

三种外源植物生长调节物质对玉米幼苗耐寒性的影响

金梓浩¹ 赵文清¹ 王芳^{1,2} 王威^{1,2} 彭云玲^{1,2} 常芳国^{1,2}

(¹甘肃农业大学农学院, 730070, 甘肃兰州; ²甘肃省干旱生境作物学重点实验室/
甘肃省作物遗传改良与种质创新重点实验室, 730070, 甘肃兰州)

摘要 以玉米低温敏感自交系 T165 为试验材料, 用 10 °C 模拟低温胁迫, 用不同浓度的 5-氨基乙酰丙酸 (5-ALA)、茉莉酸甲酯 (MeJA) 和独脚金内酯 (SL) 进行灌根, 测定与幼苗耐寒性相关的 12 个生长生理指标, 比较不同处理间指标的综合差异性。结果表明, 1~30 mg/L 的 5-ALA、0.1~20.0 mg/L 的 MeJA 和 0.05~0.40 mg/L 的 SL 能促进低温下玉米幼苗地上部及地下部物质积累和渗透调节物代谢, 增强细胞质膜稳定, 缓解效果随浓度呈先增后减的趋势。主成分分析显示, 5-ALA 最佳低温胁迫缓解浓度为 20 mg/L, 综合评价值 (*D*) 为 2.72; MeJA 为 1.0 mg/L, *D* 值为 2.24; SL 为 0.30 mg/L, *D* 值为 3.01。

关键词 玉米; 低温胁迫; 外源物质; 缓解效应

玉米 (*Zea mays* L.) 产量高居世界第一, 中国是其第二大生产和消费市场。粮饲需求增长等因素使得我国玉米消耗量不断扩大。玉米作为 C₄ 植物, 需要相对较高的温度进行光合, 其最适生长温度为 25~28 °C^[1-2]。我国玉米产区集中于东北和华北地区, 空间布局呈“北增”趋势, 北方地区玉米的播种面积和产量连年递增, 但每年因低温冷害造成的受灾面积多达 364 万 hm², 造成 20%~30% 的产量损失^[3]。

低温是影响植物生长发育和产量的主要逆境胁迫^[4], 异常温度会导致植物生理机制紊乱失控, 甚至死亡。玉米苗期遭遇低温会抑制光合功能^[5], 导致幼苗生长缓慢^[6-7]。低温还会损伤植物膜结构致使电解质渗漏, 破坏细胞结构稳定并降低细胞功能性^[8]。植物遭遇机械损伤、旱盐胁迫和高低温等逆境时, 凭借调控激素触发信号通路来适应逆境。Bindu 等^[9]研究发现, 5-氨基乙酰丙酸 (5-ALA) 通过调控光合作用有效缓解非生物胁迫带来的损伤, 还能在低浓度下显著提高植物的耐盐性和耐冷性。徐伟等^[10]指出茉莉酸甲酯 (MeJA) 是植物体中普遍存在的激素, 可诱导植物产生抗性, 以应对病菌、伤口和环境胁迫。独脚金内酯 (SL) 作为新型植物激素, 对植物的耐寒性具有正向调节作用^[11], 唐超男^[12]发现, 对低温下的辣椒施加外源 SL, 可减轻低温损伤, 提高低温耐受性。本试验以玉米

低温敏感自交系 T165 为材料, 研究低温胁迫下 5-ALA、MeJA 和 SL 3 种外源物质对玉米幼苗抗氧化系统、渗透调节和细胞膜生物活性的影响, 通过主成分分析法探究最佳缓解浓度, 为玉米苗期冷害的防治提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于 2021~2022 年在甘肃农业大学农学院进行, 供试低温敏感玉米自交系 T165 由甘肃农业大学玉米课题组提供, 5-ALA 购于上海源叶生物科技有限公司, MeJA 和独脚金内酯人工合成类似物 GR-24 (SL) 购于北京索莱宝科技有限公司, 均为分析纯。

1.2 试验仪器

仪器为 RTOP-310Y 人工气候培养箱 (浙江托普云农科技股份有限公司, 中国)、UV-1800 紫外分光光度计 (SHIMADZU 公司, 日本)、DDS-307A 型电导率仪 (上海欧史拓尔实业有限公司, 中国)、DHG-9420A 电热鼓风干燥箱 (上海一恒科学仪器有限公司, 中国)。

1.3 试验设计

1.3.1 低温处理设定与外源物选择 甘肃玉米播期主要集中在 4 月中下旬至 5 月上旬, 5 月玉米进入苗期。分析甘肃主要种植玉米的 7 个市 2013~

作者简介: 金梓浩, 主要从事玉米抗逆育种研究, E-mail: 413214147@qq.com

王芳为通信作者, 主要从事玉米育种及抗逆机理研究, E-mail: wangfang@gsau.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金地区科学基金 (32060487); 甘肃省自然科学基金重点项目 (23JRRA1405)

收稿日期: 2024-01-23; 修回日期: 2024-05-15; 网络出版日期: 2025-01-10

2022 年 5 月份气象数据（中国气象数据网 <https://data.cma.cn/>），七地 5 月的平均低温在 8~12 ℃，结合前人^[13-14]玉米的低温处理（12 ℃以下）种子萌发、叶面积和茎生长受抑制以及目前北方玉米种植田间地温满足≥10 ℃条件，本试验设恒定低温 10 ℃。

选取硝普钠二水合物（SNP）、芸苔素内酯（BR）、5-ALA、MeJA 和 SL 作为候选外源物并设置浓度梯度，浸种后进行发芽试验，确定 5-ALA、MeJA 和 SL 为本试验外源物质。

1.3.2 低温处理试验 选用外观一致、饱满的玉米种子，用 75%乙醇浸泡 1.5 min，蒸馏水冲洗 3 次后，用 2%的 NaClO 溶液消毒 8 min，取出后继续重复冲洗 3 次，置于蒸馏水中直至种子充分吸水。将浸种后的籽粒播入对应处理（表 1）装满蛭石的花盆（直径 10 cm，高 11 cm）中，放入智能人工气候培养箱（RTOP-310Y）中，昼/夜温度 25 ℃/20 ℃，光照强度 600 μmol/(m²·s)，相对湿度 60%~80%，每个处理 3 次重复，共 30 株幼苗。待玉米幼苗长至二叶一心期时移至 10 ℃低温培养箱进行低温胁迫处理，常温对照继续以 25 ℃培养。每组重复用对应处理液 25 mL/2 d 灌根，当低温处理中 80%幼苗处于三叶一心时，测定幼苗的生长参数和生理生化指标。

表 1 试验处理
Table 1 Experimental treatments

处理 Treatment	浓度 Concentration (mg/L)			温度 Temperature (℃)
	5-ALA	MeJA	SL	
NT	0	0.0	0.00	25
H0	0	0.0	0.00	10
H1	1	0.1	0.05	10
H2	5	1.0	0.10	10
H3	10	5.0	0.20	10
H4	20	10.0	0.30	10
H5	30	20.0	0.40	10

1.4 测定指标与方法

参照彭云玲等^[15]方法测定苗长（seedling length, SL）、苗鲜重（seedling fresh weight, SFW）和根鲜重（root fresh weight, RFW）等表型指标，参考玉米叶面积系数方法^[16]计算叶面积（leaf area, LA）。参照董扬^[17]的方法计算变化量。参考邹琦^[18]的方法测定脯氨酸（Pro）、丙二醛（MDA）、可溶性糖（soluble sugar, SS）、可溶性蛋白（soluble

protein, SP）的含量和相对电导率（relative electrical conductivity, REC）。采用卫昭君等^[19]的方法测定过氧化物酶（POD）、过氧化氢酶（CAT）和超氧化物歧化酶（SOD）活性。

1.5 数据处理

用 Microsoft Excel 2019 统计整理数据并制图；用 IBM SPSS 26.0 标准化数据后进行显著性和相关性分析。

通过公式(1)，利用主成分分析法计算各处理综合指标大小，对其综合生长力排名以评价低温条件下各处理的耐寒性综合评价值（D）。

$$D=\sum_{i=1}^n [F(i)\times Y_i], i=1, 2, 3, \cdots, n \tag{1}$$

式中，F(i)表示各组分主成分得分，由公式(2)得到。Y_i表示主成分 i 在保留主成分中的占比。

$$F=\sum_{j=1}^n (X_j\times W_{ji}), i=1, 2, 3, \cdots, n \tag{2}$$

式中，X_j是标准化处理后的生理指标值，W_{ji}表示第 i 个主成分中第 j 个变量系数，利用公式(3)计算。

$$W_{ji}=\theta_j/\sqrt{\lambda_i} \tag{3}$$

式中，θ_j为成分矩阵中每个变量对应的系数，λ_i为对应主成分特征值。

2 结果与分析

2.1 不同浓度的外源物对低温胁迫下玉米幼苗生长的影响

由表 2 可知，低温胁迫导致玉米生物量积累缓慢。低温胁迫（H0）下玉米幼苗根鲜重、苗长、苗鲜重及叶面积均低于常温对照（NT）。添加不同浓度的 3 种外源物处理后，促进了低温胁迫下玉米幼苗的生长。施加外源 5-ALA 后，玉米幼苗的根鲜重、苗长、苗鲜重、叶面积较低温对照（H0）有所增加，H4 处理（20 mg/L）表型良好，生长水平高于低温对照，且较为接近常温对照。外源 MeJA 处理后促进了玉米幼苗的生长，根鲜重、苗长、苗鲜重、叶面积较低温对照（H0）增加，H2（1.0 mg/L）处理长势优于低温对照。SL 处理后，低温下幼苗表型良好，接近常温对照，其中 H4 处理（0.30 mg/L）根鲜重、苗长、苗鲜重、叶面积均较低温处理差异显著。

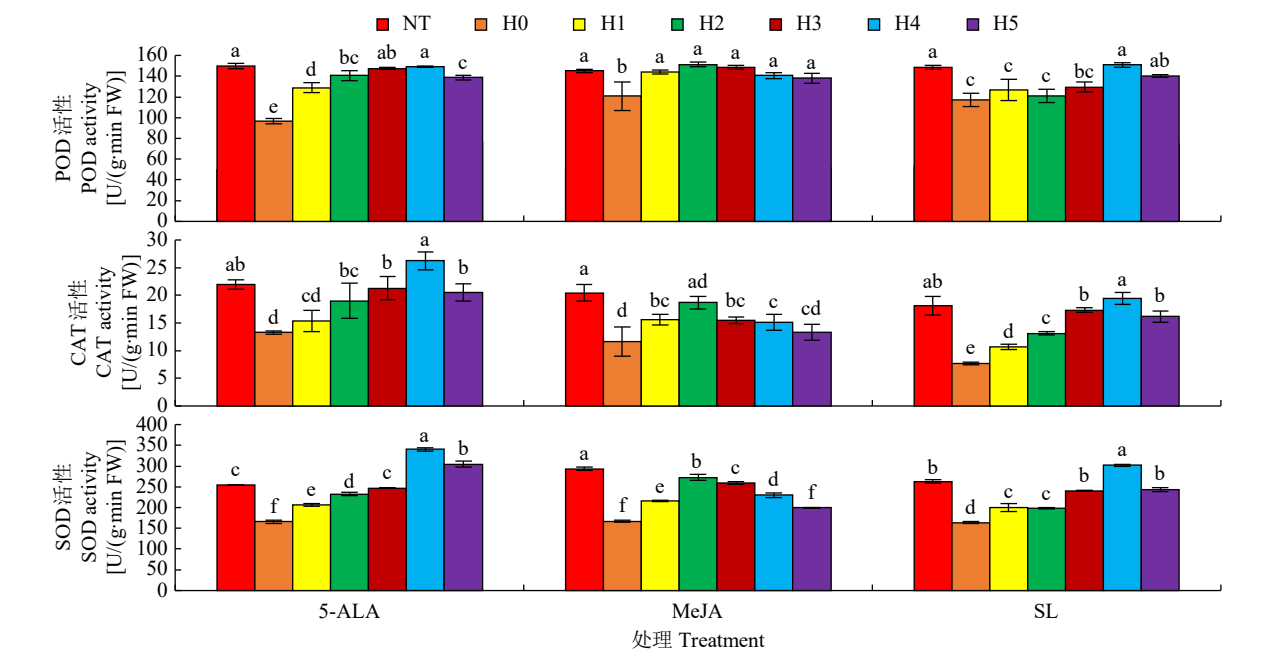
2.2 不同浓度的外源物对低温胁迫下玉米幼苗抗氧化系统的影响

植物体内的 POD、CAT 和 SOD 3 种抗氧化酶

表 2 外源 5-ALA、MeJA 和 SL 对低温胁迫玉米幼苗生长的影响					
Table 2 Effects of exogenous 5-ALA, MeJA, and SL on the growth of maize seedlings under low temperature stress					
外源物质 Exogenous substance	处理 Treatment	根鲜重 RFW (g)	苗长 SL (cm)	苗鲜重 SFW (g)	叶面积 LA (cm ²)
5-ALA	NT	0.38±0.06a	23.33±0.60a	0.80±0.08a	9.78±0.70a
	H0	0.25±0.03b	13.33±0.95d	0.38±0.01c	4.77±0.91c
	H1	0.28±0.02ab	14.25±0.21cd	0.38±0.03c	4.87±0.20c
	H2	0.32±0.05ab	14.35±0.47c	0.48±0.06bc	6.11±1.04bc
	H3	0.33±0.07ab	16.76±1.35b	0.49±0.02bc	6.98±0.56b
	H4	0.28±0.06ab	16.90±1.12b	0.57±0.10b	7.13±1.16b
	H5	0.25±0.06b	15.13±1.23b	0.50±0.09bc	5.98±1.22bc
MeJA	NT	0.39±0.04a	21.70±2.21a	0.78±0.10a	9.82±0.70a
	H0	0.25±0.04c	12.43±0.92c	0.44±0.04c	4.96±0.90c
	H1	0.28±0.06bc	13.75±0.54bc	0.52±0.06bc	5.64±0.31bc
	H2	0.38±0.06ab	15.20±1.03b	0.66±0.10ac	6.76±0.80b
	H3	0.32±0.04abc	14.10±0.48bc	0.56±0.05bc	5.67±0.48bc
	H4	0.31±0.05abc	13.48±0.83bc	0.55±0.07bc	5.56±1.12bc
	H5	0.26±0.03bc	13.13±0.71bc	0.50±0.05c	5.52±0.51bc
SL	NT	0.37±0.02ab	21.83±0.57a	0.77±0.03a	9.36±0.41a
	H0	0.24±0.03d	13.78±0.40d	0.44±0.02d	5.17±0.81c
	H1	0.27±0.07cd	14.77±0.26cd	0.53±0.06cd	5.43±0.71c
	H2	0.31±0.03bcd	15.00±0.88c	0.58±0.03c	6.04±0.86bc
	H3	0.41±0.02a	16.23±0.76b	0.63±0.11bc	7.21±1.39b
	H4	0.39±0.05ab	16.98±0.40b	0.71±0.05ab	7.53±0.73b
	H5	0.33±0.02bc	16.40±0.39b	0.58±0.03b	7.32±0.38b

不同小写字母代表同一外源物质不同处理下差异显著 ($P < 0.05$)。下同。
Different lowercase letters represent significant difference under different treatments of the same exogenous substance ($P < 0.05$). The same below.

共同保证体内环境稳定，逆境时抗氧化酶活性增强（NT）相比，低温胁迫后玉米幼苗的 POD、CAT 和 SOD 活性均下降。施加外源物后，抗氧化酶活有助于植物抵御胁迫。由图 1 可知，与常温对照



不同小写字母代表同一外源物质不同处理下差异显著 ($P < 0.05$)。下同。
Different lowercase letters represent significant difference under different treatments of the same exogenous substance ($P < 0.05$). The same below.

图 1 低温胁迫下不同外源物质对玉米幼苗抗氧化系统特性的影响
Fig.1 Effects of different exogenous hormones on antioxidant system characteristics of maize seedlings under low temperature stress

性受外源物质类型和浓度共同影响而表现出不同的变化。外施 5-ALA、MeJA 和 SL 后，玉米幼苗的 POD、CAT 和 SOD 的活性随浓度增加呈先增后减的趋势，且均分别在 H4、H2 和 H4 处理时到达最高，POD 活性较 H0 分别增加了 54.42%、25.30% 和 28.27%；CAT 活性较 H0 分别增加了 97.74%、60.00%和 152.38%；SOD 活性较 H0 分别增加了 105.43%、63.34%和 84.33%。

2.3 不同浓度的外源物对低温胁迫下玉米幼苗渗透调节物质的影响

渗透调节物质 Pro、SS 和 SP 与植物低温胁迫抗性密切相关，能改变胞内溶质浓度来维持细胞质

体积和形态，防止细胞因低温失水或产生冰晶导致死亡。由图 2 可知，低温胁迫处理下玉米幼苗的 Pro 含量较常温对照（NT）均有所升高，SS 含量较 NT 显著升高，SP 含量显著下降。不同的外源物质及浓度处理后，渗透调节物质含量较 H0 均有增加。5-ALA 处理时，Pro、SS 和 SP 含量随外源物浓度升高表现出先升高再降低的趋势，在 H4 处理下达到最高值，较 H0 分别增加了 184.60%、166.96% 和 162.09%。在 MeJA 处理时，3 种调节物质含量均在处理 H2 达到最大，较 H0 分别增加了 102.15%、110.35%和 185.67%。SL 处理下，3 种渗透调控物质含量均在 H4 处理显著高于其他处理，较 H0 分

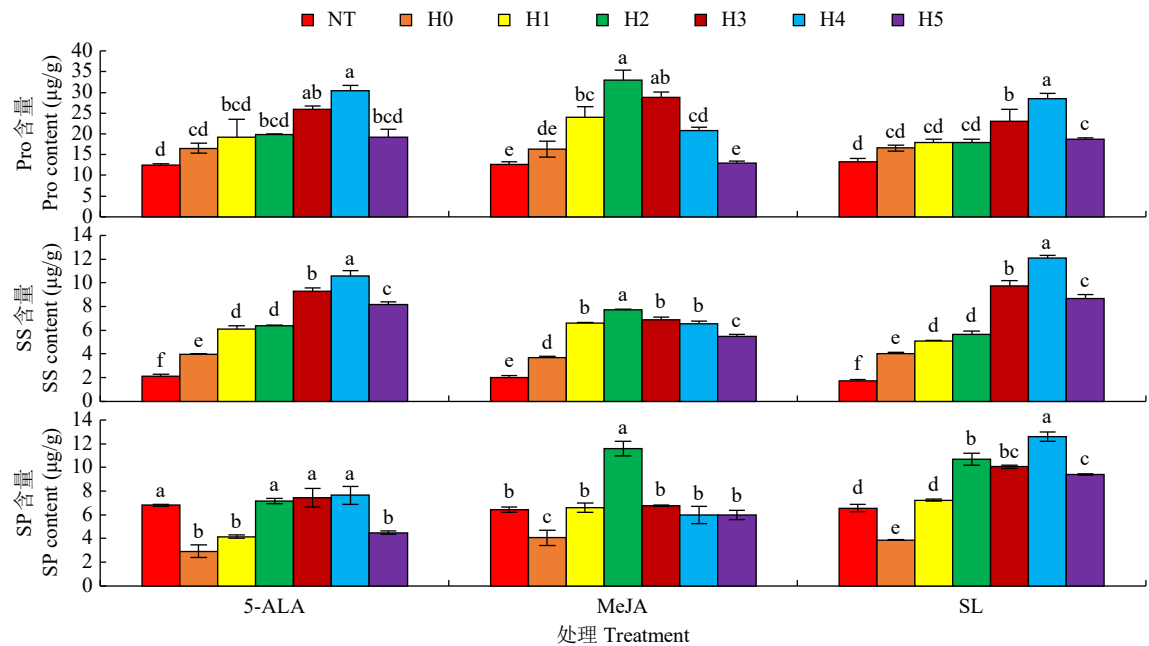


图 2 低温胁迫下不同外源物质对玉米幼苗渗透调节物质的影响
Fig.2 Effects of different exogenous substance on osmotic regulation of maize seedlings under low temperature stress

别增加了 71.81%、200.39%和 225.30%。

2.4 不同浓度的外源物对低温胁迫下玉米幼苗膜透性的影响

REC 和 MDA 是衡量细胞质膜损伤的依据，质膜过氧化生成 MDA，而高电导率代表细胞膜透性受损，电解质渗透严重。由图 3 可知，与常温对照相比，低温胁迫的玉米幼苗 REC 和 MDA 含量显著上升。外源物处理能够减轻低温引起的膜系统损伤。外施 5-ALA 后 REC 和 MDA 有不同程度下降，在 H4 处理达到了最低，分别较 H0 下降 22.32%和 26.64%。外施 MeJA 后二者在 H2 处理最低，分别较 H0 降低 25.27%和 49.00%。外施 SL

后二者在 H4 处理达到了最大降幅，分别较 H0 下降 42.83%和 46.92%。

2.5 不同处理的综合评价

2.5.1 主成分分析 利用 SPSS 26.0 降维 8 个单项生理指标进行主成分分析，以特征值大于 1 为依据提取了前 2 个主成分（表 3）。施加外源 5-ALA、MeJA 与 SL 的处理前 2 个主成分累计贡献率分别为 85.622%、82.757%和 88.106%。利用分析降维将同一外源物 8 个单项指标转置成主成分 CI (1)和 CI (2)的各项指标因子系数（表 4），二者累计代表了原来 8 个单项指标绝大多数的信息，根据各综合指标贡献率的大小可知对植株抗寒特性的影响程度。

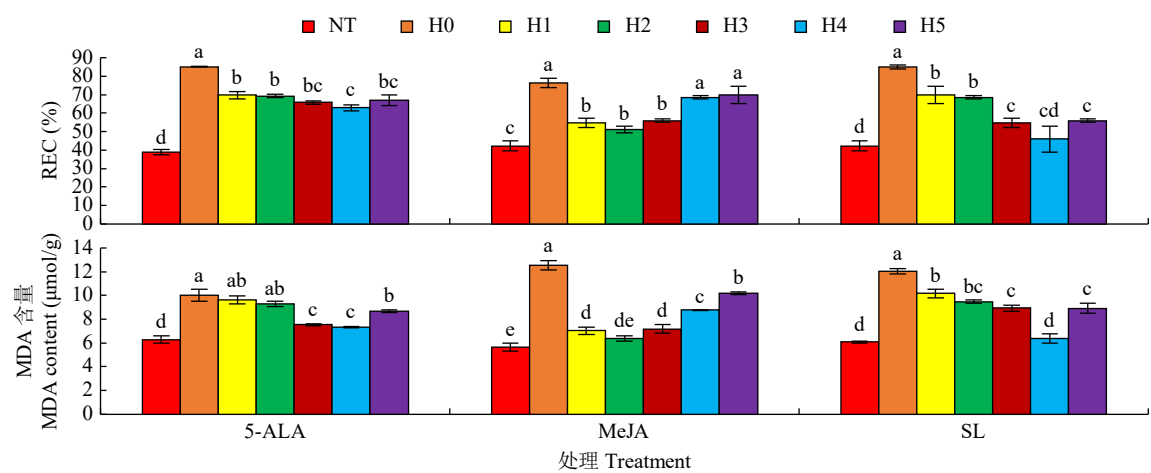


图 3 低温胁迫下不同外源物质对玉米幼苗膜透性的影响
Fig.3 Effects of different exogenous substances on membrane permeability of maize seedlings under low temperature stress

表 3 3 种外源物质处理综合指标的特征值及贡献率				
Table 3 Eigenvalues and contribution rates of three comprehensive indexes of exogenous material treatments				
外源物质 Exogenous substance	主成分 PCA	特征值 Eigenvalue	贡献率 Contribution rate (%)	累计贡献率 Cumulative contribution rate (%)
5-ALA	CI (1)	4.792	59.894	59.894
	CI (2)	2.058	25.728	85.622
MeJA	CI (1)	4.975	62.186	62.186
	CI (2)	1.646	20.572	82.757
SL	CI (1)	5.073	63.413	63.413
	CI (2)	1.975	24.693	88.106

表 4 3 种外源物质处理的综合指标系数[CI(x)]和得分系数[W(x)]									
Table 4 Comprehensive index coefficients [CI(x)] and score coefficients [W(x)] of the treatments of three exogenous substances									
外源物质 Exogenous substance	主成分 PCA	SOD	POD	CAT	SP	Pro	SS	MDA	REC
5-ALA	CI (1)	0.914	0.888	0.869	0.827	0.427	0.511	-0.898	-0.691
	CI (2)	-0.103	0.180	0.110	-0.156	0.820	0.829	0.360	0.699
	W (1)	0.417	0.406	0.397	0.378	0.195	0.234	-0.410	-0.316
	W (2)	-0.072	0.125	0.076	-0.109	0.572	0.578	0.251	0.487
MeJA	CI (1)	0.912	0.923	0.937	-0.325	-0.873	-0.960	-0.659	0.434
	CI (2)	0.230	0.243	-0.160	-0.846	0.218	0.092	0.727	0.456
	W (1)	0.409	0.414	0.420	-0.146	-0.391	-0.431	-0.296	0.194
	W (2)	0.180	0.190	-0.125	-0.659	0.170	0.071	0.567	0.356
SL	CI (1)	0.876	0.828	0.932	0.639	0.538	0.571	-0.914	-0.944
	CI (2)	-0.332	-0.377	-0.206	0.602	0.765	0.785	0.253	0.231
	W (1)	0.389	0.368	0.414	0.284	0.239	0.253	-0.406	-0.419
	W (2)	-0.237	-0.268	-0.147	0.429	0.544	0.558	0.180	0.164

旋转后的综合主成分 1 由 MDA、REC、CAT、SOD 和 POD 共计 5 个指标组成，代表了植株质膜稳定和抗氧化系统。综合主成分 2 由 SS、Pro 及 SP 这 3 个指标构成，代表了植株渗透调控机制。

2.5.2 耐寒性评价 由公式(3)得到 5-ALA、MeJA 和 SL 处理后 2 项综合指数的权值，并按公式(1)、(2)得到 3 个处理综合评估值对植株的综合长势进行评定。根据不同浓度处理间的综合评价值（表 5）对玉米幼苗的长势进行排比，发现 5-ALA 处理 H4

浓度（20 mg/L）的组内 D 值最大，表明该浓度下玉米幼苗对低温胁迫的抗性最强；外施 MeJA 时 H2 浓度（1.0 mg/L）的组内 D 值最高，表明该浓度缓解效果最佳；外施 SL 时 H4（0.30 mg/L）组内 D 值最大，即 H4 处理下低温胁迫缓解效果佳。3 个外源物质低温处理下综合评价值的标准偏差分别 1.697、1.476 和 1.801，差值越大说明施加外源物后整体综合评价值差异越明显，施加与未施加外源物差异越大，不同浓度间缓解效果突出。

表 5 各处理的主成分得分 (F)、权重 (IW) 和综合评价值 (D)
Table 5 Principal component scores (F), weight (IW), comprehensive evaluation values (D)

外源物质 Exogenous substance	处理 Treatment	主成分得分 F (1)	主成分得分 F (2)	综合评价值 D	排名 Ranking
5-ALA	NT	1.443	-2.542	0.2475	4
	H0	-3.799	0.055	-2.6428	7
	H1	-1.457	0.349	-0.9152	6
	H2	0.013	0.394	0.1273	5
	H3	1.448	1.281	1.3979	2
	H4	3.120	1.794	2.7222	1
	H5	1.443	-2.542	0.5932	3
	权重	0.700	0.300		
MeJA	NT	1.158	-2.526	0.0528	3
	H0	-3.409	0.279	-2.3026	7
	H1	0.445	-0.151	0.2662	4
	H2	2.746	1.051	2.2375	1
	H3	1.074	0.426	0.8796	2
	H4	-0.557	0.138	-0.3485	5
	H5	-1.782	-0.383	-1.3623	6
	权重	0.776	0.224		
SL	NT	1.098	-2.524	0.0114	4
	H0	-4.065	0.289	-2.7588	7
	H1	-1.862	0.360	-1.1954	6
	H2	-1.196	1.007	-0.5351	5
	H3	0.508	1.617	0.8407	2
	H4	3.572	1.686	3.0062	1
	H5	0.647	0.566	0.6227	3
	权重	0.751	0.249		

3 讨论

当下全球气候多变，极端天气对作物产量造成的影响难以估计。Wang 等^[20]提出 C₄ 作物光合潜力较高，但受制于低温难以发挥全部光合性能，玉米在降温严重时减产达 15% 以上^[21-22]。苗期的形态构建与生物量积累是影响植株产量和品质的重要因子，玉米苗期遭遇低温严重影响下一阶段的有机物积累。本研究发现，低温胁迫后玉米幼苗根鲜重、苗鲜重、苗长和叶面积显著下降，玉米幼苗生长缓慢，光合能力弱，同时 REC 和 MDA 含量升高，细胞结构受损伤，诱发低温冷害，同已有研究^[23-25]相似。而用 5-ALA、MeJA 和 SL 灌根后，玉米幼苗生物量积累逐步增加，渗透物代谢加速，同时抗氧化酶活性升高，膜系统稳定性提升，玉米抵御低温能力增强。

本研究还发现不同外源物在调控植株耐低温特性时体现出差异。外施 5-ALA 处理主要通过促进玉米幼苗苗长和增加叶面积，以及提高抗氧化

酶活性，达到缓解低温冷害的效果。这与孙永平等^[26]5-ALA 处理低温下促进了西瓜叶片光合作用以及刘卫琴等^[27]对 5-ALA 提高抗氧化酶活性促进光合作用的结果一致。外源 MeJA 处理后根重和苗重增加明显，MDA 和 REC 平均降幅分别为 36.8% 和 20.8%，高于其他 2 种外源物，该激素可能通过维持细胞膜结构的稳定来促进物质积累达到缓释冷害的作用，同张子幸^[28]提出的 MeJA 诱导钙信号，显著降低叶片 REC 和 MDA 含量一致。外源 SL 后，玉米幼苗根重、苗重和叶面积的增长明显，REC 下降，SS 和 SP 含量增加，该激素提高低温耐受性可能主要通过促进根系、叶片发育以及增加渗透调解物来实现。与庞娟^[29]喷洒 SL 后促进根系主根伸长侧根数目增加的结果一致。

主成分分析法通过降维提取公因子，在损失微量原始信息的情况下，将多个相互关联的指标转化为相互独立的综合指数，削弱单个指数误差。对各处理每个综合指标及隶属函数值后进行加权，便能方便可靠地对各处理间的抗逆性进行评

价^[30-32]。本研究利用主成分分析法,发现 SOD、POD、CAT、MDA 和 REC 在主成分 1 中系数最大,可作为简单判断玉米幼苗耐寒特性评价的生理依据;SS 和 Pro 在主成分 2 系数中最大,可作为进一步衡量玉米幼苗耐寒特性的生理依据。

4 结论

综上所述,3 种外源物通过促进代谢渗透物和提高抗氧化酶活性减轻低温对细胞结构的影响,促进了玉米苗长和根长的增大,增加了苗鲜重和叶面积,以缓解低温损伤。3 种外源物缓释机理和效果不同:5-ALA 缓解玉米幼苗低温胁迫主要与提高低温下植株光合能力相关;MeJA 缓解低温胁迫主要与维持生物膜稳定相关;SL 缓解低温胁迫主要与促进幼苗根系生长关联。其中 20 mg/L 5-ALA、1.0 mg/L MeJA 和 0.30 mg/L SL 处理对玉米幼苗综合耐寒性提高效果最佳。

参考文献

- [1] Beatriz G M, Lekfeldt J D S, Magid J, et al. Seed treatment with *Penicillium* sp. or Mn/Zn can alleviate the negative effects of cold stress in maize grown in soils dependent on soil fertility. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 2018, 204(6): 603-612.
- [2] Cutforth H W, Shaykewich C F, Cho C M. Effect of soil water and temperature on corn (*Zea mays* L.) root growth during emergence. *Canadian Journal of Soil Science*, 1986, 66(1): 51-58.
- [3] 邢则森. 低温胁迫和干旱胁迫下 S-诱抗素拌种对玉米生长的调控作用. 泰安: 山东农业大学, 2018.
- [4] Adam S, Murthy S D S. Effect of cold stress on photosynthesis of plants and possible protection mechanisms. New Delhi: Springer India, 2014.
- [5] Gu Y N, He L, Zhao C J, et al. Biochemical and transcriptional regulation of membrane lipid metabolism in maize leaves under low temperature. *Frontiers in Plant Science*, 2017, 8: 2053.
- [6] Lee J H, Oh M M. Short-term low temperature increases phenolic antioxidant levels in kale. *Horticulture Environment and Biotechnology*, 2015, 56(5): 588-596.
- [7] Leipner J. Chilling stress in maize. *Molecules and Cells*, 2009, 10 (2): 199-205.
- [8] Selim S, Hassan Y M, Saleh A M, et al. Actinobacterium isolated from a semi-arid environment improves the drought tolerance in maize (*Zea mays* L.). *Plant Physiology and Biochemistry*, 2019, 142(9): 15-21.
- [9] Bindu R C, Vivekanandan M. Hormonal activities of 5-aminolevulinic acid in callus induction and micropropagation. *Plant Growth Regulation*, 1998, 26(1): 15-18.
- [10] 徐伟, 严善春. 茉莉酸在植物诱导防御中的作用. *生态学报*, 2005, 25(8): 2074-2082.
- [11] Omoarelojie L O, Kulkarni M G, Finnie J F, et al. Synthetic strigolactone (*rac*-GR24) alleviates the adverse effects of heat stress on seed germination and photosystem II function in lupine seedlings. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2020, 155: 965-979.
- [12] 唐超男. 外源独脚金内酯调控辣椒幼苗低温耐受性的生理与分子机制. 兰州: 甘肃农业大学, 2021.
- [13] 于文颖, 冯锐, 纪瑞鹏, 等. 苗期低温胁迫对玉米生长发育及产量的影响. *干旱地区农业研究*, 2013, 31(5): 220-226.
- [14] 张晓聪, 周羽, 张林, 等. 玉米自交系芽期耐冷性鉴定. *作物杂志*, 2016(2): 21-26.
- [15] 彭云玲, 赵小强, 闫慧萍, 等. 不同玉米自交系耐深播性评价及遗传多样性分析. *草业学报*, 2016, 25(7): 73-86.
- [16] 李向岭, 赵明, 李从锋, 等. 玉米叶面积系数动态特征及其积温模型的建立. *作物学报*, 2011, 37(2): 321-330.
- [17] 董扬. 低温胁迫对不同耐冷性糜子品种苗期耐冷性的影响. *作物杂志*, 2024(6): 91-96.
- [18] 邹琦. 植物生理学实验指导. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [19] 卫昭君, 牛冰洁, 王永新, 等. 茉莉酸甲酯对盐胁迫下偏关苜蓿种子萌发和幼苗生长的影响. *草地学报*, 2020, 28(4): 998-1005.
- [20] Wang D F, Naidu S L, Portis A R, et al. Can the cold tolerance of *C4* photosynthesis in *Miscanthus x giganteus* relative to *Zea mays* be explained by differences in activities and thermal properties of Rubisco?. *Journal of Experimental Botany*, 2008, 59(7): 1779-1787.
- [21] Long S P. *C4* photosynthesis at low temperatures. *Plant, Cell and Environment*, 1983, 6(4): 345-363.
- [22] 赵俊芳, 杨晓光, 刘志娟. 气候变暖对东北三省春玉米严重低温冷害及种植布局的影响. *生态学报*, 2009, 29(12): 6544-6551.
- [23] 闫慧萍, 彭云玲, 赵小强, 等. 外源 24-表油菜素内酯对逆境胁迫下玉米种子萌发和幼苗生长的影响. *核农学报*, 2016, 30(5): 988-996.
- [24] 陈银萍, 王晓梅, 杨宗娟, 等. NO 对低温胁迫下玉米种子萌发及幼苗生理特性的影响. *农业环境科学学报*, 2012, 31(2): 270-277.
- [25] 孙玉琚, 吴玥, 马德志, 等. 外源油菜素内酯对低温胁迫下玉米发芽及幼苗生理特性的影响. *华北农学报*, 2019, 34(3): 119-128.
- [26] 孙永平, 张治平, 徐呈祥, 等. 5-氨基乙酰丙酸处理对低温下西瓜叶片快速叶绿素荧光诱导曲线的影响. *园艺学报*, 2009, 36(5): 671-678.
- [27] 刘卫琴, 康琅, 汪良驹. ALA 对草莓光合作用的影响及其与抗氧化酶的关系. *西北植物学报*, 2006, 26(1): 57-62.
- [28] 张子幸. 钙信号在茉莉酸甲酯调控西瓜低温抗性中的作用及机理. 杨凌: 西北农林科技大学, 2021.
- [29] 庞娟. 生长素与独脚金内酯调控黄芩幼苗根系生长发育的机制研究. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2020.
- [30] 朱恒达, 王策, 李伟, 等. 丛枝菌根真菌和外源褪黑素提高黄芩抗冷性的生理机制. *植物生理学报*, 2022, 58(7): 1254-1262.
- [31] Chen D Q, Wang S W, Cao B B, et al. Genotypic variation in growth and physiological response to drought stress and re-watering reveals the critical role of recovery in drought adaptation in maize seedlings. *Frontiers in Plant Science*, 2015, 6: 1241.
- [32] 崔静宇, 关小康, 杨明达, 等. 基于主成分分析的玉米萌发期抗旱性综合评定. *玉米科学*, 2019, 27(5): 62-72.

Effects of Three Exogenous Plant Growth Regulators on the Cold Tolerance of Maize Seedlings

Jin Zihao¹, Zhao Wenqing¹, Wang Fang^{1,2}, Wang Wei^{1,2}, Peng Yunling^{1,2}, Chang Fangguo^{1,2}

(¹College of Agronomy, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, Gansu, China;

²Gansu Provincial Key Laboratory of Aridland Crop Science / Gansu Key Laboratory of Crop Improvement & Germplasm Enhancement, Lanzhou 730070, Gansu, China)

Abstract Using maize low-temperature sensitive inbred line T165 as the test material, different concentrations of 5-aminolevulinic acid (5-ALA), methyl jasmonate (MeJA), and strigolactone (SL) were treated to determine 12 growth physiological indicators related to seedling cold tolerance, and the comprehensive differences among different treatments were compared under the simulated low-temperature stress at 10 °C. The results showed that 5-ALA at concentrations of 1-30 mg/L, MeJA at concentrations of 0.1-20.0 mg/L, and SL at concentrations of 0.05-0.40 mg/L could promote the accumulation of substances in the aboveground and underground parts of maize seedlings under low temperature, as well as the metabolism of osmoregulators, enhancing the stability of the cytoplasmic membrane. The sustained release effect showed a trend of first increasing and then decreasing with concentration. Principal component analysis showed that the optimal slow-release concentration of 5-ALA under low temperature stress was 20 mg/L, and the comprehensive evaluation value (*D*) was 2.72; The optimal sustained release concentration of MeJA under low temperature stress is 1.0 mg/L, and *D* was 2.24; The optimal slow-release concentration of SL under low temperature stress was 0.30 mg/L, and the *D* was 3.01.

Key words Maize; Low temperature stress; Exogenous substance; Alleviation effect