

张健伟,蒋 瑶,余国峰,等. 外源多胺对低温胁迫下辣椒幼苗生理特性的影响[J]. 江苏农业科学,2025,53(8):152-160.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2025.08.020

外源多胺对低温胁迫下辣椒幼苗生理特性的影响

张健伟^{1,2}, 蒋 瑶¹, 余国峰², 陈仙君¹, 李焕秀²

(1. 凯里学院大健康学院, 贵州凯里 556000; 2. 四川农业大学园艺学院, 四川成都 611100)

摘要:为研究外源多胺对低温胁迫下辣椒的缓解作用,以得荣树椒为试验材料,比较叶面喷施腐胺(Put)、亚精胺(Spd)、精胺(Spm)(浓度均为0.5 mmol/L)对低温胁迫下辣椒幼苗生理特性的影响。结果表明,外源喷施 Put、Spd、Spm 预处理对低温下辣椒幼苗的胁迫有明显的缓解作用。其中,在低温处理 24 h 时,Spd 处理的相对电导率(REC)、丙二醛(MDA)含量、超氧阴离子(O₂⁻)含量、过氧化氢(H₂O₂)含量分别较 CK 降低了 30.77%、37.79%、35.13%、23.4%;Spm 处理的 REC、MDA 含量、O₂⁻含量、H₂O₂ 含量分别较 CK 下降 24.16%、29.40%、20.78%、34.53%;Put 处理的 REC、MDA、O₂⁻、H₂O₂ 分别较 CK 降低 19.56%、24.18%、19.10%、7.34%。此外,外源 Spd 处理的渗透调节物质含量、抗氧化酶活性、抗坏血酸-谷胱甘肽(AsA-GSH)循环相关酶活性、光合荧光参数、多胺含量及多胺代谢相关酶活性均显著高于 CK。综上,叶面喷施多胺既可通过提高叶片渗透调节能力、抗氧化酶活性来保护叶片细胞膜的完整性,进而缓解低温胁迫对光合作用的抑制,亦可通过促进多胺代谢相关酶活性及游离态多胺含量,从而提高辣椒幼苗对低温的抗性,其中以喷施 0.5 mmol/L Spd 的效果最优,其次为喷施 0.5 mmol/L Spm 处理。

关键词:辣椒;多胺;低温胁迫;抗氧化酶;光合荧光参数;生理特性

中图分类号:S641.301 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2025)08-0152-09

辣椒(*Capsicum annuum* L.)属于茄科,是一类富含营养物质的蔬菜作物。我国是辣椒生产第一大国,辣椒的栽培面积、总产量和消费量均居世界首位^[1]。辣椒喜温,不耐低温,其适宜的生长温度为 21~27℃。在实际生产中,早春大棚栽培、越冬设施栽培过程的低温会对辣椒生长发育及产量品质造成极大影响。有研究发现,在营养生长阶段,低温易造成辣椒植株萎蔫、倒伏、开花延迟及落花落果等;而在生殖生长阶段,低温易导致辣椒落花落果、种子填充受损,并产生低温型病害^[2-3]。因此,找到缓解辣椒低温胁迫的有效措施、提高抗低温能力是保障辣椒周年生产的关键。

多胺(PAs)主要包含腐胺(Put)、亚精胺(Spd)和精胺(Spm),是一类脂肪族含氮化合物,其广泛分

布于动、植物体内,可作为外源小分子物质参与植物的生长发育和对逆境胁迫的调控^[4]。有研究发现,外源 PAs 处理通过提高抗氧化酶活性、改善叶片光合特性,促进植物生长及类激素合成,并降低电解质渗透率、有害物质丙二醛(MDA)的积累,此外还能通过结合细胞膜的磷脂部位以阻止胞溶作用等途径提高植株的耐冷性^[5-6]。针对辣椒物种,姜秀梅研究发现,外源 Spd 处理可以提高种子的发芽率、萌发指数^[7]。牛云然研究发现,外源施用 Spd、Spm 可以提高辣椒幼苗的叶绿素含量和根系活力,有效减少对辣椒的伤害^[8]。然而,目前关于比较外源 Put、Spd、Spm 缓解低温胁迫对辣椒幼苗伤害的效果、探究内源多胺含量及其代谢关键酶活性之间关系的研究鲜有报道。

因此,本研究旨在探究外源 PAs 对低温胁迫下辣椒幼苗 ROS 产生、抗氧化酶活性、光合荧光参数、多胺含量及其代谢相关酶活性的影响,以期合理利用 PAs 提高辣椒幼苗对低温的耐受性提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地点与材料

试验于 2022—2023 年在四川农业大学园艺学

收稿日期:2024-05-06

基金项目:凯里学院博士专项课题(编号:BS20240213);贵州省教育厅青年科技人才成长项目(编号:黔教技[2021]233);贵州山地特色园艺作物分子育种与品种创制重点实验室资助项目(编号:黔教技[2022]053);四川省蔬菜育种攻关项目(编号:2021YFYZ0022)。
作者简介:张健伟(1990—),男,重庆人,博士,研究方向为蔬菜逆境生理生态及遗传育种。E-mail:741104602@qq.com。

通信作者:李焕秀,博士,教授,博士生导师,研究方向为蔬菜生物技术和遗传育种。E-mail:Huanxiuli62@gmail.com。

院果蔬研究所完成。供试辣椒为四川省甘孜藏族自治州德荣县地方品种得荣树椒,该材料为笔者博士期间在实验室中筛选出的耐低温品种^[9]。供试试剂 Put、Spd、Spm 购自 Sigma 公司(美国)。

1.2 材料培养

选取籽粒饱满的得荣树椒种子置于烧杯内,55 ℃ 浸种 15 min 后再于室温(25 ℃)浸泡 8 h,接着于 28 ℃ 黑暗条件下催芽至露白。选取出芽一致的种子播种于育苗盘中,待辣椒幼苗长至 4 叶 1 心时,将其移栽到含有营养基质的 9 cm × 9 cm 育苗钵中,常规管理。待幼苗长到 6 叶 1 心时,挑选长势一致的幼苗置于人工气候箱中预培养 3 d,设昼一夜温度为 25 ℃—20 ℃,光—暗周期为 16 h—8 h,光照度为 7 000 lx。

1.3 材料处理

预培养结束后,于每天 10:00 叶片喷施外源 PAs,以真叶正反面均匀附有水珠且不下滴为准,共喷施 3 d。试验处理设置如下:(1)对照,每天喷施清水;(2)Put,喷施 0.5 mmol/L Put;(3)Spd,喷施 0.5 mmol/L Spd;(4)Spm,喷施 0.5 mmol/L Spm。药剂喷施 24 h(即次日 10:00)后进行低温处理,人工气候箱温度改为 4 ℃,光—暗周期为 16 h—8 h,光照率为 30%。分别于低温处理后 0、6、12、24 h 收集辣椒幼苗叶片。

1.4 测定方法

1.4.1 生理指标 丙二醛鲜重含量的测定使用植物丙二醛测定试剂盒(南京建成生物工程研究所,货号为 A003-3-1);超氧阴离子、过氧化氢鲜重含量的测定采用索莱宝生物科技有限公司生产的试剂盒(货号 BC1295、BC3595);精氨酸脱羧酶(ADC)、鸟氨酸脱羧酶(ODC)、亚精胺合成酶(SPDS)和多胺氧化酶(PAO)活性(鲜重)的测定采用酶联免疫试剂盒(武汉纯度生物科技有限公司,货号为 CD91502、CD91503、CD91634、CD91208)。

相对电导率、可溶性蛋白含量、可溶性糖含量、脯氨酸含量和叶绿素含量的测定参照《植物生理生化实验原理与技术》^[10]的方法测定,均为鲜重含量;超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)活性的测定参照周艳等的方法^[11],均基于鲜重;抗坏血酸过氧化物酶(APX)、脱氢抗坏血酸还原酶(DHAR)、单脱氢抗坏血酸还原酶(MDHAR)活性的测定参照王松的方法^[12],均基于鲜重。

1.4.2 叶绿素荧光参数及光合参数 用 LI-6400XT(LI-COR,美国)便携式光合仪测定辣椒幼苗的净光合速率(P_n)、胞间 CO_2 浓度(C_i)、气孔导度(G_s)和蒸腾速率(T_r),测定部位为每株第 2~3 张功能叶, CO_2 浓度设定为 400 $\mu\text{L/L}$,内源光照度为 1 000 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,温度为 25 ℃。

用 LI-6400XT(LI-COR,美国)便携式光合仪测定辣椒幼苗叶片的叶绿素荧光参数。具体方法如下:(1)用锡箔纸包裹测定叶 30 min,经充分暗适应后测定 PS II 最大光化学效率(F_v/F_m)。(2)将植物置于自然光下活化 30 min,再测定实际光化学量子效率(Φ_{PSII})、光化学淬灭系数(q_p)和非光化学淬灭系数(NPQ)等。

1.4.3 游离态多胺含量的测定 取 0.5 g 辣椒叶片,加入 3 mL 5% 高氯酸冰浴研磨成匀浆,在冰浴条件下孵育 1 h,随后于 4 ℃、13 000 g 离心 25 min。分别吸取 0.5 mL 上清液、10 μL 苯甲酰氯和 1 mL 2 mol/L 氢氧化钠于 10 mL 离心管中混匀,在 37 ℃ 条件下孵育 20 min 后加入 2 mL 饱和氯化钠、2 mL 乙醚,5 000 g 离心 8 min。取 1 mL 乙醚相置于通风橱中至乙醚完全挥发,随后加入 1 mL 甲醇。用 0.45 μm 膜过滤至棕色进样瓶中,于 -70 ℃ 保存。色谱条件:流动相为 70% 色谱甲醇,流速为 0.7 mL/min,进样量为 10 μL ,波长为 230 nm。标准曲线的构建参照林绍艳等的方法^[13]。

1.4.4 数据处理 用 Excel 2021 对原始数据进行整理,用 SPSS 17.0 软件(IBM 公司)进行单因素方差分析(ANOVA),用 Duncan's 法进行多重比较,用 Origin 2017(美国 OriginLab 公司)绘制图形,图标中数据为“平均值 ± 标准差”。

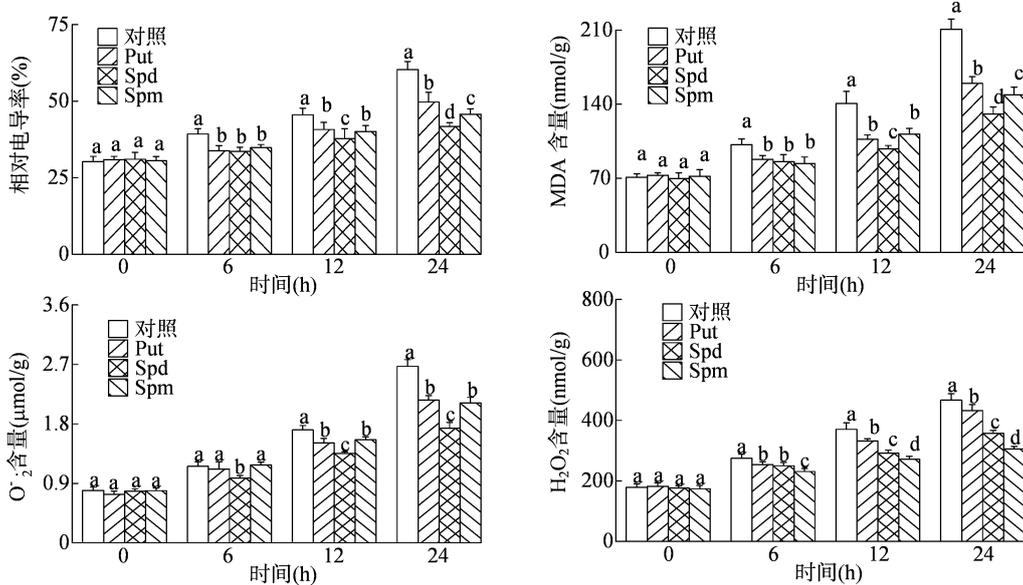
2 结果与分析

2.1 外源多胺对低温胁迫下辣椒膜系统和活性氧含量的影响

由图 1 可知,在低温胁迫下,外源 PAs 对辣椒幼苗的 REC、MDA 含量、 O_2^- 含量、 H_2O_2 含量产生显著影响($P < 0.05$)。在常温条件下,外源 PAs 处理的辣椒幼苗 REC、MDA 含量、 O_2^- 含量、 H_2O_2 含量与对照均无显著差异。低温处理后,对照幼苗的上述指标随胁迫时间的延长呈上升趋势,在处理 24 h 时,植株的 REC、MDA 含量、 O_2^- 含量、 H_2O_2 含量分别比低温处理前提高 99.33%、197.59%、237.55%、160.75%。Put、Spd、Spm 处理均可使上

述指标的上升幅度降低,且在处理 24 h 时效果最明显。其中,Put 处理的 REC、MDA 含量、 O_2^- 含量、 H_2O_2 含量分别比对照低 24.16%、19.56%、24.18%、19.10%、7.34%;Spd 处理的 REC、MDA 含量、 O_2^- 含量、 H_2O_2 含量分别比对照低 30.77%、37.79%、

35.13%、23.40%;Spm 处理的 REC、MDA 含量、 O_2^- 含量、 H_2O_2 含量分别比对照低 24.16%、29.40%、20.78%、34.53%。结果表明,外源 PAs 均能有效缓解低温胁迫下辣椒幼苗的质膜损伤,以外源 Spd 处理的效果最好。



不同处理间标有不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$), 下同
图1 外源多胺对低温胁迫下辣椒幼苗叶片 REC、MDA 含量、 O_2^- 含量、 H_2O_2 含量的影响

2.2 外源多胺对低温胁迫下辣椒幼苗叶片渗透调节物质的影响

由图 2 可见,低温胁迫下辣椒幼苗叶片的可溶性蛋白、可溶性糖、脯氨酸含量均随处理时间的延长呈上升趋势。其中低温处理后的可溶性蛋白、可溶性糖含量的增长幅度不明显,而脯氨酸含量急剧增加,在处理 24 h 时其含量较常温条件下上升 353.86%。在低温处理 6 h 时,与对照植株相比,Put、Spd、Spm 处理辣椒幼苗的可溶性蛋白、脯氨酸含量无显著差异,而可溶性糖含量显著高于对照;低温处理 12、24 h 时,外源 PAs 处理的可溶性蛋白、可溶性糖、脯氨酸含量均显著高于对照(除 Put、Spm 处理的可溶性糖含量外)。其中,Spd 处理的效果最好,在低温处理 24 h 时,上述指标分别较对照提高 11.43%、8.35%、38.31%。结果表明,外源多胺均能进一步增加低温胁迫下辣椒叶片中渗透调节物质的含量,并且以 Spd 处理的效果最好。

2.3 外源多胺对低温胁迫下辣椒抗氧化酶活性的影响

由图 3 可见,在常温条件下,外源 PAs 处理辣椒幼苗的 SOD、POD、CAT 活性与对照相比均无显著差异。低温处理后,对照植株的 SOD 活性随处理时间

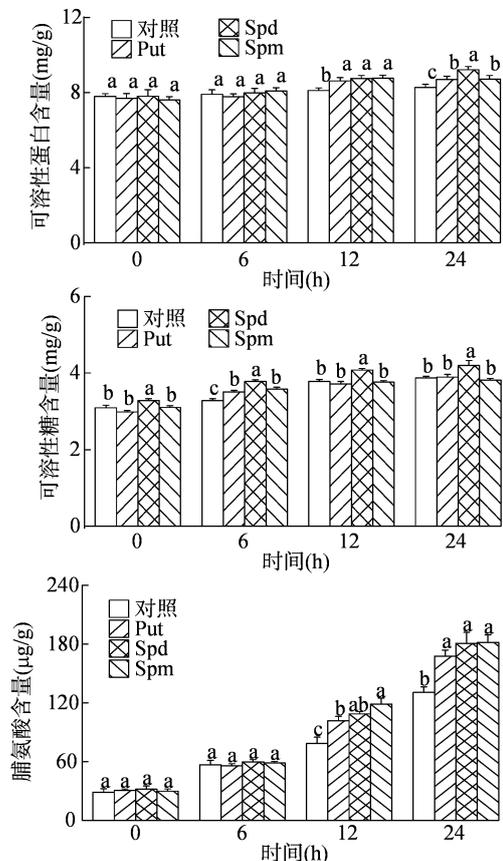


图2 外源多胺对低温胁迫下辣椒幼苗叶片可溶性蛋白、可溶性糖、脯氨酸含量的影响

的延长呈上升趋势,在处理 24 h 时较常温条件增加 108.2%,而 POD、CAT 活性呈现先增加后降低的趋势。低温处理 6 h 时,Put、Spd、Spm 处理幼苗的 POD 活性显著高于对照,而 SOD、CAT 活性与对照无显著差异;低温处理 12 h 时,SOD 活性均显著高于对照,CAT 活性与对照无显著差异;在低温处理 24 h 时,外源 PAs 处理的抗氧化酶活性均显著高于对照,其中 Put 处理的 SOD、POD、CAT 活性分别较对照提高 20.38%、10.80%、25.31%,Spd 处理的酶活性分别较对照提高 34.70%、21.75%、14.24%,Spm 处理的酶活性较对照分别提高 22.13%、14.86%、13.38%。

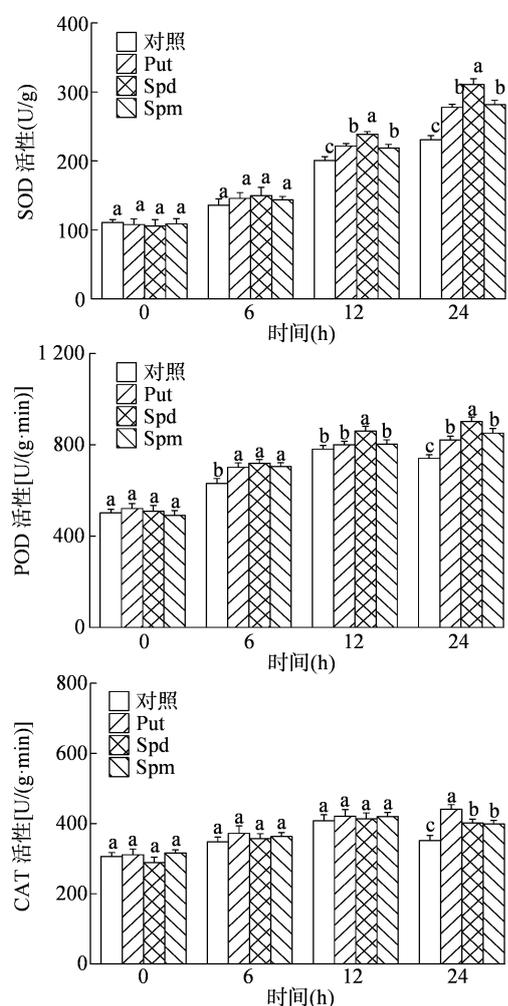


图3 外源多胺对低温胁迫下辣椒幼苗叶片 SOD、POD 和 CAT 活性的影响

2.4 外源多胺对低温胁迫下辣椒 AsA - GSH 循环相关酶活性的影响

由图 4 可见,在低温胁迫下,对照植株的 APX、DHAR、MDHAR 活性随处理时间的延长呈现不同趋势,其中 APX 活性呈逐渐上升趋势,DHAR 活性呈

先增加后降低的趋势,而 MDHAR 活性呈先降低后上升的趋势。外源 PAs 处理均可使低温胁迫下辣椒幼苗的 APX、DHAR、MDHAR 活性提高,且在处理 24 h 时增幅最大,其中 Put 处理的上述酶活性分别较对照提高 8.29%、68.64%、193.33%,Spd 处理的上述酶活性分别较对照提高 21.27%、79.39%、322.22%,Spm 处理的上述酶活性分别较对照提高 8.59%、72.26%、126.67%。

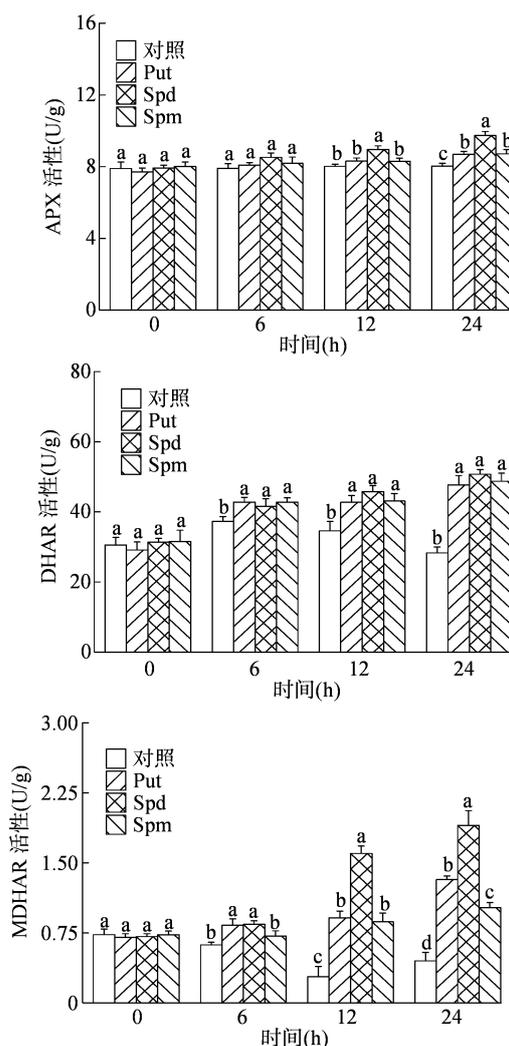


图4 外源多胺对低温胁迫下辣椒幼苗叶片抗坏血酸过氧化物酶、脱氢抗坏血酸还原酶和单脱氢抗坏血酸还原酶活性的影响

2.5 外源多胺对低温胁迫下辣椒光合色素的影响

由表 1 可见,低温胁迫下对照植株的叶绿素 a、叶绿素 b、总叶绿素、类胡萝卜素含量均随胁迫时间的延长呈现下降趋势,说明低温胁迫影响了辣椒幼苗叶绿素合成系统的正常运行。外源 PAs 处理可以缓解低温胁迫造成的叶绿素含量下降,在低温处理 24 h 时,叶绿素 a 含量分别较对照植株提高 21.65%、51.55%、45.36%,叶绿素 b 含量分别较对

照植物提高 8.70%、26.09%、34.78%，叶绿素总含量分别较对照植株提高 16.67%、42.36%、40.97%，类胡萝卜素含量分别较对照植株提高 20.69%、

75.86%、48.28%。上述结果说明，外源施用 PAs 可以减少低温胁迫下光合色素的损失，且 Spd 处理效果最佳，其次为 Spm 处理。

表 1 外源多胺对低温胁迫下辣椒幼苗叶片 Chla、Chlb、Chl(a+b)、Car 含量的影响

时间 (h)	处理	叶绿素 a 含量 (mg/g)	叶绿素 b 含量 (mg/g)	叶绿素总含量 (mg/g)	类胡萝卜素含量 (mg/g)
0	对照	1.92 ± 0.10b	0.93 ± 0.03a	2.85 ± 0.18a	0.58 ± 0.04a
	Put	2.08 ± 0.02a	0.80 ± 0.06b	2.88 ± 0.21a	0.59 ± 0.02a
	Spd	1.92 ± 0.03b	0.92 ± 0.04a	2.84 ± 0.20a	0.59 ± 0.03a
	Spm	1.91 ± 0.04b	0.98 ± 0.06a	2.89 ± 0.22a	0.62 ± 0.03a
6	对照	1.62 ± 0.07a	0.59 ± 0.01c	2.21 ± 0.11b	0.43 ± 0.01b
	Put	1.82 ± 0.08a	0.66 ± 0.04b	2.48 ± 0.13a	0.56 ± 0.01a
	Spd	1.73 ± 0.07a	0.67 ± 0.01b	2.40 ± 0.28a	0.55 ± 0.02a
12	对照	1.23 ± 0.06b	0.49 ± 0.01c	1.72 ± 0.16c	0.41 ± 0.01b
	Put	1.38 ± 0.02b	0.53 ± 0.01b	1.91 ± 0.01b	0.50 ± 0.02a
	Spd	1.62 ± 0.13a	0.59 ± 0.02a	2.22 ± 0.06a	0.54 ± 0.01a
	Spm	1.55 ± 0.06a	0.57 ± 0.02a	2.13 ± 0.11a	0.55 ± 0.02a
24	对照	0.97 ± 0.02c	0.46 ± 0.01c	1.44 ± 0.12c	0.29 ± 0.02d
	Put	1.18 ± 0.03b	0.50 ± 0.02b	1.68 ± 0.18b	0.35 ± 0.01c
	Spd	1.47 ± 0.05a	0.58 ± 0.02a	2.05 ± 0.11a	0.51 ± 0.01a
	Spm	1.41 ± 0.08a	0.62 ± 0.03a	2.03 ± 0.22a	0.43 ± 0.02b

注：同一时间不同处理间数据后标有不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

2.6 外源多胺对低温胁迫下辣椒光合气体交换参数的影响

由图 5 可见，低温胁迫下对照植株的 P_n 、 G_s 、 T_r 值随处理时间的延长呈下降趋势，在处理 24 h 时，分别较常温条件降低了 30.03%、73.23%、54.17%； C_i 值呈上升趋势，较常温条件提高了 36.55%。外源 PAs 处理的幼苗在低温处理 6 h 时 P_n 、 C_i 、 G_s 与对照无显著差异，而随着处理时间的延长， P_n 、 G_s 、 T_r 值显著高于对照，但 C_i 值显著低于对照。其中在低温处理 12 h 时，Put 处理的 P_n 、 G_s 、 T_r 值分别较对照提高了 13.28%、19.86%、17.65%， C_i 值较对照降低了 7.45%；Spd 处理的 P_n 、 G_s 、 T_r 值分别较对照增加了 14.05%、22.98%、25.95%， C_i 值下降了 7.7%；Spm 处理的 P_n 、 G_s 、 T_r 值分别较对照提升了 13.67%、37.48%、16.96%， C_i 值降低了 7.45%。在低温处理 24 h 时，Spd 处理的效果最明显， P_n 、 G_s 、 T_r 值分别较对照提高了 17.36%、66.52%、41.92%， C_i 值较对照降低了 7.7%。上述结果表明，外源施用 PAs 能够显著缓解低温胁迫对辣椒幼苗叶片光合作用的抑制，从而维持较高的光合速率。

2.7 外源多胺对低温胁迫下辣椒叶绿素荧光参数的影响

由图 6 可见，在常温条件下外源施用 PAs 处理的幼苗与对照植株的 F_v/F_m 、 Φ_{PSII} 、 q_P 、NPQ 值均无显著影响。在低温胁迫下，对照植株的 F_v/F_m 、 Φ_{PSII} 、 q_P 值随处理时间的延长而降低，而 NPQ 值随处理时间的延长而增加。在低温处理 24 h 时，上述指标分别较常温条件降低了 15.29%、29.63%、21.65 及上升了 135.63%。与对照相比，在低温处理 12 h 时，Spd、Spm 处理显著提高了辣椒幼苗的 F_v/F_m 、 q_P 值并显著降低了 NPQ 值；在低温处理 24 h 时，外源 PAs 处理的 F_v/F_m 、 Φ_{PSII} 、 q_P 、NPQ 值与对照植株间均存在显著差异，其中外源 Put、Spd、Spm 处理后的 F_v/F_m 值分别上升了 2.99%、9.25%、5.22%， Φ_{PSII} 值分别提高了 10.26%、18.42%、12.63%， q_P 值分别提高了 9.85%、18.74%、14.54%，而 NPQ 值分别降低了 19.48%、26.59%、19.73%。上述结果表明，外源施用 PAs 能够提高辣椒幼苗叶片 PS II 最大光能转化效率、光化学活性，同时降低用于热耗散部分的光能，以外源

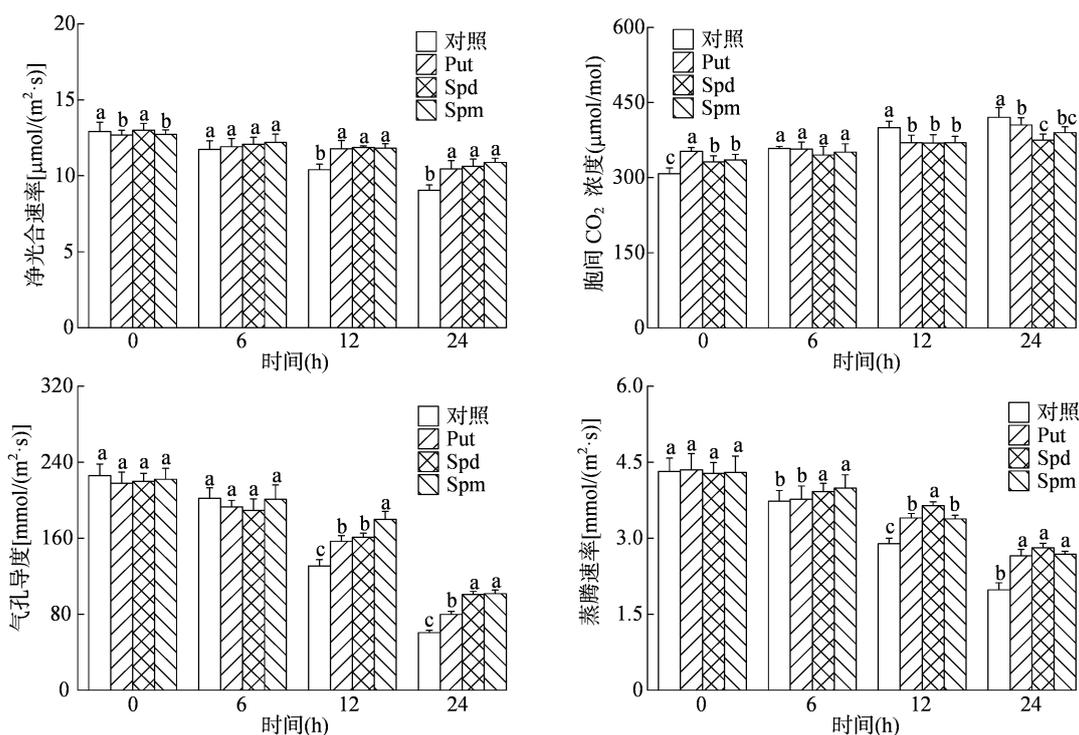


图5 外源多胺对低温胁迫下辣椒幼苗叶片净光合速率、胞间 CO₂ 浓度、气孔导度和蒸腾速率的影响

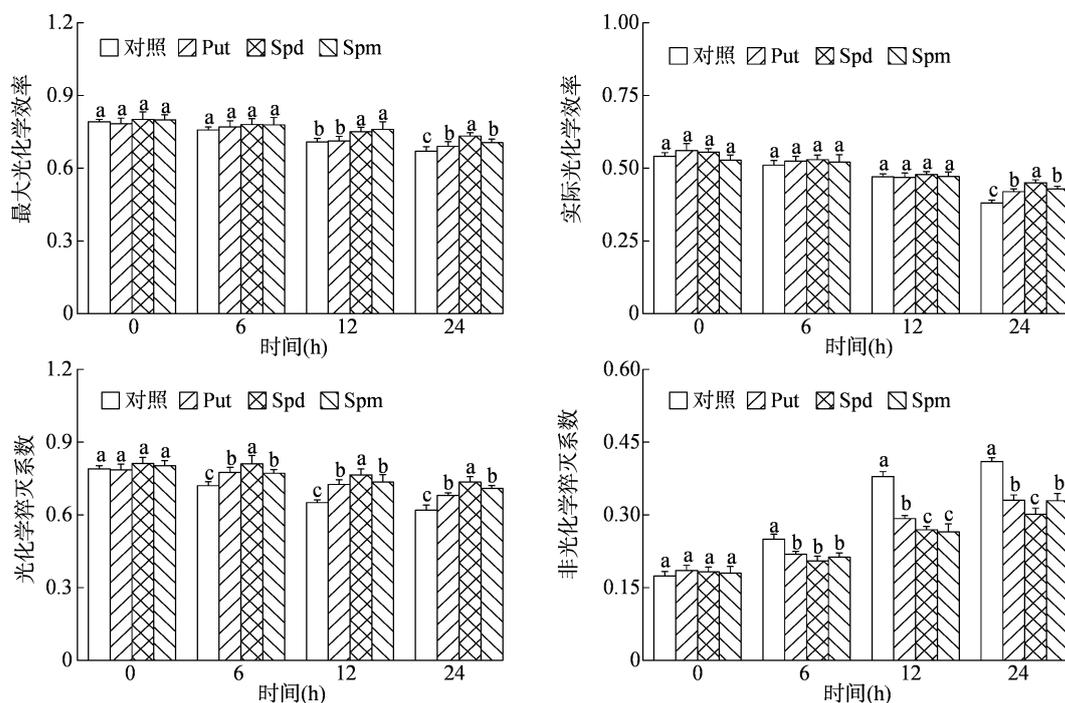


图6 外源多胺对低温胁迫下辣椒幼苗叶片最大光化学效率、实际光化学效率、光化学淬灭系数和非光化学淬灭系数的影响

Spd 处理的效果最好。

2.8 外源多胺对低温胁迫下辣椒内源多胺含量的影响

由图 7 可见,在常温条件下,Put 处理的 Put、Spm 含量显著高于对照植株;Spd、Spm 处理的 Spd、Spm 含量均显著高于对照。在低温胁迫下,对照植

株的 Put、Spd 含量随处理时间的延长而呈现上升趋势,Spm 含量呈现先增加后降低的趋势,其中 Put、Spd 含量分别较常温条件提高 134.21%、198.25%。与对照相比,Put 处理显著提高了低温处理 6、12、24 h 的 Put 含量,分别增加了 16.67%、28.53%、28.09%。Spd 处理显著增加了低温处理 6、12、24 h

的 Spd 含量,相较于对照分别提高了 30.71%、32.33%、50.98%,并显著提高了处理 12、24 h 后的 Put、Spm 含量,在处理 24 h 时分别较对照提高了 9.56%、57.06%。Spm 处理显著提高了低温处理 12、24 h 的 Spm 含量以及处理 6、12、24 h 后的 Spm 含量,相较于对照植株分别增加了 19.91%、17.54%、13.73%。结果表明,外源 PAs 处理均能提高低温胁迫下辣椒幼苗体内游离态多胺含量,其中增幅最大的为 Spm 含量。

2.9 外源多胺对低温胁迫下辣椒多胺代谢相关酶活性的影响

由图 8 可见,在低温胁迫下,对照植株的 ADC、ODC、SPDS、PAO 活性均呈先增加后降低的趋势,其中 ADC、ODC、SPDS 活性在低温处理 12 h 时达到峰值,较常温条件分别提高了 64.2%、38.59%、52.15%;PAO 活性在低温处理 6 h 时达到峰值,较常温提高了 11.73%。外源 PAs 处理提高了低温胁迫下 ADC、ODC、SPDS、PAO 活性,在低温处理 24 h 时,Put 处理的 ADC、ODC、SPDS、PAO 活性分别较对照提高了 20.94%、32.71%、58.39%、19.04%, Spd 处理的 ADC、ODC、SPDS、PAO 活性分别较对照提高了 38.5%、34.5%、53.85%、29.31%, Spm 处理的 ADC、ODC、SPDS、PAO 活性分别较对照提高了 58.68%、35.90%、84.27%、27.72%。上述结果说明,外源多胺能提高低温胁迫下多胺代谢相关酶的活性,其中以外源 Spm 处理的效果最佳,其次为 Spd 处理。

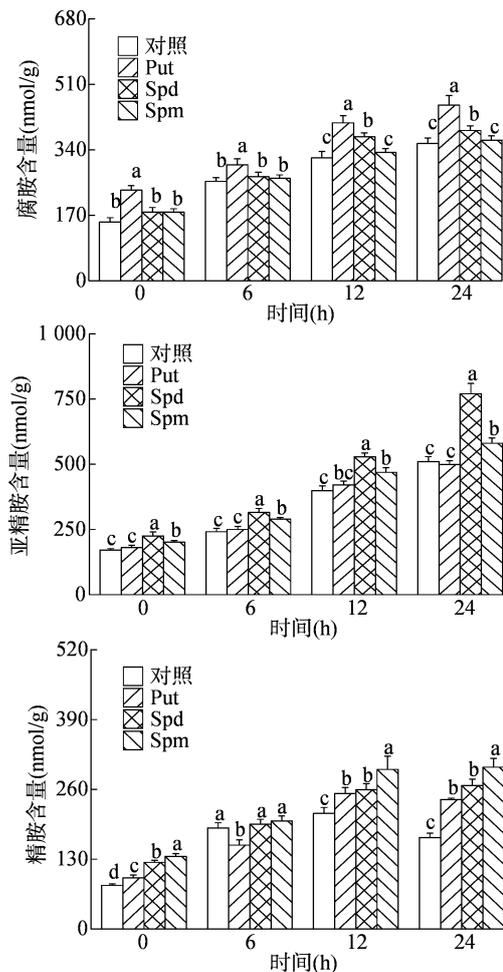


图7 外源多胺对低温胁迫下辣椒幼苗叶片腐胺、亚精胺和精胺含量的影响

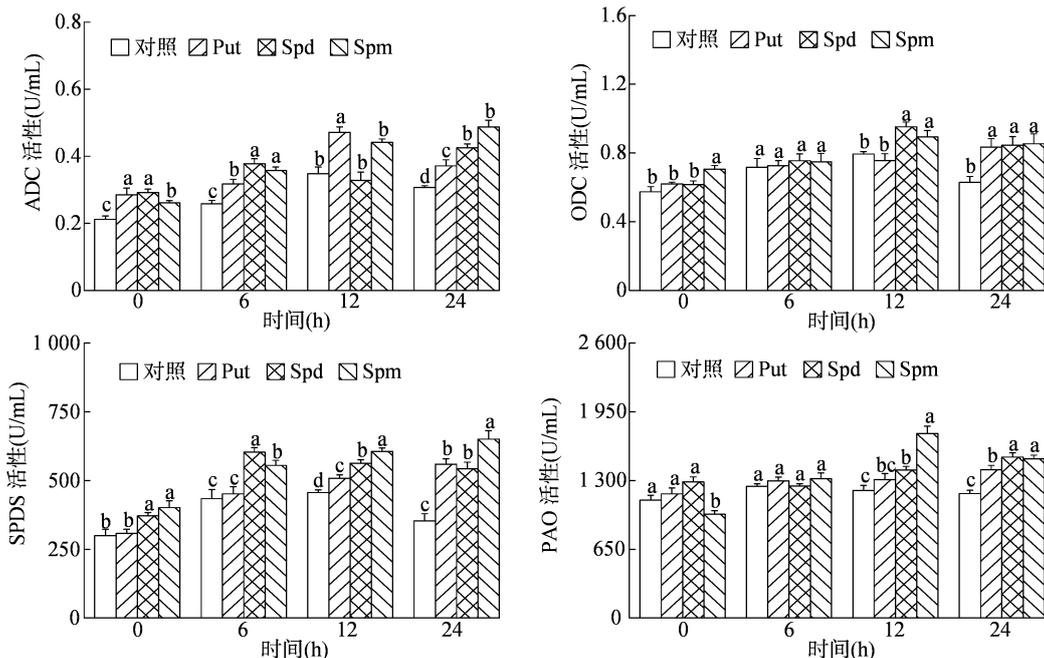


图8 外源多胺对低温胁迫下辣椒幼苗叶片精氨酸脱羧酶、鸟氨酸脱羧酶、亚精胺合成酶和多胺氧化酶活性的影响

3 讨论

ROS 爆发是植物抵抗非生物胁迫的最早期反应。在低温胁迫下,细胞中 $\text{OH}\cdot$ 和 $\text{O}_2^-\cdot$ 自由基增加,引起膜脂过氧化,进而导致细胞膜遭到破坏^[14]。REC 是衡量细胞膜完整性的重要指标之一,而 MDA 是脂质过氧化的产物,其含量直接反映了植物细胞氧化损伤的程度^[15]。在本研究中,低温胁迫会诱导 MDA、 $\text{O}_2^-\cdot$ 、 H_2O_2 含量增加,而外源 PAs 处理能显著降低辣椒叶片中上述指标的含量,由此缓解低温胁迫造成的伤害,其中以 Spd 处理的效果最好,表明低温胁迫下的外源 PAs 处理,尤其是 Spd 在清除 ROS、降低膜脂过氧化方面起着重要作用。可溶性蛋白、可溶性糖和脯氨酸等渗透调节物质在保护植物免受各种非生物胁迫中发挥了重要作用^[16-17]。在本研究中,外源 PAs 能增加低温胁迫下的可溶性蛋白、脯氨酸含量。当植物细胞中积累过量 ROS 时,抗氧化防御系统将被迅速诱导,以缓解 ROS 造成的氧化伤害^[15]。前人研究发现,PAs 可以通过增加抗氧化酶活性以清除过量的 ROS^[18]。AsA-GSH 循环系统是植物清除 ROS 的重要途径之一,主要涉及 APX、DHAR 和 MDHAR^[19]。在本研究中,外源 PAs 均能增加低温胁迫下的 SOD、POD 和 CAT 活性,并以 Spd 处理的效果最好。此外,外源 PAs 处理能提高低温胁迫下 APX、DHAR、MDHAR 活性,表明外源 PAs 能通过保持较高的抗氧化防御能力来减轻辣椒幼苗中由低温引起的氧化应激。

光合作用主要指绿色植物将光能转化为化学能的过程,它是维持地球生命活动中不可缺少的一部分。影响植物光合作用的因素主要包括光照度、温度、 CO_2 浓度、水和矿物质。前人研究发现,当植物暴露于低温环境时,往往伴随着光合色素(叶绿素 a、叶绿素 b、总叶绿素和类胡萝卜素)的降解^[20]。在本研究中,低温处理同样降低了辣椒幼苗光合色素含量,而外源 PAs 处理提高了低温胁迫下的光合色素水平,当处理 24 h 时,外源 PAs 处理的色素含量均显著高于对照,其中以 Spd 处理的效果最明显。一般而言,植物对光的吸收和利用存在一种平衡,然而逆境胁迫往往会打破这种平衡,引起植物光合器官产生不可逆损伤。环境胁迫下的植物光合速率下降有气孔限制、非气孔限制 2 种情况。当 P_n 、 G_s 、 C_i 同时下降时,说明 P_n 下降主要是由气孔因素引起的,而当 P_n 、 G_s 下降同时 C_i 升高时,则说明 P_n

下降主要由非气孔限制因素导致^[21]。在本试验中,低温胁迫引起辣椒幼苗叶片 P_n 、 G_s 、 T_r 下降的同时 C_i 升高,说明 P_n 下降主要由非气孔限制因素引起,这与唐超男的研究结果^[22]一致。低温胁迫 12、24 h 时,外源 PAs 处理均显著提高了辣椒幼苗叶片的 P_n 、 G_s 、 T_r ,并显著降低了 C_i ,表明施加外源 PAs 对低温胁迫下辣椒幼苗叶片的光合活性下降有显著缓解作用,从而使植株在低温胁迫下依然可以维持较高光合能力。植物的气体交换参数和叶绿素荧光参数相辅相成,分别具有“表观性”和“内在性”特点^[23]。在低温胁迫下,辣椒叶片的 F_v/F_m 、 Φ_{PSII} 、 q_p 显著降低,而 NPQ 呈先快速上升随后逐渐降低的趋势^[22]。在本试验中,辣椒幼苗的 F_v/F_m 、 Φ_{PSII} 、 q_p 随处理时间的延长呈下降趋势,而 NPQ 值呈逐渐上升的趋势,说明低温胁迫下辣椒幼苗叶片的 PS II 活性中心受到伤害,光合电子传递效率下降。低温胁迫下喷施外源 PAs 显著提高了植株的 F_v/F_m 、 Φ_{PSII} 、 q_p ,并降低了 NPQ 值。其中以 Spd 处理的效果最好,低温处理 24 h 时,辣椒幼苗叶片的 F_v/F_m 、 Φ_{PSII} 、 q_p 分别较对照提高了 9.25%、18.42%、18.74%;NPQ 值较对照下降了 26.59%。上述结果表明,外源 PAs 处理,尤其是 Spd 处理通过增强光化学活性、PS II 的光合电子传递速率有效促进了低温胁迫下辣椒幼苗的光合速率,从而保护光合机构免受低温胁迫产生能量过剩而造成的损伤。

大量研究发现,PAs 在植物应对各种胁迫环境中发挥重要作用。植物体内 PAs 水平的稳定受到从头合成、分解代谢 2 个方面的影响。PAs 的生物合成由多种酶催化,其中起关键作用的包括 ADC、ODC、S-腺苷甲硫氨酸脱羧酶(SAMDC)、SPDS 和 SPMS^[24]。Put 由 ADC 和 ODC 催化合成。SAMDC 催化 S-腺苷甲硫氨酸(SAM)脱羧,从而为 Spd、Spm 提供 1~2 个氨基,然后由 SPDS、SPMS 催化形成 Spd、Spm^[24]。有研究发现,逆境胁迫下的游离态 Put 含量仅受 ADC 调控,而 ODC 不参与 Put 的合成。低温会诱导香蕉果实的 ADC、ODC 活性增加,并伴随着 PAs 含量的提高^[25]。通常情况下,植物的耐冷性与 PAs 含量的积累呈正相关^[4]。细胞中 PAs 含量不仅取决于合成速率,而且取决于 PAs 的氧化降解。PAO、DAO 是 PAs 分解代谢中的 2 种关键酶^[26]。在本试验中,外源 PAs 显著提高了低温胁迫下辣椒幼苗叶片的 PAs 含量,在外源 PAs 处理的黄瓜幼苗中得到了相似的结果。此外,施加外源 PAs 促进了低

温胁迫下辣椒幼苗的 ADC、ODC、SPDS、PAO 活性。因此,推测低温胁迫下辣椒幼苗的 PAs 含量受到合成酶、分解酶的双重调控,它们共同作用以维持植物体内游离体 PAs 的高水平,从而提高植株的抗寒性。

4 结论

综上所述,外源 PAs 的施用提高了低温胁迫下辣椒幼苗叶片中 SOD、POD、CAT、AsA - GSH 循环相关酶(包括 APX、DHAR、MDHAR)的活性,并降低了 MDA、H₂O₂、O₂⁻· 的含量。此外,外源 PAs 的施用提高了 PS II 光利用效率、激发能量耗散,平衡光能吸收分配以减少 ROS 的产生,从而提高了低温胁迫下辣椒幼苗的光合作用。在多胺代谢方面,外源 PAs 也参与调控 ADC、ODC、SPDS、PAO 的活性及体内游离态 PAs 水平。总体而言,外源 PAs 通过抗氧化系统、光合系统及多胺代谢途径参与辣椒低温胁迫的响应,从而提高植株的抗寒性,其中以外源 Spd 处理的效果最好,其次为 Spm 处理。

参考文献:

[1] 邹学校, 马艳青, 戴雄泽, 等. 辣椒在中国的传播与产业发展 [J]. 园艺学报, 2020, 47(9): 1715 - 1726.

[2] Polowick P L, Sawhney V K. Temperature effects on male fertility and flower and fruit development in *Capsicum annuum* L. [J]. Scientia Horticulturae, 1985, 25(2): 117 - 127.

[3] 顾桂兰, 张雪平, 陈建芳, 等. 大棚辣椒秋延后双减绿色高效栽培技术 [J]. 北方园艺, 2022(18): 153 - 155.

[4] 张 灵, 陶亚军, 方 琳, 等. 植物多胺的代谢与生理研究进展 [J]. 植物生理学报, 2020, 56(10): 2029 - 2039.

[5] Jankovska - Bortkevič E, Gavelienė V, Šveikauskas V, et al. Foliar application of polyamines modulates winter oilseed rape responses to increasing cold [J]. Plants, 2020, 9(2): 179.

[6] 曹玉杰. 外源多胺对低温胁迫下黄瓜幼苗生理生化指标的影响 [D]. 南京: 南京农业大学, 2014: 21 - 28.

[7] 姜秀梅. 外源物质处理对低温胁迫下辣椒种子萌发及幼苗抗冷性的影响 [D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2014: 14 - 49.

[8] 牛云然. 外源物质对低温下辣椒幼苗抗冷性的影响 [D]. 邯郸: 河北工程大学, 2020: 16 - 37.

[9] Zhang J W, Liang L, Xie Y D, et al. Transcriptome and metabolome analyses reveal molecular responses of two pepper (*Capsicum annuum* L.) cultivars to cold stress [J]. Frontiers in Plant Science, 2022, 13: 819630.

[10] 王学奎, 黄见良. 植物生理生化实验原理与技术 [M]. 3 版. 北

京: 高等教育出版社, 2015: 171 - 281.

[11] 周 艳, 刘慧英, 王 松, 等. 外源 GSH 对盐胁迫下番茄幼苗生长及抗逆生理指标的影响 [J]. 西北植物学报, 2016, 36(3): 515 - 520.

[12] 王 松. 外源 NO 对盐胁迫下番茄光合碳同化的影响 [D]. 石河子: 石河子大学, 2016: 34 - 36.

[13] 林绍艳, 张 芳, 徐颖洁. 植物中多胺含量超高效液相色谱法的建立 [J]. 南京农业大学学报, 2016, 39(3): 358 - 365.

[14] Ai W, Chun K. Senescence and peroxidation of membrane lipid in mitochondria of soybean hypocotyl [J]. Acta Phytophysiological Sinica, 1988, 14(3): 269 - 273.

[15] Gill S S, Tuteja N. Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants [J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2010, 48(12): 909 - 930.

[16] 冯 召, 杨盟权, 姚 峰, 等. 干旱胁迫下哈茨木霉对烟草幼苗生理指标的影响 [J]. 江苏农业科学, 2024, 52(8): 86 - 93.

[17] 申宝营, 吴宏琪, 林碧英. 低温弱光处理对茄子不同时期花青素含量及果实品质的影响 [J]. 福建农业学报, 2024, 39(3): 310 - 319.

[18] 吴馨怡. 多胺介导油菜素内酯增强番茄耐盐性的生理功能和分子机制 [D]. 南京: 南京农业大学, 2021.

[19] Mittler R. Oxidative stress, antioxidants and stress tolerance [J]. Trends in Plant Science, 2002, 7(9): 405 - 410.

[20] Jannesar M, Seyedi S M, Niknam V, et al. Salicylic acid, as a positive regulator of isochlorogenic acid synthase, reduces the negative effect of salt stress on *Pistacia vera* L. by increasing photosynthetic pigments and inducing antioxidant activity [J]. Journal of Plant Growth Regulation, 2022, 41(3): 1304 - 1315.

[21] Jiao L Y, Wang L H, Zhou Q, et al. Stomatal and non - stomatal factors regulated the photosynthesis of soybean seedlings in the presence of exogenous bisphenol A [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2017, 145: 150 - 160.

[22] 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 [D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2021: 29 - 70.

[23] 李志博, 魏亦农, 张荣华, 等. 棉花不同叶位叶绿素荧光特性初探 [J]. 棉花学报, 2005, 17(3): 189 - 190.

[24] Bagni N, Tassoni A. Biosynthesis, oxidation and conjugation of aliphatic polyamines in higher plants [J]. Amino Acids, 2001, 20(3): 301 - 317.

[25] Wang Y S, Luo Z S, Mao L C, et al. Contribution of polyamines metabolism and GABA shunt to chilling tolerance induced by nitric oxide in cold - stored banana fruit [J]. Food Chemistry, 2016, 197: 333 - 339.

[26] Moschou P N, Wu J, Cona A, et al. The polyamines and their catabolic products are significant players in the turnover of nitrogenous molecules in plants [J]. Journal of Experimental Botany, 2012, 63(14): 5003 - 5015.