

铅胁迫对杨梅生理特性的影响

何 冰, 何计兴, 何新华, 李 峰, 韦泓明, 蔡春波

(广西大学农学院, 广西 南宁 530004)

摘 要:通过水培试验,研究了不同浓度的铅胁迫对杨梅(*Myrica rubra* Sieb. et Zucc.)叶片的叶绿素含量、可溶性蛋白质含量、可溶性糖含量、超氧化物歧化酶(SOD)活性、过氧化物酶(POD)活性、丙二醛(MDA)含量以及根系活力的影响。结果表明,在 $2\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 低铅条件下,杨梅叶片叶绿素含量和可溶性蛋白质含量在 30 d 内与对照相比无显著性差异;叶片可溶性糖和 MDA 含量在 $2\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 低铅处理第 10 d 即比对照显著增加;根系活力在 $2\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 低铅胁迫处理 20 d 后比对照显著降低;叶片 SOD 和 POD 活性在 $2\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 低铅胁迫下活性随着处理时间的延长而呈先升后降的变化趋势,在低铅处理第 20 d SOD 和 POD 活性达到最大。在 $6\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 高铅胁迫下,杨梅叶片的叶绿素含量、可溶性蛋白质含量、SOD 活性、POD 活性、MDA 含量以及根系活力均随着处理时间的延长而不断降低;而叶片可溶性糖含量在高铅处理 30 d 时比对照有所增加。综上所述,杨梅在低铅条件下可诱导活性氧清除系统以及叶片可溶性糖含量增加以减少由于铅胁迫带来的活性氧代谢失衡和缺水对植株的伤害。

关键词:铅胁迫;杨梅;超氧化物歧化酶;过氧化物酶;可溶性糖

中图分类号:X503.235 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2009)06-1263-06

Effects of Lead on Physiological Characteristics of Baylerry (*Myrica rubra*) Seedlings

HE Bing, HE Ji-xing, HE Xin-hua, LI Feng, WEI Hong-ming, CAI Chun-bo

(College of Agriculture, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: Phytoextraction is considered a cheap and green method to remove pollutants from the soil by plants. It was found that the lead (Pb) content in leaves of baylerry (*Myrica rubra* Sieb. et Zucc.) seedling can reach $1\ 107\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ without observed injury. To understand the tolerance mechanism of baylerry to Pb, we investigated the effects of Pb treatments on the contents of chlorophyll, total soluble protein, soluble sugar and malondialdehyde (MDA), root activity, activities of superoxide dismutase (SOD) and peroxidase (POD) in the leaves of baylerry seedlings in a period of 30 days. Three concentrations of lead, 2, 4, 6 $\text{mmol Pb}^{2+}\cdot\text{L}^{-1}$, were used in the treatments. Under the low concentration of Pb ($2\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$), the increasing soluble sugar and MDA content in leaves of Baylerry seedlings were detected on the 10th day, while the decreasing root activity was detected on the 20th day. The SOD and POD activities in leaves of baylerry increased after the initiation of low Pb treatment, reached a peak on the 20th day, and then declined. The low Pb treatment showed no apparent effect on the contents of chlorophyll or total soluble protein. Under the high concentrations of Pb ($6\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$), the contents of chlorophyll, total soluble protein and malondialdehyde (MDA), root activity, the activity of SOD and POD in the leaves of baylerry seedlings showed a decreasing trend during 30 days. In contrast, the contents of soluble sugar in the leaves showed an increase on the 30th day after the initiation of high Pb treatment. In conclusion, low Pb stress could induce antioxidant defense mechanism to prevent oxidative damage and increase soluble sugar contents to minimize the dehydration damage in Baylerry.

Keywords: lead stress; baylerry (*Myrica rubra* Sieb. et Zucc.); SOD; POD; soluble sugar

铅(Pb)是一种常见的重金属污染物^[1]。过量的铅进入植物体内,会对植物的生理生化过程造成一系列的不利影响。Palavi 等^[2]认为,铅毒会对植物光合作用

过程产生不利的影响;Kupper 等^[3]认为,铅胁迫条件下植物叶绿素含量的下降,是由于叶绿体结构受到破坏;而 Drazhiewicz^[4]则认为,是由于叶绿素酶活性的增加。Palavi 等^[2]认为,铅胁迫下植物组织含水量的下降是由植物呼吸速率的降低所造成的。目前,可溶性糖被认为是一种有效的渗透调节物质,并与植物的抗性有密切关系^[5]。另外,铅胁迫会诱导植物体内活性氧自由基含量的增加,而植物体内的过氧化物酶(POD)

收稿日期:2008-10-03

基金项目:国家自然科学基金资助项目(30560007)

作者简介:何 冰(1974—),女,博士,副教授,研究方向为植物逆境生理。E-mail:bingh2000@126.com

通讯作者:何新华 E-mail:Honest66222@163.com

和超氧化物歧化酶(SOD)在一定范围内能及时清除过多的活性氧以保护细胞免受伤害。

杨梅(*Myrica rubra* Sieb. et Zucc.)是我国著名的特色果树,能与弗兰克氏(*Frankia*)放线菌共生在根部形成固氮根瘤,具有固氮能力强、耐寒、耐旱、耐瘠薄、适应性强的特点。不但能在瘠薄山地上生长,而且能起到保持水土、减少土壤冲刷和改良矿区土壤的作用。何新华等^[6]研究发现杨梅幼苗叶片干重中铅含量达到 $1\,107.9\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,杨梅植株仍能正常生长,没有出现铅毒害症状。由于杨梅具有强大的保水能力,且能在贫瘠的土地上生长,被认为是一种对土壤铅污染具有潜在修复能力的先锋树种。目前,有关铅对杨梅生理生化影响的研究尚未见报道。本试验以杨梅为材料,采用水培试验的方法,研究不同浓度铅对杨梅生长的影响,以期探索杨梅的耐铅机理提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 材料

一年生东魁杨梅幼苗,取自广西南宁东魁杨梅园。

1.2 溶液培养

选取长势一致的一年生东魁杨梅幼苗,用1/4 Hoagland 营养液预培养1个月后,在营养液中加入不同浓度的 $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ 进行铅处理,其浓度分别为0、2、4和 $6\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$,每个处理9株,以不加 $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ 的营养液培养的植株作为对照。每天通气8 h,用NaOH和HCl调节营养液的pH,使pH值维持在5.4左右,每7 d更换1次营养液。在用铅处理后的第10、20、30 d分别采样进行各项生理指标的测定。

1.3 测定方法

叶绿素含量的测定:采用乙醇丙酮法^[7]。可溶性蛋白质含量的测定:采用考马斯亮蓝法^[8]。可溶性糖含量的测定:采用蒽酮比色法^[8]。根系活力的测定:氯化三苯基四氮唑(TTC)法^[8]。过氧化物酶(POD)活性的测定:采用愈创木酚法^[9]。超氧化物歧化酶(SOD)活性的测定:采用氮蓝四唑法^[10]。丙二醛(MDA)含量的测定:采用硫代巴比妥酸(TBA)法^[9]。

1.4 数据分析

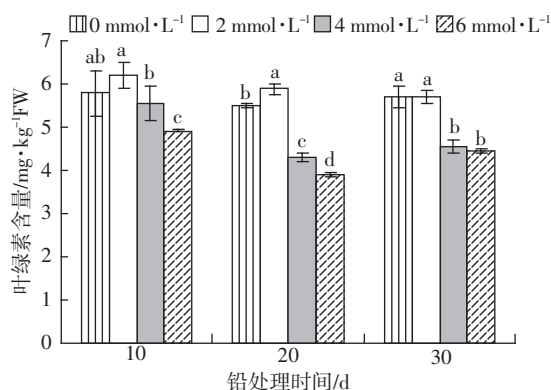
数据分析采用Excel软件,统计分析采用DPS软件处理。

2 结果与分析

2.1 铅对杨梅叶片叶绿素含量的影响

叶绿素是绿色植物进行光合作用的色素,其含量

的高低是反映植物叶片光合能力的一个重要指标。从图1可看出,在 $2\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 铅处理条件下,杨梅叶片叶绿素含量并未随着铅处理时间的延长而下降,相反在铅处理20 d时,杨梅叶片的叶绿素含量比对照略增加了7.24%。在4及 $6\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 铅处理条件下,随着处理时间的延长,杨梅叶片的叶绿素含量不断下降。在进行铅处理10 d后, $6\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的杨梅叶片叶绿素含量比对照减少了14.87%,而 $4\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 铅处理的杨梅叶片叶绿素含量在铅处理20 d后才与对照有显著差异。



同列柱体间不同字母表示经邓肯氏新复极差法检验在0.05水平上差异显著,下同。Note: in a column, the bars with different letter are significantly different at $P=0.05$ ($n=4$) in Duncan's new multiple range test, the same as below.

图1 铅对杨梅叶片叶绿素含量的影响

Figure 1 Effect of lead on chlorophyll contents in the leaves of *Myrica rubra*

2.2 铅对杨梅叶片可溶性蛋白质含量的影响

可溶性蛋白质含量的变化是反映叶片功能及衰老的可靠性指标之一^[11]。由图2可看出,随铅处理浓度的增加和时间的延长,杨梅叶片蛋白质含量的变化趋势与叶绿素含量类似。在 $2\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 铅处理条件下,其蛋白质含量并不随着处理时间的延长而下降。其中在铅处理10 d时,可溶性蛋白质含量比对照增加了11.23%。在 $4\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理条件下,其叶片蛋白质含量在处理20 d后与对照相比有所下降。在 $6\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理条件下,其叶片蛋白质含量在处理10 d即与对照有显著差异,比对照减少了11.35%。在处理30 d后, $4\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理组和 $6\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理组的叶片蛋白质含量分别比对照减少了39.14%和82.74%。

2.3 铅对杨梅根系活力和叶片可溶性糖含量的影响

根系活力是指整个根系的代谢状况,其活力大小直接影响植物地上部的生理生化情况。从表1可看

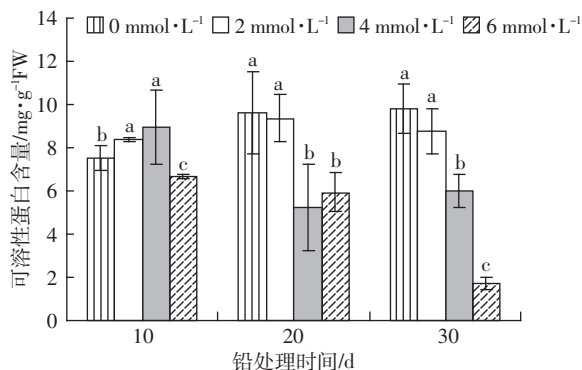


图 2 铅对杨梅叶片可溶性蛋白质含量的影响

Figure 2 Effect of lead on soluble protein contents in the leaves of *Myrica rubra*

出,在 2 mmol·L⁻¹ 铅处理条件下,杨梅根系活力随着处理时间的延长而不断下降,其中在铅处理第 10 d 时杨梅根系活力与对照相比差异不显著,但在处理第 20 d 时,其根系活力比对照减少了 28.26%。在 4 和 6 mmol·L⁻¹ 铅处理 10 d 时,杨梅根系活力分别比对照减少了 23.37% 和 17.09%,而在第 20 d 时,其根系活力分别比对照减少了 27.18% 和 43.81%。

在渗透胁迫下,植物可通过在植物体内积累可溶性糖方式来降低渗透势,以适应外界环境的变化。从表 1 可看出,2 mmol·L⁻¹ 铅处理组在各时期,与对照相比,其叶片可溶性糖含量均有不同程度的增加,其中第 10 d 时,可溶性糖含量达最高,比对照增加了 40.77%。在 4 mmol·L⁻¹ 铅处理条件下,其叶片可溶性糖含量随着处理时间的延长而呈下降趋势,其中 10 d 时,可溶性糖含量比对照下降了 12.58%。在 6 mmol·L⁻¹ 处理条件下,其叶片可溶性糖含量随着处理时间的延长而呈先降后升的趋势,其中在处理 30 d 时,叶片可溶性糖含量比对照增加了 55.12%。

2.4 铅对杨梅叶片 SOD 活性、POD 活性和 MDA 含量的影响

超氧化物歧化酶(SOD)是植物体内清除和减少活性氧自由基的保护酶。植物受到环境胁迫后活性氧代谢失去平衡造成体内活性氧增加,从而诱导 SOD

活性增加。从表 2 可知,2 和 4 mmol·L⁻¹ 处理组的叶片 SOD 活性均随着铅处理时间的延长而呈先升后降的趋势。所不同的是,4 mmol·L⁻¹ 处理组的叶片 SOD 活性在处理第 10 d 时达最高,比对照增加了 12.32%,而 2 mmol·L⁻¹ 处理的叶片 SOD 活性则在处理第 20 d 时达最高,为对照的 1.22 倍。对于 6 mmol·L⁻¹ 处理组,叶片 SOD 活性随着铅处理时间的延长而不断下降,在处理第 10、20 和 30 d 时,其 SOD 活性分别比对照减少了 7.63%、21.55% 和 30.13%。

过氧化物酶(POD)是植物酶促防御系统的关键酶之一,它与 SOD 和 CAT 协调配合,清除体内过剩的自由基,提高植物的抗逆能力。由表 2 可看出,2 mmol·L⁻¹ 铅处理的叶片 POD 活性随着处理时间的延长而呈先升后降的变化趋势。特别值得一提的是,2 mmol·L⁻¹ 铅处理的叶片 POD 活性在第 20 d 达到最大,为对照的 4.68 倍。4 和 6 mmol·L⁻¹ 处理组,其叶片 POD 活性均随着处理时间的延长而不断下降。其中,4 mmol·L⁻¹ 处理组的叶片 POD 活性在处理第 20 和 30 d 时分别比对照减少了 48.04% 和 71.17%。6 mmol·L⁻¹ 处理组的叶片 POD 活性在处理第 20 和 30 d 时分别比对照减少了 63.07% 和 87.81%。

丙二醛(MDA)是植物在逆境条件下膜脂过氧化作用形成的产物,其在植物组织中的积累量可代表膜脂过氧化的程度。由表 2 可知,在第 10 d,随着浓度的增加,各处理组 MDA 含量呈上升趋势,分别比对照增加了 63.77%、152.69% 和 173.23%。第 20 d 时,与对照相比,各处理组 MDA 含量均有不同程度的下降,且以 2 mmol·L⁻¹ 处理的含量为最低,比对照减少了 62.55%。30 d 时,随着浓度的增加,各处理组 MDA 含量逐渐下降,分别比对照减少了 11.80%、69.16% 和 80.92%。

3 讨论

铅胁迫对植物的影响是多元化的。过量的铅进入植物体内,会破坏生物膜的结构,造成叶绿体、线粒体

表 1 铅对杨梅根系活力及叶片可溶性糖含量的影响

Table 1 Effect of lead on root activities and soluble sugar contents in the leaves of *Myrica rubra*

铅处理浓度/mmol·L ⁻¹	根系活力/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}\text{FW}$			可溶性糖含量/%		
	10 d	20 d	30 d	10 d	20 d	30 d
0	118.10±5.50 a	123.89±0.46 a	122.58±8.53 a	0.31±0.01 b	0.27±0.01 a	0.19±0.01 c
2	114.72±0.12 a	88.86±1.92 b	65.80±5.20 b	0.44±0.03 a	0.28±0.01 a	0.25±0.01 b
4	90.50±9.41 b	90.22±4.60 b	75.05±5.89 b	0.27±0.02 c	0.26±0.01 a	0.19±0.01 c
6	97.91±6.33 b	69.61±5.56 c	79.40±17.40 b	0.31±0.01 b	0.27±0.01 a	0.29±0.01 a

表 2 铅对杨梅叶片 SOD 活性、POD 活性和 MDA 含量的影响

Table 2 Effect of lead on SOD activity, POD activity and MDA contents in the leaves of *Myrica rubra*

铅处理浓度/ mmol·L ⁻¹	SOD/unit·g ⁻¹ FW			POD/ΔA470·g ⁻¹ ·min ⁻¹ FW			MDA/mg·g ⁻¹ FW		
	10 d	20 d	30 d	10 d	20 d	30 d	10 d	20 d	30 d
0	159.92±9.52 b	155.45±4.80 c	158.64±1.39 a	31.19±2.33 a	23.32±7.22 b	26.23±5.64 a	57.63±2.56 c	52.82±5.13 a	63.55±1.47 a
2	162.67±19.78 a	190.32±12.04 a	133.31±3.01 b	33.57±9.77 a	109.21±8.01 a	21.09±3.09 a	94.38±5.14 b	19.78±7.38 c	56.05±5.29 b
4	179.61±6.86 a	163.98±0.94 b	108.55±2.78 c	28.90±10.01 a	12.12±3.34 c	7.56±1.46 b	145.62±7.65 a	40.64±3.04 b	19.60±1.60 c
6	147.72±1.03 c	121.96±6.17 d	110.84±13.78 c	41.03±15.12 a	8.61±0.92 c	3.20±2.10 c	157.45±8.16 a	37.76±4.29 b	12.13±2.34 d

及细胞核等重要器官的损伤,从而影响光合作用、呼吸作用以及碳水化合物代谢等过程,最终导致植物生长减缓甚至死亡^[12]。叶绿素是植物进行光合作用的关键物质,植物叶片叶绿素和可溶性蛋白质含量的变化反映了植物生长的状态和新陈代谢的水平。有研究认为,低浓度重金属胁迫对植物叶绿素和可溶性蛋白质合成有刺激作用,从而诱导其含量的增加^[13-14]。张义贤发现,低铅诱导油菜幼苗叶绿素含量增加^[15]。许云华也发现低铅胁迫可刺激条斑紫菜的可溶性蛋白质含量增加^[16]。本研究结果显示,在低浓度铅(2 mmol·L⁻¹)胁迫下,杨梅叶片叶绿素含量和可溶性蛋白质含量并未下降,而且还有不同程度的增加,表明低铅胁迫刺激杨梅新陈代谢水平增加。但高浓度铅(6 mmol·L⁻¹)处理下,杨梅叶片叶绿素含量和可溶性蛋白质含量均显著下降,表明杨梅叶片的光合等新陈代谢活动明显受到抑制。孙小霞^[17]对高羊茅的研究发现,高铅胁迫下其叶片叶绿素含量和可溶性蛋白质含量均显著下降,可能是高铅胁迫使得高羊茅叶片叶绿素降解,光合作用减弱,进而影响碳水化合物的代谢和运输,使蛋白质合成受阻,干扰植物正常的生长和代谢。

Parys 等^[18]认为铅胁迫会影响植物水势从而导致植物缺水。根系是植物吸收水分的主要器官。秦天才等^[19]和王林等^[20]的研究表明,镉、铅及其复合污染均能导致植物根系活力的明显下降。本研究结果显示,在高浓度铅胁迫下,杨梅根系活力显著下降。我们也观察到在高铅胁迫下杨梅叶片出现严重萎蔫的现象。根系活力的降低减少了水分吸收从而导致杨梅地上部含水量的下降。逆境条件下植物进行渗透调节的物质主要以糖类为主^[21],失水胁迫条件下可溶性糖含量的增加有利于降低细胞渗透势,增强细胞保水能力,减少由于细胞失水而造成的损伤。丁海东等^[22]认为镉、锌胁迫下番茄幼苗积累的可溶性糖作为渗透调节物质来保护细胞免受水分胁迫伤害。本研究表明,杨梅在低浓度铅(2 mmol·L⁻¹)胁迫 10 d 时叶片可溶性糖含量比对照显著增加。而此时根系活力与对照相比差

异不显著,说明叶片可溶性糖这一指标比根系活力更为敏感,在根系活力表现出明显变化前,杨梅叶片细胞已感受到铅处理造成的失水胁迫的信号,迅速增加可溶性糖含量,降低细胞渗透势,提高引起细胞失水的阈值。我们认为铅胁迫下杨梅可溶性糖含量的增加可能是杨梅耐铅胁迫的一个应激机制。杨梅在高浓度铅(6 mmol·L⁻¹)胁迫第 30 d,杨梅叶片可溶性糖含量比对照有所增加,原因可能是高铅胁迫造成叶绿素含量下降,光合产物的合成运输受到抑制,导致糖类积累,这与吴桂容等^[23]的研究结果一致。

许多研究表明,重金属胁迫会直接或间接地引起活性氧代谢失调,造成细胞内活性氧的增加,质膜过氧化,MDA 是质膜过氧化的产物,MDA 含量的高低揭示了质膜过氧化的程度。SOD 和 POD 属于细胞清除活性氧的抗氧化酶系统,细胞内活性氧含量增加诱导 SOD 及 POD 活力增加以清除过多的活性氧。不同的植物种类,其体内的 SOD 和 POD 活性在重金属胁迫下变化不完全相同。金璠等^[24]的研究表明,随着铅胁迫的增加,小麦的 SOD 活性先升后降,而 POD 活性则一直呈上升趋势。韩露等^[25]对香根草研究发现,随着铅浓度的增加,香根草叶片 SOD 活性先上升后下降,但仍高于对照,而 POD 活性虽也是先上升后下降,但在高浓度铅处理下,POD 活性却低于对照。曹莹等^[26]的研究表明,在低铅胁迫下玉米叶片的 SOD、CAT 和 POD 活性均高于对照,随着铅浓度的增加,SOD、CAT 和 POD 活性依次下降,且三者活性在铅处理各时期内均与 MDA 的含量呈显著的负相关。本研究表明,在低铅(2 mmol·L⁻¹)处理 20 d 时杨梅 SOD 和 POD 活性均极显著地增加,而 MDA 含量则极显著地下降,此时 MDA 含量的变化与 SOD 及 POD 活性变化呈显著负相关。说明在低铅胁迫下杨梅叶片细胞诱导了 SOD 和 POD 活性增加,有效抑制活性氧造成的质膜损伤,减少了细胞内 MDA 的积累,这与曹莹等^[26]的研究结果相似。杨梅在铅胁迫时体内能产生一个强的抗氧化酶系统,保护植物细胞免受伤害,保证植株的

正常生长,这可能是杨梅耐铅胁迫的又一个重要机制。在高铅胁迫下杨梅叶片细胞的SOD及POD活性均随着铅处理时间的延长和处理浓度的增加而不断下降,可能是由于高铅胁迫造成SOD及POD本身酶蛋白结构的直接破坏。

综上所述,在低铅胁迫条件下,杨梅能提高叶片可溶性糖含量以减少铅胁迫带来的缺水伤害,并可诱导抗氧化酶活性增加来清除植株体内过量的活性氧并降低膜脂过氧化作用,使植株正常生长。然而,在高铅胁迫下,杨梅各生理活动均受到不同程度的影响,植株生长受到抑制。

参考文献:

- [1] Watanabe M A. Phytoremediation on the brink of commercialization[J]. *Environ Sci Technol*, 1997, 31:182-186.
- [2] Palavi Sharma, Dubey R S. Lead toxicity in plants. Braz.[J]. *Plant Physiology*, 2005, 17(1):35-52.
- [3] Kupper H, Kupper F, Spiller M. Environmental relevance of heavy metal-substituted chlorophylls using the example of water plants[J]. *Exp Bot*, 1996, 47:259-266.
- [4] Drazhiewicz M. Chlorophyll-occurrence, functions, mechanism of action, effects of internal and external factors[J]. *Photosynthetica*, 1994, 30:321-331.
- [5] 冷天利, 蒋小军, 杨远祥, 等. 锌铬复合污染对水稻根系可溶性糖代谢的影响[J]. *生态环境*, 2007, 16(4):1088-1091.
LENG Tian-li, JIANG Xiao-jun, YANG Yuan-xiang, et al. Effects of compound pollution of Zn and Cr on soluble carbohydrate metabolism of rice roots[J]. *Ecology and Environment*, 2007, 16(4):1088-1091.
- [6] 何新华, 陈力耕, 何冰, 等. 铅对杨梅幼苗生长的影响[J]. *果树学报*, 2004, 21(1):29-32.
HE Xin-hua, CHEN Li-geng, HE Bing, et al. Effect of lead nitrate on the growth of *Myrica rubra*[J]. *Journal of Fruit Science*, 2004, 21(1):29-32.
- [7] 李得孝, 郭月霞, 员海燕, 等. 玉米叶绿素含量测定方法研究[J]. *中国农学通报*, 2005, 21(6):153-155.
LI De-xiao, GUO Yue-xia, YUAN Hai-yan, et al. Determined methods of chlorophyll from maize[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2005, 21(6):153-155.
- [8] 邹琦. 植物生理学实验指导[M]. 北京:中国农业出版社, 2000:129-130.
ZOU Qi. The experimental guide for plant physiology[M]. Beijing:Chinese Agricultural Press, 2000:129-130.
- [9] 张志良. 植物生理学实验指导[M]. 北京:高等教育出版社, 1990:88-91.
ZHANG Zhi-liang. The experimental guide for plant physiology[M]. Beijing:High Education Press, 1990:88-91.
- [10] 李合生. 植物生理生化试验原理和技术[M]. 北京:高等教育出版社, 2000:167-169.
LI He-sheng. The experimental principle and technology of plant physiology and biochemistry[M]. Beijing:High Education Press, 2000:167-169.
- [11] 俞慧娜, 徐根娣, 杨卫韵, 等. 锰处理对大豆生理特性的影响[J]. *河南农业科学*, 2005(7):35-38.
YU Hui-na, XU Gen-di, YANG Wei-yun, et al. Effects of manganese on physiological characteristics of soybean[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2005(7):35-38.
- [12] 杨刚, 伍钧, 唐亚. 铅胁迫下植物抗性机制的研究进展[J]. *生态学报*, 2005, 24(12):1057-1512.
YANG Gang, WU Jun, TANG Ya. Research advances in plant resistance mechanisms under lead stress[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, 24(12):1507-1512.
- [13] 徐勤松, 施国新. 镉及镉、锌共同作用对水芹菜部分生理特性的影响[J]. *南京师大学报(自然科学版)*, 2000, 23(4):97-100.
XU Qin-song, SHI Guo-xin. The toxic effects of single Cd and interaction of Cd with Zn on some physiological index of [*Oenanthe javanica* (Blume)DC][J]. *Journal of Nanjing Normal University(Natural Science)*, 2000, 23(4):97-100.
- [14] 袁敏, 铁柏清, 唐美珍. 重金属单一污染对龙须草叶绿素含量和抗氧化酶系统的影响[J]. *土壤通报*, 2005, 36(6):929-932.
YUAN Min, TIE Bai-qing, TANG Mei-zhen. Effect of Cd, Pb, Cu, Zn and as single pollution on chlorophyll content and antioxidant enzyme systems of *Eulaliopsis binata*[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2005, 36(6):929-932.
- [15] 张义贤. 汞、镉、铅胁迫对油菜的毒害效应[J]. *山西大学学报(自然科学版)*, 2004, 27(4):410-413.
ZHANG Yi-xian. The toxic effects of mercury, cadmium and lead to *Brassica chinensis* L.[J]. *Journal of Shanxi University(Nat. Sci. Ed.)*, 2004, 27(4):410-413.
- [16] 许云华, 邵世光, 张雷. 铅污染对条斑紫菜的毒害影响[J]. *淮阴师范学院学报(自然科学版)*, 2005, 4(3):236-243.
XU Yun-hua, SHAO Shi-guang, ZHANG Lei. Toxic effect of lead pollution on *Porphyra Yezoensis*[J]. *Journal of Huaiyin Teachers College(Natural Science Edition)*, 2005, 4(3):236-243.
- [17] 孙小霞. 高羊茅对铅递进胁迫的生理响应[J]. *河南科技大学学报(自然科学版)*, 2006, 27(6):75-78.
SUN Xiao-xia. Physiological response of tall fescue to lead increased stress[J]. *Journal of Henan University of Science & Technology(Natural Science Edition)*, 2006, 27(6):75-78.
- [18] Parys E, Romanowaska E, Siedlecka M, et al. The effect of lead on photosynthesis and respiration in detached leaves and in mesophyll protoplasts of *Pisum sativum*[J]. *Acta Physiol Plant*, 1998, 20:313-322.
- [19] 秦天才, 吴玉树, 王焕校, 等. 镉、铅及其交互作用对小白菜根系生理生态效应的研究[J]. *生态学报*, 1998, 18(3):320-325.
QIN Tian-cai, WU Yu-shu, WANG Huan-xiao, et al. Effect of cadmium, lead and their interactions on the physiological and ecological characteristics of root system of *Brassica Chinensis*[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1998, 18(3):320-325.
- [20] 王林, 史衍玺. 镉、铅及其复合污染对辣椒生理生化特性的影响[J]. *山东农业大学学报(自然科学版)*, 2005, 36(1):107-112.

- WANG Lin, SHI Yan-xi. Effects of cadmium, lead and their combined pollution on the physiological and biochemical characteristics of *Cap-sicum Annuum* [J]. *Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2005, 36(1): 107-112.
- [21] Tachaplinski T J, Blake T J. Water stress tolerance and late organic solute accumulation in hybrid poplar[J]. *Can J Bot*, 1989, 67: 1681-1688.
- [22] 丁海东, 朱为民, 杨少军, 等. 镉、锌胁迫对番茄幼苗生长及脯氨酸和谷胱甘肽含量的影响[J]. 江苏农业学报, 2005, 21(3): 191-196.
- DING Hai-dong, ZHU Wei-min, YANG Shao-jun, et al. Effects of cadmium and zinc stress on growth and content of proline and glutathione (GSH) in tomato seedlings[J]. *Jiangsu J of Agr Sci*, 2005, 21(3): 191-196.
- [23] 吴桂容, 严重玲. 镉对桐花树幼苗生长及渗透调节的影响[J]. 生态环境, 2006, 15(5): 1003-1008.
- WU Gui-rong, YAN Chong-ling. Effects of Cd on the growth and osmotic adjustment regulation contents of *Aegiceras Conrniculatum* seedlings[J]. *Ecology and Environment*, 2006, 15(5): 1003-1008.
- [24] 金 璁, 袁金萍. 铅对小麦保护酶系统的影响[J]. 江苏农业科学, 2007(2): 225-232.
- JIN Jin, YUAN Jin-ping. Effect of lead stress on the protective enzyme system in wheat seedling[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2007(2): 225-232.
- [25] 韩 露, 张小平, 刘必融. 香根草对重金属铅离子的胁迫反应研究[J]. 应用生态学报, 2005, 16(11): 2178-2181.
- HAN Lu, ZHANG Xiao-ping, LIU Bi-rong. Response of *Vetiveria Zizanioides* to Pb^{2+} stress[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(11): 2178-2181.
- [26] 曹 莹, 黄瑞冬, 曹志强. 铅胁迫对玉米生理生化特性的影响[J]. 玉米科学, 2005, 13(3): 61-64.
- CAO Ying, HUANG Rui-dong, CAO Zhi-qiang. Effects of Pb stress on the physiological and biochemical traits of maize[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2005, 13(3): 61-64.