应用生态学报 2015年10月 第26卷 第10期
Chinese Journal of Applied Ecology, Oct. 2015, **26**(10): 3153-3159

外源水杨酸改善 Cd 胁迫下路易斯安娜鸢尾的生长和养分吸收*

韩 鹰[1] 邓 鹏[2] 陈 刚[2]**
([1]苏州农业职业技术学院园艺科技学院, 江苏苏州 215008; [2]扬州大学生物科学与技术学院, 江苏扬州 225009)

摘 要 采用 Hoagland 溶液培养,研究了外源水杨酸(SA)预处理对镉(Cd)胁迫下路易斯安娜鸢尾生物量、含水量、光合作用、根系活力、Cd 积累、矿质养分吸收和抗氧化酶活性的影响.结果表明: Cd 胁迫下,SA 预处理的植株根叶干质量、根系活力和净光合速率提高.与单独 Cd 处理相比,SA 预处理后的胁迫植株 Cd 含量无明显变化,而叶片 N、P、S 含量显著提高,K 含量显著下降,根部抗氧化酶活性显著提高.表明 SA 预处理可明显缓解路易斯安娜鸢尾的 Cd 伤害,其原因不在于减少 Cd 吸收量而是提高了对 Cd 的抗性,矿质元素的吸收积累调节和根部抗氧化酶活性的提高是其毒害缓解的重要原因.

关键词 路易斯安娜鸢尾; 水杨酸; 镉; 生长
文章编号 1001-9332(2015)10-3153-07 **中图分类号** S682.1 **文献标识码** A

Improvement on the growth and nutrient absorption of *Iris hexagona* by exogenous salicylic acid under Cd stress.

HAN Ying[1], DEN Peng[2], CHEN Gang[2] ([1]*College of Horticulture and Technology, Suzhou Polytechnic Institute of Agriculture, Suzhou* 215008, *Jiangsu, China*; [2]*College of Bioscience and Biotechnology, Yangzhou University, Yangzhou* 225009, *Jiangsu, China*). *-Chin. J. Appl. Ecol.*, 2015, **26**(10): 3153-3159.

Abstract: The effects of exogenous salicylic acid (SA) pretreatment on the biomass, water content, photosynthesis, root vigor, Cd accumulation, nutrient absorption and antioxidant enzyme activity of *Iris hexagona* under Cd stress were studied by using Hoagland solution culture. The results showed that SA pretreatment promoted dry mass, root vigor and net photosynthetic rate of Cd-stressed *I. hexagona* seedlings. Compared with only Cd treatment, the Cd accumulation of Cd-treated plants with SA pretreatment remained unaffected, however, SA pretreatment increased contents of N, P, S, and decreased K content. Activities of antioxidant enzymes of Cd-treated seedling root were increased under SA pretreatment. In conclusion, the improvement on growth of *I. hexagona* by SA pretreatment under Cd stress was attributed to improving Cd tolerance rather than reducing Cd uptake. The regulation of mineral element accumulation and the increase of antioxidant enzyme activities could be explained for Cd resistance improvement induced by salicylic acid.

Key words: *Iris hexagona*; salicylic acid; cadmium; growth.

Cd 是植物生长的非必需元素,许多植物具有从水和土壤中摄取 Cd 并在体内积累的能力,当植物体内 Cd 积累达到一定程度,就会表现出生长迟缓、植物矮小,叶片黄化等毒害症状,高浓度的 Cd 对所有植物都有毒害作用[1-2].但是,不同植物对 Cd 的吸收、积累和抗性差异非常大.近几年,黄菖蒲、鸢尾、马蔺等鸢尾科水生观赏植物被报道对重金属 Cr、Cu、Pb、Cd 具有较强的耐受和富集能力[3-6],因这些植物在环境中具有观赏和富集重金属的双重功能而被广泛应用.路易斯安娜鸢尾(*Iris hexagona*)为鸢尾科(Iridaceae)鸢尾属(*Iris*)多年生宿根花卉,与黄菖蒲非常相近,是长江中下游植物资源中一种重要的水生花卉[7],对重金属 Cd、Pb 有较强的积累和耐受能力[8-9].

水杨酸(SA)是植物体内一种简单的酚类物质,具有多种生理调节作用,被认为是一种植物内源信

* 国家自然科学基金项目(30770344)、江苏省科技支撑计划项目(BE2010337)、苏州市科技计划项目(SN201009)和苏州农业职业技术学院科研基金项目(200801)资助.
** 通讯作者. E-mail: zwsl@yzu.edu.cn
2014-12-01 收稿,2015-06-30 接受.

号物质和新的植物激素.近几年在大豆、小麦、玉米等多种植物中报道了 SA 能缓解 Cd 诱导的氧化胁迫作用[10-12].但是,也有一些报道认为,SA 缓解 Cd 毒害可能与抗氧化系统无关,而与植物体内金属元素的吸收积累调节有关[13-14].因此,尽管国内外有许多研究表明 SA 能够缓解多种重金属对植物的毒害,但 SA 诱导植物重金属抗性机理的阐述目前仍未清晰,可能与不同植物种类、不同处理方法和时间有关.关于水杨酸对水生花卉重金属毒害的调节效应国内外尚未见文献报告.本研究以路易斯安娜鸢尾为材料,探讨了外源 SA 预处理对 Cd 胁迫下植株幼苗的生物量、含水量、根系活力、N、P、S、K 等矿质元素含量及根抗氧化酶活性的调节效应,旨在进一步明确外源 SA 根系预处理对路易斯安娜鸢尾 Cd 毒害的缓解作用,并初步探讨其作用机制,为路易斯安娜鸢尾对重金属的生物修复、种植推广应用提供科学的理论依据.

1 材料与方法

1.1 植物材料

待组织培养的路易斯安娜鸢尾幼苗在大棚生长到高度为 20 cm 左右,取回室内水培盆栽.室温 20~25 ℃,光强 150 μmol · m^{-2} · s^{-1}, 相对湿度 65%~70%,1/2 Hoagland 培养液培养,每 4 d 换一次培养液,隔天用 NaOH 调一次 pH 值,保持在 6.5 左右,1 月后转入不同处理.

1.2 试验设计

将 SA 加入培养液中形成 1 μmol · L^{-1}SA 浸泡幼苗根系 24 h,以不加 SA 的培养液浸泡幼苗根系作为参比,然后把幼苗均移入含有不同浓度 Cd 的培养液中,3 个 Cd 处理浓度分别为 0、100、500 μmol · L^{-1} $CdCl_2$.每处理 4 株苗,重复 3 次,共 12 株苗,处理 7 d 后采样并进行各指标的测定.

1.3 测定项目与方法

1.3.1 光合速率(P_n)及根系活力(ROC) 光合速率用德国 WALZ GFS-3000 光合荧光系统测定,光照强度为 1200 μmol · m^{-2} · s^{-1},叶温 25 ℃,大气 CO_2 浓度.每个处理选取 6 株,每株苗选相同位置 1~2 张叶片重复测定 3 次,取平均值.

用 TTC 法测定根系活力,称取鲜根 0.5 g,每处理重复 3 次,用 0.4%TTC 溶液和磷酸缓冲液(1/15 mol · L^{-1},pH 7.0)的等量混合液 10 mL 充分浸没,在 37 ℃下暗处保温 2 h,加入 1 mol · L^{-1}硫酸 2 mL,停止反应.取出并吸干水分后用少量乙酸乙酯提取,冲洗残渣,最后定容到 10 mL.485 nm 下比色,以空白作为参比,按同样的方法绘制标准曲线,计算四氮唑还原量[15-16].

1.3.2 干质量及含水量测定 将每个处理 12 株苗根系浸泡于 20 mmol · L^{-1} Na_2-EDTA 中 15 min,蒸馏水反复冲洗,擦干水分后将其中 6 株苗的根叶(含基部茎节)分开,分别称得根叶鲜质量并取平均值(FM),然后 105 ℃杀青 15 min,80 ℃烘至恒量,称得干质量并取平均值(DM),干样用于各元素含量的测定.另外 6 株苗叶与根分开后液氮冷冻,-80 ℃保存,用于酶活性的测定.

含水量参照文献[15]以下式计算:

含水量=(鲜质量-干质量)/干质量

1.3.3 Cd、N 含量的测定 用万能粉碎机或玛瑙研钵将根和叶分别磨成粉末,过 40 目筛后待用.称取适量,每处理重复 3 次.用 HNO_3 + $HClO_4$(V∶V=87∶13)混合酸消煮完全,采用 TAS-986 原子吸收分光光度计测定 Cd 含量.用浓硫酸消化后,采用 FOSS 全自动定氮仪测定 N 含量.

1.3.4 Cd、P、K 和 S 相对含量的测定 取 3 个位点,叶、基部茎节和根皮层.直接将样品用导电银胶粘在样品台上,用荷兰飞利浦公司的 XL-30 型环境扫描电镜进行观察和能谱分析.样品室的环境条件为:冷台温度 5 ℃,样品室气压 4 Torr,加速电压 15 KV.上述样品在扫描电子显微镜下进行观察的同时,进行 X 射线电子探针显微分析.能谱仪为美国 Thermo 公司的 Kevex 能谱仪,加速电压为 20 KV,速流为 0.15 μA,样品倾角为 0°,样品与探针间的角度为 33°,工作距离为 10.0 mm,对样品进行点分析.X-射线能谱分析记录叶、基部茎节和根皮层的离子峰值,用附带标样程序计算机判断峰值代表的元素种类,每个处理重复 6 次取平均值计算 Cd、P、K 和 S 元素相对含量(以质量百分比,即 mass%表示).未检测出 N 的相对含量.

1.3.5 过氧化氢酶(CAT)、过氧化物酶(POD)、超氧化物歧化酶(SOD)活性和丙二醛(MDA)含量的测定 分别称取 1 g 根和叶鲜冻样,每个处理重复 3 次,用含水 1 mmol · L^{-1}EDTA 和 1%PVP 的磷酸缓冲液(pH7.0)10 mL 磨成均浆,10000 ×g 4 ℃离心 15 min,上清液用于酶活性测定.参照李合生[16]提出的方法,用氮蓝四唑(NBT)还原法测定 SOD 活性,以抑制 NBT 光化还原的 50%为一个酶活力单位.用愈创木酚法测定 POD 活性,以每分钟每毫克蛋白 460 nm 的吸光度变化为一个酶活力单位.用硫代巴比妥

酸法测定 MDA 含量.用紫外吸收法测定 CAT 活性，以每分钟每毫克蛋白降解的过氧化氢微摩尔数为一个酶活力单位[17].

1.4　数据处理

试验数据在 Excel 下建立数据库，数据均为“平均值±标准差”形式.用 SPSS 17.0 统计软件进行双因素方差分析，各均值间采用 Duncan 多重比较(α=0.05).

2　结果与分析

2.1　SA 对 Cd 胁迫下根叶干质量、光合速率及根系活力的影响

与对照相比，100 和 500 μmol·L^{-1}Cd 处理 7 d 后，根和叶的干质量显著下降，根的生长对 Cd 处理更加敏感，分别比对照下降了 30.6% 和 55.1%(表 1).SA 预处理可以显著改善 Cd 胁迫下路易斯安娜鸢尾的根叶生长，特别是根干质量比单独 100 μmol·L^{-1} Cd 处理增加 35.2%，比单独 500 μmol·L^{-1} Cd 处理增加 45.4%.根和叶的相对含水量都随着 Cd 浓度的上升而显著下降，SA 预处理可以提高 Cd 胁迫下根的含水量，100 μmol·L^{-1}Cd 时差异显著，500 μmol·L^{-1}Cd 时因部分根系失水死亡差异不显著.经 Cd 处理后路易斯安娜鸢尾光合速率和根系活力显著下降，SA 预处理不能改变光合速率和根系活力随 Cd 浓度增加而下降的趋势.但 SA 预处理后，光合速率和根系活力均比同一浓度下单独 Cd 处理显著提高.无 Cd 胁迫条件下，单独 SA 处理对植物生长没有促进作用(表 1).

2.2　SA 对 Cd 胁迫下根叶 Cd 积累的影响

如图 1 所示，路易斯安娜鸢尾经 Cd 处理后，体内大量积累 Cd，且根的积累量明显高于叶，100 μmol·L^{-1} Cd 处理时根积累量达到 183 μg·g^{-1}DM，是叶内 Cd 含量的 3 倍多，500 μmol·L^{-1}Cd 处理时根积累量达到 784 μg·g^{-1}DM，是叶的 7 倍左右.SA 预处理后，根叶中 Cd 积累量与同一浓度单独 Cd 处理非常接近，无显著差异.

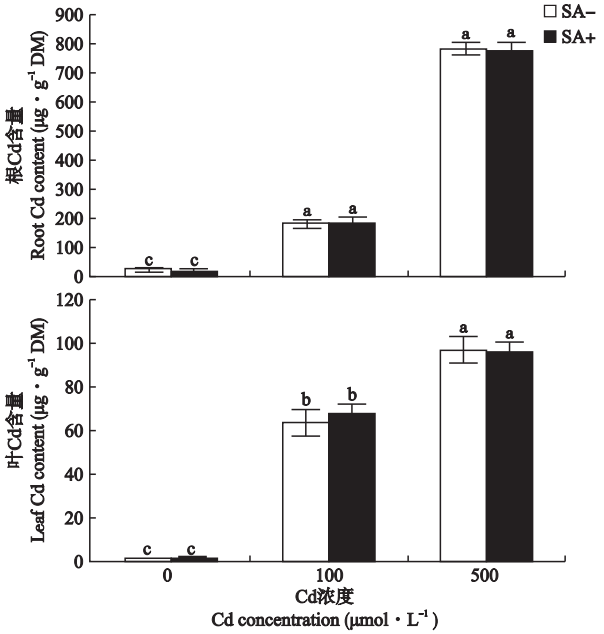


图 1　Cd 胁迫下 SA 处理对路易斯安娜鸢尾根叶 Cd 积累的影响

Fig.1　Effects of SA on Cd contents in leaf and root of *Iris hexagona* under Cd stress.

不同小字母表示处理间差异显著(P<0.05) Different letters meant significant difference among treatments at 0.05 level. 下同 The same below.

2.3　SA 对 Cd 胁迫下根叶 N 含量的影响

如图 2 所示，随着 Cd 处理浓度的增加，叶的 N 含量呈明显的下降趋势，但根的N含量仅在500

表 1　SA 对 Cd 胁迫下路易斯安娜鸢尾干质量、含水量、光合速率和根系活力的影响

Table 1　Effects of SA on dry mass, water content, photosynthetic rate and root oxidizing capacity in *Iris hexagona* under Cd stress

Cd 浓度 Cd concentration (μmol·L^{-1})	SA 处理 SA treatment	叶干质量 Leaf dry mass (mg·$plant^{-1}$)	根干质量 Root dry mass (mg·$plant^{-1}$)	叶含水量 Leaf water content (g·g^{-1})	根含水量 Root water content (g·g^{-1})	光合速率 P_n (μmol·m^{-2}·s^{-1})	根系活力 Root vigor (mg·h^{-1}·g^{-1}FM)
0	SA−	967±117a	49±4.7a	8.09±0.91a	20.67±1.74a	7.96±0.30a	1.75±0.02a
	SA+	969±132a	50±4.4a	8.42±0.65a	21.30±1.10a	8.10±0.31a	1.82±0.05a
100	SA−	774±159b	34±4.3b	6.59±0.74b	17.67±1.37b	3.65±0.28c	1.17±0.02c
	SA+	792±117b	46±2.8a	6.76±0.43b	20.01±1.46a	5.40±0.93b	1.68±0.03b
500	SA−	612±50c	22±2.1c	4.60±0.63c	13.63±0.82c	1.80±0.72e	0.44±0.02e
	SA+	745±111bc	32±3.4b	4.65±0.78c	15.15±1.53c	2.44±0.28d	0.86±0.02d
Cd		18.07***	110.31***	79.23***	71.74***	482.17***	1998.80***
SA		1.62ns	37.40***	0.63ns	10.59**	29.13***	499.82***
Cd×SA		1.07ns	8.55**	0.11ns	1.16ns	9.18***	82.50***

同列不同小字母处理间差异显著(P<0.05) Different small letters in the same column stood for significant difference at 0.05 level. ns: P>0.05; *P<0.05; **P<0.01; ***P<0.001.

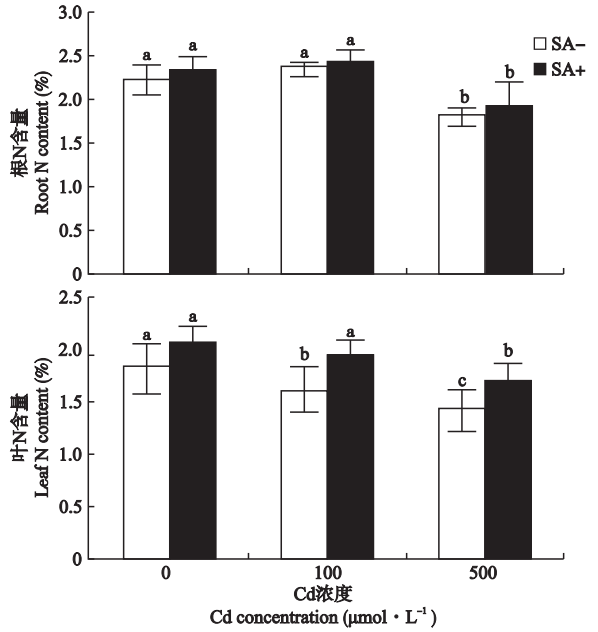


图 2 Cd 胁迫下 SA 处理对路易斯安娜鸢尾根叶 N 积累的影响

Fig.2 Effects of SA on N contents in leaf and root of *Iris hexagona* under Cd stress.

μmol · L^{-1}Cd 处理时明显降低.SA 预处理后,叶 N 含量仍随 Cd 处理浓度上升而下降,但 SA 预处理后比同一浓度单独 Cd 处理显著升高.SA 预处理后,根的 N 含量与同一浓度单独 Cd 处理相比无明显变化.

2.4 SA 对叶片 Cd、P、K、S 相对含量的影响

由表 2 可知,随着 Cd 处理浓度的增加,叶的 P、S、Cd 相对含量增加,而 K 的相对含量降低.经 SA 预处理后,随着 Cd 处理浓度的增加,各元素相对含量均保持了原来的变化趋势,但与单独 Cd 处理相比,P、S 相对含量显著升高,K 的相对含量显著降低.经 SA 预处理后,Cd 相对含量与同一浓度单独 Cd 处理相近.

表 2 SA 处理对路易斯安娜鸢尾叶 P、S、K、Cd 相对含量(质量百分率%)的影响

Table 2 Effects of SA on relative contents of P, S, K, Cd in leaves of *Iris hexagona* (mass%)

Cd 浓度 Cd concentration (μmol · L^{-1})	SA 处理 SA treatment	P	S	K	Cd
0	SA−	7.6±1.3e	4.7±0.6e	87.7±1.5a	0.0±0.0c
	SA+	7.8±1.8e	5.1±0.6e	87.1±2.3a	0.0±0.0c
100	SA−	8.3±1.5d	8.1±1.8d	82.1±1.2b	1.5±0.3b
	SA+	9.2±1.1c	9.9±1.2c	79.3±1.8c	1.6±0.5b
500	SA−	10.4±0.8b	10.7±0.9b	76.9±1.5d	2.0±0.2a
	SA+	11.4±0.5a	12.4±0.6a	74.0±0.8e	2.2±0.5a

同列不同小字母表示处理间差异显著($P<0.05$) Different letters in the same column meant significant difference among treatments at 0.05 level. 下同 The same below.

2.5 SA 对根皮层 Cd、P、K、S 相对含量的影响

随着 Cd 处理浓度的增加,根皮层 Cd 相对含量显著增加, P、S 稍有增加但差异不显著,而 K 的相对含量显著降低.经 SA 预处理后,各元素相对含量随着 Cd 处理浓度的增加而增加,但与单独 Cd 处理相比,K 的相对含量显著降低,P、S 略有上升但差异不显著,Cd 相对含量无明显差异(如表 3).

2.6 SA 对基部茎节 Cd、P、K、S 相对含量的影响

路易斯安娜鸢尾基部有一个膨大的茎节,生长多年后还会形成粗壮的根状茎.试验中的路易斯安娜鸢尾苗龄小,但基部茎节已明显膨大,我们对这个特殊部位进行了元素分析.结果表明,随着 Cd 处理浓度的增加,基部茎节 P、S、Cd 相对含量增加,而 K 的相对含量降低,而与其他部位相比,基部茎节 Cd 的相对含量最高.经 SA 预处理后各元素相对含量仍随着 Cd 处理浓度的增加而增加.但与单独 Cd 处理相比,经 SA 预处理后 P、S 相对含量略有增加但差异不显著,而 K 的相对含量明显降低.经 SA 预处理后,Cd 的相对含量均比同一浓度单独 Cd 处理比较接近(表 4).

表 3 SA 处理对路易斯安娜鸢尾根皮层 P、S、K、Cd 相对含量(质量百分率%)的影响

Table 3 Effects of SA on relative contents of P, S, K, Cd in root cortex of *Iris hexagona* (mass%)

Cd 浓度 Cd concentration (μmol · L^{-1})	SA 处理 SA treatment	P	S	K	Cd
0	SA−	10.3±0.8c	4.6±1.2c	84.5±1.3a	0.5±0.3c
	SA+	11.0±0.6bc	4.8±1.2c	83.5±1.4a	0.6±0.2c
100	SA−	11.5±2.9ab	6.0±2.0ab	80.8±1.5b	1.7±0.1b
	SA+	12.7±1.2ab	5.3±1.4bc	80.1±1.1b	1.9±0.4b
500	SA−	12.0±1.4ab	6.0±0.9ab	78.5±0.8c	3.5±0.9a
	SA+	13.8±2.5a	7.0±1.9a	75.7±2.2d	3.4±0.3a

表 4 SA 处理对路易斯安娜鸢尾基部茎节 P、S、K、Cd 相对含量(质量百分率%)的影响

Table 4 Effects of SA on relative contents of P, S, K, Cd in basal stems of *Iris hexagona* (mass%)

Cd 浓度 Cd concentration (μmol · L^{-1})	SA 处理 SA treatment	P	S	K	Cd
0	SA−	7.5±0.8cd	10.4±0.7b	81.8±0.3a	0.3±0.2c
	SA+	9.1±1.3c	10.4±2.6b	80.1±1.7a	0.4±0.3c
100	SA−	8.6±0.7cd	10.9±1.8b	73.4±2.2b	7.0±0.2b
	SA+	12.1±2.0b	11.2±0.6b	69.8±0.6c	7.4±2.1b
500	SA−	13.1±2.1a	11.5±0.2ab	66.5±2.0d	9.2±1.0a
	SA+	14.0±1.0a	12.4±2.2a	63.9±2.5e	9.7±0.9a

表 5　SA 处理对路易斯安娜鸢尾根部 CAT、POD、SOD 活性和 MDA 含量的影响
Table 5　Effects of treatments of SA on activities of CAT, POD, SOD and MDA contents in *Iris hexagona* seedlings

Cd 浓度 Cd concentration (μmol · L^{-1})	SA 处理 SA treatment	CAT (U · mg^{-1} Pro)	POD (U · mg^{-1} Pro)	SOD (U · mg^{-1} Pro)	MDA (nmol · g^{-1} FM)
0	SA−	5.36±0.55a	34.10±1.14c	121.1±3.9d	3.92±0.13c
	SA+	5.85±0.80a	44.93±5.56b	130.2±5.2c	3.93±0.52c
100	SA−	3.92±0.33b	37.33±0.49c	142.1±2.4b	4.78±0.25b
	SA+	5.6±0.93a	49.16±5.00b	153.2±8.1a	4.18±0.30c
500	SA−	2.3±0.24c	46.74±0.44b	106.7±6.9e	5.46±0.16a
	SA+	3.08±0.25bc	55.39±4.58a	120.1±7.6d	4.64±0.18b

2.7　SA 对根部抗氧化酶活性的影响

从表 5 可以看出,随着 Cd 处理浓度的升高,路易斯安娜鸢尾根的 CAT 活性下降,POD 活性上升,SOD 活性在 100 μmol · L^{-1} Cd 处理时上升,而在 500 μmol · L^{-1} Cd 处理浓度时下降.经 SA 预处理后,CAT,POD 和 SOD 活性均比同一浓度单独 Cd 处理升高.丙二醛(MDA)是膜脂过氧化产物,反映了膜受损程度.路易斯安娜鸢尾根的丙二醛(MDA)含量随 Cd 处理浓度增加而增加, SA 预处理后根 MDA 含量显著低于同一浓度单独 Cd 处理.

3　讨　　论

对大多数植物来说,叶内 Cd 浓度大于 5~10 μg · g^{-1}就可造成伤害[18].因此,大部分植物吸收的 Cd 主要积累在根部,向地上部转运的能力是植物耐 Cd 能力大小的重要因素[19].在本试验中,路易斯安娜鸢尾经 Cd 处理后,体内大量积累 Cd,经过 7 d 100~500 μmol · L^{-1}Cd 处理,叶内 Cd 含量达到 64~98 μg · g^{-1} DM,根的积累量还要大大高于叶.另外,对 Cd 相对含量的测定表明,在叶、基部茎节和根皮层中 Cd 含量均随着 Cd 处理浓度的增加而增加,基部茎节中比例最高.说明路易斯安娜鸢尾根具有较强的 Cd 积累能力,基部膨大的茎节是 Cd 积累的主要场所.综合考虑生长速度、生物量及观赏价值,路易斯安娜鸢尾可能是水体和湿地去除 Cd 污染的有效植物,其实践应用值得进一步研究.

植物体内营养元素的失调是植物 Cd 毒害的重要原因之一.植物根系对大部分矿质元素的吸收以主动吸收方式进行,即通过细胞膜上的转运蛋白进行转运,而部分有毒元素的吸收也是依靠这一途径.通常 Cd 是通过根部吸收到植物体内,且常常与细胞膜上的二价金属离子产生竞争作用,致使植物对营养元素吸收能力减弱,进而影响植物正常生长发育[20].一般来说 N、K、Mg 吸收会受到 Cd 的抑制,P、S、Ca 有较多促进吸收的报道[21-22].最近几年,关于 P、S 在 Cd 胁迫耐受机制中的作用越来越受到重视,研究表明,为了保持足够高的谷胱甘肽(GSH)水平,Cd 胁迫后玉米需要通过根系吸收更多的 S[23-24].S 元素是植物螯合肽(PCs)中的关键元素,其通过-SH 螯合细胞质中游离态 Cd,从而降低 Cd 对细胞质中功能蛋白的结合几率,达到减轻 Cd 毒害的目的.Stefania 等[25]研究表明,施 S 可提高玉米谷氨酸合成酶(GS)的活性,并产生植物络合素(PC),从而降低 Cd 的毒性.本研究结果表明,在 Cd 胁迫条件下,叶内的 N 含量显著下降,K 相对含量显著下降,P、S 相对含量显著上升;基部茎节、根皮层均表现为 K 含量的显著下降,而 P、S 含量呈上升趋势,但差异不显著,进一步证实 Cd 胁迫可以显著抑制路易斯安娜鸢尾 N、K 的吸收代谢,促进对 P、S 的吸收并且主要向地上部积累.

SA 及其衍生物可以影响植物的生理生化代谢,在调节植物生长发育中具有重要作用.近几年,关于 SA 缓解植物重金属毒害有大量的研究报道.苜蓿、玉米、小麦、水稻、大麦等多种植物种子经 SA 浸泡后能缓解 Cd 毒害[11,14,26-28].Metwally 等[13]用 500 μmol · L^{-1} SA 预处理大麦根系,可以改善 Cd 对根和地上部的生长抑制.Guo 等[29]在水稻中得到了类似的结果,用 10 μmol · L^{-1}SA 预处理水稻根系后,Cd 对水稻幼苗的生长抑制明显减轻,多个抗氧化酶活性显著提高.SA 叶面处理也具有缓解 Cd 毒害的作用,Ahmad 等[30]用 1.0 mmol · L^{-1}SA 喷施芥菜叶面表明,SA 可以缓解 Cd 对芥菜的生长抑制.Noriega 等[10]用 0~500 mmol · L^{-1}SA 处理大豆叶片明显缓解了 Cd 诱导的氧化胁迫.以往研究表明,不同植物种类、不同 Cd 胁迫程度,不同 SA 处理方法、时间、浓度,其缓解机制都有很大不同.路易斯安娜鸢尾的种皮很厚,生产中种子苗的出苗率较低,一般采用分株繁殖和组培苗繁殖的方法.另外,在准备试验过程

中发现,路易斯安娜鸢尾对 SA 敏感,超过 10 μmol·L^{-1} SA 就会对其根系生长产生影响.因此,本试验采用低浓度 SA 预处理根系来探索提高路易斯安娜鸢尾 Cd 抗性的方法.结果表明,SA 根系预处理与同一浓度单独 Cd 处理相比,叶片光合速率显著提高,在 500 μmol·L^{-1}Cd 处理时干质量提高差异显著.经 SA 预处理后根系含水量、根系活力显著上升,根干质量在 100 μmol·L^{-1}Cd 处理时就得到明显提高,说明 SA 预处理可以缓解 Cd 对路易斯安娜鸢尾的毒害,且根对毒害缓解作用的反应比较敏感.这可能是由于根系直接与处理溶液接触,更易对外界环境做出反应.另外,本试验表明,在同一 Cd 胁迫浓度下,SA 预处理后根和叶 Cd 含量与单独 Cd 处理相比没有显著差异(图 1),说明 SA 预处理对 Cd 毒害的缓解作用不是通过减少 Cd 吸收量,而是增加了对 Cd 耐性,这与 Drazic 等[15]的报道结果一致.

近几年,在玉米、水稻、大麦、大豆、大麻、绿豆、苔子等多种植物中报道了 SA 能缓解 Cd 诱导的氧化胁迫[31-33].但是,Metwally 等[13]指出,SA 可以缓解大麦 Cd 毒害导致的脂类过氧化,增加根和地上部的鲜质量,而抗氧化酶如 CAT、抗坏血酸过氧化物酶(APX)的活性下降,说明 SA 对大麦的 Cd 毒害缓解与抗氧化系统无关,可能存在另外的缓解机制[13].Drazic 等[15]报道了 SA 通过调节各元素的吸收缓解大豆 Cd 毒害.Drazic 等[14]用 10 μmol·L^{-1}SA 预处理紫花苜蓿种子,可以改善 Cd 对根和茎生长抑制作用,调节金属元素吸收,保持幼苗体内的离子平衡.因此,SA 调节离子的跨膜运输,调节 N、P、K、Mg、S、Fe 等主要营养元素及 Cd 的吸收、运输和分配是 SA 缓解 Cd 毒害的另一个重要机制.本试验结果也证明,与同一浓度单独 Cd 处理相比,SA 预处理后叶 N 含量显著上升,P、S 的相对含量也显著上升,而 K 相对含量进一步下降;基部茎节和根皮层中 P、S 的相对含量呈上升趋势但无显著差异,说明 SA 预处理能显著促进 N、S、P 的地上部运输,提高了叶片对 Cd 的耐性.另外,本研究中 SA 预处理后 K 相对含量进一步下降,究其原因,可能是 SA 作为酚类物质,其作用位点之一在细胞膜上,引起跨膜电势快速去极化,从而增加膜透性,使 K^+等小分子物质的外渗增加,影响了 K 离子的吸收[34].

另一方面,本试验中路易斯安娜鸢尾经 SA 预处理后,根部 N、P、S、K 等元素含量与单独 Cd 处理没有显著差异,而所测多种抗氧化酶活性显著提高,说明 SA 预处理对路易斯安娜鸢尾幼苗 Cd 胁迫的缓解作用,除了调节营养元素的吸收和分配,还可能同时与抗氧化系统有关.已有研究表明,只要重金属胁迫没有超过植物的抵抗能力,一般表现为 CAT 活性下降而 POD 和 SOD 活性上升,同时 MDA 含量上升[11,35].本研究中,路易斯安娜鸢尾根经 100 μmol·L^{-1} Cd 处理后 CAT 活性下降,SOD、POD 活性上升,MDA 含量上升,而经 500 μmol·L^{-1} Cd 处理后根叶均表现为 CAT、SOD 活性下降,POD 活性上升,MDA 含量上升.说明 100 μmol·L^{-1}Cd 虽然对路易斯安娜鸢尾根造成了氧化伤害,但根内的抗氧化系统作用明显,具有较强的 Cd 耐性,而 500 μmol·L^{-1}Cd 处理超出其生理抗性范围.经 SA 预处理后,根叶中 CAT、SOD、POD 活性均比同一浓度单独 Cd 处理的活性高,而 MDA 含量则比同一浓度单独 Cd 处理的含量低,说明 SA 预处理显著提高了根部抗氧化酶活性,有效减少了活性氧的产生,降低脂类过氧化,保持了生物膜的稳定性,从而缓解了 Cd 对路易斯安娜鸢尾根造成的氧化伤害.

综上所述,路易斯安娜鸢尾具有较强的 Cd 吸收和积累能力,低浓度 SA 根系预处理可以调节叶片营养元素 N、P、K、S 的积累,同时提高根部抗氧化酶活性,进一步提高路易斯安娜鸢尾的 Cd 抗性,具有实践应用价值.关于外源 SA 对路易斯安娜鸢尾 Cd 毒害的缓解机理有待进一步研究.

参考文献

[1] Sandalio LM, Dalurzo HC, Gomez M, *et al*. Cadmium-induced changes in the growth and oxidative metabolism of pea plants. *Journal of Experimental Botony*, 2001, **52**: 2115-2126

[2] Mazen A. Accumulation of four metals in tissues of *Corchorus olitorius* and possible mechanisms of their tolerance. *Biologia Plantarum*, 2004, **48**: 267-272

[3] Han YL, Yuan HY, Huang SZ, *et al*. Cadmium tolerance and accumulation by two species of *Iris*. *Ecotoxicology*, 2007, **16**: 557-563

[4] Han YL, Huang SZ, Gu JG, *et al*. Tolerance and accumulation of lead by species of *Iris* L. *Ecotoxicology*, 2008, **17**: 853-859

[5] Caldelas C, Araus JL, Febrero A, *et al*. Accumulation and toxic effects of chromium and zinc in *Iris pseudacorus* L. *Acta Physiologiae Plantarum*, 2012, **34**: 1217-1228

[6] Zhang XB, Liu P, Yang YS, *et al*. Phytore mediation of urban wastewater by model wetlands with ornamental hydrophytes. *Journal of Environmental Sciences*, 2007, **19**: 902-909

[7] Zhou Y-Z (周玉珍), Cheng H-Z (成海钟), Zhang W-J (张文婧), *et al*. Study on introduction and fruit character of Louisiana iris in Suzhou. *Northern Horticul-*

ture (北方园艺), 2010(21): 72-75 (in Chinese)
[8] Han Y (韩　鹰), Gao Y (高　岳), Wang W (王　薇), *et al*. Studies of cadmium uptake, accumulation and stress resistance in Louisiana iris. *Journal of Yangzhou University* (Agricultural and Life Science Edition) (扬州大学学报:农业与生命科学版), 2014, **35**(1): 76-80 (in Chinese)
[9] Zhu X-D (朱旭东), Tian S-Q (田松青), Yuan H-Y (原海燕), *et al*. Studies on growth and distribution of Iris *Germanica germanica* L. under lead stress. *Northern Horticulture*(北方园艺), 2014(9): 82-86 (in Chinese)
[10] Noriega G, Caggiano E, Lecube ML, *et al*. The role of salicylic acid in the prevention of oxidative stress elicited by cadmium in soybean plants. *Biometals*, 2012, **25**: 1155-1165
[11] Krantev A, Yordanova R, Janda T, *et al*. Treatment with salicylic acid decreases the effect of cadmium on photosynthesis in maize plants. *Journal of Plant Physiology*, 2008, **165**: 920-931
[12] Agami RA, Mohamed GF. Exogenous treatment with indole-3-acetic acid and salicylic acid alleviates cadmium toxicity in wheat seedlings. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2013, **94**: 164-171
[13] Metwally A, Finkemeier I, Georgi M, *et al*. Salicylic acid alleviates the cadmium toxicity in barley seedlings. *Plant Physiology*, 2003, **132**: 272-281
[14] Dražić G, Mihailovic N, Lojic M. Cadmium accumulation in *Medicago sativa* seedlings treated with salicylic acid. *Biologia Plantarum*, 2006, **50**: 239-244
[15] Dražić G, Mihailović N. Modification of cadmium toxicity in soybean seedlings by salicylic acid. *Plant Science*, 2005, **168**: 511-517
[16] Li H-S (李合生). Principle and Technology of Plant Physiology and Biochemistry Experiment. Beijing: Higher Education Press, 2000 (in Chinese)
[17] Aebi H. Catalase *in vitro*. *Methods in Enzymology*, 1984, **105**: 121-126
[18] White PJ, Brown PH. Plant nutrition for sustainable development and global health. *Annals of Botany*, 2010, **105**: 1073-1080
[19] Rosa G, Montes M, Parsons J. Cadmium uptake and translocation in tumbleweed (*Salsola kaki*), a potential Cd-hyperaccumulator desert plant species: ICP/OES and XAS studies. *Chemosphere*, 2004, **55**: 117-123
[20] Yuan H-Y (原海燕), Huang S-Z (黄苏珍), Guo Z (郭　智), *et al*. Effects of Zn on the growth, Cd accumulation and physiological resistance of *Iris jactea* var. *chinensis* under Cd stress. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2007, **18**(9): 2111-2116 (in Chinese)
[21] Jail A, Sellers F, Clarke JM. Effect of cadmium on growth and the uptake of cadmium and other elements by durum wheat. *Journal of Plant Nutrition*, 1994, **17**: 1839-1858
[22] Moral R, Gonez I. Effect of cadmium on nutrient distribution, yield and growth of tomato grown in soilless culture. *Journal of Plant Nutrition*, 1994, **17**: 953-962
[23] Nocito FF, Pirovano L, Cocucci M, *et al*. Cadmium-induced sulfate uptake in maize roots. *Plant Physiology*, 2002, **129**: 1872-1879
[24] Sun J-Y (孙建云), Shen Z-G (沈振国). Effects of Cd stress on photosynthetic characteristics and nutrient uptake of cabbages with different Cd-tolerance. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2007, **18**(11): 2605-2610 (in Chinese)
[25] Stefania A, Sabrina Z, Calvino P. Role of sulphur availability on cadmium-induced changes of nitrogen and sulphur metabolism in maize (*Zea mays* L.) leaves. *Journal of Plant Physiology*, 2004, **161**: 795-799
[26] Panda SK, Patra HK. Effect of salicylic acid potentiates cadmium-induced oxidative damage in *Oryza sativa* L. leaves. *Acta Physiologiae Plantarum*, 2007, **29**: 567-575
[27] Moussa HR, El-Gamal SM. Effect of salicylic acid pretreatment on cadmium toxicity in wheat. *Biologia Plantraum*, 2010, **54**: 315-320
[28] Guo B, Liang YC, Zhu YG, *et al*. Role of salicylic acid in alleviating oxidative damage in rice roots (*Oryza sativa*) subjected to cadmium stress. *Environmental Pollution*, 2007, **147**: 743-749
[29] Guo B, Liang Y, Zhu Y. Does salicylic acid regulate antioxidant defense system, cell death, cadmium uptake and partitioning to acquire cadmium tolerance in rice? *Journal of Plant Physiology*, 2009, **166**: 20-31
[30] Ahmad P, Nabi G, Ashraf M. Cadmium-induced oxidative damage in mustard [*Brassica juncea* (L.) Czern. & Coss.] plants can be alleviated by salicylic acid. *South African Journal of Botany*, 2011, **77**: 36-44
[31] Choudhury S, Panda SK. Role of salicylic acid in regulating cadmium induced oxidative stress *in Oryza sativa* L. roots. *Bulgarian Journal of Plant Physiology*, 2004, **30**: 95-110
[32] Zhang FQ, Zhang HX, Xia Y, *et al*. Exogenous application of alicylic acid alleviates cadmium toxicity and reduces hydrogen peroxide accumulation in root apoplasts of *Phaseolus aureus* and *Vicia sativa*. *Plant Cell Reports*, 2011, **30**: 1475-1483
[33] Cui WT, Li L, Gao ZZ. Haem oxygenase-1 is involved in salicylic acid-induced alleviation of oxidative stress due to cadmium stress in *Medicago sativa*. *Journal of Experimental Botany*, 2012, **63**: 5521-5534
[34] Hoeberichts JA, Hulsebos TJ, Van Wezenbeek PM, *et al*. The site of action of 2-4 dinitrophenol and saliclic acid upon the uncoupler-indued K^+ effiux from non-metabolizing years. *Biochimica et Biophysica Acta*, 1980, **595**: 126-132
[35] Siedlecka A, Krupa Z. Functions of enzymes in heavy metal treated plants// Prasad MNV, Kazimierz S, eds. Physiology and Biochemistry of Metal Toxicity and Tolerance in Plants. Amsterdam, The Netherlands: Kluwer, 2002: 56-62

作者简介　韩　鹰,女,1972 年生,硕士,副教授. 主要从事园艺植物栽培生理研究. E-mail: hygfx@126.com

责任编辑　肖　红