

# 钒、汞胁迫对菜心幼苗生理生化特性的影响\*

侯 明\*\* 路 畅 张兴龙

(桂林理工大学化学与生物工程学院, 广西桂林 541004)

**摘 要** 通过水培实验研究了钒(V)、汞(Hg)单一和复合胁迫对四九黄菜心幼苗生理生化特性的影响。结果表明:随着胁迫强度的增加,丙二醛(MDA)含量和细胞膜透性明显上升,与对照相比,MDA 含量和细胞膜透性分别增加了 8.4% ~ 271.5% 和 22.4% ~ 145.6%;叶绿素含量、过氧化氢酶(CAT)、过氧化物酶(POD)和超氧化物歧化酶(SOD)活性均呈先上升后下降的趋势;重金属浓度较低时,3 种保护酶均有较好的协同效应,表现出较强的自我调节能力;重金属浓度较高时,叶绿素含量和 3 种酶的活性呈下降趋势,表明在逆境环境因子下,植物的生理特征发生变化,酶活性受到抑制;V、Hg 复合胁迫对蔬菜幼苗的毒害作用大于同水平单一胁迫效应。

**关键词** V; Hg; 复合胁迫; 生理特性; 菜心幼苗

**中图分类号** Q945.78 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2012)3-0532-06

**Effects of V and Hg stress on the physiological and biochemical characteristics of *Brassica chinensis* L. seedlings.** HOU Ming\*\*, LU Chang, ZHANG Xing-long (College of Chemistry and Bioengineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China). *Chinese Journal of Ecology*, 2012, 31(3): 532–537.

**Abstract:** A water culture experiment was conducted to study the effects of single and combined stresses of V and Hg on the physiological and biochemical characteristics of *Brassica chinensis* seedlings. With the increasing V and Hg stresses, the malondialdehyde content and the cell membrane permeability of the seedlings had an obvious increase, and the increment was 8.4% – 271.5% and 22.4% – 145.6%, respectively, as compared with the control. The chlorophyll content and the catalase, peroxidase, and superoxide dismutase activities all increased first and decreased then. At lower concentrations V and Hg, the three protective enzymes showed synergistic effect, suggesting the stronger self-adjustable capability of *B. chinensis* seedlings; while at higher concentrations V and Hg, the activities of the three enzymes and the chlorophyll content declined, revealing that under environmental stress, plant physiological characteristics changed, and the activities of plant protective enzymes were inhibited. Combined stress of V and Hg had stronger toxic effect than the single stress of V and Hg when applied at the same levels.

**Key words:** V; Hg; combined stress; physiological characteristics; *Brassica chinensis* seedling.

重金属是限制许多植物生长发育的重要因素之一,当植物中重金属积累到一定程度,就可以通过干扰细胞正常的代谢途径以及物质在细胞中的运输过程,对植物造成伤害,抑制植物的生长发育(Chen *et al.*, 2002; Gajewska *et al.*, 2006; Stobrawa & Lorenc-Plucińska, 2008; Monteiro *et al.*, 2009)。汞(Hg)是

环境中的有毒重金属,能够影响植物细胞的正常分裂,导致膜脂过氧化水平提高,细胞超微结构发生变化,抑制植物的生长发育,对植物具有明显的毒害作用(刘建新, 2005; 高大翔等, 2008; 袁彦婷等, 2011)。钒(V)是动植物所必需的微量元素,但又是一种可以侵害土壤、植物和动物整个生态系统的潜在危险化学污染物,钒过量时可抑制植物生长,出现矮化、失绿等症状。随着钒矿的开采、冶炼、燃煤以及钒的广泛应用,造成环境中钒的含量增加,钒污染已引起人们的关注(汪金舫和刘铮, 1994; Weg,

\* 国家自然科学基金项目(41161076)、广西自然科学基金项目(2011GXNSFA018045)和广西环境工程与保护评价重点实验室研究基金项目(桂科能 0701k013)资助。

\*\* 通讯作者 E-mail: glhou@glute.edu.cn

收稿日期: 2011-09-13 接受日期: 2011-11-30

2001)。前期研究表明,桂林市各片区菜地土壤 Hg 含量平均值为 95.0~560.4 ng·g<sup>-1</sup>,为中国 11 种土壤 Hg 平均含量(71 ng·g<sup>-1</sup>)的 1.34~7.89 倍(侯明等,2005);土壤中 V 含量为 94.97 mg·kg<sup>-1</sup>,明显高于各种土壤中 V 含量(86 mg·kg<sup>-1</sup>)(侯明等,2009)。可见,由于各种污染渠道释放出大量的 V、Hg,二者通过降水和降尘进入土壤,容易形成复合污染,对蔬菜植物的生长发育造成一定的毒害,因此有必要弄清 V、Hg 复合重金属污染对蔬菜生理生长的影响。

近年来,有关蔬菜遭受重金属胁迫的生理生态毒性研究中,主要为 Cu(邵兴华等,2010)、Cd(任安芝等,2000)、Pb(刘素纯等,2006;陈丽娜等,2010)、Cr(柳玲等,2010)和 Hg 等单一污染,Cd 和 Pb(杨金凤等,2009;高扬等,2010)、Hg 和 Al(姬俊华等,2010)等复合污染,而有关 V、Hg 复合污染对蔬菜幼苗生理特性的影响未见报道。我们在获得钒单一污染对芥菜生长影响规律基础上(郭零和侯明,2010),以桂林市广泛种植的特色蔬菜四九黄菜心作为材料,通过水培试验,研究了 V、Hg 单一和复合胁迫对其生理影响,旨在阐明 V、Hg 单一和复合污染对蔬菜幼苗的毒害机理,并为 V、Hg 污染的风险评价及其污染防治提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

四九黄菜心(*Brassica chinensis*)种子购自桂林市明鑫种子有限公司。试剂为偏钒酸铵(NH<sub>4</sub>VO<sub>3</sub>)、氯化汞(HgCl<sub>2</sub>)。

1.2 试验设计与方法

1.2.1 幼苗培养 挑选饱满的四九黄菜心种子,经 30% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>(含少量硫酸钙)消毒 30 min 之后,均匀的播种于铺以 3 层滤纸的白瓷盘(35 cm×25 cm)中,每盘种子的数量相当,常温自然光照培养,待种子发芽并直立之后,每 3 d 更换一次 Hoagland 营养液。在幼苗长出第 3 片真叶后,选择长势、大小一致的幼苗,进行 V、Hg 的单一和复合处理。V 处理浓度设 0、1.0、5.0、10、20 mg·L<sup>-1</sup> 5 个水平,Hg 处理浓度设 0、5、10 mg·L<sup>-1</sup> 3 个水平,共 15 个处理(表 1),重复试验 3 次。用含各水平处理组合 V、Hg 的 Hoagland 营养液(pH 5.5)培养 8 d 后,采集幼苗的地上部分(茎、叶)于-40℃保存,立即进行各项生理生化指标的测定。

表 1 V(V)与 Hg(II)处理的试验设计  
Table 1 Experimental design of V(V) and Hg(II) treatment

Hg(II) (mg·L <sup>-1</sup> )	V(V)(mg·L <sup>-1</sup> )				
	0	1	5	10	20
0	0	1+0	5+0	10+0	20+0
5	0+5	1+5	5+5	10+5	20+5
10	0+10	1+10	5+10	10+10	20+10

1.2.2 测定方法 叶绿素含量测定采用丙酮提取法(张志良和瞿伟菁,2003);丙二醛(MDA)含量的测定采用李合生(2000)硫代巴比妥酸分光光度法,超氧化物歧化酶(SOD)活性的测定采用张志良(2003)邻苯三酚自氧化法;过氧化物酶(POD)活性的测定按愈创木酚法(李合生等,2000),酶活性以每克植物鲜重每分钟吸光度变化值(ΔA<sub>470</sub>·g<sup>-1</sup>·min<sup>-1</sup>)表示;过氧化氢酶(CAT)活性的测定采用过氧化氢酶活性分光光度法(徐镜波等,1997),其活性以每克植物鲜重每分钟吸光度的变化值(ΔA<sub>240</sub>·g<sup>-1</sup>·min<sup>-1</sup>)表示;细胞膜透性采用电导法(杜天庆等,2009)测定,用相对电导率表示。

1.3 数据处理

采用 DPS 数据处理系统和 Microsoft Excel 2003 对数据进行统计分析和制图,Duncan 多重比较法对显著性差异(α=0.05)进行多重比较,结果用平均值±标准差(mean±SD)表示。

2 结果与分析

2.1 V、Hg 胁迫对蔬菜幼苗叶绿素含量的影响

叶绿素是植物进行光合作用的物质基础,各种环境胁迫均可导致叶绿素的破坏与降解。由图 1 可知,V 在较低浓度(≤5 mg·L<sup>-1</sup>)范围,可促进叶绿素的合成,当浓度达 5 mg·L<sup>-1</sup>时,叶绿素含量达到最大值,与对照相比,叶绿素 a、叶绿素 b 和总叶绿素含量分别增加 56.2%、57.8%和 56.6%,叶绿素 a/b 提高 2.1%,以后随着 V 浓度加大叶绿素含量逐渐下降,当 V 浓度达 20 mg·L<sup>-1</sup>,与对照相比,叶绿素 a、叶绿素 b 和总叶绿素含量分别降低 45.5%、33.1%和 42.9%,叶绿素 a/b 下降 9.5%,说明高浓度 V 对叶绿素的合成有抑制作用,这与赵婷等(2007)“适量浓度的钒处理能促进水稻幼苗叶绿素的合成,但当钒浓度过高时则会表现出毒害作用”的研究结果相一致。当 V、Hg 复合胁迫时,叶绿素含量变化趋势与 V 单独胁迫相似,当 V 浓度超过 5

$\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,随着金属浓度的增加,复合胁迫对植物的光合作用影响加大,尤其在高浓度 V、Hg 复合污染时叶绿素含量显著降低,如在 V、Hg 浓度分别为 20 和  $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  复合胁迫下,叶绿素 a、叶绿素 b 和总叶绿素含量分别下降 69.1%、52.9% 和 64.4%,叶绿素 a/b 降低 41.6%,显然 V、Hg 复合胁迫明显增强了 V 对叶片的毒害作用。

2.2 V、Hg 胁迫对蔬菜幼苗丙二醛(MDA)含量的影响

丙二醛(MDA)是膜脂氧化的产物,其含量的

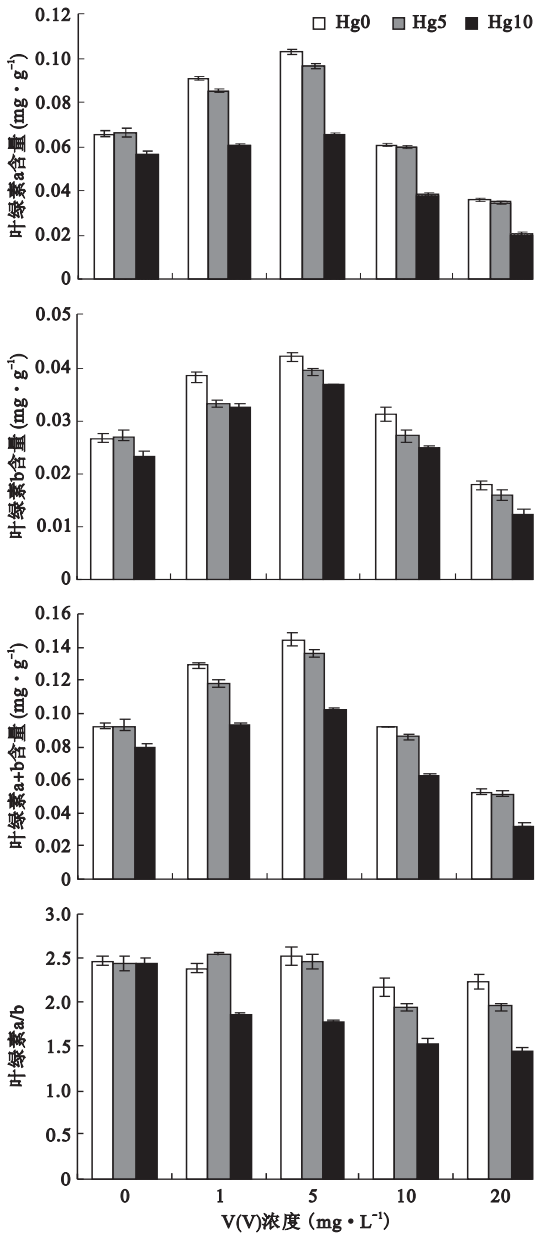


图 1 V(V)、Hg(II)胁迫对四九黄菜心叶绿素含量的影响  
Fig.1 Effect of V(V) and Hg(II) on chlorophyll content of *Brassica chinensis*

变化可作为检测逆境条件下膜系统受伤害程度的指标。不同处理对四九黄菜心 MDA 含量的影响如图 2。随着金属浓度的增加,无论 V 单一胁迫或 V、Hg 复合胁迫,MDA 含量均呈明显上升趋势。当 V 浓度为  $10.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,Hg 浓度分别为 5.0 和  $10.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,与对照相比,V 单一胁迫下 MDA 含量增加了 39.3%,V、Hg 复合胁迫 MDA 增加了 131.8% 和 215.8%,说明 V、Hg 复合胁迫下 MDA 含量明显高于单一 V 胁迫,高浓度复合污染使四九黄菜心幼苗的膜脂过氧化水平明显提高,产物 MDA 含量显著增大,植物损伤程度加深。

2.3 V、Hg 胁迫对蔬菜叶片细胞膜透性(CMP)的影响

细胞膜透性是评定植物对污染物反应的生理指标之一。从图 3 可知,随着 V、Hg 胁迫浓度的升高,细胞膜透性均呈逐渐递增的趋势,且 V、Hg 复合胁迫的细胞膜透性高于单一 V 胁迫。当 V 浓度为  $5.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,Hg 浓度分别为 5.0 和  $10.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,与对照相比,V 单一胁迫下细胞膜透性增加了 51.1%,复合胁迫则增加了 97.6% 和 119.1%;V 浓度为

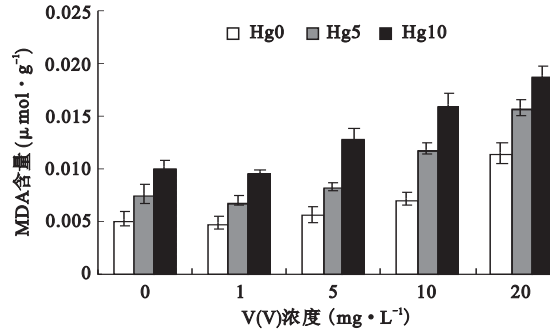


图 2 V、Hg 胁迫对四九黄菜心中 MDA 含量的影响  
Fig.2 Effect of V and Hg stress on MDA content in *Brassica chinensis*

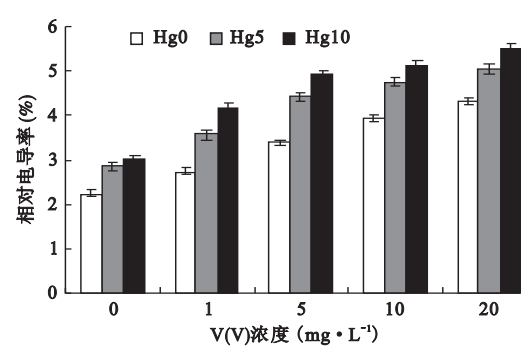


图 3 V、Hg 胁迫对四九黄菜心叶片细胞膜透性的影响  
Fig.3 Effect of V and Hg stress on cell membrane penetration in *Brassica chinensis*

10.0 mg · L<sup>-1</sup>时, V (V) 单一胁迫细胞膜透性增加了 75.4%, 复合胁迫则增加了 112.2% 和 129.1%。可见, 复合胁迫对蔬菜幼苗的毒害作用最为明显, 对细胞造成显著伤害。

## 2.4 V、Hg 胁迫对蔬菜幼苗 CAT、POD 和 SOD 活性的影响

CAT、POD、SOD 均为植物细胞内清除活性氧的保护酶, 在防止自由基伤害中起着重要作用。由图 4 可见, 四九黄菜心幼苗的叶片和叶茎的 CAT、POD 和 SOD 活性均随着 V、Hg 浓度的增加呈现先升后降的变化趋势。

由图 4 可见, 无论是 V 单一胁迫还是 V、Hg 复合胁迫, CAT 活性均在 V 浓度为 1.0 mg · L<sup>-1</sup> 时出现最大, 如在 1.0 mg · L<sup>-1</sup> 的 V 中分别加入 Hg 浓度为 0、5 和 10 mg · L<sup>-1</sup> 时, 与对照相比较, CAT 活性增加 15.6%、19.2% 和 23.4%, 以后随着 V 浓度增大 CAT 活性呈现明显下降趋势, 表明四九黄菜心对 V、

Hg 复合污染具有一定的应激性反应, 在低浓度金属胁迫下植物体内 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 出现积累, CAT 受到诱导而使其活性增加, 自身清除氧自由基能力增强, 随胁迫浓度的增加植物体内产生了大量过氧化物, 胁迫已超出 CAT 的耐受范围, 使细胞受到伤害, 导致 CAT 活性下降。

POD 与 SOD 和 CAT 协调配合, 可清除植物体内过剩的自由基, 催化有毒物质的分解, 提高植物的抗逆能力。由图 4 可知, 随着金属胁迫浓度的增加, 四九黄菜心幼苗中 POD 活性呈上升趋势, 并在 V 浓度为 5.0 mg · L<sup>-1</sup> 时酶活性达到最大值, 与对照相比较, 当 V 浓度为 5.0 mg · L<sup>-1</sup>, Hg 浓度为 5.0 和 10 mg · L<sup>-1</sup>, V 单一胁迫下增加了 50.6%; V、Hg 复合胁迫时增加 40.0% 和 48.8%, 表明 POD 在保护蔬菜幼苗免受金属胁迫的伤害中起着重要作用。但当 V 浓度大于 5 mg · L<sup>-1</sup>, 无论单一胁迫还是复合胁迫, POD 活性均明显下降, 尤其在高水平 V 中加入不同浓度的 Hg, POD 活性降低趋势更为明显, 如 V 浓度为 20 mg · L<sup>-1</sup> 时分别加入 Hg 浓度为 5、10 mg · L<sup>-1</sup>, POD 活性比对照下降 18.8% 和 36.2%, 表明复合胁迫产生的有毒物质超过 POD 的催化能力, 表现出机体抗氧化能力的降低。

从图 4 可以看出, 在各种处理下, 蔬菜幼苗 SOD 活性均随 V 浓度增加先升高后降低, 在 V 浓度为 1.0 mg · L<sup>-1</sup> 时达最大值, 如 Hg 浓度分别为 0、5 和 10 mg · L<sup>-1</sup> 时, 与对照相比较, SOD 增加了 18.6%、26.3% 和 19.1%, 以后, 随 V 浓度的增大, 酶活性逐渐下降, 20 mg · L<sup>-1</sup> V 单一胁迫时, 与对照相比, 减小了 53.7%; 用 5、10 mg · L<sup>-1</sup> Hg (Ⅱ) 复合胁迫, 下降 71.8% 和 82.6%, 可见, 当重金属胁迫强度不同, 其酶活性水平也不相同, 低浓度的胁迫, 有助于提高植物细胞消除氧自由基的功能, 较高浓度胁迫下却表现酶活性降低, 说明菜心自我调节 SOD 活性来适应金属胁迫的能力是有限的。

## 3 讨论

叶绿素含量的高低是衡量叶片衰老的重要生理指标。本研究发现, 无论 V 单一胁迫还是 V、Hg 复合胁迫, 四九黄菜心幼苗叶绿素含量均呈先上升后下降的趋势, 但复合胁迫的影响更为显著, 表明菜苗受到低浓度重金属刺激作用, 体内产生防御性反应, 其活性氧自由基清除酶 (如 SOD) 活性增加, 使叶绿素的伤害减少或合成速度加快, 叶绿素含量呈上升

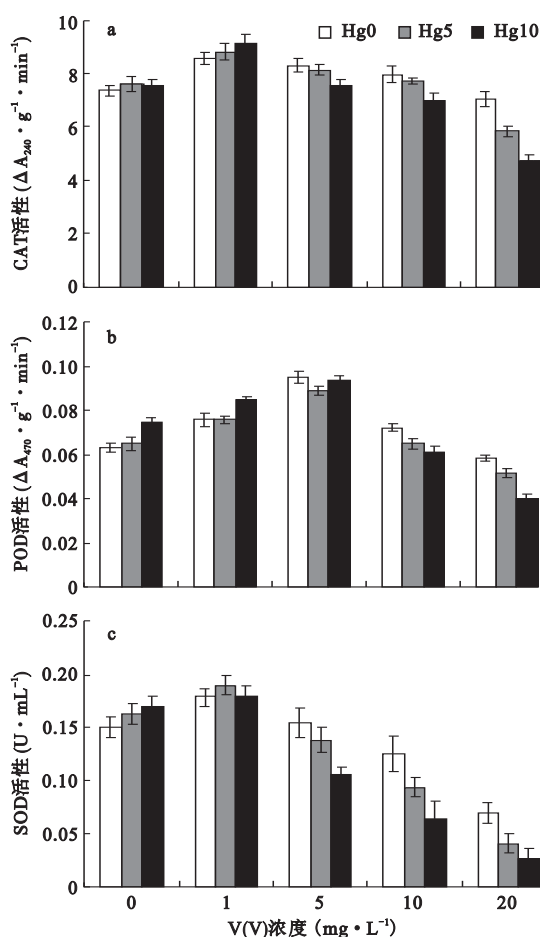


图 4 V、Hg 胁迫对四九黄菜心 CAT、POD 和 SOD 影响  
Fig.4 Effect of V and Hg stress on CAT, POD and SOD activities in *Brassica chinensis*

趋势。当胁迫浓度进一步加大,可能超量的重金属直接破坏解毒物质,形成大量活性氧自由基,从而抑制叶绿素前体的合成,并导致叶绿素分解,使叶绿素含量降低,从而加速了蔬菜幼苗叶片的衰老(刘建新,2005;周燕等,2011)。蔬菜叶片在外观上逐渐出现绿色变淡并黄化,叶片变小,叶片出现的黄色斑块,表明高含量的重金属 V、Hg 能明显抑制植物叶绿素的合成,降低了植物的光合作用。而 V、Hg 复合胁迫时叶绿素含量下降程度明显增大,可见复合胁迫对叶绿素的毒害作用高于 V 单一胁迫。

植物在逆境中,细胞原生质膜中的不饱和脂肪酸会发生过氧化作用而产生 MDA,使质膜系统受到伤害。当菜苗受到重金属胁迫时,其细胞膜的选择透性机能受损,透性增大,细胞内一些可溶性物质外渗,从而破坏了细胞内酶及代谢作用,所以,丙二醛含量高低和细胞质膜透性变化是反映细胞膜脂过氧化作用强弱和质膜破坏程度的重要指标。研究表明,MDA 含量与细胞膜透性在不同处理下随金属浓度的增高而呈逐渐递增的趋势,说明在胁迫浓度较高时,细胞内有害物质将不断积累,使膜脂过氧化反应更为剧烈,导致细胞膜系统伤害的程度更大,膜系统稳定性下降,明显阻碍了植物的正常生长,这与任安芝等(2000),王云等(2008)的研究结果一致。在 V、Hg 复合胁迫处理时,菜心叶片中细胞膜透性和 MDA 含量显著高于相同浓度 V 的单一胁迫,显示多金属的复合氧化胁迫作用较强,膜脂过氧化程度更大,V、Hg 复合胁迫对细胞膜系统伤害的程度明显超过了单独 V 的作用,影响了细胞的正常代谢。

研究表明,植物在正常生长条件下,抗氧化酶能有效地清除重金属胁迫产生的活性氧,以防止植物体内膜系统受到过氧化伤害;当植物处于逆境条件时,活性氧不断积累,若金属浓度超过一定阈值就会使植物细胞内的大分子物质发生过氧化反应,导致植物生长异常(许建光等,2007;严明理等,2009;孙天国等,2010)。本研究发现,四九黄菜心中 CAT、POD、SOD 三种抗氧化酶对于不同浓度金属胁迫响应程度不同,随着胁迫浓度增大,酶活性呈先上升后下降的变化趋势,无论单一或复合胁迫, CAT 和 SOD 活性均在 V 浓度为  $1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  出现最大, POD 活性在  $5.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时达最大,以后随着胁迫浓度增加,酶活性逐渐下降,这与姬俊华等(2010),严明理等(2009)和袁彦婷等(2011)的研究结果不一致。此现象可能是,在重金属胁迫的低浓度范围,体内活

性氧增多启动了细胞的防御反应,使 CAT、POD、SOD 部分活性受到激发而升高,3 种酶能共同抵御胁迫造成的膜伤害,表现出较强的自我调节能力和抗性,这是低浓度重金属对植物的积极“刺激作用”(Patra *et al.*, 1994)。但在较高胁迫浓度或复合胁迫下,植物酶活性受到抑制,重金属离子在植物体内积累量增多,对植物的毒害加剧,从而导致自由基在叶细胞内大量积累,当植物细胞内产生的活性氧自由基超过保护酶系统的清除能力时,植物膜结构和功能受到破坏,造成对植物细胞的过氧化损伤。所以,当金属胁迫超过植物忍受极限时,其防御措施相应减弱,表明重金属胁迫条件下植物体内 CAT、POD 和 SOD 对膜系统的保护作用是有其一定限度的。

综上所述,无论 V 单一或 V、Hg 复合胁迫,低浓度 ( $V \leq 5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) 胁迫可使四九黄菜心幼苗表现出一定抗性,通过提高酶活性使植株免受伤害,其叶绿素含量,抗氧化酶 SOD、POD、CAT 的活性有所增大,说明微量金属 V、Hg 对四九黄菜心的生长有一定的刺激作用。随着金属胁迫浓度增加,植物体内活性氧的产生和清除平衡失调,叶绿素含量下降,细胞内的保护酶 SOD、POD、CAT 活性降低,细胞膜系统受到伤害,膜脂过氧化程度增加,导致 MDA 含量与细胞膜透性明显增加,最终植株受到重金属胁迫的伤害,加速了植物的衰老和死亡,尤其在高浓度 ( $\geq 10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) 胁迫下对植物的生理特性影响更为显著。本研究还表明,重金属 V、Hg 对四九黄菜心的毒害作用存在差别,但其毒害作用的大小还有待于进一步研究。V、Hg 复合处理对四九黄菜心生理特性影响比较复杂,无论浓度高低,V、Hg 复合胁迫对菜心幼苗的生理伤害明显大于 V 单一胁迫,但二者间交互作用的微观机理也还有待进一步研究。

## 参考文献

- 陈丽娜,艾绍英,唐明灯,等. 2010. 铅胁迫对不同叶菜生长及铅吸收的影响. 农业环境科学学报, **29**(7): 1232–1238.
- 杜天庆,杨锦忠,郝建平,等. 2009. Cd、Pb、Cr 三元胁迫对小麦幼苗生理生化特性的影响. 生态学报, **29**(8): 4475–4482.
- 高扬,毛亮,周培,等. 2010. Pb、Cd 复合胁迫下 4 种植物抗氧化防御差异性研究. 中国生态农业学报, **18**(4): 836–842.
- 高大翔,郝建朝,李子芳,等. 2008. 汞胁迫对水稻生长及幼苗生理生化的影响. 农业环境科学学报, **27**(1): 58–61.

- 郭零, 侯明. 2010. 钒胁迫对芥菜生理特性的影响. 桂林理工大学学报, **30**(4): 617–620.
- 侯明, 黄以峰, 何剑亮, 等. 2009. 蔬菜根际环境钒的形态变化及植物有效性. 农业环境科学学报, **28**(7): 1353–1357.
- 侯明, 钱建平, 殷辉安. 2005. 桂林市土壤汞存在形态的研究. 土壤通报, **36**(3): 398–401.
- 姬俊华, 孟超敏, 杨瑞先, 等. 2010.  $Hg^{2+}$  和  $Al^{3+}$  单一及复合污染对小白菜生理特性的影响. 安徽农业科学, **38**(23): 12656–12657, 12660.
- 李合生, 孙群, 赵世杰, 等. 2000. 植物生理生化实验原理和技术. 北京: 高等教育出版社.
- 刘建新. 2005.  $Hg^{2+}$  对豌豆幼苗生长和生理代谢的影响. 宁夏大学学报(自然科学版), **26**(1): 67–70.
- 刘素纯, 萧浪涛, 廖柏寒, 等. 2006. 铅胁迫对黄瓜幼苗抗氧化酶活性及同工酶的影响. 应用生态学报, **17**(2): 300–304.
- 柳玲, 吕金印, 张微. 2010. 不同浓度  $Cr^{6+}$  处理下芹菜的铬累积量及生理特性. 核农学报, **24**(3): 639–644.
- 任安芝, 高玉葆, 刘爽. 2000. 铬-镉-铅胁迫对青菜叶片几种生理生化指标的影响. 应用与环境生物学报, **6**(2): 112–116.
- 邵兴华, 张建忠, 林国卫, 等. 2010. 铜胁迫对油麦菜生长和土壤酶活性的影响. 中国农学通报, **26**(4): 157–161.
- 孙天国, 沙伟, 刘岩. 2010. 复合重金属胁迫对两种藓类植物生理特性的影响. 生态学报, **30**(9): 2332–2339.
- 汪金舫, 刘铮. 1994. 钒在土壤中的含量分布和影响因素. 土壤学报, **31**(1): 61–67.
- 王云, 陈尧, 钱亚如. 2008. 镉胁迫对不同品种小麦幼苗生长和生理特性的影响. 生态学杂志, **27**(5): 767–770.
- 徐镜波, 袁晓凡, 郎佩珍. 1997. 过氧化氢酶活性及活性抑制的紫外分光光度测定. 环境化学, **16**(1): 73–76.
- 许建光, 李淑仪, 王荣萍, 等. 2007. 硅对铬胁迫下小白菜生理指标的影响. 生态学杂志, **26**(6): 865–868.
- 严明理, 冯涛, 刘丽莉, 等. 2009. 模拟酸雨和 Pb 复合污染对芥菜型油菜的生理特性和 Pb 富集的影响. 环境科学学报, **29**(10): 2172–2179.
- 严明理, 冯涛, 向言词, 等. 2009. 铈尾沙对油菜幼苗生长和生理特征的影响. 生态学报, **29**(8): 4215–4222.
- 杨金凤, 卜玉山, 邓红艳. 2009. 镉、铅及其复合污染对油菜部分生理指标的影响. 生态学杂志, **28**(7): 1284–1287.
- 袁彦婷, 丁振华, 张玲. 2011. 汞胁迫对白骨壤(*Avicennia marina*)幼苗生理生态的影响. 生态学杂志, **30**(5): 1013–1017.
- 张志良, 瞿伟菁. 2003. 植物生理学实验指导. 北京: 高等教育出版社.
- 赵婷, 铁柏清, 杨余维. 2007. 钒对水稻种子萌发及幼苗生长的影响. 环境科学与技术, **30**(5): 3–5.
- 周燕, 张桂花, 徐迎春, 等. 2011. 铜对凤丹生长、生理及体内矿质元素吸收分配的影响. 生态学杂志, **30**(3): 415–423.
- Chen EL, Chen YA, Chen LM, *et al.* 2002. Effect of copper on peroxidase activity and lignin content in *Raphanus sativus*. *Plant Physiology and Biochemistry*, **40**: 439–444.
- Gajewska E, Sklodowska M, Slaba M, *et al.* 2006. Effect of nickel on antioxidative enzyme activities, proline and chlorophyll contents in wheat shoots. *Biologia Plantarum*, **50**: 653–659.
- Monteiro MS, Santos C, Soares AMVM, *et al.* 2009. Assessment of biomarkers of cadmium stress in lettuce. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, **72**: 811–818.
- Patra J, Lenka M, Panda BB. 1994. Tolerance and co-tolerance of the grass *Chloris barbata* Sw. to mercury, cadmium and zinc. *New Phytologist*, **128**: 165–171.
- Stobrawa K, Lorenc-Plucińska G. 2008. Thresholds of heavy-metal toxicity in cuttings of European black poplar (*Populus nigra* L.) determined according to antioxidant status of fine roots and morphometrical disorders. *Science of the Total Environment*, **390**: 86–96.
- Weg W. 2001. Salinity dependence of vanadium toxicity against the brackish water hydroid. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, **48**: 18–26.

作者简介 侯明, 女, 1957年生, 博士, 教授, 主要从事分析化学、环境化学等教学与科研工作. E-mail: glhou@glite.edu.cn

责任编辑 李凤芹