

酸模叶蓼对重金属 Pb 胁迫的生理响应

吴晓薇¹, 裴红宾^{1*}, 张永清², 周进财¹, 高振峰¹, 连慧达¹

(1. 山西师范大学 生命科学学院, 山西 临汾 041004; 2. 山西师范大学 城市与环境科学学院, 山西 临汾 041004)

摘要: 采用水培法, 研究不同质量浓度[0 mg/L(对照)、200 mg/L、600 mg/L、800 mg/L]Pb 处理对酸模叶蓼叶片枯黄比例、叶绿素含量及各种抗氧化酶活性等生理生态指标的影响。结果表明: 随着 Pb 质量浓度的增加, 酸模叶蓼的叶片枯黄比例逐渐增加, 完全展开叶数逐渐减少, 植株生长受到显著抑制; 酸模叶蓼幼苗的生物量呈下降趋势; 酸模叶蓼叶片的丙二醛含量、相对电导率、超氧化物歧化酶活性均呈升高的趋势, 叶绿素 a、叶绿素 b 和总叶绿素含量表现为逐渐下降的趋势, 过氧化物酶活性则呈先升高后降低的趋势。在 3 种 Pb 浓度胁迫下, 15 d 内酸模叶蓼体内的 Pb 积累量分别达到 30.21、75.86、100.25 mg/kg; Pb 在酸模叶蓼根中以醋酸提取态、盐酸提取态为主, 而在茎、叶中则以盐酸提取态为主。酸模叶蓼对 Pb 具有一定的富集作用。

关键词: 酸模叶蓼; 重金属; Pb; 生理响应

中图分类号: Q945.79 文献标志码: A 文章编号: 1004-3268(2013)10-0105-06

Physiological Response of *Polygonum lapathifolium* L. to Pb Stress

WU Xiao-wei¹, PEI Hong-bin^{1*}, ZHANG Yong-qing², ZHOU Jin-cai¹,
GAO Zhen-feng¹, LIAN Hui-da¹

(1. College of Life Sciences, Shanxi Normal University, Linfen 041004, China;

2. College of Urban and Environmental Sciences, Shanxi Normal University, Linfen 041004, China)

Abstract: The solution culture method was conducted to study the ecological and physiological effect of different levels of lead concentrations (0, 200, 600, 800 mg/L) on yellow leaf ratio, chlorophyll contents and various antioxidant enzyme activities in *Polygonum lapathifolium* L.. The results demonstrated as follows: with Pb concentration increasing, the proportion of yellow leaves of *Polygonum lapathifolium* L. gradually increased, the number of complete expansion leaf gradually decreased, and the plant growth was significantly affected. Also, the seedlings biomass gradually decreased. Compared with the control, malondialdehyde, relative conductivity, the activities of superoxide dismutase of *Polygonum lapathifolium* L. gradually increased, and their chlorophyll contents showed gradually decreased, whereas the activities of peroxidase firstly increased and then decreased. Under the stress of the three different Pb concentration, the accumulations of Pb in *Polygonum lapathifolium* L. reached 30.21, 75.86 and 100.25 mg/kg within 15 days, respectively. The main chemical forms of Pb in the roots of *Polygonum lapathifolium* L. were acetate acid (HAc) extractable, and hydrochloric acid (HCl) extractable, while in stems and leaves they were HCl extractable. *Polygonum lapathifolium* L. showed some accumulation to Pb.

Key words: *Polygonum lapathifolium* L.; heavy metal; lead; physiological response

收稿日期: 2013-03-07

基金项目: 山西师范大学生命科学学院科学研究基金项目(SMYKZ-24)

作者简介: 吴晓薇(1988-), 女, 山西临汾人, 在读硕士研究生, 研究方向: 生理生态学。E-mail: wuxiaoweikuai@sohu.com

* 通讯作者: 裴红宾(1965-), 女, 山西运城人, 副教授, 主要从事植物生理生态方面的研究。E-mail: bbpei65110@163.com

随着经济的发展,土壤、水体 Pb 污染问题日趋严峻。Pb 是一种不可降解的环境污染物,在生态系统中迁移性强,生物毒性大,并可通过进入食物链在生物体内累积,进而影响生物体正常生理代谢活动,危害动物及人体健康,更为严重的是这种污染具有隐蔽性、长期性和不可逆性的特点^[1]。Pb 污染土壤、水体的治理已引起国内外的广泛重视。近年来,利用植物修复治理重金属污染成为研究的重点,许多 Pb 积累植物已被发现并深入研究,如羽叶鬼针草^[2]、芥菜^[3]、小鳞苔草^[4]、圆锥南芥^[5]、密毛白莲蒿^[6]等。但已发现的超积累植物普遍存在生长速度缓慢、生物量小的特点,限制了其在修复中的应用。酸模叶蓼(*Polygonum lapathifolium* L.)是蓼科(Polygonaceae)蓼属(*Polygonum*)1年生植物,具有生物量大、适应强、易繁殖、在陆地和水域都可成片分布等优点,既可以作为一种修复植物,应用在土壤和水体2种环境进行重金属污染的修复,也可以作为一种景观植物种植。土壤、水体中过量的重金属元素对植物产生胁迫,若这种胁迫超过植物自身的忍耐限度,就会对植物产生伤害,轻者影响植物生长,重者会导致植物死亡^[7]。目前将酸模叶蓼应用于Pb污染土壤的修复已有报道,而关于酸模叶蓼对重金属Pb的生理响应的研究还处于空白阶段,使得酸模叶蓼的应用缺乏理论依据。因此,为探明酸模叶蓼对Pb的响应机制,以水培的方法研究Pb对酸模叶蓼生长、生理生化特征的影响以及Pb在酸模叶蓼中的积累特征,以期筛选土壤和水体Pb污染治理的修复植物提供理论参考和依据。

1 材料和方法

1.1 植株培养

试验于2012年3—6月在山西师范大学试验地进行。水培试验前,先将野外采集到的酸模叶蓼种子播种于砂盆内,沙子先用2% HNO₃溶液浸泡过夜,然后用蒸馏水洗干净,每盆装沙500 g。2012年3月12日播种,待幼苗长出3片真叶(4月19日)后选长势一致的健康幼苗,用蒸馏水洗净根系,移栽至长35 cm、宽25 cm、高15 cm含2 L 1/2 Hoagland营养液的塑料盒中进行水培,培养过程中不间断地向营养液通气,待新根长出27 d后(5月6日)对幼苗进行Pb胁迫。

1.2 试验设计

处理液Pb质量浓度为0(对照)、200、600、800 mg/L, Pb由Pb(NO₃)₂(分析纯)提供,营养液为1/2 Hoagland营养液。营养液配制时扣除因加

Pb(NO₃)₂所增加的氮素。采用完全随机区组试验设计,每处理3盒(即重复3次),每盒培养酸模叶蓼6株。4 d换一次营养液,保持pH值在5.5~6.0,在温室自然光照下进行培养。培养过程中,不间断地向营养液通气。培养15 d后,对植株伤害症状进行分析。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 叶片枯黄比例的计算 将除全绿和仅叶尖枯黄外的完全展开叶定义为枯黄叶片,枯黄比例=枯黄叶数/完全展开叶数^[8]。

1.3.2 生理指标的测定 每处理随机取去除叶尖和叶基的完全展开功能叶片2 g,于冰箱4℃保存,测定各项生理指标^[9]。丙二醛(MDA)含量测定采用硫代巴比妥酸(TBA)法;质膜相对透性测定采用电导仪法;过氧化物酶(POD)活性测定采用愈创木酚法,超氧化物歧化酶(SOD)活性测定采用氮蓝四唑(NBT)法;叶绿素含量测定采用直接浸提法。

1.3.3 Pb含量及Pb结合形态的测定 每处理随机取样,根用10 mmol/L Na₂EDTA溶液浸泡15 min,螯合根系表面吸附的Pb离子。将根、茎、叶分开,去离子水洗净,滤纸吸干,105℃下杀青,85℃烘干至恒定质量。称质量后,取0.5 g放入马弗炉中510℃灰化12 h,室温冷却后用浓HNO₃消化,消化后用原子吸收光谱仪(novAA 400型,德国耶拿公司)测定根、茎、叶的Pb含量^[10]。

采用化学试剂逐步提取法提取酸模叶蓼中5种不同化学形态的Pb^[11]。5种提取剂分别为80%乙醇、去离子水、1 mol/L NaCl溶液、2%醋酸、0.6 mol/L盐酸,最后为残渣态。提取液经蒸发近干后,用4:1的硝酸-高氯酸消化,用10%的硝酸定容到10 mL,用原子吸收光谱仪测定溶液中的Pb含量。Pb积累量=Pb含量×样品干质量;转运系数=地上部Pb含量/地下部Pb含量。

1.4 数据分析

用Excel 2003处理试验数据,使用SPSS 17.0软件进行方差分析。

2 结果与分析

2.1 Pb胁迫对酸模叶蓼叶片枯黄程度的影响

由表1可知,随着Pb质量浓度的增加,酸模叶蓼叶片的枯黄比例显著升高。Pb质量浓度为200、600、800 mg/L时,叶片枯黄比例分别较对照提高了10.0、26.9、58.3个百分点。Pb质量浓度为200 mg/L时,酸模叶蓼幼苗长势较好;Pb质量浓度为800 mg/L时,一些酸模叶蓼老叶萎蔫。

表 1 Pb 胁迫对酸模叶蓼叶片枯黄程度的影响

Pb 质量浓度/ (mg/L)	枯黄叶数/片	完全展开 叶数/片	枯黄比例/%
0	1.3±0.6c	29.67±1.53a	4.5±1.7c
200	3.3±0.6c	23.00±2.65bc	14.5±1.8bc
600	7.7±1.5b	24.33±3.51b	31.4±2.5b
800	12±2.7a	19.33±1.53c	62.8±17.8a

注:同列不同字母表示差异显著($P<0.05$),下同。

2.2 Pb 胁迫对酸模叶蓼幼苗生物量的影响

如图 1 所示,酸模叶蓼幼苗的生物量在 Pb 胁迫下呈下降趋势。与对照相比,在 Pb 200 mg/L 处理下幼苗生物量差异不显著;在 Pb 600、800 mg/L 处理下生物量分别下降 42.35%、60.58%,差异均显著。可见,Pb 质量浓度为 600、800 mg/L 时酸模叶蓼受到了胁迫,生长受到抑制。

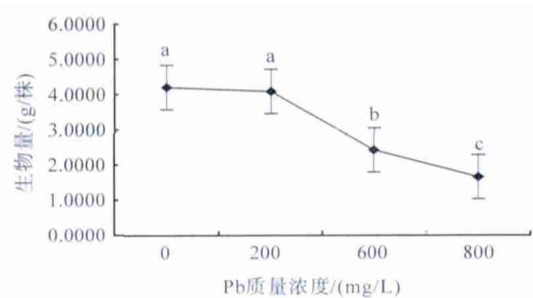


图 1 Pb 胁迫对酸模叶蓼幼苗生物量的影响

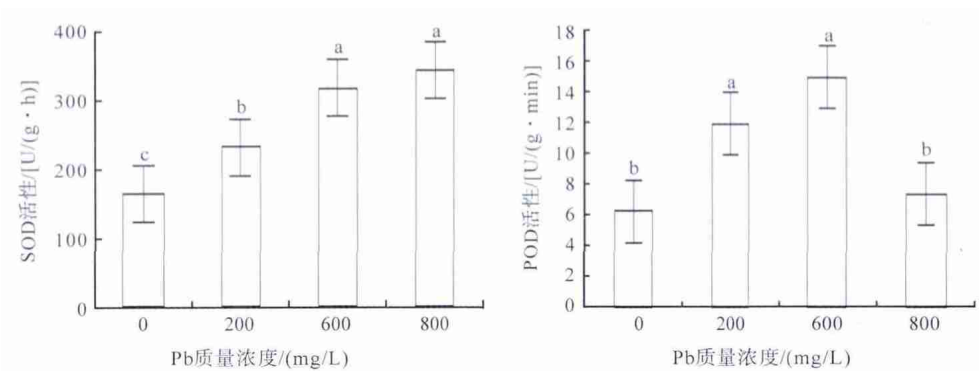


图 2 Pb 胁迫对酸模叶蓼叶片 SOD 和 POD 活性的影响

上升后下降的趋势,Pb 600 mg/L 时达到最高。在 Pb 800 mg/L 时,POD 活性有所下降,但仍高于对照,差异不显著。

由图 3 可知,随着 Pb 质量浓度的增加,酸模叶蓼叶片中叶绿素 a、叶绿素 b 和总叶绿素含量呈下降趋势,且与对照差异显著,Pb 质量浓度为 200、600、800 mg/L 时,叶绿素 a 分别较对照下降了 20.37%、38.46%、38.89%;叶绿素 b 分别较对照下降了 11.76%、23.53%、29.41%;总叶绿素含量分别较对照下降了 17.14%、25.71%、35.71%,且 Pb

2.3 Pb 胁迫对酸模叶蓼叶片细胞膜透性的影响

细胞质膜是植物逆境伤害的主要部位,质膜透性可以反映植物在逆境条件下的伤害程度^[12]。从表 2 可以看出,随着 Pb 质量浓度的增加,MDA 含量增加,说明伤害加重。Pb 质量浓度为 200、600、800 mg/L 时,MDA 含量分别较对照增加 29.90%、86.60%、114.09%;相对电导率与 MDA 的变化规律一致,相对电导率分别较对照提高了 3.73、8.70、15.12 个百分点,与甘蔗、晚松、玉米等植物受 Pb 胁迫相似^[13-15]。

表 2 Pb 胁迫对酸模叶蓼叶片细胞膜透性的影响

Pb 质量 浓度/(mg/L)	MDA 含量/ ($\mu\text{mol/g}$)	相对电导 率/%
0	2.91±0.12d	20.81±3.6c
200	3.78±0.37c	24.54±1.3bc
600	5.43±0.32b	29.51±2.6b
800	6.23±0.25a	35.93±5.0a

2.4 Pb 胁迫对酸模叶蓼叶片 SOD 和 POD 活性及叶绿素含量的影响

由图 2 可知,随着 Pb 质量浓度的增加,SOD 活性逐渐增强,且各处理间达到显著差异,Pb 质量浓度为 200、600、800 mg/L 时,SOD 活性分别较对照增加了 40.72%、93.21%、109%。POD 活性呈现先

对叶绿素 a 的影响大于对叶绿素 b 的影响。

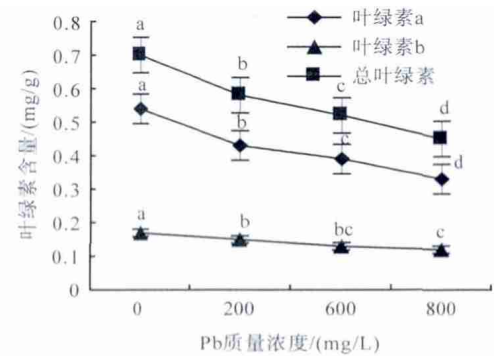


图 3 Pb 胁迫对酸模叶蓼叶片叶绿素含量的影响

2.5 Pb 胁迫对酸模叶蓼中 Pb 分布的影响

转运系数是地上部某元素质量分数与地下部该元素质量分数之比,用来评价植物将重金属从地下部向地上部的运输和富集能力。

由表 3 可知,随着 Pb 质量浓度的增加,植物各器官 Pb 含量明显增加,呈现根>叶>茎, Pb 800 mg/L 处理叶中的 Pb 含量比较少,可能由于 Pb 在根系主要以结合态的形式存在,在植物汁液中也有离子态和络合态 Pb,由于沉淀作用,植物根系所吸收的 Pb 向叶中运输困难^[2]。随着 Pb 质量浓度的增加,叶/根的转

运系数呈下降的趋势,说明 Pb 对酸模叶蓼叶片伤害表现比较明显,转移到叶中的 Pb 含量少;茎/根转运系数呈先下降后上升的趋势,Pb 800 mg/L 处理的茎/根转运系数大于对照,因为此时叶片枯黄比例达到了 62.8%,导致蒸腾拉力迅速减小,大量的 Pb 积累在茎中无法向上运输。在 3 种 Pb 浓度胁迫下,酸模叶蓼在 15 d 中对 Pb 的积累量分别达到 30.21、75.86、100.25 mg/kg,说明酸模叶蓼对 Pb 有一定的富集作用,可以作为重金属 Pb 的修复植物。对照中的 Pb 可能来自种子、蒸馏水和药品等。

表 3 Pb 胁迫后酸模叶蓼体内 Pb 的分布

Pb 质量 浓度/(mg/L)	Pb 含量/(mg/kg)			茎/根转运系数/%	叶/根转运系数/%
	根	茎	叶		
0	3.46±0.10d	0.82±0.08d	2.07±0.14d	23.71±2.6b	59.73±2.9a
200	18.80±0.30c	3.73±0.07c	7.68±0.10c	19.80±0.4bc	40.86±1.1b
600	48.83±0.90b	9.08±0.26b	17.95±0.37a	18.59±0.2c	36.76±0.8c
800	70.76±0.10a	20.20±0.90a	9.29±0.15b	28.55±1.0a	13.30±0d

2.6 Pb 胁迫对酸模叶蓼中 Pb 结合形态的影响

从表 4 可知,在 Pb 胁迫下,Pb 醋酸提取态、盐酸提取态和水提取态是酸模叶蓼根内 Pb 的主要化学形态,随着 Pb 质量浓度的增加,各形态 Pb 的绝对含量也增加,但各自所占的比重发生了变化。在 Pb 质量浓度为 200 mg/L 时,醋酸提取态和盐酸提取态所占比重升高,分别为 40.49%、40.76%;而水提取态所占比重大幅度下降,为 5.89%。在 Pb 质量浓度为 800 mg/L 时,水提取态和乙醇提取态的 Pb 比重下降,分别为 2.30%、5.12%;而氯化钠提取态所占比重升高,为 14.15%。

在酸模叶蓼的茎中,Pb 的化学形态主要是水提取态、乙醇提取态、盐酸提取态。随着 Pb 质量浓度增加,乙醇和水提取态的 Pb 比重逐渐下降,在 Pb 质量浓度为 800 mg/L 时,下降幅度最大,分别为 12.32%、3.19%;醋酸和盐酸提取态所占比重逐渐升高,在 Pb 质量浓度为 800 mg/L 时,升高幅度达到最大,分别为 16.42%、58.59%;残渣态所占比重也是逐渐升高。

酸模叶蓼叶片中的 Pb 以乙醇提取态、盐酸提取态和水提取态为主。随着 Pb 质量浓度的增加水提取态

所占比重下降,分别为 23.12%、19.82%、15.87%;乙醇提取态在 Pb 200 mg/L 处理下,所占比重升高,为 23.72%;而在 Pb 600、800 mg/L 处理下,所占 Pb 比重下降,分别为 19.82%、19.11%。氯化钠提取态在 Pb 200 mg/L 处理下,所占比重有所下降,为 4.20%;而在 Pb 600、800 mg/L 处理下,所占比重升高,分别为 14.48%、12.80%。残渣态所占比重逐渐升高。

在 Pb 质量浓度为 200 mg/L 时,乙醇提取态和水提取态转运系数比较大,茎/根的转移系数分别为 0.86、0.83,叶/根的转移系数分别为 0.87、1.18,其次是氯化钠提取态、残渣态、盐酸提取态,醋酸提取态的转运系数最低,茎/根、叶/根转运系数分别为 0.02、0.08;在 Pb 质量浓度为 600 mg/L 时,乙醇提取态和水提取态的转运系数比例大,茎/根的转移系数分别为 0.61、0.89,叶/根的转移系数分别为 0.64、1.32,同上,醋酸提取态的转运系数也是最低,茎/根、叶/根转运系数分别为 0.02、0.06;在 Pb 质量浓度为 800 mg/L 时,乙醇提取态和残渣态茎/根的转运系数比较大,分别为 0.89、1.78,而乙醇提取态和水提取态叶/根的转运系数比较大,分别为 0.41、0.76。

表 4 酸模叶蓼根、茎、叶各组织中各种化学提取态的 Pb 含量

mg/kg

器官	Pb 质量浓度/(mg/L)	F _E	F _W	F _{NaCl}	F _{HAc}	F _{HCl}	F _R
根	0	0.26±0.01d	0.49±0.02c	0.11±0.02d	0.50±0.02d	0.54±0.04b	0.07±0.04d
	200	0.91±0.04c	0.65±0.03b	0.25±0.02c	4.47±0.42c	4.50±0.70b	0.26±0.02c
	600	1.35±0.03b	0.66±0.02b	1.16±0.08b	6.33±0.29b	5.11±0.08b	0.47±0.01b
	800	2.74±0.06a	1.23±0.13a	7.57±1.19a	13.52±0.98a	27.87±5.06a	0.55±0.01a
茎	0	0.29±0.03c	0.26±0.03c	0.01±0.01d	0.01±0.01c	0.18±0.01d	0.02±0.01c
	200	0.78±0.03b	0.54±0.06b	0.05±0.01c	0.08±0.03b	0.62±0.06c	0.08±0.02bc
	600	0.83±0.07b	0.59±0.03ab	0.12±0.01b	0.12±0.03b	1.12±0.22b	0.11±0.04b
	800	2.43±0.03a	0.63±0.04a	0.89±0.02a	3.24±0.02a	11.56±0.20a	0.98±0.05ba

续表 4 酸模叶蓼根、茎、叶各组织中各种化学提取态的 Pb 含量

mg/kg

器官	Pb 质量浓度/(mg/L)	F _E	F _W	F _{NaCl}	F _{HAc}	F _{HCl}	F _R
叶	0	0.32±0.02d	0.48±0.04c	0.09±0.02c	0.03±0.01c	0.53±0.02d	0.03±0.03b
	200	0.79±0.03c	0.77±0.04b	0.14±0.01c	0.36±0.13b	1.19±0.04c	0.08±0.02b
	600	0.87±0.01b	0.87±0.06a	0.46±0.04b	0.37±0.03b	1.69±0.09b	0.13±0.01ab
	800	1.12±0.01a	0.93±0.06a	0.75±0.10a	0.89±0.13a	1.95±0.14a	0.22±0.11a

注:F_E表示80%乙醇提取态,F_W表示去离子水提取态,F_{NaCl}表示1 mol/L氯化钠提取态,F_{HAc}表示2%醋酸提取态,F_{HCl}表示0.6 mol/L盐酸提取态,F_R表示残渣态。

3 结论与讨论

根据枯黄比例和生物量测定观察得出:Pb质量浓度在200 mg/L时,酸模叶蓼幼苗能够正常生长,枯黄比例与对照差异不显著,生物量下降幅度小;而Pb质量浓度在800 mg/L时,枯黄比例与对照差异显著,生物量下降幅度达到最大;Pb质量浓度在600 mg/L时,酸模叶蓼能够存活,说明该植物对Pb具有一定耐性,因而可用于重金属Pb污染的修复。

MDA是膜脂过氧化产物之一,其含量高低能反映膜脂过氧化程度的强弱,间接地反映膜系统受损程度以及植物的抗逆性^[9]。随着Pb胁迫程度的加剧,植物受伤害程度增加,细胞电解质的外渗量增加,MDA含量也随之增加^[16]。本研究结果表明,MDA含量随着Pb质量浓度的增加而升高,相对电导率与MDA的变化趋势一致,说明酸模叶蓼叶肉细胞内活性氧水平和膜脂过氧化程度加深。

随着Pb质量浓度的增加,酸模叶蓼SOD活性逐渐增加,当重金属胁迫导致活性氧增加时,SOD的合成表达增强。在重金属胁迫下,植物体内所具有的活性氧清除酶系统和具抗性特征的生理活动因被诱导而加快,SOD活性逐渐增加^[17]。POD活性是先升高后降低,POD活性的升高是植物抵抗环境胁迫的一个适应反应,一定浓度下Pb胁迫能诱导植物组织中POD活性升高,这是植物对所有污染胁迫的共同响应^[18]。但随着Pb质量浓度的增加,在Pb800 mg/L胁迫下植物体内的酶系统遭到破坏,代谢趋于紊乱,抑制抗氧化酶基因的表达,导致POD活性下降,这一结果与沙翠芸等^[19]、王连芳等^[20]的研究结果一致。

酸模叶蓼叶片中叶绿素a、叶绿素b、总叶绿素均随着Pb胁迫的增加而降低,与甘蔗^[13]、晚松^[14]等植物相同,但不同于高羊茅叶片中叶绿素的含量,它是随着土壤中Pb质量浓度的升高呈先升高后降低的趋势^[21]。研究发现叶绿素含量降低与其生物合成途径中所需的酶受重金属破坏有关,原因是叶绿素合成酶如原叶绿素酸酯还原酶、胆色素原脱氨酶的肽链中富含巯基的部分受重金属影响而改变其正常的构型,使得酶活性受到抑制,进而影响叶绿素合成^[22]。

在Pb胁迫下,进入酸模叶蓼体内的绝大部分Pb被富集在根部,而迁移至其他部位较少,这与Ye等^[23]研究的结果一致,叶中和^[10]的研究也证实这一结果。

本研究中,3种Pb浓度胁迫下酸模叶蓼15 d内对Pb的积累量分别达到30.21、75.86、100.25 mg/kg;Pb不同结合态在根中均以醋酸提取态、盐酸提取态和乙醇提取态为主要形态;在茎中,Pb200、600 mg/L处理下均以盐酸提取态和乙醇提取态Pb含量最高,而高质量浓度Pb(800 mg/L)下,则以盐酸提取态和醋酸提取态Pb含量最高;在叶中,均以盐酸提取态Pb含量最高,其次为乙醇提取态和水提取态。研究表明,酸模叶蓼对比较难以转运的盐酸结合态Pb转运能力强,可把Pb以盐酸形态区域化在地上部分,进而降低毒性,而关于Pb在酸模叶蓼细胞水平的分布有待于进一步研究。

参考文献:

- [1] 毛海立,王震,龙成梅. 重金属铅超富集植物的研究进展[J]. 黔南民族师范学院学报,2011(3):50-54.
- [2] 刘秀梅,聂俊华,王庆仁. 6种植物对Pb的吸收与耐性研究[J]. 植物生态学报,2002,26(5):533-537.
- [3] 柯文山,陈建军,黄邦全. 十字花科芸薹属5种植物对铅的吸收和富集[J]. 湖北大学学报,2004,26(3):236-238.
- [4] 胡宗达,杨远祥,朱雪梅,等. Pb、Zn对超富集植物(小鳞苔草)抗氧化酶活性的影响[J]. 水土保持学报,2007,21(6):86-91.
- [5] 汤叶涛,仇荣亮,曾晓雯,等. 一种新的多金属超富集植物——圆锥南芥[J]. 中山大学学报,2005,44(4):135-136.
- [6] 罗于洋,赵磊,王树森. 铅超富集植物密毛白莲蒿对铅的富集特性研究[J]. 西北林学院学报,2010,25(5):37-40.
- [7] 杨刚,伍钧,唐亚. 铅胁迫下植物抗性机制的研究进展[J]. 生态学杂志,2005,24(12):1507-1512.
- [8] 刘俊祥,孙振元,巨关升,等. 结缕草对重金属镉的生理响应[J]. 生态学报,2011,31(20):6149-6156.
- [9] 高俊凤. 植物生理学实验指导[M]. 北京:科学出版社,2006.
- [10] 叶中和. 紫花苜蓿对铅污染土壤修复能力及其机理的研究[J]. 土壤与环境,2002,11(4):331-334.

(下转第141页)

- 144.
- [19] 高文伟,任家琰. 实验性免疫应激对雏鸡体液免疫功能的影响[J]. 山西农业科学, 2001, 29(3): 80-84.
- [20] 徐彤,高文伟,任家琰,等. 实验性免疫应激对雏鸡血液激素与免疫功能的影响[J]. 华北农学报, 2002, 17(1): 114-118.
- [21] Takahashi K, Mashiko T, Akiba Y. Effect of dietary concentration of xylitol on growth in male broiler chicks during immunological stress[J]. Poult Sci, 2000, 79(5): 743-747.
- [22] Swamy H V L N, Smith T K, Karrow N A, *et al.* Effects of feeding blends of grains naturally contaminated with fusarium mycotoxins on growth and immunological parameters of broiler chickens[J]. Poult Sci, 2004, 83(4): 533-543.
- [23] Lin H, Sui S J, Jiao H C, *et al.* Effects of diet and stress mimicked by corticosterone administration on early postmortem muscle metabolism of broiler chickens[J]. Poultry Science, 2007, 86(3): 545-554.
- [24] 胡晓飞, 吴于明. 皮质酮应激对肉仔鸡生产性能及血液指标的影响[J]. 中国畜牧杂志, 2010, 46(15): 48-51.
- [25] Yahav S. Relative humidity at moderate ambient temperatures; Its effect on male broiler chickens and turkeys[J]. British Poultry Science, 2000, 41(1): 94-100.
- [26] 刘凤华, 谢仲权, 孙朝龙, 等. 高温对蛋鸡血液理化指标及生产性能的影响[J]. 中国畜牧杂志, 1997, 33(5): 23-25.
- [27] Mitchell M A, Sandercock D A. Possible mechanisms of heat stress induced myopathy in the domestic fowl[J]. Journal of Physiology and Biochemistry, 1997, 53(1): 75.
- [28] Mitchell M A, Carlisle A J. The effect of chronic exposure to elevated environmental temperature on intestinal morphology and nutrient absorption in the domestic fowl (*Gallus domesticus*) [J]. Comp Biochem Physiol, 1992, 101(1): 137-142.
- [29] Sandercock D A, Hunter R R, Nute G R, *et al.* Acute heat stress-induced alterations in blood acid-base status and skeletal muscle membrane integrity in broiler chickens at two ages: Implications for meat quality [J]. Poultry Science, 2001, 80(4): 418-425.

~~~~~

(上接第 109 页)

- [11] 许嘉琳, 鲍子平, 杨居荣, 等. 农作物体内铅、镉、铜的化学形态研究[J]. 应用生态学报, 1991, 2(3): 244-248.
- [12] 孙文越, 王辉, 黄久常. 外源甜菜碱对干旱胁迫下小麦幼苗膜脂过氧化作用的影响[J]. 西北植物学报, 2001, 21(3): 487-491.
- [13] 程文伟, 夏会龙. 甘蔗对铅递进的生理响应[J]. 作物杂志, 2008(4): 30-33.
- [14] 黄桂萍, 刘苑秋, 程磊. 土壤铅污染对晚松生理特征的影响[J]. 江西农业大学学报, 2006, 2(6): 833-837.
- [15] 曹莹, 黄瑞冬, 曹志强. 铅胁迫对玉米生理生化特征的影响[J]. 玉米科学, 2005, 13(3): 61-64.
- [16] 孙永林. 铅对黄瓜叶片丙二醛、脯氨酸和可溶性总糖含量的影响[J]. 长江蔬菜, 2008, 12(4): 28-30.
- [17] 黄华刚, 李廷轩, 杨肖娥. 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.
- [18] Malecka A, Jarmuszkiewicz W, Tomaszewska B. Antioxidative defense to lead stress in subcellular compartments of pea root cells[J]. Acta Biochimica Polonica, 2001, 48(3): 687-698.
- [19] 沙翠芸, 孟庆瑞, 王静, 等. 两种彩叶植物对铅胁迫的生理响应[J]. 西北林学院学报, 2011, 26(4): 36-40.
- [20] 王连芳, 徐学华, 李玉灵, 等. 铅胁迫对六种绿化树种叶片生理生化特性的影响[J]. 河北农业大学学报, 2009, 32(2): 30-33.
- [21] 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.
- [22] 刘拥海, 俞乐, 陈亦斌, 等. 不同荞麦品种对铅胁迫的耐性差异[J]. 生态学杂志, 2006, 25(11): 1344-1347.
- [23] Ye Z H, Baker A J M, Wong M H, *et al.* Zinc, lead and cadmium tolerance, uptake and accumulation by the common reed, *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steudel[J]. Annals of Botany, 1997, 80(3): 363-370.