

范军强,路晓明,王会文,等. 低温胁迫下甘蓝型冬油菜抗寒性与叶片激素含量的关联性[J].江苏农业学报,2023,39(1):15-21.  
doi:10.3969/j.issn.1000-4440.2023.01.002

# 低温胁迫下甘蓝型冬油菜抗寒性与叶片激素含量的关联性

范军强<sup>1,2</sup>, 路晓明<sup>1,2</sup>, 王会文<sup>1,2</sup>, 武军艳<sup>1,2</sup>, 刘丽君<sup>2</sup>, 马 骊<sup>2</sup>, 蒲媛媛<sup>1,2</sup>,  
李学才<sup>1,2</sup>, 孙万仓<sup>1,2</sup>

(1.甘肃农业大学农学院,甘肃 兰州 730070; 2.省部共建干旱生境作物学国家重点实验室,甘肃 兰州 730070)

**摘要:** 为探究不同抗寒性甘蓝型冬油菜在应对低温胁迫时内源激素含量的变化,并阐明其抗寒性与叶片激素含量的关联性,选用感温性差异较大的4个甘蓝型冬油菜品种(品系),分别于4℃及0℃处理不同时间后测定植株叶片内玉米素(Zeatin,ZT)、赤霉素(Gibberellin A<sub>3</sub>,GA<sub>3</sub>)、水杨酸(Salicylic acid,SA)、生长素(Indole-3-acetic acid,IAA)和脱落酸(Absciscic acid,ABA)5种内源激素的含量,并联系抗寒性评价指标进行相关性分析。结果表明,与对照(24℃)相比,低温处理后甘蓝型冬油菜叶片中IAA、ZT、GA<sub>3</sub>含量显著降低,ABA含量较对照(24℃)上升2~3倍,不同品种(品系)SA含量增幅差异较大。相关性分析结果表明,ABA、IAA、GA<sub>3</sub>、SA含量的耐寒系数与抗寒性呈显著负相关。总之,内源激素含量会随外界温度变化而变化,且强抗寒性甘蓝型冬油菜品种(品系)叶片中激素含量的变化(上升或下降)幅度小于弱抗寒性品种(品系)。

**关键词:** 甘蓝型冬油菜; 低温胁迫; 半致死温度; 内源激素; 抗寒性

**中图分类号:** S565.401 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2023)01-0015-07

## Association between cold resistance and leaf hormone content of *Brassica napus* L. under low temperature stress

FAN Jun-qiang<sup>1,2</sup>, LU Xiao-ming<sup>1,2</sup>, WANG Hui-wen<sup>1,2</sup>, WU Jun-yan<sup>1,2</sup>, LIU Li-jun<sup>2</sup>, MA Li<sup>2</sup>,  
PU Yuan-yuan<sup>1,2</sup>, LI Xue-cai<sup>1,2</sup>, SUN Wan-cang<sup>1,2</sup>

(1.College of Agronomy,Gansu Agricultural University,Lanzhou 730070, China; 2.State Key Laboratory of Aridland Crop Science, Lanzhou 730070, China)

**Abstract:** To study the changes of endogenous plant hormone content in *Brassica napus* L. varieties (strains) with different cold resistance under low temperature stress, and to clarify the correlation between their cold resistance and leaf hormone content, four *B. napus* L. varieties (strains) with great difference in temperature sensitivity were selected and were treated at 4℃, 0℃ for different times, respectively. Then contents of five endogenous hormones in the leaves of the plants were detected, such as zeatin (ZT), gibberellin A<sub>3</sub>(GA<sub>3</sub>), salicylic acid (SA), indole-3-acetic acid (IAA) and absciscic acid (ABA), and correlation analysis was made with evaluation indexes of cold resistance. The results showed that, compared with the control (24℃), contents of IAA, ZT and GA<sub>3</sub> in leaves of *B. napus* L. decreased significantly after low temperature treatment, and content of ABA increased by two to three times. The increase amplitude of SA content in different varieties (strains) of *B. napus* L. was

different. Results of correlation analysis showed that, the cold resistance coefficients of ABA, IAA, GA<sub>3</sub> and SA contents were significantly negatively correlated with cold resistance. In conclusion, the endogenous hormone content changes with the change of external temperature, and the change (increase or decrease) of hormone content in leaves of *B. napus* L. varieties (strains) with strong cold resistance was less than that of varieties(strains) with weak cold resistance.

收稿日期:2022-04-20

基金项目:甘肃农业大学干旱生境作物学重点实验室主任基金项目  
(GSCS-2020-Z1);国家现代农业产业技术体系项目(CARS-  
12);国家自然科学基金项目(31860388,31960435)

作者简介:范军强(1998-),男,甘肃通渭人,硕士研究生,研究方向  
为作物遗传育种。(E-mail)2260651693@qq.com

通讯作者:孙万仓,(E-mail)18293121851@163.com

**Key words:** *Brassica napus* L.; low temperature stress; Semi-lethal temperature; Endogenous auxin; cold resistance; Correlation analysis

低温逆境下植物内源激素会调控相关结构的建成与功能表达<sup>[1]</sup>,同时在植物适应逆境的过程中发挥重要作用。冬油菜种植区在向天水市以西、以北方向扩展的过程中,最早实施的就是甘蓝型冬油菜<sup>[2]</sup>。随着北移工作的推进,甘蓝型冬油菜作为蜜源植物、油料作物和观赏作物,具有极大的经济价值与生态价值<sup>[3]</sup>。冷胁迫后植物内源激素含量会发生明显变化<sup>[4]</sup>,脱落酸(Abscicic acid,ABA)在低温环境下会大量合成<sup>[5]</sup>,这会引起相关抗逆蛋白质的合成<sup>[6]</sup>。多数学者认为植物激素是抗寒基因表达的启动因素<sup>[7]</sup>。阐明低温下抗寒性与激素调控的关系,将为推动冬油菜越冬研究提供新方向。本研究选取感温性差异较大的 4 个甘蓝型冬油菜品种,低温处理后测定内源激素水平及叶片低温半致死温度,以探究甘蓝型冬油菜抗寒性与叶片激素含量的关联性。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

选取 4 个感温性不同的甘蓝型冬油菜品种作为试验材料,详见表 1。

表 1 试验材料基本情况

Table 1 Basic situation of experiment materials

品种(品系)	类型	感温性	选育单位
gau-24	甘蓝型冬油菜	强冬性	甘肃农业大学
gau-30	甘蓝型冬油菜	强冬性	甘肃农业大学
天油 2266	甘蓝型冬油菜	半冬性	天水市农业科学研究所
天油 2288	甘蓝型冬油菜	弱冬性	天水市农业科学研究所

内源激素含量测定使用四元梯度超快速液相色谱仪(型号:ACQUITY Arc)。5 种植物内源激素标准品玉米素(Zeatin,ZT)、赤霉素(Gibberellin A<sub>3</sub>,GA<sub>3</sub>)、水杨酸(Salicylic acid,SA)、生长素(Indole-3-acetic acid,IAA)和脱落酸(Abscicic acid,ABA),均采购于上海源叶生物科技有限公司。流动相溶液乙腈(色谱专用)、甲醇(色谱专用)、磷酸(分析纯),均采购于上海西格玛奥德里奇贸易有限公司。

### 1.2 试验设计

试验材料以盆栽方式进行种植。各品种种子在

2021 年 8 月 21 日于培养皿中进行萌发,并于 2021 年 8 月 25 日统一移栽。移栽选用直径为 25 cm、高度为 12 cm 的树脂花盆。每盆装入已加水搅拌均匀的育苗基质 4 kg,每盆设置 3 穴,每穴 2 株苗,株距 10 cm,放置于自然条件下生长,地点位于甘肃农业大学。两叶一心期进行间苗,每穴定苗一株,待长至六叶期进行下一步试验。种植期间的栽培管理措施按常规方法进行。

试验共设置 5 个处理,分别为 24 ℃ 处理 12 h、0 ℃ 处理 1 h、0 ℃ 处理 12 h、4 ℃ 处理 1 h 和 4 ℃ 处理 12 h(全部盆栽均先置于 24 ℃ 培养 12 h)。处理过程中尽量保证光照及水分条件的一致。

处理结束后快速取出盆栽并采样,每株展开的第 2 张叶用于内源激素含量的测定,第 3 张叶用于低温半致死温度的测定。

### 1.3 测定项目及方法

1.3.1 半致死温度(LT<sub>50</sub>)的测定 试验材料于 24 ℃ 培养 12 h 后,用打孔器在展开的第 3 张叶上打 3 个直径为 5 mm 的叶圆片(避开叶脉)。将打好的 3 个叶圆片装入 10 ml 离心管中并加入 0.2 ml 去离子水,对照只加入去离子水,分别置于 0 ℃、-4 ℃、-8 ℃、-12 ℃、-16 ℃ 条件下处理 30 min,每个温度下设置 3 个重复。取出后再加入 10 ml 去离子水,室温振荡 1 h 后使用电导仪测出电导率(C1),测得对照电导率为 C0。最后置于 120 ℃ 烘箱中煮沸 20 min,取出冷却至室温后定容至 10.2 ml,测出电导率(C2),按公式计算相对电导率,相对电导率(REC)=(C1-C0)/(C2-C0)×100%。

### 1.3.2 高效液相色谱(HPLC)法测定内源激素

1.3.2.1 激素的提取 称取 0.5 g 新鲜叶片,加入液氮快速充分研磨成粉末。加入 4 ℃ 预冷后的 80%(体积分数)甲醇(色谱专用)5 ml,使用超声波清洗仪于 22 ℃ 处理 2 min,振荡混匀,置于 4 ℃ 浸提 12 h。浸提结束后于 4 ℃、10 000 r/min 离心 10 min,吸取上清液 3 ml 转移至新离心管,使用真空离心浓缩仪完全浓缩至无液体残留。加入 1 ml 80%(体积分数)甲醇(色谱专用),振荡混匀(保证提取物完全溶解于甲醇溶液),过 0.22 μm 有机滤膜,样品制备完成。

1.3.2.2 标准品的配制 准确称取 5 种激素的标准品,配制成 10 μg/ml 的高质量浓度单个标准品,用于出峰时间的确定及混合标准品的配制。将配制好的高质量浓度单个标准品混合稀释为 1 μg/L、95 μg/L、100 μg/L、200 μg/L、300 μg/L、400 μg/L、600 μg/L、800 μg/L、1 000 μg/L 的梯度混合标准品,用于绘制各激素的标准曲线。

1.3.2.3 内源激素的测定方法 色谱柱 C<sub>18</sub>W 柱,流动相由甲醇与 0.1% 磷酸按 1 : 9 的体积比例混合配制而成(超声波处理 15 min 脱气),检测波长 280 nm,流速 1 ml/min,柱温 30 ℃,进样量 10 μl,单个样品检测时间 30 min。

1.4 数据处理及分析方法

1.4.1 Logistic 回归方程分析 对测定的相对电导率进行 Logistic 回归分析,回归模型为:

$$Y = \frac{k}{1 + ae^{bt}}$$

其中,Y 为相对电导率,t 为处理温度,k 为细胞伤害率的饱和容量,a、b 为方程参数。因本试验中细胞伤害率消除了干扰,故 k=100。为确定 a、b 值,将 Logistic 方程转化为:

$$\ln\left(\frac{k-y}{y}\right) = \ln a - bt, \text{ 令 } Y' = \ln\left(\frac{k-y}{y}\right)$$

则方程转化为 Y' 与 t 之间的线性方程,即:

$$Y' = \ln a - bt$$

半致死温度计算公式为:

$$LT_{50} = \frac{\ln a}{b}$$

1.4.2 激素水平的计算方法 标准曲线的绘制:使用 10 μg/ml 的高质量浓度单个标准品确定每种激素的出峰时间,使用梯度质量浓度的混合标准品确定 5 种激素峰面积与质量浓度的线性关系,并绘制标准曲线。依据标准曲线得到样品质量浓度,通过公式计算叶片激素含量: $M = C \times V / M_s$ ,其中 V 是定容体积,M<sub>s</sub>是样品质量,C 为依据标准曲线得到的激素浓度,M 为最终叶片激素含量。单项指标耐寒系数(K)= 低温测定值/常温测定值。

2 结果与分析

2.1 甘蓝型冬油菜叶片半致死温度

相对电导率可表示细胞膜透性,离体叶片在一定温度范围内的渗透情况具有反映细胞膜受伤程度的作用。当处理温度低于半致死温度时,植物将受到不可逆的伤害,相对电导率快速升高。低温半致死温度的高低是反映植物抗寒性强弱的重要指标。根据 LT<sub>50</sub>测定结果(表 2)鉴定 4 个油菜品种(品系)的抗寒性强弱为 gau-24>gau-30>天油 2288>天油 2266,决定系数为 0.86~0.93,可用于进一步分析。

表 2 不同低温下甘蓝型冬油菜叶片相对电导率及 Logistic 拟合方程

Table 2 Relative electrolytic conductivity and Logistic equation of leaves of Brassica napus L. under different low temperature treatments

品种(品系)	相对电导率(%)					回归方程	决定系数(R <sup>2</sup> )	半致死温度(℃)	抗寒性排序
	0 ℃	-4 ℃	-8 ℃	-12 ℃	-16 ℃				
天油 2266	15.62	28.52	84.22	86.49	89.93	$Y = 100 / (1 + 2.992 \cdot 0e^{0.239 \cdot 1x})$	0.87	-4.58	4
天油 2288	15.14	28.52	85.86	86.97	91.27	$Y = 100 / (1 + 4.536 \cdot 0e^{0.274 \cdot 1x})$	0.87	-5.52	3
gau-24	13.22	15.72	34.84	83.44	91.57	$Y = 100 / (1 + 11.051 \cdot 0e^{0.295 \cdot 7x})$	0.93	-8.12	1
gau-30	17.12	22.72	26.43	85.83	92.42	$Y = 100 / (1 + 8.506 \cdot 0e^{0.279 \cdot 5x})$	0.86	-7.66	2

x 为峰面积,Y 为激素浓度。

2.2 标准曲线的绘制及回归方程的建立

对单个标准品进行色谱分析,ZT 出峰时间为 5.084 min,GA<sub>3</sub> 出峰时间为 6.540 min,SA 出峰时间为 7.306 min,IAA 出峰时间为 8.039 min,ABA 出峰时间为 8.985 min。对照出峰时间获得各激素梯度浓度的峰面积,求得各激素浓度与峰面积的线性关系(表 3)。

2.3 不同抗寒性甘蓝型冬油菜激素含量

0 ℃、4 ℃测得的激素含量分别列于表 4、表 5。

表 3 5 种植物激素浓度与峰面积的线性关系

Table 3 Linear relationship between concentration of five plant hormones and peak area

植物激素	标准曲线	决定系数(R <sup>2</sup> )
ZT	$Y = 0.014 \cdot 7x + 12.042 \cdot 0$	0.995 4
GA <sub>3</sub>	$Y = 0.020 \cdot 0x + 30.801 \cdot 0$	0.993 8
SA	$Y = 0.013 \cdot 4x + 18.537 \cdot 0$	0.993 7
IAA	$Y = 0.021 \cdot 4x + 32.685 \cdot 0$	0.990 6
ABA	$Y = 0.027 \cdot 4x + 33.481 \cdot 0$	0.994 9

x 为峰面积,Y 为激素浓度。ZT 为玉米素;GA<sub>3</sub> 为赤霉素;SA 为水杨酸;IAA 为生长素;ABA 为脱落酸。

分析发现部分激素含量在不同处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。随低温 ( $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  及  $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) 处理时间的增加, ABA/IAA 值、ABA/ZT 值、ABA/GA<sub>3</sub> 值、IAA/GA<sub>3</sub> 值表现出增大趋势,各激素间协同作用明显。

表 4  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  甘蓝型冬油菜叶片中内源激素含量及比值

Table 4 Content and ratio of endogenous hormones in leaves of *Brassica napus* L. at  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$

处理	品种 (品系)	内源激素含量 ( $\mu\text{g/g}$ )					内源激素含量比值			
		ZT	GA <sub>3</sub>	SA	IAA	ABA	ABA/IAA	ABA/ZT	ABA/GA <sub>3</sub>	IAA/GA <sub>3</sub>
24 $^{\circ}\text{C}$ 12 h	天油 2266	17.02±4.37a	155.36±4.61a	36.83±15.04a	37.72±15.65a	6.55±2.62a	0.17	0.38	0.04	0.24
	天油 2288	16.12±0.53a	151.93±0.97a	30.76±40.09a	50.28±17.48a	6.16±2.87a	0.12	0.38	0.04	0.33
	gau-24	19.22±0.91a	141.18±22.76a	43.03±11.54a	37.90±6.80a	6.73±5.33a	0.18	0.35	0.05	0.27
	gau-30	20.04±3.96a	160.54±19.54a	31.26±13.39a	40.58±9.07a	6.49±4.46a	0.16	0.32	0.04	0.25
0 $^{\circ}\text{C}$ 1 h	天油 2266	12.35±4.94a	69.57±2.35b	60.70±19.03a	13.24±9.18a	17.33±3.61a	1.31	1.40	0.25	0.19
	天油 2288	12.58±4.31a	70.30±6.01b	42.80±21.90a	15.25±6.40a	15.05±4.56a	0.99	1.20	0.21	0.22
	gau-24	15.56±3.94a	87.20±3.46a	74.89±44.56a	29.82±4.41a	9.96±1.78a	0.33	0.64	0.11	0.34
	gau-30	17.25±3.51a	56.73±9.56b	68.89±89.23a	18.81±7.18a	10.37±4.93a	0.55	0.60	0.18	0.33
0 $^{\circ}\text{C}$ 12 h	天油 2266	9.30±2.10a	13.64±6.60a	100.60±29.19bc	6.02±2.90a	22.88±2.20a	3.80	2.46	1.68	0.44
	天油 2288	11.78±1.17a	18.08±5.79a	60.20±17.17c	8.31±1.36a	20.59±3.69a	2.48	1.75	1.14	0.46
	gau-24	11.04±9.97a	30.55±7.55a	141.65±18.36ab	15.51±4.32a	29.71±2.75a	1.92	2.69	0.97	0.51
	gau-30	14.32±2.54a	28.98±9.21a	175.30±8.83a	18.70±9.60a	26.31±5.19a	1.41	1.84	0.91	0.65

不同小写字母表示同一处理不同品种间在 0.05 水平下差异显著。ZT 为玉米素;GA<sub>3</sub> 为赤霉素;SA 为水杨酸;IAA 为生长素;ABA 为脱落酸。

表 5  $4\text{ }^{\circ}\text{C}$  甘蓝型冬油菜叶片中内源激素含量及比值

Table 5 Content and ratio of endogenous hormones in leaves of *Brassica napus* L. at  $4\text{ }^{\circ}\text{C}$

处理	品种 (品系)	内源激素含量 ( $\mu\text{g/g}$ )					内源激素含量比值			
		ZT	GA <sub>3</sub>	SA	IAA	ABA	ABA/IAA	ABA/ZT	ABA/GA <sub>3</sub>	IAA/GA <sub>3</sub>
24 $^{\circ}\text{C}$ 12 h	天油 2266	15.84±5.95a	207.86±8.72a	49.63±21.24a	46.21±5.96a	6.85±4.60a	0.15	0.43	0.03	0.22
	天油 2288	18.78±6.55a	162.92±41.44a	39.37±37.22a	38.06±12.06a	7.60±6.08a	0.20	0.40	0.05	0.23
	gau-24	19.00±8.35a	198.96±2.85a	36.86±17.30a	52.08±20.31a	5.62±2.31a	0.11	0.30	0.03	0.26
	gau-30	21.25±6.36a	200.44±31.21a	39.87±8.58a	50.35±30.89a	6.64±2.28a	0.13	0.31	0.03	0.25
4 $^{\circ}\text{C}$ 1 h	天油 2266	12.03±3.16a	126.25±39.12a	52.52±6.13a	32.21±15.53a	14.82±3.55a	0.46	1.23	0.12	0.26
	天油 2288	16.13±1.99a	77.23±25.44a	52.40±44.31a	19.86±15.23a	6.15±1.77b	0.31	0.38	0.08	0.26
	gau-24	15.66±7.04a	99.35±3.64a	37.33±21.14a	39.58±17.48a	8.91±1.23ab	0.23	0.57	0.09	0.40
	gau-30	18.41±4.66a	109.00±23.15a	35.26±12.73a	25.57±6.98a	9.65±2.84ab	0.38	0.52	0.09	0.23
4 $^{\circ}\text{C}$ 12 h	天油 2266	11.79±5.20a	42.87±12.92b	57.77±17.83a	25.97±12.38a	18.78±3.87a	0.72	1.59	0.44	0.61
	天油 2288	9.34±1.37a	39.20±8.73b	52.32±25.67a	20.36±3.25a	14.69±4.11a	0.72	1.57	0.37	0.52
	gau-24	14.82±7.76a	64.11±4.96a	75.28±7.50a	36.87±10.25a	22.07±4.53a	0.60	1.49	0.34	0.58
	gau-30	17.58±7.25a	57.67±3.71ab	67.38±10.01a	30.76±13.48a	23.99±2.91a	0.78	1.36	0.42	0.53

不同小写字母表示同一处理不同品种间在 0.05 水平下差异显著。ZT 为玉米素;GA<sub>3</sub> 为赤霉素;SA 为水杨酸;IAA 为生长素;ABA 为脱落酸。

## 2.4 不同水平低温对甘蓝型冬油菜内源激素含量的影响

4 个甘蓝型冬油菜品种(品系)内源激素对低温胁迫的响应如图 1 所示。与对照( $24\text{ }^{\circ}\text{C}$ )相比, $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  处理 12 h 后 ZT 含量平均降幅为 35.84%,高于  $4\text{ }^{\circ}\text{C}$

处理的平均降幅(28.79%)。GA<sub>3</sub> 含量随低温处理时间延长呈下降趋势,gau-24 在  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  处理 12 h 后降至 30.55  $\mu\text{g/g}$ ,高于天油 2288(18.08  $\mu\text{g/g}$ )。gau-30 在  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  处理 12 h 后 SA 含量与对照相比增加 460.82%,天油 2288 增幅仅为 95.71%。在  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  处

理 12 h 后平均 IAA 含量为 12.13  $\mu\text{g/g}$ , 低于 4  $^{\circ}\text{C}$  处理 12 h 后的平均含量 (28.49  $\mu\text{g/g}$ )。在 4  $^{\circ}\text{C}$  及 0  $^{\circ}\text{C}$  处理后 ABA 含量明显上升, gau-24 的 ABA 含量在 0  $^{\circ}\text{C}$  处理 12 h 后自 CK 的 6.73  $\mu\text{g/g}$  上升至 29.71  $\mu\text{g/g}$ , 增加了 341.46%, 高于天油 2266 及天油 2288 在 0  $^{\circ}\text{C}$  处理 12 h 后的增幅。0  $^{\circ}\text{C}$  处理 12 h

后 ABA 含量平均增幅为 282.63%, 4  $^{\circ}\text{C}$  处理 12 h 后 ABA 含量平均增幅为 205.31%, 0  $^{\circ}\text{C}$  上升幅度较 4  $^{\circ}\text{C}$  大。总体上看, 5 种内源激素含量随低温处理强度变化而变化, 低温处理后 ZT、GA<sub>3</sub>、IAA 含量下降, SA 及 ABA 含量升高, 且 4  $^{\circ}\text{C}$  处理的增加或下降幅度小于 0  $^{\circ}\text{C}$ 。

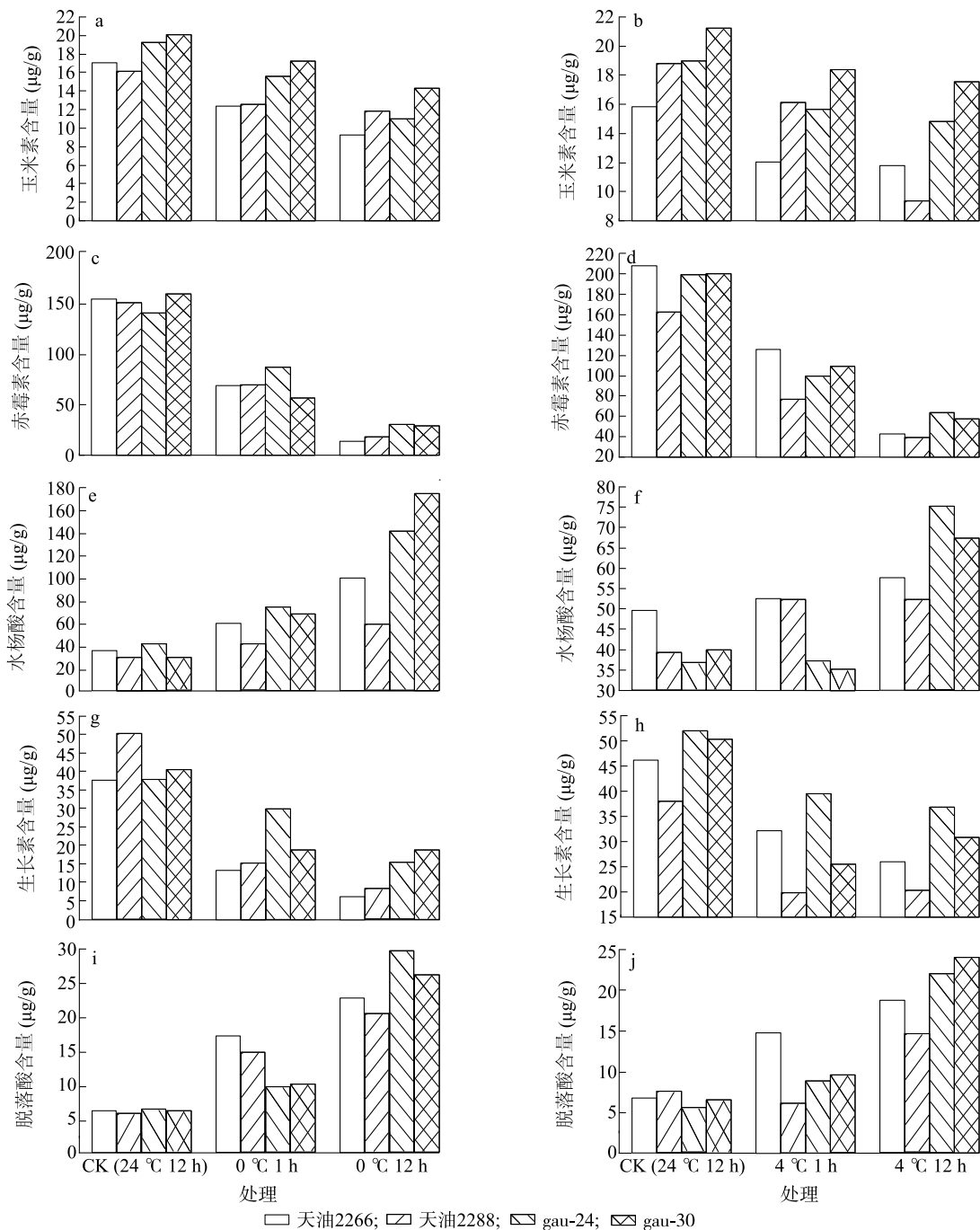


图1 低温连续处理后甘蓝型冬油菜叶片内源激素含量的变化

Fig.1 Changes of endogenous hormone content in leaves of *Brassica napus* L. after continuous low temperature treatment



## 2.5 低温胁迫后不同抗寒性甘蓝型冬油菜叶片激素含量与抗寒性的关系

0 ℃ 及 4 ℃ 处理 12 h 后甘蓝型冬油菜叶片 5 种

内源激素含量及比值的耐寒系数分别列于表 6、表 7。ZT、GA<sub>3</sub>、IAA 的 K 值均小于 1.000, SA、ABA 的 K 值均大于 1.000。

表 6 0 ℃ 甘蓝型冬油菜叶片中内源激素含量及比值的耐寒系数

Table 6 Cold resistance coefficient of endogenous hormone content and ratio in *Brassica napus* L. leaves at 0 ℃

品种(品系)	ZT	GA <sub>3</sub>	SA	IAA	ABA	ABA/IAA 值	ABA/ZT 值	ABA/GA <sub>3</sub> 值	IAA/GA <sub>3</sub> 值
天油 2266	0.547	0.088	1.164	0.160	3.496	21.903	6.396	39.803	1.817
天油 2288	0.731	0.119	1.329	0.165	3.340	20.216	4.571	28.073	1.389
gau-24	0.575	0.216	2.043	0.409	4.415	10.785	7.683	20.403	1.892
gau-30	0.715	0.181	1.690	0.461	4.055	8.800	5.673	22.459	2.552

ZT 为玉米素; GA<sub>3</sub> 为赤霉素; SA 为水杨酸; IAA 为生长素; ABA 为脱落酸。

表 7 4 ℃ 甘蓝型冬油菜叶片中内源激素含量及比值的耐寒系数

Table 7 Cold resistance coefficient of endogenous hormone content and ratio in *Brassica napus* L. leaves at 4 ℃

品种(品系)	ZT	GA <sub>3</sub>	SA	IAA	ABA	ABA/IAA 值	ABA/ZT 值	ABA/GA <sub>3</sub> 值	IAA/GA <sub>3</sub> 值
天油 2266	0.744	0.206	2.731	0.562	2.740	4.874	3.681	13.283	2.725
天油 2288	0.497	0.241	1.957	0.535	1.932	3.611	3.885	8.030	2.224
gau-24	0.780	0.322	3.292	0.708	3.926	5.546	5.034	12.185	2.197
gau-30	0.827	0.288	5.608	0.611	3.614	5.917	4.370	12.562	2.123

ZT 为玉米素; GA<sub>3</sub> 为赤霉素; SA 为水杨酸; IAA 为生长素; ABA 为脱落酸。

利用半致死温度与 9 个内源激素相关指标的耐寒系数之间的相关性确定甘蓝型冬油菜抗寒性与叶片激素含量的关联性。0 ℃ 处理 12 h 后, 与半致死温度相关性显著或极显著的指标有 GA<sub>3</sub> 含量、SA 含量、IAA 含量、ABA 含量、ABA/IAA 值、ABA/GA<sub>3</sub> 值

的耐寒系数, 4 ℃ 处理 12 h 后, 与半致死温度显著或极显著相关的指标仅有 GA<sub>3</sub> 含量和 ABA/ZT 值的耐寒系数, GA<sub>3</sub> 在 0 ℃ 及 4 ℃ 处理后 12 h 后均与半致死温度极显著相关(表 8)。

表 8 5 种内源激素含量耐寒系数与半致死温度(LT<sub>50</sub>)的相关性

Table 8 Correlation between cold resistance coefficient of five endogenous hormones and semi-lethal temperature (LT<sub>50</sub>)

处理	ZT	GA <sub>3</sub>	SA	IAA	ABA	ABA/IAA 值	ABA/ZT 值	ABA/GA <sub>3</sub> 值	IAA/GA <sub>3</sub> 值
0 ℃ 12 h	-0.149	-0.991 **	-0.964 *	-0.947 *	-0.920 *	0.965 *	-0.452	0.938 *	-0.575
4 ℃ 12 h	-0.525	-0.985 **	-0.636	-0.839	-0.823	-0.689	-0.935 *	-0.193	0.795

采用 Pearson 相关系数计算, \*\* 代表在 0.01 水平下极显著相关, \* 代表在 0.05 水平下显著相关。ZT 为玉米素; GA<sub>3</sub> 为赤霉素; SA 为水杨酸; IAA 为生长素; ABA 为脱落酸。

## 3 讨论与结论

生长促进型激素和生长抑制型激素对于低温的响应趋势不同<sup>[8]</sup>。低温处理下云雾贡茶 IAA 含量下降明显<sup>[9]</sup>。Yamada 等<sup>[10]</sup>在 5 ℃ 低温处理的积砧叶片中未检测出细胞分裂素。本试验在 0 ℃ 处理 12 h 后的甘蓝型冬油菜叶片中虽能检测出玉米素(细胞分裂素的一种), 但含量降幅显著。严寒静等<sup>[11]</sup>发现, 梔子叶片中 GA<sub>3</sub> 含量在自然降温过程中下降明显。低温会促进植物体内脱落酸水平升高,

环境温度降低后油菜叶片中脱落酸水平会不断升高<sup>[12]</sup>。番茄在感受夜间低温后, 脱落酸升高至白天的 1.5 倍<sup>[13]</sup>。李亮等<sup>[14]</sup>认为, 低温胁迫后 SA 的积累影响黄瓜幼苗对低温的响应。本研究发现, 0 ℃ 处理 12 h 后油菜叶片中 ABA 含量较对照(24 ℃ 处理 12 h)上升 2~3 倍, SA 含量也表现增长趋势。

低温处理后抗寒性强的番茄品种 ABA 含量高于抗寒性弱的品种<sup>[15]</sup>。不同抗寒性油棕品种在 10 ℃ 低温下叶片中的 ABA 含量变化与番茄相同<sup>[16]</sup>。王兴等<sup>[17]</sup>认为, 强抗寒性冬小麦品种能在低温下较

长时间维持高水平的 IAA 含量。本试验证明,抗寒性越弱的品种叶片中 ABA 含量在 0 ℃ 处理前后的相对上升幅度越小,IAA 含量在低温处理后降幅越小,抗寒性越强。*ABA/IAA* 值的耐寒系数与抗寒性显著相关,证明 ABA 与 IAA 的协同作用与抗寒性也有关系,在葡萄中有相似结论,曲凌慧等<sup>[18]</sup>认为,强抗寒性品种叶片中 *ABA/IAA* 值较高。

植物会响应外界低温环境从而改变内源激素的含量<sup>[19-23]</sup>,强抗寒性甘蓝型冬油菜品种叶片中生长促进型激素含量下降幅度小于弱抗寒性品种,生长抑制型激素含量上升幅度大于弱抗寒性品种。相关性分析结果表明,低温处理后  $GA_3$  含量的相对变化可作为抗寒性评价的稳定指标。

#### 参考文献:

- [1] 董志强,舒文华,翟学军,等. 棉株不同器官中几种内源激素的变化及相关关系[J]. 核农学报, 2005, 19(1): 62-67.
- [2] 武军艳,孙万仓,杨 杰,等. 不同覆盖处理对甘肃中部地区甘蓝型冬油菜越冬率及产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28(3): 96-99.
- [3] 孙万仓,裴新梧,马 骊,等. 我国北方冬季覆盖作物研究进展及发展前景[J]. 中国农业科技导报, 2022, 24(1): 128-136.
- [4] 田小霞,孟 林,毛培春,等. 低温条件下不同抗寒性薰衣草内源激素的变化[J]. 植物生理学报, 2014, 50(11): 1669-1674.
- [5] 宋运贤,周素英,杜雪玲,等. 低温预处理对小麦花药内源激素的影响[J]. 核农学报, 2012, 26(7): 1064-1069.
- [6] 尚忠林,傅晓瑞,李云荫. 干旱和 ABA 对同核异质冬小麦叶片蛋白的影响[J]. 西北植物学报, 2001, 22(6): 99-103, 257-259.
- [7] 罗 斌,赵卫国,李保军,等. 我国白菜型冬油菜与甘蓝型冬油菜抗寒性研究进展[J]. 陕西农业科学, 2017, 63(9): 80-83.
- [8] 许耀照,孙万仓,方 彦,等. 自然低温下白菜型冬油菜内源激素和总多酚含量的变化[J]. 核农学报, 2020, 34(7): 1551-1560.
- [9] 王 莹,李 岩,王 姝,等. 低温胁迫下贵州云雾贡茶生长调节剂的变化[J]. 湖北农业科学, 2020, 59(8): 99-102.
- [10] YAMADA H, MUKAI H, UTSUNOMIYA N, et al. The effect of low root temperature on the cold hardiness of citrus species and avocado[J]. Journal of the Japanese Society for Horticultural Science, 1985, 53(4): 419-426.
- [11] 严寒静,谈 锋. 栀子对自然降温的适应性研究[J]. 植物研究, 2006, 48(2): 2238-2241.
- [12] 马学才,方 彦,刘丽君,等. 低温胁迫下不同温敏性油菜保护酶活性及内源激素变化[J]. 甘肃农业大学学报, 2021, 56(3): 86-94.
- [13] DAIE J, CAMPBELL W F. Response of tomato plants to stressful temperatures: increase in abscisic acid concentrations[J]. Plant Physiology, 1981, 1: 9-26.
- [14] 李 亮,董春娟,尚庆茂. 内源水杨酸参与黄瓜叶片光合系统对低温胁迫的响应[J]. 园艺学报, 2013, 40(3): 487-497.
- [15] 乔志霞. 番茄内源激素含量与其耐温度胁迫的关系[D]. 北京: 中国农业大学, 2004.
- [16] 刘世红,倪书邦,魏丽萍,等. 油棕抗寒性与内源激素的关系[J]. 中国农学通报, 2015, 31(21): 144-148.
- [17] 王 兴,于 晶,杨 阳,等. 低温条件下不同抗寒性冬小麦内源激素的变化[J]. 麦类作物学报, 2009, 29(5): 827-831.
- [18] 曲凌慧,车永梅,刘 新,等. ABA 和 JA 等激素参与葡萄对低温胁迫的应答[J]. 青岛农业大学学报(自然科学版), 2010, 27(1): 36-41.
- [19] 徐慧敏,郭 磊,马瑞娟,等. 低温冷藏对桃砧木 Nemaguard 种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 江苏农业学报, 2022, 38(1): 200-206.
- [20] 刘 洋,张 洋,范立强,等. *N*-乙酰氨基葡萄糖对水稻的抗寒作用研究[J]. 南方农业学报, 2021, 52(6): 1576-1586.
- [21] 陈芊如,丁蓬勃,胡希好,等. 外源壳寡糖对低温胁迫条件下烟草幼苗的保护作用[J]. 江苏农业科学, 2022, 50(1): 80-85.
- [22] 朱俊杰,王天顺,牙 禹,等. 莴笋叶片低温下积累花青素对光合作用的影响[J]. 南方农业学报, 2021, 52(1): 180-188.
- [23] 张续周,李金秋,陈雪津,等. 低温胁迫下乙酸叶醇酯对茶树耐寒性生理生化的影响[J]. 江苏农业科学, 2021, 49(24): 127-132.

(责任编辑:张震林)