

连 芯,李欣瑀,路紫鑫,等. 表油菜素内酯对镉胁迫下黄瓜生长生理的调控效应[J]. 江苏农业科学,2025,53(11):127-133.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2025.11.018

# 表油菜素内酯对镉胁迫下黄瓜生长生理的调控效应

连 芯<sup>1</sup>,李欣瑀<sup>2</sup>,路紫鑫<sup>2</sup>,韩丽叶<sup>2</sup>,张 波<sup>2</sup>,于 佳<sup>2</sup>,王小云<sup>3</sup>,孙红艳<sup>1,2</sup>

(1. 太原科技大学化学工程与技术学院,山西太原 030024; 2. 太原科技大学环境与资源学院,山西太原 030024;

3. 山西农业大学水土保持科学研究所,山西太原 030013)

**摘要:**为探讨外源表油菜素内酯在镉胁迫条件下对黄瓜幼苗生长生理的调控效应,以黄瓜“津优1号”为供试材料,设置4组处理为对照组、表油菜素内酯、镉、镉+表油菜素内酯,记录生长及生理相关参数。研究结果表明,在镉处理下,黄瓜幼苗的生长受到明显抑制,包括根长、株高、叶绿素含量和光合效率下降,以及蛋白质含量、叶片、茎和根系鲜重及干重减少。然而,当添加外源表油菜素内酯后,和单独镉处理的黄瓜幼苗相比,生长状况和生理指标得到显著改善,根长增加了22.46%、株高增加了29.03%、根系和茎的干重分别增加了39.56%和16.85%;同时,叶绿素含量显著提高,光合作用得到改善,且幼苗叶中的多酚氧化酶活性大幅提升。结果表明,外源表油菜素内酯能有效缓解镉胁迫对黄瓜幼苗的不利影响,不仅促进幼苗的生长,还提高光合色素含量和光合效率,增强植物组织中多酚氧化酶的活性,有助于黄瓜在镉胁迫逆境中保持正常生长和发育,增强其适应能力。

**关键词:**黄瓜;镉胁迫;表油菜素内酯;生长调控

**中图分类号:**S642.201 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2025)11-0127-06

镉(Cd)是一种非必需元素,会对植物产生不利的生理影响;它易于在土壤和植物中积累,一旦进入植物体内,镉往往会从根部快速转移到地上部分<sup>[1]</sup>,对植物造成严重影响,包括生长速度变慢、光合作用受阻,甚至导致细胞死亡等生理问题<sup>[2]</sup>。随着工业化进程的加快,工业废水和废渣中所含的镉污染日益严重。另外,在生产过程中,农药和肥料中也会存在镉的残留量,尤其是纯度不高的产品,更易引起镉的累积;这些化肥和农药的使用,也会进一步加剧土壤中镉的累积<sup>[3]</sup>。城市近郊的蔬菜种植地通常接近工业废水和废渣处理区,这导致了蔬菜中镉等重金属超标的风险增加,可能对它们的正常生长和发育造成严重影响<sup>[4]</sup>。

油菜素内酯(brassinosteroid, BR)是一种在植物体内发现的活性高、采用极低浓度处理植物后可表现出显著的生理效果的第六大植物生长激素,在植

物的正常生长发育和对生物、非生物胁迫适应过程中发挥积极作用<sup>[5]</sup>,能够减少重金属和放射性元素在植物中的累积,改善植物的生理代谢及生长发育,增强其耐性,进而提高作物品质和产量<sup>[6-7]</sup>。研究表明,BR在面面对高盐<sup>[8-9]</sup>、干旱<sup>[10]</sup>、低氧<sup>[11]</sup>、高温<sup>[12]</sup>、低温<sup>[13]</sup>及病菌感染<sup>[14-15]</sup>等多种逆境胁迫时,能有效减轻植物损伤的程度。表油菜素内酯(epibrassinolide, EBR)是一种合成的高活性植物生长调节剂,已经广泛应用于生产。EBR可以减轻逆境引起的氧化性损伤,增加植株的光合作用和生物量。前人研究表明,EBR信号与镉(Cd)存在交互作用,可调节植物对重金属的敏感性,EBR对多种植物在重金属胁迫下具有减缓作用<sup>[17]</sup>。但有关外源表油菜素内酯EBR与黄瓜在镉胁迫条件下耐性的研究却鲜有报道,本研究将黄瓜品种津优1号作为试验对象,研究EBR对镉胁迫下黄瓜生长生理的调控效应,揭示EBR在镉胁迫下的生理调控机制,以期通过EBR缓解镉胁迫的农业应用奠定理论基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验时间和地点

本试验于2024年4月在太原科技大学玻璃温室和植物生理实验室完成。

收稿日期:2024-05-25

基金项目:山西省重点研发计划项目(编号:201903D221066);国家自然科学基金(编号:31401319)。

作者简介:连 芯(1998—),女,山西省长治市人,硕士研究生,主要从事植物逆境生理与调控、生物化学工程等研究。E-mail: xinlian1013@163.com。

通信作者:孙红艳,博士,教授,主要从事植物逆境生理与调控方向研究。E-mail: hongyansun@tyust.edu.cn。

### 1.2 试验材料

本研究采用黄瓜津优 1 号作为研究材料,其种子购自太原市种子分公司;所用化学试剂均采用普通分析纯,购自上海生物工程有限公司。试验所用镉和表油菜素内酯分别以氯化镉( $CdCl_2 \cdot 2.5H_2O$ )和 2,4-表油菜素内酯(EBR)的形式加入。

### 1.3 试验方法与处理

选取健康的黄瓜种子,在 2%  $H_2O_2$  中浸泡 30 min 后采用蒸馏水冲洗 5 次,在蒸馏水里在泡 1 h,然后在发芽盒中沙床发芽。发芽盒放在恒温箱中常规培养,每天光照 10 h,设置白天( $25 \pm 2$ )  $^{\circ}C$ 、晚上( $20 \pm 2$ )  $^{\circ}C$ ,湿度 70%,培养至 2 叶 1 心期;选择生长状况一致的黄瓜幼苗移植入 3 L 的桶内,桶内装有约 2.5 L 的基本营养液,营养液的 pH 值为 ( $6.1 \pm 0.1$ ),并采用通气泵持续为营养液通气。在每个桶的桶盖上均匀地打出 6 个孔,其中,外围 5 个孔移栽入使用海绵轻柔包裹的黄瓜幼苗,每孔移栽 3 株长势均匀的黄瓜幼苗,中间孔用于充气。对黄瓜幼苗水培移植后缓苗培养第 10 天进行如下处理:(1)空白对照,基本营养液;(2)EBR,0.15  $\mu mol/L$  EBR;(3) Cd, 50  $\mu mol/L$   $CdCl_2$ ;(4) Cd + EBR, 50  $\mu mol/L$   $CdCl_2$  + 0.15  $\mu mol/L$  EBR;EBR 于镉处理前 24 h 添加,每组处理设置 3 次重复。处理 10 d 后取样并对相关指标进行测定,所有数据使用 DPS 软件进行方差分析、利用 LSD 法进行多重比较。

### 1.4 分析测定方法

1.4.1 生长指标测定 参照文献[18]中的方法对株高、根长等指标进行测定。生物量相关测定参考

孙红艳等的方法<sup>[19]</sup>,取样并洗净黄瓜幼苗后,将表面水分用吸水纸吸干,使用电子天平准确称重即为鲜重;将幼苗置于烘干箱中,105  $^{\circ}C$  下杀青 0.5 h,之后 65  $^{\circ}C$  烘干至恒重后称重即为干重。

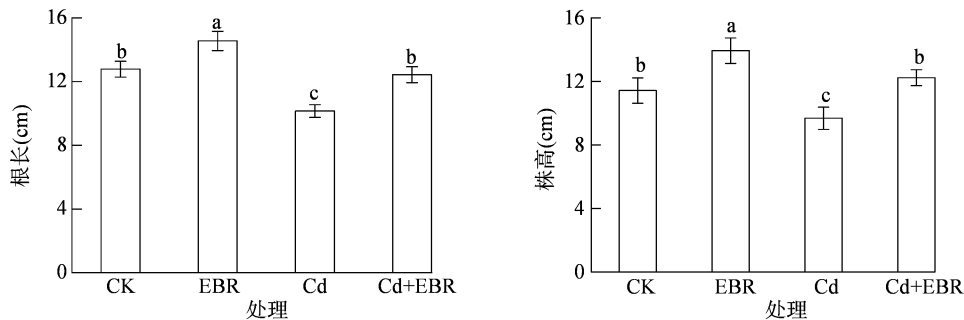
1.4.2 生理指标测定 叶绿素含量采用 Beligni 等的方法<sup>[20]</sup>测定,准确称取新鲜叶片 0.100 g,采用 10 mL 提取液(乙醇:丙酮:水 = 4.5:4.5:1.0) 25  $^{\circ}C$  黑暗提取 24 h,过滤后用紫外分光光度计在 663、645、470 nm 处比色测定其吸光度,分别计算叶绿素 a、b 和类胡萝卜素含量;利用 LI-6400 便携式光合测定仪测定黄瓜叶片光合参数。

多酚氧化酶(PPO)活性参照林植芳等的方法<sup>[21]</sup>进行测定。可溶性蛋白含量以 Bradford 提出的方法<sup>[22]</sup>进行测定,采用牛血清蛋白绘制标准曲线;可溶性糖含量用 Ren 等的方法<sup>[23]</sup>测定,采用蔗糖制做标准曲线;黄酮和总酚含量按照 Matic 等的方法<sup>[24]</sup>测定。

## 2 结果与分析

### 2.1 表油菜素内酯对镉胁迫下黄瓜幼苗生长指标的影响

由图 1 可知,黄瓜幼苗的生长在镉胁迫下受到明显抑制。与对照相比,镉处理后幼苗的根长、株高分别下降了 20.58%、15.24%。添加外源表油菜素内酯(Cd + EBR)后,黄瓜幼苗的根长、株高较单独镉处理升高了 22.5% 和 29.1% ( $P < 0.05$ ),并基本恢复到对照水平,表明外源表油菜素内酯缓解了镉对黄瓜幼苗生长的损伤,促进了黄瓜幼苗生长。



柱上不同小写字母表示不同处理在 0.05 水平上显著差异( $P < 0.05$ )。下同

图1 表油菜素内酯对镉胁迫下黄瓜幼苗生长的影响

### 2.2 表油菜素内酯对镉胁迫下黄瓜幼苗生物量积累的影响

由图 2 可知,镉处理导致黄瓜幼苗鲜重和干重受到明显抑制,根系、茎和叶片干重分别较对照下降了 25.12%、9.54% 和 19.78%。但随着 EBR 的

添加,复合处理中黄瓜茎和根系的鲜重和干重均比单独镉处理显著增加,根系和茎的鲜重分别增加了 51.80% 和 11.16%、干重分别增加了 39.56% 和 16.85% ( $P < 0.05$ )。由黄瓜整株来观察,外源表油菜素内酯显著促进了黄瓜幼苗鲜重和干重的积累,

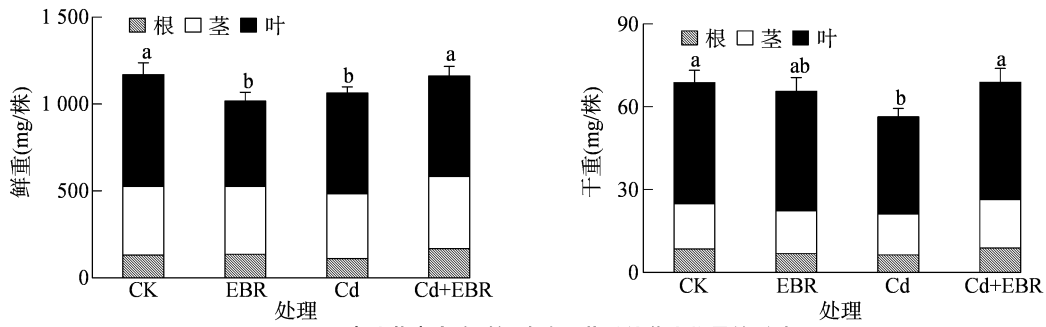


图2 表油菜素内酯对镉胁迫下黄瓜幼苗生物量的影响

表明外源表油菜素内酯可提高镉胁迫下黄瓜幼苗的总生物量积累。

### 2.3 表油菜素内酯对镉胁迫下黄瓜幼苗叶绿素含量的影响

由图 3 可知,与对照相比,50  $\mu\text{mol/L}$  镉处理显著减少了黄瓜幼苗光合色素含量,叶绿素 a、b 和类胡萝卜素含量的下降幅度分别为 27.55%、32.14%

及 25.58% ( $P < 0.05$ )。加入外源表油菜素内酯后 (Cd + EBR),黄瓜幼苗叶绿素 a、b 和类胡萝卜素的含量均显著增加,与单一镉处理相比,增幅分别为 74.65%、73.68% 及 68.75%。结果表明,50  $\mu\text{mol/L}$  镉对黄瓜幼苗叶绿素合成有抑制作用,但外源表油菜素内酯能显著促进镉处理下黄瓜幼苗叶绿素的合成,进而提高黄瓜幼苗的耐镉性 ( $P < 0.05$ )。

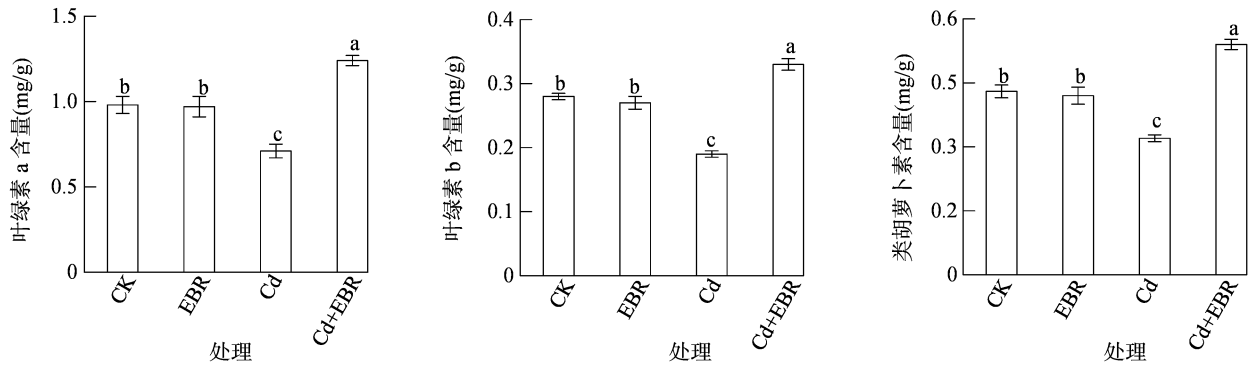


图3 表油菜素内酯对镉胁迫下黄瓜幼苗叶绿素含量的影响

### 2.4 表油菜素内酯对镉胁迫下黄瓜光合参数的影响

由表 1 可知,与对照相比,50  $\mu\text{mol/L}$  镉处理下黄瓜幼苗的  $P_n$ 、 $G_s$  和  $T_r$  显著降低,分别降低 34.95%、45.45% 和 25.00% ( $P < 0.05$ );同时,  $C_i$  显著提高,增长 34.47% ( $P < 0.05$ )。外源表油菜素内酯 (Cd + EBR) 处理显著提高了  $P_n$ 、 $G_s$  和  $T_r$  的值,与单独镉处理相比,添加 EBR 复合处理使其分别提

高了 22.39%、41.67% 和 30.95% ( $P < 0.05$ );此外,表油菜素内酯 (Cd + EBR) 处理也显著降低了镉胁迫下黄瓜幼苗的  $C_i$ ,比单独镉处理降低了 15.34%。无镉条件下,单独 EBR 处理对黄瓜光合参数无显著影响。结果表明,EBR 可以改善镉胁迫下黄瓜幼苗的光合作用。

表 1 表油菜素内酯对镉胁迫下黄瓜叶片光合参数的影响

处理	净光合速率 $P_n$ [ $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ]	气孔导度 $G_s$ [ $\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ]	蒸腾速率 $T_r$ [ $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ]	胞间 $\text{CO}_2$ 浓度 $C_i$ ( $\mu\text{mol}/\text{mol}$ )
CK	10.3 $\pm$ 0.45a	0.22 $\pm$ 0.01a	5.6 $\pm$ 0.14a	254.1 $\pm$ 1.32c
EBR	9.7 $\pm$ 0.27a	0.26 $\pm$ 0.02a	5.9 $\pm$ 0.09a	261.5 $\pm$ 2.18c
Cd	6.7 $\pm$ 0.15c	0.12 $\pm$ 0.01c	4.2 $\pm$ 0.08b	341.7 $\pm$ 2.95a
Cd + EBR	8.2 $\pm$ 0.29b	0.17 $\pm$ 0.01b	5.5 $\pm$ 0.11a	289.3 $\pm$ 3.12b

### 2.5 表油菜素内酯对镉胁迫下黄瓜幼苗多酚氧化酶活性的影响

由图 4 可知,镉处理降低了黄瓜根系多酚氧化

酶 PPO 活性,比对照降低了 12.94%;茎和叶片与对照相比无显著差异。相比于单独镉处理,在复合处理中,随着表油菜素内酯 (Cd + EBR) 的添加,黄瓜

幼苗根、茎、叶多酚氧化酶活性均显著提高,分别增加了 16.48%、10.84% 及 97.48% ( $P < 0.05$ );表明

0.15  $\mu\text{mol/L}$  油菜素内酯对镉胁迫下黄瓜根系、茎和叶片多酚氧化酶活性的提升具有一定促进作用。

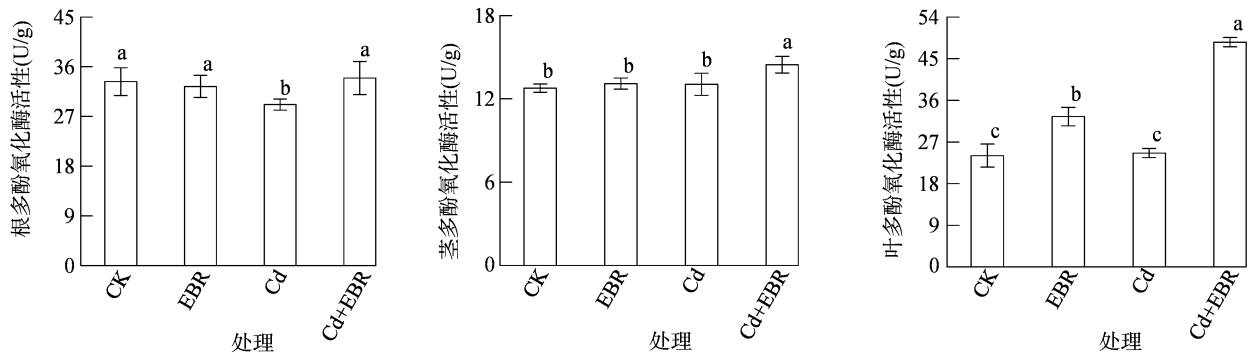


图4 表油菜素内酯对镉胁迫下黄瓜幼苗多酚氧化酶活性的影响

### 2.6 表油菜素内酯对镉胁迫下黄瓜可溶性蛋白、可溶性糖、黄酮、总酚含量的影响

由表 2 可知,相比于对照,镉处理下黄瓜幼苗根系、茎和叶片中可溶性蛋白含量分别降低了 35.93%、28.23% 和 26.69%。而相比于单独 Cd 处理,Cd + EBR 处理使黄瓜幼苗根、茎和叶片蛋白质含量分别提高了 38.32%、26.97% 和 22.12%。与对照相比,镉胁迫将黄瓜幼苗根系和茎可溶性糖含量显著提高了 36.13% 和 23.23% ( $P < 0.05$ ),但叶片可溶性糖含量无显著差异;与单独镉处理相比,镉和表油菜素内酯复合处理将根系可溶性糖含量

显著降低 34.39% ( $P < 0.05$ ),而茎和叶片可溶性糖含量无明显变化。

相比于对照,镉胁迫下黄瓜幼苗各组织中的类黄酮含量也有明显的提高,而添加外源表油菜素内酯(Cd + EBR)对黄瓜叶片中黄酮类化合物含量的影响不大,而根系和茎中黄酮含量较单独镉处理显著降低 19.44% 和 23.81% ( $P < 0.05$ )。同时,镉胁迫显著升高了黄瓜茎和叶的总酚含量,相较于对照分别增长了 19.35% 和 21.64% ( $P < 0.05$ ),外源 EBR(Cd + EBR)处理与单独镉处理相比,黄瓜组织中总酚含量无显著差异。

表 2 油菜素内酯对镉胁迫下黄瓜幼苗可溶性蛋白、可溶性糖、黄酮、总酚含量的影响

组织	处理	可溶性蛋白含量 (mg/g)	可溶性糖含量 (mg/g)	黄酮含量 (以 RE 计,mg/g)	总酚含量 (以 GRE 计,mg/g)
根系	CK	16.7 ± 0.62a	69.2 ± 3.3b	2.7 ± 0.19b	9.6 ± 0.35a
	EBR	15.9 ± 0.34a	68.5 ± 2.9b	2.5 ± 0.17b	8.7 ± 0.29ab
	Cd	10.7 ± 0.45b	94.2 ± 4.3a	3.6 ± 0.20a	10.4 ± 0.37a
	Cd + EBR	14.8 ± 0.61a	61.8 ± 3.5b	2.9 ± 0.18b	9.7 ± 0.28a
茎	CK	12.4 ± 0.62a	83.1 ± 4.2b	1.4 ± 0.12b	6.2 ± 0.14b
	EBR	12.1 ± 0.46a	80.5 ± 3.8b	1.2 ± 0.15b	5.9 ± 0.12b
	Cd	8.9 ± 0.32b	102.4 ± 4.5a	2.1 ± 0.13a	7.4 ± 0.13a
	Cd + EBR	11.3 ± 0.55a	90.5 ± 4.8ab	1.6 ± 0.09b	8.1 ± 0.14a
叶片	CK	29.6 ± 4.6a	130.3 ± 6.5a	7.6 ± 0.24b	17.1 ± 0.34b
	EBR	28.4 ± 3.7a	128.4 ± 5.1a	6.9 ± 0.11b	16.4 ± 0.47b
	Cd	21.7 ± 2.5b	115.2 ± 4.4ab	9.3 ± 0.44a	20.8 ± 1.04a
	Cd + EBR	26.5 ± 3.2a	124.8 ± 5.3a	8.9 ± 0.24a	21.2 ± 0.75a

注:GAE 和 RE 分别为没食子酸和芸香苷。

### 3 讨论与结论

镉是高危害有毒重金属,它极易在土壤中迁移,并通过根系吸收、运输到地上部积累,再通过食物链进入到动物和人类体内,从而给动植物生长及

人类的健康带来巨大的威胁<sup>[25-26]</sup>。BR 是一类甾醇类植物激素,它在植物的生长发育过程中扮演着重要角色,促进细胞分裂和发育,改善植物代谢,增强植物的抗逆性,促进生长发育和提高产量品质<sup>[27]</sup>。但 EBR 与黄瓜对 Cd 耐性关系的研究却鲜

见报道。故本研究采用营养液水培法,测定油菜素内酯对镉胁迫下黄瓜幼苗生理特性指标,分析油菜素内酯在黄瓜应答镉胁迫中的调节作用。

生物积累量可作为评估植物逆境耐受性和适应性的重要指标之一,反映了植物对环境变化的直接响应和生存策略<sup>[28]</sup>。已有研究表明,植物体内过多的非必需镉元素积累会对其生长和发育产生负面影响。镉的积累会导致细胞分裂速度减慢,根系生长受到阻碍,同时还会影响植物对其他必需矿物质的吸收和利用效率;这些效应综合作用下,从而使植物的鲜重、干重减少<sup>[29]</sup>。本试验表明,单独镉胁迫使黄瓜幼苗的根长、株高均下降,而添加外源表油菜素内酯使黄瓜幼苗根长、株高显著增加。说明表油菜素内酯能促进细胞分裂,而使黄瓜幼苗的生物量得到积累,其原因可能是 EBR 通过调节细胞壁的合成和修饰,增强了细胞壁的可塑性。具体来说,EBR 可刺激 ATP 酶活性,导致细胞壁中大量 H<sup>+</sup> 泵运输,这有助于细胞壁松弛和伸长过程中的细胞外 pH 值调节。这种作用有助于促进细胞伸长和分裂,从而促进整体的生长和发育过程<sup>[30]</sup>。

在已有研究中,Hasan 等发现,EBR 可调节番茄幼苗的生长和发育过程,同时也被发现具有一定的抗逆性作用,特别是在重金属胁迫下<sup>[31]</sup>。在菜豆中也发现类似效应,Rady 研究发现,1 mmol/L Cd 胁迫下,5 μmol/L EBR 喷施促进了菜豆植株的生长<sup>[32]</sup>。本试验中,镉处理下黄瓜幼苗的生物量显著降低,50 μmol/L Cd + 0.15 μmol/L EBR 复合处理显著促进了黄瓜幼苗茎和根系干重和鲜重的增加。此结果与前人研究类似,表明外源施用油菜素内酯能够减轻镉对黄瓜幼苗的毒害作用,从而促进幼苗生长。

叶绿素含量与光合速率之间存在着一定联系,植物叶片的光合速率随着其叶绿素含量的增加而提高<sup>[33]</sup>。可见,叶片中的光合色素水平可被用来评价植物对重金属的耐性。一般情况下,镉毒害会降低叶绿素含量,导致光合作用受到抑制,从而影响植物的生长和光能利用效率。然而,通过添加外源表油菜素内酯,可有效提升叶绿素的合成能力,增加其含量,进而促进光合作用的进行。这种作用机制显著提升了植物的光合效率,表现为增强植物的  $P_n$ 、 $G_s$  和  $T_r$  指标,同时降低了  $C_i$ 。说明外源表油菜素内酯能显著缓解镉对黄瓜叶绿素生物合成量的抑制,防止叶绿素降解,可提高黄瓜光合作用,进而提高黄瓜幼苗的耐镉性。

此外,表油菜素内酯对多酚氧化酶活性也有不同程度的影响。本试验表明,与对照相比,50 μmol/L 镉处理能在一定程度上降低黄瓜根系多酚氧化酶的活性,而 0.15 μmol/L 表油菜素内酯对黄瓜叶中多酚氧化酶活性有促进作用,但对根系和茎部的 PPO 活性无明显促进作用。在 Cd + EBR 复合处理中,油菜素内酯的添加显著提高了镉胁迫对黄瓜根系、茎和叶 PPO 活性的降低,其中,叶中的 PPO 活性与单独镉处理相比提高幅度最高,达 97.48%,表明 50 μmol/L 镉对黄瓜幼苗各部分的多酚氧化酶活性作用效果不同,其原因可能是 50 μmol/L 镉浓度尚未达到危害茎叶中多酚氧化酶的活性;在镉和 EBR 复合处理下,0.15 μmol/L EBR 可能处于提升镉处理下黄瓜幼苗叶中多酚氧化酶活性的最佳浓度范围内,且镉处理下黄瓜幼苗各部位的多酚氧化酶活性对 0.15 μmol/L EBR 的敏感度不同。

在非生物胁迫的情况下,植物蛋白质合成对于抵抗胁迫至关重要<sup>[35]</sup>。镉胁迫通常会导致植物细胞的核酸和细胞膜受损,从而降低蛋白质的生物合成能力,如镉胁迫使降低烟草各组织中的可溶性蛋白含量降低<sup>[36-37]</sup>。本研究发现,外源施加表油菜素内酯(EBR)显著改善了镉诱导的可溶性蛋白含量变化,这种现象可能是因为镉胁迫导致了黄瓜幼苗代谢活性受损以及与蛋白质合成相关酶活性下降。Khan 等在枣椰树中也发现了类似的结果<sup>[38]</sup>。

植物在面对镉毒害时,通过多种机制来应对,其中包括解毒 ROS、维持细胞膜完整性、保持酶活性稳定以及调节渗透压<sup>[39]</sup>。可溶性糖在植物中不仅是能量的重要来源,还在维持细胞内外的渗透压平衡中起到关键作用。本研究中,镉胁迫下黄瓜幼苗中可溶性糖和类黄酮化合物含量有所增加,然而,外源添加表油菜素内酯(Cd + EBR)却减少了镉胁迫引起的可溶性糖和类黄酮化合物的积累,这种减少可能表明,表油菜素内酯通过某种方式缓解了镉毒害对植物造成的影响,Mauad 等也发现了相似的结果<sup>[40]</sup>。在面对镉胁迫时,植物通常会调整其相关渗透调节物质的含量,这些含量的变化通常与镉胁迫的强度、品种的抗性差异、渗透调节物质的类型有关。因此,植物在镉胁迫下的这种渗透调节物质调控策略会使植物适应环境压力并维持生长和代谢的相对稳定。

综合分析可知,外源表油菜素内酯可有效减轻镉毒害对黄瓜幼苗产生的不同程度的损伤,主要通

过促进黄瓜幼苗生长及生物量的积累,提高光合色素含量、光合效率和多酚氧化酶活性,维持渗透压来抵抗镉毒害;镉胁迫下,添加外源油菜素内酯对黄瓜分子层面的调控作用,还有待进一步深入研究和探讨。

#### 参考文献:

- [1] Smeets K, Opdenakker K, Remans T, et al. The role of the kinase OXII in cadmium - and copper - induced molecular responses in *Arabidopsis thaliana* [J]. *Plant, Cell & Environment*, 2013, 36 (6) : 1228 - 1238.
- [2] 鲜靖苹, 王勇, 马晖玲. 一氧化氮信号途径参与草地早熟禾耐镉机制的研究 [J]. *草地学报*, 2019, 27 (6) : 1577 - 1586.
- [3] 杨颂娟, 王秋月, 华丽君, 等. 镉胁迫对桉树 (*Eucalyptus*) 保护酶活性及相关基因表达的影响 [J]. *分子植物育种*, 2020, 18 (6) : 2006 - 2012.
- [4] 胡文海, 詹秀花, 闫小红, 等. 24 - 表油菜素内酯对干旱胁迫下辣椒幼苗叶片抗氧化酶系统及耐旱相关基因表达的影响 [J]. *植物研究*, 2015, 35 (6) : 908 - 914.
- [5] Planas - Riverola A, Gupta A, Betegón - Putze I, et al. Brassinosteroid signaling in plant development and adaptation to stress [J]. *Development*, 2019, 146 (5) : dev151894.
- [6] Krishna P. Brassinosteroid - mediated stress responses [J]. *Journal of Plant Growth Regulation*, 2003, 22 (4) : 289 - 297.
- [7] Bajguz A, Hayat S. Effects of brassinosteroids on the plant responses to environmental stresses [J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2009, 47 (1) : 1 - 8.
- [8] Reyes Guerrero Y, Martínez González L, dell Amico J, et al. Reversion of deleterious effects of salt stress by activation of ROS detoxifying enzymes via foliar application of 24 - epibrassinolide in rice seedlings [J]. *Theoretical and Experimental Plant Physiology*, 2015, 27 (1) : 31 - 40.
- [9] 张红. 硝普钠、24 - 表油菜素内酯/水杨酸浸种对盐胁迫下玉米种子萌发及幼苗生长的影响 [J]. *核农学报*, 2012, 26 (1) : 164 - 169, 181.
- [10] 阮英慧, 董守坤, 刘丽君, 等. 干旱胁迫下油菜素内酯对大豆花期生理特性的影响 [J]. *作物杂志*, 2011 (6) : 33 - 37.
- [11] 康云艳, 郭世荣, 李娟, 等. 24 - 表油菜素内酯对低氧胁迫下黄瓜幼苗根系抗氧化系统的影响 [J]. *中国农业科学*, 2008, 41 (1) : 153 - 161.
- [12] 耶兴元, 全胜利, 张燕. 油菜素内酯对高温胁迫下猕猴桃苗耐热性相关生理指标的影响 [J]. *西北农业学报*, 2011, 20 (9) : 113 - 116.
- [13] 惠竹梅, 王智真, 胡勇, 等. 24 - 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.
- [14] Ali S S, Sunil Kumar G B, Khan M, et al. Brassinosteroid enhances resistance to *Fusarium* diseases of barley [J]. *Phytopathology*, 2013, 103 (12) : 1260 - 1267.
- [15] Nakashita H, Yasuda M, Nitta T, et al. Brassinosteroid functions in a broad range of disease resistance in tobacco and rice [J]. *The Plant Journal*, 2003, 33 (5) : 887 - 898.
- [16] Gudesblat G E, Russinova E. Plants grow on brassinosteroids [J]. *Current Opinion in Plant Biology*, 2011, 14 (5) : 530 - 537.
- [17] Villiers F, Jourdain A, Bastien O, et al. Evidence for functional interaction between brassinosteroids and cadmium response in *Arabidopsis thaliana* [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2012, 63 (3) : 1185 - 1200.
- [18] 王素平. H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 对镉胁迫下黄瓜种子萌发及生长的影响 [J]. *种子*, 2012, 31 (3) : 98 - 100.
- [19] 孙红艳, 王杰文, 王宇娜, 等. 硒对镉胁迫下黄瓜种子萌发及幼苗生长的影响 [J]. *江苏农业科学*, 2016, 44 (12) : 175 - 177.
- [20] Beligni M V, Lamattina L. Nitric oxide counteracts cytotoxic processes mediated by reactive oxygen species in plant tissues [J]. *Planta*, 1999, 208 (3) : 337 - 344.
- [21] 林植芳, 李双顺, 张东林, 等. 采后荔枝果皮色素、总酚及有关酶活性的变化 [J]. 1988, 30 (1) : 40 - 45.
- [22] Bradford M M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein - dye binding [J]. *Analytical Biochemistry*, 1976, 72 : 248 - 254.
- [23] Ren H X, Liu L, Liu C, et al. Physiological investigation of magnetic iron oxide nanoparticles towards Chinese mung bean [J]. *Journal of Biomedical Nanotechnology*, 2011, 7 (5) : 677 - 684.
- [24] Mati ć P, Sabljic M, Jakobek L. Validation of spectrophotometric methods for the determination of total polyphenol and total flavonoid content [J]. *Journal of AOAC International*, 2017, 100 (6) : 1795 - 1803.
- [25] 姜永雷, 唐探, 陈嘉裔, 等. 镉胁迫对水蕨幼苗叶绿素荧光参数和生理指标的影响 [J]. *江苏农业科学*, 2015, 43 (9) : 357 - 360.
- [26] 孙宁晓, 宋桂龙. 紫花苜蓿对镉胁迫的生理响应及积累特性 [J]. *草业科学*, 2015, 32 (4) : 581 - 585.
- [27] 吴杨, 高慧纯, 张必弦, 等. 24 - 表油菜素内酯对盐碱胁迫下大豆生育、生理及细胞超微结构的影响 [J]. *中国农业科学*, 2017, 50 (5) : 811 - 821.
- [28] 杨海涛, 张彪, 杨素勤, 等. 镉胁迫对苗期曼陀罗生长及镉富集的影响 [J]. *江苏农业科学*, 2015, 43 (10) : 309 - 311.
- [29] 王晓娟, 王文斌, 杨龙, 等. 重金属镉 (Cd) 在植物体内的转运途径及其调控机制 [J]. *生态学报*, 2015, 35 (23) : 7921 - 7929.
- [30] Haubrick L L, Assmann S M. Brassinosteroids and plant function: some clues, more puzzles [J]. *Plant, Cell & Environment*, 2006, 29 (3) : 446 - 457.
- [31] Hasan S A, Hayat S, Ahmad A. Brassinosteroids protect photosynthetic machinery against the cadmium induced oxidative stress in two tomato cultivars [J]. *Chemosphere*, 2011, 84 (10) : 1446 - 1451.
- [32] Rady M M. Effect of 24 - epibrassinolide on growth, yield, antioxidant system and cadmium content of bean (*Phaseolus vulgaris* L.) plants under salinity and cadmium stress [J]. *Scientia Horticulturae*, 2011, 129 (2) : 232 - 237.
- [33] Khalid A, Aftab F. Effect of exogenous application of 24 - epibrassinolide on growth, protein contents, and antioxidant enzyme

仰小东,龙燕兰,汤 鹏,等. 郁金香表型性状的遗传变异及多样性分析[J]. 江苏农业科学,2025,53(11):133-140.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2025.11.019

# 郁金香表型性状的遗传变异及多样性分析

仰小东,龙燕兰,汤 鹏,梁海英  
(江苏开放大学环境生态学院,江苏南京 210036)

**摘要:**揭示不同种质资源郁金香品种的表型性状的多样性,为后续郁金香的遗传育种、种质评价和园林应用奠定良好基础。以 27 份郁金香种质资源为供试材料,对 12 个数量性状和 9 个质量性状进行观测,结合方差分析、相关性分析、聚类分析和主成分分析等多元统计分析方法解析郁金香种质资源表型性状的遗传变异和多样性。结果表明,不同郁金香品种之间大部分的数量性状之间差异较大,数量性状的表型变异系数在 14.52%~90.39% 之间,遗传变异系数略小于表型变异系数;所有数量性状中广义遗传力均较高,数值范围在 0.72~0.97 之间;而 9 个质量性状的变异系数范围为 20.67%~52.05%。质量性状的 Shannon-Wiener 指数为 0.50~3.66,而大部分数量性状的多样性指数均在 2.70 以上,说明数量性状的多样性更为丰富。相关性分析结果表明在不同性状之间共有 45 对达到显著或极显著相关,表明不同性状间具有一定的相关性;从 21 个表型性状中提炼出 7 个主成分,累计贡献率达 81.29%,反映了大部分表型性状的信息。此外,聚类分析发现在欧氏距离为 10 时,可以将 27 份郁金香品种资源分为 3 个大类,分类结果与郁金香品种的生长状况和形态较为吻合。综上所述,郁金香品种资源的表型性状具有丰富多样性,基于表型性状的种质资源筛选潜力较大,花瓣数量、株高和花葶长等性状在早期选择的潜力较大、效果好。

**关键词:**郁金香;遗传变异;表型性状;多样性分析;聚类分析

**中图分类号:**S682.2<sup>+</sup>63.032 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2025)11-0133-08

郁金香为百合科郁金香属(*Tulipa* L.)观赏植物,在欧洲、亚洲、美洲皆有广泛栽培,是全球栽培

收稿日期:2024-05-28

基金项目:江苏省基础研究计划(自然科学基金)(编号: BK202301116);江苏省高等学校自然科学研究面上项目(编号: 21KJB220005);华东地区花卉生物学国家林业和草原局重点实验室开放课题(编号:KF202103)。

作者简介:仰小东(1991—),男,浙江湖州人,博士,讲师,主要从事园林植物遗传育种与分子生物学等研究工作。E-mail: yangxd@jso.u.edu.cn。

数量最大的球根花卉,享有“世界花后”的美誉<sup>[1]</sup>。因其具有花大色艳、色彩丰润、适应性好、抗逆性强、花期较长等优点,在园林、盆栽及鲜切花等领域均具有重要的经济价值<sup>[2]</sup>。随着人民生活水平的日益提高,对郁金香品种的需求也日趋多样化,为产业发展带来巨大的空间。虽然我国作为郁金香的原产地之一,但优异郁金香品种大多从国外引进,缺乏自主知识产权品种严重制约了相关产业的可持续发展。因此,开展郁金香种质资源调查,明

activities of *in vitro*-grown *Solanum tuberosum* L. under salt stress [J]. *In Vitro Cellular & Developmental Biology - Plant*, 2016, 52(1):81-91.

[34] 郑爱珍. 镉胁迫对芥蓝根系膜过氧化及 ATPase 活性的影响 [J]. *生态学报*, 2012, 32(2):483-488.

[35] Muslu A, Ergün N. Effects of copper and chromium and high temperature on growth, proline and protein content in wheat seedlings [J]. *Bangladesh Journal of Botany*, 2013, 42(1):105-112.

[36] Abbas T, Rizwan M, Ali S, et al. Effect of biochar on alleviation of cadmium toxicity in wheat (*Triticum aestivum* L.) grown on Cd-contaminated saline soil [J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2018, 25(26):25668-25680.

[37] Liu W X, Shang S H, Feng X, et al. Modulation of exogenous selenium in cadmium-induced changes in antioxidative

metabolism, cadmium uptake, and photosynthetic performance in the 2 tobacco genotypes differing in cadmium tolerance [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2015, 34(1):92-99.

[38] Khan A, Bilal S, Khan A L, et al. Silicon-mediated alleviation of combined salinity and cadmium stress in date palm (*Phoenix dactylifera* L.) by regulating physio-hormonal alteration [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2020, 188:109885.

[39] Sardar R, Ahmed S, Ahmad Yasin N. Seed priming with karrikinolide improves growth and physiochemical features of *Coriandrum sativum* under cadmium stress [J]. *Environmental Advances*, 2021, 5:100082.

[40] Mauad M, Crusciol C A C, Nascente A S, et al. Effects of silicon and drought stress on biochemical characteristics of leaves of upland rice cultivars [J]. *Revista Ciência Agronômica*, 2016, 47(3):532-539.