

外源 ABA 浸种对冬油菜种子萌发及幼苗 抗寒性的诱导效应

方彦^{1,2}, 武军艳², 孙万仓², 杨晓娟², 韩慧敏², 韩亚伟², 陈亚平²

(1. 甘肃农业大学研究测试中心, 甘肃 兰州 730070; 2. 甘肃省干旱生境作物学重点实验室, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 为探讨外源脱落酸(ABA)对北方寒旱区冬油菜幼苗抗寒性的诱导效应, 试验分别用不同浓度的 ABA 对超强抗寒性白菜型冬油菜品种“陇油 6 号”和弱抗寒性品种“天油 2 号”进行浸种处理, 研究不同浓度 ABA 浸种对冬油菜种子萌发及常温 and 低温胁迫条件下相关抗寒指标的影响。结果表明, 10 ~ 70 mg·L⁻¹ ABA 处理促进了种子萌发, 80 mg·L⁻¹ ABA 处理对发芽率和发芽势有抑制作用; 30 mg·L⁻¹ 浓度的 ABA 对冬油菜抗寒性诱导效果最佳, 可显著 ($P < 0.05$) 提高冬油菜幼苗抗氧化酶(SOD、POD 和 CAT)活性, 延缓叶绿素含量的降低, 增加叶片脯氨酸含量, 减缓膜脂过氧化产物丙二醛的积累; 外源 ABA 处理在品种上存在差异, 对抗寒性强的品种陇油 6 号效果明显。

关键词: 脱落酸(ABA); 低温胁迫; 冬油菜; 抗寒性; 诱导效应

中图分类号: S565.4; S482.99 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7601(2014)06-0070-05

Inducing effects of exogenous ABA on seed germination and cold tolerance of winter rape seedlings

FANG Yan^{1,2}, WU Jun-yan², SUN Wan-cang², YANG Xiao-juan²,
HAN Hui-min², HAN Ya-wei², CHEN Ya-ping²

(1. Instrumental Research and Analysis Center of Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China;

2. Gansu Provincial Key Lab of Aridland, Lanzhou, Gansu 730070, China)

Abstract: In order to investigate the inducing effects of cold tolerance of winter rapeseed by exogenous ABA in northern drought and cold region, two winter rapeseed cultivars Longyou 6 (cold resistant) and Tianyou 2 (cold susceptible) were presoaked with different concentrations of ABA. The effect of different ABA concentrations on seed germination and related cold resistance indexes of winter rapeseed were studied under normal temperature and cold stress. The results showed that the concentration of 10 ~ 70 mg·L⁻¹ promoted seed germination, while that of 80 mg·L⁻¹ abscisic acid solution lowered germination ability and percentage. The recommended concentration of abscisic acid is 30 mg·L⁻¹, increasing superoxide dismutase (SOD), peroxidase (POD) and catalase (CAT) activities, alleviating the chlorophyll degradation, and elevating proline content but decreasing MDA content, the product of membrane lipid peroxidation. In addition, the effects of exogenous ABA on winter rapeseed varied with varieties, and it was obvious for Longyou 6 with high chilling resistance.

Keywords: abscisic acid; cold stress; winter rapeseed; cold tolerance; inducing effect

白菜型冬油菜 (*Brassica rapa*) 是北方寒旱区一种重要的冬春季覆盖作物, 能显著减弱农田地表风蚀沙漠化发展, 抑制沙尘暴的尘源供给, 蓄水保肥, 改善区域生态环境^[1]。北方旱寒区冬油菜 5 月初到 6 月上中旬即可成熟, 收获后可复种马铃薯、玉米、

向日葵、棉花和其它秋粮与蔬菜作物, 能提高复种指数与农业经济效益, 具有重要的生态效益与经济效益, 发展前景十分广阔。北方寒旱区冬油菜秋季播种, 次年春季返青, 期间要经历枯叶期到返青期一段漫长的越冬期。但该区冬季温度较低, 极端低温在

收稿日期: 2014-05-25

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项经费项目(200903002-04); 国家高技术研究发展计划(863 计划)项目“强优势油菜杂交种的创制与应用”(2011AA10A104); 现代农业产业技术体系建设专项资金(CARS-13); 甘肃农业大学盛彤笙创新基金(GSAU-STC-132)

作者简介: 方彦(1976—), 女, 甘肃金塔人, 副研究员, 硕士, 从事作物遗传育种方向研究。E-mail: ffyv@163.com。

通信作者: 孙万仓, 男, 教授, 博士, 主要从事油菜育种及十字花科种质资源研究。E-mail: wangcangsun@yahoo.com.cn。

-30℃以上,冬季负积温在-800℃以上,因此,低温是限制冬油菜栽培的主要因子。如何确保冬油菜安全越冬,提高返青率是生产及育种上的重要课题。

施用外源激素可提高作物的抗逆性^[2]。脱落酸(ABA)是一种逆境胁迫激素,在植物应对逆境环境中发挥着重要作用^[3-6]。外源 ABA 可提高植物抗冷性或抗寒性。罗立津^[7]指出,ABA 诱导能增强甜椒幼苗的抗寒性。党秋玲等^[8]认为适宜浓度 ABA 处理种子后,可促进加工番茄幼苗抗寒性的提高。郭确^[9]认为外施 ABA 预处理能大大提高水稻幼苗的抗寒性。ABA 处理可提高柱花草的抗冷性和抗氧化酶活性^[10]。于晶^[11]等研究结果表明外源 ABA 对小麦的抗冷性有很大影响。施用外源 ABA 能诱导抗冷基因的表达^[9],诱导某些酶的重新合成^[12],从而增加植物的抗冷性,因此 ABA 诱导处理是增强植物抗冷性和抗寒性的常用方法。本研究从激素调控角度出发,采用不同浓度的 ABA 浸种处理两种不同抗寒性的冬油菜,通过测定冬油菜幼苗叶片保护酶和相关抗冷性指标,探讨 ABA 浸种对冬油菜幼苗抗寒性的影响,旨在找出外源 ABA 浸种的最适浓度,为北方旱寒区冬油菜提高返青率提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试品种为甘肃农业大学农学院选育的超强抗寒白菜型冬油菜品种陇油 6 号 and 天水市农业科学研究所选育的弱抗寒白菜型冬油菜品种天油 2 号。脱落酸为北京鼎国生物有限责任公司生产。

1.2 试验方法

1.2.1 发芽实验 设 9 个处理组,ABA 浓度分别为 10、20、30、40、50、60、70 mg·L⁻¹和 80 mg·L⁻¹,以蒸馏水处理作对照(CK)。用蒸馏水将 ABA 稀释成所需溶液备用。选取饱满、均匀一致的油菜种子,用蒸馏水冲洗干净后,用不同浓度 ABA 浸种(每组用量相同)处理 2 h,清水冲洗 3 遍并阴干,点播于底部铺有两层滤纸的培养皿中,加水催芽并每天适量浇水。以有明显胚根破壳(露白)为发芽种子,参照文献^[8]的方法,计算发芽势和发芽率。试验设置 3 次重复。

1.2.2 幼苗培养 依据 1.2.1 实验结果,设定 5 个处理(10、30、50、60、70 mg·L⁻¹),以蒸馏水浸种作对照(CK)。将天油 2 号和陇油 6 号种子用蒸馏水和不同浓度 ABA 分别浸种处理后,待胚根露白后播至装有育苗基质的营养钵(上口径 10 cm,下口径 7 cm,高 10 cm)内,每个品种移栽 5 盆,每盆 3 株,培养至 6 片真叶,选取形态、长势、大小基本一致的幼

苗株进行处理。各处理幼苗分成 2 组,一组置于常温下(25℃)培养(简称常温苗,下同),一组于低温试验箱中冷冻处理,处理程序如下 10℃/24h→5℃/24h→0℃/24h→-5℃/24h(简称低温苗,下同),分别取叶片,进行各项指标的测定。

1.2.3 生理生化指标的测定 过氧化物酶(POD)活性,超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)、丙二醛、叶绿素及脯氨酸含量的测定均参照文献^[13],3 次重复。

1.2.4 数据处理 试验中的所有数据均利用 Excel 2003 和 DPS 7.05 软件进行分析,Duncan's 新复极差法进行比较分析。

2 结果与分析

2.1 不同浓度 ABA 溶液浸种对冬油菜种子萌发的影响

由表 1 可以看出,不同浓度的 ABA 溶液浸种对冬油菜种子萌发具有明显影响,10、20、30、40、50、60、70 mg·L⁻¹ ABA 溶液处理能明显促进种子萌发,提高两个冬油菜品种种子的发芽率和发芽势,其中以 30 mg·L⁻¹ ABA 溶液促进作用最为明显,陇油 6 号发芽率比对照增加 8.89%,发芽势增加了 71.88%;天油 2 号发芽率增加量为 14.12%,发芽势增加了 72.00%。当 ABA 溶液浓度达到 80 mg·L⁻¹ 时,两个冬油菜品种种子发芽受到抑制,发芽率和发芽势显著下降($P < 0.05$)。与对照相比,陇油 6 号发芽势下降了 90.62%,发芽率下降了 55.56%,天油 2 号发芽势下降了 92.00%,发芽率下降了 55.29%。

2.2 不同浓度 ABA 溶液浸种对冬油菜叶片 SOD 活性的影响

随着 ABA 浓度的增加,两个冬油菜品种幼苗叶片 SOD 活性均先增加后降低(表 2)。常温下,ABA 浓度为 50 mg·L⁻¹ 时,天油 2 号品种 SOD 活性最大,较对照增加 18.03%;ABA 浓度为 30 mg·L⁻¹ 时陇油 6 号品种 SOD 活性最大,较对照增加 19.14%。低温下,两品种 SOD 活性均在 ABA 浓度为 30 mg·L⁻¹ 时最大,天油 2 号和陇油 6 号分别较对照增加 11.49% 和 29.05%。方差分析和多重比较(同一温度下)表明,天油 2 号品种在常温下,ABA 浓度为 30 mg·L⁻¹ ~ 70 mg·L⁻¹ 的处理都达到了显著水平($P < 0.05$);陇油 6 号品种,ABA 浓度为 10 mg·L⁻¹ ~ 60 mg·L⁻¹ 的处理与对照相比差异显著($P < 0.05$)。低温胁迫下,ABA 浓度为 10 mg·L⁻¹ ~ 50 mg·L⁻¹ 时,天油 2 号幼苗 SOD 活性显著高于对照($P < 0.05$);陇油 6 号各处理的 SOD 活性均高于对照,差异显著($P < 0.05$)。

表 1 不同浓度 ABA 溶液浸种对冬油菜种子萌发的影响
Table 1 Effects of ABA presoaking on germination of winter rapeseed

ABA 溶液浓度/(mg·L ⁻¹) ABA level	陇油 6 号 Longyou 6		天油 2 号 Tianyou 2	
	发芽势/% Germinating ability	发芽率/% Germination percentage	发芽势/% Germinating ability	发芽率/% Germination percentage
	3d	7d	3d	7d
0(CK)	32 ± 1.76f	90 ± 0.58c	25 ± 1.86e	85 ± 1.16d
10	37 ± 1.20de	92 ± 0.87bc	31 ± 2.73cd	90 ± 0.30c
20	44 ± 0.33c	94 ± 0.58b	34 ± 1.53bc	92 ± 2.03bc
30	55 ± 1.73a	98 ± 1.15a	43 ± 2.89a	97 ± 1.45a
40	51 ± 1.15b	95 ± 0.85b	37 ± 0.84b	95 ± 0.88ab
50	45 ± 0.88c	93 ± 1.45b	36 ± 0.58bc	93 ± 0.33bc
60	40 ± 0.86d	93 ± 0.83bc	34 ± 0.88bc	90 ± 0.58c
70	35 ± 1.73ef	92 ± 1.20bc	28 ± 1.50de	89 ± 2.03c
80	3 ± 0.33g	40 ± 0.58d	2 ± 0.58f	38 ± 1.15e

注:同一列数据后不同小写字母分别表示处理间在 0.05 水平上差异显著。下表同。
Note: Different small letters indicate significantly difference at $P < 0.05$ level. The same as below.

2.3 不同浓度 ABA 溶液浸种后冬油菜叶片 POD 活性的变化

在常温和低温胁迫两种环境下,两个品种叶片 POD 活性均随着 ABA 浓度的增加呈现先升高再下降的趋势(表 2),POD 值的最高点均出现在 ABA 浓度为 30 mg·L⁻¹时。方差分析和多重比较表明,常温下,70 mg·L⁻¹ABA 处理对天油 2 号无明显效果;10 mg·L⁻¹ABA 处理对陇油 6 号无明显效果。低温条件下,ABA 浓度为 10 mg·L⁻¹~70 mg·L⁻¹时,天油 2 号幼苗 POD 活性与对照相比均有显著差异($P < 0.05$);陇油 6 号在 30 mg·L⁻¹~70 mg·L⁻¹浓度范围内各处理与对照相比差异显著($P < 0.05$)。

2.4 不同浓度 ABA 溶液浸种对冬油菜叶片 CAT 活性的影响

不同 ABA 处理下冬油菜叶片 CAT 含量的变化因品种而异(表 2)。在常温和低温胁迫两种环境下,抗寒性强的陇油 6 号品种叶片 CAT 活性高于抗寒性弱的品种天油 2 号,且两品种均在 ABA 浓度为 30 mg·L⁻¹时,CAT 活性达最大。低温胁迫下,天油 2 号 CAT 活性较对照增加 85.39%,陇油 6 号 CAT 活性较对照增加 47.85%。方差分析和多重比较表明,常温下 ABA 浓度为 10 mg·L⁻¹、30 mg·L⁻¹、50 mg·L⁻¹和 60 mg·L⁻¹的处理均显著增加两个品种叶片 CAT 活性;低温下 ABA 浓度为 30 mg·L⁻¹和 50 mg·L⁻¹时天油 2 号 CAT 活性与对照相比差异显著($P < 0.05$);ABA 浓度为 10 mg·L⁻¹、30 mg·L⁻¹和 50 mg·L⁻¹时陇油 6 号 CAT 活性较对照显著增加($P < 0.05$)。

整体来看,陇油 6 号各处理的抗氧化酶 SOD、

POD 和 CAT 活性均高于天油 2 号。无论是常温还是低温胁迫条件下,当 ABA 浓度为 30 mg·L⁻¹时,天油 2 号和陇油 6 号幼苗叶片 SOD、POD 和 CAT 活性达最大,说明该浓度提高冬油菜抗氧化酶系统的效果最为明显。

2.5 不同浓度 ABA 溶液浸种对冬油菜叶片脯氨酸含量的影响

由图 1 可知,两种温度环境下两个冬油菜品种叶片脯氨酸含量均在 ABA 浓度为 30 mg·L⁻¹时最大。在常温条件下,各浓度 ABA 处理后两个冬油菜品种幼苗叶片中游离脯氨酸差异不大,经低温处理后品种间游离脯氨酸累积出现差异。ABA 浓度为 10 mg·L⁻¹、30 mg·L⁻¹、50 mg·L⁻¹、60 mg·L⁻¹和 70 mg·L⁻¹时,天油 2 号品种叶片中游离脯氨酸含量有所增加,但幅度较小,分别是常温时的 2.57、2.30、1.99、1.89 和 1.76 倍;陇油 6 号冬油菜品种叶片中游离脯氨酸分别是常温时的 3.57、5.07、4.01、4.00 和 3.10 倍,说明其对逆境的适应性较强,在低温下能够积累较多游离脯氨酸而提高其抗性。因此,ABA 浸种处理有利于增加抗寒性强的品种的脯氨酸累积能力,而对抗寒性弱的品种脯氨酸累积能力较弱。

2.6 不同浓度 ABA 浸种对冬油菜叶片叶绿素含量的影响

从图 2 可以看出,两种温度环境下不同冬油菜经各浓度 ABA 浸种处理后,叶绿素含量随着 ABA 浓度的增大呈现先升高后降低的变化趋势,且陇油 6 号叶片叶绿素含量高于天油 2 号。

表 2 不同浓度 ABA 浸种对冬油菜叶片抗氧化酶的影响
Table 2 Effects of ABA presoaking on antioxidant enzymes of winter rapeseed

品种 Varieties	处理/(mg·L ⁻¹) Treatments	SOD/(U·g ⁻¹ ·min ⁻¹)		POD/(△OD470·min ⁻¹ ·g ⁻¹)		CAT/(△OD470·min ⁻¹ ·g ⁻¹)	
		常温	低温	常温	低温	常温	低温
		Normal temperature	Cold stress	Normal temperature	Cold stress	Normal temperature	Cold stress
天油 2 号 Tianyou2	0(CK)	205.30 ± 0.05c	331.65 ± 0.05d	18.53 ± 0.77e	24.61 ± 1.61e	6.72 ± 0.66c	22.79 ± 0.40c
	10	205.31 ± 0.01c	352.39 ± 0.12c	36.11 ± 2.51d	36.56 ± 1.45d	18.01 ± 0.57ab	26.07 ± 0.31c
	30	242.16 ± 0.11a	369.74 ± 0.53a	79.83 ± 3.25a	86.81 ± 2.14a	19.13 ± 1.27a	42.25 ± 0.19a
	50	242.31 ± 0.02a	362.13 ± 0.59b	60.00 ± 1.30b	84.72 ± 4.49a	14.72 ± 1.91b	36.14 ± 1.66b
	60	242.04 ± 0.06a	289.68 ± 0.35e	46.14 ± 1.28c	65.69 ± 0.33b	15.26 ± 1.02b	25.47 ± 2.14c
	70	241.36 ± 0.18b	245.56 ± 0.12f	22.42 ± 0.96e	52.64 ± 0.20c	6.54 ± 0.60c	24.29 ± 2.06c
陇油 6 号 Longyou6	0(CK)	216.36 ± 0.24e	304.24 ± 0.04e	22.97 ± 2.25d	36.0 ± 1.89d	8.64 ± 0.10d	31.60 ± 0.52c
	10	241.32 ± 0.19c	335.15 ± 0.11c	28.36 ± .84cd	42.4 ± 1.50d	18.52 ± 0.19b	37.31 ± 0.57b
	30	257.78 ± 0.31a	392.65 ± 0.07a	86.72 ± 0.07a	120.97 ± 5.51a	23.61 ± 0.62a	46.72 ± 0.92 a
	50	249.98 ± 0.34b	378.78 ± 0.10b	56.69 ± 2.01b	86.00 ± 2.26b	19.26 ± 0.92b	45.58 ± 2.06a
	60	230.14 ± 0.01d	335.58 ± 0.01c	49.39 ± 5.02 b	85.81 ± 0.19b	16.06 ± 0.38c	34.40 ± 1.13bc
	70	216.21 ± 0.14e	309.21 ± 0.43d	31.58 ± 0.89c	76.67 ± 1.43c	6.35 ± 0.01e	34.28 ± 1.46bc

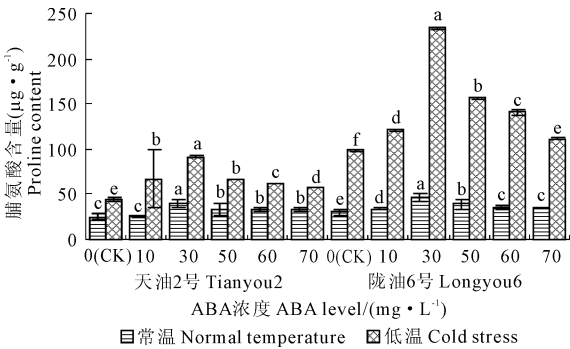


图 1 不同浓度 ABA 溶液浸种对冬油菜叶片脯氨酸含量的影响
Fig.1 Effect of different concentration of ABA soaking seeds on proline content of winter rapeseed

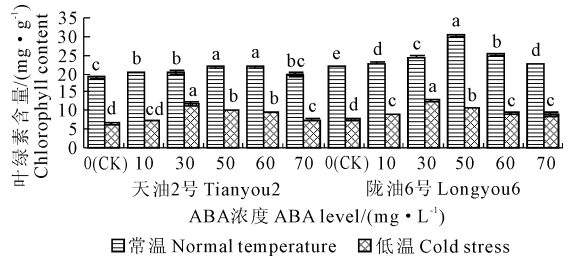


图 2 不同浓度 ABA 溶液浸种对冬油菜叶片叶绿素含量影响
Fig.2 Effect of different concentration of ABA soaking seeds on chlorophyll content of winter rapeseed

常温下,10 mg·L⁻¹ ~ 70 mg·L⁻¹浓度 ABA 处理后,天油 2 号叶片中叶绿素依次比对照增加了 6.87%、7.85%、15.33%、14.73% 和 5.42%;陇油 6 号增加量分别为 2.60%、10.72%、36.72%、13.66% 和 2.78%。两个品种均以 ABA 浓度为 50 mg·L⁻¹时叶绿素含量最高。

低温胁迫后,两个冬油菜品种叶片叶绿素含量较常温降低,但经 ABA 处理的叶片中叶绿素含量明显高于低温对照,表明经外源 ABA 处理的植株对低温具有更强的适应性。其中以 30 mg·L⁻¹ ABA 处理叶绿素含量最高,与其它处理相比,其效果达到差异显著水平($P < 0.05$),说明经 30 mg·L⁻¹的 ABA 处理冬油菜幼苗在寒害期间能经受低温的危害,受低温影响最小,仍能促进叶绿素进行缓慢地合成。

2.7 不同浓度 ABA 浸种对冬油菜叶片丙二醛含量的影响

如图 3 所示,在常温 and 低温条件下两个冬油菜品种各处理叶片 MDA 含量变化趋势相似,都呈现随着 ABA 浓度的增加先降后升的趋势,并且 ABA 处理后 MDA 含量均显著低于对照($P < 0.05$)。

常温下,经过 ABA 浸种处理,冬油菜叶片 MDA 含量都有不同程度的降低。两品种均以 ABA 浓度为 30 mg·L⁻¹时降幅最高,其中天油 2 号与对照(CK)相比减少了 56.46%,陇油 6 号降幅为 61.46%。

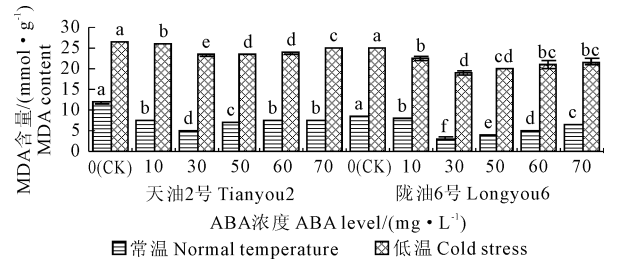


图 3 不同浓度脱落酸溶液浸种对冬油菜叶片 MDA 含量的影响
Fig.3 Effect of different concentration of ABA soaking seeds on MDA content of winter rapeseed

低温条件下两个冬油菜品种叶片中 MDA 含量大小依次均为 $CK > 10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} > 70 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} > 60 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} > 50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} > 30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 说明 ABA 浓度为 $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时增强冬油菜的抗寒性效果最佳。

3 讨论和结论

1) ABA 是一种“逆境应激激素”, 能提高植物的抗逆能力^[14], 外源施用一定浓度的 ABA 溶液作浸种处理, 能明显促进种子萌发, 改善幼苗生长状况^[8]。不同类型植物以及同一类型植物的不同品种对施用 ABA 浓度的敏感性大不相同^[15-16]。本研究表明, $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ABA 溶液浸种处理能促进白菜型冬油菜种子萌发。

2) ABA 是抗寒基因表达的启动因素, 对植物抗寒力的启动起着重要作用^[17]。在寒冷条件, 外施 ABA 可促进植物水分从根系向叶片输送, 提高细胞膜通透性、增加膜稳定性、减少水分损失、增加脯氨酸等渗透调节物质的含量以及诱导有关基因的表达来提高植物对寒冷的抵抗能力。SOD、POD 和 CAT 等作为植物体内活性氧清除的酶系统^[18-19], 可以清除低温逆境条件下植物体内产生的有害物质, 保护细胞膜和生物大分子, 以使植物适应逆境而生存下来^[20]。脯氨酸是冷害和冻害条件下细胞内的保护物质, 其含量和多数植物的抗寒性呈正相关^[21]。叶绿体是植物体内冷敏感性很强的一个亚细胞器, 低温胁迫可造成叶绿素降解^[15]。丙二醛的含量与植物衰老及逆境伤害有密切关系。膜脂过氧化过程中, MDA 含量积累越多, 膜系统受伤害越严重, 即 MDA 含量与植物抗寒性呈负相关性^[2]。外源 ABA 可增加内源 ABA 含量, 提高冬油菜幼苗叶片中酶活性, 减缓膜脂过氧化物 MDA 的积累, 同时能促进叶绿素和渗透保护物质脯氨酸含量的增加, 这是 ABA 有效提高冬油菜幼苗抗冷性、减轻低温对其伤害的主要生理基础。

3) 应用外源 ABA 诱导植物抗冷性的最佳浓度需要视具体植物种类而定^[11]。蔡世英^[22]认为 $100 \sim 150 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ ABA 处理对提高咖啡幼苗的抗冷性效应最佳; 郭凤领^[23]报道了 $50 \sim 100 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ ABA 处理对番茄抗冷性有一定的作用。本研究表明, ABA 提高冬油菜幼苗抗寒性的效果与其浓度密切相关, 在一定浓度范围内 ABA 提高冬油菜幼苗抗寒性的效果显著, 但浓度过高效果不再明显, 综合各个生理指标的变化, ABA 浓度为 $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时对冬油菜抗寒性诱导效果最佳。

参考文献:

- [1] 王学芳, 孙万仓, 李 芳, 等. 中国西部冬油菜种植的生态效应评价[J]. 应用生态学报, 2009, 20(3): 647-652.
- [2] 徐文玲, 王翠花, 牟晋华, 等. 不同浓度脱落酸对大白菜抗冷特性的影响[J]. 山东农业科学, 2012, 44(1): 47-50.
- [3] Jiang M Y, Zhang J H. Water stress-induced abscisic acid accumulation triggers the increased generation of reactive oxygen species and up-regulates the activities of antioxidant enzymes in maize leaves[J]. Journal of Experimental Botany, 2002, 53: 2401-2410.
- [4] 陈 娟. 干旱胁迫和外源 ABA 对生姜生长和根际效应的影响研究[D]. 成都: 四川大学, 2007.
- [5] Agarwal S, Sairam R K, Srivastava G C, et al. Changes in antioxidant enzymes activity and oxidative stress by abscisic acid and salicylic acid in wheat genotypes[J]. Biologia Plantarum, 2005, 49(4): 541-550.
- [6] Takeshi F, Julia B S. Ethylene - A key regulator of submergence responses in rice[J]. Plant Science, 2008, 175: 43-51.
- [7] 罗立津, 徐福乐, 翁华钦, 等. 脱落酸对甜椒幼苗抗寒性的诱导效应及其机理研究[J]. 西北植物学报, 2011, 31(1): 94-100.
- [8] 党秋玲, 余 超, 王祯丽. ABA 处理种子对加工番茄幼苗抗寒力及相关生理指标的影响[J]. 石河子大学学报(自然科学版), 2005, 23(3): 349-351.
- [9] 郭 确, 潘瑞炽. ABA 对水稻幼苗抗冷性的影响[J]. 植物生理学报, 1984, 10(4): 295-299.
- [10] 周碧燕, 郭振飞. ABA 及其合成抑制剂对柱花草抗冷性及抗氧化酶活性的影响[J]. 草业学报, 2005, 14(6): 94-99.
- [11] 于 晶, 张 林, 苍 晶, 等. 外源 ABA 对寒地冬小麦东农冬麦 1 号幼苗生长及抗冷性的影响[J]. 麦类作物学报, 2008, 28(5): 883-887.
- [12] 江福英, 李 延, 翁伯琦. 植物低温胁迫及其抗性生理[J]. 福建农业学报, 2002, 17(3): 190-195.
- [13] 李合生. 植物生理生化原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [14] 潘瑞炽. 植物生理学(第四版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001: 281-282.
- [15] 刘德兵, 魏军亚, 崔百明, 等. 脱落酸对香蕉幼苗抗寒性的影响[J]. 热带作物学报, 2007, 28(2): 1-4.
- [16] 李艳军. 外源化学物质诱导对番茄苗期抗冷性的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2005.
- [17] Chen H H, Li D H. Plant Cold hardness and freezing stress[M]. New York: Academic Press, 1982.
- [18] Foyer C H, Noctor G. Oxygen processing in photosynthesis: Regulation and signaling[J]. New Phytologist, 2000, 146(3): 359-388.
- [19] Mittler R. Oxidative stress, antioxidants and stress tolerance[J]. Trends in Plant Science, 2002, 7: 405-410.
- [20] Lyons J M. Chilling injury in plants[J]. Ann Rev Plant Physical, 1973, 24: 445-448.
- [21] 蒲高斌, 张 凯, 张陆阳, 等. 外源 ABA 对西瓜幼苗抗冷性和某些生理指标的影响[J]. 西北农业学报, 2011, 20(1): 133-136.
- [22] 蔡世英, 周倩苹, 潘秋红. 脱落酸对咖啡幼苗抗冷性的效应[J]. 热带作物学报, 1990, 11(2): 69-78.
- [23] 郭凤领, 卢育华, 李宝光. 外源 ABA 对番茄苗期和开花期抗冷特性的影响[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2000, 31(4): 357-362.