

张子怡,王学虎,苑莹,等. 外源物质复配对低温胁迫下小白菜生理特性的影响[J]. 山西农业科学, 2025, 53(1):73-79.

ZHANG Z Y, WANG X H, YUAN Y, et al. Effect of exogenous compound pairing on physiological characteristics of pakchoi under low temperature stress[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2025, 53(1):73-79.

doi:10.3969/j.issn.1002-2481.2025.01.08

外源物质复配对低温胁迫下小白菜生理特性的影响

张子怡,王学虎,苑莹,沈志峰

(河北萌帮生物科技有限公司研发部,河北 邢台 054000)

摘 要:为了探究3种外源物质腐植酸、海藻糖以及阿氏芽孢杆菌 MB35-5 复配对小白菜抗低温能力的影响,以小白菜为试验材料,设置1个常温处理(T1)为对照(CK),3个4℃低温处理:根部灌溉清水(T2)、腐植酸+海藻糖(T3)、腐植酸+阿氏芽孢杆菌 MB35-5(T4),研究不同外源物质复配对低温胁迫下小白菜的渗透调节物质、生物量、抗氧化酶活性以及丙二醛含量等指标的影响。结果表明,与T1(CK)处理相比,T2处理小白菜的生物量、叶绿素含量显著降低,渗透调节物质、相对电导率、抗氧化酶活性以及丙二醛含量显著增加。与T2处理相比,T3、T4处理小白菜的株高、叶片面积、地上部鲜质量、地下部鲜质量、可溶性糖、可溶性蛋白、脯氨酸、叶绿素含量以及 POD、SOD、CAT 活性均显著增加;T3、T4处理的小白菜根、叶相对电导率以及丙二醛含量均显著降低。综上,2种外源物质复配均可提高小白菜幼苗的抗低温能力。其中,腐植酸+海藻糖显著增加小白菜的生物量、叶绿素含量以及过氧化酶活性,降低小白菜相对电导率和丙二醛含量;腐植酸+阿氏芽孢杆菌 MB35-5 在增强细胞膜稳定性等方面发挥了重要的作用。

关键词:小白菜;腐植酸;海藻糖;阿氏芽孢杆菌 MB35-5;低温胁迫;生理特性

中图分类号:S14

文献标识码:A

文章编号:1002-2481(2025)01-0073-07

Effect of Exogenous Compound Pairing on Physiological Characteristics of Pakchoi under Low Temperature Stress

ZHANG Ziyi, WANG Xuehu, YUAN Ying, SHEN Zhifeng

(The Research and Development department of Hebei Monband

Biotechnology Company Limited, Xingtai 054000, China)

Abstract: In order to investigate the effects of three exogenous substances including humic acid, trehalose, and *Bacillus aryabhattai* MB35-5 compound pairing on the low temperature resistance of pakchoi, in this study, pakchoi was used as the experimental material. One room temperature treatment(T1) was set as the control, and three 4℃ low temperature treatments were applied for root irrigation with clean water(T2), humic acid+trehalose(T3), humic acid+*Bacillus Aryabhattai* MB35-5 (T4) to study the effects of different exogenous substance compound pairing on the osmotic regulatory substances, biomass, antioxidant enzyme activity, and malondialdehyde content of pakchoi under low temperature stress. The results showed that compared with T1, the biomass and chlorophyll content of pakchoi treated with T2 were significantly reduced, while the osmotic regulatory substances, relative conductivity, antioxidant enzyme activity, and malondialdehyde content were significantly increased. Compared with T2, the plant height, leaf area, fresh weight of aboveground, fresh weight of underground, soluble sugar, soluble protein, proline, chlorophyll content, and POD, SOD, and CAT activities of T3 and T4 treatments were increased significantly in pakchoi. The root and leaf electrical conductivity, and malondialdehyde content of T3 and T4 treatments were reduced significantly in pakchoi. In summary, the combination of two exogenous substances could improve the low temperature resistance of pakchoi seedlings. Among them, humic Acid+trehalose significantly increased the biomass, chlorophyll content, and peroxidase activity of pakchoi, while reduced its relative conductivity and malondialdehyde content. Humic acid+*Bacillus Aryabhattai* MB35-5 played an important role in enhancing cell membrane stability and other aspects.

收稿日期:2024-03-07

基金项目:石家庄市厅市会商专项(225490590595A)

作者简介:张子怡,农艺师,硕士,主要从事新型肥料研发与应用研究,E-mail: 2630598794@qq.com

Keywords: pakchoi; humic acid; trehalose; *Bacillus aryabhattai* MB35-5; low temperature stress; physiological characteristics

气候变化下极端低温事件发生的风险越来越大,晚春霜冻是我国主要气象灾害^[1]。恶劣的气候条件导致植物细胞膜流动性差、蛋白质复合物解离、各种酶活性降低、光合速率降低,最终导致植物生长减慢、脱水、叶片萎蔫,营养器官干物质积累降低,产量或品质下降^[2]。在整个生物发展和进化过程中,植物体已经进化出多种调节机制来响应外部环境变化。植物可以通过调节对水分和养分的吸收、膜流动性和光合作用来降低生化反应速率,进而影响细胞代谢^[3]。逆境胁迫下,植物中的活性氧含量(ROS)会大量增加,而ROS的动态平衡对于降低ROS的毒性至关重要。为了减轻植物体内ROS过度蓄积造成的损害,植物演化出复杂的抗氧化防御系统,如超氧化物歧化酶、过氧化氢酶等,加速清除自由基,降低细胞氧化损伤^[4]。因此,提高植物的耐低温能力,将有利于提高作物品质和产量,进而减少经济损失。

腐植酸是一种生物刺激素,在促进植物生长方面具有重要作用^[5-6]。它可以诱导与非生物胁迫耐受性相关的植物初级和次级代谢的变化,从而改善植物生长并提高对非生物胁迫的抵抗力^[7]。已有研究表明^[8-9],低温胁迫下,叶面喷施腐植酸,水稻、红掌细胞中的脯氨酸和抗氧化酶活性增加,植物对低温的抗性增强。海藻糖是一种能促进植物生长发育和植物防御反应能力的寡糖素类物质^[10]。在低温胁迫下,喷施海藻糖可以有效缓解玉米幼苗根系的抑制作用,增加作物的生物量^[11]。阿氏芽孢杆菌MB35-5具有较强的脱硅活性,可以把土壤中矿物质硅降解为活性硅^[12],可显著提高低温胁迫下小麦叶片的气孔导度、净光合速率以及水分利用效率^[13]。目前,腐植酸、海藻糖和阿氏芽孢杆菌在植物抗逆境胁迫方面已有较多的研究,而有关这3种活性物质复配制剂在调节小白菜抗低温胁迫方面的研究鲜有报道。

本研究对腐植酸、海藻酸、阿氏芽孢杆菌MB35-5这3种不同外源物质进行复配,研究不同外源物质对低温胁迫条件下小白菜生物量、可溶性糖含量、可溶性蛋白含量、脯氨酸含量、叶绿素含量、相对电导率、抗氧化酶活性以及丙二醛含量的影响,以明确不同外源物质复配对低温胁迫下小

白菜的耐逆生理机制,为植物更好适应低温环境提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 试验材料

供试白菜品种为白梗小白菜,购于山东寿禾种业有限公司。供试外源物质为腐植酸悬浮剂(质量浓度为300 mg/L)、海藻酸(质量浓度为10 mg/L)、阿氏芽孢杆菌MB35-5(菌数 1.25×10^7 cfu/mL),均由河北萌帮生物科技有限公司研发部实验室提供。

1.2 试验设计

选取饱满的小白菜种子,用2%的次氯酸钠消毒10 min,纯水反复冲洗后,均匀播撒到花盆中,于培养室(温度22℃,湿度60%,昼夜光照时间为12 h/12 h)培养。当幼苗长至3片真叶时,移植到口径7 cm、高7.5 cm的小花盆中,利用人工气候箱模拟低温条件。试验共设4个处理,每个处理种植10棵,每个处理3个重复。设置1个常温处理(T1,CK),3个4℃低温处理:T2(清水处理)、T3(腐植酸+海藻酸)、T4(腐植酸+阿氏芽孢杆菌MB35-5)。在低温处理前1 d按照50 mL/株的处理液灌根,7 d后取样进行各指标的测定。

1.3 测定项目及方法

培养7 d后,测定小白菜叶面积、地上部鲜质量、地下部鲜质量、株高。取适量小白菜的叶片和根检测相关指标。采用苯酚法测定可溶性糖含量;乙醇提取法测定叶绿素含量;考马斯亮蓝G-250染色法测定可溶性蛋白含量;利用试剂盒(Solarbio公司)检测POD、CAT、SOD活性,MDA、脯氨酸含量;电导仪测定小麦叶片和根的电导率^[14]。

$$\text{相对电导率} = R1/R2 \times 100\% \quad (1)$$

式中,R1为浸提液电导率,R2为水浴加热后浸提液电导率。

1.4 数据分析

采用Excel 2020和IBM SPSS Statistics 20.0进行统计分析;使用GraphPad Prism软件制图。

2 结果与分析

2.1 外源物质复配对低温胁迫下小白菜生物量的影响
由表1可知,低温胁迫下小白菜的生物量受到

明显的抑制,相较于T1(CK)处理,T2处理小白菜的株高降低28.87%,叶面积降低47.80%,地上部鲜质量降低58.06%,地下部鲜质量降低42.86%。相较于T2处理,腐植酸+海藻糖、腐植酸+阿氏芽孢杆菌MB35-5处理后,小白菜的株高分别增加

31.26%、15.63%;叶片面积分别增加68.55%、55.78%;地上部鲜质量分别增加116.67%、97.44%,地下部鲜质量分别增加53.13%、37.5%。结果表明,腐植酸与海藻糖复配较好地缓解了低温胁迫对小白菜生物量的抑制作用。

表1 外源物质复配对低温胁迫下小白菜生物量的影响

Tab.1 Effects of exogenous compound pairing on the biomass of pakchoi under low temperature stress

处理 Treatment	株高/cm Plant height	叶面积/cm ² leaf area	地上部鲜质量/(g/株) Fresh weight of aboveground	地下部鲜质量/(g/株) Fresh weight of underground
T1(CK)	13.13±0.12a	25.04±1.58a	1.86±0.09a	0.56±0.03a
T2	9.34±0.31b	13.07±0.60c	0.78±0.02c	0.32±0.02c
T3	12.26±0.33a	22.03±1.13ab	1.69±0.84ab	0.49±0.04ab
T4	10.80±0.29a	20.36±0.44b	1.54±0.49b	0.44±0.04b

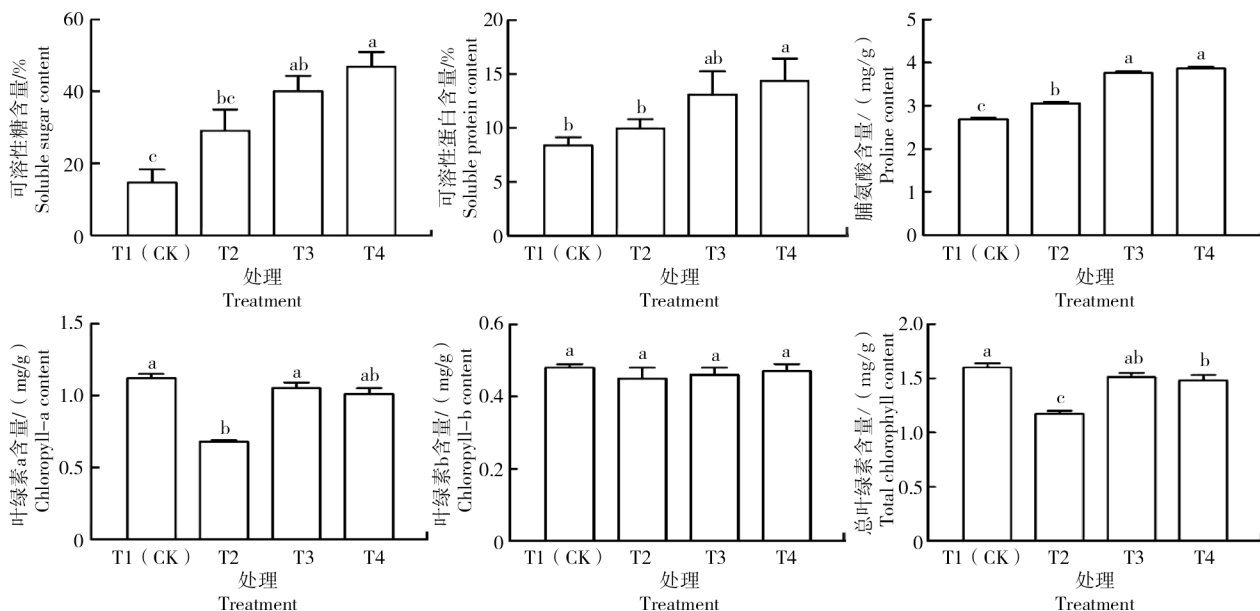
注:同列中不同小写字母表示不同处理间存在显著性差异($P<0.05$)。

Note: Different lowercase letters in the same column indicated significant differences among different treatments($P<0.05$).

2.2 外源物质复配对低温胁迫下小白菜渗透调节物质和叶绿素含量的影响

从图1可以看出,相较于T1处理,T2处理的小白菜的可溶性糖、可溶性蛋白、脯氨酸含量呈上升趋势,分别增加了97.75%、18.50%、13.81%。相较于T2处理,腐植酸+海藻糖、腐植酸+阿氏芽孢杆菌MB35-5处理的可溶性糖、可溶性蛋白、脯氨酸积累量进一步增加。其中,相较于T2处

理,T3处理可溶性糖、可溶性蛋白、脯氨酸含量分别增加37.76%、14.4%、23.28%,T4处理可溶性糖、可溶性蛋白、脯氨酸含量分别增加61.48%、43%、26.56%。结果表明,腐植酸与阿氏芽孢杆菌MB35-5复配显著增加小白菜的可溶性糖、可溶性蛋白、脯氨酸含量,增加细胞渗透压,增强细胞膜的稳定性。



图中不同小写字母表示不同处理间存在显著性差异($P<0.05$)。下图同

Different lowercase letters indicated significant differences among different treatments($P<0.05$). The same as below

图1 外源物质复配对低温胁迫下小白菜渗透调节物质和叶绿素含量的影响

Fig.1 Effects of exogenous compound pairing on osmotic regulatory substances and chlorophyll content in pakchoi under low temperature stress

低温环境下会造成植物光抑制,光合作用减弱,叶绿素含量降低,从而影响植物的正常生长发育。从图 1 可以看出,与 T1 处理相比,T2 处理的小白菜叶片叶绿素 a 和总叶绿素含量显著降低 ($P<0.05$),分别降低了 39.29%、26.88%。与 T2 处理相比,施用腐植酸+海藻糖、腐植酸+阿氏芽孢杆菌 MB35-5 后,小白菜叶片叶绿素 a 含量分别增加 54.41%、48.53%,总叶绿素含量分别增加 29.41%、26.50%。结果表明,腐植酸+海藻糖复配处理可以有效保持低温条件下小白菜中叶绿素的含量,维持小白菜的光合作用,保证植物可以正常生长。

2.3 外源物质复配对低温胁迫下小白菜相对电导率的影响

植物组织的相对电导率表征植物细胞膜受损害的程度。低温胁迫下,植物的细胞膜遭到破坏,使植物细胞的电解质外渗,植物浸提取液的电导率也随之增加。从图 2 可以看出,相较于 T1 处理,T2 处理下小白菜叶片和根的电导率显著增加 ($P<0.05$),分别增加 130.66%、11.60%。与 T2 处理相比,T3、T4 处理的小白菜叶片相对电导率分别降低 26.01%、22.94%,小白菜根的相对电导率分别降低 7.63%、6.43%。结果表明,外源物质复配处理可以降低低温胁迫下细胞膜通透性,提高细胞膜的流动性,缓解低温对植物根系造成的损伤,其中,腐植酸和海藻糖复配处理效果最佳。

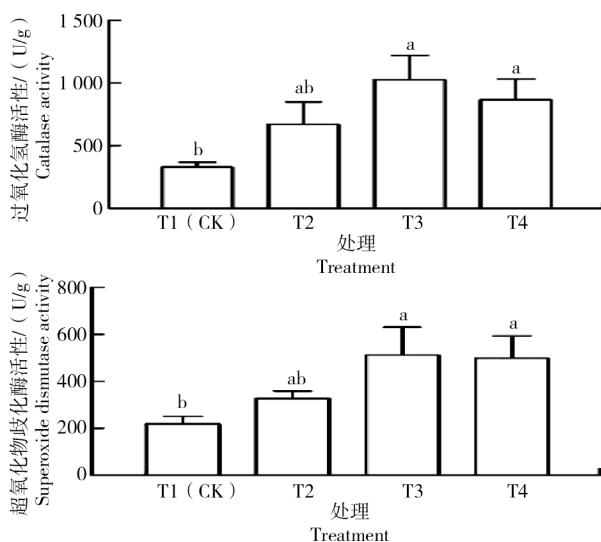


图 3 外源物质复配对低温胁迫下小白菜过氧化酶活性和丙二醛含量的影响

Fig.3 Effect of exogenous compound on peroxidase activity and malondialdehyde content of pakchoi under low temperature stress

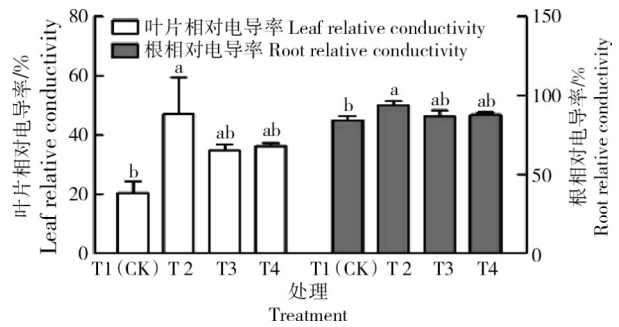
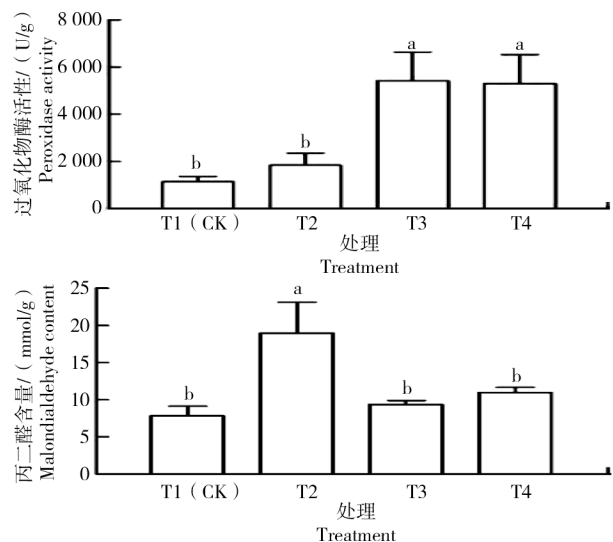


图 2 外源物质复配对低温胁迫下小白菜相对电导率的影响

Fig.2 Effect of exogenous compound pairing on the relative conductivity of pakchoi under low temperature stress

2.4 外源物质复配对低温胁迫下小白菜过氧化酶活性和丙二醛含量的影响

由图 3 可知,与 T1 处理相比,T2 处理小白菜叶片中 CAT、POD、SOD 活性分别增加 102.32%、60.94%、49.88%。与 T2 处理相比,T3、T4 处理后小白菜叶片 POD、SOD、CAT 的活性呈上升趋势,其中,以 T3 处理小白菜叶片 POD、SOD、CAT 活性最高,分别增加 194.49%、56.34%、53.21%。相较于 T1 处理,T2 处理小白菜叶片中的丙二醛含量增加。相较于 T2 处理,T3、T4 处理的小白菜叶片的 MDA 含量显著降低 ($P<0.05$),分别减少 50.69%、42.25%。由此可见,外源物质的复配可以提高低温胁迫下植物组织的抗氧化酶的活性,降低丙二醛含量,其中,腐植酸与海藻糖复配效果较好、腐植酸与阿氏芽孢杆菌 MB35-5 复配效果次之。



2.5 小白菜各指标的相关性分析

从表2可以看出,低温胁迫下小白菜生物量与株高、叶面积、地下部鲜质量、叶绿素含量以及POD、SOD、CAT活性均呈正相关;与可溶性糖、

可溶性蛋白、MDA含量、脯氨酸含量、根相对电导率、叶片相对电导率均呈负相关。其中,小白菜生物量与叶绿素含量的相关性系数最高,为0.998,与叶面积的相关性系数为0.993。

表2 小白菜各指标的相关性分析
Tab.2 Correlation analysis of various indicators of pakchoi

因素 Element	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
A	1													
B	0.965*	1												
C	0.945	0.993**	1											
D	0.985*	0.993**	0.973*	1										
E	0.932	0.993**	0.998**	0.971*	1									
F	-0.197	-0.158	-0.043	-0.237	-0.077	1								
G	-0.234	-0.236	-0.128	-0.299	-0.169	0.986*	1							
H	-0.056	-0.057	-0.052	-0.121	0.008	0.981*	0.983*	1						
I	-0.923	-0.939	-0.892	-0.960*	-0.904	0.488	0.551	0.391	1					
J	-0.960*	-1.000**	-0.992**	-0.991**	-0.994**	0.167	0.247	0.069	0.942	1				
K	-0.236	-0.205	0.092	0.281	-0.127	0.999**	0.992**	0.979*	0.529	0.214	1			
L	0.019	0.122	0.240	0.024	0.220	0.936	0.870	0.909	0.219	-0.119	0.917	1		
M	-0.154	-0.067	0.053	-0.162	0.029	0.980*	0.934	0.940	0.401	0.071	0.970*	0.981*	1	
N	-0.941	-0.990*	-1.000**	-0.968*	-0.997**	0.020	0.105	-0.074	0.882	0.989*	0.068	-0.263	-0.076	1

注:A.株高;B.叶面积;C.地上部鲜质量;D.地下部鲜质量;E.叶绿素;F.可溶性糖;G.可溶性蛋白;H.脯氨酸;I.叶片相对电导率;J.根相对电导率;K.过氧化物酶;L.过氧化氢酶;M.超氧化物歧化酶;N.丙二醛;*和**分别表示在0.05水平上显著相关和0.01水平上极显著相关。

Note: A. plant height; B. leaf area; C. fresh weight of aboveground; D. fresh weight of underground; E. chlorophyll; F. soluble sugars; G. soluble protein; H. proline; I. leaf relative conductivity; J. root relative conductivity; K. peroxidase; L. catalase; M. superoxide dismutase; N. malondialdehyde; * and ** indicated that there was significant correlation at the 0.05 level and extremely significant correlation at the 0.01 level, respectively.

3 结论与讨论

低温影响植物的生长发育,改变植物的自身形态^[15]。低温胁迫下植物细胞的超微结构遭到破坏,从而导致叶片弯曲、萎蔫,光合色素减少^[16],株高、鲜质量等生物量明显下降,降低小白菜的产量和品质^[17]。本研究中,与常温处理相比,低温处理后,小白菜叶片的叶绿素含量减少26.87%,叶面积、株高、地上部鲜质量和地下部鲜质量分别降低了28.87%、47.80%、58.06%、42.86%。由此可见,小白菜在低温胁迫下光合色素减少,从而影响了小白菜的光合速率和生长发育。这与胡雪华等^[18]研究结果相一致。相较于清水处理,施加腐植酸+海藻糖以及腐植酸+阿氏芽孢杆菌MB35-5后,小白菜叶绿素含量、叶面积、株高、地上部鲜质量和地下部鲜质量显著增加。结果表明,腐植酸+

海藻糖以及腐植酸+阿氏芽孢杆菌MB35-5处理在低温条件下能有效保持小白菜光合色素含量,维持正常光合作用供应植物生长。此结果与李进等^[19]、刘海卿^[20]在白菜和棉花上的研究结果一致。

在低温、干旱等逆境胁迫下,植物的呼吸速率加强,新陈代谢加速,植物体内会产生一系列的活性氧,这些活性氧会破坏酶的活性,扰乱膜的稳定性,损害DNA的复制和蛋白质的合成^[21]。在逆境胁迫过程中,植物通过提高体内抗氧化酶活性,协同并清除多余的活性氧,使自由基水平维持在平衡状态^[22-23]。已有大量研究表明^[24-27],低温胁迫处理前,喷施腐植酸、水杨酸、海藻糖、氯化胆碱等外源物质会提高马铃薯、小麦、玉米等作物的抗氧化酶活性。辛慧慧等^[28]研究表明,2种或2种以上外源物质复配可能会产生协同作用,其效果会优于单独施加1种外源物质。本研究中,低温胁迫处理

前,施加腐植酸+海藻糖以及腐植酸+阿氏芽孢杆菌 MB35-5,增加了小白菜叶片中的过氧化物酶活性,降低了小白菜叶片中丙二醛的含量。由此可见,腐植酸+海藻糖以及腐植酸+阿氏芽孢杆菌 MB35-5 的复配使用可以缓解细胞膜脂的过氧化程度,减少活性氧对植物的伤害,提高小白菜的低温耐受性。

植物膜系统状况的生理生化指标通常通过相对电导率来反映。王秋京^[29]研究发现,低温胁迫下水稻秧苗中有大量电解质渗出,叶片相对电导率提高。辛慧慧等^[28]研究发现,低温胁迫处理前,用 2 种或 2 种以上外源物质复配处理棉花幼苗后,植物叶片的相对电导率降低。本研究中,低温胁迫下小白菜叶片和根系的相对电导率增加,2 种外源物质复配处理则显著降低了叶片与根系的相对电导率,并且提高叶片组织中的可溶性糖、可溶性蛋白含量。已有研究表明^[30-31],低温冷害下,植物细胞内会生成大量的可溶性糖、可溶性蛋白等渗透调节物质,缓解细胞失水、冷凝。由此可见,外源物质复配处理可以稳定植物细胞内水分平衡,维持质膜完整性,增加可溶性糖含量,降低细胞内水势,降低低温胁迫下根系和叶片浸出液的相对电导率。

本研究结果表明,2 种外源物质复配处理均可以有效缓解低温胁迫下小白菜的生长抑制和细胞损伤,其中,腐植酸与海藻糖复配可以显著提高小白菜的生物量、抗氧化酶的活性以及叶绿素含量;腐植酸与阿氏芽孢杆菌 MB35-5 复配对小白菜可溶性糖、可溶性蛋白以及脯氨酸含量有较好的促进作用。不同外源物质所激发的抗非生物胁迫的通路不同,外源物质的复配使用能够激活更多的抗逆通路,作用效果更显著。因此,在今后的研究和应用中,外源物质复配可能作为减轻低温胁迫对小白菜影响的有效途径之一,但其实际的影响机理仍有待深入探讨。

参考文献:

- [1] BARLOW K M, CHRISTY B P, O'LEARY G J, et al. Simulating the impact of extreme heat and frost events on wheat crop production: a review[J]. *Field Crops Research*, 2015, 171: 109-119.
- [2] XIAO L J, ASSENG S, WANG X T, et al. Simulating the effects of low-temperature stress on wheat biomass growth and yield[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2022, 326: 109-191.
- [3] ZHENG M, WANG Y H, LIU K, et al. Protein expression changes during cotton fiber elongation in response to low temperature stress[J]. *Journal of Plant Physiology*, 2012, 169(4): 399-409.
- [4] ZHANG X H, ZHANG L, SUN Y P, et al. Hydrogen peroxide is involved in strigolactone induced low temperature stress tolerance in rape seedlings[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2020, 11(157): 402-415.
- [5] 陈玉玲. 腐植酸对植物生理活动的影响[J]. *植物学通报*, 2000, 35(1): 64-72.
- [6] CHEN Y L. Influence of humic acids on physiological activities of plants[J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 2000, 35(1): 64-72.
- [7] ZHANG X Z, SCHMIDT R E. Hormone-containing products/ impact on antioxidant status of tall fescue and creeping bentgrass subjected to drought[J]. *Crop Science*, 2000, 40(5): 1344-1349.
- [8] CANELLAS L P, OLIVARES F L, AGUIAR N O, et al. Humic and fulvic acids as biostimulants in horticulture[J]. *Scientia Horticulturae*, 2015, 196: 15-27.
- [9] 金平, 刘山莉. 腐殖酸与水稻抗冷性的研究初探[J]. *东北农业大学学报*, 1997, 28(1): 90-93.
- [10] JIN P, LIU S L. Effect of humic acid on rice to chilling injury[J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 1997, 28(1): 90-93.
- [11] 张彩凤, 王慧, 潘虹, 等. 低温胁迫下叶面喷施腐植酸钾对红掌生理生化指标的影响[J]. *山西农业科学*, 2015, 43(2): 167-171, 191.
- [12] ZHANG C F, WANG H, PAN H, et al. Effect of potassium humate with foliar application on the physiological and biochemical indices of *Anthurium* under low temperature stress[J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2015, 43(2): 167-171, 191.
- [13] 吴文杰, 蔡建秀, 葛清秀, 等. 海藻源物质对低温胁迫蔬菜生长的效应[J]. *安徽农业科学*, 2007, 35(9): 2547-2552.
- [14] WU W J, CAI J X, GE Q X, et al. Effect of liquid from seaweed on the vegetable growth under low temperature stress[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2007, 35(9): 2547-2552.
- [15] 刘旋, 佟昊阳, 田礼欣, 等. 外源海藻糖对低温胁迫下玉米幼苗根系生长及生理特性的影响[J]. *中国农业气象*, 2018, 39(8): 538-546.
- [16] LIU X, TONG H Y, TIAN L X, et al. Effects of exogenous trehalose on growth and physiological characteristics of maize seedling roots under chilling stress[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2018, 39(8): 538-546.
- [17] 黄志浩, 吴广利, 张涛, 等. 阿氏芽孢杆菌 MB35-5 解硅能力及田间应用效果研究[J]. *中国土壤与肥料*, 2021(5): 140-143.
- [18] HUANG Z H, WU G L, ZHANG T, et al. Quantitative analysis of the ability of *Bacillus aryabhattai* MB35-5 to dissolve silicon using incubation and field experiments[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2021(5): 140-143.
- [19] 范琼花, 孙万春, 李兆君, 等. 硅对短期低温胁迫小麦叶片光合作用及其主要相关酶的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2009, 15(3): 544-550.

- FAN Q H, SUN W C, LI Z J, et al. Effects of silicon on photosynthesis and its major relevant enzyme activities in wheat leaves under short-term cold stress[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2009, 15(3): 544-550.
- [14] 徐新娟, 李勇超. 2种植物相对电导率测定方法比较[J]. 江苏农业科学, 2014, 42(7): 311-312.
- XU X J, LI Y C. Comparison of two methods for measuring relative electrical conductivity of plants[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2014, 42(7): 311-312.
- [15] 魏鑫, 王升, 王兴东, 等. 不同蓝莓品种对低温处理的生理响应及抗寒性评价[J]. 河南农业科学, 2023, 52(8): 115-125.
- WEI X, WANG S, WANG X D, et al. Physiological response and cold resistance evaluation of blueberry varieties under low temperature treatment[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2023, 52(8): 115-125.
- [16] 彭剑涛, 赵大芹, 王天文, 等. 低温胁迫下结球白菜的光合及叶绿素荧光特性[J]. 西南农业学报, 2014, 27(6): 2345-2348.
- PENG J T, ZHAO D Q, WANG T W, et al. Effects of low temperature on photosynthetic and chlorophyll fluorescence characteristics of Chinese heading cabbage[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2014, 27(6): 2345-2348.
- [17] 王庆彬, 刘治国, 彭春娥, 等. 宛氏拟青霉提取物诱导小白菜抗低温胁迫的作用机理[J]. 核农学报, 2022, 36(2): 473-480.
- WANG Q B, LIU Z G, PENG C E, et al. Mechanism of *Paeecilomyces variotii* extract in inducing pakchoi resistance to low-temperature stress[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2022, 36(2): 473-480.
- [18] 胡雪华, 刘宁宁, 陶慧敏, 等. 低温胁迫对番茄幼苗不同叶龄叶片叶绿素荧光成像特性的影响[J]. 中国农业科学, 2022, 55(24): 4969-4980.
- HU X H, LIU N N, TAO H M, et al. Effects of chilling on chlorophyll fluorescence imaging characteristics of leaves with different leaf ages in tomato seedlings[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2022, 55(24): 4969-4980.
- [19] 李进, 张军高, 刘梦丽, 等. 4种外源物质对低温胁迫下棉花(*Gossypium hirsutum*)幼苗的缓解效应分析[J]. 分子植物育种, 2019, 17(17): 5792-5800.
- LI J, ZHANG J G, LIU M L, et al. Mitigation effect analysis of four exogenous substances on *Gossypium hirsutum* seedlings under low temperature stress[J]. Molecular Plant Breeding, 2019, 17(17): 5792-5800.
- [20] 刘海卿. ABA(脱落酸)对北方白菜型冬油菜抗寒性影响研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2016: 1-85.
- LIU H Q. Study on the effect of ABA(Absciscic Acid) on the cold resistance of northern pakchoi winter rapeseed[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2016: 1-85.
- [21] 张小冰, 邢勇, 郭乐, 等. 腐植酸钾浸种对干旱胁迫下玉米幼苗保护酶活性及MDA含量的影响[J]. 中国农学通报, 2011, 27(7): 69-72.
- ZHANG X B, XING Y, GUO L, et al. Effects of soaking with potassium humate on the activity of protective enzymes and the level of MDA of maize seedlings under drought stress[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(7): 69-72.
- [22] 张帆, 李景富, 姜景彬, 等. 外源水杨酸诱导对番茄幼苗抗冷性的影响[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(3): 91-94.
- ZHANG F, LI J F, JIANG J B, et al. Effect of exogenous salicylic acid induction on cold resistance of tomato seedlings[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2017, 45(3): 91-94.
- [23] THEOCHARIS A, CLÉMENT C, BARKA E A. Physiological and molecular changes in plants grown at low temperatures[J]. Planta, 2012, 235(6): 1091-1105.
- [24] 孙海燕, 孔德庸, 胡慧影, 等. 腐植酸浸种对低温胁迫下玉米幼苗抗氧化系统的影响[J]. 生态学报, 2021, 41(13): 5385-5397.
- SUN H Y, KONG D Y, HU H Y, et al. Effects of soaking seed with humic acid on antioxidant system of maize seedlings under low-temperature stress[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(13): 5385-5397.
- [25] 赵小强, 彭云玲, 方鹏, 等. 不同外源调节物质对低温胁迫下玉米的缓解效应分析[J]. 干旱地区农业研究, 2018, 36(3): 184-193, 229.
- ZHAO X Q, PENG Y L, FANG P, et al. Mitigation effect analysis of different exogenous regulatory substances on maize under low-temperature stress[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2018, 36(3): 184-193, 229.
- [26] 荆恩恩, 高翔, 李宗震, 等. 氯化胆碱对小麦幼苗耐低温能力的生理调控效应[J]. 麦类作物学报, 2018, 38(6): 748-755.
- JING E E, GAO X, LI Z Z, et al. Physiological regulation of choline chloride on tolerance of wheat seedling to low temperature[J]. Journal of Triticeae Crops, 2018, 38(6): 748-755.
- [27] 李华伟, 林志坚, 许泳清, 等. 外源水杨酸对低温胁迫下马铃薯幼苗生理指标的影响[J]. 分子植物育种, 2018, 16(10): 3321-3326.
- LI H W, LIN Z J, XU Y Q, et al. Effects of exogenous salicylic acid on the physiological characteristics and growth of potato seedlings under low temperature stress[J]. Molecular Plant Breeding, 2018, 16(10): 3321-3326.
- [28] 辛慧慧, 李志强, 李防洲, 等. 外源调节物质对棉花幼苗耐寒生理特性的效应[J]. 棉花学报, 2015, 27(3): 254-259.
- XIN H H, LI Z Q, LI F Z, et al. Effects of exogenous regulating substances on physiological traits of cold tolerance in cotton seedlings[J]. Cotton Science, 2015, 27(3): 254-259.
- [29] 王秋京. 低温对水稻秧苗电导率及可溶性糖含量的影响[J]. 黑龙江气象, 2011, 28(4): 25-26.
- WANG Q J. The effect of low temperature on the electrical conductivity and soluble sugar content of rice seedlings[J]. Heilongjiang Meteorology, 2011, 28(4): 25-26.
- [30] 叶梅荣, 王晓鹏, 黄守程. 低温胁迫下野生马齿苋转录组分析[J]. 西南农业学报, 2022, 35(12): 2732-2738.
- YE M R, WANG X P, HUANG S C. Transcriptome changes induced by low temperature stress in wild *Portulaca oleracea* [J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2022, 35(12): 2732-2738.
- [31] 杨志桃. 外源腐植酸对低温胁迫下厚皮甜瓜幼苗生长及生理特性的影响[D]. 保定: 河北农业大学, 2022: 1-56.
- YANG Z T. Effects of exogenous humic acid on the growth and physiological characteristics of thick skin melon seedlings under low temperature stress[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2022: 1-56.