黑素和氮肥处理的酶活性较中期有所降低,而褪黑素与氮素配施处理在整个胁迫期间均保持较高的酶活性水平。这种持续的保护效应是因为:①褪黑素作为一种生理调节物质,能够激活植株抗氧化酶的活性及合成能力,有助于消除活性氧自由基,减轻胁迫所造成的损伤^[16-17]。②适量氮肥能够促进作物生长健壮,为抗氧化酶的合成和功能发挥创造良好条件,还为酶蛋白的合成与代谢修复提供了物质基础^[18]。两者协同有效延缓了抗氧化系统功能的衰退。MDA可直接反映细胞膜的受损状况^[19]。前人研究认为:高温胁迫下MDA含量的上升与抗氧化酶活性的下降密切相关^[20]。本研究发现:高温胁迫提高了MDA的积累,造成细胞膜受损。而褪黑素与氮素配施能够不同程度地缓解这种膜脂过氧化现象。表明褪黑素与氮肥在减轻膜脂过氧化方面具有明显的协同效应,即褪黑素通过增强抗氧化酶活性来减少膜脂过氧化的发生,而适宜的氮素为膜脂的合成与修复提供了物质基础,两者协同抑制MDA的积累^[20-21]。

3.2 褪黑素与氮素协同保障光合性能与碳氮代谢

有研究发现:逆境胁迫时马铃薯光合性能受到抑制,而喷施不同浓度的褪黑素后对净光合速率、气孔导度和胞间二氧化碳浓度均有不同程度的缓解作用^[22]。而适当增加氮素能提高马铃薯光合性能,减轻对光系统Ⅱ的伤害^[23]。马铃薯与甘薯同为薯类作物,在光合响应机制上具有一定的相似性。本研究也表明:在高温胁迫条件下,褪黑素与氮素配施处理则表现出明显的光合保护效应。其原因在于外源褪黑素可通过维持类囊体膜的稳定性,保护光合色素蛋白复合体,从而缓解高温对光合机构的损伤^[24]。适量氮素供应可促进叶绿素合成,提高Rubisco酶活性,为光合作用提供充分的物质与能量基础^[25]。褪黑素与氮素可高效维持膜系统稳定与光合机构完整,共同保障了甘薯叶片在高温胁迫下的光合功能稳定性。已有研究表明:高温胁迫会显著抑制碳氮代谢关键酶的活性,直接影响光合产物向贮藏器官的转运效率^[26]。本研究表明:外源喷施褪黑素配施氮肥处理显著缓解了高温胁迫对碳氮代谢关键酶活性的影响。可能是外源褪黑素与氮肥协同调控,既能维持叶片光合能力,为碳代谢提供充足的物质基础,又可依托氮素供给保障氮同化进程,有效平衡高温胁迫下甘薯碳氮代谢,助力光合产物向块根转运积累^[27-28]。

3.3 褪黑素与氮素协同优化根系功能促进产量品质形成

根系是作物吸收养分和水分的主要器官,其发育状况直接影响作物的抗逆性和产量形成。前人研究表明:高温胁迫会显著抑制根系生长,导致根长减少和根系活力下降,进而削弱植株的水分和养分吸收能力^[29]。而本研究中褪黑素配施氮肥则有效缓解根长和根系活力的降低。其原因在于外源褪黑素可作为信号分子激活植物体内的保守防御网络,有效保护根系细胞膜的完整性,促进逆境下根系的形态建成与功能维持^[30];氮素则为根系生长发育提供了必需的营养支持,协同褪黑素增强植株整体的胁迫适应能力,从而共同塑造健壮根系^[31]。产量和品质是衡量作物生产效益与商品价值的两大核心指标。本研究中,外源喷施 $100\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 褪黑素配施 $150\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 氮肥处理在产量与品质形成上表现最佳,该处理在块根产量、单薯质量、淀粉及可溶性糖质量分数上均优于其他处理,这主要归因于褪黑素与氮肥可协同促进根系建成、提升根系活力,既能增强植株水肥吸收能力以缓解高温胁迫伤害,又能通过根系信号调控光合产物向块根合理分配,最终实现甘薯产量与品质协同提升^[32-33]。此外,本研究结合变异系数发现:高温胁迫下各测定指标在不同处理间的变异系数偏高,这主要是浙南丘陵山区田间土壤湿度、肥力存在局部差异,且该差异在高温环境下被进一步加剧。

3.4 高温胁迫下甘薯对褪黑素与氮素互作的综合响应机制

本研究相关性分析发现:产量、品质与抗氧化酶、光合特性、氮代谢、碳代谢、根系发育及库强均呈极显著正相关,而与MDA呈极显著负相关,这表明维持较强的抗氧化能力、稳定的光合性能、协调的碳氮代谢以及发达的根系是作物抵御高温胁迫、保障产量与品质形成的关键生理基础^[29,34-36]。本研究通过隶属函数分析发现:不施用褪黑素时,即使施加最高施氮量,其综合评分仍低于施用褪黑素的低氮处理,这表明外源褪黑素可在相同氮肥水平下明显提升甘薯抗逆性,或在更低氮肥投入下实现相当的抗逆效果,减少化肥的用量^[32]。综合来看,外源喷施 $100\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 褪黑素配合 $150\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 氮肥在所有处理中综合得分最高,本研究进一步揭示其作用机制:适宜的褪黑素和氮肥用量通过增强抗氧化系统活性和维持光合机构稳定性,进而协同调控碳氮代谢关键酶活性并促进根系发育,显著改善了植株的物质合

成与吸收能力, 最终实现了产量、品质和经济效益的同步提升^[16, 27, 33]。

4 结论

本研究表明: 高温胁迫下喷施褪黑素配施氮肥可有效提高甘薯叶片 SOD、POD 活性, 缓解 MDA 积累, 提高 P_n 和 F_v/F_m , 稳定碳氮代谢平衡, 促进根系和块根发育, 提高产量与品质。隶属函数分析发现: 喷施 $100\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 褪黑素配合 $150\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 氮肥为最佳处理, 建议在浙南丘陵山区甘薯种植中推广应用该模式来提高经济效益。

5 参考文献

- [1] 舒素芳, 鹿翔, 范瑜越, 等. 浙江金华翠冠梨花期气温演变及低温灾害特征分析[J]. 中国南方果树, 2024, 53(2): 159–162. SHU Sufang, LU Xiang, FAN Yuyue, *et al.* Analysis of temperature evolution and low-temperature disaster characteristics at flowering stage of Cuiguan pear in Jinhua, Zhejiang Province[J]. *South China Fruits*, 2024, 53(2): 159–162. DOI: 10.13938/j.issn.1007-1431.20230178.
- [2] 邵正伟. 高温对甘薯块根形成的分子机制研究[D]. 湛江: 广东海洋大学, 2022. SHAO Zhengwei. *Molecular Mechanism of High Temperature on Tuberous Roots Formation of Sweet Potato (Ipomoea batatas (L.) Lam)*[D]. Zhanjiang: Guangdong Ocean University, 2022. DOI: 10.27788/d.cnki.ggdhy.2022.000224.
- [3] 杨军, 章毅之, 段里成, 等. 高温下喷施不同外源物质对中稻生理特征和产量的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2026, 34(4): 864–875. YANG Jun, ZHANG Yizhi, DUAN Licheng, *et al.* Effects of spraying different exogenous substances on physiological characteristics, and yield of single-season rice under high temperature condition[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2026, 34(4): 864–875. DOI: 10.12357/cjea.20250924.0944.001.
- [4] 郭嘉, 熊定伟, 杨丽娟, 等. 高温胁迫下 2, 4-表油菜素内酯和丛枝菌根真菌对四季杜鹃光合特性及激素代谢的影响[J]. 河南农业科学, 2025, 54(10): 110–120. GUO Jia, XIONG Dingwei, YANG Lijuan, *et al.* Effects of 2, 4-epibrassinolide and arbuscular mycorrhizal fungi on photosynthetic characteristics and hormone metabolism of *Rhododendron hybridum* under high temperature stress[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2025, 54(10): 110–120. DOI: 10.15933/j.cnki.1004-3268.2025.10.012.
- [5] 刘晓龙, 叶世河, 廖俊婕, 等. 灌浆初期高温胁迫对水稻籽粒活性氧积累及产量形成的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2024, 52(5): 33–47. LIU Xiaolong, YE Shihe, LIAO Junjie, *et al.* Effect of heat stress during early filling stage on ROS accumulation and yield formation in rice grain[J]. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 2024, 52(5): 33–47. DOI: 10.13207/j.cnki.jnwafu.2024.05.004.
- [6] 杨克明, 李海峰, 胡西旦·买买提, 等. 调环酸钙对高温胁迫下甜瓜生理生长及产量品质的影响[J]. 华北农学报, 2025, 40(4): 85–95. YANG Keming, LI Haifeng, Huxidan Maimaiti, *et al.* The effect of prohexadione-calcium on physiological growth, yield and quality of cantaloupe under high temperature stress[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2025, 40(4): 85–95. DOI: 10.7668/hbxb.20195650.
- [7] ARNAO M B, HERNÁNDEZ-RUIZ J. Melatonin: a new plant hormone and/or a plant master regulator?[J]. *Trends in Plant Science*, 2019, 24(1): 38–48. DOI: 10.1016/j.tplants.2018.10.010.
- [8] 李国英, 代红军. 外源激素对高温胁迫下赤霞珠葡萄叶片光合性能及果实品质的影响[J]. 南方农业学报, 2024, 55(8): 2277–2285. LI Guoying, DAI Hongjun. Effects of exogenous hormones on leaf photosynthetic performance and fruit quality of Cabernet Sauvignon grape under high temperature stress[J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2024, 55(8): 2277–2285. DOI: 10.3969/j.issn.2095-1191.2024.08.007.
- [9] 张婷宇, 张明如, 李清香, 等. 光强和氮素对紫茎幼苗光合特性的影响[J]. 浙江农林大学学报, 2022, 39(6): 1247–1256. ZHANG Tingyu, ZHANG Mingru, LI Qingxiang, *et al.* Effects of light intensity and nitrogen treatments on photosynthetic characteristics of *Stewartia sinensis* seedlings[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2022, 39(6): 1247–1256. DOI: 10.11833/j.issn.2095-0756.20210771.
- [10] AHMAD S, SU Wennan, KAMRAN M, *et al.* Foliar application of melatonin delay leaf senescence in maize by improving the antioxidant defense system and enhancing photosynthetic capacity under semi-arid regions[J]. *Protoplasma*, 2020, 257(4): 1079–1092. DOI: 10.1007/s00709-020-01491-3.
- [11] 李志涛, 马文婧, 朱金勇, 等. 膜下滴灌条件下不同田间持水量对马铃薯根系分布及其产量的影响[J]. 华北农学报, 2024, 39(4): 1079–1092.

- 2022, **37**(增刊 1): 161–171. LI Zhitao, MA Wenjing, ZHU Jinyong, *et al.* Effects of different field water capacity on root system characteristics and yield of potato under drip irrigation with plastic mulch[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2022, **37**(suppl 1): 161–171. DOI: [10.7668/hbxb.20193047](https://doi.org/10.7668/hbxb.20193047).
- [12] 阳新月, 肖人漓, 张林茜, 等. 不同生育期涝渍对甘薯抗逆生理特性及产量形成的影响[J]. *作物学报*, 2025, **51**(3): 744–754. YANG Xinyue, XIAO Renhao, ZHANG Linxi, *et al.* Effects of waterlogging at different growth stages on the stress-resistance physiological characteristics and yield formation of sweet potato[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2025, **51**(3): 744–754. DOI: [10.3724/SP.J.1006.2025.44116](https://doi.org/10.3724/SP.J.1006.2025.44116).
- [13] 吴昊, 贺金萍, 廖朝霞, 等. 块根分化建成期干旱-复水对甘薯根系活性氧代谢与内源激素的影响[J]. *作物杂志*, 2026(1): 111–117. WU Hao, HE Jinping, LIAO Zhaoxia, *et al.* Effects of drought and re-watering on reactive oxygen species metabolism and endogenous hormones in sweet potato roots during tuberous root differentiation and formation stage[J]. *Crops*, 2026(1): 111–117. DOI: [10.16035/j.issn.1001-7283.2026.01.014](https://doi.org/10.16035/j.issn.1001-7283.2026.01.014).
- [14] 刘莹, 万丽婧, 海梅荣. 外源褪黑素对 UV-B 辐射下马铃薯苗期叶片抗氧化物和过氧化氢的影响[J]. *江苏农业科学*, 2023, **51**(9): 60–67. LIU Ying, WAN Liqiang, HAI Meirong. Effects of exogenous melatonin on leaf antioxidant and hydrogen peroxide in potato seedlings under UV-B radiation[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2023, **51**(9): 60–67. DOI: [10.15889/j.issn.1002-1302.2023.09.008](https://doi.org/10.15889/j.issn.1002-1302.2023.09.008).
- [15] 苏明, 汪华, 洪自强, 等. 氮肥用量对花期高温胁迫玉米生长发育及产量的影响[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2026, **54**(2): 45–55. SU Ming, WANG Hua, HONG Ziqiang, *et al.* Effect of nitrogen fertilizer application on the growth and yield of maize under high temperature stress during flowering period[J]. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 2026, **54**(2): 45–55. DOI: [10.13207/j.jnwf.2026.02.005](https://doi.org/10.13207/j.jnwf.2026.02.005).
- [16] MAACH M, BAGHOUR M, AKODAD M, *et al.* Overexpression of LeNHX4 improved yield, fruit quality and salt tolerance in tomato plants (*Solanum lycopersicum* L.)[J]. *Molecular Biology Reports*, 2020, **47**(6): 4145–4153. DOI: [10.1007/s11033-020-05499-z](https://doi.org/10.1007/s11033-020-05499-z).
- [17] 郭爱华. 外源褪黑素对盐胁迫下苦菜幼苗生长的影响[J]. *江苏农业科学*, 2022, **50**(13): 153–157. GUO Aihua. Influences of exogenous melatonin on seedling growth of *Sonchus oleraceus* L. under salt stress[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2022, **50**(13): 153–157. DOI: [10.15889/j.issn.1002-1302.2022.13.025](https://doi.org/10.15889/j.issn.1002-1302.2022.13.025).
- [18] HIGASHI Y, SAITO K. Lipidomic studies of membrane glycerolipids in plant leaves under heat stress[J]. *Progress in Lipid Research*, 2019, **75**: 100990. DOI: [10.1016/j.plipres.2019.100990](https://doi.org/10.1016/j.plipres.2019.100990).
- [19] 米美多, 慕宇, 代晓华, 等. 花后高温胁迫下不同施氮量对春小麦抗氧化特性的影响[J]. *江苏农业科学*, 2017, **45**(1): 52–56. MI Meiduo, MU Yu, DAI Xiaohua, *et al.* Effects of different nitrogen application rates on antioxidant characteristics of spring wheat under high temperature stress after anthesis[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2017, **45**(1): 52–56. DOI: [10.15889/j.issn.1002-1302.2017.01.015](https://doi.org/10.15889/j.issn.1002-1302.2017.01.015).
- [20] LUIS CASTAÑARES J, ALBERTO BOUZO C. Effect of exogenous melatonin on seed germination and seedling growth in melon (*Cucumis melo* L.) under salt stress[J]. *Horticultural Plant Journal*, 2019, **5**(2): 79–87. DOI: [10.1016/j.hpj.2019.01.002](https://doi.org/10.1016/j.hpj.2019.01.002).
- [21] 杨元玲, 刘慧英, 关思慧, 等. 外源褪黑素对盐胁迫下石榴幼苗光合及抗氧化特性的影响[J]. *果树学报*, 2025, **42**(2): 360–375. YANG Yuanling, LIU Huiying, GUAN Sihui, *et al.* Effects of exogenous melatonin on photosynthetic and antioxidant properties of young seedlings under salt stress conditions in pomegranate[J]. *Journal of Fruit Science*, 2025, **42**(2): 360–375. DOI: [10.13925/j.cnki.gsxb.20240458](https://doi.org/10.13925/j.cnki.gsxb.20240458).
- [22] 顾玉倩, 商开晰, 胡峻清, 等. 褪黑素处理对盐胁迫下马铃薯生长和光合作用的影响[J]. *中国瓜菜*, 2025, **38**(12): 102–109. GU Yuqian, SHANG Kaixi, HU Junqing, *et al.* Effects of melatonin treatment on the growth and photosynthesis of *Solanum tuberosum* L. under salt stress[J]. *China Cucurbits and Vegetables*, 2025, **38**(12): 102–109. DOI: [10.16861/j.cnki.zggc.2025.0224](https://doi.org/10.16861/j.cnki.zggc.2025.0224).
- [23] 易紫凤, 段绍光, 卞春松, 等. 马铃薯光合、氮代谢及产量对水氮运筹的响应[J]. *中国蔬菜*, 2025(2): 82–93. YI Zifeng, DUAN Shaoguang, BIAN Chunsong, *et al.* Response of potato photosynthesis, nitrogen metabolism and yield to water and nitrogen management[J]. *China Vegetables*, 2025(2): 82–93. DOI: [10.19928/j.cnki.1000-6346.2024.4027](https://doi.org/10.19928/j.cnki.1000-6346.2024.4027).
- [24] 余梦奇, 路梦莉, 张雅婷, 等. 褪黑素对高温胁迫玉米叶片光合特性与抗氧化酶活性的调控[J]. *玉米科学*, 2024, **32**(1): 90–99. YU Mengqi, LU Mengli, ZHANG Yating, *et al.* Regulation of melatonin on photosynthetic characteristics and

- antioxidant enzyme activities in maize leaves under high temperature stress condition[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2024, **32**(1): 90–99. DOI: [10.13597/j.cnki.maize.science.20240112](https://doi.org/10.13597/j.cnki.maize.science.20240112).
- [25] 张海维, 顾欣怡, 陈明帅, 等. 基肥氮素类型对再生稻生长、产量和氮素利用率的影响[J]. *中国水稻科学*, 2025, **39**(3): 387–398. ZHANG Haiwei, GU Xinyi, CHEN Mingshuai, *et al.* Effects of nitrogen type of basal fertilizer on growth, grain yield and nitrogen use efficiency of ratooning rice[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2025, **39**(3): 387–398. DOI: [10.16819/j.1001-7216.2025.240507](https://doi.org/10.16819/j.1001-7216.2025.240507).
- [26] 张宇鹏, 周国模, 周宇峰, 等. 5 个常见绿化树种对极端高温的光合响应特征[J]. *浙江农林大学学报*, 2017, **34**(2): 301–309. ZHANG Yupeng, ZHOU Guomo, ZHOU Yufeng, *et al.* Photosynthetic characteristics of five common tree species in response to extreme heat[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2017, **34**(2): 301–309. DOI: [10.11833/j.issn.2095-0756.2017.02.014](https://doi.org/10.11833/j.issn.2095-0756.2017.02.014).
- [27] 曹亮, 杜昕, 于高波, 等. 外源褪黑素对干旱胁迫下绥农 26 大豆鼓粒期叶片碳氮代谢调控的途径分析[J]. *作物学报*, 2021, **47**(9): 1779–1790. CAO Liang, DU Xin, YU Gaobo, *et al.* Regulation of carbon and nitrogen metabolism in leaf of soybean cultivar Suinong 26 at seed-filling stage under drought stress by exogenous melatonin[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2021, **47**(9): 1779–1790. DOI: [10.3724/SP.J.1006.2021.04151](https://doi.org/10.3724/SP.J.1006.2021.04151).
- [28] 杨子, 于静, 孙晶洁, 等. 施氮对马铃薯发育及碳氮代谢的影响[J]. *内蒙古农业大学学报(自然科学版)*, 2025, **46**(3): 14–19, 61. YANG Zi, YU Jing, SUN Jingjie, *et al.* Effects of nitrogen application on potato development and carbon and nitrogen metabolism[J]. *Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2025, **46**(3): 14–19, 61. DOI: [10.16853/j.cnki.1009-3575.2025.03.002](https://doi.org/10.16853/j.cnki.1009-3575.2025.03.002).
- [29] 曾鸣谦, 吴丽君, 周围, 等. 施氮和高温胁迫对杜鹃幼苗根系构型和生理指标的影响[J]. *生态学杂志*, 2025, **44**(2): 451–459. ZENG Mingqian, WU Lijun, ZHOU Wei, *et al.* Effects of nitrogen application and high-temperature stress on root configuration and physiological indices of *Rhododendron* seedlings[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2025, **44**(2): 451–459. DOI: [10.13292/j.1000-4890.202502.021](https://doi.org/10.13292/j.1000-4890.202502.021).
- [30] KHAN Z, JAN R, ASIF S, *et al.* Exogenous melatonin induces salt and drought stress tolerance in rice by promoting plant growth and defense system[J]. *Scientific Reports*, 2024, **14**: 1214. DOI: [10.1038/s41598-024-51369-0](https://doi.org/10.1038/s41598-024-51369-0).
- [31] 顾帆, 季梦成, 顾翠花, 等. 高温干旱胁迫对黄薇抗氧化防御系统的影响[J]. *浙江农林大学学报*, 2019, **36**(5): 894–901. GU Fan, JI Mengcheng, GU Cuihua, *et al.* Heat and drought stress with an antioxidant defense system in *Heimia myrtifolia*[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2019, **36**(5): 894–901. DOI: [10.11833/j.issn.2095-0756.2019.05.007](https://doi.org/10.11833/j.issn.2095-0756.2019.05.007).
- [32] 冯梅, 欧阳胜男, SAURER M, 等. 前期氮添加对无梗花栎幼苗干旱响应中地上-地下碳氮分配动态的影响[J]. *植物生态学报*, 2025, **49**(9): 1527–1542. FENG Mei, OUYANG Shengnan, SAURER M, *et al.* Effects of previous nitrogen addition on aboveground and belowground carbon and nitrogen allocation dynamics in drought-exposed sessile oak seedlings[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2025, **49**(9): 1527–1542. DOI: [10.17521/cjpe.2024.0218](https://doi.org/10.17521/cjpe.2024.0218).
- [33] 卫宏健, 贺文员, 王越, 等. 丛枝菌根真菌与褪黑素对多年生黑麦草耐热性的影响[J]. *草业学报*, 2023, **32**(12): 126–138. WEI Hongjian, HE Wenyuan, WANG Yue, *et al.* The effects of arbuscular mycorrhizal fungi and melatonin on heat tolerance of perennial ryegrass[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2023, **32**(12): 126–138. DOI: [10.11686/cyxb2023129](https://doi.org/10.11686/cyxb2023129).
- [34] IQBAL S, HAYAT F, HUSSAIN M, *et al.* Melatonin supplementation alleviates drought stress in peach (*Prunus persica*) seedlings by improving photosynthesis, root morphological traits, and antioxidant defense system[J]. *Acta Physiologiae Plantarum*, 2024, **46**(2): 18. DOI: [10.1007/s11738-023-03634-4](https://doi.org/10.1007/s11738-023-03634-4).
- [35] 王彬, 田正凤, 应彬彬, 等. 高温胁迫对樟树光合性能的影响[J]. *浙江农林大学学报*, 2019, **36**(1): 47–53. WANG Bin, TIAN Zhengfeng, YING Binbin, *et al.* Photosynthetic abilities in *Cinnamomum camphora* with high temperature stress[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2019, **36**(1): 47–53. DOI: [10.11833/j.issn.2095-0756.2019.01.007](https://doi.org/10.11833/j.issn.2095-0756.2019.01.007).
- [36] 王瑞, 李向岭, 郭栋, 等. 增施氮肥对夏玉米花后高温胁迫下籽粒碳氮代谢的影响[J]. *作物学报*, 2023, **49**(12): 3342–3351. WANG Rui, LI Xiangling, GUO Dong, *et al.* Effects of application nitrogen on carbon and nitrogen metabolism of summer maize grain under post-silking heat stress[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2023, **49**(12): 3342–3351. DOI: [10.3724/SP.J.1006.2023.33003](https://doi.org/10.3724/SP.J.1006.2023.33003).