

硅对镉胁迫下红树白骨壤酚类代谢的影响*

张琼^{1,2**} 刘景春² 卢豪良² 段罕慧² 严重玲²

(¹ 闽南师范大学生物科学与技术学院, 福建漳州 363000; ² 厦门大学滨海湿地生态系统教育部重点实验室, 福建厦门 361102)

摘要 采用水培方式研究硅对重金属镉胁迫下白骨壤幼苗酚类代谢影响, 探讨硅对白骨壤耐受重金属胁迫的影响。结果表明, 低浓度镉胁迫 ($\text{Cd } 0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 下, 随着外源硅的增加, 叶片和根系丙二醛含量降低, 但 $\text{Si } 50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理中各器官总酚含量最高, 硅对各器官单宁含量影响不显著; 高浓度镉 ($\text{Cd } 5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 导致白骨壤叶片和根系膜脂过氧化, 使得丙二醛含量显著高于对照, 外源硅的添加显著降低了白骨壤叶片和根系丙二醛积累, $\text{Si } 100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 显著增加了各器官中总酚含量和单宁含量。根系丙二醛含量与根系总酚含量呈显著负相关, 叶片丙二醛含量与叶片单宁含量呈显著负相关, 表明硅显著刺激高镉胁迫下白骨壤植物组织中酚类物质代谢, 增加根系和叶片的抗氧化性, 进而增加白骨壤对镉的耐受性。

关键词 重金属耐受性; 丙二醛; 单宁

中图分类号 X173, X171.5 文献标识码 A 文章编号 1000-4890(2015)7-1892-06

Silicon effects on phenols metabolism of *Avicennia marina* under cadmium stress. ZHANG Qiong^{1,2**}, LIU Jing-chun², LU Hao-liang², DUAN Han-hui², YAN Chong-ling² (¹ School of Biological Sciences and Biotechnology, Minnan Normal University, Zhangzhou 363000, Fujian, China; ² Key Laboratory of Ministry of Education for Coastal and Wetland Ecosystems, Xiamen University, Xiamen 361102, Fujian, China). *Chinese Journal of Ecology*, 2015, 34(7): 1892-1897.

Abstract: The effects of silicon on the phenols metabolism in *Avicennia marina* seedlings were studied under the stress of cadmium by adopting the hydroponic method, and the effects of silicon on the resistance of *A. marina* seedling to cadmium were further explored. The results showed that under the stress of cadmium of low concentration ($\text{Cd } 0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), the content of malondialdehyde in the leaves and roots decreased with the increase of the exogenous silicon level, and the total phenol content in each organ was the highest at $\text{Si } 50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, while the effect of silicon on the tannin content in each organ was not significant. The high-concentration cadmium ($\text{Cd } 5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) led to the membrane lipid peroxidation of the leaves and roots in *A. marina*, making the content of malondialdehyde significantly higher than that of the control; the addition of the exogenous silicon significantly reduced the accumulation of malondialdehyde in the leaves and roots of *A. marina*, and $\text{Si } 100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ significantly increased the contents of total phenol and tannin in each organ. Significant negative correlations between the malondialdehyde content and total phenol content in roots and between the malondialdehyde content and tannin content in leaves were found, indicating that silicon significantly stimulated phenolic metabolism in *A. marina* organs under the stress of high-concentration cadmium, increased the oxidation resistance of the root system and leaves, and thus increased the tolerance of *A. marina* to cadmium.

Key words: tolerance of heavy metal; malondialdehyde; tannin.

DOI:10.13292/j.1000-4890.20150615.010

* 国家自然科学基金项目(31370516, 31170471)、闽南师范大学博士科研启动项目(2006L21432)和闽南师范大学园林植物生长发育与生态配置校级创新团队项目资助。

** 通讯作者 E-mail: 349369029@qq.com

收稿日期: 2014-11-12 接受日期: 2015-03-23

红树林生长于热带、亚热带海湾河口区和海岸潮间带,是淤泥质海滩上特有的植被类型,作为独特的海陆边缘生态系统在防浪护岸、维护河口和海滨生态系统平衡等多方面具有重要作用和意义。红树林处于陆地生态系统和水域生态系统交界过渡区域,属于生态脆弱敏感带,易受人类活动影响。随着人口增长和经济发展,越来越多的市政污水排入红树林湿地,市政污水中含有大量污染物,尤其是重金属毒素。红树林湿地群落具有独特的生物学和生态学特性,其林内潮流缓慢,沉积物有高粘粒、有机碎屑颗粒细、高有机质、高硫、低氧化还原电位等特征,有高“解毒”性和植物修复潜力,能够大量接受重金属污染物,为污染物的吸附治理提供良好场所,被认为是城市废水廉价高效的处理系统(Clark *et al.*, 1998; Pi *et al.*, 2010)。红树林生态系统重金属污染受到广泛关注,已成为国内外研究的热点。

酚类化合物是植物次生代谢物中最为重要的类群,当外界环境因子发生改变时,植物体内的苯丙烷代谢也会发生改变,使得酚类物质数量和种类随之变化。比如,谢峰等(2010)报道红树植物秋茄和桐花树在有机污染物芘和菲胁迫下,植物体内的总酚含量发生显著变化,其中秋茄叶片中总酚含量在低芘和菲胁迫下显著降低,而桐花树叶片中总酚含量在低芘和菲胁迫下显著升高。覃光球(2007)和苏艳(2012)研究显示,红树植物桐花树在重金属镉胁迫下,随着镉浓度的升高体内总酚含量呈单峰曲线发生改变,在 $10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 镉胁迫时达到最高值。植物单宁是一类广泛存在于植物体内的多元酚类化合物,主要存在于植物的皮、根、叶和果中。单宁的多元酚结构使其具有一系列独特的化学性质,可以与蛋白质以共价键、氢键、离子键的形式结合,降低酶活性,从而抑制多种酶促反应和微生物的生长;单宁分子中的多个邻位酚羟基,可以作为多基配位体与一个中心离子,如铅、铜、镉、汞、钙、钡、锶等结合,形成环状络合物,在不同pH条件下形成金属盐沉淀(Garcialopez *et al.*, 1990);单宁分子中含有的邻位酚羟基是一种优良供氢体,对活性氧自由基有明显清除作用,能够提高植物组织抗氧化性,降低植物体遭受的氧化胁迫(杨锦华等, 2006)。红树植物单宁含量较高,特别是树皮中含量可高达20%,单宁对红树植物所处的特殊的物理、化学和生物环境等各方面具有重要生态意义(林益明等, 2005)。红树植物白骨壤体内单宁含量较其他红树植物低,但对其

生存和进化也具有重要意义。

硅是地球上第二大元素,地壳中含量约为28%,是地球上大多数植物生长的矿质基质。由于硅广泛存在,硅在植物中的作用和代谢机理还未完全清楚等原因,长期以来硅没有被认为是植物的必需元素。研究发现,硅对植物生长发育和抗逆性方面具有促进作用,特别是能够提高一些植物的抗重金属性(Liang *et al.*, 2007; Vaculik *et al.*, 2009; Prabagar *et al.*, 2011)。早在1957年,Williams等(1957)发现,大麦在水培实验中,添加少量硅能够缓解锰毒害。此后,硅缓解重金属毒害研究在多种植物上开展,这些研究结果显示硅能够缓解部分植物上重金属的毒害作用。硅缓解重金属毒害作用机制随植物或重金属种类不同而不同,主要包括硅缓解重金属胁迫下植物对其他元素吸收的抑制,硅作为物理壁垒沉积阻碍重金属通过质外体途径进入植物体内,硅缓解重金属引起的氧化胁迫,硅影响重金属在亚细胞中的分布,硅影响生长基质中重金属形态等(周建华等, 1999; Liang *et al.*, 2007; Ye *et al.*, 2012; Zhang *et al.*, 2014)。

红树林生态系统位于海陆交错带的河口海湾区,是陆源Si进入海洋的过滤系统, Si含量较高(Billen *et al.*, 1991; Humborg *et al.*, 2003; Roubeix *et al.*, 2008)。河口沉积物中Si释放与沉积物受扰动的时间成对数关系,且与pH值呈负相关(Qin *et al.*, 2006)。在红树林生态系统中,由于沉积物主要由细颗粒组成,含有丰富的有机物质和低pH值,而且定期被潮汐搅动,使得生长基质中可利用的硅较为丰富(Peters *et al.*, 1997; Marchand *et al.*, 2004; Qin *et al.*, 2006)。目前,硅对红树植物生长影响的研究已初步开展。汪秀芳(2007)研究Si对盐胁迫下桐花树幼苗存活和生长的影响,结果显示, Si促进盐胁迫下桐花树幼苗的存活和生长,缓解盐胁迫造成的氧化伤害;也研究硅对桐花树幼苗生长发育的影响,结果显示, $100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的硅处理浓度对幼苗的生长最为适宜。Ye等(2012)研究Si对镉胁迫下秋茄幼苗的影响,结果显示, Si可促进秋茄幼苗生物量积累,缓解Cd对秋茄生长的抑制,主要缓解机制在于Si增强了秋茄幼苗根尖细胞壁对重金属Cd的吸附能力,一定程度上改变重金属在植物体的区域化分布,从而避免重金属对细胞原生质产生毒害。白骨壤属于泌盐型红树,是红树林生态系统中重要树种之一,对重金属污染耐性较高,本课题组前

期实验表明硅也能够缓解重金属镉对白骨壤生长的抑制(张琼等 2013; Zhang *et al.* 2013 2014)。本文通过研究硅对镉胁迫下白骨壤幼苗酚类代谢影响,探讨硅对白骨壤耐受重金属胁迫的影响及其机制,以期揭示红树植物对重金属的耐性机制和影响耐性的关键因素,为红树林生态系统重金属污染治理和红树林作为生物修复系统提供新的理论依据。

1 材料与方法

1.1 幼苗培养

自福建省九龙江口红树林自然保护区南岸龙海浮宫镇草埔头村(24°29'N, 117°55'E)海滩白骨壤林采集成熟白骨壤胚轴。选择完好无损、大小成熟度相近的胚轴用于试验。将胚轴种植于营养钵中,以蛭石为培养基质。营养钵置于塑料盆中,添加自来水,置于自然光照温室中培养。胚轴萌发后添加 Hoagland 培养液,盐度为 10‰,每周换水 1 次。温室平均温度 25 °C,相对湿度在 70% ~ 80%。白骨壤幼苗培养约 5 个月后,开始试验处理。

1.2 实验设计

将白骨壤幼苗小心挖出,用自来水冲洗残留的蛭石后,幼苗转移到容积为 2 L 的塑料桶,添加去离子水配置的 Hoagland 营养液进行水培。水培适应 2 周后,进行硅镉处理。水培介质中添加 CdCl₂ 原溶液和 Na₂SiO₃ 原溶液,使最后介质中硅浓度分别为 0、50 和 100 mg · L⁻¹ 3 个水平(记为 Si 0、Si 50 和 Si 100),镉的浓度分别为 0、0.5 和 5 mg · L⁻¹ 3 个水平(记为 Cd 0、Cd 0.5 和 Cd 5,也记为对照,低浓度镉处理和高浓度镉处理)。试验采用完全随机设计,共 9 个处理,每处理重复 3 次。水培溶液每 3 d 换 1 次,并用 1 mol · L⁻¹ HCl 或 1 mol · L⁻¹ NaOH 调节 pH 至 6.0 ~ 6.5。处理 8 周后,植株收获,用去离子水冲洗干净后进行试验。

1.3 丙二醛含量测定

选取新鲜植物样(叶片和根系),分别剪碎混匀称取 0.5 g,置于研钵中,加入 2 mL 10% TCA 和少量石英砂,冰浴研磨至匀浆后;再加 10% TCA 至体积 4 mL,匀浆在 10000 g 离心 10 min,上清液即为样品提取液。取上清液 2 mL(对照 2 mL 蒸馏水)加入 2 mL 0.6% TBA 混匀,摇匀后置于沸水浴中煮沸 15 min,迅速冷却后在 10000 g,4 °C,离心 20 min。取上清液,分别在 532、600 和 450 nm 处比色并读取吸光值。按照下列公式计算 MDA 含量(刘祖祺等,

1994):

$$C(\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}) = 6.45(A_{532} - A_{600}) - 0.56A_{450}$$

$$\text{MDA 含量}(\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}) = CV_1V_2 / (1000V_2W)$$

式中, V_1 为提取液体积, V_2 为叶片提取液和 TBA 溶液总反应液体积, V_2 为与 TBA 反应的样品提取液体积, W 为样品鲜重。

1.4 总酚和单宁含量测定

冻干植物样(根、茎和叶)研磨后,称取 0.2 g 样品,于 25 mL 的玻璃烧杯中,加入 8 mL 70% 的丙酮溶液,将烧杯悬置于超声波水浴锅中,室温超声波处理 20 min。将烧杯内容物移入离心管,4 °C,3000 g 离心 10 min,收集上清液,重复提取 3 次,定容至 25 mL 比色管,4 °C 保存待测。取 0.05 mL 待测液加蒸馏水至 0.5 mL,加入 0.25 mL Folin-Ciocalteu 试剂和 1.25 mL 20% 碳酸钠溶液,混匀静置 40 min 后于 725 nm 波长处比色。根据标准曲线计算出总酚相当于单宁酸的量。

称取 100 mg PVPP 于试管中,加入 1.0 mL 蒸馏水和 1.0 mL 待测样品溶液(100 mg PVPP 足可以结合 2 mg 单宁),震荡摇匀后,于 4 °C 静置 15 min,再次震荡摇匀后 3000 g 离心 15 min,取上清液按前述方法检测总酚相当于单宁酸的量。待测样品中单宁的含量为总酚含量减去非单宁总酚含量(林益明等 2005; 刘华伟 2010)。

1.5 统计分析

数值均为 3 次重复平均值(标准误)。应用 SPSS 软件对白骨壤幼苗丙二醛、单宁和总酚含量分别进行 2 因素(硅处理和镉处理)方差分析;亦对同一镉处理水平下不同硅处理组白骨壤幼苗丙二醛、单宁和总酚含量进行单因素方差分析和多重比较(SSR 法),显著性水平为 0.05。

2 结果与分析

2.1 硅对镉胁迫下丙二醛(MDA)含量的影响

对不同处理组叶片和根系中丙二醛含量进行双因素方差分析表明,硅镉处理因素间的交互作用均不显著。从图 1 看出,在镉胁迫下,白骨壤根系和叶片中丙二醛含量明显高于无镉处理组,随着镉浓度的升高,丙二醛含量也升高。无镉处理组中,硅的添加没有影响叶片和根系中丙二醛含量;而低浓度镉处理中,叶片中的丙二醛含量随着硅浓度的升高而降低,与 Si 0 处理相比,Si 50 处理没有显著影响根系丙二醛含量,Si 100 处理显著降低根系丙二醛含

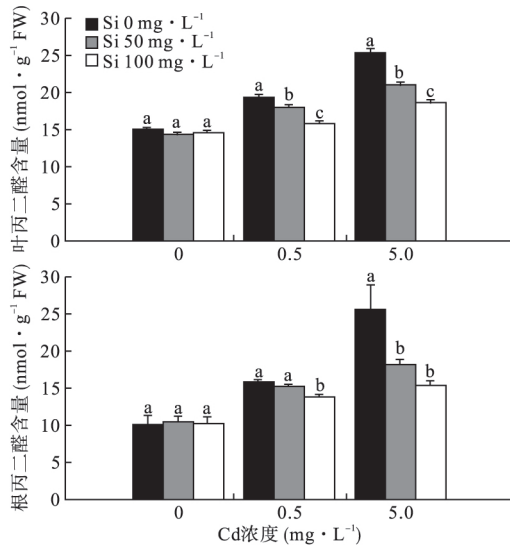


图1 硅对不同镉处理下白骨壤幼苗叶片和根系 MDA 含量的影响

Fig.1 Effects of Si on MDA content in leaves and roots of *Avicennia marina* seedlings under different Cd treatments

同一镉处理水平组中不同字母表示不同硅处理间有显著差异(单因素方差分析)($P < 0.05$)。

量;高浓度镉处理中,叶片丙二醛含量随着硅浓度的升高而显著降低,硅也显著降低根系丙二醛含量,但是2种硅浓度处理组间差异不显著。上述结果表明,镉胁迫加剧白骨壤幼苗根系和叶片膜脂过氧化作用,硅处理显著减少白骨壤叶片和根系丙二醛的积累,减缓Cd胁迫下白骨壤叶片和根系的膜脂过氧化程度。

2.2 不同处理组中各器官总酚和单宁的含量

2.2.1 对白骨壤幼苗总酚含量的影响

双因素方差分析显示,硅和镉处理对根、茎和叶中总酚含量影响均达到显著水平,硅镉交互作用对器官中3种总酚含量影响也显著($P < 0.05$)。高镉处理显著降低了根系总酚含量,而显著增加茎和叶片中总酚含量($P < 0.05$)。

表1显示,硅镉处理组中各器官总酚含量。不同器官总酚含量不一样,茎部总酚含量最高,其次是叶片,而根系总酚含量最少。对同一镉处理水平下不同硅处理组进行多重比较,结果显示,在没有镉胁迫下,Si 100处理组根总酚含量显著低于Si 0和Si 50处理组;Cd 0.5处理中,Si 50处理组中总酚含量显著高于其他硅处理组;Cd 5处理下,与Si 0处理组相比,Si 100处理显著增加了总酚含量,Si 50处理对总酚含量无显著影响,与Si 0处理组中根总酚含量差异不显著。

表1 硅对不同镉处理下白骨壤幼苗总酚含量的影响 ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \text{DW}$)

Table 1 Effects of Si on total phenols content of *Avicennia marina* seedlings under different Cd treatments

器官	硅 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	镉($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)					
		0		0.5		5.0	
		平均值	标准误	平均值	标准误	平均值	标准误
根	0	8.95 a	0.12	8.58 b	0.19	7.03 b	0.31
	50	9.31 a	0.08	9.68 a	0.18	7.81 b	0.46
	100	8.25 b	0.12	8.2 b	0.21	8.61 a	0.26
茎	0	12.87 b	0.53	12.72 ab	1.43	12.57 b	0.06
	50	14.34 a	0.17	15.26 a	0.62	19.06 a	1.69
	100	13.47 ab	0.13	11.98 b	0.2	21.68 a	0.48
叶	0	8.96 a	1.25	12.7 b	0.62	11.86 b	0.86
	50	10.59 a	0.34	14.63 a	0.06	11.21 b	1.26
	100	10.69 a	0.4	11.57 b	0.39	15.31 a	0.71

同一器官中同一列字母不同代表有显著性差异($P < 0.05$)(单因素方差分析)。下同。

在同一镉处理下,硅对茎中总酚含量影响显著,但不同镉处理水平中,硅的影响规律不一致。在Cd 0和Cd 0.5处理水平下,均为Si 50处理组中茎总酚含量最高,Si 0和Si 100处理组中总酚含量差异不显著;在Cd 5处理组中,硅的添加显著增加总酚含量,但硅处理间含量差异不显著。

在同一镉处理水平下,硅对叶片总酚含量的影响不同。在Cd 0处理组中,硅对叶片总酚含量无显著作用;在Cd 0.5处理组中,Si 50处理组中含量显著高于Si 0和Si 100处理组;在Cd 5处理水平下,与Si 0处理组相比,Si 50处理对叶片中总酚含量无显著影响,而Si 100处理显著增加叶片总酚含量。

总的来说,与Si 0处理相比,高浓度镉胁迫下Si 100处理组中各器官总酚含量显著升高,而低浓度镉胁迫下Si 50处理组中各器官总酚含量显著升高,Si 100处理组中添加的硅对各器官总酚含量无显著影响。

2.2.2 对白骨壤幼苗单宁含量的影响

双因素方差分析显示,硅和镉处理因素对根中单宁含量无显著影响,但双处理因素均显著影响茎和叶中单宁含量,其中高浓度镉显著增加茎和叶中的单宁含量;在根、茎和叶器官中单宁含量均受硅镉交互作用影响显著($P < 0.05$)。在不同镉处理水平下,硅对各器官中单宁含量的影响不同。

表2显示,白骨壤茎中单宁含量最高,叶片和根中的含量差别不大。

在Cd 0处理水平下,Si 100处理组中根中单宁含量显著低于Si 0和Si 50处理组,而Si 50处理组和Si 0处理组中差异不显著;在Cd 0.5处理水平

表2 硅对不同镉处理下白骨壤幼苗单宁含量的影响 ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \text{DW}$)

Table 2 Effects of Si on tannin content of *Avicennia marina* seedlings under different Cd treatments

器官 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	硅 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	镉 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)					
		0		0.5		5.0	
		平均值	标准误	平均值	标准误	平均值	标准误
根	0	3.92 a	0.22	3.52 a	0.22	3.64 b	0.37
	50	4.14 a	0.14	4.23 a	0.42	3.58 b	0.25
	100	3.43 b	0.10	3.42 a	0.02	4.43 a	0.48
茎	0	7.61 b	0.09	7.28 b	0.21	9.27 b	0.53
	50	9.06 a	0.85	9.09 a	0.64	15.91 a	0.21
	100	10.06 a	0.64	8.93 a	0.18	16.02 a	0.22
叶	0	3.24 a	0.24	4.43 a	0.21	3.84 b	0.17
	50	3.35 a	0.48	4.89 a	0.26	4.16 b	0.54
	100	3.33 a	0.50	4.33 a	0.30	5.78 a	0.57

表3 白骨壤各器官酚类物质与丙二醛含量相关性

Table 3 Correlation analysis between the content of the phenols and MDA

镉处理 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	叶片		根系	
	总酚	单宁	总酚	单宁
0.5	0.533	0.349	0.404	0.277
5.0	-0.602	-0.814 **	-0.965 **	-0.719

下 2 种硅处理均没有显著影响根中单宁含量; 在 Cd 5 处理, 与 Si 0 处理相比, Si 100 处理显著增加根系单宁含量, 而 Si 50 对根系单宁含量无显著作用。

在同一镉处理水平中, 硅对 3 种镉处理下茎的单宁含量影响较为一致, 均显著增加其含量, 且 2 种硅处理浓度效应不显著, 2 组硅处理间单宁含量差异不显著。

在同一镉处理水平下, Cd 0 和 Cd 0.5 处理中, 硅的添加没有显著影响叶中单宁含量; 而在 Cd 5 处理中, 与 Si 0 相比, Si 100 处理中叶片单宁含量显著提高, 而 Si 50 处理没有显著影响单宁含量。

总的来说, 与 Si 0 处理相比, 在没有镉胁迫下, Si 100 处理显著增加根和茎中单宁含量, 而对叶中含量无显著影响; 硅的添加显著增加低浓度镉胁迫下茎部单宁含量; 高浓度镉胁迫下, Si 100 的添加显著增加各器官中单宁含量。

2.3 相关性分析

各器官酚类物质与其丙二醛含量相关分析结果如表所示: 低浓度镉胁迫下根系和叶片丙二醛含量与总酚含量、单宁含量不相关, 而高浓度镉胁迫下, 叶片单宁含量与叶片丙二醛含量呈显著负相关, 根系总酚含量与根系丙二醛含量呈显著负相关。

3 讨论

重金属对植物体产生的主要危害是氧化胁迫, 使得植物体内活性氧的产生和清除失去平衡, 积累的活性氧导致了膜脂过氧化。丙二醛 (MDA) 是脂类氧化胁迫的直接产物, 可与蛋白质、核酸、氨基酸等活性物质交联, 形成不溶性的化合物沉积, 干扰细胞的正常生命活动, 其含量高低代表膜脂过氧化的水平和对细胞膜的伤害程度, 是衡量遭受重金属危害程度的指标之一。一些研究表明, 硅能够提高植物体抗氧化能力, 维持或提高非生物胁迫下植物组织中 SOD、POD、CAT 活性 (Gong *et al.*, 2008; He *et al.*, 2010), 从而维持生物膜稳定, 提高植物体抗性。本研究结果显示, 镉处理下, 白骨壤叶片和根系丙二醛含量明显高于没有添加镉的处理组, 硅的添加显著减少白骨壤叶片和根系丙二醛的积累, 减缓镉胁迫下白骨壤叶片和根系的膜脂过氧化程度。但是 Ma 等 (2006) 认为, 硅缓解环境的胁迫和增加抗氧化能力有关, 可能是硅直接影响的有益结果, 而不是原因。

植物单宁是一类广泛存在于植物体内的多元酚类化合物, 对红树植物所处的环境具有重要生态意义。红树植物各器官总酚含量不一样, 苏艳 (2012) 研究桐花树叶片和根系总酚含量, 结果显示, 叶片总酚含量高于根系; 本研究中, 白骨壤各器官中总酚分布规律与该结论较为一致。红树植物树皮中单宁含量一般最为丰富, 对于耐海水侵蚀具有重要的意义。本研究结果显示, 白骨壤中亦如此 (表 2), 茎中单宁含量最高, 叶片和根中的含量差别不大。红树植物体内的单宁通过络合、螯合作用与重金属离子结合形成难溶的化合物, 降低植物细胞中重金属活性; 另一方面可以直接清除活性氧分子, 降低重金属对植物产生的氧化胁迫, 从而提高红树植物的抗重金属性。本研究中, 镉显著增加了白骨壤茎和叶片中单宁含量, 表明白骨壤幼苗体内酚类代谢对镉胁迫产生应急反应, 降低重金属的毒害。

植物体硅元素提高植物生物和非生物胁迫抗性机制可分为物理和生化影响机制。硅在植物体内可作为物理壁垒沉积, 提高植物抗病性, 降低质外体途径吸收重金属的量, 或者与重金属共沉淀降低重金属的生物活性, 也在植物组织中作为活性元素, 通过提高一些酶的活性, 促进次生代谢, 提高植物在环境胁迫中的抗性。比如, 硅的添加刺激黄瓜幼苗几丁

质酶、过氧化物酶、多酚氧化酶和黄酮类物质的合成进而则成提高幼苗抗病性(Chérif *et al.*, 1994; Fawe *et al.*, 1998)。Vaculík 等(2009)推测,非生物胁迫下,硅的施加导致玉米中更高防御基因的表达。有研究表明,重金属胁迫下,硅影响玉米植物组织中酚类物质的代谢,促进根系分泌物中酚类物质的产生,对缓解重金属对植物体的毒害作用具有重要的意义(Vaculík *et al.*, 2009)。本研究中,高浓度镉胁迫下(Cd 5) Si 100 显著增加各器官中总酚和单宁含量;而低浓度镉胁迫下(Cd 0.5) Si 50 显著增加各器官中总酚含量,显著增加茎部单宁含量(表 1, 表 2)。本结果表明,硅刺激镉胁迫下白骨壤植物组织中酚类物质代谢,提高植物体中总酚和单宁含量可能是硅缓解镉对白骨壤胁迫的机制之一。

参考文献

- 林益明, 向平, 林鹏. 2005. 红树林单宁的研究进展. 海洋科学, **29**(3): 59-63.
- 刘华伟. 2010. 栗树单宁的抗氧化能力及其对肉兔生产性能的影响研究(博士学位论文). 北京: 中国农业科学院.
- 刘祖祺, 张石城. 1994. 植物抗性生理学. 北京: 中国农业出版社.
- 覃光球. 2007. 桐花树幼苗植物络合素和植物多酚对重金属的响应(硕士学位论文). 厦门: 厦门大学.
- 苏艳. 2012. 桐花树酚代谢对镉胁迫的响应(硕士学位论文). 厦门: 厦门大学.
- 汪秀芳. 2007. Si 在漳江流域沿岸植物体内的累积及其对桐花树幼苗生理生态效应的研究(硕士学位论文). 厦门: 厦门大学.
- 谢峰. 2010. 苳和菲对红树植物秋茄和桐花树的影响(博士学位论文). 厦门: 厦门大学.
- 杨锦华, 李博, 籍保平. 2006. 我国常见食用和药用植物的抗氧化性研究. 食品科学, (6): 87-91.
- 张琼, 段罕慧, 汪文云, 等. 2013. 硅对镉胁迫下白骨壤幼苗低分子量有机酸代谢的影响. 厦门大学学报: 自然科学版, **52**(6): 866-975.
- 周建华, 王永锐. 1999. 硅营养缓解水稻幼苗 Cd、Cr 毒害的生理研究. 应用与环境生物学报, **5**(1): 11-15.
- Billen G, Lancelot C, Meybeck M. 1991. N, P, and Si retention along the aquatic continuum from land to ocean// Ocean Margin Processes in Global Change. Chichester: John Wiley & Sons: 19-44.
- Chérif M, Asselin A, Bélanger RR. 1994. Defense responses induced by soluble silicon in cucumber roots infected by *Pythium* spp. *Phytopathology*, **84**: 236-242.
- Clark MW, McConchie D, Lewis DW. 1998. Redox stratification and heavy metal partitioning in *Avicennia*-dominated mangrove sediments: A geochemical model. *Chemical Geology*, **149**: 147-171.
- Fawe A, Abou-Zaid M, Menzies JG, *et al.* 1998. Silicon-mediated accumulation of flavinoid phytoalexins in cucumber. *Phytopathology*, **88**: 396-401.
- Garcilopez JS, Erdman JW, Sherman AR. 1990. Iron retention by rats from casein-legume test metals: Effect of tannin level and previous diet. *Journal of Nutrition*, **120**: 760-766.
- Gong HJ, Chen KM, Zhao ZG, *et al.* 2008. Effects of silicon on defense of wheat against oxidative stress under drought at different developmental stages. *Biologia Plantarum*, **52**: 592-596.
- He YM, Xiao HD, Wang HZ, *et al.* 2010. Effect of silicon on chilling-induced changes of solutes, antioxidants, and membrane stability in seashore paspalum turfgrass. *Acta Physiologiae Plantarum*, **32**: 487-494.
- Humborg C, Danielsson A, Sjöberg B, *et al.* 2003. Nutrient land-sea fluxes in oligotrophic and pristine estuaries of the Gulf of Bothnia, Baltic Sea. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **56**: 781-793.
- Liang YC, Sun WC, Zhu YG, *et al.* 2007. Mechanisms of silicon-mediated alleviation of abiotic stresses in higher plants: A review. *Environmental Pollution*, **147**: 422-428.
- Ma JF, Yamaji N. 2006. Silicon uptake and accumulation in higher plants. *Plant Science*, **11**: 392-397.
- Marchand C, Baltzer F, Lallier-Vergès E, *et al.* 2004. Pore-water chemistry in mangrove sediments: Relationship with species composition and developmental stages (French Guiana). *Marine Geology*, **208**: 361-381.
- Peters EC, Gassman NJ, Firman JC, *et al.* 1997. Ecotoxicology of tropical marine ecosystems. *Environmental Toxicology and Chemistry*, **16**: 12-40.
- Pi N, Tam NFY, Wong MH. 2010. Effects of wastewater discharge on formation of Fe plaque on root surface and radial oxygen loss of mangrove roots. *Environmental Pollution*, **158**: 381-387.
- Prabagar S, Hodson MJ, Evans DE. 2011. Silicon amelioration of aluminium toxicity and cell death in suspension cultures of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.). *Environmental and Experimental Botany*, **70**: 266-276.
- Qin Y, Weng H. 2006. Silicon release and its speciation distribution in the surficial sediments of the Pearl River Estuary, China. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **67**: 433-440.
- Roubeix V, Rousseau V, Lancelot C. 2008. Diatom succession and silicon removal from freshwater in estuarine mixing zones: From experiment to modeling. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **78**: 14-26.
- Vaculík M, Lux A, Luxová M, *et al.* 2009. Silicon mitigates cadmium inhibitory effects in young maize plants. *Environmental and Experimental Botany*, **67**: 52-58.
- Williams DE, Vlamis J. 1957. The effect of silicon on yield and manganese-54 uptake and distribution in the leaves of barley plants grown in culture solutions. *Plant Physiology*, **32**: 404-409.
- Ye J, Yan CL, Liu JC, *et al.* 2012. Effects of silicon on the distribution of cadmium compartmentation in root tips of *Kandelia obovata* (S., L.) Yong. *Environmental Pollution*, **162**: 369-373.
- Zhang Q, Yan CL, Liu JC, *et al.* 2014. Silicon alleviation of cadmium toxicity in mangrove (*Avicennia marina*) in relation to cadmium compartmentation. *Journal of Plant Growth Regulation*, **33**: 233-242.
- Zhang Q, Yan CL, Liu JC, *et al.* 2013. Silicon alleviates cadmium toxicity in *Avicennia marina* (Forsk.) Vierh. seedlings in relation to root anatomy and radial oxygen loss. *Marine Pollution Bulletin*, **76**: 187-193.

作者简介 张琼,女,1980年生,博士,主要研究方向为植物生理生态学和污染生态学。E-mail: 349369029@qq.com
责任编辑 魏中青