

赵跃锋,连少英,范小玉,等. 外源 2,4-表油菜素内酯对低温胁迫下结球甘蓝幼苗形态建成、光合特性及生理特性的影响[J]. 江苏农业科学, 2024,52(13):169-174.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2024.13.022

# 外源 2,4-表油菜素内酯对低温胁迫下结球甘蓝幼苗形态建成、光合特性及生理特性的影响

赵跃锋, 连少英, 范小玉, 任晓雪, 张清华

(商丘市农林科学院,河南商丘 476000)

**摘要:**为明确外源 2,4-表油菜素内酯(2,4-epibrassinolide,简称 EBR)对结球甘蓝幼苗在低温胁迫下的缓解效应,以商甘 6 号品系为试材,采用人工气候箱模拟低温(8℃/-2℃)环境,通过不同浓度(0、0.01、0.05、0.10、0.50、1.00 mg/L)EBR 溶液对甘蓝幼苗进行喷施处理,研究其对低温胁迫下甘蓝幼苗形态建成、光合特性及生理特性的影响。结果表明,EBR 能够显著提高低温胁迫下甘蓝幼苗株高、茎粗、鲜重和干重,其中以 0.10 mg/L EBR 处理效果最佳,与对照处理相比,其株高、茎粗、鲜重和干重分别提高 43.02%、62.59%、48.13%、59.38%。EBR 能够有效减缓低温胁迫下幼苗叶片叶绿素含量、净光合速率、蒸腾速率的降低,减少气孔阻力,降低胞间 CO<sub>2</sub> 浓度,以促进干物质的积累,且以 0.10 mg/L EBR 处理效果最佳。EBR 能够有效降低低温胁迫下幼苗叶片相对电导率及丙二醛含量,其中 0.10 mg/L EBR 处理较对照处理,其相对电导率值分别降低 16.84%、23.55% 和 22.57%,丙二醛含量分别降低 29.15%、28.68% 和 19.75%,且处理间差异显著。EBR 能够有效提高低温胁迫下幼苗叶片超氧化物歧化酶和过氧化物酶的活性,其中在低温胁迫 48 h 时较对照处理,其活性分别提高 23.55% 和 45.59%。综上所述,EBR 能够有效缓解低温胁迫对甘蓝幼苗形态建成、光合特性和生理特性造成的伤害,增强甘蓝幼苗耐冷性,且以 0.10 mg/L EBR 处理浓度效果最佳。

**关键词:**2,4-表油菜素内酯;低温胁迫;结球甘蓝;形态建成;光合特性;生理特性

**中图分类号:**S635.101;S635.104 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2024)13-0169-06

结球甘蓝(*Brassica oleracea* var. *capitata* L.)别称甘蓝,是十字花科芸薹属甘蓝种的一个变种,在我国周年蔬菜生产中占有重要地位。结球甘蓝在

越冬栽培时如遇低温甚至零下温度,则会严重影响甘蓝植株生长发育,导致甘蓝产量和品质的降低。关于低温胁迫影响植物生长发育的作用机制,不少学者已有报道<sup>[1-4]</sup>。因此,探索如何减缓低温对甘蓝植株的伤害,对于越冬甘蓝高产栽培和周年供应具有重要意义。

植物的抗逆响应是受多种因素影响的较为复杂的生理生化过程。生产上应用 2,4-表油菜素内酯(EBR)提高作物抗逆性是一种简单易行的方式

收稿日期:2023-12-18

基金项目:河南省重点研发专项(编号:221111110100-31)。

作者简介:赵跃锋(1969—),男,河南商丘人,副研究员,从事蔬菜育种及栽培研究。E-mail:zyf9698aaa@163.com。

通信作者:张清华,助理研究员,从事蔬菜育种及栽培研究。E-mail:zqh6738@163.com。

stability along a Mediterranean successional gradient in severely eroded gully bed ecosystems;combined effects of soil,root traits and plant community characteristics[J]. Plant and Soil,2016,398(1):121-137.

[28]崔爱花,孙亮庆,刘帅,等.棉花产量和土壤微生物数量及酶活性对棉田间作系统的响应[J].江苏农业科学,2022,50(2):53-58.

[29]石悦,房永雨,刘拴成,等.高丹草/黄芩间作对高丹草根际土壤微生物多样性的影响[J].中国草地学报,2023,45(12):130-137.

[30]Luo L F,Yang L,Yan Z X,et al. Ginsenosides in root exudates of *Panax notoginseng* drive the change of soil microbiota through carbon source different utilization[J]. Plant and Soil,2020,455(4):139-153.

[31]Liao J,Xia P. Continuous cropping obstacles of medicinal plants: focus on the plant-soil-microbe interaction system in the rhizosphere[J]. Scientia Horticulturae,2024,328:112927.

[32]Zhang Y,Liu J,Zhang J,et al. Row ratios of intercropping maize and soybean can affect agronomic efficiency of the system and subsequent wheat[J]. PLoS One,2015,10(6):e0129245.

之一,其主要通过化控手段来达到改变植物生理生化过程以增强植物抗逆性的目的,如使植物体维持较高的叶绿素含量、促进光合作用、提高叶片光合效率、调节细胞生理环境、促进植物体正常生理生化代谢等<sup>[5-9]</sup>。近年来,许多学者在 EBR 缓解作物低温伤害研究方面取得了一定的进展<sup>[10-12]</sup>,但关于 EBR 提高结球甘蓝幼苗抗寒性的影响鲜见报道。因此,本试验设计利用人工气候箱模拟低温环境,研究不同浓度的 EBR 溶液对甘蓝幼苗形态建成、光合特性及生理特性的影响,以此来探究其对甘蓝幼苗耐冷性的缓解机制,以期为越冬甘蓝高产栽培提供重要的理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于 2022 年 3 月在商丘市农林科学院实验室和人工气候室内进行。供试材料为商丘市农林科学院蔬菜所自育品系商甘 6 号。2,4-表油菜素内酯购于上海 Sigma 公司。

1.2 试验方法

选择籽粒饱满、大小一致的甘蓝种子播种于营养钵(6 cm×6 cm)内,置于人工气候室内进行育苗,每盆播种 4 粒,定苗 1 株。试验采用随机区组排列,EBR 溶液共设 6 个质量浓度:0(CK,叶面喷施蒸馏水)、0.01、0.05、0.10、0.50、1.00 mg/L。每个处理选取大小一致的幼苗 15 株,设 3 次重复,待幼苗长至 4 叶 1 心时,分别按照试验设计每天 08:00 将 EBR 溶液喷施于甘蓝叶片上,每株 50 mL,每隔 24 h 喷 1 次,连续喷 5 d,静置 2 d 后,把处理好的幼苗放置于光照培养箱,温度昼 8℃/夜-2℃(温度设定参照孙惠娟等的方法<sup>[13]</sup>),光照度为 12 000 lx,相对湿度为 60%~80%,温度误差控制在±0.5℃内,进行低温处理。

选取甘蓝幼苗倒 3 叶,于低温胁迫 0、24、48、72 h 时进行叶绿素相对含量(SPAD 值)、相对电导率、丙二醛含量(MDA)、超氧化物歧化酶(SOD)活性、过氧化物酶(POD)活性的测定,于胁迫 7 d 时进行幼苗株高、茎粗、干重、鲜重及光合参数的测定,每个处理选取 3 株幼苗进行测定,重复 3 次。

1.3 测定指标及方法

用直尺和游标卡尺测定甘蓝幼苗株高及茎粗,万分之一天平称量其鲜重和干重。利用手持便携式 SPAD-502 叶绿素测定仪测定幼苗 SPAD 值。便携式光合仪 LI-6400(LI-COR,美国)测定幼苗叶片净光合效率( $P_n$ )、气孔导度( $G_s$ )、胞间 CO<sub>2</sub> 浓度( $C_i$ )和蒸腾速率( $T_r$ )。采用电导法测定甘蓝幼苗叶片相对电导率,MDA 含量和 SOD、POD 活性分别采用硫代巴比妥酸法、氮蓝四唑光还原法及愈创木酚法测定,具体测定参照李和生的方法<sup>[14]</sup>。

1.4 数据处理与分析

利用 Microsoft Excel 软件进行数据整理及图表制作。采用 DPS 软件对数据进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 EBR 对低温胁迫下甘蓝幼苗形态建成的影响

由表 1 可知,甘蓝幼苗在低温条件下其生长受到显著影响。通过喷施 EBR,其幼苗株高、茎粗、鲜重及干重值均高于对照,且随着处理浓度的增加呈现先升后降的趋势。其中以 0.10 mg/L 处理后的甘蓝幼苗株高、茎粗、鲜重及干重值最高,与低温对照相比,分别增加了 43.02%、62.59%、48.13% 和 59.38%,能够有效地缓解低温胁迫造成的甘蓝幼苗生物量的下降,促进干物质的积累,从而维持较好的甘蓝幼苗形态建成。

2.2 EBR 对低温胁迫下甘蓝幼苗光合特性的影响

2.2.1 EBR 对低温胁迫下甘蓝幼苗 SPAD 值的影

表 1 EBR 对低温胁迫下甘蓝幼苗形态建成指标的影响

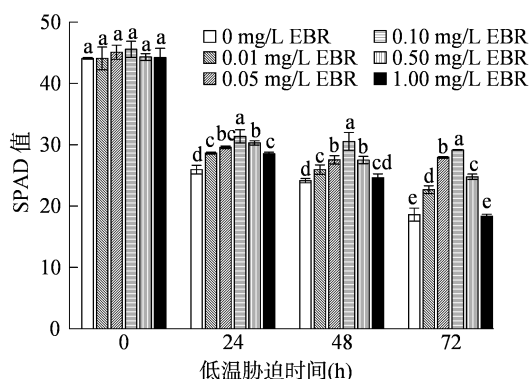
浓度 (mg/L)	株高 (cm)	茎粗 (mm)	鲜重 (g/株)	干重 (g/株)
0(CK)	3.58±0.09dD	1.47±0.10eC	2.14±0.02dD	0.32±0.05eC
0.01	3.95±0.06eC	1.61±0.05bcBC	2.37±0.05eC	0.37±0.01cBC
0.05	4.52±0.02bB	1.68±0.06bB	2.88±0.06bB	0.44±0.04bAB
0.10	5.12±0.10aA	2.39±0.14aA	3.17±0.03aA	0.51±0.02aA
0.50	4.61±0.02bB	1.75±0.04bB	2.89±0.03bB	0.45±0.02bAB
1.00	3.62±0.03dD	1.49±0.09eC	2.15±0.18dD	0.36±0.02eC

注:同列数据后不同小写、大写字母分别表示处理间在 0.05、0.01 水平上差异显著。

响 叶绿素是植物进行光合作用的主要色素,是绿叶植物进行光合作用时捕捉光能的重要物质,其含量的高低与光合作用程度密切相关<sup>[15-16]</sup>。由图 1 可知,各处理 SPAD 值在低温胁迫前无显著差异,随着低温胁迫时间的延长,其 SPAD 值整体呈逐渐降低的趋势。低温处理 24 h 时,EBR 各处理均能明显减缓叶绿素降解,与 CK 呈显著差异,其中 SPAD 值以 0.10 mg/L EBR 处理最高,比对照显著提高了 20.98%;随着低温胁迫时间的延长,1.00 mg/L EBR 处理 SPAD 值与对照差异不显著,对缓解甘蓝幼苗叶绿素的降解效果不明显;说明 EBR 处理浓度存在剂量效应,适宜浓度的 EBR 处理能够显著减缓低温胁迫对甘蓝幼苗叶片叶绿素的降解,但过量的 EBR 施用浓度则会加剧叶绿素的降解,从而对甘蓝幼苗造成严重伤害。

2.2.2 EBR 对低温胁迫下甘蓝幼苗光合特性的影响 通过光合参数的测定可直接反映植株生长势和抗性的强弱<sup>[17]</sup>。由图 2 可知,低温胁迫过程中,通过外源 EBR 的施用,处理组叶片  $P_n$ 、 $G_s$  及  $T_r$  值均大于对照,且随 EBR 浓度的增加  $P_n$ 、 $G_s$  及  $T_r$  值

呈先升高后降低的趋势,其中 0.10 mg/L EBR 施用浓度效果最佳,比对照分别显著增加 45.38%、60.55% 和 92.61%;处理组  $C_i$  值均小于对照,分别比对照降低 2.95%、7.46%、16.19%、13.25% 和 2.04%。说明外源 EBR 能够有效地缓解低温胁迫下甘蓝幼苗净光合速率的下降,减少气孔阻力,延缓蒸腾速率的下降,降低细胞间  $CO_2$  浓度,从而较好地促进干物质的积累,以获得健壮植物体,提高甘蓝幼苗的抗寒性。



柱上不同小写字母表示处理间差异显著( $P < 0.05$ )。下同  
图1 EBR 对低温胁迫下甘蓝幼苗叶片 SPAD 值的影响

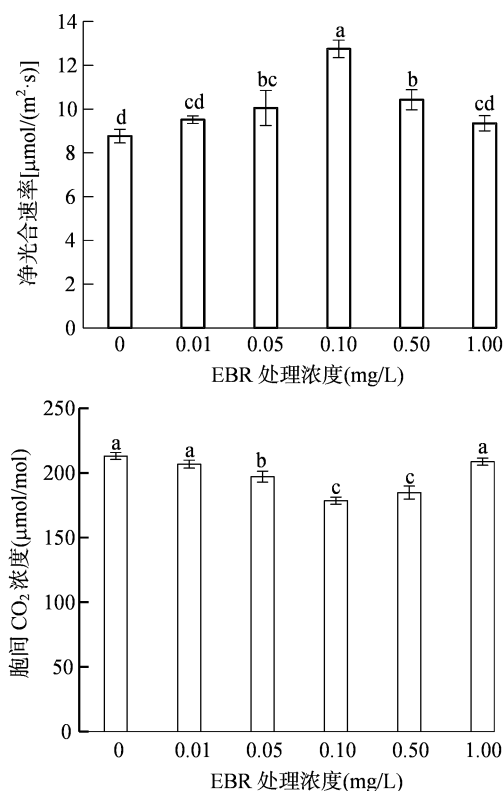
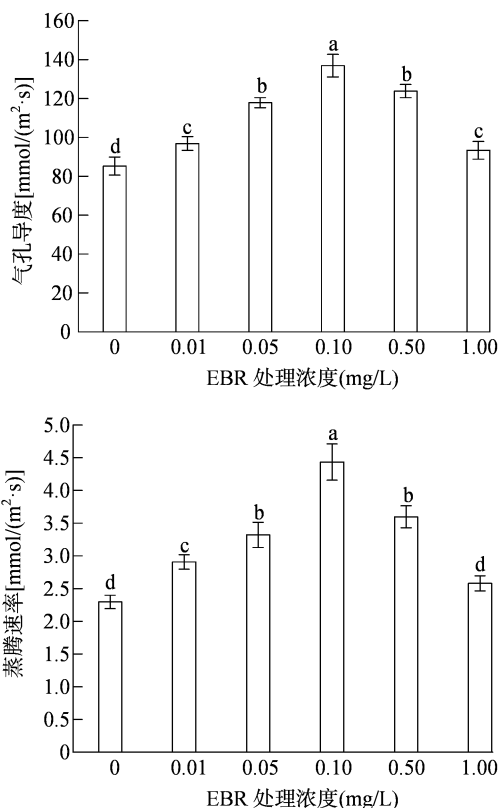


图2 EBR 对低温胁迫下甘蓝幼苗叶片光合参数的影响



## 2.3 EBR 对低温胁迫下甘蓝幼苗生理特性的影响

### 2.3.1 EBR 对低温胁迫下甘蓝幼苗叶片相对电导

率的影响 由图 3 可知,在低温胁迫处理初期各处理相对电导率无显著差异,随着低温胁迫时间的延

长,相对电导率呈逐渐上升趋势,但均低于对照。其中在低温处理过程中,未经 EBR 处理的甘蓝幼苗相对电导率急剧上升,与各个 EBR 处理间存在显著差异。其中 0.10 mg/L EBR 处理电导率值最低,与对照相比,低温胁迫 24、48、72 h 分别降低 8.17、

14.30、14.63 百分点,喷施效果最佳。说明低温可导致幼苗叶片电导率增大,电解质严重外泄,细胞损伤程度严重,而喷施适宜浓度的 EBR 溶液可显著降低幼苗叶片相对电导率,减少质膜受伤害程度,以保持植物体较好的形态建成。

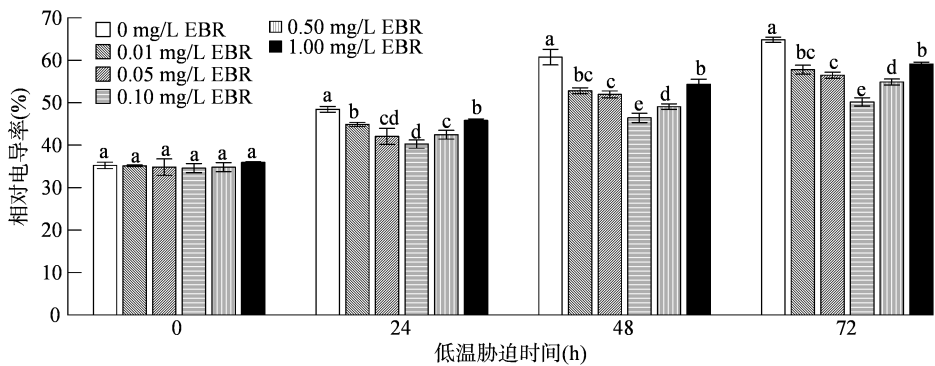


图3 EBR 对低温胁迫下甘蓝幼苗叶片相对电导率的影响

2.3.2 EBR 对低温胁迫下甘蓝幼苗叶片 MDA 含量的影响 植物体在逆境下 MDA 含量的高低可直接反映出膜系统受损程度以及植物的抗逆性<sup>[18]</sup>。由图 4 可知,在低温胁迫前各处理幼苗叶片 MDA 含量无显著差异,随着胁迫时间的延长,其 MDA 含量呈逐渐上升趋势,且各 EBR 处理 MDA 含量均低于对照。在整个低温胁迫过程中,0.10 mg/L EBR 处

理可使幼苗叶片 MDA 含量始终保持最低,且与对照差异显著,比对照 MDA 含量分别降低 29.15%、28.68% 和 19.75%。说明低温胁迫可导致 MDA 含量逐渐升高,而叶面喷施 EBR 处理可不同程度地降低幼苗叶片 MDA 含量,最大程度地减少低温对植物体造成的伤害。

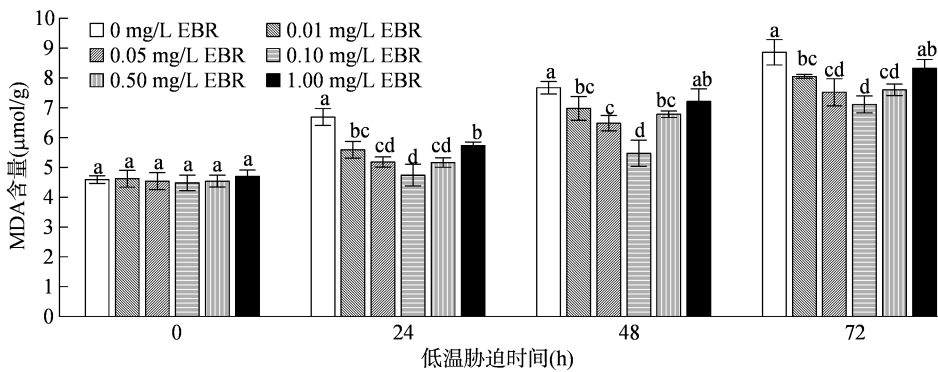


图4 EBR 对低温胁迫下甘蓝幼苗叶片 MDA 含量的影响

2.3.3 EBR 对低温胁迫下甘蓝幼苗叶片 SOD、POD 活性的影响 植物体在逆境条件下,其体内细胞活性氧水平会提高,但同时也可诱发植物体内防御体系的建立,从而可以在一定程度上避免或减轻活性氧对植物造成的伤害<sup>[19]</sup>。由图 5、图 6 可知,在低温胁迫时间内,通过 EBR 溶液处理,甘蓝幼苗叶片 SOD 与 POD 活性与对照相比均有不同程度的提高,其活性变化总体呈先升后降趋势,且都在胁迫 48 h 时达到峰值,相对于对照,0.10 mg/L EBR 处理表现效果最佳,SOD、POD 活性分别提高了 23.55%、45.59%,且差异显著。说明 0.10 mg/L

EBR 处理可较好地诱导甘蓝幼苗抗氧化酶活性提高,以提高甘蓝幼苗的耐冷性,减缓低温胁迫对甘蓝幼苗造成的伤害。

3 讨论与结论

当植株遭受外界低温伤害,最表现的特征是植株外部形态发生变化,如失水、萎蔫、甚至死亡,显著降低幼苗株高、茎粗、鲜重和干重<sup>[20]</sup>。本研究结果发现,在低温条件下,通过喷施外源 EBR 溶液,可显著提高植株生物量,维持较好的形态建成,缓解低温胁迫对幼苗的伤害,这与杨莲等的研究结果<sup>[21-22]</sup>

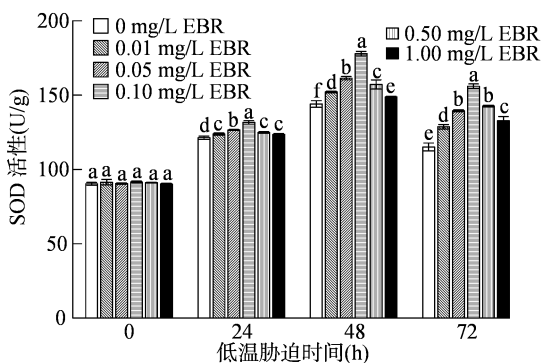


图5 EBR 对低温胁迫下甘蓝幼苗叶片 SOD 活性的影响

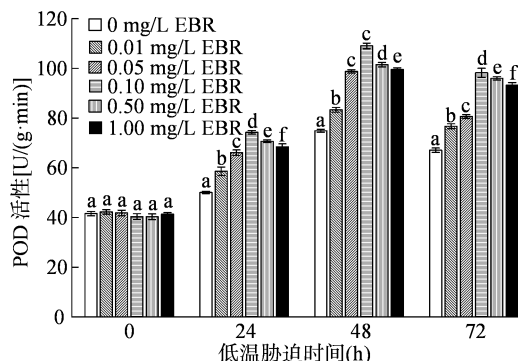


图6 EBR 对低温胁迫下甘蓝幼苗叶片 POD 活性的影响

相同。其中 0.10 mg/L EBR 处理效果最佳,而 1.00 mg/L EBR 处理和低温对照间均无显著差异,说明 EBR 的施用浓度不是越高越好,而是存在剂量效应。

叶绿素含量的高低是反映绿色植物营养和生长状况的重要指标,叶片失绿、黄化都与低温抑制叶绿素形成有关<sup>[23-24]</sup>,而 SPAD 值与叶绿素含量呈显著正相关,可以较好地反映出叶片中的叶绿素含量<sup>[25-27]</sup>。刘德兵等研究认为,在冷胁迫条件下,香蕉幼苗经不同浓度的 BR 处理后,可以明显地减缓叶片中叶绿素的降解速度,增强香蕉幼苗的抗冷性<sup>[28]</sup>。本试验研究结果表明,在低温胁迫条件下,EBR 能够显著提高低温胁迫下甘蓝幼苗叶片的 SPAD 值,减缓甘蓝幼苗叶片中叶绿素的降解,从而不同程度地缓解低温对甘蓝幼苗叶片的伤害。其中 0.10 mg/L EBR 处理使甘蓝幼苗叶片在低温胁迫下保持较高的叶绿素含量,减缓叶绿素的下降程度,使叶绿素含量保持稳定降低,从而有利于植物叶片对光能的利用和干物质的降低,以减轻低温对幼苗的伤害,使甘蓝植株保持较好的形态建成。这与丁锦新等的研究结果<sup>[29]</sup>一致。

Farquhar 等研究发现,植物体遭遇低温,可造成叶片失水皱缩、气孔关闭,从而使叶片光合速率明

显下降,导致植物无法正常生长<sup>[30]</sup>。本研究结果发现,外源喷施 EBR 溶液可以在一定程度上改善低温胁迫后引起的甘蓝幼苗叶片  $P_n$ 、 $G_s$  及  $T_r$  值的下降,并降低  $C_i$  值,使植物体的光合速率和蒸腾速率处于一个动态的平衡,使甘蓝幼苗维持较好的形态建成,从而提高幼苗耐冷性,该结果与前人的研究结果<sup>[31-32]</sup>一致。低温胁迫下,气孔因素和非气孔因素是影响植物光合效率降低的主要因素,当胞间  $CO_2$  浓度和气孔导度同时降低时,说明光合速率降低是由气孔因素引起;反之,则为非气孔因素引起<sup>[33-34]</sup>。本试验研究结果显示,在低温胁迫下光合效率的降低主要是由于非气孔因素造成的,这说明在低温胁迫下,EBR 可以通过减少气孔阻力、增大气孔导度、降低胞间  $CO_2$  浓度来提高植物在逆境下的光合效率,以增强植物的抗逆性。

当植物体遭受低温胁迫时,原生质结构受到影响,质膜选择透性丧失,此时盐类或有机物会从细胞中渗出,进入到周围介质中,因此通过植物相对电导率和细胞中 MDA 含量的测定,可以很好地反映植物生物膜受伤害的程度<sup>[35]</sup>。本试验研究结果发现,当甘蓝幼苗遭受低温伤害时,对照组叶片相对电导率和 MDA 含量始终处于较高水平,呈急剧增高趋势;而处理组叶片相对电导率和 MDA 含量保持缓慢增长趋势,且均低于对照,这说明在植物遭受低温伤害时可以通过 EBR 处理,来减缓低温对甘蓝幼苗叶片的细胞膜伤害,从而提高甘蓝幼苗的耐冷性,其中 0.10 mg/L EBR 施用效果最佳。

SOD、POD 是植物在逆境时防止膜脂过氧化酶促防御体系中起重要作用的 2 种保护酶,其活性的高低与植物的抗寒性呈显著正相关<sup>[36-37]</sup>。张小贝等研究表明,在 8℃ 低温胁迫下,通过对甘薯叶进行外源 EBR 喷施,甘薯叶中 SOD、POD 活性明显高于对照<sup>[38]</sup>;李杰等研究得出,喷施 0.10  $\mu\text{mol/L}$  EBR,可使辣椒幼苗根系在低温胁迫下的 SOD、POD 活性显著提高<sup>[39]</sup>。本次试验结论与上述观点相同,在低温胁迫下,通过施用适宜浓度的 EBR,可以有效地提高甘蓝幼苗叶片 SOD、POD 活性,这可能是因为通过外源 EBR 施用,诱导了甘蓝幼苗相关抗氧化调控基因的响应,提高了体内抗氧化酶活性,增强了植株清除活性氧的能力,有效地缓解了低温胁迫对幼苗造成的伤害。

综上所述,外源 2,4-表油菜素内酯可以在一定程度上有效缓解低温胁迫对甘蓝幼苗的伤害,且

存在剂量效应,其中以 0.10 mg/L EBR 的效果较好,可以较好地提高植株的生物量、光合效率及抗氧化酶活性,增强植株的抗寒性,从而使植株维持较好的形态建成,为甘蓝高产稳产打下坚实的基础。

#### 参考文献:

- [1] 王芳,王淇,赵曦阳. 低温胁迫下植物的表型及生理响应机制研究进展[J]. 分子植物育种,2019,17(15):5144–5153.
- [2] 秦文斌,山溪,张振超,等. 低温胁迫对甘蓝幼苗抗逆生理指标的影响[J]. 核农学报,2018,32(3):576–581.
- [3] 周艳虹,黄黎锋,喻景权. 持续低温弱光对黄瓜叶片气体交换、叶绿素荧光猝灭和吸收光能分配的影响[J]. 植物生理与分子生物学学报,2004,30(2):153–160.
- [4] 郑春芳,刘伟成,魏龙,等. 外施褪黑素对低温胁迫下红树植物秋茄光合作用和抗坏血酸-谷胱甘肽循环的调控[J]. 植物生理学报,2019,55(8):1211–1221.
- [5] Jaillais Y, Vert G. Brassinosteroids, gibberellins and light-mediated signalling are the three-way controls of plant sprouting[J]. Nature Cell Biology,2012,14:788–790.
- [6] Fridman Y, Savaldi-Goldstein S. Brassinosteroids in growth control: how, when and where[J]. Plant Science,2013,209:24–31.
- [7] Clouse S D, Sasse J M. Brassinosteroids: essential regulators of plant growth and development[J]. Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology,1998,49:427–451.
- [8] 束红梅,郭书巧,巩元勇,等. 油菜素内酯对 NaCl 胁迫下棉花叶片生理特征和基因表达谱的影响[J]. 应用生态学报,2016,27(1):150–156.
- [9] Bhandari S, Nailwal T K. Role of brassinosteroids in mitigating abiotic stresses in plants[J]. Biologia,2020,75(12):2203–2230.
- [10] 惠竹梅,王智真,胡勇,等. 2,4-表油菜素内酯对低温胁迫下葡萄幼苗抗氧化系统及渗透调节物质的影响[J]. 中国农业科学,2013,46(5):1005–1013.
- [11] 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 *Choripora bungeana* [J]. Plant Growth Regulation,2009,59(3):207–214.
- [12] 杨萍,李杰. 2,4-表油菜素内酯对低温胁迫下辣椒幼苗抗氧化系统的影响[J]. 北方园艺,2017(21):7–12.
- [13] 孙惠娟,王超. 结球甘蓝幼苗期耐寒性鉴定[J]. 作物杂志,2014(3):58–63.
- [14] 李合生. 植物生理学实验技术指导[M]. 北京:高等教育出版社,2001:160–261.
- [15] 孙桂丽,徐敏,李疆,等. 香梨两种树形净光合速率特征及影响因素[J]. 生态学报,2013,33(18):5565–5573.
- [16] 贾婷婷,常伟,范晓旭,等. 盐胁迫下 AM 真菌对沙枣苗木光合与叶绿素荧光特性的影响[J]. 生态学报,2018,38(4):1337–1347.
- [17] 李俊周,乔江方,李梦琪,等. 短时水分胁迫对水稻叶片光合作用的影响[J]. 干旱地区农业研究,2017,35(3):126–129,277.
- [18] 高俊凤. 植物生理学实验指导[M]. 北京:高等教育出版社,2006:210–211.
- [19] Jamshidi Goharrizi K, Meru G, Ghotbzadeh Kermani S, et al. Short-term cold stress affects physiological and biochemical traits of pistachio rootstocks[J]. South African Journal of Botany,2021,141:90–98.
- [20] 吴雪霞,查丁石,邵翔. 低温胁迫对茄子幼苗生长、抗氧化酶活性和渗透调节物质的影响[J]. 江苏农业学报,2008,24(4):471–475.
- [21] 杨莲,高欢,吴凤芝. 2,4-表油菜素内酯对亚低温胁迫下番茄幼苗生长与钾积累的影响[J]. 中国蔬菜,2021(1):48–55.
- [22] 徐晓昀,郁继华,颀建明,等. 水杨酸和油菜素内酯对低温胁迫下黄瓜幼苗光合作用的影响[J]. 应用生态学报,2016,27(9):3009–3015.
- [23] 潘瑞炽. 植物生理学[M]. 5 版. 北京:高等教育出版社,2004:58–66.
- [24] 王平荣,张帆涛,高家旭,等. 高等植物叶绿素生物合成的研究进展[J]. 西北植物学报,2009,29(3):629–636.
- [25] 艾天成,李方敏,周治安,等. 作物叶片叶绿素含量与 SPAD 值相关性研究[J]. 湖北农学院学报,2000,20(1):6–8.
- [26] 蹇黎,朱利泉,张以忠,等. 贵州兰花 SPAD 值和叶绿素含量测定与分析[J]. 安徽农业科学,2009,37(35):17462–17464.
- [27] 张文英,王凯华. 甘蓝型油菜 SPAD 值与叶绿素含量关系分析[J]. 中国农学通报,2012,28(21):92–95.
- [28] 刘德兵,魏军亚,李绍鹏,等. 油菜素内酯提高香蕉幼苗抗冷性的效应[J]. 植物研究,2008,28(2):195–198,221.
- [29] 丁锦南,陶晓东,黄素青. 表油菜素内酯对黄瓜幼苗抗冷性的影响[J]. 浙江农业科学,1998,39(4):195–197.
- [30] Farquhar G D, Sharkey T D. Stomatal conductance and photosynthesis[J]. Annual Review of Plant Physiology,1982,33:317–345.
- [31] 许大全. 光合作用气孔限制分析中的一些问题[J]. 植物生理学通讯,1997,33(4):241–244.
- [32] 曹更生,宋纯鹏. 气孔保卫细胞信号转导途径[J]. 植物生理学通讯,1997,33(3):219–225.
- [33] 刘旭,林碧英,李彩霞,等. 外源脱落酸对盐胁迫下茄子幼苗生理特性的影响[J]. 河南农业大学学报,2020,54(2):231–236,268.
- [34] 项洪涛,郑殿峰,何宁,等. 植物对低温胁迫的生理响应及外源脱落酸缓解胁迫效应的研究进展[J]. 草业学报,2021,30(1):208–219.
- [35] 崔洁冰,张萌,张莹婷,等. 低温胁迫对柳杉不同无性系的影响及抗寒性评价[J]. 生物技术通报,2022,38(3):31–40.
- [36] 李岩,田维丽,谢恩俊,等. 低温胁迫及生理生化指标综合评价抗寒茶树[J]. 种子,2020,39(12):38–43,54.
- [37] 魏鑫,王升,王宏光,等. 低温胁迫下不同类型蓝莓品种的抗寒性研究[J]. 江苏农业科学,2023,51(19):131–137.
- [38] 张小贝,祝志欣,南文卓,等. 2,4-表油菜素内酯(EBR)对菜用甘薯抗寒生理生化的影响[J]. 安徽农业大学学报,2017,44(3):525–529.
- [39] 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.