

DOI: 10.7524/AJE.1673-5897.20151127003

袁俊, 丁振华. 桐花树幼苗叶片生理生态指标对气态汞胁迫的响应[J]. 生态毒理学报, 2016, 11(2): 216-222

Yuan J, Ding Z H. Physiological response of *Aegiceras corniculatum* leaves to Hg^0 stress [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2016, 11(2): 216-222 (in Chinese)

桐花树幼苗叶片生理生态指标对气态汞胁迫的响应

袁俊, 丁振华*

厦门大学 环境与生态学院 厦门 361100

收稿日期: 2015-11-27 录用日期: 2016-1-6

摘要: 桐花树是我国主要的广布种红树植物,具有泌盐性。通过胁迫实验,研究桐花树幼苗叶片生理生态指标对气态单质汞(Hg^0)胁迫的响应,以期了解红树植物吸收和富集气态汞的机制。结果表明:气态汞胁迫造成桐花树叶片可溶性糖含量、过氧化物酶(POD)活性下降;而丙二醛(MDA)、脯氨酸、超氧化物歧化酶(SOD)等指标上升;叶绿素含量、过氧化氢酶(CAT)活性出现先升高后降低的趋势,还原型谷胱甘肽(GSH)含量则先降低后升高。总之,虽然 Hg^0 胁迫可增加桐花树幼苗叶的膜质过氧化程度,影响其生理代谢活动,但其叶片可通过调节抗氧化酶活性及还原型谷胱甘肽含量来提高自身抗氧化能力,进而提高对 Hg^0 的抗性。

关键词: 气态单质汞; 桐花树; 生理指标; 抗性

文章编号: 1673-5897(2016)2-216-07 中图分类号: X171.5 文献标识码: A

Physiological Response of *Aegiceras corniculatum* Leaves to Hg^0 Stress

Yuan Jun, Ding Zhenghua*

College of the Environment and Ecology, Xiamen University, Xiamen 361100, China

Received 27 November 2015 accepted 6 January 2016

Abstract: As one of the main widespread mangrove plants in China, *Aegiceras corniculatum* can tolerate salt by excreting salt. Mangroves are facing more and more serious heavy metal pollution, especially the mercury contamination. To investigate the mechanism of mercury absorption and tolerance of mangrove, stress experiments were conducted with *Aegiceras corniculatum* seedlings under Hg^0 stress. In this experiment, physiological characteristics such as the contents of chlorophyll, soluble sugars, malondialdehyde (MDA), proline (Pro), and reduced glutathione (GSH), activities of superoxide dismutase (SOD), peroxidase (POD) and catalase (CAT) of *Aegiceras corniculatum* seedlings' leaves were measured. Results showed as follows: the content of soluble sugars and the activity of POD gradually decreased under Hg^0 stress; while MDA content, Pro content and SOD activity significantly increased; the chlorophyll content and CAT activity increased firstly and then decreased, and on the contrary, the content of GSH decreased initially and then increased. The findings from above study demonstrate that although Hg^0 stress can lead to damage of metabolism by causing membrane lipid peroxidation in seedlings' leaves, but the seedlings could change activities of the antioxidative enzymes and the content of GSH to enhance the antioxidant abilities, and then strengthen

基金项目: 国家自然科学基金(No. 41176090)

作者简介: 袁俊(1990-), 女, 硕士研究生, 研究方向为环境生态学和汞的生物地球化学, E-mail: yuanjun519@126.com

* 通讯作者(Corresponding author), E-mail: dzh@xmu.edu.cn

organism resistance to mercury.

Keywords: Hg^0 ; *Aegiceras corniculatum*; physiological characteristics; resistance

红树林湿地生态系统处于海陆交界带,可为水生生物和鸟类提供栖息场所和丰富的食物来源。但是近年来随着沿海经济的迅速发展,大量污染物排入红树林区,造成严重的环境污染问题。红树林湿地沉积物中汞含量较高^[1],红树植物对重金属汞具有较高的吸收富集能力,在潮汐和海水浸泡的作用下,红树植物的残体又可分解释放汞进入湿地环境中。而且湿地环境中含有较多的硫,汞易与硫结合形成络合物。特殊的生境使红树林沉积物成为 Hg 的源和汇^[2-3]。无论红树植物成林还是幼苗,红树植物叶中汞含量都相对较高^[4],且随着叶片的生长,红树植物幼叶到成熟叶中的 Hg 含量也逐步增加^[5-6]。目前,对湿地汞污染修复的研究主要围绕湿地汞的地球化学特征、红树植物对离子汞的耐性及其机制、湿地无机汞与有机汞的转化及其在食物链中的传递等方面。但对单质气态汞胁迫耐汞机制还缺乏研究。

桐花树(*Aegiceras corniculatum*)是我国广布型红树植物,是泌盐红树植物的典型代表,并具有一定的重金属抗性。本文利用通量箱,对红树植物桐花树进行饱和气态 Hg^0 胁迫,以期地揭示红树植物叶片富集大气汞的机理,为汞污染的植物生理学监测及红树林生态系统的修复、保护提供科学依据和实践依据。

1 材料与方法 (Materials and methods)

1.1 仪器与试剂

药品:单质汞(Hg^0);乙醇(AR);丙酮(AR);三氯乙酸等均为国产分析纯试剂(绿茵试剂玻仪有限公司)。

仪器:Milli-Q超纯水系统(Millipore美国密理博公司);DK-450B电热恒温水浴锅(上海森信实验仪器有限公司);Nanodrop 2000分光光度计(美国赛默飞公司);Hettich220R离心机(Hettich德国赫提驰公司);BS110S电子分析天平(北京塞多利斯有限公司)。

1.2 试验设计

挑选采自野外的株高约20~30 cm、4~5对叶,且生活力强,无病虫害,大小相近的桐花树(*Aegiceras corniculatum*)幼苗沙培复壮1周(室温约25℃),准备实验。

复壮后,幼苗用自来水冲洗干净并用超纯水冲洗3遍后,将其置于盛有1/4 Hogland营养液的烧杯

中,并使幼苗地下部分(根)与茎叶用玻璃板隔开。将盛有液态单质汞的培养皿置入封闭通量箱(通量箱的两侧各有一个直径0.8 cm的小孔)中,自然达到饱和。对桐花树进行饱和态 Hg^0 胁迫处理。同时设未放置 Hg^0 的对照组。试验完全采用随机设计,对照组和胁迫组分别设3个平行样,每个平行实验设置6株苗。

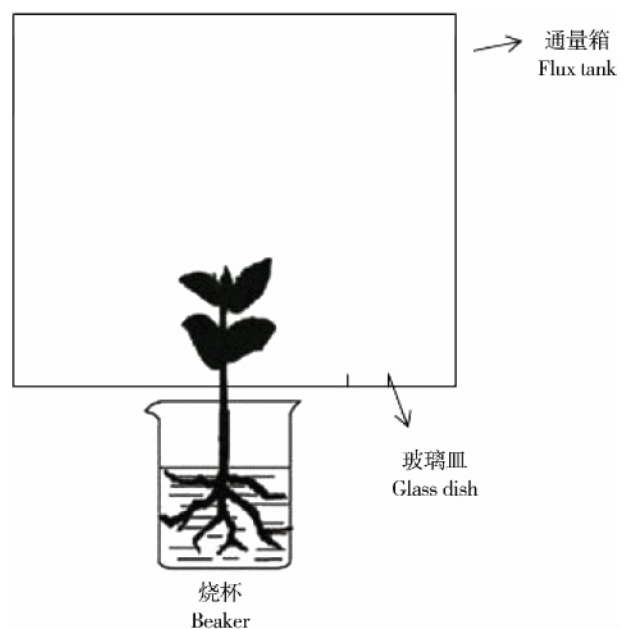


图1 实验装置图

Fig. 1 Experimental facility

参照陈建勋和王晓峰^[7]的混合液法测定叶绿素含量;利用蒽酮比色法^[8]测定还原糖含量;采用硫代巴比妥酸法^[8]测定MDA含量;利用磺基水杨酸法测定脯氨酸含量;采用氮蓝四唑法^[9]测定超氧化物歧化酶(SOD)活性;依据愈创木酚法^[10]测得过氧化物酶(POD)活性的测定;利用紫外吸收法^[11]测得过氧化氢酶(CAT)活性;利用二硫二硝基苯甲酸(DTNB)显色法^[12]测得还原型谷胱甘肽(GSH)的含量,均重复测定3次,结果取平均值。

1.3 数据处理

试验中结果均为3个重复处理的平均数,采用SPSS软件对数据结果进行单因素方差分析: $P > 0.05$,差异显著; $P < 0.05$,差异不显著。采用Sigma-Plot10.0软件进行图表制作。

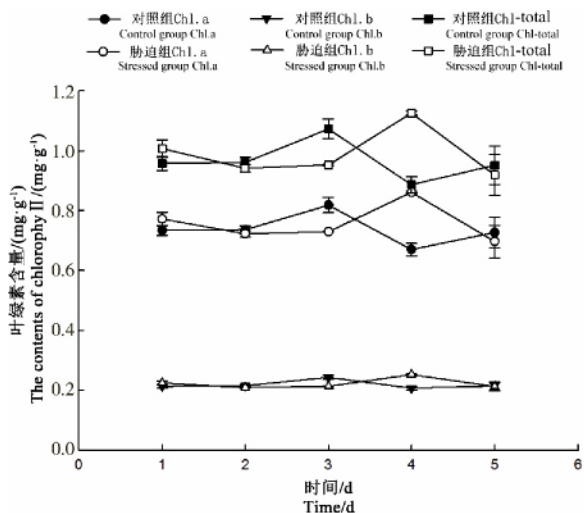


图 2 气态单质汞对桐花树叶绿素含量的影响

Fig. 2 Effect of Hg⁰ on chlorophyll content of *Aegiceras corniculatum*

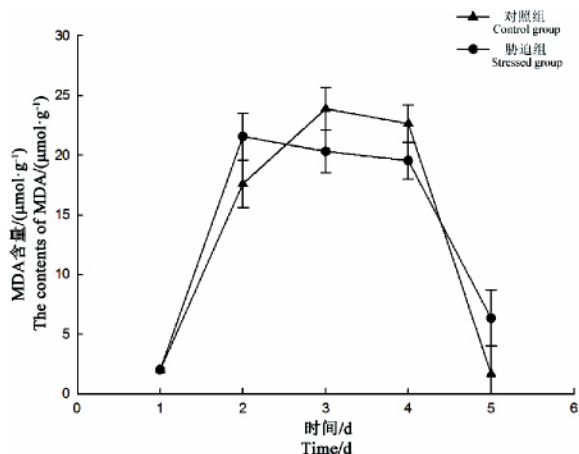


图 3 气态单质汞对桐花树叶丙二醛含量的影响

Fig. 3 Effect of Hg⁰ on MDA contents of leaves in *Aegiceras corniculatum*

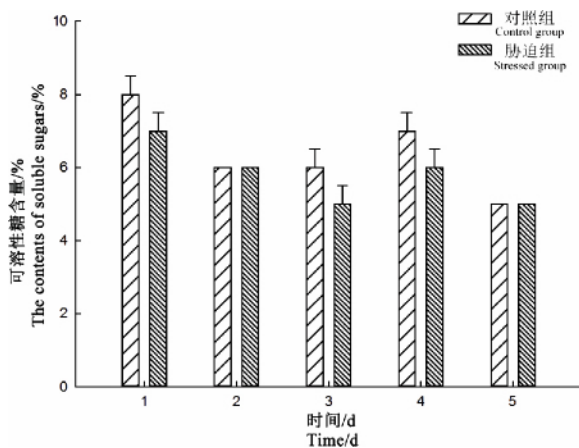


图 4 气态单质汞对桐花树叶可溶性糖含量的影响

Fig. 4 Effect of Hg⁰ on soluble sugars contents of leaves in *Aegiceras corniculatum*

2 结果(Results)

2.1 Hg⁰胁迫对桐花树幼苗叶绿素含量的影响

气态单质汞对桐花树幼苗叶片叶绿素含量的影响见图 2 胁迫组叶绿素 a、b 及总叶绿素含量随胁迫时间的延长 都呈现先上升又下降的趋势 第 4 天叶绿素 a 含量为 0.86 mg·g⁻¹, 叶绿素 b 含量为 0.25 mg·g⁻¹, 总叶绿素含量为 1.13 mg·g⁻¹, 都显著高于相应其他胁迫时间的含量(P < 0.05)。胁迫组叶绿素 a、b 及总叶绿素的最高值均迟于对应对照组出现。

2.2 Hg⁰胁迫对桐花树幼苗叶丙二醛含量的影响

随着时间的延长, MDA 含量变化呈现如图 3 所示的变化趋势, 即先增加后下降。胁迫组和对照组的 MDA 含量同时在第 1 天出现最低。但胁迫组 MDA 含量最高值早于对照组最高值出现。胁迫组第 1 天时的 MDA 含量显著低于其他各天 MDA 的含量(P < 0.05)。胁迫组第 2 天的 MDA 含量最高, 为 22 μmol·g⁻¹, 比此时对照组 MDA 含量高了 18%。第 5 天时, 胁迫组的 MDA 含量显著高于对照组(P < 0.05)。

2.3 Hg⁰胁迫对桐花树幼苗叶可溶性糖含量的影响

气态单质汞胁迫下, 胁迫组与对照组桐花树幼苗成熟叶片的可溶性糖含量变化如图 4 所示, 均呈现先降低后升高又降低的趋势。相应时间胁迫组和对照组的可溶性糖含量差异不显著(P > 0.05)。处理第 1 天时, 胁迫组和对照组可溶性还原糖的含量最高, 但胁迫组可溶性糖的含量低于对照组。

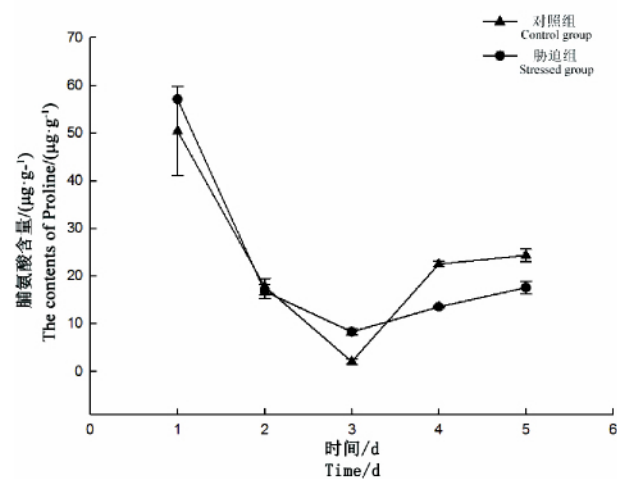


图 5 气态单质汞对桐花树叶脯氨酸含量的影响

Fig. 5 Effect of Hg⁰ on proline contents of leaves in *Aegiceras corniculatum*

2.4 Hg⁰胁迫对桐花树幼苗叶脯氨酸含量的影响

气态单质汞胁迫对桐花树叶脯氨酸含量的影响如图 5 所示, 呈现先降低后升高的趋势。胁迫组第 1 天脯氨酸的含量最高, 为 57 μg·g⁻¹, 显著高于其余各天的脯氨酸含量(P < 0.05)。第 3 天的脯氨酸含量显著低于其余各天的含量(P < 0.05), 但显著高于此时对照组脯氨酸的含量(P < 0.05)。第 4 天和第 5 天胁迫组脯氨酸含量显著低于对照组(P < 0.05)。

2.5 Hg⁰胁迫对桐花树幼苗叶抗氧化能力的影响

由图 6 可知, 相应时间的胁迫组与对照组 GSH 含量差异不显著(P > 0.05)。胁迫组和对照组都在第 2 天时出现最低值, 但此时胁迫组 GSH 含量比对照组的 GSH 含量低了 46%。胁迫组第 4 天 GSH 含量最高, 为 105 μmol·g⁻¹, 显著高于第 2、3、5 天的含量(P < 0.05), 但比对照组 GSH 含量最高值低了 30%。

抗氧化酶活性变化呈现出与 GSH 含量不同的趋势(图 6)。胁迫组 CAT 活性随胁迫时间的延长, 呈现先上升又下降, 之后上升, 最后下降的趋势。胁迫组第 2 天 CAT 活性为 17 U·g⁻¹·min⁻¹, 显著高于其

余各天 CAT 活性(P < 0.05), 且比此时对照组 CAT 活性高了 20%, 但差异并不显著(P > 0.05)。

胁迫组和对照组 POD 活性随胁迫时间的延长, 均呈现先升高后降低的趋势(图 6)。两者峰值出现时间不同: 胁迫组第 4 天 POD 活性最高, 但比此时对照组 POD 活性低了 48%; 对照组在第 3 天时 POD 活性最高, 显著高于胁迫组 POD 活性(P < 0.05)。

胁迫组与对照组 SOD 活性均随时间的延长, 呈现先上升后下降的趋势。与相应 POD 活性变化趋势相似(图 6)。胁迫组第 3 天 SOD 活性为 55 748 U·g⁻¹, 显著高于其余各天及此时对照组的 SOD 活性(P < 0.05)。第 2 天时胁迫组 SOD 活性最低, 比此时对照组 SOD 活性低了 63%, 但差异不显著(P > 0.05)。

3 讨论 (Discussion)

叶绿素是叶绿体的重要组成部分, 是植物进行光合作用的主要载体, 其含量的变化直接影响植物的光合作用、呼吸作用等过程, 可以表征光合作用能力的大小及植物受胁迫下组织和器官抗逆性能力的

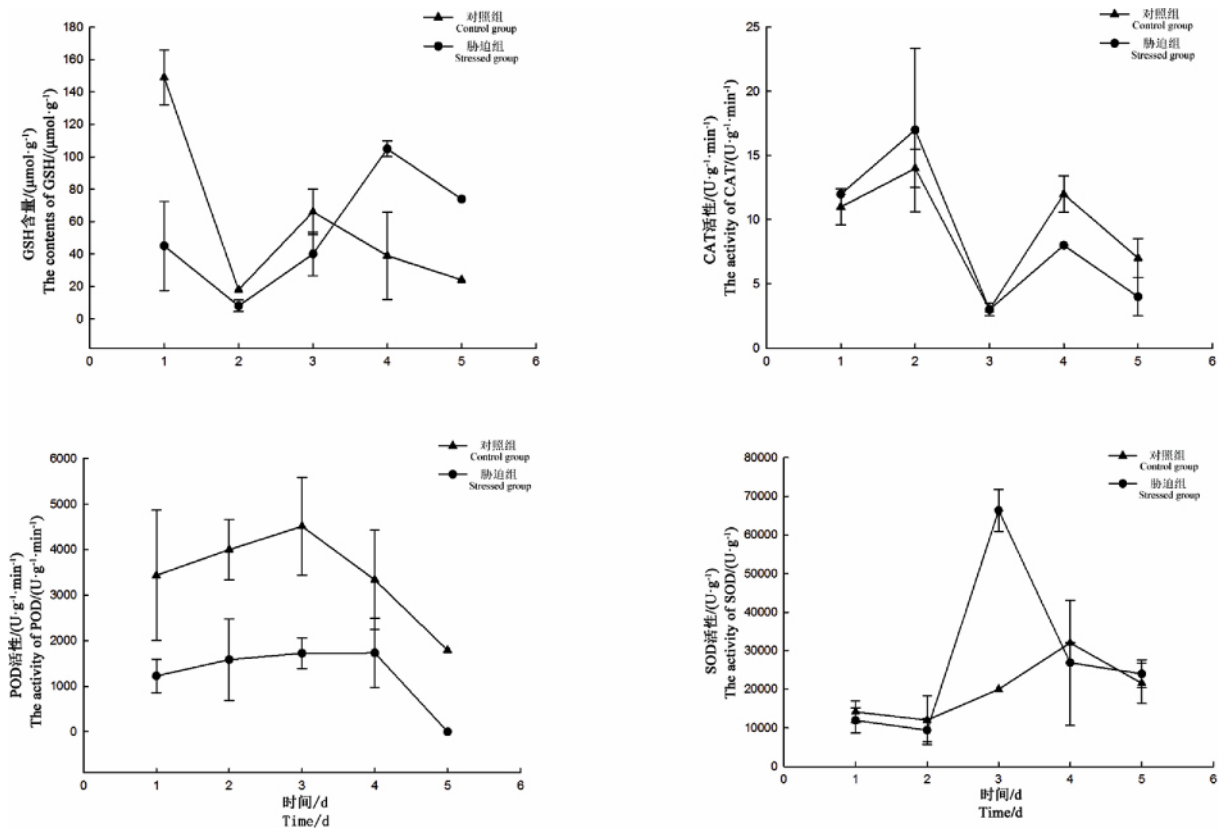


图 6 气态单质汞对桐花树叶抗氧化酶活性和还原型谷胱甘肽含量的影响

Fig. 6 Effect of Hg⁰ on antioxidant activities and GSH contents of leaves in *Aegiceras corniculatum*

强弱^[13]。汞胁迫可加速叶绿素的分解,改变叶绿素合酶的构型,从而导致叶绿素含量的降低。本研究中,胁迫组叶绿素 a、b 及总叶绿素含量的最高值出现在第 4 天,迟于对照组的最高值,可能是因为汞胁迫下,胁迫组桐花树幼苗叶片遭受更大程度的损伤,植物通过加强光合作用来增强机体对汞的抗性^[14]。胁迫 4 d 之后,机体内活性氧自由基积累过多,胞内叶绿体膜系统遭到破坏,叶绿体内某些酶的合成受阻^[15],最终造成桐花树幼苗叶绿素含量的降低。对照组 1~5 d 的叶绿素 a、b 及总叶绿素含量有所不同,是因为本研究中通量箱的使用,一方面可为胁迫组桐花树幼苗创造饱和态气态单质汞胁迫的环境,另一方面限制了对照组幼苗与大气的自由交换。故使对照组叶绿素含量出现波动情况。对照组以下生理指标出现类似情况。

可溶性糖是植物体内一种重要的渗透调节物质,不良环境下,植物体内可溶性糖会发生显著变化^[16-18],以稳定细胞膜和原生质胶体^[19]。脯氨酸是水溶性最大的氨基酸,正常条件下,植物体内脯氨酸含量很低。在受逆境胁迫后,其含量可明显增加^[20-23],以防止体内水分过分丢失。本研究中,胁迫 1~3 d,胁迫组脯氨酸、可溶性糖含量呈现下降趋势,表明短时间 Hg⁰胁迫可造成植物体内渗透压的改变,植物通过降低脯氨酸、可溶性糖含量来维持其体内细胞膜渗透压的稳定。

MDA 是植物膜质过氧化的产物,能反映植物膜质过氧化程度,是衡量氧化胁迫程度的指标^[24]。正常生长条件下,植物体内 MDA 含量较低,遭受逆境胁迫后,MDA 含量有所增加。因此,MDA 含量的变化也可作为检测逆境条件下膜系统受损程度的指标^[25-26]。作为活性氧非酶清除物质的谷胱甘肽,不仅可以直接清除细胞代谢过程中产生的活性氧,减轻膜脂过氧化程度,维持膜系统的稳定性,而且可以通过提高保护酶的活性,间接减少活性氧的量,从而起到稳定膜结构的作用^[27],是植物光合作用组织和非光合作用组织中重要的抗氧化物质^[28]。Zhao 等^[29]的研究发现,随汞胁迫时间的增加,紫花苜蓿叶片内 GSH 含量显著增加;张宗申等^[30]的研究发现热胁迫可造成植物体 GSH 含量的降低;闫慧芳等^[31]指出植物体内 GSH 含量的高低直接关系到自身对重金属离子毒害作用的解除效果。因此,GSH 含量的变化可以反映植物对外界不良环境的抵抗力和适应性^[32]。SOD、POD、CAT 是植物体内的膜系统的

保护酶,可清除活性氧和超氧阴离子自由基,维持植物体内的动态平衡,减少逆境对系统的伤害^[33-35]。汞能够引起植物体内超氧离子的累积,且随汞浓度的增加, O₂⁻· 积累速率加快^[36]。1~3 d,胁迫组 MDA 含量有升高趋势。虽然 SOD、POD、CAT 活性均出现了最高值,但胁迫组 POD 活性与对照组相比差异较大。表明短时间 Hg⁰胁迫下桐花树幼苗叶片主要作用在 POD 上,且桐花树幼苗叶片可通过调节体内其它抗氧化酶活性维持体内自由基代谢平衡,保持膜的稳定,提高其对汞的耐性。项锡娜等^[37]用盐胁迫红叶石楠也发现:逆境情况下,植物可通过调节氧化酶活性来提高自身的耐性。3 d 之后,MDA 含量呈下降趋势,SOD、POD 活性降低,而 CAT 活性及 GSH 含量有所升高,说明长时间胁迫下,植物通过体内非酶抗氧化系统和酶抗氧化系统相互作用来维持自身稳定性,增加对汞的抗性。

致谢:成文过程中惊闻傅家谟院士因病去世的噩耗,甚感悲切。笔者在中国科学院地球化学研究所求学及工作期间,经常遇到傅先生,聆听傅先生的教诲,受益匪浅,谨以此文纪念傅家谟院士,愿先生千古!

通讯作者简介:丁振华(1966-),男,博士,教授,研究方向为生态学污染和生物地球化学。

参考文献(References):

- [1] 丁振华,刘金铃,李柳强,等.中国主要红树林湿地沉积物中汞的分布特征[J].环境科学,2009,20(8):2210-2215
Ding Z H, Liu J L, Li L Q, et al. Distribution of mercury in surficial sediments from main mangrove wetlands of China [J]. Environmental Science, 2009, 20(8): 2210-2215 (in Chinese)
- [2] Lindqvist O, Johansson K, Bringmark L, et al. Mercury in the Swedish environment—recent research on causes, consequences and corrective methods [J]. Water, Air and Soil Pollution, 1991, 55(1): 1-261
- [3] 丁振华,刘金铃,李柳强,等.中国主要红树林中汞含量特征与沉积物汞形态之间的关系[J].环境科学 2010(9):2234-2239
Ding Z H, Liu J L, Li L Q, et al. Distribution of Hg in mangrove plants and correlation with Hg speciation in sediments [J]. Environmental Science, 2010(9): 2234-2239 (in Chinese)
- [4] 梁英,刘锡尧,袁东星,等.九龙江口红树林区秋茄植物组织中总汞的分布特征[J].海洋湖沼通报,2011(3):84-88

- Ling Y, Liu X Y, Yuan D X, et al. Characteristics of total mercury in different *Kandelia candel* tissues of Fugong Mangrove Forest Reserve at estuary of Jiulongjiang [J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2011(3): 84-88 (in Chinese)
- [5] 康丽锋. 红树植物秋茄与汞污染土壤相互作用研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2009
- Kang L F. The interaction between mangrove plant (*Kandelia candel*) and soil polluted by mercury [D]. Xiamen: Xiamen University, 2009
- [6] Ding Z H, Wu H, Liu J L. Distribution of Hg in mangrove trees and its implication for Hg enrichment in the mangrove ecosystem [J]. *Applied Geochemistry*, 2011, 26: 205-212
- [7] 陈建勋, 王晓峰. 植物生理学实验指导[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2002: 35-36
- [8] 孔祥生, 易现峰. 植物生理学实验技术[M]. 北京: 中国农业出版社, 2008: 257-261
- [9] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 167-168
- [10] 刘祖祺, 张石城. 植物抗性生理学[M]. 北京: 中国农业出版社, 1994: 371-372.
- [11] 刘萍, 李明军. 植物植物生理学实验技术[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 128-129
- [12] 黄爱纓, 吴珍龄. 水稻谷胱甘肽过氧化物酶的测定法[J]. *西南农业大学学报*, 1999, 21(4): 324-327
- Hu A Y, Wu Z L. Determination of glutathione peroxidase in rice seedlings [J]. *Journal of Southwest Agricultural University*, 1999, 21(4): 324-327 (in Chinese)
- [13] 吕廷良, 孙明高, 宋尚文, 等. 盐、旱及其交叉胁迫对紫荆幼苗净光合速率及其叶绿素含量的影响[J]. *山东农业大学学报: 自然科学版*, 2010, 41(2): 191-195
- Lv Y L, Sun M G, Song S W, et al. Study on photosynthesis characteristics of *Cercis chinensis* Bunge under drought and salt stress [J]. *Journal of Shandong Agricultural University: Natural Science*, 2010, 41(2): 191-195 (in Chinese)
- [14] 袁彦婷. 胁迫条件下红树植物叶片汞释放及汞对红树植物生理生态的影响[D]. 厦门: 厦门大学, 2011
- Yan Y T. Flux of atmospheric mercury of mangrove leaves under mercury stress and impacts of mercury stress on mangrove ecophysiology [D]. Xiamen: Xiamen University, 2011
- [15] 赵鸿彬, 张正斌, 徐萍, 等. $HgCl_2$ 胁迫对小麦幼苗水分利用效率和叶绿素含量的影响[J]. *西北植物学报*, 2007, 27(12): 2478-2483
- Zhao H B, Zhang Z B, Xu P, et al. Water use efficiency and chlorophyll II content of wheat seedlings under the inhibition of $HgCl_2$ [J]. *Acta Botanica Boreale-Occidentalia Sinica*, 2007, 27(12): 2478-2483 (in Chinese)
- [16] 倪郁, 郭彦军, 吕俊, 等. 水分胁迫下豆科牧草的生理生化变化[J]. *土壤通报*, 2004, 35(3): 275-278
- Ni Y, Guo Y J, Lv J, et al. Physiological-biological changes of legumes under drought stress [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2004, 35(3): 275-278 (in Chinese)
- [17] Liu F R, Chen H Y, Liu Y, et al. Changes in solute content of different tomato genotypes under salt stress [J]. *Journal of Plant Physiology and Molecular Biology*, 2004, 30(1): 99-104
- [18] Yang S C, Li Y B, Lin P. Change of leaf caloric value from *Avicennia marina* and *Aegiceras corniculatum* mangrove plants under cold stress [J]. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, 2003, 22(1): 46-52
- [19] 赵宇飞, 沙文沛, 任诗语, 等. 铅胁迫对小叶黄杨幼苗生理生化指标的影响[J]. *贵州农业科学*, 2014, 42(9): 68-71
- Zhao Y F, Sha W P, Ren S Y, et al. Effects of lead stress on physiological and biochemical characteristics of *Buxus harlandi* seedlings [J]. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2014, 42(9): 68-71 (in Chinese)
- [20] 王红梅, 包维楷, 李芳兰. 不同干旱胁迫强度下白刺花幼苗叶片的生理生化反应[J]. *应用与环境生物学报*, 2008, 14(6): 757-762
- Wang H M, Bao W K, Li F L. Physiological and biochemical responses of *Sophora davidii* seedlings leaves to different water stresses [J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2008, 14(6): 757-762 (in Chinese)
- [21] 段九菊, 郭世荣, 樊怀福, 等. 盐胁迫对黄瓜幼苗根系脯氨酸和多胺代谢的影响[J]. *西北植物学报*, 2006, 26(12): 2486-2492
- Duan J J, Guo S R, Fan H F, et al. Effects of salt stress on proline and polyamine metabolisms in the roots of cucumber seedlings [J]. *Acta Botanica Boreale Occidentalia Sinica*, 2006, 26(12): 2486-2492 (in Chinese)
- [22] 韩晓燕, 别之龙. 不同温度处理对嫁接黄瓜幼苗生理特性的影响[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(S2): 220-224
- Han X Y, Bie Z L. Effects of different temperatures on the physiological characteristics of grafted cucumber seedlings [J]. *Transactions of the CSAE*, 2008, 24(S2): 220-224 (in Chinese)
- [23] 王萍, 张兴旭, 赵晓静, 等. 重金属胁迫对醉马草生长及生理生化指标的影响[J]. *草业科学*, 2014, 31(6): 1080-1086
- Wang P, Zhang X X, Zhao X J, et al. Effects of three metal ions on growth and physio-biochemical response of

- Achnatherum inebrians [J]. Pratacultural Science, 2014, 31 (6): 1080-1086 (in Chinese)
- [24] Sun H P, Li L, Wang X, et al. Ascorbate-glutathione cycle of mitochondria in osmoprimed soybean cotyledons in response to imbibitional chilling injury [J]. Journal of Plant Physiology, 2011, 168(3): 226-232
- [25] 刘建新, 赵国林, 王毅民. Cd、Zn 复合胁迫对玉米幼苗膜脂过氧化和抗氧化酶系统的影响[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25 (1): 54-58
- Liu J X, Zhao G L, Wang Y M. Effects of Cd and Zn combined stress on membrane lipid peroxidation and antioxidant enzyme system of maize seedlings [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2006, 25 (1): 54-58 (in Chinese)
- [26] Graham-Evans B, Tchounwou P B, Cohly H P. Cytotoxicity and proliferation studies with arsenic in established human cell lines: Keratinocytes, melanocytes, dendritic cells, dermal fibroblasts, microvascular endothelial cells, monocytes and T-cells [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2003, 4: 13-21
- [27] 韩阳, 吴斌, 李珍珍. 谷胱甘肽对老化小麦种子影响的研究[J]. 辽宁大学学报: 自然科学版, 2002, 29(3): 275-278
- Han Y, Wu B, Li Z Z. Effects of glutathione on aging wheat seeds [J]. Journal of Liaoning University: Natural Sciences Edition, 2002, 29(3): 275-278 (in Chinese)
- [28] Nehnevajova E, Lyubenova L, Herzig R, et al. Metal accumulation and response of antioxidant enzymes in seedlings and adult sunflower mutants with improved metal removal traits on a metal-contaminated soil [J]. Environmental and Experimental Botany, 2012, 76: 39-48
- [29] Zhao S Z, Wang S J, Zhi M Y. Biological detection and analysis of mercury toxicity to alfalfa (*Medicago sativa*) plants [J]. Chemosphere, 2008, 70(8): 1500-1509
- [30] 张宗申, 利容千, 王建波. 草酸处理对热胁迫下辣椒叶片膜透性和钙分布的影响[J]. 植物生理学报, 2001, 27 (2): 109-113
- Zhang Z S, Li R Q, Wang J B. Effects of oxalate treatment on the membrane permeability and calcium distribution in pepper leaves under heat stress [J]. Acta Phytophysiologica Sinica, 2001, 27(2): 109-113 (in Chinese)
- [31] 闫慧芳, 毛培胜, 夏方山. 植物抗氧化剂谷胱甘肽研究进展[J]. 草地学报, 2013, 21(3): 429-434
- Yan H F, Mao P S, Xia F S. Research progress in plant antioxidant glutathione [J]. Acta Agrectir Sinica, 2013, 21 (3): 429-434 (in Chinese)
- [32] Rausch T, Gromes R, Liedschulte V, et al. Novel insight into the regulation of GSH biosynthesis in higher plants [J]. Plant Biology, 2007, 9(5): 565-572
- [33] 刘素纯, 萧浪涛, 廖柏寒, 等. 铅胁迫对黄瓜幼苗抗氧化酶活性及同工酶的影响[J]. 应用生态学报, 2006, 17 (2): 300-304
- Liu S C, Xiao L T, Liao B H, et al. Effects of lead stress on anti-oxidative enzyme activities and isoenzymes in cucumber seedlings [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2006, 17(2): 300-304 (in Chinese)
- [34] 周化斌, 徐根娣, 刘鹏, 等. 大豆种子萌发中过氧化物酶同工酶的动态研究[J]. 种子, 2002, 20(1): 9-13
- Zhou H B, Xu G D, Liu P, et al. Developments of peroxidase isozymes during seed germination of soybean [J]. Seed, 2002, 20(1): 9-13 (in Chinese)
- [35] 黄化刚, 李廷轩, 杨肖娥, 等. 植物对铅胁迫的耐性及其解毒机制研究进展[J]. 应用生态学报, 2009, 20(3): 696-704
- Huang H G, Li Y X, Yang X E, et al. Research advances in plant lead tolerance and detoxification mechanism [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, 20(3): 696-704 (in Chinese)
- [36] 徐勤松, 施国新, 顾龚平, 等. 不同浓度 Hg^{2+} 对睡莲的毒害影响的研究[J]. 西北植物学报, 2000, 20(5): 784-789
- Xu Q S, Shi G X, Gu G P, et al. Study of toxic effect on *Nymphaea tetragona* Georgi [J]. Acta Botanica Boreale-Occidentalia Sinica, 2000, 20(5): 784-789 (in Chinese)
- [37] 项锡娜, 陈泰豪, 吴月燕, 等. 盐胁迫对红叶石楠“鲁班”生理生化特性及叶片显微结构的影响[J]. 植物生理学报, 2014, 50(7): 917-924
- Xiang X N, Chen T H, Wu Y Y, et al. Effects of salt stress on physio-biochemical characteristics and leaf of microstructure in *Photinia glabra* 'Rubens' seedlings [J]. Plant Physiology Journal, 2014, 50 (7): 917-924 (in Chinese)

◆