

引用格式:

陈汉, 黄科, 刘峰, 张文霞, 胡佳未, 周龙, 王军伟. 外源EBR与ALA对湖南地区越冬辣椒幼苗生长及生理特性的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2025, 51(4): 25–37.

CHEN H, HUANG K, LIU F, ZHANG W X, HU J W, ZHOU L, WANG J W. Effects of exogenous EBR and ALA on growth and physiology of overwintering pepper seedlings in Hunan Province[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2025, 51(4): 25–37.

投稿网址: <http://xb.hunau.edu.cn>



外源EBR与ALA对湖南地区越冬辣椒幼苗生长及生理特性的影响

陈汉¹, 黄科^{1,2,3,4}, 刘峰^{1,2,3,4}, 张文霞¹, 胡佳未¹, 周龙¹, 王军伟^{1,2,3,4*}

(1. 湖南农业大学园艺学院, 湖南 长沙 410128; 2. 蔬菜生物学湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410128; 3. 园艺作物种质创新与新品种选育教育部工程研究中心, 湖南 长沙 410128; 4. 农业农村部园艺作物(蔬菜、茶叶等)基因资源评价利用重点实验室, 湖南 长沙 410128)

摘要: 以‘博辣红牛’‘兴蔬215’‘长研青香’为试材, 研究不同质量浓度外源2,4-表油菜素内酯(EBR)与5-氨基乙酰丙酸(ALA)对越冬辣椒幼苗生长、抗氧化酶活性、渗透调节物质含量及氮代谢关键酶活性的影响。结果表明: 外源EBR和ALA均能不同程度地提升幼苗抵御低温逆境的能力, 与喷施清水相比, 喷施不同质量浓度的外源EBR与ALA后, 越冬辣椒幼苗的形态指标(株高、茎粗、鲜质量、干质量、壮苗指数)均有所提升, 抗氧化酶(SOD、POD、CAT)活性增强, 渗透调节物质(脯氨酸、可溶性糖、可溶性蛋白)含量以及氮代谢关键酶(NR、NiR、GS)活性均有一定程度的提高, 其中0.01 mg/L EBR与30.00 mg/L ALA更能缓解低温逆境对幼苗生理生长造成的危害。在此基础上, 以此质量浓度开展越冬辣椒育苗的生产应用试验, 试验结果显示外源喷施30.00 mg/L ALA+助剂处理后辣椒幼苗的壮苗指数显著高于其他处理的, 且单株幼苗增加的成本为0.007 3元。

关键词: 辣椒; 低温逆境; 2,4-表油菜素内酯; 5-氨基乙酰丙酸; 植物生长调节剂

中图分类号: S641.3

文献标志码: A

文章编号: 1007-1032(2025)04-0025-13

Effects of exogenous EBR and ALA on growth and physiology of overwintering pepper seedlings in Hunan Province

CHEN Han¹, HUANG Ke^{1,2,3,4}, LIU Feng^{1,2,3,4}, ZHANG Wenxia¹, HU Jiawei¹, ZHOU Long¹, WANG Junwei^{1,2,3,4*}

(1. College of Horticulture, Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan 410128, China; 2. Key Laboratory for Vegetable Biology of Hunan Province, Changsha, Hunan 410128, China; 3. Engineering Research Center for Horticultural Crop Germplasm Creation and New Variety Breeding, Ministry of Education, Changsha, Hunan 410128, China; 4. Key Laboratory for Evaluation and Utilization of Gene Resources of Horticultural Crops(Vegetables, Tea, etc.), Ministry of Agriculture and Rural Affairs of China, Changsha, Hunan 410128, China)

Abstract: The effects of different concentrations of exogenous 2,4-epibrassinolide(EBR) and 5-aminoacetyl propane(ALA) on the growth, antioxidant enzyme activity, osmoregulatory substance content and nitrogen metabolism key enzyme activity of overwintering pepper seedlings were studied using ‘Bola Red Bull’ ‘Xingshu 215’ and ‘Changyan Qingxiang’ as test materials. The results showed that exogenous EBR and ALA could enhance the ability of seedlings to resist low temperature stress to varying degrees. Compared to the water-sprayed control, the application of different

收稿日期: 2024-06-18

修回日期: 2025-07-12

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFD); 湖南湘南‘供粤港澳’蔬菜优势特色产业项目(湘农联[2023]64号); 湖南省重点研发计划项目(2023NK2010、2024QY2010); 湖南省现代农业(蔬菜)产业技术体系项目(HARS-04); 湖南省教育厅项目(24C0100)

作者简介: 陈汉(1997—), 男, 湖南常德人, 硕士研究生, 主要从事设施蔬菜栽培生理研究, 1120573858@qq.com; *通信作者, 王军伟, 博士, 副教授, 主要从事设施蔬菜栽培生理研究, JunweiWang87@126.com

concentrations of exogenous EBR and ALA improved the morphological indicators of overwintering pepper seedlings, including plant height, stem thickness, fresh weight, dry weight, and seedling vigor index. The activities of antioxidant enzymes(SOD, POD, CAT) were enhanced, and the content of osmoregulatory substances(proline, soluble sugars, soluble proteins) and the activities of key nitrogen metabolism enzymes(NR, NiR, GS) were also increased to some extent. Among them, 0.01 mg/L EBR and 30.00 mg/L ALA were more effective in alleviating the damage effects of low-temperature stress on seedling physiology and growth. Based on these findings, practical application trial was conducted for overwintering pepper seedling cultivation at this concentration. The results showed that the seedling vigor index following the foliar application of 30.00 mg/L ALA plus an adjuvant was significantly higher than that in all other treatments, and the additional cost per seedling was calculated to be RMB 0.007 3.

Keywords: pepper; low temperature stress; 2,4-epibrassinolide; 5-aminolevulinic acid; plant growth regulator

辣椒(*Capsicum* spp.)又名番椒、海椒、辣子、辣角、辣茄等,其种植面积居我国蔬菜首位。湖南是我国辣椒种植、消费、加工的重要省份,但湖南地区在冬春季辣椒育苗过程中常遭遇气温低、光照短和光强弱等问题,致使辣椒幼苗生长发育受到影响。因此,研究辣椒幼苗耐低温机制,提升幼苗耐冷性,对培育健壮幼苗、提高栽培效益具有重要意义。

2,4-表油菜素内酯(2,4-epibrassinolide, EBR)是一种多羟基化的甾醇类物质,虽然在植物体内含量少,但具有很高的生理活性^[1-2]。现有研究表明,EBR在调控植物生长发育、提升作物光合效率、增强抗逆性等方面发挥重要作用^[2-4]。马金虎^[5]研究发现,低温胁迫下用油菜素内酯浸种玉米,其发芽率、发芽势、干质量、鲜质量、根长等生长指标均显著提升,同时渗透调节物质含量也增加,有效增强了玉米抵御低温逆境的能力。周伟江等^[6]研究表明,喷施适宜质量浓度的EBR显著降低了水稻叶片与根系中丙二醛(MDA)的含量,增加了可溶性蛋白的含量,缓解了低温胁迫造成的损伤,提升了幼苗的低温抗性。低温胁迫下采用EBR喷施苦瓜幼苗和烟草幼苗后,叶片萎蔫程度减轻,超氧化物歧化酶(SOD)和过氧化物酶(POD)等抗氧化酶活性升高,脯氨酸等渗透调节物质含量增加,幼苗抵御低温胁迫的能力增强^[7-8]。

5-氨基乙酰丙酸(5-ALA)是卟啉化合物生物合成的关键前体,是叶绿素的重要前体物质,它普遍存在于生命活动中的天然非蛋白氨基酸中,在植物、动物、微生物细胞中广泛存在,在生物体的多种生物化学反应中发挥重要作用^[9-10]。低温条件下采用叶施、浸种、浇灌等3种方式对辣椒施用不同

质量浓度的ALA均提升了其抗寒性^[11]。尹璐璐等^[12]研究表明,在低温胁迫下对黄瓜喷施0.5 mg/L ALA,幼苗叶片SOD、POD等酶的活性提升了,脯氨酸及可溶性糖等渗透调节物质含量也显著增加,MDA含量和电解质渗透率降低了。程菊娥等^[13]研究发现,外源5-ALA提高了烟草叶片的叶绿素含量,增强了植物的抗冷性。

本试验通过对辣椒幼苗喷施不同质量浓度的外源EBR与ALA,测定幼苗的生长指标以及叶片的抗氧化酶活性、渗透调节物质含量、氮代谢关键酶活性等指标,以筛选湖南省越冬辣椒育苗最适的外源EBR与ALA质量浓度,探究外源EBR与ALA缓解低温弱光胁迫的生理机制,为此类外源物质在辣椒育苗生产上的应用提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料

供试辣椒品种‘博辣红牛’‘兴蔬215’购于湖南兴蔬种业有限公司,‘长研青香’购于长沙春润种业有限公司,‘鸡肠子’购于浏阳市沿溪镇,‘龙福辣’购于长沙湘研种业有限公司。

1.2 试验设计

试验于2020年11月至2021年3月在湖南农业大学耘园基地智能温室内进行。2020年11月1日采用50孔穴盘播种‘博辣红牛’‘兴蔬215’和‘长研青香’3个辣椒品种,2020年12月2日待幼苗长至两叶一心时,对幼苗叶片喷施外源EBR与ALA,EBR 4个质量浓度梯度分别为0.001 mg/L(E1)、0.010 mg/L(E2)、0.100 mg/L(E3)、1.000 mg/L(E4);ALA 4个质量浓度分别为15 mg/L(A1)、30 mg/L(A2)、45 mg/L(A3)、

60 mg/L(A4);均以喷施清水为对照(CK)。每个处理设置3次重复,每个重复1盘幼苗(50孔),3 d喷施1次,共喷施9次,其间进行常规肥水管理。于2021年3月12日取样测定。

后续应用试验在湖南省长沙市浏阳市沿溪镇沙河村万亩蔬菜园进行,以‘鸡肠子’和‘龙福辣’为供试材料。2021年11月12日采用50孔穴盘进行播种。2022年1月1日,当幼苗长至两叶一心时开始对其进行处理,每10 d喷施1次0.01 mg/L EBR或30.00 mg/L ALA(两者为各自筛选出的最优质量浓度)。其他方面按常规管理。试验共设计4个处理,外源喷施0.01 mg/L EBR(C1)、30.00 mg/L ALA(C2)、0.01 mg/L EBR + 青皮桔油助剂(C3)、30.00 mg/L ALA + 青皮桔油助剂(C4),并以清水喷施为对照(CK)。每个处理设置3次重复,每个重复10盘幼苗,并于2022年1月30日进行取样测定。

1.3 测定指标与方法

测量株高(从茎基部到生长点)、茎粗以及地上部、地下部的鲜质量和干质量;参照张文霞等^[14]的方法计算壮苗指数;采用北京索莱宝科技有限公司生产的试剂盒测定丙二醛(MDA)、脯氨酸(Pro)含量及SOD、POD、过氧化氢酶(CAT)、硝酸还原酶(NR)、谷氨酰胺合成酶(GS)活性;采用上海苗彩生物科技有限公司生产的试剂盒测定可溶性糖、可溶

性蛋白含量及亚硝酸还原酶(NiR)活性;选取第3片功能叶(自上而下)采用PJ-4N叶绿素测定仪测定叶片SPAD值;按每667 m²育辣椒苗50 000株计算增加的成本。

1.4 数据分析工具

采用SPSS 17.0进行方差分析,选用Duncan法进行多重比较($P=0.05$);采用Excel 2010与Graphpad Prism绘图。

2 结果与分析

2.1 外源EBR与ALA对越冬辣椒幼苗形态指标的影响

2.1.1 外源EBR对越冬辣椒幼苗形态指标的影响

由表1可知,对于‘博辣红牛’,与清水对照相比,E1处理显著提高了幼苗的株高、茎粗、鲜质量和干质量,E2处理显著提高了幼苗的茎粗,E3处理显著提高了幼苗的茎粗和干质量,E4处理显著提高了幼苗的株高、鲜质量和干质量,但显著降低了茎粗。各处理均提高了幼苗的壮苗指数,但未达到显著水平。对于‘兴蔬215’,与清水对照相比,E1处理显著提高了幼苗的茎粗,E2处理显著提高了幼苗的株高与茎粗,E3处理显著提高了幼苗的株高、茎粗、鲜质量和干质量,E4处理显著提高了幼苗的株高、鲜质量和干质量,各处

表1 外源EBR处理后越冬辣椒幼苗的形态指标

辣椒品种	处理	株高/cm	茎粗/mm	鲜质量/g	干质量/g	壮苗指数
‘博辣红牛’	CK	(16.62±0.52)b	(2.83±0.26)b	(2.87±0.60)b	(0.333±0.082)c	0.169±0.025
	E1	(18.49±0.37)a	(3.33±0.12)a	(3.62±0.28)a	(0.433±0.051)ab	0.222±0.027
	E2	(16.99±0.42)b	(3.12±0.10)a	(3.38±0.18)ab	(0.409±0.012)bc	0.198±0.008
	E3	(17.02±0.62)b	(3.10±0.01)a	(3.19±0.08)ab	(0.428±0.014)ab	0.181±0.008
	E4	(17.92±0.31)a	(2.45±0.08)c	(3.71±0.19)a	(0.502±0.019)a	0.187±0.005
‘兴蔬215’	CK	(13.12±0.05)d	(2.71±0.05)c	(2.81±0.04)b	(0.317±0.025)b	(0.167±0.017)b
	E1	(13.25±0.30)d	(2.99±0.14)b	(3.16±0.30)b	(0.345±0.073)ab	(0.195±0.019)a
	E2	(14.05±0.28)c	(3.18±0.10)b	(3.43±0.13)ab	(0.438±0.053)ab	(0.243±0.011)a
	E3	(16.74±0.38)b	(3.41±0.19)a	(3.87±0.44)a	(0.475±0.134)a	(0.202±0.044)a
	E4	(17.39±0.10)a	(2.56±0.07)c	(4.05±0.62)a	(0.478±0.063)a	(0.195±0.015)a
‘长研青香’	CK	(12.03±0.20)d	(2.69±0.07)c	(2.07±0.19)c	(0.246±0.031)b	(0.129±0.023)c
	E1	(12.46±0.14)c	(2.85±0.08)c	(2.35±0.04)c	(0.254±0.010)b	(0.150±0.004)bc
	E2	(14.42±0.18)b	(3.17±0.02)b	(3.11±0.36)b	(0.391±0.039)a	(0.215±0.012)ab
	E3	(17.80±0.27)a	(3.38±0.02)a	(4.48±0.53)a	(0.474±0.096)a	(0.244±0.041)a
	E4	(14.23±0.08)b	(2.33±0.02)d	(3.09±0.14)b	(0.410±0.042)a	(0.185±0.016)abc

注:同一品种同列不同字母表示处理间的差异有统计学意义($P<0.05$)。

理下壮苗指数均显著提高。对于‘长研青香’，与清水对照相比，E1处理显著提高了幼苗的株高，E2、E3处理均提高了幼苗的株高、茎粗、鲜质量、干质量及壮苗指数，E4处理显著提高了幼苗的株高、茎粗、鲜质量和干质量。

2.1.2 外源ALA对越冬辣椒幼苗形态指标的影响

由表2可知，外源喷施ALA可以不同程度地促进越冬辣椒幼苗的生长，但各品种的株高、茎粗、鲜质量、干质量、壮苗指数对不同质量浓度ALA的响应程度存在差异。对于‘博辣红牛’，与对照相比，

A1处理与A2处理都显著提升了幼苗的株高、茎粗、鲜质量和干质量，A3处理显著提高了幼苗的株高，A4处理显著提高了幼苗的株高、鲜质量和干质量，各处理下幼苗壮苗指数均有一定程度的提高，但差异不显著。对于‘兴蔬215’，与对照相比，各处理均显著提高了幼苗的株高、茎粗、鲜质量和干质量，其中A1、A2处理显著提高了幼苗的壮苗指数。对于‘长研青香’，与对照相比，A1、A2、A3、A4处理均显著提高了幼苗的株高、茎粗、鲜质量、干质量及壮苗指数。

表2 外源ALA处理后越冬辣椒幼苗的形态指标

Table 2 Morphological indices of overwintering pepper seedlings after treatment with exogenous ALA						
辣椒品种	处理	株高/cm	茎粗/mm	鲜质量/g	干质量/g	壮苗指数
‘博辣红牛’	CK	(16.62±0.52)d	(2.83±0.26)b	(2.87±0.60)c	(0.249±0.063)b	0.169±0.025
	A1	(23.44±0.22)a	(3.26±0.24)a	(4.66±0.90)a	(0.425±0.100)a	0.222±0.043
	A2	(22.19±0.64)b	(3.36±0.17)a	(4.39±0.35)ab	(0.399±0.037)a	0.244±0.006
	A3	(20.64±0.50)c	(3.19±0.13)ab	(3.49±0.32)bc	(0.329±0.033)ab	0.213±0.032
	A4	(21.51±0.10)b	(3.12±0.35)ab	(4.02±0.20)ab	(0.364±0.016)a	0.243±0.017
‘兴蔬215’	CK	(13.69±0.30)e	(2.71±0.05)d	(2.81±0.04)c	(0.241±0.011)d	(0.167±0.016)c
	A1	(22.09±0.41)b	(3.40±0.10)b	(5.38±0.34)a	(0.483±0.015)b	(0.267±0.019)ab
	A2	(24.82±0.47)a	(3.65±0.04)a	(5.13±0.51)a	(0.585±0.063)a	(0.290±0.024)a
	A3	(21.38±0.36)c	(3.16±0.12)c	(3.33±0.11)a	(0.340±0.019)c	(0.182±0.007)c
	A4	(19.41±0.03)d	(3.13±0.04)c	(4.07±0.59)b	(0.382±0.069)c	(0.222±0.024)bc
‘长研青香’	CK	(12.03±0.20)d	(2.69±0.07)d	(2.07±0.19)c	(0.189±0.013)b	(0.129±0.023)b
	A1	(21.02±0.34)a	(3.17±0.13)c	(4.52±0.31)ab	(0.371±0.020)a	(0.205±0.003)a
	A2	(21.76±0.81)a	(3.58±0.02)a	(4.90±0.63)a	(0.367±0.017)a	(0.235±0.023)a
	A3	(19.62±0.54)b	(3.16±0.05)c	(3.88±0.11)b	(0.327±0.050)a	(0.220±0.015)a
	A4	(18.60±0.11)c	(3.34±0.06)b	(4.01±0.39)b	(0.381±0.034)a	(0.219±0.026)a

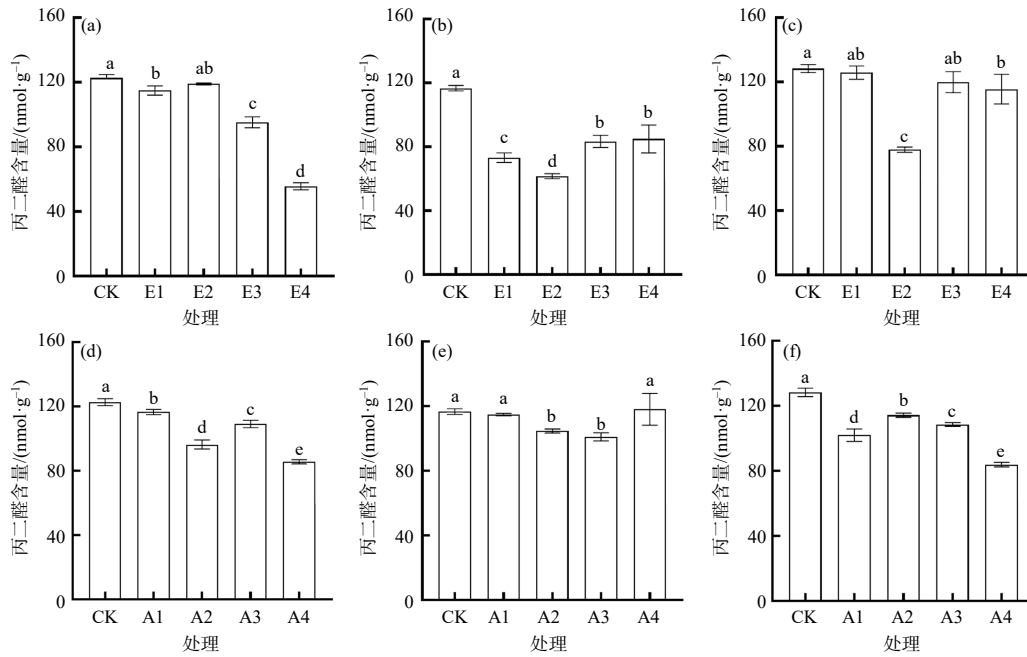
注：同一品种同列不同字母表示处理间的差异有统计学意义($P < 0.05$)。

2.2 外源EBR与ALA对越冬辣椒幼苗缓解氧化损伤的影响

2.2.1 外源EBR与ALA对越冬辣椒幼苗丙二醛(MDA)含量的影响

由图1可知，与清水对照相比，喷施不同质量浓度的EBR均降低了越冬辣椒幼苗的MDA含量。对于‘博辣红牛’，随着EBR质量浓度的增加，辣椒幼苗MDA含量整体呈下降趋势(图1(a))；‘兴蔬215’、‘长研青香’辣椒幼苗MDA含量均在E2处理最低，且显著低于其他处理的(图1(b)、图1(c))。与对照相比，

喷施不同质量浓度的ALA降低了越冬辣椒幼苗MDA含量，且随着ALA质量浓度的增加，‘博辣红牛’辣椒幼苗MDA含量基本呈下降趋势，A4处理下MDA含量显著低于CK和其他处理的(图1(d))。‘兴蔬215’辣椒幼苗MDA含量呈先降低后升高的趋势，A2与A3处理下辣椒幼苗的MDA含量均显著低于对照和其他处理的(图1(e))。‘长研青香’辣椒幼苗MDA含量随ALA质量浓度的增加呈先降低后升高再降低的趋势，在A4处理下幼苗MDA含量显著低于对照和其他处理的(图1(f))。



同一分图不同小写字母表示处理间的差异有统计学意义($P < 0.05$)。

(a) 喷施EBR的‘博辣红牛’; (b) 喷施EBR的‘兴蔬215’; (c) 喷施EBR的‘长研青香’; (d) 喷施ALA的‘博辣红牛’;
(e) 喷施ALA的‘兴蔬215’; (f) 喷施ALA的‘长研青香’

图1 外源EBR与ALA处理后越冬辣椒幼苗的MDA含量

Fig.1 MDA content in overwintering pepper seedlings after treatment with exogenous EBR and ALA

2.2.2 外源EBR与ALA对越冬辣椒幼苗抗氧化酶活性的影响

由表3可知, 与对照相比, 喷施不同质量浓度的EBR和ALA基本上提高了越冬辣椒幼苗SOD、POD和CAT活性。随着EBR和ALA质量浓度的增加, 辣椒幼苗SOD、POD和CAT活性整体上呈先升高后

降低的趋势。‘博辣红牛’和‘长研青香’辣椒幼苗在E3处理下, 其SOD和CAT活性均显著高于对照和其他处理的, 而‘兴蔬215’辣椒幼苗在E2处理下的SOD和CAT活性显著高于CK与其他处理的。‘博辣红牛’与‘兴蔬215’辣椒幼苗在E2处理下, 其POD活性显著高于CK和其他处理的, 而‘长研青香’辣椒幼

表3 外源EBR与ALA处理后越冬辣椒幼苗的抗氧化酶活性

Table 3 Antioxidant enzyme activities in overwintering pepper seedlings after treatment with exogenous EBR and ALA U/g

辣椒品种	EBR			ALA			U/g	
	处理	SOD	POD	CAT	处理	SOD		POD
‘博辣红牛’	CK	(55.17±6.18)e	(10.66±0.18)e	(30.91±1.03)d	CK	(55.17±6.18)d	(10.66±0.18)e	(30.91±1.03)e
	E1	(88.38±4.23)c	(45.22±3.75)c	(62.17±2.58)c	A1	(95.56±3.64)c	(99.78±1.40)d	(206.27±2.61)b
	E2	(190.29±0.52)b	(113.05±2.39)a	(98.47±2.09)b	A2	(167.94±9.47)b	(327.78±1.11)a	(251.47±3.50)a
	E3	(238.21±2.71)a	(94.08±1.53)b	(112.22±2.81)a	A3	(218.14±17.04)a	(105.97±0.66)c	(130.76±1.95)c
	E4	(68.38±4.39)d	(23.90±3.70)d	(38.12±3.22)d	A4	(103.41±3.84)c	(117.61±1.27)b	(100.95±1.82)d
‘兴蔬215’	CK	(50.54±1.99)d	(12.65±2.78)d	(43.92±1.83)e	CK	(50.54±1.99)c	(12.65±2.78)e	(43.92±1.83)e
	E1	(99.35±2.89)c	(135.57±1.67)b	(181.19±2.17)c	A1	(64.16±1.79)c	(125.61±2.03)d	(229.40±1.12)b
	E2	(197.76±16.11)a	(307.63±4.30)a	(278.17±2.53)a	A2	(107.10±2.44)b	(362.63±2.49)a	(216.60±2.12)c
	E3	(86.80±3.60)c	(294.53±7.24)a	(207.74±3.33)b	A3	(226.21±15.66)a	(154.30±2.89)b	(271.43±2.87)a
	E4	(136.21±6.15)b	(79.76±19.29)c	(164.67±2.67)d	A4	(90.61±3.59)b	(142.27±0.92)c	(138.64±1.96)d
‘长研青香’	CK	(45.94±1.31)d	(18.50±0.30)e	(97.48±1.62)d	CK	(45.94±1.31)e	(18.50±0.30)d	(97.48±1.62)e
	E1	(56.15±0.93)d	(94.90±1.21)d	(85.25±4.41)d	A1	(106.48±1.55)c	(259.15±11.27)c	(240.32±3.19)b
	E2	(75.00±3.87)c	(117.26±2.70)c	(145.96±5.20)c	A2	(247.14±5.53)b	(504.88±2.98)a	(268.96±3.20)a
	E3	(221.98±7.25)a	(182.87±3.51)a	(222.39±5.56)a	A3	(268.70±3.29)a	(408.25±5.29)b	(148.67±2.32)c
	E4	(115.43±5.41)b	(147.01±2.92)b	(178.04±2.26)b	A4	(90.18±2.94)d	(194.79±2.97)d	(115.81±1.69)d

注: 同一品种同列不同字母表示处理间的差异有统计学意义($P < 0.05$)。

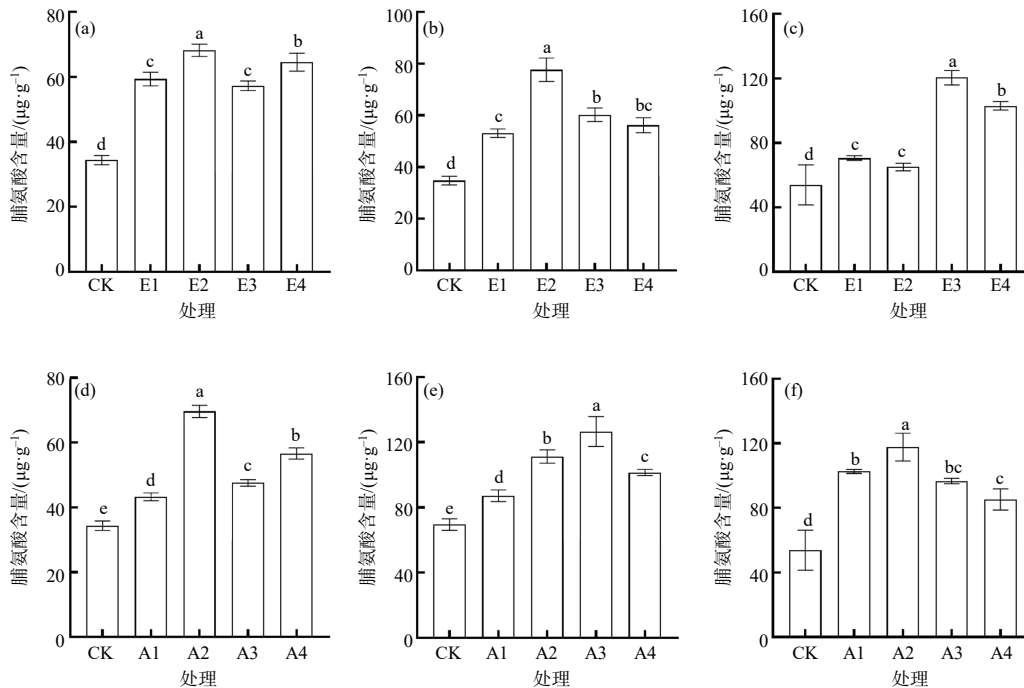
苗在E3处理下的POD活性显著高于CK与其他处理的。‘博辣红牛’‘兴蔬215’‘长研青香’在A3处理下的SOD活性均显著高于CK和其他处理的，A2处理下的POD活性显著高于CK与其他处理的。‘博辣红牛’与‘长研青香’辣椒幼苗的CAT活性在A2处理下显著高于CK与其他处理的，而‘兴蔬215’辣椒幼苗的CAT活性则在A3处理下显著高于CK与其他处理的。

2.3 外源EBR与ALA对越冬辣椒幼苗渗透调节物质的影响

2.3.1 外源EBR与ALA对越冬辣椒幼苗脯氨酸含量的影响

由图2可知，与清水对照相比，喷施不同质量浓度的EBR均显著提高了越冬辣椒幼苗脯氨酸的含量。

随着EBR质量浓度的增加，3个品种辣椒幼苗脯氨酸含量基本呈先升高后降低的趋势，其中‘博辣红牛’和‘兴蔬215’辣椒幼苗在E2处理下脯氨酸含量显著高于其他处理的(图2(a)、图2(b))，‘长研青香’辣椒幼苗在E3处理下脯氨酸含量显著高于其他处理的(图2(c))。与对照相比，喷施不同质量浓度的ALA也均提高了越冬辣椒幼苗的脯氨酸含量，且随着ALA质量浓度的增加，3个品种辣椒幼苗脯氨酸含量基本呈先升高后降低的趋势(图2(d)、图2(e)、图2(f))，其中‘博辣红牛’和‘长研青香’辣椒幼苗在A2处理下脯氨酸含量显著高于其他处理的(图2(d)、图2(f))，‘兴蔬215’辣椒幼苗则在A3处理下脯氨酸含量显著高于其他处理的(图2(e))。



同一分图不同小写字母表示处理间的差异有统计学意义($P < 0.05$)。

(a) 喷施EBR的‘博辣红牛’；(b) 喷施EBR的‘兴蔬215’；(c) 喷施EBR的‘长研青香’；(d) 喷施ALA的‘博辣红牛’；(e) 喷施ALA的‘兴蔬215’；(f) 喷施ALA的‘长研青香’

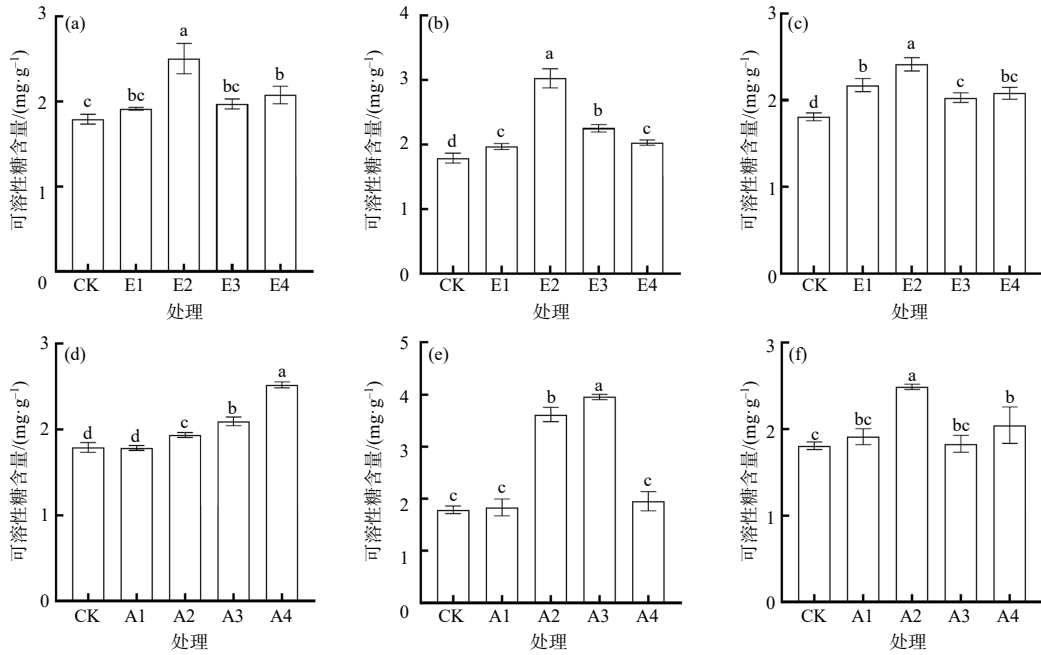
图2 外源EBR与ALA处理后越冬辣椒幼苗的脯氨酸含量

Fig.2 Proline content in overwintering pepper seedlings after treatment with exogenous EBR and ALA

2.3.2 外源EBR与ALA对越冬辣椒幼苗可溶性糖含量的影响

由图3可知，与对照相比，喷施不同质量浓度的EBR均提高了越冬辣椒幼苗可溶性糖含量。随着EBR质量浓度的增加，‘博辣红牛’‘兴蔬215’与‘长研青香’3个品种辣椒幼苗的可溶性糖含量基本呈先升高后降低的趋势，且E2处理下的可溶性糖含量显著高于其他处理的(图3(a)、图3(b)、图3(c))。与对照

相比，喷施不同质量浓度的ALA也均不同程度地提高了越冬辣椒幼苗可溶性糖含量，随着ALA质量浓度的增加，‘博辣红牛’辣椒幼苗可溶性糖含量呈增加趋势，A4处理下的可溶性糖含量显著高于CK与其他处理的(图3(d))。‘兴蔬215’和‘长研青香’辣椒幼苗可溶性糖含量基本呈先上升后下降的趋势，‘兴蔬215’和‘长研青香’辣椒幼苗分别在A3、A2处理下可溶性糖含量最高，且显著高于其他处理的(图3(e)、图3(f))。



同一分图不同小写字母表示处理间的差异有统计学意义($P < 0.05$)。

(a) 喷施EBR的‘博辣红牛’; (b) 喷施EBR的‘兴蔬215’; (c) 喷施EBR的‘长研青香’; (d) 喷施ALA的‘博辣红牛’;
(e) 喷施ALA的‘兴蔬215’; (f) 喷施ALA的‘长研青香’

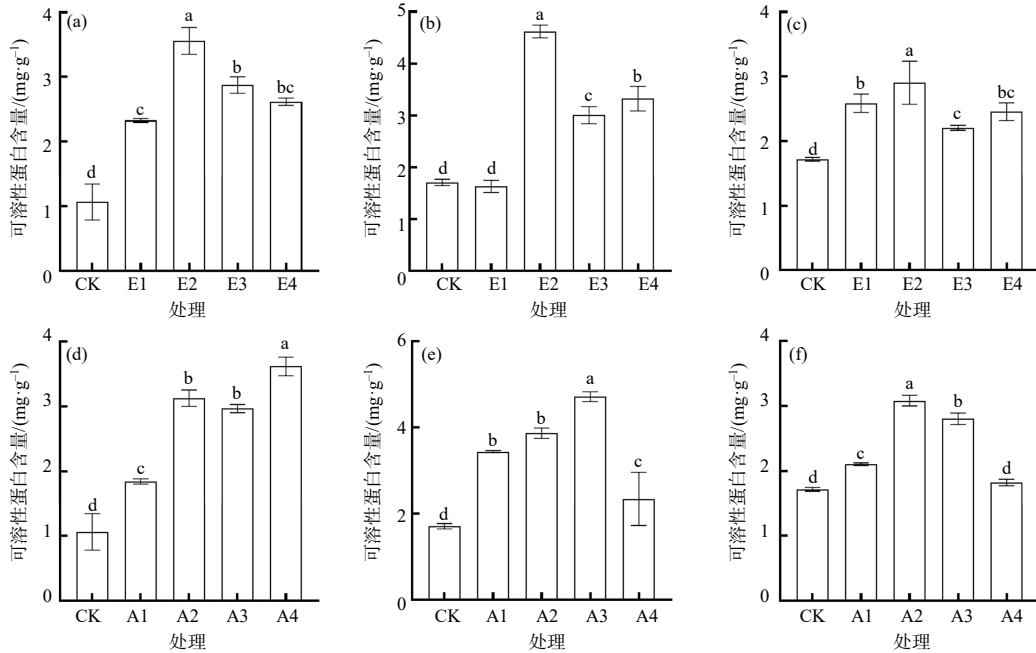
图3 外源EBR与ALA处理后越冬辣椒幼苗的可溶性糖含量

Fig.3 Soluble sugar content in overwintering pepper seedlings after treatment with exogenous EBR and ALA

2.3.3 外源EBR与ALA对越冬辣椒幼苗可溶性蛋白含量的影响

由图4可知,与对照相比,喷施不同质量浓度的EBR均提高了越冬辣椒幼苗可溶性蛋白含量,随

着EBR质量浓度的增加,辣椒幼苗可溶性蛋白含量基本呈先升高后降低的趋势,3个品种幼苗在E2处理下的可溶性蛋白含量最高,显著高于其他处理的(图4(a)、图4(b)、图4(c))。与对照相比,喷施不同



同一分图不同小写字母表示处理间的差异有统计学意义($P < 0.05$)。

(a) 喷施EBR的‘博辣红牛’; (b) 喷施EBR的‘兴蔬215’; (c) 喷施EBR的‘长研青香’; (d) 喷施ALA的‘博辣红牛’;
(e) 喷施ALA的‘兴蔬215’; (f) 喷施ALA的‘长研青香’

图4 外源EBR与ALA处理后越冬辣椒幼苗的可溶性蛋白含量

Fig.4 Soluble protein content in overwintering pepper seedlings after treatment with exogenous EBR and ALA

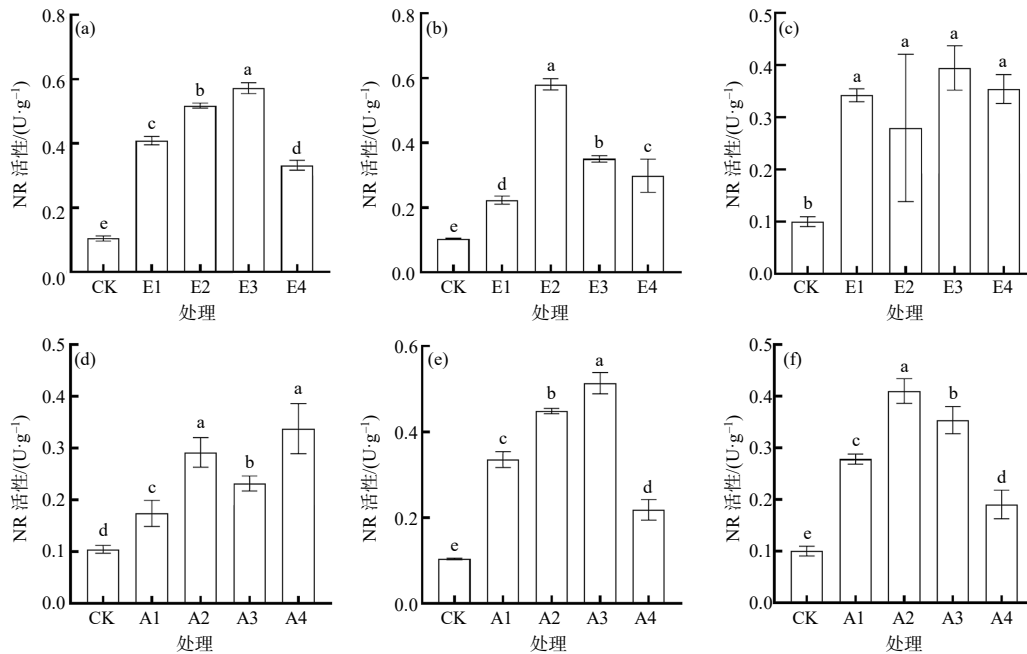
质量浓度的ALA也均提高了越冬辣椒可溶性蛋白含量,且随着ALA质量浓度的增加,‘博辣红牛’辣椒幼苗可溶性蛋白含量基本呈增长趋势,在A4处理下可溶性蛋白含量显著高于CK和其他处理的(图4(d));‘兴蔬215’和‘长研青香’辣椒幼苗可溶性蛋白含量呈现出先升高后降低的趋势,二者分别分别在A3、A2处理下与其他处理的差异达显著水平(图4(e)、图4(f))。

2.4 外源EBR与ALA对越冬辣椒幼苗氮代谢关键酶的影响

2.4.1 外源EBR与ALA对越冬辣椒幼苗硝酸还原酶(NR)活性的影响

由图5可以看出,与对照相比,喷施不同质量

浓度的EBR均提高了越冬辣椒幼苗的NR活性。随着EBR质量浓度的增加,‘博辣红牛’和‘兴蔬215’辣椒幼苗NR活性呈先升高后降低的趋势,两者分别在E3、E2处理下NR活性显著高于其他处理的(图5(a)、图5(b))。‘长研青香’辣椒幼苗各处理的可溶性蛋白含量均显著高于CK的,但喷施EBR的4个处理的差异不显著(图5(c))。与对照相比,喷施不同质量浓度的ALA也均提高了越冬辣椒幼苗的NR活性,‘博辣红牛’在A4、A2处理下的NR活性显著高于其他处理的(图5(d));‘兴蔬215’与‘长研青香’辣椒幼苗NR活性呈先升高后降低的趋势,2个品种分别在A3与A2处理下NR的活性显著高于其他处理的(图5(e)、图5(f))。



同一分图不同小写字母表示处理间的差异有统计学意义($P < 0.05$)。

(a) 喷施EBR的‘博辣红牛’; (b) 喷施EBR的‘兴蔬215’; (c) 喷施EBR的‘长研青香’; (d) 喷施ALA的‘博辣红牛’; (e) 喷施ALA的‘兴蔬215’; (f) 喷施ALA的‘长研青香’

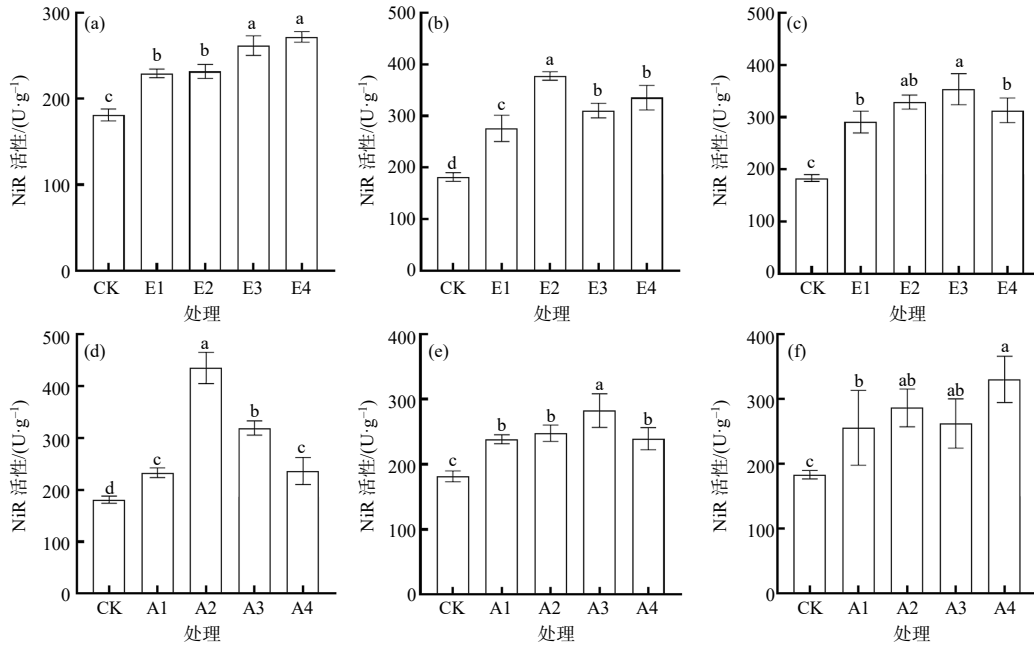
图5 外源EBR与ALA处理后越冬辣椒幼苗的NR活性

Fig.5 NR activity in overwintering peppers seedlings after treatment with exogenous EBR and ALA

2.4.2 外源EBR与ALA对越冬辣椒幼苗亚硝酸还原酶(NiR)活性的影响

由图6可知,与对照相比,喷施不同质量浓度的EBR均提高了越冬辣椒幼苗的NiR活性。随着EBR质量浓度的增加,‘博辣红牛’辣椒幼苗的NiR活性呈持续上升的趋势,E4处理下NiR活性最高,显著高于CK、E1、E2的(图6(a));‘兴蔬215’和‘长研青香’辣椒幼苗的NiR活性随着EBR质量浓度的增加基本呈先升高后降低的趋势,分别在E2、E3处理

下的活性最高(图6(b)、图6(c))。与对照相比,喷施不同质量浓度的ALA也提高了越冬辣椒幼苗的NiR活性,随着ALA质量浓度的增加,‘博辣红牛’与‘兴蔬215’辣椒幼苗的NiR活性呈先升高后降低的趋势,2个品种分别在A2、A3处理下的NiR活性最高,且显著高于其他处理的(图6(d)、图6(e));‘长研青香’辣椒幼苗的NiR活性随ALA质量浓度的增加基本呈升高趋势,A4处理下幼苗的NiR活性显著高于CK和A1处理的(图6(f))。



同一分图不同小写字母表示处理间的差异有统计学意义($P < 0.05$)。

(a) 喷施EBR的‘博辣红牛’; (b) 喷施EBR的‘兴蔬215’; (c) 喷施EBR的‘长研青香’; (d) 喷施ALA的‘博辣红牛’;
(e) 喷施ALA的‘兴蔬215’; (f) 喷施ALA的‘长研青香’

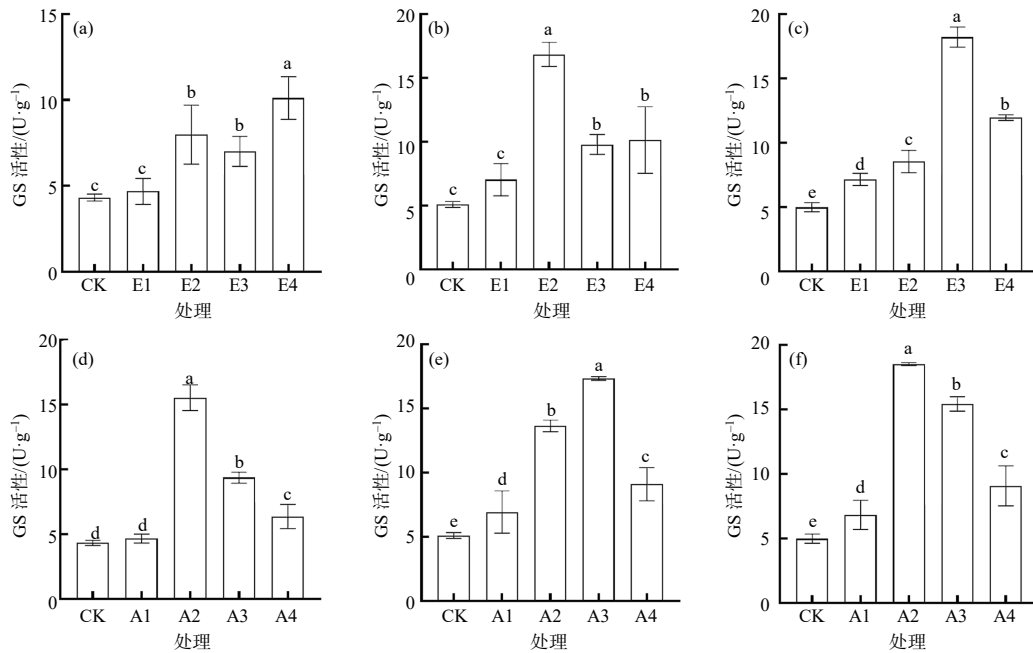
图6 外源EBR与ALA处理后越冬辣椒幼苗的NiR活性

Fig.6 NiR activity in overwintering pepper seedlings after treatment with exogenous EBR and ALA

2.4.3 外源EBR与ALA对越冬辣椒幼苗谷氨酰胺合成酶(GS)活性的影响

由图7可知,与对照相比,喷施不同质量浓度的EBR均提高了越冬辣椒幼苗的GS活性。随着EBR

质量浓度的增加,‘博辣红牛’辣椒幼苗的GS活性基本呈增加趋势,在E4处理下活性最高,且显著高于其他处理的(图7(a));‘兴蔬215’与‘长研青香’辣椒幼苗的GS活性随EBR质量浓度的增加基本呈先上升



同一分图不同小写字母表示处理间的差异有统计学意义($P < 0.05$)。

(a) 喷施EBR的‘博辣红牛’; (b) 喷施EBR的‘兴蔬215’; (c) 喷施EBR的‘长研青香’; (d) 喷施ALA的‘博辣红牛’;
(e) 喷施ALA的‘兴蔬215’; (f) 喷施ALA的‘长研青香’

图7 外源EBR与ALA处理后越冬辣椒幼苗的GS活性

Fig.7 GS activity in overwintering pepper seedlings after treatment with exogenous EBR and ALA

后下降的趋势, 分别于E2、E3处理下的活性最高, 且显著高于其他处理的(图7(b)、图7(c))。与对照相比, 喷施不同质量浓度的ALA也提高了越冬辣椒幼苗的GS活性, 且随着ALA质量浓度的增加, 辣椒幼苗的GS活性呈先升高后降低的趋势。‘博辣红牛’、‘兴蔬215’、‘长研青香’辣椒幼苗分别在A2、A3、A2处理下, 其GS活性显著高于其他处理的(图7(d)、图7(e)、图7(f))。

主成分分析结果显示, 对3种辣椒喷施不同质量浓度外源EBR(图8(a))后, 幼苗在形态指标、抗氧

化酶、渗透调节物质、氮代谢关键酶等指标趋向于E2和E3区域, 而MDA趋向于CK区域, 表明E2、E3处理下越冬辣椒幼苗生长较佳。从节约生产成本方面考虑, 本试验选择E2处理作为后续越冬辣椒育苗中试的EBR质量浓度。对3种辣椒喷施不同质量浓度外源ALA(图8(b))后, 幼苗在形态指标、抗氧化酶、渗透调节物质、氮代谢关键酶等指标趋向于A2区域, MDA则趋向于CK区域。因此, 本试验选择A2处理作为后续越冬辣椒育苗中试的ALA质量浓度。

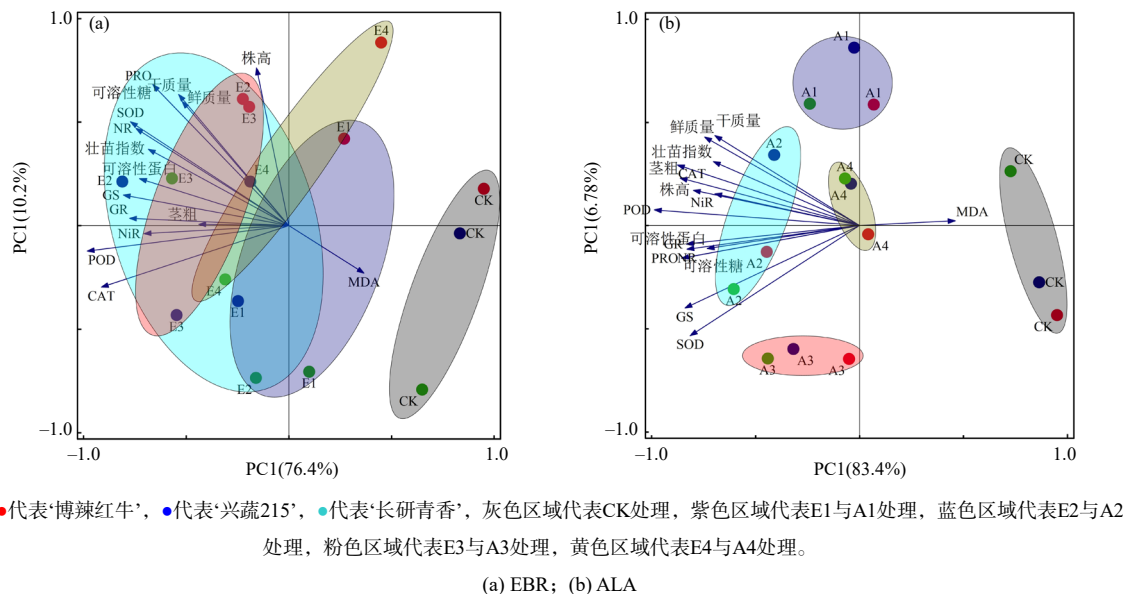


图8 施用外源EBR与ALA的越冬辣椒幼苗主成分分析结果

Fig.8 Principal component analysis result of data from overwintering pepper seedlings treated with exogenous EBR and ALA

2.5 最优外源EBR与ALA对越冬辣椒幼苗形态指标的影响

由表4可知, 喷施0.01 mg/L EBR或30.00 mg/L

ALA能不同程度地促进越冬辣椒幼苗的生长, 但各处理间的株高、茎粗、鲜质量、干质量、SPAD值对EBR或ALA的响应存在差异。对于‘鸡肠子’辣椒,

表4 外源EBR与ALA处理后越冬辣椒幼苗的形态指标

Table 4 Morphological indices of overwintering pepper seedlings after treatment with exogenous EBR and ALA							
辣椒品种	处理	株高/cm	茎粗/mm	鲜质量/g	干质量/g	SPAD值	壮苗指数
‘鸡肠子’	CK	(9.92±0.35)d	(2.16±0.02)b	(1.07±0.06)d	(0.137±0.011)c	31.66±1.91	(0.069±0.002)c
	C1	(12.84±0.15)c	(2.46±0.11)a	(1.61±0.08)c	(0.216±0.014)b	30.73±2.45	(0.096±0.006)b
	C2	(13.35±0.10)b	(2.50±0.05)a	(1.80±0.07)b	(0.234±0.039)ab	31.20±2.98	(0.109±0.012)ab
	C3	(13.95±0.05)a	(2.60±0.02)a	(2.00±0.14)a	(0.270±0.008)a	32.93±0.35	(0.116±0.011)a
	C4	(13.86±0.08)a	(2.61±0.13)a	(1.83±0.13)b	(0.253±0.015)ab	32.16±1.25	(0.122±0.014)a
‘龙福椒’	CK	(7.96±0.45)b	(2.08±0.07)c	(1.15±0.13)c	(0.152±0.017)b	(31.96±1.02)a	(0.078±0.012)c
	C1	(12.06±0.16)a	(2.68±0.09)b	(1.90±0.09)ab	(0.263±0.018)a	(28.74±1.34)b	(0.129±0.007)b
	C2	(12.05±0.18)a	(2.63±0.06)b	(1.80±0.05)b	(0.256±0.036)a	(30.58±0.76)ab	(0.110±0.006)b
	C3	(12.20±0.17)a	(2.72±0.06)b	(1.83±0.08)b	(0.272±0.051)a	(28.93±0.86)b	(0.113±0.008)b
	C4	(11.81±0.30)a	(3.00±0.08)a	(2.14±0.13)a	(0.284±0.021)a	(32.39±1.40)a	(0.161±0.012)a

注: 同一品种同列不同字母表示处理间的差异有统计学意义(P<0.05)。

与对照相比,外源EBR或ALA处理均显著提高了幼苗的株高、茎粗、鲜质量、干质量和壮苗指数,但对SPAD值无显著影响。C3与C4处理的辣椒幼苗株高、茎粗、干质量和壮苗指数无显著差异,株高显著高于C1和C2处理的。对于‘龙福椒’辣椒,与对照相比,C1或C2处理均显著提高了幼苗的株高、茎粗、鲜质量、干质量和壮苗指数,C4处理下辣椒幼苗茎粗、鲜质量、干质量、SPAD值和壮苗指数均高于其他处理的。综上,随着助剂的使用,外源喷施0.01 mg/L EBR或30.00 mg/L ALA能进一步促进越冬辣椒幼苗的生长。根据2个辣椒品种生长的中试效果,综合判定C4处理对辣椒越冬育苗生长能起到较好的促进效果。

2.6 越冬辣椒育苗生产上外源喷施ALA的成本核算

在整个幼苗生长期间,共喷施了外源物质5-氨基乙酰丙酸盐(ALA,纯度98%)3次(10 d/次),ALA采购于陕西慈缘生物技术有限公司,成本为50元/g;青皮桔油助剂(网购),成本为6.85元/100 mL。按667 m²温室育辣椒苗50 000株,其间共喷施3次,每次3桶(16 L喷雾器),合计使用外源ALA 220.5元,青皮桔油助剂9.864元。人工按15元/桶计算,共花费135元,总花费366元,单株平均成本约0.007 3元/株。因此,在生产上喷施30.00 mg/L ALA+青皮桔油助剂对促进越冬辣椒幼苗生长具有较好的应用前景。

3 结论与讨论

植物的外部特征能反映植物的生长状况,在一定程度上决定了植物的竞争力与获得资源的能力,因此,明确植物外部形态特征变化规律具有重要意义。本试验结果表明,对越冬辣椒幼苗喷施不同质量浓度的EBR,幼苗株高、茎粗、鲜质量、干质量、壮苗指数均有不同程度的提高,这与石新新^[15]、李杰等^[16]的研究结果相似。综合分析得知,在0.01 mg/L EBR处理下越冬辣椒幼苗的生长效果较佳。对辣椒幼苗喷施不同质量浓度ALA后发现,其株高、茎粗、鲜质量、干质量等生长指标均有不同程度的提高,其中在30.00 mg/L ALA处理下越冬辣椒幼苗生长调控得最好,与ANJUM等^[17]、YE等^[18]的研究结论基本一致。

在非生物逆境胁迫下,植物体内会产生活性氧

(ROS),导致膜脂过氧化并损伤植物膜系统。植物体内活性氧清除剂主要包括SOD、POD和CAT等,活性氧物质的清除可以缓解逆境引起的氧化伤害,增强植物抵御逆境的能力。本试验研究表明,外源喷施0.01 mg/L EBR能显著提高SOD、POD、CAT活性,且显著降低幼苗MDA含量,这与LIU等^[19]和刘巾瑞^[20]的研究结果相似。NAEEM等^[21]与沈奇等^[22]分别在油菜、辣椒上喷施外源ALA后发现,幼苗MDA含量降低。KORKMAZ等^[11]研究表明,外源ALA能够提高辣椒幼苗在低温胁迫下的抗氧化酶活性。本试验在冬季条件下对辣椒幼苗叶片外源喷施30.00 mg/L ALA后,SOD、POD、CAT活性显著增大,MDA含量显著降低,表明辣椒幼苗在ALA处理下通过提高抗氧化酶活性,极大程度地减轻了低温胁迫下幼苗的膜脂过氧化程度。

植物在生长过程中遇到低温胁迫会使膜系统受到损伤,细胞液发生外漏,胞内环境与外界环境失衡。此时,植物通过体内渗透调节物质提高细胞液浓度,保持渗透压平衡并维持细胞水势,以此来抵御低温胁迫伤害。植物体内渗透物质主要包括游离脯氨酸、可溶性蛋白、可溶性糖等。赵普庆^[23]和范敏等^[8]分别在黄瓜和烟草上施用外源EBR,发现可溶性蛋白、可溶性糖、脯氨酸含量均得到提高。本试验研究结果表明,在冬季条件下对辣椒幼苗叶片喷施不同质量浓度的EBR均提高了幼苗的脯氨酸、可溶性蛋白、可溶性糖含量,且在0.01 mg/L EBR处理下效果最好。在冬季低温条件下施用不同质量浓度ALA后发现,辣椒幼苗脯氨酸、可溶性蛋白、可溶性糖含量较清水对照均有一定程度的提高,且在30.00 mg/L处理下效果最好,这与张治平等^[24]对油菜的研究结果相一致。

在植物氮代谢过程中,NR作为氮同化的限速酶和植物同化NO₃⁻过程中的关键酶,其活性高低影响着植物根系对NO₃⁻的吸收利用^[25]。植物通过NR及NiR作用将吸收的NO₃⁻还原成NH₄⁺,后续经过GS-GOGTA循环等一系列的合成过程,降低NH₄⁺的毒性,并完成把氨转化成氨基酸的过程^[26]。本试验通过对越冬辣椒幼苗叶片喷施外源EBR后发现,其NR、GS、NiR活性均显著提高,在0.01 mg/L EBR

处理下提升幅度较大,这与寇江涛^[27]和马月花等^[28]分别在苜蓿幼苗和黄瓜幼苗上的研究结果一致。通过对越冬辣椒幼苗叶片喷施外源ALA,氮代谢关键酶NR、GS、NiR活性显著提升,并在喷施30.00 mg/L ALA处理下氮代谢关键酶活性提升较明显,这与CHEN等^[29]和TANG等^[30]分别在西瓜和板蓝根上喷施外源ALA提高幼苗氮代谢关键酶活性的研究结果一致。

综上所述,外源喷施0.01 mg/L EBR和30.00 mg/L ALA均有效提高了越冬辣椒幼苗SOD、POD、CAT活性,降低了MDA含量,减轻了胁迫引起的ROS升高对膜脂过氧化造成的伤害;同时提高了脯氨酸、可溶性糖、可溶性蛋白等渗透调节物质的含量,有效降低了细胞水势,缓解了逆境胁迫对幼苗造成的渗透伤害,增强了NR、GS、NiR氮代谢关键酶活性,维持了逆境下的氮代谢平衡,最终提高了越冬辣椒幼苗的株高、茎粗、鲜质量、干质量、壮苗指数等指标,缓解了低温逆境对植物生长的抑制作用。在此基础上,以0.01 mg/L EBR和30.00 mg/L ALA开展了越冬辣椒育苗上的生产应用试验,结果表明,外源喷施30.00 mg/L ALA+助剂处理后辣椒幼苗的壮苗指数显著高于其他处理的。推断30.00 mg/L ALA+青皮桔油助剂可用于湖南辣椒越冬育苗的外源调控处理,有利于促进辣椒幼苗生长,具有较好的应用前景。

参考文献:

- [1] LIM Q, AHAMMED G J, LI C X, et al. Brassinosteroid ameliorates zinc oxide nanoparticles-induced oxidative stress by improving antioxidant potential and redox homeostasis in tomato seedling[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2016, 7: 615.
- [2] CUI J X, ZHOU Y H, DING J G, et al. Role of nitric oxide in hydrogen peroxide-dependent induction of abiotic stress tolerance by brassinosteroids in cucumber[J]. *Plant, Cell & Environment*, 2011, 34(2): 347-358.
- [3] 王玲玲, 虎淘淘, 张昕怡, 等. 油菜素内酯对盐碱胁迫下菊花幼苗生长及生理特性的影响[J]. *湖南农业大学学报(自然科学版)*, 2024, 50(3): 55-61.
- [4] 束胜, 汤园园, 罗佳音, 等. 外源2,4-表油菜素内酯对亚低温弱光胁迫下番茄叶片碳同化和抗氧化代谢的影响[J]. *植物生理学报*, 2016, 52(8): 1295-1304.
- [5] 马金虎. 油菜素内酯调控低温胁迫下玉米种子萌发的生理机制[D]. 晋中: 山西农业大学, 2015.
- [6] 周伟江, 吴旺斌, 唐才宝, 等. 外源油菜素内酯对低温胁迫下水稻幼苗生长及生理特性的影响[J]. *西北农业学报*, 2020, 29(9): 1410-1416.
- [7] 黄玉辉, 黄如葵, 陈小凤, 等. 油菜素内酯对苦瓜抗冷性生理指标的影响[J]. *南方农业学报*, 2012, 43(5): 592-596.
- [8] 范敏, 向世鹏, 许金亮, 等. 外源表油菜素内酯和过氧化氢对低温处理后湘烟7号幼苗生理特性的影响[J]. *湖南农业大学学报(自然科学版)*, 2022, 48(4): 401-406.
- [9] CZARNECKI O, HEDTKE B, MELZER M, et al. An *Arabidopsis* GluTR binding protein mediates spatial separation of 5-aminolevulinic acid synthesis in chloroplasts[J]. *The Plant Cell*, 2011, 23(12): 4476-4491.
- [10] GERONA M E B, DEOCAMPO M P, EGDANE J A, et al. Physiological responses of contrasting rice genotypes to salt stress at reproductive stage[J]. *Rice Science*, 2019, 26(4): 207-219.
- [11] KORKMAZ A, KORKMAZ Y, DEMIRKIRAN A R. Enhancing chilling stress tolerance of pepper seedlings by exogenous application of 5-aminolevulinic acid[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2010, 67(3): 495-501.
- [12] 尹璐璐, 于贤昌, 王英华, 等. 5-氨基乙酰丙酸对黄瓜幼苗抗冷性的影响[J]. *西北农业学报*, 2007, 16(4): 166-169.
- [13] 程菊娥, 肖启明, 成飞雪, 等. 5-氨基乙酰丙酸对温室烟草的光合作用及抗逆性的促进效应[J]. *湖南农业科学*, 2007(4): 58-60.
- [14] 张文霞, 陈汉, 胡佳未, 等. 外源EBR与ALA对高温胁迫下辣椒幼苗生长的影响[J]. *中国蔬菜*, 2023(8): 89-96.
- [15] 石新新. 表油菜素内酯对高粱UV-B胁迫缓解作用的研究[D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2015.
- [16] 李杰, 杨萍, 颀建明, 等. 2,4-表油菜素内酯对低温胁迫下辣椒幼苗根系生长及抗氧化酶系统的影响[J]. *核农学报*, 2015, 29(5): 1001-1008.
- [17] ANJUM S A, RAN W, NIU J H, et al. Exogenous application of ALA regulates growth and physiological characters of *Leymus chinensis*(Trin.) Tzvel. under low temperature stress[J]. *The Journal of Animal and Plant Sciences*, 2016, 26(5): 1354-1360.
- [18] YE J B, CHEN Q W, TAO T T, et al. Promotive effects of 5-aminolevulinic acid on growth, photosynthetic gas

- exchange, chlorophyll, and antioxidative enzymes under salinity stress in *Prunus Persica*(L.) Batsch seedling[J]. Emirates Journal of Food and Agriculture, 2016, 28(11): 786–795.
- [19] LIU Y J, ZHAO Z G, SI J, et al. Brassinosteroids alleviate chilling-induced oxidative damage by enhancing antioxidant defense system in suspension cultured cells of *Chorispora bungeana*[J]. Plant Growth Regulation, 2009, 59(3): 207–214.
- [20] 刘巾瑞. 表油菜素内酯对高粱低温胁迫的缓解作用研究[D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2018.
- [21] NAEEM M S, RASHEED M, LIU D, et al. 5-aminolevulinic acid ameliorates salinity-induced metabolic, water-related and biochemical changes in *Brassica napus* L[J]. Acta Physiologiae Plantarum, 2011, 33(2): 517–528.
- [22] 沈奇, 刘涛, 徐刚, 等. ALA对辣椒低温胁迫下伤害的缓解效应[J]. 江苏农业学报, 2012, 28(2): 376–383.
- [23] 赵普庆. 油菜素内酯对黄瓜种子抗逆萌发的影响及其机理[D]. 杭州: 浙江大学, 2005.
- [24] 张治平, 张丽丽. 5-氨基乙酰丙酸对油菜幼苗抗冷性和抗氧化系统的影响[J]. 江苏农业科学, 2014, 42(2): 52–55.
- [25] CHIEN H F, KAO C H. Accumulation of ammonium in rice leaves in response to excess cadmium[J]. Plant Science, 2000, 156(1): 111–115.
- [26] LI J, WU T, HUANG K, et al. Effect of LED spectrum on the quality and nitrogen metabolism of lettuce under recycled hydroponics[J]. Frontiers in Plant Science, 2021, 12: 678197.
- [27] 寇江涛. 2, 4-表油菜素内酯诱导下紫花苜蓿耐盐性生理响应研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2016.
- [28] 马月花, 郭世荣, 杜南山, 等. 外源2,4-表油菜素内酯对低氧胁迫下黄瓜幼苗氮代谢的影响[J]. 南京农业大学学报, 2015, 38(4): 538–545.
- [29] CHEN G, FAN P S, FENG W M, et al. Effects of 5-aminolevulinic acid on nitrogen metabolism and ion distribution of watermelon seedlings under salt stress[J]. Russian Journal of Plant Physiology, 2017, 64(1): 116–123.
- [30] TANG X Q, WANG Y, LV T T, et al. Role of 5-aminolevulinic acid on growth, photosynthetic parameters and antioxidant enzyme activity in NaCl-stressed *Isatis indigotica* Fort[J]. Russian Journal of Plant Physiology, 2017, 64(2): 198–206.

责任编辑: 毛友纯

英文编辑: 罗维