

引文格式: 沈子奇, 向世鹏, 许金亮, 等. 喷施外源 EBR 和 H_2O_2 对烤烟幼苗抗低温胁迫的影响[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2022, 37(4): 623–629. DOI: 10.12101/j.issn.1004-390X(n).202201004

喷施外源 EBR 和 H_2O_2 对烤烟幼苗 抗低温胁迫的影响*

沈子奇¹, 向世鹏², 许金亮¹, 范 敏¹, 张芸萍¹, 谢鹏飞², 李 强^{1**}

(1. 湖南农业大学农学院, 湖南长沙 410128; 2. 湖南省烟草公司长沙市公司, 湖南长沙 410021)

摘要: 【目的】研究低温胁迫前喷施外源表油菜素内酯 (EBR) 和过氧化氢 (H_2O_2) 对烤烟幼苗生理和生长的保护效应。【方法】以烤烟品种 K326 和湘烟 7 号为试验材料, 在七叶一心期进行叶面喷施 0.01 mg/L EBR 和 340 mg/L H_2O_2 处理, 连续喷施 4 d 后进行低温胁迫处理, 对低温胁迫下烟草叶片幼苗抗氧化酶活性、渗透调节物质和丙二醛 (MDA) 含量以及生物量进行测定。【结果】(1) 2 种烤烟在经历低温胁迫后均出现叶面积变小、生物量减少和根冠比减小的现象, 但 MDA 含量均上升; K326 的抗氧化酶活性和渗透调节物质含量降低, 而湘烟 7 号仅 POD 和 CAT 活性以及可溶性蛋白含量降低。(2) 与仅低温胁迫的处理相比, 喷施外源物质+低温处理后 K326 的生物量、抗氧化酶活性和渗透调节物质含量均显著升高 ($P<0.05$), MDA 含量显著降低 ($P<0.05$)。 (3) 与仅低温胁迫的处理相比, 喷施外源物质+低温处理后湘烟 7 号的 MDA 含量变化不显著 ($P>0.05$), 仅有部分渗透调节物质含量和抗氧化酶活性增加, 且整体变化幅度小于 K326。【结论】喷施外源 EBR 和 H_2O_2 可作为保护剂提高 2 个烤烟品种对于低温胁迫的耐受性, 且对 K326 的保护效果更好。

关键词: 低温胁迫; 表油菜素内酯 (EBR); H_2O_2 ; 保护效应; 酶活性; 渗透调节物质

中图分类号: S572.01

文献标志码: A

文章编号: 1004-390X (2022) 04-0623-07

Effect of Spraying Exogenous EBR and H_2O_2 on the Resistance of Tobacco Seedlings to Low Temperature Stress

SHEN Ziqi¹, XIANG Shipeng², XU Jinliang¹, FAN Min¹,
ZHANG Yunping¹, XIE Pengfei², LI Qiang¹

(1. College of Agriculture, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China;

2. Changsha Branch of Hunan Provincial Tobacco Company, Changsha 410021, China)

Abstract: [Purpose] To study the protective effects of exogenous epibrassinolide (EBR) and hydrogen peroxide (H_2O_2) sprayed before low temperature stress on the physiology and growth of tobacco seedlings. [Methods] The test materials were tobacco varieties K326 and Xiangyan No.7. Foliar sprays of 0.01 mg/L EBR and 340 mg/L H_2O_2 were applied at the seven-leaf-one-center stage, and then treated with low temperature stress for four days. The antioxidant enzyme activities, osmoregulatory substances contents, malondialdehyde (MDA) content, and biomass of tobacco leaf seed-

收稿日期: 2022-01-03

修回日期: 2022-05-03

网络首发日期: 2022-06-19

*基金项目: 湖南省烟草公司长沙市公司项目 (20-24A01)。

作者简介: 沈子奇 (1996—), 男, 湖南长沙人, 在读硕士研究生, 主要从事烟草栽培生理研究。

E-mail: 270503032@qq.com

**通信作者 Corresponding author: 李强 (1982—), 男, 江苏仪征人, 博士, 副教授, 主要从事烟草科学与工程技术和农业可持续发展研究。E-mail: zqiangli@126.com

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/53.1044.S.20220616.1450.001.html>



lings were measured. [**Results**] 1) After low temperature stress, the leaf area, biomass and root-shoot ratio of two varieties of tobacco decreased, but MDA content increased. The antioxidant enzyme activities and osmoregulatory substance contents of K326 were reduced; while only POD and CAT activities and soluble protein content were reduced in Xiangyan No.7. 2) Compared with the only low temperature stress treatment, biomass, antioxidant enzyme activities and osmoregulatory substance contents of K326 were significantly higher ($P<0.05$) and MDA content was significantly lower ($P<0.05$) in the sprayed exogenous substance+low temperature treatment. 3) Compared with the only low temperature stress treatment, the change of MDA content of Xiangyan No.7 was not significant ($P>0.05$), and only some osmoregulatory substances contents and antioxidant enzyme activities were higher in the sprayed exogenous substance+low temperature treatment, but the overall changes were smaller than that of K326. [**Conclusion**] Exogenous EBR and H_2O_2 were applied as protectants to improve the tolerance of both tobacco varieties to low temperature stress, and the protection effect was better for K326.

Keywords: low temperature stress; epibrassinolide (EBR); H_2O_2 ; protective effect; enzyme activity; osmoregulatory substance

烟草是常见喜温作物,多在春季移栽。近年来,为适应新的栽培制度,烤烟移栽期时常提前,因而容易出现早期烟草幼苗受低温胁迫所导致的营养生长不足,生殖生长提前,烟株矮小早花,叶片小且叶数少,从而造成烟叶产量品质降低^[1]。研究表明:植物受低温胁迫时,会通过抗氧化酶系统清除活性氧或减少活性氧产生,以维护细胞质膜、蛋白质及核酸等生物大分子稳定,降低活性氧损伤^[2];也会通过大量积累细胞中的渗透调节物质,如脯氨酸、可溶性蛋白和可溶性糖等增强对低温胁迫的抵抗能力^[3-4]。常博文等^[5]研究证实:施用外源物质(如赤霉素、水杨酸和多胺等)可提高作物耐性,从而缓解低温胁迫对作物造成的损伤。通过施用外源物质缓解烟草幼苗在大田早期受到的低温胁迫对烤烟栽培同样具有重要意义。

表油菜素内酯(epibrassinolide, EBR)在植物响应逆境胁迫中发挥着重要作用。大量研究表明:EBR可以缓解植物因多种逆境胁迫带来的损伤,如盐胁迫、干旱胁迫、高温或低温胁迫、重金属胁迫、弱光胁迫和生物胁迫等^[6-10]。聂文婧等^[6]研究发现:EBR可显著提高 $NaHCO_3$ 胁迫下黄瓜叶片和根系的抗氧化酶活性,维持植株内氧化还原平衡,提高植株耐盐性;丁丹阳等^[7]研究表明:喷施外源EBR能够促进根系形态发育,提高抗氧化酶活性,降低活性氧积累和膜质过氧化

水平,提高光合能力,增强烟草的抗旱能力。EBR能改善植物生长发育,增强植物对逆境的耐受性,降低因胁迫造成的损失,且其在改善植物生理活性方面的表现优于现有的5种植物激素^[11]。低含量的外源 H_2O_2 作为一种植物信号分子,参与调控植物体内多种生理代谢过程和众多基因表达^[12],可提高植物对逆境胁迫的耐受能力。有研究表明: H_2O_2 处理可显著增强盐胁迫下草莓叶片中抗氧化酶的表达水平,提高叶片光合能力以抵抗胁迫^[13];也有研究表明:施用 H_2O_2 可以提高水稻幼苗的抗氧化活性以缓解Cd胁迫^[14]。

目前关于施用外源EBR和 H_2O_2 对植物抗逆性作用的报道主要集中于植物受胁迫后的缓解效应,而对其施用的保护效应研究则鲜有报道。本研究以低温敏感型烤烟K326和新品种烤烟湘烟7号为材料,研究低温胁迫对烟草生理和生长的影响以及外源EBR和 H_2O_2 对烟草的保护效应,以为化学调控技术在烟草抗逆栽培中的应用提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试烤烟品种为K326和湘烟7号,均来自湖南省烟草种质资源管理库;植物生长外源物质为0.01 mg/L EBR和340 mg/L H_2O_2 ,购自上海易恩化学技术有限公司,两者的质量浓度由预试验确定。

1.2 试验设计

取饱满一致的烤烟种子依次放入 50 ℃ 温水浸泡 10 min、75% 乙醇溶液浸泡 30 s 和 10% NaClO 溶液浸泡 10 min (每次浸泡后均用无菌水洗净) 后点播于已经用 1/4 霍格兰营养液完全浸湿的脱脂棉培养皿上, 每皿 50~60 粒, 置于 28 ℃ 人工气候箱中避光催芽 4 d, 取萌动一致的种子播种于育苗盘, 每盘播种 24 株, 后将人工气候箱设置为光照时长 14 h/10 h(昼/夜)、昼/夜温度 28 ℃/18 ℃、相对湿度 75% 和光照强度 7000 lx; 待烟苗长至七叶一心时, K326 (T₁~T₄) 和湘烟 7 号 (T₅~T₈) 各设置 4 个试验处理。T₁ 和 T₅: 连续 4 d 喷施 EBR, 转入低温胁迫 4 d 后恢复常温; T₂ 和 T₆: 连续 4 d 喷施 H₂O₂, 转入低温胁迫 4 d 后恢复常温; T₃ 和 T₇ (阴性对照): 连续喷施 4 d 蒸馏水, 转入低温胁迫 4 d 后恢复常温; T₄ 和 T₈ (阳性对照): 连续喷施 4 d 蒸馏水, 始终保持常温生长。其中, EBR 和 H₂O₂ 的喷施量约为每株 5 mL (使药液浸润叶面), 喷施时间为 9:00 和 14:00; 每个处理重复 3 次, 每个重复 8 株。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 农艺性状及生物量

低温胁迫结束后第 8 天, 分别取各处理植株自上而下第 2、3 片真叶, 测量其最大叶长和最大叶宽, 并称量各处理地上和地下部烟株鲜质量, 后将烟苗 105 ℃ 杀青 40 min, 于 80 ℃ 恒温箱中烘干至恒质量, 称量各样品干质量。计算最

大叶面积 (最大叶长×最大叶宽×0.6345) 和根冠比 (根部干质量/地上部干质量)。

1.3.2 抗氧化酶活性、MDA 及渗透调节物质含量

烟株低温处理 4 d 后, 取自上而下第 2、3 片完全展开叶测定各项指标。采用 MUZI 等^[15]的方法测定超氧化物歧化酶 (SOD) 活性; 采用 FOY-ER 等^[16]的方法测定过氧化物酶 (POD) 活性; 采用秦文芳等^[17]的方法测定过氧化氢酶 (CAT) 活性和 MDA 含量; 游离脯氨酸含量使用南京建成生物工程所有有限公司试剂盒检测; 可溶性糖含量采用蒽酮比色法测定^[18]; 可溶性蛋白含量采用考马斯亮蓝法测定^[17]。

1.4 数据分析

采用 SPSS 21.0 和 Origin 2018 软件进行数据处理和绘图, 采用 Duncan's 新复极差法进行多重比较 ($P<0.05$)。

2 结果与分析

2.1 低温胁迫对喷施 2 种外源物质后烤烟幼苗农艺性状及生物量的影响

2.1.1 农艺性状

由表 1 可知: 经低温胁迫后, 2 种烤烟的各项农艺性状均下降。相比于 T₄ 和 T₈, T₃ 和 T₇ 的最大叶长、最大叶宽和最大叶面积分别下降 27.80%、26.42%、46.95% 和 30.75%、30.53%、51.89%, 表明低温对 2 种烤烟的生长均产生显著的抑制作用。与 T₃ 相比, T₁ 和 T₂ 的最大叶长分别提高 16.41% 和 13.90%, 最大叶宽分别提高 19.65% 和

表 1 不同外源物质对低温胁迫下 2 种烤烟幼苗农艺性状的影响

Tab. 1 Effects of different exogenous substances on the agronomic traits of two types of tobacco seedlings under low temperature stress

品种 variety	处理 treatment	最大叶长/cm maximum leaf length	最大叶宽/cm maximum leaf width	最大叶面积/cm ² maximum leaf area
K326	T ₁	17.17±0.53 b	8.83±0.23 a	96.16±3.89 b
	T ₂	16.80±0.67 b	8.87±0.63 a	94.46±5.17 b
	T ₃	14.75±0.64 c	7.38±0.48 b	69.01±4.95 c
	T ₄	20.43±0.72 a	10.03±1.33 a	130.08±18.93 a
湘烟7号 Xiangyan No.7	T ₅	16.25±0.64 b	7.92±1.04 b	81.66±23.18 b
	T ₆	15.60±4.81 b	7.53±0.56 b	74.53±15.23 b
	T ₇	16.55±1.21 b	7.28±0.71 b	76.45±12.81 b
	T ₈	23.90±2.93 a	10.48±1.09 a	158.92±33.99 a

注: T₁和T₅. EBR+低温, T₂和T₆. H₂O₂+低温, T₃和T₇. 蒸馏水+低温, T₄和T₈. 蒸馏水+常温; 同列不同小写字母表示在0.05水平下差异显著 ($P<0.05$); 下同。

Note: T₁ and T₅. EBR+low temperature, T₂ and T₆. H₂O₂+low temperature, T₃ and T₇. distilled water+low temperature, T₄ and T₈. distilled water+normal temperature; in the same column, different lowercase letters indicate significant differences at the 0.05 level ($P<0.05$); the same as below.

20.19%，最大叶面积分别提高 39.34% 和 36.88%，且差异均达到显著水平，而 T₁ 和 T₂ 间差异不显著。T₅、T₆ 和 T₇ 之间的各项农艺性状指标差异均未达显著水平。说明低温胁迫前喷施 2 种外源物质有助于减轻 K326 受低温胁迫后对叶片生长的抑制，从而加强 K326 对低温的耐受性，但 2 种外源物质的效果没有显著差异；而湘烟 7 号叶片生长受低温胁迫抑制的程度不随喷施 2 种外源物质而发生显著变化。

2.1.2 生物量

由表 2 可知：经低温胁迫后，2 种烤烟的鲜质量、干质量和根冠比均下降。T₃ 较 T₄ 的地上部干质量和鲜质量分别下降 42.62% 和 28.49%，

根干质量和鲜质量分别下降 66.67% 和 49.62%，根冠比下降 55.00%；T₇ 较 T₈ 的上述指标分别下降 42.62%、22.58%、50.00%、33.81% 和 15.00%。就 K326 而言，T₁ 和 T₂ 的地上部和根干、鲜质量以及根冠比均显著高于 T₃；就湘烟 7 号而言，T₆ 的地上部和根干、鲜质量和根冠比与 T₇ 相比差异不显著；T₅ 的根干、鲜质量和根冠比都显著高于 T₇，分别高 16.67%、16.30% 和 11.76%。说明在低温前喷施 2 种外源物质都能缓解低温胁迫下 2 种烤烟的生物量损失，且以喷施 EBR 的效果更为明显；而 2 种烤烟中 K326 的生物量受低温胁迫影响更大，2 种外源物质对其保护效果也更为明显。

表 2 不同外源物质对低温胁迫下 2 种烤烟幼苗生物量的影响

Tab. 2 Effects of different exogenous substances on the biomass of two types of tobacco seedlings under low temperature stress

品种 variety	处理 treatment	单株鲜质量/g fresh weight of per plant		单株干质量/g dry weight of per plant		根冠比 root-shoot ratio
		地上部 aboveground	根 root	地上部 aboveground	根 root	
K326	T ₁	7.04±0.04 b	1.06±0.01 b	0.40±0.01 b	0.07±0.00 b	0.18±0.03 ab
	T ₂	6.86±0.04 c	0.83±0.02 c	0.37±0.01 b	0.05±0.00 c	0.14±0.02 b
	T ₃	6.45±0.03 d	0.67±0.01 d	0.34±0.01 c	0.04±0.00 d	0.09±0.01 c
	T ₄	9.02±0.04 a	1.33±0.06 a	0.60±0.00 a	0.12±0.00 a	0.20±0.02 a
湘烟7号 Xiangyan No.7	T ₅	6.93±0.05 b	1.07±0.03 b	0.37±0.02 b	0.07±0.00 b	0.19±0.02 a
	T ₆	6.58±0.09 b	0.97±0.01 c	0.34±0.02 c	0.06±0.00 c	0.18±0.03 ab
	T ₇	7.03±0.06 b	0.92±0.02 c	0.35±0.02 c	0.06±0.00 c	0.17±0.02 b
	T ₈	9.08±0.03 a	1.39±0.05 a	0.61±0.01 a	0.12±0.02 a	0.20±0.01 a

2.2 低温胁迫对喷施 2 种外源物质后烤烟幼苗抗氧化酶活性的影响

2.2.1 超氧化物歧化酶 (SOD) 活性

由图 1 可知：低温胁迫后，T₃ 的 SOD 活性显著低于 T₄，而 T₁ 和 T₂ 的 SOD 活性比 T₄ 分别高 13.51% 和 16.77%；T₈ 的 SOD 活性比 T₇ 低 12.85%，T₅ 和 T₆ 分别较 T₈ 高 4.28% 和 7.93%，但未达到 T₇ 的 SOD 活性水平。说明喷施 2 种外源物质可以提高 K326 在受低温胁迫后的 SOD 活性，增强其活性氧清除能力，且喷施 H₂O₂ 的保护效果更佳；而湘烟 7 号在受低温胁迫后出现 SOD 活性显著上升的现象可能与其品种耐冷特性有关。

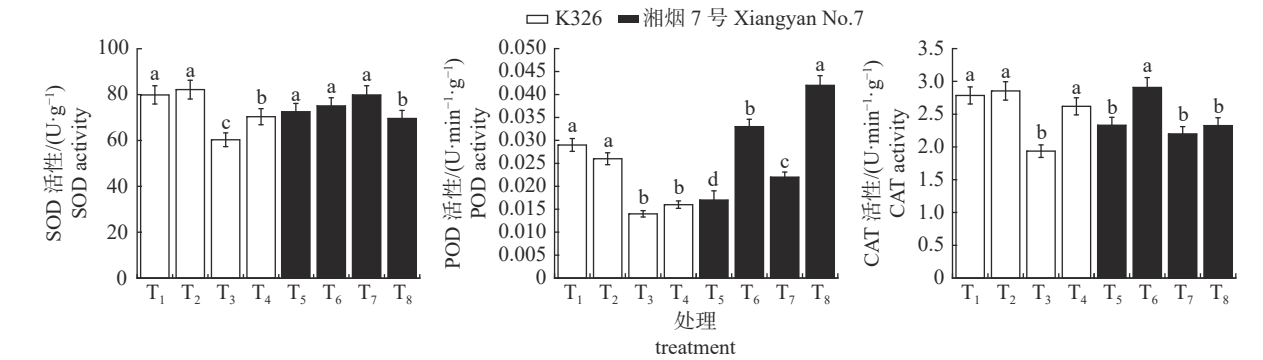
2.2.2 过氧化物酶 (POD) 活性

由图 1 还可知：低温胁迫后，与 T₄ 相比，T₃ 的 POD 活性下降 12.50%；与 T₃ 相比，T₁ 和 T₂ 的 POD 活性分别显著提高 107.14% 和 85.71%；

T₇ 的 POD 活性比 T₈ 低 47.62%，T₆ 的 POD 活性比 T₇ 高 50.00%，但 T₅ 的 POD 活性反而比 T₇ 低 22.72%。说明低温胁迫前喷施 2 种外源物质均可以提高 K326 在低温胁迫后的 POD 活性，且 EBR 的效果更好；但仅喷施 H₂O₂ 可以提高低温胁迫下湘烟 7 号的 POD 活性。

2.2.3 过氧化氢酶 (CAT) 活性

由图 1 可知：低温胁迫均导致 2 种烤烟 CAT 活性下降，且对 K326 的影响达显著水平，T₃ 的 CAT 活性比 T₄ 低 25.95%；而对湘烟 7 号影响较小，T₇ 的 CAT 活性比 T₈ 仅低 5.58%，未达到显著水平。与仅低温胁迫相比，在低温胁迫前喷施外源物质均可提高 2 种烤烟的 CAT 活性，T₁ 和 T₂ 的 CAT 活性分别比 T₃ 高 43.81% 和 47.42%；T₅ 和 T₆ 的 CAT 活性分别比 T₇ 高 5.91% 和 32.27%。说明在低温胁迫前喷施 2 种外源物质都能降低低



注: T₁ 和 T₅. EBR+低温, T₂ 和 T₆. H₂O₂+低温, T₃ 和 T₇. 蒸馏水+低温, T₄ 和 T₈. 蒸馏水+常温; 不同小写字母表示在 0.05 水平下显著 ($P<0.05$)。Note: T₁ and T₅. EBR+low temperature, T₂ and T₆. H₂O₂+low temperature, T₃ and T₇. distilled water+low temperature, T₄ and T₈. distilled water+normal temperature; different lowercase letters indicate significant at the 0.05 level ($P<0.05$).

图 1 不同外源物质对低温胁迫下 2 种烤烟幼苗抗氧化酶活性的影响

Fig. 1 Effects of different exogenous substances on the antioxidant enzyme activities of two types of tobacco seedlings under low temperature stress

温胁迫对 2 种烤烟 CAT 活性的影响, 且喷施 H₂O₂ 的效果更为明显, 其中, K326 的 CAT 活性受低温胁迫影响更大, 2 种外源物质对其保护效果更为明显。

2.3 低温胁迫对喷施 2 种外源物质的烤烟幼苗渗透调节物质和丙二醛 (MDA) 含量的影响

由表 3 可知: 喷施 2 种外源物质后, 2 种烤烟的可溶性蛋白含量变化相反, T₅ 和 T₆ 分别较 T₇ 低 6.67% 和 13.33%, T₁ 和 T₂ 均较 T₃ 高 7.14%。

就可溶性糖含量而言, T₁ 和 T₂ 分别比 T₃ 显著高 76.95% 和 54.13%, 且显著高于 T₄; T₅、T₆ 和 T₇ 的可溶性糖含量无显著差异, 但分别比 T₈ 显著高 20.80%、27.04% 和 21.30%。T₁ 和 T₂ 的脯氨酸含量分别比 T₃ 显著高 22.88% 和 35.46%; T₅、T₆ 和 T₇ 的脯氨酸含量无显著差异, 但均显著高于 T₈。T₁ 和 T₂ 的 MDA 含量比 T₃ 显著低 31.52% 和 42.93%; T₅、T₆ 和 T₇ 的 MDA 含量没有显著差异。

表 3 不同外源物质对低温胁迫下 2 种烤烟渗透调节物质和丙二醛含量的影响

Tab. 3 Effect of different exogenous substances on the osmoregulatory substances and MDA content of two tobacco under low temperature stress

品种 variety	处理 treatment	可溶性蛋白含量/(mg·g ⁻¹) soluble protein content	可溶性糖含量/(mg·g ⁻¹) soluble sugar content	脯氨酸含量/(μg·g ⁻¹) proline content	丙二醛含量/(μmol·kg ⁻¹) MDA content
K326	T ₁	0.15±0.01 a	46.91±2.22 a	30.56±4.01 a	1.26±0.14 b
	T ₂	0.15±0.02 a	40.86±1.06 b	33.69±3.15 a	1.05±0.11 c
	T ₃	0.13±0.01 b	26.51±2.99 d	24.87±0.45 b	1.84±0.12 a
	T ₄	0.14±0.01 b	33.45±2.70 c	25.10±1.69 b	1.73±0.14 a
湘烟7号 Xiangyan No.7	T ₅	0.14±0.01 c	36.64±0.78 a	39.50±7.04 a	1.34±0.28 a
	T ₆	0.13±0.02 c	38.53±1.79 a	46.12±12.17 a	1.18±0.17 ab
	T ₇	0.15±0.01 b	36.79±2.63 a	47.95±14.29 a	1.26±0.31 a
	T ₈	0.17±0.01 a	30.33±0.79 b	26.62±8.07 b	1.01±0.13 b

3 讨论

烤烟对低温胁迫的响应主要表现在细胞膜系统、保护酶活性、渗透调节物质和代谢活性等 4 个方面^[19], 本研究从细胞膜系统、保护酶活性和渗透调节物质 3 个方面分别选取具有代表性的指标, 配合植株的生物量变化, 探讨低温胁迫前

喷施 2 种外源物质对 2 种烤烟幼苗的保护效果。受低温胁迫影响, 烤烟幼苗生理和代谢过程出现异常, 导致其形态和结构发生变化^[20]。本研究对烤烟幼苗干物质质量和根冠比等形态结构指标进行测定, 表明低温胁迫前喷施 EBR 和 H₂O₂ 均有利于提高烤烟幼苗耐低温胁迫的能力, 且喷施 EBR 的处理耐受性更强。同时, 通过对比 2 种烤烟相

同低温胁迫下生长(生物量)受抑制的程度,证实湘烟 7 号耐低温胁迫的能力较 K326 强。与 K326 相比,低温胁迫下湘烟 7 号的叶面积减小更明显,这可能是由于湘烟 7 号能通过减小叶面积的方式减少气孔密度,以削弱低温胁迫造成的伤害^[21]。

MDA 含量可用于综合评价细胞受胁迫时生物膜的损伤程度^[22]。有研究表明:低温胁迫下烤烟幼苗 MDA 含量随胁迫程度的增强而明显上升^[23]。本研究中,低温胁迫下 2 种烤烟的 MDA 含量较常温有所上升,这与前人研究结果一致。与阴性对照相比,喷施 EBR 和 H₂O₂ 处理的 K326 MDA 含量明显下降,说明适宜质量浓度的 EBR 和 H₂O₂ 可通过提高烤烟幼苗生物膜系统对低温胁迫的耐受性进而提高其耐低温胁迫的能力;而喷施外源 EBR 和 H₂O₂ 处理的湘烟 7 号 MDA 含量变化不显著,这可能是由于湘烟 7 号受低温胁迫后 MDA 含量仍然较低所致^[23]。

当植物处于低温逆境时,会在短时间内产生大量 O₂⁻,导致 ROS 积累,打破体内 ROS 代谢平衡,对细胞造成氧化伤害^[24]。此时,植株会自发提高抗氧化酶活性以应对大量生成的 O₂⁻,其中, SOD 可以催化 O₂⁻生成 H₂O₂ 和 O₂, POD 和 CAT 又对 H₂O₂ 进行分解^[25-26]。本研究中,与阴性对照相比,低温胁迫前喷施外源 EBR 和 H₂O₂ 可使 K326 的 SOD、POD 和 CAT 活性显著上升,也证明喷施 2 种外源物质均有保护效果;但湘烟 7 号的抗氧化酶活性变化规律不一致,其原因可能是:处于低温逆境中的植物,耐寒性较差的品种其抗氧化酶活性升高趋势明显,而耐寒性较好的品种其抗氧化酶活性在低温持续阶段甚至后续恢复温度阶段始终保持一定^[27]。此外,湘烟 7 号的 POD 活性在受到低温胁迫后大幅下降,这一现象仍有待进一步研究。

烤烟生长受低温胁迫的抑制,其植物组织通常会降低渗透势以适应环境。植物体内的渗透调节物质包括可溶性糖、可溶性蛋白和脯氨酸等^[20],这些渗透调节物质与植物的耐冷性有关,如受低温胁迫时,植株体内的可溶性糖积累用以增加组织中的非结冰水,降低细胞水势,增强持水力^[28-29]。本研究中,低温敏感型品种 K326 受低温胁迫后,可溶性糖、可溶性蛋白和脯氨酸含量均降低,表明低温胁迫已经损伤烤烟幼苗细胞,导致细胞水势失衡;而在低温胁迫前喷施外源 EBR 和

H₂O₂ 可以显著提高其 3 种渗透调节物质的含量,说明适宜质量浓度的 EBR 和 H₂O₂ 可以通过提高烤烟幼苗渗透调节物质含量帮助烤烟抵御低温胁迫。

4 结论

低温胁迫前喷施的外源 EBR (0.01 mg/L) 和 H₂O₂ (340 mg/L) 可作为保护剂增强 K326 和湘烟 7 号幼苗对低温胁迫的耐受性,并提高其抗氧化酶活性。在 2 种外源物质中,EBR 的保护效果较 H₂O₂ 好,且 2 种外源物质对于低温敏感型烤烟品种 K326 的保护效果更好。

[参考文献]

- [1] 王浏杰. 烟草早花与苗期低温的相关性研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2017.
- [2] SABER H, ALAIN G, NAJOUA M, et al. Positive charges of polyamines protect PSII in isolated thylakoid membranes during photoinhibitory conditions[J]. *Plant & Cell Physiology*, 2011, 52(5): 866. DOI: [10.1093/pcp/pcr040](https://doi.org/10.1093/pcp/pcr040).
- [3] 马文涛, 樊卫国. 贵州野生柑橘的抗寒性测定和综合评价[J]. *西北植物学报*, 2014, 34(10): 2063. DOI: [10.7606/j.issn.1000-4025.2014.10.2063](https://doi.org/10.7606/j.issn.1000-4025.2014.10.2063).
- [4] 徐盛春. 烟草种子和幼苗多胺代谢的调控及与其耐寒性关系的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2009.
- [5] 常博文, 钟鹏, 刘杰, 等. 低温胁迫和赤霉素对花生种子萌发和幼苗生理响应的影响[J]. *作物学报*, 2019, 45(1): 118. DOI: [10.3724/SP.J.1006.2019.84043](https://doi.org/10.3724/SP.J.1006.2019.84043).
- [6] 聂文婧, 王硕硕, 荆鑫, 等. 外源表油菜素内酯对 NaHCO₃ 胁迫下黄瓜幼苗生长及氧化还原平衡的影响[J]. *应用生态学报*, 2018, 29(3): 899. DOI: [10.13287/j.1001-9332.201803.024](https://doi.org/10.13287/j.1001-9332.201803.024).
- [7] 丁丹阳, 张璐翔, 朱智威, 等. 叶面喷施 2,4-表油菜素内酯对烟草抗旱性的影响[J]. *中国烟草科学*, 2018, 39(4): 50. DOI: [10.13496/j.issn.1007-5119.2018.04.007](https://doi.org/10.13496/j.issn.1007-5119.2018.04.007).
- [8] 李淑叶, 马慧娟, 张思平, 等. 外源 24-表油菜素内酯对低温胁迫下棉花幼苗光合生理的影响[J]. *棉花学报*, 2018, 30(3): 252. DOI: [10.11963/1002-7807.lsyxh.20180409](https://doi.org/10.11963/1002-7807.lsyxh.20180409).
- [9] 徐晓昀, 郁继华, 顾建明, 等. 2,4-表油菜素内酯对亚适温弱光下黄瓜幼苗光合特性和抗氧化系统的影响[J]. *核农学报*, 2017, 31(5): 979. DOI: [10.11869/j.issn.100-8551.2017.05.0979](https://doi.org/10.11869/j.issn.100-8551.2017.05.0979).
- [10] 杨艺琳, 张正敏, 李美琳, 等. 2,4-表油菜素内酯对葡萄果实采后灰霉病的抑制作用机理[J]. *食品科学*, 2019, 40(15): 231. DOI: [10.7506/spkx1002-6630-20180821-222](https://doi.org/10.7506/spkx1002-6630-20180821-222).
- [11] 吴杨, 高慧纯, 张必弦, 等. 24-表油菜素内酯对盐碱胁迫下大豆生育、生理及细胞超微结构的影响[J]. *中国农业科学*, 2017, 50(5): 811. DOI: [10.3864/j.issn.0578-1752.2017.05.004](https://doi.org/10.3864/j.issn.0578-1752.2017.05.004).
- [12] YOU J, CHAN Z L. ROS regulation during abiotic stress responses in crop plants[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2015, 6: 1092. DOI: [10.3389/fpls.2015.01092](https://doi.org/10.3389/fpls.2015.01092).
- [13] CHRISTOU A, MANGANARIS G A, FOTPOULOS

- V, et al. Systemic mitigation of salt stress by hydrogen peroxide and sodium nitroprusside in strawberry plants via transcriptional regulation of enzymatic and non-enzymatic antioxidants[J]. Environmental and Experimental Botany, 2014, 107: 46. DOI: [10.1016/j.envexpbot.2014.05.009](https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2014.05.009).
- [14] 任艳芳, 何俊瑜, 杨军, 等. 外源H₂O₂对盐胁迫下小白菜种子萌发和幼苗生理特性的影响[J]. 生态学报, 2019, 39(20): 7745. DOI: [10.5846/stxb201809172021](https://doi.org/10.5846/stxb201809172021).
- [15] MUZI C, CAMONI L, VISCONTI S, et al. Cold stress affects H⁺-ATPase and phospholipase D activity in Arabidopsis[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2016, 108: 328. DOI: [10.1016/j.plaphy.2016.07.027](https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2016.07.027).
- [16] FOYER C H, NOCTOR G. Redox homeostasis and antioxidant signaling: a metabolic interface between stress perception and physiological responses[J]. The Plant Cell, 2005, 17(7): 1866. DOI: [10.1105/tpc.105.033589](https://doi.org/10.1105/tpc.105.033589).
- [17] 秦文芳, 宋慧平, 范远, 等. 活性焦对晋北盐碱地土壤性质和两种植物生长的影响[J]. 应用生态学报, 2021, 32(5): 1799. DOI: [10.13287/j.1001-9332.202105.028](https://doi.org/10.13287/j.1001-9332.202105.028).
- [18] DHAKAL S, REITER J W, LAROCHE A, et al. Leaf vein pattern response to heat and drought requires genes that influence PINFORMED1 localization and is mimicked by ABA treatment[J]. Environmental and Experimental Botany, 2021, 185: 104426. DOI: [10.1016/j.envexpbot.2021.104426](https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2021.104426).
- [19] 李琦瑶. 低温调控烤烟幼苗叶片生长发育的生理机制研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2019.
- [20] 李琦瑶, 陈爱国, 王程栋, 等. 低温胁迫对烤烟幼苗光合荧光特性及叶片结构的影响[J]. 中国烟草学报, 2018, 24(2): 30. DOI: [10.16472/j.chinatobacco.2017.327](https://doi.org/10.16472/j.chinatobacco.2017.327).
- [21] 钟克友, 唐湘如, 胡飞, 等. 水稻剑叶气孔性状与孕穗期耐冷性的关系研究[J]. 西北植物学报, 2010, 30(1): 98.
- [22] CAMPOS P S, QUARTIN V, RAMALHO J C, et al. Electrolyte leakage and lipid degradation account for cold sensitivity in leaves of *Coffea* sp. plants[J]. Journal of Plant Physiology, 2003, 160(3): 283. DOI: [10.1078/0176-1617-00833](https://doi.org/10.1078/0176-1617-00833).
- [23] 陈卫国. 不同烤烟品种抗寒性及相关生理生化指标的研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2007.
- [24] 孙富, 杨丽涛, 谢晓娜, 等. 低温胁迫对不同抗寒性甘蔗品种幼苗叶绿体生理代谢的影响[J]. 作物学报, 2012, 38(4): 732. DOI: [10.3724/SP.J.1006.2012.00732](https://doi.org/10.3724/SP.J.1006.2012.00732).
- [25] 郭慧, 李树杏, 孙平勇, 等. 不同基因型水稻苗期抗氧化系统对低温胁迫的响应[J]. 植物科学学报, 2019, 37(1): 63. DOI: [10.11913/PSJ.2095-0837.2019.10063](https://doi.org/10.11913/PSJ.2095-0837.2019.10063).
- [26] 王国骄, 王嘉宇, 马殿荣, 等. 不同耐冷性杂草稻和栽培稻抗氧化系统对冷水胁迫的响应[J]. 中国农业科学, 2015, 48(8): 1660. DOI: [10.3864/j.issn.0578-1752.2015.08.21](https://doi.org/10.3864/j.issn.0578-1752.2015.08.21).
- [27] BHATTACHARJEE S. Reactive oxygen species and oxidative burst: roles in stress, senescence and signal transduction in plants[J]. Current Science, 2005, 89(7): 1113.
- [28] 杨华庚. 低温胁迫对油棕幼苗生理生化特性的影响[D]. 海口: 华南热带农业大学, 2007.
- [29] 马晓华, 胡青荻, 张庆良, 等. 2个蝴蝶兰品种对低温胁迫的生理响应[J]. 西南林业大学学报(自然科学), 2021, 41(4): 72. DOI: [10.11929/j.swfu.202009013](https://doi.org/10.11929/j.swfu.202009013).

责任编辑: 何馨成