

宋佳敏, 何佳伟, 蒋伟勤, 等. 喷施水杨酸和褪黑素对药隔期低温胁迫下小麦产量及生理特性的影响[J]. 江苏农业学报, 2025, 41(3): 477-484.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2025.03.006

喷施水杨酸和褪黑素对药隔期低温胁迫下小麦产量及生理特性的影响

宋佳敏¹, 何佳伟¹, 蒋伟勤¹, 车 阳¹, 李其胜¹, 文廷刚¹, 顾大路¹, 杜小凤¹, 顾克军², 杨 威³

(1. 江苏徐淮地区淮阴农业科学研究所, 江苏 淮安 223001; 2. 江苏省农业科学院, 江苏 南京 210014; 3. 淮阴师范学院, 江苏 淮安 223300)

摘要: 为探明药隔期低温胁迫前喷施水杨酸和褪黑素对小麦光合作用、抗氧化特性及产量的影响, 以淮麦 40 为材料开展盆栽试验。试验于药隔期人工模拟倒春寒(昼夜温度设置为 2 ℃ 12 h / -2 ℃ 12 h), 在低温胁迫前喷施 300 mg/L 水杨酸(SA 处理)和 46 mg/L 褪黑素(MT 处理), 并以低温+清水(CL 处理)、常温+清水(CK)作为对照, 调查分析小麦产量及其生理特性的变化情况。结果表明, 相比于 CL 处理, 喷施水杨酸和褪黑素显著提高了叶片中超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)和抗坏血酸过氧化物酶(APX)3 种抗氧化酶的活性, 并保持了较高的还原型谷胱甘肽(GSH)浓度与氧化型谷胱甘肽(GSSG)浓度的比值, 使丙二醛(MDA)含量显著下降。这有效缓解了低温对光合作用的抑制作用, 故叶绿素相对含量(SPAD)和地上部干物质积累显著提高, 有效减轻了低温对产量造成的不利影响, 其中相较 CL 处理, MT 处理、SA 处理的小麦产量显著提高。同时, 喷施水杨酸和褪黑素处理也缓解了低温对穗分化发育的不利影响, 其穗粒数和穗数协同提高, 而相较于 CK, 穗数、穗粒数和千粒重均未发生显著变化, 其中以 SA 处理的效果更好。以上结果表明, 药隔期低温胁迫前喷施水杨酸和褪黑素均能通过调控小麦体内抗氧化系统酶活性来增强小麦倒春寒抗性, 保证小麦的正常生长发育。

关键词: 小麦; 倒春寒; 药隔期; 水杨酸; 褪黑素; 产量; 生理特性

中图分类号: S512.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2025)03-0477-08

Effects of salicylic acid and melatonin on yield and physiological characteristics of wheat under low temperature stress at anther connective stage

SONG Jiamin¹, HE Jiawei¹, JIANG Weiqin¹, CHE Yang¹, LI Qisheng¹, WEN Tinggang¹, GU Dalu¹, DU Xiaofeng¹, GU Kejun², YANG Wei³

(1. Huaiyin Institute of Agricultural Sciences of the Xuhuai District of Jiangsu Province, Huai'an 223001, China; 2. Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China; 3. Huaiyin Normal University, Huai'an 223300, China)

收稿日期: 2024-10-14

基金项目: 江苏省农业科技自主创新基金项目[CX(22)1002]; 淮安市农业科学研究院科研发展基金项目(HABL202227); 国家现代农业产业技术体系专项(CARS-03)

作者简介: 宋佳敏(1996-), 女, 山西阳泉人, 硕士, 研究实习员, 主要研究方向为小麦化控栽培技术。(E-mail) 962193633@qq.com

通讯作者: 杜小凤, (E-mail) 15061234456@163.com; 顾大路, (E-mail) 1302680742@qq.com

Abstract: To investigate the effects of spraying salicylic acid and melatonin before low temperature stress during the anther connective stage on photosynthesis, antioxidant characteristics and yield of wheat, a pot experiment was conducted using Huaimai 40 as the material. The experiment artificially simulated late spring cold during the anther connective stage (day and night temperature was set at 2 ℃ 12 h / -2 ℃ 12 h), sprayed 300 mg/L salicylic

acid (SA) and 46 mg/L melatonin (MT) before low temperature stress, and used low temperature + clean water (CL) and normal temperature + clean water (CK) as controls to investigate and analyze the changes in wheat yield and physiological characteristics. The results showed that compared with the CL treatment, spraying SA and MT significantly increased the activities of three antioxidant enzymes, superoxide dismutase (SOD), peroxidase (POD) and ascorbate peroxidase (APX), and maintained a higher ratio of reduced glutathione (GSH) concentration to oxidized glutathione (GSSG) concentration in leaves, leading to a significant decrease in malondialdehyde (MDA) content. This effectively alleviated the inhibitory effect of low temperature on photosynthesis, so the relative chlorophyll content (SPAD value) and aboveground dry matter accumulation were significantly increased, which effectively mitigated the adverse effects of low temperature on yield. Compared with CL, the wheat yield was significantly increased in MT and SA. At the same time, the spraying treatment also alleviated the adverse effects of low temperature on spike differentiation and development, and the kernels per spike and spikes increased synergistically. Compared with CK, the spikes, kernels per spike and the 1 000-kernel weight did not change significantly. Among them, SA had the best effect. The above results show that spraying salicylic acid and melatonin before low temperature stress during the anther connective stage can enhance the resistance of wheat to late spring cold by regulating the activities of antioxidant enzymes in wheat, and ensure the normal growth and development of wheat.

Key words: wheat; late spring cold; anther connective stage; salicylic acid; melatonin; yield; physiological characteristics

小麦是中国重要的粮食作物之一,其产量约占中国粮食作物产量的 1/4^[1],然而近年来极端天气频发,大气环流加剧,小麦受寒潮影响越来越大。黄淮及长江中下游是中国冬小麦的主要产区,同时也是中国低温多发区^[2],该区的低温灾害主要发生在小麦苗期及拔节孕穗期^[3],在小麦苗期发生频率低,对小麦产量影响较小,在拔节孕穗期发生(倒春寒)则会影响到小麦穗发育,尤其是在小麦药隔期,极易造成减产^[4-5]。有研究发现,一般情况下倒春寒造成小麦减产 10%~30%,严重的情况下会导致小麦减产达到 50%以上^[6]。因此,在日益严峻的气候变化背景下探究如何增强小麦倒春寒抗性、提高小麦产量对保障中国小麦高产及粮食安全具有重要意义。

水杨酸(SA)是一种广泛存在于植物中的酚类物质^[7],在植物的生长发育中发挥着重要的作用,同时水杨酸可以通过调节抗氧化酶活性、增强光合电子传递能力、积累渗透调节物质等来提高作物抗寒性^[8-9]。褪黑素(*N*-乙酰-5-甲氧基色胺)是在牛松果体中被首次发现的,褪黑素在植物体中以色氨酸为底物,由至少 6 种酶通过 4 个酶促反应合成^[10]。Arnao 等^[11]在拟南芥(*Arabidopsis thaliana*)中发现了第 1 个可能的植物褪黑素受体,表明褪黑素可能是一种植物激素。有研究表明,褪黑素通过调控与氧化还原相关的物质^[12]或其他植物激素的活性、激活相关基因^[13]等来提高作物抗逆性。目前,

关于水杨酸和褪黑素在不同作物抗逆上的应用研究已经有报道,但其在小麦药隔期低温胁迫(倒春寒)下的应用效果和机理尚不明确,因此,本研究拟采用盆栽试验人工模拟倒春寒,探究低温胁迫前喷施水杨酸和褪黑素对小麦光合作用、抗氧化特性及产量的影响,为黄淮海冬麦区和长江中下游冬麦区防御小麦倒春寒提供理论依据和技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验设计

盆栽试验于 2022 年 11 月–2023 年 6 月在淮安市农业科学研究院科研基地(33°33'N,119°1'E)进行,该地属于北亚热带湿润季风气候,年平均气温 13.6℃,年降雨量约 940 mm,年日照时数 2 130 h。供试品种为对倒春寒较敏感品种淮麦 40。试验用土经自然风干过筛后与沙子以体积比 2:1 混合,称取 5 kg 装盆(直径与高度均为 24 cm),浇水沉实后播种。播种前每盆施用纯氮 1.0 g(基肥:拔节肥=6:4),施用磷酸二氢钾 1.0 g,全部基肥。11 月 11 日选取饱满并且均匀一致的种子播种,每盆播种 21 粒,播种后覆土 1 cm,于三叶一心期间苗,每盆留长势一致的幼苗 7 株。

在小麦药隔期(叶龄余数为 1.5 叶,基部第 3 节开始伸长)选取生长一致的盆栽,人工模拟倒春寒(昼夜温度设置为 2℃ 12 h/–2℃ 12 h),在低温胁迫前 1 d 上午 7:00–9:00(晴朗无风)分别对小麦叶

面喷施 300 mg/L 水杨酸 (SA 处理)、46 mg/L 褪黑素 (MT 处理) 及清水 (CL 处理), 另设喷施清水、室外自然生长处理为对照 (CK), 喷施溶液中含有 0.002% 的吐温 20, 以水滴挂叶为宜。低温胁迫后立即将盆栽移至自然条件下生长至成熟。

1.2 测定项目与方法

生长指标及产量指标的测定: 于低温胁迫结束 24 h 后采用 SPAD-502 便携式叶绿素仪测定小麦顶展叶上、中、下 3 处叶绿素相对含量 (SPAD), 取平均值作为此叶 SPAD, 每个处理测定 10 个重复。于低温胁迫后 14 d 后取长势一致的 20 株小麦测定鲜重, 其中 10 株小麦采用长宽法测定植株叶面积, 随后将所有样品于 105 ℃ 杀青, 80 ℃ 烘干至恒重后测定干物重。在成熟期每个处理取长势均匀的盆栽测定产量, 每个处理取 3 个重复, 每个重复 3 盆, 测定有效穗数、穗粒数, 晒干脱粒, 测定千粒重及产量。

抗氧化酶活性测定: 于低温胁迫结束后, 取顶展叶, 立即放入液氮, 每个处理取 3 个重复, 样品于 -40 ℃ 冰箱储存备用。超氧化物歧化酶 (SOD) 活性采用氮蓝四唑显色法测定, 过氧化物酶 (POD) 活性采用愈创木酚法测定, 过氧化氢酶 (CAT) 活性采用过氧化氢法测定, 抗坏血酸过氧化物酶 (APX) 活性根据单位时间抗坏血酸减少量测定, 超氧阴离子 ($O_2^{\cdot-}$) 含量采用羟胺法测定, 过氧化氢 (H_2O_2) 含量根据其与其生成量测定, 还原型谷胱甘肽 (GSH) 及氧化型谷胱甘肽 (GSSG) 浓度采用 5, 5'-二硫代双循环法测定^[14], 以上物质均采用南京建成生物技术公司的试剂盒测定, 具体测定方法以试剂盒使用说明书为准。参照 Du 等^[15] 的方法, 丙二醛 (MDA) 含量采用硫代巴比妥酸法测定。

1.3 数据处理与分析

采用 Microsoft Excel 2021 软件对试验数据进行处理, 采用 SPSS 20.0 和 Origin 2022 进行数据分析并作图。

2 结果与分析

2.1 喷施水杨酸和褪黑素对药隔期低温胁迫下小麦产量的影响

对不同处理下小麦产量及其构成因素进行分析, 结果 (表 1) 显示, 药隔期低温胁迫显著降低了小麦产量, 外源喷施褪黑素和水杨酸后小麦产量较 CL 处理显著提高, 分别增加了 20.07% 和 24.80%, 其

中 SA 处理的效果更好, 产量仅比 CK 下降 3.40%。在产量构成方面, 与 CK 相比, 低温胁迫处理 (CL 处理) 显著降低了小麦穗数和穗粒数, 喷施褪黑素和水杨酸后小麦穗粒数显著增加, 穗数较 CL 处理分别增加了 4.61% 和 9.23%。低温胁迫处理、喷施水杨酸和褪黑素对小麦千粒重影响不显著。

表 1 喷施水杨酸和褪黑素对药隔期低温胁迫下小麦产量的影响

Table 1 Effects of salicylic acid and melatonin on wheat yield under low temperature stress at anther connective stage

处理	穗数 (个/盆)	穗粒数	千粒重 (g)	每盆产量 (g)
MT	22.67ab	43.63a	42.36a	36.61c
SA	23.67a	42.64a	42.13a	38.05b
CL	21.67b	36.40b	42.01a	30.49d
CK	24.00a	43.20a	42.44a	39.39a

CL: 低温条件下喷施清水; CK: 对照, 喷施清水, 室外自然生长; MT: 低温条件下喷施 46 mg/L 褪黑素; SA: 低温条件下喷施 300 mg/L 水杨酸。同一列数据后不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

2.2 喷施水杨酸和褪黑素对药隔期低温胁迫下小麦生长的影响

由表 2 可知, 药隔期低温胁迫 (CL 处理) 显著降低了小麦 SPAD、叶面积、地上部干重及地上部鲜重, 相应指标分别比对照降低了 16.01%、16.05%、33.07% 及 12.09%。相比于 CL 处理, 喷施褪黑素后小麦 SPAD、叶面积、地上部干重及地上部鲜重显著增加了 5.80%、5.53%、17.39% 及 4.77%, 喷施水杨酸后小麦 SPAD、叶面积、地上部干重及地上部鲜重显著增加了 8.58%、11.43%、25.69% 及 10.39%, MT 处理和 SA 处理的小麦干鲜重比分别较 CL 处理增加了 2.41 个和 2.74 个百分点。说明喷施褪黑素和水杨酸可以提高低温胁迫下小麦光合叶面积, 增强光合能力, 有利于小麦干物质积累。

表 2 喷施水杨酸和褪黑素对药隔期低温胁迫下小麦生长的影响

Table 2 Effects of salicylic acid and melatonin on wheat growth under low temperature stress at anther connective stage

处理	SPAD	叶面积 (cm^2)	地上部 鲜重 (g)	地上部 干重 (g)	干鲜重比 (%)
MT	51.41b	243.02c	13.41b	2.97c	22.15b
SA	52.76b	256.59b	14.13a	3.18b	22.51b
CL	48.59c	230.28d	12.80c	2.53d	19.77c
CK	57.85a	274.32a	14.56a	3.78a	25.96a

CL: 低温条件下喷施清水; CK: 对照, 喷施清水, 室外自然生长; MT: 低温条件下喷施 46 mg/L 褪黑素; SA: 低温条件下喷施 300 mg/L 水杨酸。SPAD: 叶绿素相对含量。同一列数据后不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

2.3 喷施水杨酸和褪黑素对药隔期低温胁迫下小麦丙二醛含量、超氧阴离子含量、过氧化氢含量的影响

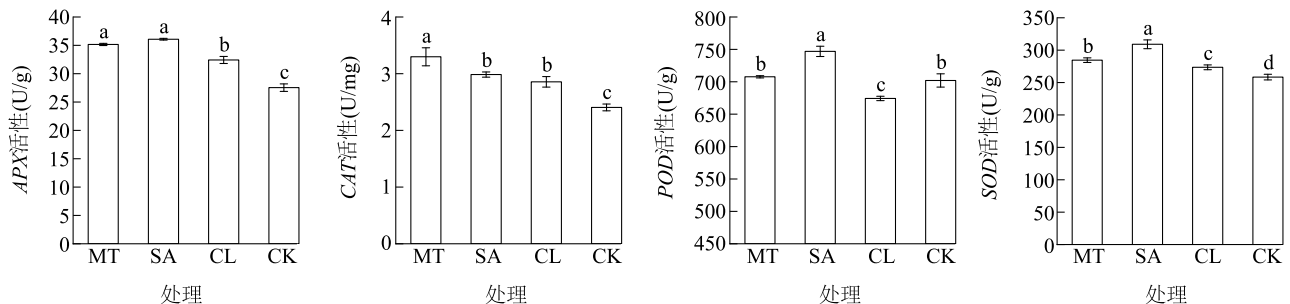
由表 3 可知,药隔期低温胁迫 (CL 处理) 显著提高了小麦超氧阴离子含量、丙二醛含量及过氧化氢含量。在低温胁迫下,与 CL 处理相比,喷施褪黑素和水杨酸后小麦超氧阴离子含量和过氧化氢含量显著降低,丙二醛含量分别显著降低了 18.55% 和 13.75% ($P < 0.05$)。

表 3 喷施水杨酸和褪黑素对药隔期低温胁迫下小麦丙二醛含量、超氧阴离子含量、过氧化氢含量的影响

Table 3 Effects of salicylic acid and melatonin on malondialdehyde (MDA) content, superoxide anion content and hydrogen peroxide content of wheat under low temperature stress at anther connective stage

处理	超氧阴离子含量 ($\mu\text{mol/g}$)	过氧化氢含量 (nmol/mg)	丙二醛含量 ($\mu\text{mol/g}$)
MT	3.63b	2.54b	8.65c
SA	2.71c	2.64b	9.16b
CL	6.86a	3.17a	10.62a
CK	2.36c	2.44b	8.06d

CL:低温条件下喷施清水;CK:对照,喷施清水,室外自然生长;MT:低温条件下喷施 46 mg/L 褪黑素;SA:低温条件下喷施 300 mg/L 水杨酸。同一列数据后不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。



CL:低温条件下喷施清水;CK:对照,喷施清水,室外自然生长;MT:低温条件下喷施 46 mg/L 褪黑素;SA:低温条件下喷施 300 mg/L 水杨酸。

SOD:超氧化物歧化酶;POD:过氧化物酶;CAT:过氧化氢酶;APX:抗坏血酸过氧化物酶。不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

图 1 喷施水杨酸和褪黑素对药隔期低温胁迫下小麦抗氧化相关酶活性的影响

Fig.1 Effects of salicylic acid and melatonin on antioxidant-related enzyme activities in wheat under low temperature stress at anther connective stage

2.6 小麦产量与其构成因素间的相关性分析

对药隔期低温胁迫下小麦的产量及其构成因素进行相关性分析,结果 (表 5) 表明,产量与穗数、穗粒数呈极显著正相关,相关系数分别为 0.807 和 0.906,产量与千粒重相关性不显著。说明药隔期低温胁迫前喷施褪黑素和水杨酸后产量显著高于喷施清水的主要原因是穗数和穗粒数的提高,其中穗粒数对小麦产量贡献最高。

2.4 喷施水杨酸和褪黑素对药隔期低温胁迫下小麦抗氧化相关酶活性的影响

由图 1 可知,药隔期低温胁迫 (CL 处理) 显著提高了小麦的超氧化物歧化酶 (SOD)、抗坏血酸过氧化物酶 (APX) 及过氧化氢酶 (CAT) 的活性,分别提高了 5.83%、17.71% 及 18.77%,显著降低了过氧化物酶 (POD) 活性。低温胁迫下,与 CL 处理相比,喷施褪黑素和水杨酸后小麦 SOD、POD 和 APX 活性显著提高,分别提高了 4.04%、4.96% 和 8.45%,13.00%、10.78% 和 11.28%。说明低温胁迫条件下,外源喷施褪黑素和水杨酸可以提高小麦抗氧化相关酶活性,有利于清除活性氧,减轻活性氧对植物细胞的破坏。

2.5 喷施水杨酸和褪黑素对药隔期低温胁迫下小麦抗氧化物质浓度的影响

还原型谷胱甘肽与氧化型谷胱甘肽的动态平衡可以高效稳定地维持细胞内氧化还原状态^[16],同时还可以作为信号物质参与调控^[17]。由表 4 可知,与 CK 相比,各处理均显著提高了 GSH 浓度及 GSH 浓度与 GSSG 浓度的比值,其中 MT 处理及 SA 处理的 GSH 浓度与 CL 处理差异显著,分别较 CL 处理增加了 51.66% 和 49.49%。

2.7 小麦产量与关键指标间的相关性分析

对药隔期低温胁迫下小麦产量与关键指标进行相关性分析,结果 (表 6) 表明,干重、SPAD、叶面积与产量均呈极显著正相关。抗氧化产物 MDA 含量、 O_2^- 含量均与产量呈极显著负相关,GSH 含量与 GSSG 含量的比值、抗氧化相关酶 SOD 活性与产量呈显著正相关。其中 SPAD 与 MDA 含量、 O_2^- 含量呈极显著负相关,与干重呈极显著正相关。说明药

表 4 喷施水杨酸和褪黑素对药隔期低温胁迫下小麦 GSH 浓度、GSSG 浓度及其比值的影响

Table 4 Effects of spraying salicylic acid and melatonin on reduced glutathione (GSH) concentration, oxidized glutathione (GSSG) concentration and their ratio in wheat under low temperature stress at anther connective stage

处理	GSH 浓度 ($\mu\text{mol/L}$)	GSSG 浓度 ($\mu\text{mol/L}$)	GSH 浓度与 GSSG 浓度的比值
MT	494.90a	42.55a	11.63a
SA	487.83a	37.34ab	13.06a
CL	326.32b	31.45b	10.38a
CK	252.04c	38.01ab	6.63b

GSH:还原型谷胱甘肽;GSSG:氧化型谷胱甘肽。CL:低温条件下喷施清水;CK:对照,喷施清水,室外自然生长;MT:低温条件下喷施 46 mg/L褪黑素;SA:低温条件下喷施 300 mg/L水杨酸。不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

表 6 小麦产量与关键指标间的相关系数

Table 6 Correlation coefficients between wheat yield and key indicators

指标	相关系数									
	产量	SPAD	叶面积	干重	干鲜重比	MDA 含量	超氧阴离子含量	SOD 活性	CAT 活性	GSH 浓度与 GSSG 浓度 的比值
产量	1.000									
SPAD	0.930 **	1.000								
叶面积	0.851 **	0.778 *	1.000							
干重	0.922 **	0.946 **	0.771 *	1.000						
干鲜重比	0.813 **	0.838 **	0.663	0.930 **	1.000					
MDA 含量	-0.856 **	-0.805 **	-0.521	-0.793 *	-0.755 *	1.000				
超氧阴离子含量	-0.970 **	-0.939 **	-0.827 **	-0.958 **	-0.887 **	0.861 **	1.000			
SOD 活性	0.722 *	0.827 **	0.739 *	0.775 *	0.564	-0.396	-0.721 *	1.000		
CAT 活性	0.545	0.413	0.319	0.408	0.528	-0.740 *	-0.503	-0.049	1.000	
GSH 浓度与 GSSG 浓度的比值	0.715 *	0.532	0.834 **	0.584	0.431	-0.346	-0.592	0.585	0.275	1.000

SPAD、MDA、SOD、CAT、GSH、GSSG 分别表示叶绿素相对含量、丙二醛、超氧化物歧化酶、过氧化氢酶、还原型谷胱甘肽、氧化型谷胱甘肽。* 表示显著相关($P\leq 0.05$); ** 表示极显著相关($P\leq 0.01$)。

3 讨论

3.1 喷施水杨酸和褪黑素对药隔期低温胁迫下小麦生长及产量的影响

近年来,随着倒春寒发生频率增加,早春低温已经影响到了小麦的生长发育,给小麦产量造成一定程度的损失。同时全球气候变暖使得小麦关键生育期提前^[18],小麦在拔节期或孕穗期遭遇倒春寒的风险增加,此时小麦正处于穗分化及发育的关键时期,低温极易造成减产^[19-20]。小麦产量的形成主要依靠光

表 5 小麦产量及其构成因素间的相关系数

Table 5 Correlation coefficients between wheat yield and its components

指标	相关系数			
	产量	穗数	穗粒数	千粒重
产量	1.000			
穗数	0.807 **	1.000		
穗粒数	0.906 **	0.672 *	1.000	
千粒重	0.516	0.475	0.459	1.000

* 表示显著相关($P\leq 0.05$); ** 表示极显著相关($P\leq 0.01$)。

隔期低温胁迫前对小麦喷施褪黑素和水杨酸,可以通过调控抗氧化相关酶活性减少氧化物质积累,提高植株光合能力,促进光合产物形成,增加干重,最终小麦产量显著高于喷施清水。

合产物的积累,叶绿素的主要功能为捕获光能并驱动电子转移^[21],其含量高低与作物光合能力强弱密切相关。马泉等^[22]发现在小麦药隔期进行低温胁迫,显著降低了 SPAD 及花前干物质转运量,对千粒重影响不大。柯媛媛等^[23]研究发现,药隔期进行-2℃低温胁迫 4 h 显著降低了小麦干物质积累量,穗部光合同化物分配减少,影响穗部小花发育,导致穗粒数减少,小麦单穗产量降幅达到 90%以上。在本研究中,药隔期低温胁迫显著降低了小麦 SPAD 和叶面积,抑制了光合作用,地上部干重显著低于常温对照,最终

产量显著降低,这与前人研究结果基本一致。春季低温会造成花粉发育异常,显著增加花粉败育率,最终导致结实小穗数及穗粒数下降,且药隔期对小麦穗粒数的影响大于孕穗期及开花期^[24]。Ji 等^[25]发现在小麦拔节期和孕穗期分别进行 $-6\sim 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 低温胁迫,产量分别下降了 $3.1\%\sim 56.4\%$ 和 $3.2\%\sim 85.9\%$,且穗数和穗粒数对拔节期和孕穗期低温的敏感性高于千粒重。本研究中,药隔期低温胁迫显著降低了小麦的有效穗数及穗粒数,千粒重与常温对照差异不显著,说明该时期低温会影响到穗部发育从而减少穗粒数,造成有效穗数的减少,同时可能相对增加了存活籽粒的物质供应^[19],最终千粒重受影响较小。这与前人的研究结果一致。

喷施外源物质可以有效提高小麦抗寒性^[26-27],杜思梦等^[28]研究发现,喷施水杨酸处理显著减小了最大光化学效率(F_v/F_m)、光合性能指数(PI_{ABS})、电子传递的量子产额(φE_0)等光合电子传递活性相关参数的下降幅度,以此增强了小麦光合作用。朱春权等^[29]研究发现,外源施加褪黑素显著提高了低温条件下水稻的株高、根长、叶龄、地上部干重、地下部干重、根条数及叶绿素含量,有效减缓了低温给水稻生长及光合作用带来的损伤。本研究结果表明,在药隔期低温胁迫下,相比于喷施清水对照,喷施水杨酸和褪黑素显著提高了小麦 SPAD 和叶面积,增加了地上部干重,有效减缓了低温对小麦产量的影响,其中外源施用水杨酸效果最优。对小麦产量与其构成因素的相关性分析发现,产量与穗粒数相关系数最高,其次是穗数,与千粒重相关性不显著;另外,小麦产量与 SPAD、叶面积、干重均呈极显著正相关。说明喷施水杨酸和褪黑素增强了小麦低温胁迫下的光合能力,增加了干物质积累,减轻了低温胁迫对穗部发育的损伤,最终降低了春季低温对小麦产量的影响。

3.2 喷施水杨酸和褪黑素对药隔期低温胁迫下小麦抗氧化特性的影响

低温胁迫会使作物膜脂过氧化加剧,植株体内 $\text{O}_2^{\cdot-}$ 及 H_2O_2 等活性氧大量积累,最终产物 MDA 会造成细胞膜的损伤^[30]。植株体内存在一套活性氧清除系统,可以维持活性氧平衡,抗氧化系统主要包括酶类(如 SOD、POD、CAT、APX 等)和非酶类(GSH 等)^[31]。赵海亮等^[32]发现,低温胁迫显著增加了番茄 GSH 含量,而 GSH 含量与 GSSG 含量的比值显著

低于常温对照。薛盈文等^[33]发现,与常温对照相比,低温胁迫显著增加了小麦 MDA 含量, SOD 及 CAT 均可以对低温胁迫快速应答。苏慧等^[20]研究发现,随着温度降低小麦旗叶 MDA 含量及 SOD、CAT、POD 活性均显著增加。本研究结果表明,在药隔期低温胁迫下,与常温对照相比,随着 $\text{O}_2^{\cdot-}$ 含量、 H_2O_2 及 MDA 含量显著提高,小麦体内的 SOD、APX、CAT 活性显著提升,这与前人的研究结果一致。另外,本研究发现,在药隔期低温胁迫下,抗氧化物质 GSH 浓度及 GSH 浓度与 GSSG 浓度的比值较常温对照显著提高,与周艳等^[34]的研究结果不一致,这可能是由于研究作物不同导致的。李璇等^[35]指出某些逆境情况下, CAT 和 POD 在清除 H_2O_2 中有互补作用。葛君等^[36]发现拔节期低温胁迫显著增加了 POD 活性。而在本试验中,药隔期低温胁迫显著降低了 POD 活性,其可能的原因是和低温处理时期及强度有关。

喷施外源物质可以提高作物抗氧化能力从而提高抗逆性,朱春权等^[29]发现在低温胁迫下,外源施加褪黑素提高了植株 SOD、POD、GST 和 APX 的活性,MDA 和 H_2O_2 含量分别比对照减少了 33.52% 和 13.85% 。赵海亮等^[32]在低温胁迫前对番茄外源喷施褪黑素后发现,GSH 含量与 GSSG 含量的比值比对照增加了 $5.7\%\sim 14.1\%$,有效减轻了低温带来的过氧化损伤。杜思梦等^[28]的研究结果表明,在低温胁迫下,水杨酸处理的小麦 CAT 及 SOD 活性显著提高,MDA 含量降低了 $2.80\%\sim 34.11\%$ 。本研究中,在药隔期低温胁迫下,喷施水杨酸和褪黑素后小麦 SOD、POD 和 APX 活性及 GSH 浓度均显著高于低温下喷施清水的对照,显著降低了 MDA 含量,这与前人的研究结果基本一致。另外,从相关性分析结果来看,产量与 SOD 活性呈显著正相关,与 MDA 含量及 $\text{O}_2^{\cdot-}$ 含量呈极显著负相关,同时 MDA 含量与 SPAD 呈极显著负相关,MDA 含量与干重呈显著负相关,表明在低温胁迫前喷施水杨酸和褪黑素可以通过调节抗氧化相关酶活性和物质含量来减少活性氧对细胞膜脂的损伤,减轻低温胁迫给光合作用带来的不利影响,增强了光合产物积累,提高了小麦抗逆性,最终减少了小麦产量损失。

4 结论

药隔期低温胁迫前喷施水杨酸和褪黑素可以显

著提高小麦抗氧化能力,减少MDA等有害物质的积累,减少膜脂过氧化对小麦的损伤,从而提高光合作用,增加干重,同时喷施处理有利于缓解低温胁迫对小穗发育的不利影响,使得穗粒数及有效穗数增加,从而缓解了低温胁迫对小麦造成的产量损失,其中喷施水杨酸效果最优。

参考文献:

- [1] 刘录祥. 我国小麦产业科技创新发展现状与展望[J]. 寒旱农业科学, 2024, 3(6): 491-494.
- [2] YUE Y J, ZHOU Y, WANG J A, et al. Assessing wheat frost risk with the support of GIS: an approach coupling a growing season meteorological index and a hybrid fuzzy neural network model[J]. Sustainability, 2016, 8(12): 1308.
- [3] 钟秀丽,王道龙,赵 鹏,等. 黄淮麦区小麦拔节后霜冻的农业气候区划[J]. 中国生态农业学报, 2008, 16(1): 11-15.
- [4] 刘 畅,王维领,赵 灿,等. 小麦倒春寒研究现状及展望[J]. 江苏农业学报, 2022, 38(4): 1115-1122.
- [5] 方宇辉,齐学礼,张 煜,等. 黄淮麦区小麦品种抗倒春寒鉴定及其评价方法构建[J]. 麦类作物学报, 2023, 43(10): 1288-1297.
- [6] 李春燕,徐 雯,刘立伟,等. 药隔至开花期低温对小麦产量和生理特性的影响[J]. 麦类作物学报, 2016, 36(1): 77-85.
- [7] RIVAS-SAN VICENTE M, PLASENCIA J. Salicylic acid beyond defence: its role in plant growth and development[J]. Journal of Experimental Botany, 2011, 62(10): 3321-3338.
- [8] 王维领,赵 灿,李国辉,等. 水杨酸在植物抵御低温胁迫中的作用[J]. 植物生理学报, 2020, 56(12): 2585-2594.
- [9] WANG W L, WANG X, HUANG M, et al. Hydrogen peroxide and abscisic acid mediate salicylic acid-induced freezing tolerance in wheat[J]. Frontiers in Plant Science, 2018, 9: 1137.
- [10] BACK K, TAN D X, REITER R J. Melatonin biosynthesis in plants: multiple pathways catalyze tryptophan to melatonin in the cytoplasm or chloroplasts[J]. Journal of Pineal Research, 2016, 61(4): 426-437.
- [11] ARNAO M B, HERNÁNDEZ-RUIZ J. Melatonin in flowering, fruit set and fruit ripening[J]. Plant Reproduction, 2020, 33(2): 77-87.
- [12] TURK H, ERDAL S, GENISEL M, et al. The regulatory effect of melatonin on physiological, biochemical and molecular parameters in cold-stressed wheat seedlings[J]. Plant Growth Regulation, 2014, 74(2): 139-152.
- [13] WANG Y P, REITER R J, CHAN Z L. Phytomelatonin: a universal abiotic stress regulator[J]. Journal of Experimental Botany, 2018, 69(5): 963-974.
- [14] 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.
- [15] DU Z Y, BRAMLAGE W J. Modified thiobarbituric acid assay for measuring lipid oxidation in sugar-rich plant tissue extracts[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1992, 40(9): 1566-1570.
- [16] HASANUZZAMAN M, NAHAR K, ANEE T I, et al. Glutathione in plants: biosynthesis and physiological role in environmental stress tolerance[J]. Physiology and Molecular Biology of Plants, 2017, 23(2): 249-268.
- [17] WEI L T, WANG L N, YANG Y, et al. Absciscic acid enhances tolerance of wheat seedlings to drought and regulates transcript levels of genes encoding ascorbate-glutathione biosynthesis[J]. Frontiers in Plant Science, 2015, 6: 458.
- [18] XIAO L J, LIU L L, ASSENG S, et al. Estimating spring frost and its impact on yield across winter wheat in China[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2018, 260: 154-164.
- [19] 张 军,鲁 敏,孙树贵,等. 拔节期低温胁迫对小麦生理生化特性和产量的影响[J]. 西北农业学报, 2014, 23(2): 73-79.
- [20] 苏 慧,李金鹏,胡燕美,等. 喷施 KH_2PO_4 对孕穗期低温胁迫下小麦叶片抗氧化特性与幼穗冻害的影响[J]. 麦类作物学报, 2021, 41(5): 585-593.
- [21] JUNG K H, HUR J, RYU C H, et al. Characterization of a rice chlorophyll-deficient mutant using the T-DNA gene-trap system[J]. Plant and Cell Physiology, 2003, 44(5): 463-472.
- [22] 马 泉,张玉雪,陶 源,等. 春季不同时期低温对小麦光合特性和粒重形成的影响[J]. 麦类作物学报, 2022, 42(2): 226-235.
- [23] 柯媛媛,陈 翔,张乐乐,等. 药隔期低温胁迫对小麦干物质积累、转运和分配及产量的影响[J]. 安徽农业大学学报, 2021, 48(5): 701-706.
- [24] 高 芸,张玉雪,马 泉,等. 春季低温对小麦花粉育性及粒数形成的影响[J]. 作物学报, 2021, 47(1): 104-115.
- [25] JI H T, XIAO L J, XIA Y M, et al. Effects of jointing and booting low temperature stresses on grain yield and yield components in wheat[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2017, 243: 33-42.
- [26] 张雪莲,罗德旭,杨 红,等. 外源褪黑素和硒对高温胁迫下辣椒生理特性和抗氧化系统的影响[J]. 江苏农业学报, 2023, 39(8): 1729-1738.
- [27] 赵 欣,孟德义,苍 晶,等. 外源 SA 对低温胁迫下冬小麦糖酵解代谢的影响[J]. 麦类作物学报, 2022, 42(8): 1031-1038.
- [28] 杜思梦,方保停,李向东,等. 外源水杨酸对低温胁迫下小麦幼苗叶绿素荧光特性及抗氧化酶活性的影响[J]. 江苏农业科学, 2022, 50(19): 68-73.
- [29] 朱春权,魏倩倩,项兴佳,等. 褪黑素和茉莉酸甲酯基质育秧对水稻耐低温胁迫的调控作用[J]. 作物学报, 2022, 48(8): 2016-2027.
- [30] SCEBBA F, SEBASTIANI L, VITAGLIANO C. Changes in activity of antioxidative enzymes in wheat (*Triticum aestivum*) seedlings under cold acclimation[J]. Physiologia Plantarum, 1998, 104(4): 747-752.
- [31] CAVERZAN A, CASASSOLA A, BRAMMER S P. Antioxidant responses of wheat plants under stress[J]. Genetics and Molecular

- Biology, 2016, 39(1): 1-6.
- [32] 赵海亮, 左璐, 张璐, 等. 低温胁迫下外源褪黑素对番茄幼苗光抑制的缓解效应[J]. 应用生态学报, 2023, 34(1): 151-159.
- [33] 薛盈文, 黄寿光, 范博文, 等. 低温和 UV-B 复合胁迫对小麦幼苗抗氧化酶和渗透调节物质的影响[J]. 麦类作物学报, 2017, 37(6): 834-840.
- [34] 周艳, 刘慧英, 邓嘉欣, 等. GSH/GSSG 对盐胁迫下番茄幼苗谷胱甘肽化修饰和抗氧化系统的影响[J]. 分子植物育种, 2021, 19(6): 1995-2003.
- [35] 李璇, 岳红, 王升, 等. 影响植物抗氧化酶活性的因素及其研究热点和现状[J]. 中国中药杂志, 2013, 38(7): 973-978.
- [36] 葛君, 姜晓君, 任德超, 等. 低温胁迫对拔节期小麦抗氧化系统及光合能力的影响[J]. 天津农业科学, 2021, 27(9): 5-9.

(责任编辑: 陈海霞)