

Pb 胁迫对圆叶无心菜 (*Arenaria rotundifolia* Bieberstein) 生长和生理特征的影响

闵 焕, 祖艳群, 李 元

(云南农业大学资源与环境学院, 昆明 650201)

摘 要: 通过室内水培圆叶无心菜幼苗, 研究不同浓度 Pb 对圆叶无心菜生长、叶绿素含量、丙二醛含量和细胞膜透性的影响。结果表明, 随着 Pb 处理浓度的增加, 植物生长受到抑制, 叶绿素含量呈现先上升后下降的变化趋势, 丙二醛含量和细胞膜透性均呈上升的变化趋势。铅浓度为 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 圆叶无心菜株高、根长以及生物量和叶绿素含量均比对照含量有所增加; 铅浓度大于 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 植株株高和根长的生长受到抑制, 地上部鲜重和地下部鲜重均减少, 叶绿素含量降低, 丙二醛含量和细胞膜透性都显著增加。

关键词: Pb; 圆叶无心菜; 叶绿素; 丙二醛; 细胞膜透性

中图分类号: Q945.78 文献标识码: A 文章编号: 1672-2043(2010)增刊-0015-05

Effects of Pb on the Growth and Physiological Characteristics of *Arenaria rotundifolia* Bieberstein

MIN Huan, ZU Yan-qun, LI Yuan

(College of Resources and Environment, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China)

Abstract: Water culture experiments were conducted in order to understand the effects of lead on the growth, chlorophyll contents, melondialdehyde (MDA) contents and permeability of cell membrane (CMP). The results showed that the plant was strongly inhibited with increases in Pb concentrations and the chlorophyll content increased with low Pb concentration, then decreased with increase in Pb concentration. Melondialdehyde (MDA) contents and permeability of cell membrane (CMP) were increased. With treatment Pb = $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, the height, root length, biomass and chlorophyll contents increased but MDA and CMP kept stable. With treatment Pb > $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, the plant was short. The biomasses of shoot and root in fresh matter decreased. Chlorophyll contents decreased and MDA and CMP increased.

Keywords: lead; *Arenaria rotundifolia* Bieberstein; chlorophyll; melondialdehyde; permeability of cell membrane

随着工业、城市污染的加剧和农用化学物质种类、数量的增加, 土壤重金属污染日益严重, 污染程度加剧, 污染面积逐年扩大。铅是重金属污染的主要元素之一, 它可随着汽车排放的废气及城市污水而污染空气和土壤。铅沉积在土壤中, 积累到一定限度就会对植物产生毒害^[1], Pb 进入植物体内后, 不仅严重影响到作物的生长发育、品质及产量, 还可通过食物链

富集放大, 危及人类健康^[2]。通过食物摄取的铅量在人体铅总暴露量中所占的比例逐渐升高^[3]。

关于 Pb 对植物的生理影响目前已有部分研究报道^[4], 当铅进入植物体后, 会造成根系伤害, 使根系活力下降, 破坏叶肉中叶绿素结构与功能, 抑制植物的光合作用而导致植物生物量下降^[5-8]。不同铅浓度可诱导细胞膜透性增大, 随着 Pb 浓度的增加, 丙二醛含量也逐渐增加^[2,9-11]。圆叶无心菜在铅锌矿区有较强的生命力, 作为 Pb 的超累积植物对 Pb 具有一定的耐性能力和抗性^[12-13]。因此, 了解铅对圆叶无心菜生长和生理的影响可以为重金属污染区的治理提供依据。本文研究了不同浓度 Pb 对圆叶无心菜生长、叶绿素含量、丙二醛和细胞膜透性的影响, 旨在了

收稿日期: 2009-09-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(30560034); 云南省学术带头人后备人才项目(2006 PY01-34)

作者简介: 闵 焕 (1985—), 女, 陕西高陵人, 在读硕士, 主要从事土壤污染和环境生态学研究。

通讯作者: 祖艳群 E-mail: zuyanqun@yahoo.com.cn

解 Pb 对超累积植物圆叶无心菜的生长和生理特征的影响及圆叶无心菜对 Pb 的耐性特征,为进一步探求圆叶无心菜对 Pb 的累积机理提供依据。

1 实料与方法

1.1 实验材料

圆叶无心菜(*Arenaria rotundifolia* Bieberstein)别名圆叶蚤缀,石竹目石竹科,无心菜属,二年生或多年生草本,主要生长于海拔 2 300~3 600 m 的地方,高 10~30 cm。花期在每年 4—5 月,果期 6—7 月。

1.2 水培实验

本实验采用的圆叶无心菜种子采自云南会泽 Pb/Zn 矿区,用基质漂浮育苗长至 5~7 cm 时移栽至塑料盆中的塑料板上。盆内营养液按照 Hoagland 营养液配方配制^[14],每 4 d 换一次营养液,连续不断充气,自然光照,温度为 15~23 ℃,Pb[Pb(CH₃COO)₂·3H₂O]处理浓度为 0、50、100、200 mg·L⁻¹,3 次重复,分别于培养 10、20 和 30 d 时采样,测定生长指标和生理指标。

1.3 测定方法

生长指标的测定:株高、根长、地上部鲜重和地下部鲜重采用常规方法。

叶绿素测定:将植株样品磨碎,采用乙醇浸提法,分别在 665、649 和 470 nm 处测定滤液的吸光度^[14]。

丙二醛(MDA)含量测定:将植株样品磨碎,加入 0.5% 硫代巴比妥酸提取液,在 95 ℃水浴 20 min 后迅速冷却,离心 10 min,在 532 和 600 nm 处测定上清液吸光度^[14]。

细胞膜透性测定:采用电导仪法,用雷磁 DSS-II 型电导仪测定圆叶无心菜叶片细胞外渗液的电导值,以相对电导率表示细胞膜的透性:相对电导率 = 正常情况下电导率/煮沸后的电导率 × 100%^[14]。

1.4 统计方法

用 DPS 数据处理软件进行 $P < 0.05$ 水平上的显

著性检验,用 SPASS 软件进行相关性分析。

2 结果

2.1 Pb 处理对圆叶无心菜株高、根长和生物量的影响

随着铅处理浓度的增加,圆叶无心菜株高和根长均呈先上升后下降的变化趋势(表 1)。铅浓度为 50 mg·L⁻¹时圆叶无心菜的株高和对照相比显著升高,另外两个处理水平下的株高均比对照显著降低。而随着时间的推移,圆叶无心菜株高呈增加的趋势。铅浓度为 100 和 200 mg·L⁻¹时生长受到抑制,在处理 30 d 时,株高随浓度的变化从 30.5 cm 下降到 21.2 cm。

圆叶无心菜根长则随时间的变化在低浓度下呈增加的趋势,高浓度下呈递减的趋势。特别是在铅浓度为 200 mg·L⁻¹时与对照相比显著下降,在不同时期分别比同期对照减少了 27.2%、33.8% 和 37.9%。

不同铅浓度处理对圆叶无心菜生物量影响也不同(表 1)。当处理浓度为 50 mg·L⁻¹时,圆叶无心菜生物量增加,而且地上部和地下部鲜重分别增加 32% 和 22.2%。铅浓度为 100 和 200 mg·L⁻¹时,圆叶无心菜生物量均比对照低,地上部减少幅度为 8%~66%,地下部减少幅度为 11.1%~55.6%,铅对地上部的影响要大于地下部。

2.2 Pb 处理对圆叶无心菜叶绿素含量的影响

不同铅处理对圆叶无心菜叶绿素总含量,叶绿素 a,叶绿素 b 和叶绿素 a/b 比值的影响均不同(表 2)。圆叶无心菜叶绿素总量随着铅浓度的增加明显下降,特别是处理 30 d,随着 Pb 浓度由 0 增加到 200 mg·L⁻¹,叶绿素总量由 0.62 mg·g⁻¹显著下降到 0.51 mg·g⁻¹。随时间的变化,铅浓度为 50 mg·L⁻¹时,叶绿素总量与对照相比没有显著性差异,铅处理为 100 和 200 mg·L⁻¹时,圆叶无心菜叶绿素总量与对照相比显著降低。

表 1 Pb 对圆叶无心菜生长的影响

Table 1 Effect of Pb on plant growth of *Arenaria rotundifolia* Bieberstein

铅浓度/ mg·L ⁻¹	株高/cm			根长/cm			地上部鲜重/ g·10 株 ⁻¹	地下部鲜重/ g·10 株 ⁻¹
	10 d	20 d	30 d	10 d	20 d	30 d		
0	20.6 ± 1.7a	24.5 ± 1.5b	27.5 ± 1.1b	6.7 ± 0.9a	7.1 ± 1.4ab	7.3 ± 0.9a	5.0	0.9
50	21.7 ± 3.29a	27.5 ± 1.9a	30.5 ± 2.1a	6.5 ± 1.1a	7.7 ± 0.9a	8.0 ± 0.7a	6.6	1.1
100	19.7 ± 1.4a	22.9 ± 0.6b	24.5 ± 0.2c	6.1 ± 0.5ab	6.5 ± 0.6b	6.0 ± 0.5b	3.6	0.8
200	16.9 ± 3.5a	18.4 ± 0.8c	21.2 ± 1.5d	4.9 ± 0.4b	4.7 ± 0.5c	4.5 ± 0.5c	1.7	0.4

表2 Pb对圆叶无心菜叶绿素含量的影响

Table 2 Effect of Pb on chlorophyll content of *Arenaria rotundifolia* Bieberstein

时间/d	铅浓度/ $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$	总量/ $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$	叶绿素 a/ $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$	叶绿素 b/ $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$	叶绿素 a/b 比值
10	0	$0.61 \pm 0.03\text{b}$	$0.45 \pm 0.01\text{ab}$	$0.16 \pm 0.03\text{b}$	$2.58 \pm 0.10\text{a}$
	50	$0.67 \pm 0.01\text{a}$	$0.44 \pm 0.03\text{b}$	$0.22 \pm 0.02\text{a}$	$2.16 \pm 0.16\text{b}$
	100	$0.67 \pm 0.01\text{a}$	$0.48 \pm 0.01\text{a}$	$0.20 \pm 0.01\text{a}$	$2.43 \pm 0.12\text{a}$
	200	$0.57 \pm 0.02\text{c}$	$0.46 \pm 0.01\text{b}$	$0.12 \pm 0.01\text{c}$	$2.42 \pm 0.09\text{a}$
20	0	$0.51 \pm 0.04\text{a}$	$0.36 \pm 0.02\text{b}$	$0.16 \pm 0.03\text{a}$	$2.78 \pm 0.06\text{a}$
	50	$0.55 \pm 0.01\text{a}$	$0.40 \pm 0.01\text{a}$	$0.16 \pm 0.01\text{a}$	$2.56 \pm 0.08\text{bc}$
	100	$0.45 \pm 0.01\text{b}$	$0.34 \pm 0.01\text{b}$	$0.11 \pm 0.01\text{b}$	$2.68 \pm 0.09\text{b}$
	200	$0.44 \pm 0.01\text{b}$	$0.32 \pm 0.01\text{c}$	$0.13 \pm 0.01\text{ab}$	$2.38 \pm 0.16\text{c}$
30	0	$0.62 \pm 0.02\text{a}$	$0.42 \pm 0.01\text{b}$	$0.20 \pm 0.01\text{a}$	$2.08 \pm 0.03\text{b}$
	50	$0.62 \pm 0.02\text{a}$	$0.46 \pm 0.01\text{a}$	$0.18 \pm 0.03\text{b}$	$2.79 \pm 0.41\text{a}$
	100	$0.57 \pm 0.02\text{b}$	$0.39 \pm 0.02\text{b}$	$0.17 \pm 0.01\text{b}$	$2.39 \pm 0.17\text{ab}$
	200	$0.51 \pm 0.02\text{c}$	$0.35 \pm 0.02\text{c}$	$0.17 \pm 0.01\text{b}$	$2.25 \pm 0.18\text{b}$

注:不同小写字母表示在 $P < 0.05$ 水平上差异显著水平。Note: The different small letters indicate significant difference at $P < 0.05$ level.

不同铅浓度处理对叶绿素 a 影响较大,随着浓度的升高,叶绿素 a 呈先上升后下降的变化趋势。铅浓度为 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时叶绿素 a 含量与对照相比有上升趋势,铅浓度为 100 和 $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,叶绿素 a 含量与对照相比显著降低。与叶绿素 a 相比,叶绿素 b 所受影响并不是很大。不同铅处理条件对叶绿素 b 含量与对照相比减少的幅度为 15% ~ 18%。

叶绿素 a/b 比值在 10 d 时变化不明显,20 d 时高浓度铅处理下显著降低,30 d 时铅处理浓度为 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的叶绿素 a/b 比值最高,但随着铅处理浓度增加反而下降。

2.3 Pb 处理对圆叶无心菜丙二醛含量的影响

MDA 含量随着 Pb 处理浓度升高显著增加(图 1),铅浓度为 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,MDA 含量与对照没有显著差异,铅浓度为 100 和 $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时 MDA 含量显著增加。与对照相比,在 30 d 时,圆叶无心菜 MDA 含量分别比对照增加了 25.1%、130.6% 和 177.9%。铅浓度为 $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,30 d 的 MDA 含量是 10 d 的 7 倍。且在不同时期丙二醛含量和 Pb 浓度呈显著正相关(10 d, $R^2 = 0.98$; 20 d, $R^2 = 0.935$; 30 d, $R^2 = 0.911$ 。 $P < 0.05$)。

2.4 Pb 处理对圆叶无心菜细胞膜透性的影响

随着铅处理浓度的升高,圆叶无心菜细胞膜透性显著升高(图 2)。在 30 d 时,圆叶无心菜细胞膜透性随着铅浓度的增加呈显著正相关, $R^2 = 0.965$, $F = 55.93$ ($y = 13.18 + 0.25x$, $n = 4$, $P < 0.05$)。且随着铅处理时间的延长,圆叶无心菜细胞膜透性不断上升。

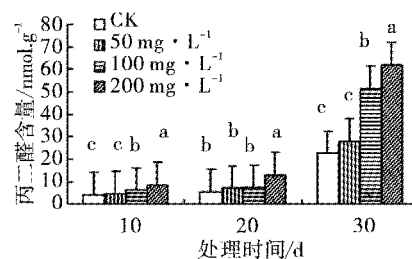


图1 Pb处理对圆叶无心菜丙二醛含量的影响

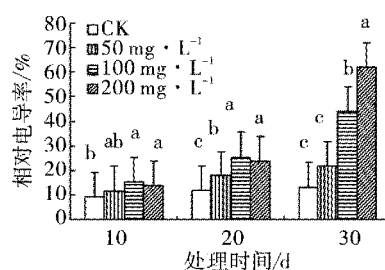
Figure 1 Effect of Pb on MDA content of *Arenaria rotundifolia* Bieberstein

图2 Pb对圆叶无心菜叶片细胞膜透性的影响

Figure 2 Effect of Pb on CMP of *Arenaria rotundifolia* Bieberstein

铅处理浓度为 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, CMP 在 10 d、20 d 和 30 d 时分别比对照增加了 48.9%、99.9% 和 364.8%。

3 讨论

通过比较不同浓度铅对圆叶无心菜的株高、根长、地上部鲜重和地下部鲜重的影响,可以看出,在浓度为 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,其值均呈上升的趋势,说明该浓

度铅能促进圆叶无心菜的生长,这与铅浓度为 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时促进灯芯草的生长是一致的^[7]。铅处理大于 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,圆叶无心菜的生长与对照相比显著减小,植株受到重金属的抑制,生长缓慢。重金属离子会导致植物组织、细胞失水,又可能阻碍植物体内水分的运输,从而影响植物的生长发育。

叶绿素是植物进行光合作用的色素,叶绿素含量在一定程度上反映光合作用水平,叶绿素代谢是一个动态平衡过程,而重金属胁迫打破这种平衡,造成叶绿素含量发生变化。在重金属 Pb 胁迫下,植物细胞色素系统遭到破坏,从而导致叶绿素含量降低。本结果表明,在不同浓度重金属 Pb 的胁迫下,圆叶无心菜的叶绿素总量随铅浓度增加而下降,在铅含量为 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理条件下,叶绿素含量最高,随着处理时间的延续,叶绿素含量开始下降。说明低浓度的 Pb 对圆叶无心菜的生长具有促进作用,这与张义贤(2004)采用 $50 \sim 200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Pb 处理研究结果相同,低浓度 Pb^{2+} 刺激小白菜叶绿素合成,高浓度 Pb^{2+} 才引起叶绿素含量降低^[10]。有研究表明,低浓度铅会促进叶绿素的生成^[15],Kaznina (2005)认为,其原因是低浓度的铅对植物具有刺激作用,而刺激作用的产生则可能与植物体新陈代谢的活化作用有关,其机理还有待于进一步研究^[16]。高浓度铅处理条件下,圆叶无心菜叶绿素总含量比对照显著下降,这可能是由于铅破坏了叶绿素的合成过程并影响了叶绿素酶的活性,或自由基攻击直接导致叶绿素微结构的破坏,从而降低叶绿素含量^[17]。叶绿素 a/b 比值是衡量叶片感受重金属的较敏感的一个生理指标^[9]。本实验中,叶绿素 a 和叶绿素 b 对外界重金属胁迫反应敏感程度不同,这可能是重金属首先破坏叶绿素 a 造成的。另外,叶绿素总量的减少与叶绿素 a/b 比值的下降并不完全同步,其中高浓度铅胁迫下叶绿素 a/b 比值在初期与对照相比并未表现出显著性差异,而是随着时间的推移,叶绿素 a/b 比值随着铅浓度的升高有下降的趋势。关于铅对叶绿素的影响,不同研究的结论不尽相同^[4,6],这可能与植物材料及其成熟度、铅处理浓度和栽培基质等有关^[18]。

相关性分析结果显示,叶绿素和株高、根长、地上部鲜重和地下部鲜重均呈显著正相关。叶绿素和株高的 $R^2 = 0.944^*$ ($P < 0.05$);叶绿素和根长的 $R^2 = 0.987^*$ ($P < 0.05$);叶绿素和地上部鲜重的 $R^2 = 0.94^*$ ($P < 0.05$);叶绿素和地下部的 $R^2 = 0.90^*$ ($P < 0.05$)。说明 Pb 对圆叶无心菜生长和叶绿素的

影响具有一定的相关性,叶绿素的变化能在一定程度上反应 Pb 对圆叶无心菜生长的影响。

在铅胁迫条件下,细胞原生质膜中的不饱和脂肪酸会发生过氧化作用产生丙二醛(MDA),丙二醛伤害脂膜系统,使其选择性被破坏,细胞内电解质外渗量增加,因而丙二醛含量反应膜脂过氧化作用的强弱,细胞膜透性(CMP)可表示膜受伤害或受损程度,其大小可以作为植物抗逆性的一个生理指标^[19]。圆叶无心菜细胞内 MDA 水平间接表明了植物体内的活性氧水平和细胞的受损程度。从实验结果可以看出,在铅处理为 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,MDA 含量和 CMP 与对照相比并没有显著性差异,铅处理为 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,MDA 含量和 CMP 与对照相比均显著上升,且铅浓度越大,MDA 含量和 CMP 越高。这与韩豫等(2007)^[21]和刘法彬等(2008)^[22]的研究结果一致。说明随铅胁迫浓度升高圆叶无心菜细胞膜脂过氧化作用加强,细胞膜遭到破坏,质膜透性会增大,细胞内部电解质外渗。根据相关性分析结果显示,在 30 d 时,丙二醛和细胞膜透性之间呈极显著正相关关系, $R^2 = 0.986^{**}$ ($y = -11.92 + 1.15x, P < 0.01$);叶绿素与丙二醛($R^2 = 0.943^*, P < 0.05$)和细胞膜透性之间均呈显著负相关($R^2 = 0.946^*, P < 0.05$)。这说明圆叶无心菜在高浓度铅处理下,已受到铅胁迫的影响造成膜脂过氧化损伤,从而导致叶绿体等膜质器官的解体,这也可能是导致叶绿素含量下降的一个原因^[20]。

4 结论

(1)圆叶无心菜株高、根长、地上部鲜重和地下部鲜重在低浓度铅处理下增加,在处理浓度 $\text{Pb} > 100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,显著降低。

(2)低浓度铅处理促进圆叶无心菜叶绿素的合成,高浓度铅处理抑制叶绿素的合成。Pb 对叶绿素 a 的影响较大,随铅浓度的升高,叶绿素 a 先上升后下降。叶绿素 b 对不同浓度铅处理的响应没有叶绿素 a 敏感。叶绿素 a/b 比值随铅处理浓度的升高有下降的趋势。

(3)随着铅处理时间的延续,MDA 含量和 CMP 不断增加,随着铅处理浓度的增加,圆叶无心菜 MDA 含量和 CMP 显著增加,且与铅浓度呈显著正相关。

参考文献:

[1] 庞 欣,王东红,彭 安. 铅胁迫对小麦幼苗抗氧化酶活性的影响

- [J]. 环境科学, 2001, 22(5): 108-111.
- PANG Xin, WANG Dong-hong, PENG An. Effect of lead on the activities of antioxidant enzymes in wheat seedlings[J]. *Environmental Science*, 2001, 22(5): 108-111.
- [2] 张义贤, 李晓科. 镉、铅及其复合污染对大麦幼苗部分生理指标的影响[J]. 植物研究, 2008, 28(1): 43-47.
- ZHANG Yi-xian, LI Xiao-ke. Effects of Cd, Pb and their combined pollution on physiological indexes in leaf of the *Hordeum vulgare* seedling[J]. *The Bulletin of Botanical Research*, 2008, 28(1): 43-47.
- [3] Zhang Z W, Qu J B, Xu G F, et al. Maize and foxtail millet as substantial sources of dietary lead intake[J]. *The Science of the Total Environment*, 1997, 208(1-2): 81-88.
- [4] 王艳, 鄂巍, 吴丹. 铜、铅污染对剪股颖和高羊茅生理的影响[J]. 沈阳师范大学学报, 2005, 23(1): 74-77.
- Wang Yan, E Wei, WU Dan. Effect of Cu and Pb pollution on physiological indexes of *Agrostis stolonifera* and *Festuca arundinaceae*[J]. *Journal of Shenyang Normal University(Natural Science)*, 2005, 23(1): 74-77.
- [5] 谷绪环, 金春文, 王永章, 等. 重金属 Pb 与 Cd 对苹果幼苗叶绿素含量和光合特性的影响[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(24): 10328-10331.
- GU Xu-huan, JIN Chun-wen, WANG Yong-zhang, et al. Effects of heavy metal Pb and Cd on chlorophyll contents and photosynthetic characteristics in different apple seedlings[J]. *Journal of Anhui Agri Sci*, 2008, 36(24): 10328-10331.
- [6] 王慧忠, 何翠屏, 赵楠. 铅对草坪植物生物量与叶绿素水平的影响[J]. 草业科学, 2003, 20(6): 73-75.
- WANG Hui-zhong, HE Cui-ping, ZHAO Nan. Effect of lead on turf-grass biomass and chlorophyll level[J]. *Pratacultural Science*, 2003, 20(6): 73-75.
- [7] 孙健, 铁柏清, 钱湛, 等. 单一重金属胁迫对灯心草生长及生理生化指标的影响[J]. 土壤通报, 2007, 38(1): 121-126.
- SUN Jian, TIE Bo-qing, QIAN Zhan, et al. Effects of Cu, Cd, Pb, Zn and As single stress on the growth and physiological and biochemical characteristics of *Juncus Effuse*[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2007, 38(1): 121-126.
- [8] 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, 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 *Capsicum Annuum*[J]. *Journal of Shandong Agricultural University(Natural Science)*, 2005, 36(1): 107-112.
- [9] 刘法彬, 孙永林. 铅污染对黄瓜种子萌发及叶片生理指标的影响[J]. 化学与工程, 2008, 25(10): 60-63.
- LIU Fa-bin, SUN Yong-lin. Effects of lead pollution on seed germination and physiological indexes in leaves of cucumber[J]. *Chemistry and Bioengineering*, 2008, 25(10): 60-63.
- [10] 张义贤, 张丽萍. 重金属对大麦幼苗膜脂过氧化及脯氨酸和可溶性糖含量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(4): 857-860.
- ZHANG Yi-xian, ZHANG Li-ping. Effects of heavy metals on membrane lipid peroxidation, proline and soluble sugar in roots of *Hordeum vulgare*[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(4): 857-860.
- [11] 陶毅明, 陈燕珍, 梁杨琳, 等. 铅对红树植物木榄幼苗几种生理特性的影响[J]. 植物生理学通讯, 2007, 46(6): 1119-1121.
- TAO Yi-ming, CHEN Yan-zhen, LIANG Yang-lin, et al. Effect of lead on the physiological characteristics of plant growth-promoting bacteria on *bruguiera gymnorhiza* seedlings[J]. *Plant Physiology Communications*, 2007, 46(6): 1119-1121.
- [12] Zu Yan-qun, Li Yuan, Chen Jian-jun, et al. Hyperaccumulation of Pb, Zn and Cd in herbaceous grown on lead-zinc mining area in Yunnan, China[J]. *Environment International*, 2005, 31(5): 755-762.
- [13] Zu Yan-qun, Li Yuan, Christian Schwartz, et al. Accumulation of Pb, Cd, Cu and Zn in plants and hyperaccumulator choice in lanping lead-zinc mine area, China[J]. *Environment International*, 2004, 30: 567-576.
- [14] 叶尚红. 植物生理生化实验[M]. 昆明: 云南科技出版社, 2004: 98-102, 116-120, 150-152.
- YE Shang-hong. Plant physiology and biochemistry experiment[M]. Kunming: Yunnan Science and Technology Press, 2004: 98-102, 116-120, 150-152.
- [15] 刘鹏, 徐根娣, 姜雪梅, 等. 铝对大豆幼苗膜脂过氧化和体内保护系统的影响[J]. 农业环境科学学报, 2004, 23(1): 51-54.
- LIU Peng, XU Gen-di, JIANG Xue-mei, et al. Effects of aluminum on membrane lipid peroxidation and endogenous protective systems of soybean seedling[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2004, 23(1): 51-54.
- [16] Kazmina N M, Laidinen G F, Titov A F, et al. Effect of lead on the photosynthetic apparatus of annual grasses[J]. *Biology Bulletin of the Russian Academy of Sciences*, 2005, 32(2): 147-150.
- [17] Liang Peng, Pardee Arthur B. Differential display of eukaryotic messenger RNA by means of the polymerase chain reaction[J]. *Science*, 1992, 257(5072): 967-971.
- [18] 孙小霞. 高羊茅对铅胁迫的生理响应[J]. 河南科技大学学报, 2006, 27(6): 75-78.
- SUN Xiao-xia. Effect of progressive lead stress on the physiological indexes *Festuca arundinaceae*[J]. *Journal of Henan University of Science and Technology: Natural Science*, 2006, 27(6): 75-78.
- [19] 秦天才, 吴玉树, 王焕校. 镉、铅及其相互作用对小白菜生理生化特性的影响[J]. 生态学报, 1994, 14(1): 6-49.
- QIN Tian-cai, WU Yu-shu, WANG Huan-xiao. Effect of cadmium, lead and their interactions on the physiological and biochemical characteristics of *brassica chinensis*[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1994, 14(1): 46-49.
- [20] 何冰, 叶海波, 杨肖娥. 铅胁迫下不同生态型东南景天叶片抗氧化酶活性及叶绿素含量比较[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(3): 274-278.
- HE Bing, YE Mei-bo, YANG Xiao-e. Effects of Pb on chlorophyll contents and antioxidant enzyme activity in leaf for Pb-accumulating and non-accumulating ecotypes of *Sedum. Alfredii* (Hance)[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2003, 22(3): 274-278.
- [21] 韩豫, 曹莹, 王绍斌, 等. 铅胁迫对花生生理生化特性的影响[J]. 花生学报, 2007, 36(1): 24-27.
- HAN Yu, CAO Ying, WANG Shao-bin, et al. Effects of lead stress on the physiological and biochemical characteristics of peanut[J]. *Journal of Peanut Science*, 2007, 36(1): 24-27.
- [22] 刘法彬, 孙永林. 铅污染对黄瓜种子萌发及叶片生理指标的影响[J]. 化学与工程, 2008, 5(10): 60-63.
- LIU Fa-bin, SUN Yong-lin. Effects of lead pollution on seed germination and physiological indexes in leaves of cucumber[J]. *Chemistry and Bioengineering*, 2008, 5(10): 60-63.