

β -氨基丁酸对Cd胁迫下菊花生理特性的影响

施旭丽, 陈发棣, 房伟民, 管志勇, 陈素梅*

(南京农业大学园艺学院, 南京 210095)

摘要: 为探究 β -氨基丁酸 (BABA) 能否缓解 Cd 胁迫对菊花生长和生理代谢的毒害作用, 以耐 Cd 型菊花品种 ‘钟山金葵’ 和 Cd 敏感型菊花品种 ‘钟山丹桂’ 为试验材料, 用 1/2Hogland 营养液培养, 研究了 $200 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Cd 单独处理和 $200 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Cd + $0.2 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ BABA 处理下两个品种的生长、生物量、Cd 积累和转运、根尖 Cd 流量以及叶片 MDA 含量、相对电导率、叶绿素含量、脯氨酸含量的变化。结果表明: Cd 胁迫抑制菊花的生长和叶绿素的合成, 破坏细胞膜结构的完整性, 引起膜脂过氧化伤害。耐 Cd 品种 ‘钟山金葵’ 的膜脂过氧化程度较低, 细胞膜的完整性较好, 能快速、大量地合成渗透调节物质 (脯氨酸) 来减轻 Cd 胁迫的毒害作用。BABA 能改善 Cd 胁迫下菊花的生长, 缓解 Cd 胁迫对株高、根长和生物量的抑制作用。BABA 还可减缓 Cd 胁迫下叶片 MDA 含量的增加和相对电导率的升高, 但并不增加脯氨酸的含量。耐 Cd 品种 ‘钟山金葵’ 根尖 Cd 离子流量大于 Cd 敏感型品种 ‘钟山丹桂’ , 能积累较多的 Cd, 并可以利用老叶贮存 Cd, 且受害程度较低。BABA 能促进 Cd 胁迫下根系对 Cd 的吸收及其向地上部的转运, 但对 Cd 在地上部不同叶位中的分布无影响。BABA 处理可以促进菊花对 Cd 污染土壤的修复。

关键词: 菊花; 耐 Cd 性; β -氨基丁酸; Cd 流量; 非损伤微测技术

中图分类号: S 682.1⁺¹

文献标志码: A

文章编号: 0513-353X (2015) 12-2429-10

Effects of β -aminobutyric Acid on Physiological Characteristics of Chrysanthemum Under Cd Stress

SHI Xu-li, CHEN Fa-di, FANG Wei-min, GUAN Zhi-yong, and CHEN Su-mei*

(College of Horticulture, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: To illustrate whether the toxicity of cadmium to chrysanthemum on the growth and physiological metabolism could be reduced or not by exogenous β -aminobutyric acid (BABA), chrysanthemum ‘Zhongshan Jinkui’ (Cd tolerant) and ‘Zhongshan Dangui’ (Cd sensitive) were subjected to hydroponic culture in 1/2Hogland nutrient solution supplemented with $200 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Cd, $200 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Cd with $0.2 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ BABA. The morphology and biomass, Cd accumulation and transportation, Cd fluxes on root tip and relative electrolyte conductivity, contents of MDA, chlorophyll, proline in leaves were measured. The results showed that Cd stress inhibited the growth, biomass and chlorophyll synthesis, destroyed the integrity of the cell membrane, and induced membrane lipid peroxidation damage in both varieties.

收稿日期: 2015-06-21; 修回日期: 2015-11-23

基金项目: ‘十二五’农村领域国家科技计划项目(2012BAD01B07005-1); 江苏省科技支撑计划项目(BE2012350, BE2011325); 上海市科技兴农重点攻关项目[沪农科攻字(2011)第1-9号]

* 通信作者 Author for correspondence (E-mail: chensm@njau.edu.cn)

‘Zhongshan Jinkui’ suffered less membrane lipid peroxidation, thereby showed better integrity of the cell membrane than ‘Zhongshan Dangui’, it could synthesis a large number of osmotic adjustment substances such as proline to alleviate the toxicity of Cd stress. BABA improved the growth, biomass of chrysanthemum under Cd stress. Meanwhile, BABA reduced the increase of MDA content and relative conductivity in leaves, but no increase in proline were observed with the presence of BABA. Cd tolerant variety ‘Zhongshan Jinkui’ has a larger Cd fluxes than the Cd sensitive cultivar ‘Zhongshan Dangui’, the tolerant cultivar accumulated higher Cd than the sensitive one, especially in the base mature leaves. BABA accelerated the absorption of Cd in both varieties and promoted transportation of Cd from root to aboveground, but has no effect on distribution of Cd in different leaf positions, inferring application of BABA could contribute to the phytoremediating of cadmium contaminated soil by chrysanthemum.

Key words: chrysanthemum; cadmium tolerance; BABA; Cd flux; NMT

重金属 Cd 具有很强的迁移性，易被植物吸收和积累，导致其生理代谢失调。Cd 通过食物链进入人体，会对健康带来威胁。植物修复技术是利用能在污染土壤中生长并超积累重金属植物来有效地降低和去除土壤中重金属的新兴技术 (Mohanty et al., 2010)。然而，能超积累 Cd 的植物的报道尚为数不多，如天蓝遏蓝菜、拟南芥、薪莫属雷竹、东南景天等 (Verbruggen et al., 2009)。

β -氨基丁酸 (BABA) 是番茄根系分泌的非蛋白质氨基酸 (Gamliel & Katan, 1992)。近年来大量研究表明，BABA 是广谱的化学抗性诱导剂，且不存在环境污染和残留问题，是真正意义上的绿色农用化学制剂 (张永刚 等, 2006)，具有诱导抗病性 (Cohen, 2002) 和增强植物对非生物逆境胁迫抗性的作用 (Jakab et al., 2005; Cao et al., 2008)。新近研究发现，BABA 可诱导拟南芥 (Cao et al., 2009) 和大豆 (Zahed et al., 2012) 对重金属 Cd 胁迫的耐性。

观赏植物因不被食用，不会通过食物链进入人体，因此是较为理想的 Cd 污染修复植物。菊花在园林中广泛应用。本试验中采用营养液培养的方法，研究了 BABA 对 Cd 胁迫下耐性不同的菊花‘钟山金葵’和‘钟山丹桂’的生长和生理特性、Cd 的积累、转运和根系 Cd 流量的影响，对于将菊花用于 Cd 污染土壤的修复具有重要的指导意义。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验时间为 2014 年 4—8 月，供试材料为前期试验筛选获得的耐 Cd 型菊花品种‘钟山金葵’和 Cd 敏感型菊花品种‘钟山丹桂’，由南京农业大学“中国菊花种质资源保存中心”提供。

1.2 试验设计

选取生长健壮一致、发育充实、无病虫害、长 6~8 cm 的菊花插穗，留 2~3 片完全展开的叶片，扦插于穴盘内，采用蛭石：珍珠岩 = 1:1 的混配基质。扦插生根阶段保持气温在 15~27 °C，扦插前 5 d 内每天喷水 2~4 次，避免叶片萎蔫，其后逐渐减少喷水，扦插期间保持基质适度湿润 (施旭丽 等, 2013)。15 d 后选取长势一致、8 叶龄的扦插苗，用自来水洗净根部的基质，用去离子水缓苗培养 3~4 d，至有白色新根长出后用 1/2Hogland 营养液培养。利用气泵保持通气，每 4 d 换 1 次营养液，每隔 2 d 调整 1 次 pH 值，保持 pH 6.5~7.0。预培养 7 d 后开始进行处理。

试验设 4 个处理: (1) 空白对照, 既不加 Cd 也不加 BABA; (2) $0.2 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ BABA 单独处理 (预试验筛选而得); (3) $200 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Cd 单独处理; (4) $200 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Cd + $0.2 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ BABA 共同处理。处理 1 d 后用非损伤微测技术测定根尖 Cd 流量, 8 d 后测定株高、根长等形态指标、生物量和 Cd 的积累与分布情况; 处理 0、2、4、6、8 d 后取顶端向下的第 3~8 片完全展开叶用于生理指标的测定。每处理含 6 株重复, 试验重复 3 次。

1.3 测定指标与测定方法

Cd 含量测定: 分别称取 0.5 g 地上部、地下部以及上 (第 1~3 片叶)、中 (第 4~6 片叶)、下 (第 7~9 片叶) 不同叶位的干样采用微波消煮法 (Bai et al., 2011) 测定 Cd 含量。

根尖 Cd 流量测定: 采用非损伤微测技术 (NMT) 测定 (Li et al., 2012)。采用 Cd 离子微电极, 在含 $50 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Cd 的测试液中测定根表面两个点之间的浓度差来计算 Cd 离子的流速, 采用 MageFlux 软件将流速转化为 Cd 离子的流量 (北京旭月科技有限公司, 非损伤微测技术专家)。根尖测试点确定: 在距根尖不同距离处扫点测试离子信号强度, 取信号最强点为测试点。每个处理测 5~8 个重复, 每个重复连续测 10 min, 10 min 内的平均值作为该重复的测定值。

用直尺测定植株的株高和根长。将材料分为地上部和地下部, 用去离子水冲洗 3 次, 吸水纸吸干表面水分, 称取鲜样质量后在 105°C 的烘箱中杀青 2 h, 然后在 80°C 下烘干, 分别称地上部和地下部的干样质量。

叶片细胞膜透性的测定采用相对电导率法 (李合生, 2000)。

丙二醛 (MDA) 含量的测定采用硫代巴比妥酸 (TBA) 比色法 (李合生, 2000)。

叶绿素含量的测定参照李合生 (2000) 的方法。

脯氨酸含量的测定采用酸性茚三酮比色法 (李合生, 2000)。

应用 SPSS17.0 软件对数据进行差异显著性分析, 采用 One-way ANOVA 单因素方差分析和邓肯氏新复极差法比较不同处理间的差异显著性。

2 结果与分析

2.1 Cd 胁迫及 BABA 处理下菊花地上部和下部 Cd 含量及其在不同叶位中的分布

表 1 显示, Cd 胁迫下菊花地上部和地下部均能积累 Cd, 但地下部的积累量高于地上部。其中耐 Cd 品种 ‘钟山丹桂’ 地上部 Cd 积累量高于 Cd 胁迫敏感品种 ‘钟山金葵’。Cd + BABA 处理与

表 1 BABA 对 Cd 胁迫下 ‘钟山丹桂’ 和 ‘钟山金葵’ 地上部与地下部 Cd 积累量的影响
Table 1 Effects of BABA on the accumulation of Cd in overground and underground part of ‘Zhongshan Dangui’ and ‘Zhongshan Jinkui’ under Cd stress

品种 Cultivar	处理 Treatment	Cd 含量/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) Cd accumulation		地上部/地下部 Overground part/ underground part
		地上部 Overground part	地下部 Underground part	
钟山丹桂 Zhongshan Dangui	Cd	523.07 ± 18.70 d	1345.33 ± 28.03 c	0.39 ± 0.01 d
钟山金葵 Zhongshan Jinkui	Cd + BABA	613.33 ± 9.25 c	1229.87 ± 13.73 d	0.50 ± 0.01 b
	Cd	718.33 ± 22.06 b	1497.00 ± 37.12 a	0.48 ± 0.01 c
	Cd + BABA	856.80 ± 18.32 a	1447.98 ± 15.51 b	0.59 ± 0.01 a

注: 同列中不同的小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。表中数据为平均值 \pm 标准差 ($n = 3$)。下同。

Note: Different small letters in the same column indicate the significant difference ($P < 0.05$); Values in the table are mean \pm standard deviation of three replicates. The same below.

单独 Cd 处理相比, ‘钟山金葵’和‘钟山丹桂’地上部与地下部 Cd 含量比分别从 0.48 和 0.39 升高到 0.59 和 0.50, 两个品种地上部的 Cd 含量均增加, 表明 BABA 能促进 Cd 向地上部运输。

图 1 表明, ‘钟山金葵’地上部积累的 Cd 主要分布在基部老叶及中部叶片中, 老叶中镉含量最高, 中部叶片其次, 上部叶片含量最少, 且不同部位 Cd 含量存在显著差异, Cd 单独处理及 Cd + BABA 处理下, 中下叶位中 Cd 积累量均达到 80%以上; 而‘钟山丹桂’不同叶位中 Cd 含量差异较小, 上部叶片中 Cd 含量比例高于‘钟山金葵’, 且老叶和中部叶片中 Cd 含量没有显著差异。但 BABA 处理并不影响 Cd 在地上部分不同叶位的分布。

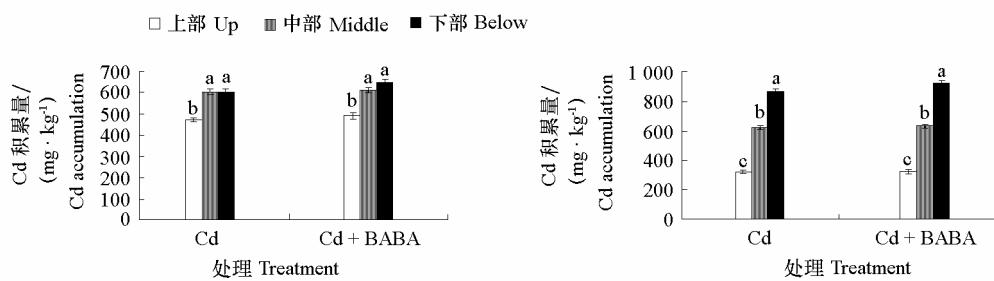


图 1 BABA 对 Cd 胁迫下‘钟山丹桂’(左)和‘钟山金葵’(右)不同叶位(上、中、下)中 Cd 含量的影响

Fig. 1 Effects of BABA on the Cd contents in different leaf positions (up, middle, below) of ‘Zhongshan Dangui’ (left) and ‘Zhongshan Jinkui’ (right) under Cd stress

2.2 Cd 胁迫及 BABA 处理下菊花根尖的 Cd 离子流量

采用 Cd 离子选择性微电极分别测定了距离根尖 0、200、400、600、800 μm 处的 Cd 离子流量, 发现根尖处 Cd 离子流速最大, 故根尖为 Cd 离子流量最适测试点。图 2 是两个供试品种的 Cd 离子流量动态图。流量为负值表示根系从外界吸收离子, 正值则表示根系向外界释放离子。

由图 2 可知耐 Cd 型菊花品种‘钟山金葵’在对照和处理下根尖 Cd 流量均大于 Cd 敏感型菊花品种‘钟山丹桂’, 表明‘钟山金葵’根系吸收 Cd 离子的能力更强。BABA + Cd 共同处理后, 两个品种的 Cd 离子流量均高于单独 Cd 处理时的 Cd 离子流量, 说明 BABA 能促进根系对 Cd 离子的吸收。

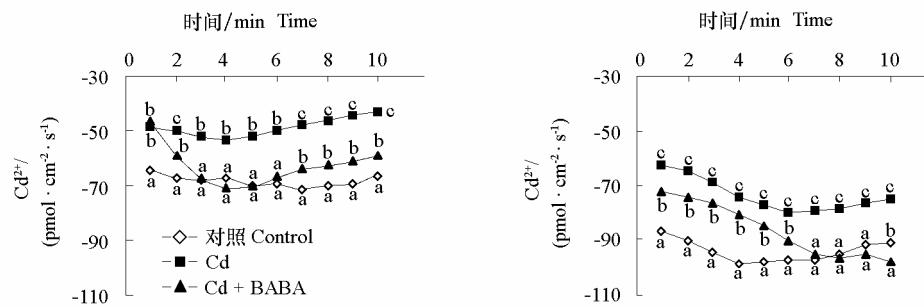


图 1 BABA 对 Cd 胁迫下‘钟山丹桂’(左)和‘钟山金葵’(右)根尖 Cd 离子流量的影响

Fig. 2 Effects of BABA on the net Cd ion fluxes on root tip of ‘Zhongshan Dangui’ (left) and ‘Zhongshan Jinkui’ (right) under Cd stress

2.3 Cd 胁迫及 BABA 处理下的株高、根长与生物量

由表 2 可见, Cd 胁迫抑制了菊花的生长, Cd 处理 8 d 后, 株高、根长和生物量相比对照显著下降, ‘钟山丹桂’地上部和地下部鲜样质量相比对照分别下降了 48.18% 和 57.14%, 干样质量分别下降了 41.51% 和 57.14%; ‘钟山金葵’地上部和地下部鲜样质量分别比对照下降了 39.95% 和 48.21%, 干样质量分别下降了 39.47% 和 40.00%。‘钟山金葵’地上部和地下部鲜样质量和干样质量下降幅度均小于‘钟山丹桂’, 即 Cd 胁迫对耐性品种‘钟山金葵’生物量的影响较小。BABA 单独处理与对照无显著性差异。BABA + Cd 共同处理后, 与单独 Cd 处理相比, 两个品种的株高、根长、地上部和地下部生物量下降幅度减小, 即 BABA 能缓解 Cd 对菊花幼苗生长的抑制作用。

表 2 BABA 对 Cd 胁迫下‘钟山丹桂’和‘钟山金葵’生长的影响

Table 2 Effects of BABA on the growth of ‘Zhongshan Dangui’ and ‘Zhongshan Jinkui’ under Cd stress

品种 Cultivar	处理 Treatment	株高/cm Plant height	根长/cm Root length	鲜样质量/g Fresh weight		干样质量/g Dry weight	
				地上部 Overground part	地下部 Underground part	地上部 Overground part	地下部 Underground part
钟山丹桂 Zhongshan Dangui	对照 Control	13.76 ± 0.41 a	10.01 ± 0.15 a	5.21 ± 0.02 a	0.77 ± 0.02 a	0.53 ± 0.01 a	0.07 ± 0.00 a
BABA	13.89 ± 0.18 a	10.05 ± 0.10 a	5.39 ± 0.01 a	0.80 ± 0.01 a	0.54 ± 0.01 a	0.08 ± 0.00 a	
Cd	10.35 ± 0.13 c	6.52 ± 0.11 c	2.70 ± 0.05 c	0.33 ± 0.01 c	0.31 ± 0.01 c	0.03 ± 0.00 c	
Cd + BABA	11.83 ± 0.24 b	7.58 ± 0.11 b	3.77 ± 0.12 b	0.44 ± 0.01 b	0.39 ± 0.01 b	0.04 ± 0.00 b	
钟山金葵 Zhongshan Jinkui	对照 Control	10.45 ± 0.07 a	8.72 ± 0.12 a	3.73 ± 0.06 a	0.56 ± 0.01 a	0.38 ± 0.01 a	0.05 ± 0.00 b
BABA	10.64 ± 0.06 a	8.97 ± 0.07 a	3.83 ± 0.03 a	0.58 ± 0.01 a	0.39 ± 0.00 a	0.06 ± 0.00 a	
Cd	7.68 ± 0.14 c	6.59 ± 0.10 c	2.24 ± 0.09 c	0.29 ± 0.01 c	0.23 ± 0.01 c	0.03 ± 0.00 d	
Cd + BABA	8.14 ± 0.05 b	7.33 ± 0.07 b	2.86 ± 0.05 b	0.40 ± 0.01 b	0.30 ± 0.01 b	0.04 ± 0.00 c	

2.4 Cd 胁迫及 BABA 处理下叶片的相对电导率和 MDA 含量

图 3, A、B 显示, Cd 胁迫处理, 叶片相对电导率持续上升。‘钟山金葵’相对电导率增加缓慢, 而‘钟山丹桂’急剧增加。胁迫 8 d, ‘钟山丹桂’比对照增加了 59.10%。BABA + Cd 共同处理下,

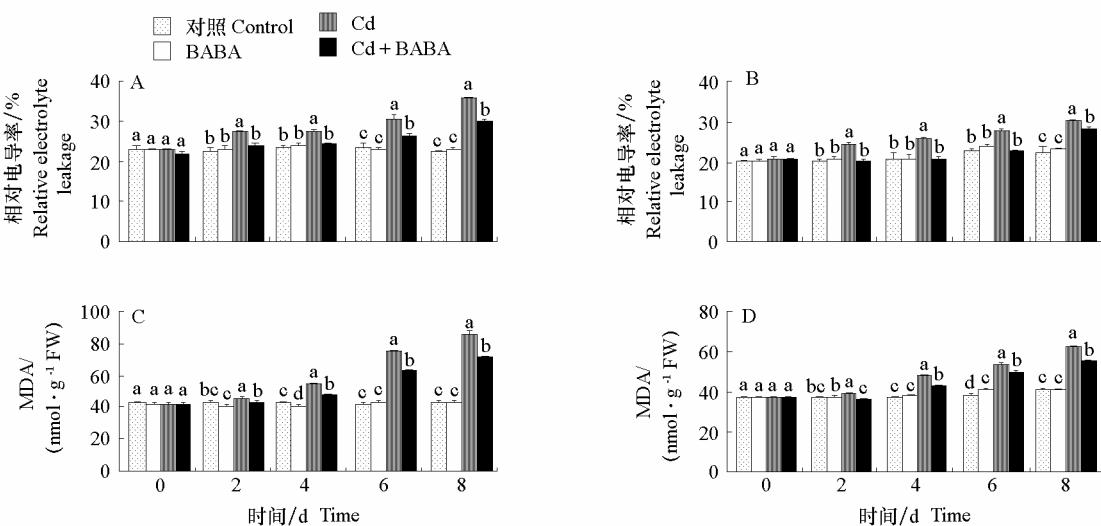


图 3 BABA 对 Cd 胁迫下‘钟山丹桂’(左)和‘钟山金葵’(右)叶片相对电导率和 MDA 含量的影响

Fig. 3 Effects of BABA on the electrolyte leakage and MDA contents in leaves of ‘Zhongshan Dangui’ (left) and ‘Zhongshan Jinkui’ (right) under Cd stress

‘钟山丹桂’在胁迫前 4 d 内，相对电导率显著低于 Cd 处理组，且与对照无显著差异，至胁迫第 8 天，比单独 Cd 处理降低了 15.76%；‘钟山金葵’在胁迫前 6 d 内相对电导率与对照相比都无显著差异，胁迫 8 d 时显著高于对照，但比单独 Cd 处理时低了 6.23%，表明 BABA 能缓解 Cd 对细胞膜结构的破坏程度，减轻膜脂过氧化伤害，且在胁迫后期对 Cd 敏感型品种‘钟山丹桂’的缓解作用更明显。

由图 3, C、D 可见，Cd 胁迫下菊花叶片 MDA 的含量随着胁迫时间增长呈持续上升趋势，‘钟山金葵’MDA 含量在整个胁迫过程中上升较‘钟山丹桂’缓慢。Cd 胁迫 6 d，‘钟山丹桂’和‘钟山金葵’分别比对照高 77.43% 和 40.14%，胁迫第 8 天，分别比对照高了 100.79% 和 52.21%，说明 Cd 胁迫下‘钟山丹桂’叶片膜脂过氧化伤害程度较大。BABA + Cd 共同处理后，MDA 含量均比单独 Cd 处理时低，处理 8 d 后，‘钟山丹桂’和‘钟山金葵’叶片 MDA 含量相比单独 Cd 处理分别下降了 17.21% 和 10.97%；叶片 MDA 含量相比单独 Cd 处理下降了。进一步表明 BABA 能缓解 Cd 膜脂过氧化作用，且对 Cd 敏感品种‘钟山丹桂’的缓解效果更显著。

2.5 Cd 胁迫及 BABA 处理下叶片的叶绿素含量

图 4 显示，Cd 胁迫下，两个品种的叶绿素 a、叶绿素 b、叶绿素 a+b 的含量随着处理时间的增长呈现出持续下降。在 Cd 处理 8 d 时，‘钟山丹桂’叶绿素 a、叶绿素 b、叶绿素 a+b 的含量与对照相比分别下降了 45.50%、60.94% 和 50.60%（图 4, A、C、E），‘钟山金葵’分别下降了 12.33%、28.01% 和 17.33%（图 4, B、D、F），表明 Cd 胁迫对‘钟山丹桂’叶绿素合成的破坏作用更大。BABA 处理减缓了 Cd 叶绿素的破坏，处理 8 d 后，‘钟山丹桂’叶绿素 a、叶绿素 b、叶绿素 a+b 的含量

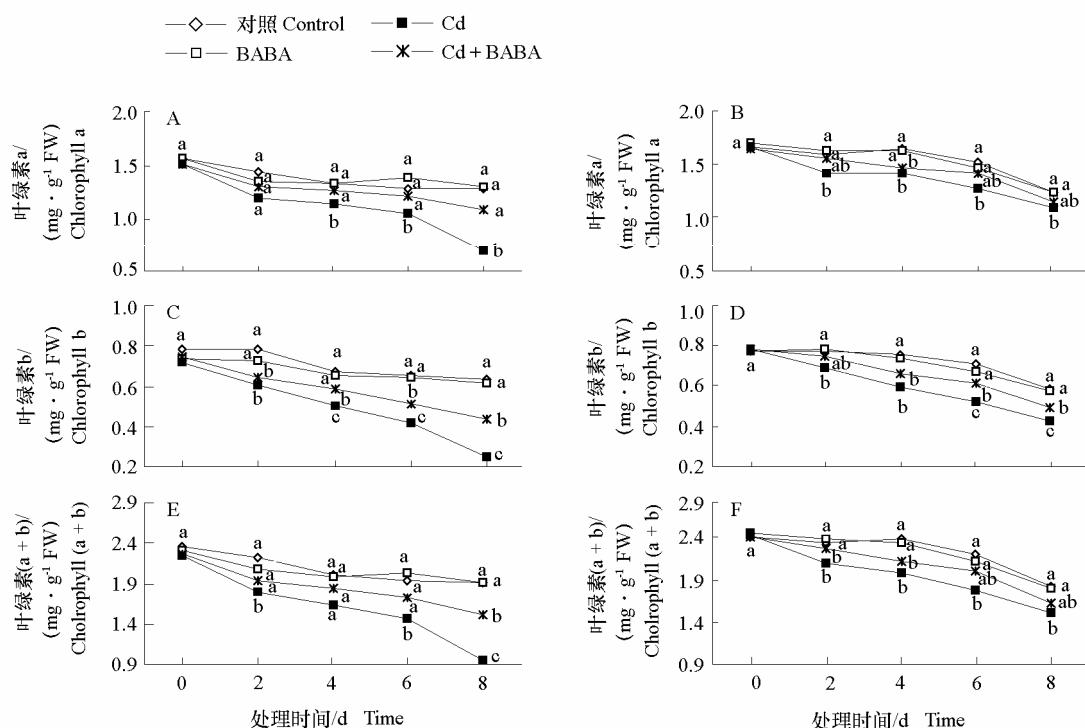


图 4 BABA 对 Cd 胁迫下‘钟山丹桂’(左) 和‘钟山金葵’(右) 叶片叶绿素含量的影响
 Fig. 4 Effects of BABA on the contents of chlorophyll in leaves of ‘Zhongshan Dangui’ (left) and ‘Zhongshan Jinkui’ (right) under Cd stress

与对照相比, 分别下降了 15.99%、31.81% 和 21.36%, 表明 BABA 处理显著缓解了 Cd 处理对其叶绿素的降解; ‘钟山金葵’ 叶绿素 a、叶绿素 b、叶绿素 a+b 的含量与对照相比分别下降了 7.82%、16.67% 和 10.64%, 与单独 Cd 处理时相比, 无显著差异, 表明 BABA 对耐 Cd 型菊花 ‘钟山金葵’ 在 Cd 胁迫下叶绿素的保护作用不明显。

2.6 Cd 胁迫及 BABA 处理下叶片的脯氨酸含量

如图 5 所示, Cd 胁迫增加了菊花叶片内脯氨酸的积累量。其中耐镉品种 ‘钟山金葵’ 对胁迫的响应更迅速, 且脯氨酸的积累量高于敏感品种 ‘钟山丹桂’。Cd 胁迫 8 d, ‘钟山丹桂’ 脯氨酸积累量比对照高出 117.38%, ‘钟山金葵’ 比对照高出 196.72%。

BABA 单独处理下叶片脯氨酸的含量有所下降。处理 4 d 后, ‘钟山丹桂’ 脯氨酸含量逐渐降低, 到第 8 天时, 相比对照下降了 19.93%; 处理 6 d 后, ‘钟山金葵’ 脯氨酸含量显著低于对照, 第 8 天时相比对照下降了 16.06%。BABA + Cd 共同处理后, 与单独 Cd 处理相比, 两个品种脯氨酸含量均有所下降。‘钟山丹桂’ 在处理第 4、6、8 天脯氨酸含量分别比 Cd 单独处理时下降了 4.70%、12.36%、8.5%, ‘钟山金葵’ 在处理第 2、4、6、8 天时分别比 Cd 单独处理下降了 5.73%、5.71%、11.76%、14.59%。

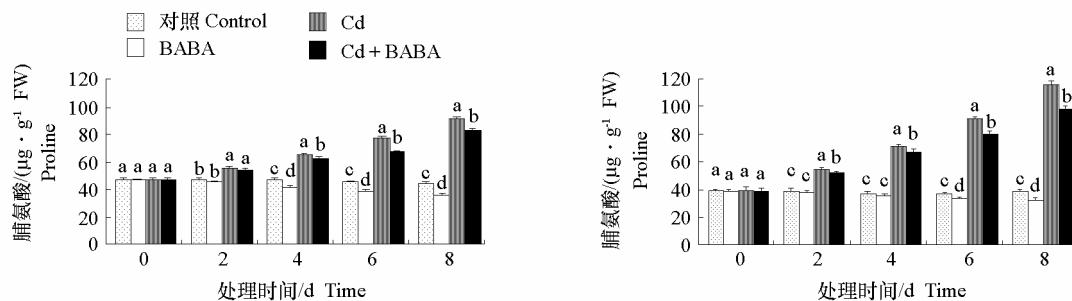


图 5 BABA 对 Cd 胁迫下 ‘钟山丹桂’ (左) 和 ‘钟山金葵’ (右) 叶片脯氨酸含量的影响
Fig. 5 Effects of BABA on the contents of proline in leaves of ‘Zhongshan Dangui’ (left) and ‘Zhongshan Jinkui’ (right) under Cd stress

3 讨论

Cd 在植物体内不同器官的积累和分布因不同植物种类和同种植物的不同品种而异 (Grant et al., 1998), 大多数植物吸收的 Cd 主要积累在根部 (Simon, 1998; Zhang et al., 2000)。本研究中发现, 菊花吸收的 Cd 也主要积累在地下根部。耐 Cd 品种 ‘钟山金葵’ 根系吸收 Cd 的能力较强, 其地上部和地下部积累的 Cd 均高于 Cd 敏感型品种 ‘钟山丹桂’, 且 ‘钟山金葵’ 地上部积累的 Cd 能大多积累在老叶中, 从而减少 Cd 对幼嫩叶片的伤害, 积累在老叶中的 Cd 将随着老叶脱落而被排出体外, 从而减少 Cd 对植株的毒害。通过清除落叶还能减少土壤中的 Cd。因此, 该耐 Cd 品种具有应用于 Cd 污染土壤修复的潜力。BABA + Cd 共同处理后, 地上部 Cd 含量与地下部 Cd 含量的比值增加, 表明 BABA 能促进 Cd 向地上部的转运。BABA 可以提高菊花对 Cd 污染土壤修复的作用。

株高、根长、生物量等是反映非生物胁迫最直观的指标 (原海燕, 2006; 李彦 等, 2008)。郭

艳丽等(2009)的研究表明Cd处理抑制了向日葵幼苗生长;张利红等(2005)发现随着Cd浓度的增加,小麦幼苗生物量显著降低;石贵玉等(2005)报道,Cd胁迫致使杂交水稻植株矮小,导致植株生长量不足,产量下降。本研究中发现Cd胁迫抑制了菊花的生长,表现为植株生长缓慢,叶片萎蔫、下垂、黄化,根系褐化,地上部和地下部生物量下降等毒害症状。耐Cd型品种‘钟山金葵’生长受抑制的程度低于Cd敏感型品种‘钟山丹桂’。BABA单独处理不影响菊花生长。BABA+Cd处理下Cd毒害程度明显低于单独Cd处理组,毒害症状延迟出现,株高、根长、地上部和地下部生物量均显著高于单独Cd处理组,表明BABA能减轻Cd胁迫对菊花生长的抑制作用。

相对电导率是衡量细胞膜透性的重要指标(刘俊祥等,2011)。Cd胁迫会破坏细胞的膜系统,从而抑制植物生长(张金彪和黄维南,2000)。重金属胁迫下细胞膜透性的变化还与膜脂过氧化程度有关。大量研究表明,重金属胁迫会导致植物膜脂过氧化作用(Zhao & Tan, 2005; 郑爱珍, 2012)。Shah等(2001)发现,500 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Cd导致水稻膜脂过氧化指标MDA含量显著升高。Hou等(2007)的研究发现,高浓度Cd处理会引起MDA含量的升高。本研究中发现,Cd胁迫下,菊花叶片MDA含量和相对电导率相比对照都有显著升高,即Cd胁迫导致了菊花叶片的膜脂过氧化作用。耐Cd品种‘钟山金葵’叶片MDA的含量和相对电导率均低于Cd敏感型品种‘钟山丹桂’,表明‘钟山金葵’遭受的氧化伤害程度较轻,细胞膜结构相对完整。BABA+Cd处理下,两个品种叶片MDA含量和相对电导率都显著低于单独Cd处理,表明BABA能缓解Cd胁迫对细胞膜结构的伤害,与BABA能减轻盐胁迫下稻苗叶片萎蔫,减轻盐胁迫对细胞膜的伤害,降低盐胁迫下膜的相对透性的结果(何永明等,2010)一致。

本研究中发现Cd胁迫下菊花叶绿素含量随着处理时间增长而显著降低,与前人报道Cd胁迫下玉米、小麦的生理效应(张利红等,2005; 刘建新,2005)相同。叶绿素含量的降低可能是由于胁迫引起的过氧化作用使植物叶绿体膜结构和功能遭到破坏,基粒垛叠混乱,类囊体减少,导致叶绿素合成量降低(Burzyński & Kłobus, 2004; López-Millán et al., 2009; Malec et al., 2010),也可能是Cd被植物吸收后,与叶绿素合成相关酶肽链富含SH的部分结合,从而抑制了酶的活性,导致叶肉细胞光合活性下降(Ekmekçi et al., 2008)。本研究中,BABA单独处理对菊花叶绿素含量无影响,BABA+Cd处理后,叶绿素含量下降的幅度低于单独Cd处理。Cao等(2008)研究发现,低钾胁迫下BABA预处理的拟南芥幼苗中叶绿素含量显著升高,但在非胁迫下BABA预处理并没有改变叶绿素的含量,本研究结果与之一致。BABA处理后,Cd敏感型菊花品种‘钟山丹桂’叶绿素a和叶绿素b的含量在处理后期(Cd胁迫4 d后)显著低于单独Cd处理,而耐Cd型品种‘钟山金葵’在处理后期与Cd单独处理时差异不显著,意味着BABA对Cd胁迫下Cd敏感型品种‘钟山丹桂’叶绿素降解的保护作用更明显。

脯氨酸是植物体内最有效的一种渗透调节物质,能保持膜结构的完整性,保护蛋白质分子,增加蛋白质分子间的水合作用,脯氨酸的积累是植物对逆境条件的一种适应性反应,许多植物在逆境胁迫下脯氨酸会迅速积累(Wu, 1995)。大量研究证实,植物在重金属胁迫下会累积游离脯氨酸。秦天才等(1998)发现Cd处理白菜后,其体内脯氨酸含量增加。Mehta和Gaur(1999)用Cd处理小球藻,其细胞内脯氨酸含量较对照提高了近4倍。本研究的结果表明,在Cd胁迫下,耐Cd型菊花品种‘钟山金葵’能通过迅速而大幅度地提高体内脯氨酸的含量来适应Cd胁迫的不良环境,表明脯氨酸在菊花耐受Cd毒害中起到重要作用。BABA+Cd共同处理后,两种菊花叶片脯氨酸的含量都低于单独Cd处理组,与何永明等(2010)发现BABA会降低盐胁迫下稻苗脯氨酸含量研究结果一致。Jakab等(2005)也曾报道,BABA在诱导拟南芥抗盐和干旱胁迫的作用中不能增加植株

脯氨酸的积累。推测 BABA 并不是通过增加脯氨酸含量的机制来缓解 Cd 对菊花的毒害作用。

References

- Bai X J, Liu L J, Zhang C H, Ge Y, Cheng W D. 2011. Effect of H_2O_2 pretreatment on cd tolerance of different rice cultivars. *Rice Science*, 18 (1): 29 – 35.
- Burzyński M, Klobus G. 2004. Changes of photosynthetic parameters in cucumber leaves under Cu, Cd and Pb stress. *Photosynthetica*, 42 (2): 505 – 510.
- Cao S Q, Jiang L, Yuan H B, Jian H Y, Ren G, Bian X H, Zou J Z, Chen Z Y. 2008. β -aminobutyric acid protects *Arabidopsis* against low potassium stress. *Acta Physiol Plant*, 30: 309 – 314.
- Cao S Q, Ren G, Jiang L, Yuan H B, Ma G H. 2009. The role of β -aminobutyric acid in enhancing cadmium tolerance in *Arabidopsis thaliana*. *Russ J Plant Physiol*, 56: 575 – 579.
- Cohen Y. 2002. β -aminobutyric acid-induced resistance against plant pathogens. *Plant Disease*, 86: 448 – 457.
- Ekmekekci Y, Tanyolac D, Ayhan B. 2008. Effects of cadmium on antioxidant enzyme and photosynthetic activities in leaves of two maize cultivars. *Journal of Plant Physiology*, 165 (6): 600 – 611.
- Gamlie A, Katan J. 1992. Influence of seed and root exudates on fluorescent *Pseudomonas* and fungi in solarized soil. *Phytopathology*, 82: 320 – 327.
- Grant C A, Buckley W T, Bailey L D, Selles F. 1998. Cadmium accumulating in crops. *Canadian Journal of Plant Science*, 78 (1): 1 – 17.
- Guo Yan-li, Tai Pei-dong, Han Yan-ping, Feng Qian, Li Pei-jun. 2009. Effects of cadmium on the growth and physiological characteristics of sunflower seedlings. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 3 (12): 2291 – 2296. (in Chinese)
- 郭艳丽, 台培东, 韩艳萍, 冯倩, 李培军. 2009. 镉胁迫对向日葵幼苗生长和生理特性的影响. *环境工程学报*, 3 (12): 2291 – 2296.
- He Yong-ming, Xie Jian-chun, Li Chun-xiao. 2010. Preliminary study on the enhancement of salt tolerance of rice seedlings by β -aminobutyric acid. *Journal of Anhui Agri Sci*, 38 (2): 641 – 642, 645. (in Chinese)
- 何永明, 谢建春, 李春晓. 2010. β -氨基丁酸增强水稻幼苗耐盐性的初步研究. *安徽农业科学*, 38 (2): 641 – 642, 645.
- Hou W H, Chen X, Song G L, Wang Q L, Chang C C. 2007. Effects of copper and cadmium on heavy metal polluted waterbody restoration by duckweed (*Lemna minor*). *Plant Physiology and Biochemistry*, 45 (1): 62 – 69.
- Jakab G, Ton J, Flors V, Zimmerli L, Métraux J P, Brigitte M M. 2005. Enhancing *Arabidopsis* salt and drought stress tolerance by chemical priming for its abscisic acid responses. *Plant Physiology*, 139: 267 – 274.
- Li He-sheng. 2000. The experiment principle and technique on plant physiology and biochemistry. Beijing: Higher Education Press. (in Chinese)
- 李合生. 2000. 植物生理生化实验原理和技术. 北京: 高等教育出版社.
- Li L Z, Liu X L, Peijnenburg W, Zhao J M, Chen X B, Yu J B, Wu H F. 2012. Pathways of cadmium fluxes in the root of the halophyte *Suaeda salsa*. *Ecotoxicol Environ Saf*, 75: 1 – 7.
- Li Yan, Zhang Ying-peng, Sun Ming, Gao Bi-mo. 2008. Research advance in the effects of salt stress on plant and the mechanism of plant resistance. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 24 (1): 258 – 263. (in Chinese)
- 李彦, 张英鹏, 孙明, 高弼模. 2008. 盐分胁迫对植物的影响及植物耐盐机理研究进展. *中国农学通报*, 24 (1): 258 – 263.
- Liu Jian-xin. 2005. Physiological and ecological responses of maize seedlings to cadmium stress. *Chinese Journal of Ecology*, 24 (3): 265 – 268. (in Chinese)
- 刘建新. 2005. 镉胁迫下玉米幼苗生理生态的变化. *生态学杂志*, 24 (3): 265 – 268.
- Liu Jun-xiang, Sun Zhen-yuan, Ju Guan-sheng, Han Lei, Qian Yong-qiang. 2011. Physiological response of *Zoysia japonica* to Cd^{2+} . *Acta Ecologica Sinica*, 31 (20): 6149 – 6156. (in Chinese)
- 刘俊祥, 孙振元, 巨关升, 韩蕾, 钱永强. 2011. 结缕草对重金属镉的生理响应. *生态学报*, 31 (20): 6149 – 6156.
- López-Millán A F, Sagardoy R, Solanas M, Abadía A, Abadía J. 2009. Cadmium toxicity in tomato (*Lycopersicon esculentum*) plants grown in hydroponics. *Environmental and Experimental Botany*, 65 (2): 376 – 385.
- Malec P, Maleva M G, Prasad M N V, Strzaka K. 2010. Responses of *Lemna trisulca* L. (Duckweed) exposed to low doses of cadmium: Thiols,

- metal binding complexes, and photosynthetic pigments as sensitive biomarkers of ecotoxicity. *Protoplasma*, 240 (1 - 4): 69 - 74.
- Mehta S K, Gaur J P. 1999. Heavy-metal-induced praline accumulation and its role in ameliorating metal toxicity in *Chlorella vulgaris*. *New Phyto*, 143: 253 - 259.
- Mohanty M, Dhal N K, Patra P, Das B, Reddy P S R. 2010. Phytoremediation: A novel approach for utilization of ironore wastes. *Rev Environ Contam Toxicol*, 206: 29 - 47.
- Qin Tian-cai, Wu Yu-shu, Wang Huan-xiao, Li Qi-ren. 1998. Effect of cadmium, lead and their interactions on the physiological and ecological characteristics of root system of *Brassica chinensis*. *Acta Ecologica Sinica*, 18 (3): 98 - 103. (in Chinese)
- 秦天才, 吴玉树, 王焕校, 李启任. 1998. 镉、铅及其相互作用对小白菜根系生理生态效应的研究. 生态学报, 18 (3): 98 - 103.
- Shah K, Kumar R G, Verma S, Dubey R S. 2001. Effect of cadmium on lipid peroxidation, superoxide anion generation and activities of antioxidant enzymes in growing rice seedlings. *Plant Science*, 161 (6): 1135 - 1144.
- Shi Gui-yu, Deng Huan-ai, Wang Jin-hua. 2005. The toxic effect of cadmium on rice seedling. *Journal of Guangxi Normal University*, 23 (3): 74 - 77. (in Chinese)
- 石贵玉, 邓欢爱, 王金花. 2005. 镉对杂交水稻幼苗毒害效应的研究. 广西师范大学学报, 23 (3): 74 - 77.
- Shi Xu-li, Wang Yun-zhu, Wang Cui-bo, Fang Wei-min, Chen Fa-di, Chen Su-mei. 2013. Cutting propagation with four cultivars of pot chrysanthemums. *Journal of Zhejiang A & F University*, 30 (1): 141 - 147. (in Chinese)
- 施旭丽, 王筠竹, 王萃铂, 房伟民, 陈发棣, 陈素梅. 2013. 4个国庆盆菊品种扦插繁殖. 浙江农林大学学报, 30 (1): 141 - 147.
- Simon L. 1998. Cadmium accumulation and distribution in sunflower plant. *J Plant Nutr*, 21 (2): 341 - 352.
- Verbruggen N, Hermans C, Schat H. 2009. Molecular mechanisms of metal hyperaccumulation in plants. *New Phytol*, 181: 759 - 776.
- Wu J T. 1995. Intracellular proline accumulation in some algae exposed to copper and cadmium. *Bot Bull Acad Sin*, 36: 89.
- Yuan Hai-yan. 2006. Studies on the accumulation, mechanism and influencing factors of cadmium absorption of four species of *Iris* L. [M. D. Dissertation]. Nanjing: Nanjing Agricultural University. (in Chinese)
- 原海燕. 2006. 鸢尾属 (*Iris* L.) 4种植物镉(Cd)积累、耐性机理及影响因子研究[硕士论文]. 南京: 南京农业大学.
- Zahed H, Takahiro M, Setsuko K. 2012. Proteomic study of β -aminobutyric acid-mediated cadmium stress alleviation in soybean. *Journal of Proteomics*, 75: 4151 - 4164.
- Zhang G P, Fukami M, Sekimoto H. 2000. Genotypic differences in effects of cadmium on growth and nutrient compositions in wheat. *J Plant Nutr*, 9: 1337 - 1350.
- Zhang Jin-biao, Huang Wei-nan. 2000. Advances on physiological and ecological effects of cadmium on plants. *Acta Ecologica Sinica*, 20 (3): 514 - 523. (in Chinese)
- 张金彪, 黄维南. 2000. 镉对植物的生理生态效应的研究进展. 生态学报, 20 (3): 514 - 523.
- Zhang Li-hong, Li Pei-jun, Li Xue-mei, Meng Xue-lian, Xu Cheng-bin. 2005. Effects on cadmium stress on the growth and physiological characteristics of wheat seedlings. *Chinese Journal of Ecology*, 24 (4): 458 - 460. (in Chinese)
- 张利红, 李培军, 李雪梅, 孟雪莲, 徐成斌. 2005. 镉胁迫对小麦幼苗生长及生理特性的影响. 生态学杂志, 24 (4): 458 - 460.
- Zhang Yong-gang, Fan Zhi-jin, Liu Xiu-feng, Yuan Jian-xun, Li Zheng-ming. 2006. A screening system for β -aminobutyric acid induction of cucumber against *Colletotrichum lagenarium*. *Agrochemicals*, 45 (4): 239 - 242. (in Chinese)
- 张永刚, 范志金, 刘秀峰, 苑建勋, 李正名. 2006. β -氨基丁酸诱导黄瓜抗黄瓜炭疽病筛选体系的构建. 农药, 45 (4): 239 - 242.
- Zhao H J, Tan J F. 2005. Role of calcium ion in protection against heat and high irradiance stress-induced oxidative damage to photosynthesis of wheat leaves. *Photosynthetica*, 43 (3): 473 - 476.
- Zheng Ai-zhen. 2012. Effects of cadmium on lipid peroxidation and ATPase activity of plasma membrane from Chinese kale (*Brassica alboglabra* Bailey) roots. *Acta Ecologica Sinica*, 32 (2): 483 - 488. (in Chinese)
- 郑爱珍. 2012. 镉胁迫对芥蓝根系质膜过氧化及 ATPase 活性的影响. 生态学报, 32 (2): 483 - 488.