

日本槲木对重金属复合胁迫的生理生化响应

李德生, 彭玲, 张森, 孟丽, 茹丽叶

(天津理工大学 环境科学与安全工程学院, 天津 300384)

摘要:以日本槲木为试材,设置镉(Cd)(1、5、20、50 mg/kg)、铅(Pb)(100、500、1 000、1 500 mg/kg)、锌(Zn)(100、500、1 000、1 500 mg/kg)单一及复合胁迫共 8 个处理组,通过盆栽试验,研究了土壤中镉、铅、锌对日本槲木叶片中可溶性蛋白质、可溶性糖含量、抗氧化保护酶活性及膜脂质过氧化作用的影响。结果表明: Cd+Zn 和 Pb+Zn 胁迫下可溶性蛋白质随重金属浓度增大而降低,其余胁迫均先升高后降低; Zn 胁迫下可溶性糖含量均随处理浓度增大而升高,其余胁迫下则先升高后降低; 单一胁迫下 MDA 含量均随处理浓度增大先降低后升高; CAT 活性在单一胁迫下随处理浓度增大而增强,复合胁迫下则先增强后减弱; 单一胁迫下 POD 活性均随处理浓度的升高而降低,除 Cd+Pb 外,其余复合胁迫组均随处理浓度升高而显著降低。

关键词: 槲木; 复合胁迫; 丙二醛(MDA); 过氧化氢酶(CAT); 过氧化物酶(POD)

中图分类号: S 567.1⁺9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-0009(2015)15-0001-06

重金属具有不能被微生物降解、难被植物吸收利用和在土壤中难以移动等特征,重金属在污染土壤中化学行为的研究受到了国内外学者的重视。其中镉(Cd)、铅(Pb)、锌(Zn)是常见的导致土壤污染的重金属^[1]。Cd 污染使植物出现生长迟缓、植株矮小、褪绿、产量下降等症状^[2], Pb 会导致土壤的正常功能失调、质量下降,而且会对植物产生毒害,最终影响植物品质与生物量^[3]。锌是植物必需的微量元素之一,具有重要的生理功能和营养作用,缺 Zn 会引起植物的生理病害,但过量 Zn 会对植物产生毒性^[4]。目前,重金属污染对植物影响的研究主要集中在单个重金属胁迫上,对重金属复合胁迫的研究较少,但在自然环境中植物常受多种重金属共同胁迫,重金属复合污染有其不同于单一污染的特点,毒性机理与解毒机理更为复杂,复合污染对植物的毒理效应以及污染的控制途径逐渐成为研究热点,但目前镉铅锌复合污染对木本蔬菜影响的研究还少有报道。

日本槲木(*Aralia elata* var. *inermis*)属五加科槲木属落叶小乔木,是兼食用、药用、保健为一体的天然木本蔬菜。试验采用盆栽法,探讨镉铅锌单一及复合胁迫下

日本槲木活性氧清除系统中保护酶活性的变化和膜脂质过氧化作用的影响以及叶片中可溶性蛋白质和可溶性糖含量的变化,以研究日本槲木对重金属复合胁迫可能的响应机制,旨在为揭示重金属复合胁迫机理、控制土壤重金属污染和保障农产品安全生产提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试日本槲木取自天津市宝坻区青龙湾苗圃场,挑选大小基本一致 2 年生日本槲木苗木,通过修剪后栽植,保留茎长度 15 cm,根长度 10 cm。选用天津理工大学校园土壤作为栽培基质,营养土购自河北省兴农生物工程开发有限公司;校园土与营养土比例为 20:1(质量比),花盆尺寸 30 cm(径)×20 cm(高),每盆装土 5.5 kg,供试土壤理化性质见表 1。

1.2 试验方法

试验在天津理工大学的人工气候室内进行,采用盆栽试验,每盆种植 1 株苗木,共 8 个处理组,每处理组 3 个重复。于 2013 年 12 月 5 日栽植并置于人工气候室中,人工气候室温度(20±2)℃、光照 12 h/12h(光照/黑暗),光照强度 1 400 lx,平衡 14 d 后,将 Cd(CdCl₂·2.5H₂O,分析纯)、Pb(Pb(NO₃)₂,分析纯)、Zn(ZnSO₄·7H₂O,分析纯)以溶液形式加入土壤中。重金属处理方式分为:单一重金属胁迫(编号为 S)、2 种重金属复合胁迫(编号为 D)、3 种重金属复合胁迫(编号为 T),每种处理方式设 4 个浓度梯度,另设对照组(CK)。重金属复合污染处理浓度见表 2。

第一作者简介:李德生(1964-),男,博士,教授,现主要从事植物生理生态和环境生态学等研究工作。E-mail: deshli@tjut.edu.cn.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41303057);天津市科技支撑计划重点资助项目(12ZCZDNC00400);天津市农业科技成果转化与推广资助项目(0801160)。

收稿日期:2015-05-18

表 1

供试土壤理化性质

Table 1

The physical and chemical properties of the tested soil

项目 Item	pH 值 pH value	有机质含量 Organic content /(g · kg ⁻¹)	总氮含量 Total nitrogen content /(g · kg ⁻¹)	总磷含量 Total phosphorus content /(g · kg ⁻¹)	总钾含量 Total potassium content /(g · kg ⁻¹)	Cd 含量 Cd content /(mg · kg ⁻¹)	Pb 含量 Pb content /(mg · kg ⁻¹)	Zn 含量 Zn content /(mg · kg ⁻¹)
含量 Content	7.81	11.25	8.85	2.07	0.72	0	9.16	58.29

表 2 重金属复合污染设计方案

Table 2 Design of combined pollution of heavy metals

处理 Treatment	重金属添加量 Heavy metals added ratio/(mg · kg ⁻¹)	Cd	Pb	Zn
CK	0	0	0	0
1	1	100	100	100
2	5	500	500	500
3	20	1 000	1 000	1 000
4	50	1 500	1 500	1 500

1.3 项目测定

可溶性蛋白质含量采用考马斯亮蓝 G-250 法测定^[5],可溶性糖含量采用蒽酮比色法测定^[6],丙二醛(MDA)含量采用硫代巴比妥酸法测定^[7],过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)活性参照植物生理学实验技术的相关方法测定^[5],于 2014 年 6 月进行各指标测定。

1.4 数据分析

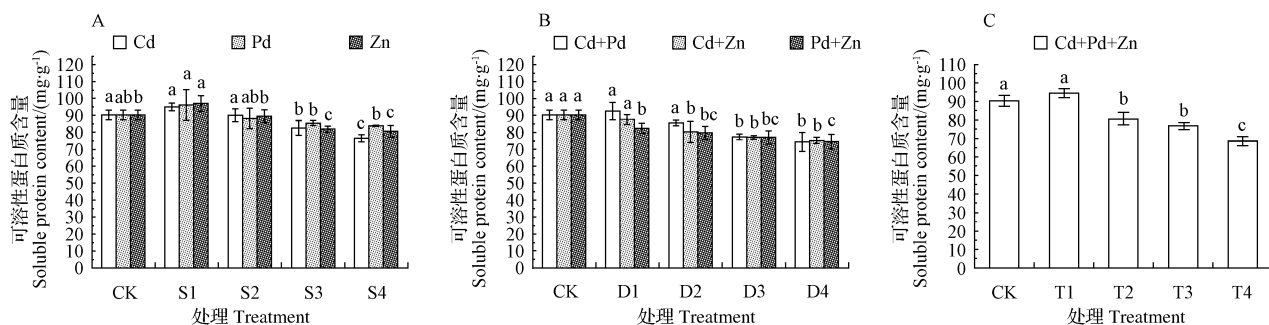
所有测定均重复 3 次,数据以平均值表示,试验数据整理采用 Excel 2003 软件,采用 SPSS 17.0 进行差异性显著分析,采用 origin 8 制图。

2 结果与分析

2.1 重金属胁迫对日本槲木叶片可溶性蛋白质含量的影响

蛋白质在植物生长中起着关键的作用,也是表征植

物生理生化特性的重要指标之一,不少研究指出,重金属胁迫诱导可溶性蛋白质含量增加,在体内合成一类能与重金属特异结合的蛋白质或多肽,以减轻重金属毒害,这是植物适应重金属污染的主要途径之一^[8-9]。由图 1A 可知,单一重金属胁迫下可溶性蛋白质含量均随处理浓度增加呈先升高后降低趋势,Cd、Pb、Zn 分别在 1、100、100 mg/kg 下达到最大值,比对照增加了 5.19%、6.46%、7.52%,处理浓度最高时下降了 15.26%、7.10%、10.83%,说明单一胁迫下低浓度重金属能诱导日本槲木叶片蛋白质合成,而浓度较高时则表现为抑制作用。与单一胁迫相似,Cd+Pb 和 Cd+Pb+Zn 复合胁迫也呈先升高后降低趋势(图 1B、C),分别在(1+100)、(1+100+100) mg/kg 达到最大值,比对照升高了 2.55%、4.67%,低浓度下(≤(5+500) mg/kg)变化不显著,处理浓度最高时分别降低了 17.71%、24.12%。Cd+Zn 和 Pb+Zn 胁迫下可溶性蛋白质含量随处理浓度增大而降低(图 1B),最高降低了 16.64%、17.46%,说明 Cd+Zn 和 Pb+Zn 复合胁迫导致日本槲木叶片内可溶性蛋白质含量降低,这可能由于重金属浓度的增加引起了蛋白质分解或抑制了蛋白质合成酶的活性。



注:不同小写字母表示不同处理间的差异显著($P < 0.05$)。下同。

Note: Different lowercase letters show significant differences among treatments ($P < 0.05$). The same below.

图 1 重金属对日本槲木叶片可溶性蛋白质含量的影响

Fig. 1 Effect of heavy metals on soluble protein content in leaves of *Aralia elata* var. *inermis*

2.2 重金属胁迫对日本槲木叶片可溶性糖含量的影响

可溶性糖是逆境胁迫诱导的小分子溶质之一,它可与游离脯氨酸共同调节植物细胞渗透平衡,其含量的增加可以从一定程度上反映植物所受逆境胁迫的程度和对不良环境的适应能力^[10-11]。

由图 2A 可知,Cd、Pb 单一胁迫下可溶性糖含量均随重金属浓度增加而先升高后降低,分别在 20、100 mg/kg 处达到最大值,比对照升高了 39.12%、27.30%;Zn 单一胁迫下可溶性糖含量则随处理浓度增大而增大,最高达 21.41 mg/g,比对照增加了 47.32%,

说明 Zn 胁迫能促进日本楸木叶片可溶性糖含量的增加。Cd+Pb、Cd+Zn、Pb+Zn 复合胁迫下可溶性糖含量均随处理浓度增加先升高后降低(图 2B),可溶性糖含量最高时处理浓度分别为(5+500)、(5+500)、(100+100) mg/kg,比对照升高 92.38%、52.72%、127.45%。

Cd+Pb+Zn 与 2 种重金属复合胁迫情况相似(图 2C),重金属浓度为(20+1 000+1 000) mg/kg 时可溶性糖含量达到最大值 27.32 mg/g,比对照升高了 88.03%。由此可见,复合胁迫对可溶性糖含量的影响明显大于单一胁迫。

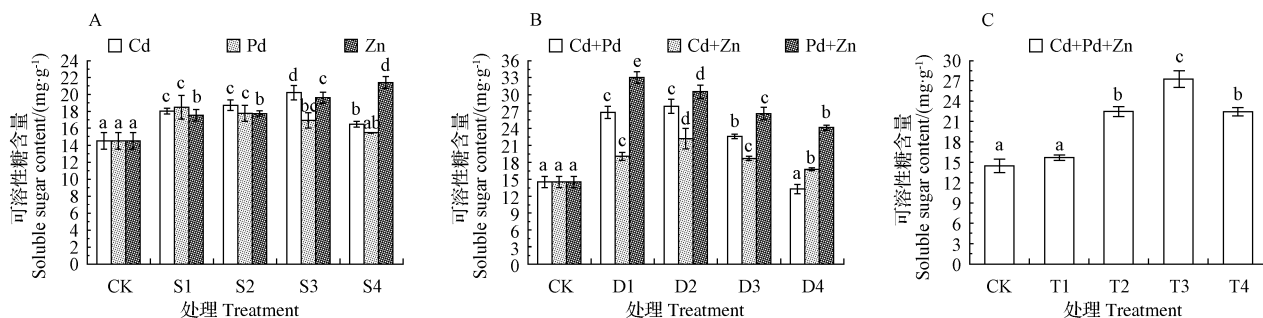


图 2 重金属对日本楸木叶片可溶性糖含量的影响

Fig. 2 Effect of heavy metals on soluble sugar content in leaves of *Aralia elata* var. *inermis*

2.3 重金属胁迫对日本楸木叶片脯氨酸含量的影响

植物游离脯氨酸含量的增加是植物对逆境胁迫的一种生理生化反应,它可以保护细胞膜系统、维持胞内酶的结构和减少胞内蛋白质的降解,脯氨酸含量的变化是植物在逆境下的适应表现^[12-13]。

由图 3A 可知,与对照相比,Cd 胁迫下日本楸木叶片中的脯氨酸含量先降低后增加,在浓度为 1 mg/kg 时达到最低值 60.54 mg/g,Cd 浓度最高时脯氨酸含量增加了 38.29%,Pb 胁迫浓度较低时与对照相比无显著差异($P < 0.05$),Pb ≥ 500 mg/kg 时脯氨酸含量随浓度增大而增加,浓度最高时增加了 58.21%,Zn 胁迫下脯氨酸含量随浓度增大而增加,最高增加了 51.68%,说明单一胁迫下高浓度 Cd、Pb($\geq 5,500$ mg/kg)和 Zn 胁迫均能

诱导日本楸木叶片脯氨酸的合成。由图 3B 可知,复合胁迫下 Cd、Pb、Zn $\geq 5,500,500$ mg/kg 时日本楸木叶片脯氨酸含量与对照相比均有显著升高($P < 0.05$),说明重金属浓度较高时复合胁迫均对脯氨酸的合成有显著的诱导作用;Cd+Pb 复合胁迫下脯氨酸含量先降低后升高,在浓度为(1+100) mg/kg 时脯氨酸含量最小,为 64.56 mg/g;Cd+Zn 胁迫下脯氨酸含量随胁迫浓度增大而升高,但低浓度时变化不显著,最高达到 121.68 mg/g;Pb+Zn 胁迫在重金属浓度较高时($\geq (500+500)$ mg/kg)脯氨酸含量显著增加,低浓度变化不显著($P < 0.05$)。Cd+Pb+Zn 复合胁迫时,脯氨酸含量先升高后下降,在处理浓度为(10+1 000+1 000) mg/kg 时脯氨酸含量最高(113.79 mg/g),比对照增加了 57.71%(图 3C)。

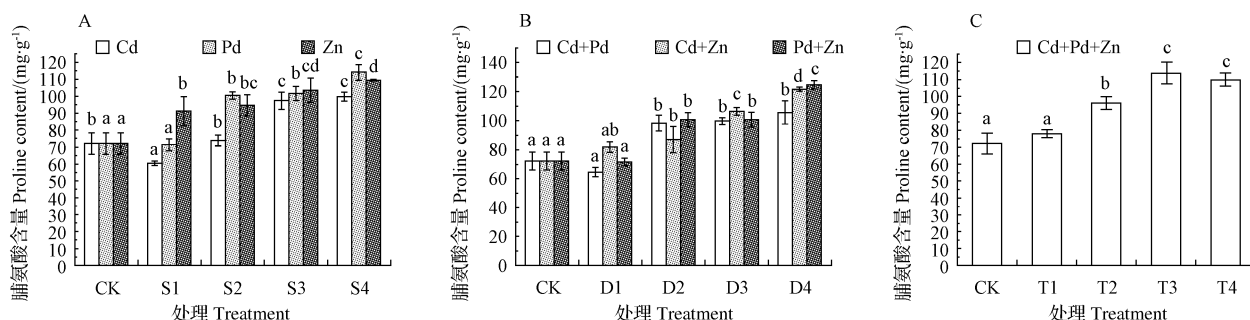


图 3 重金属对日本楸木叶片脯氨酸含量的影响

Fig. 3 Effect of heavy metals on proline content in leaves of *Aralia elata* var. *inermis*

2.4 重金属胁迫对日本楸木叶片丙二醛含量的影响

丙二醛(MDA)的积累来自不饱和脂肪酸的降解,是膜脂过氧化作用的产物,它的生成是植物体内自由基引发而产生的,丙二醛的积累能够反映植物体内自由基的活动状态,其含量的变化表明了植物细胞的过氧化程度

及其对逆境环境反应的强弱^[14]。

由图 4A 可知,Cd、Pb、Zn 单一胁迫下日本楸木叶片 MDA 含量均呈先降低后升高趋势,最低值分别出现在 1,500,500 mg/kg,分别比对照降低了 15.08%、14.01%、21.66%,MDA 含量最高时分别比对照增加了 21.02%、

27.32%、88.08%。2种元素处理情况下(图4B),Cd+Pb复合胁迫下MDA含量也呈现先降低后升高的趋势,但重金属浓度较低时($\leq (5+500)$ mg/kg)变化不显著,说明低浓度的镉铅复合胁迫对MDA含量影响不显著,而高浓度时MDA含量随浓度增加而显著增加,最高比对照升高了68.67% ($P < 0.05$);Cd+Zn $\geq (5+500)$ mg/kg时,MDA含量均显著增加,且Cd+Zn浓度为 $(10+1\ 000)$ mg/kg时达到最大值19.50 mg/g,比对照升高了

42.04%,说明镉、锌复合胁迫下该浓度对榉木叶片脂质过氧化损害最大;Pb+Zn处理时MDA含量随处理浓度的增大呈增加趋势,MDA含量最高比对照升高了74.62%,说明铅锌复合胁迫对日本榉木叶片的损害与浓度成正相关。Cd+Pb+Zn处理时(图4C),MDA含量随处理浓度的增大而升高,最高达28.48 mg/g(升高了107.40%),说明镉、铅、锌复合胁迫对日本榉木叶片的脂质过氧化损害最大。

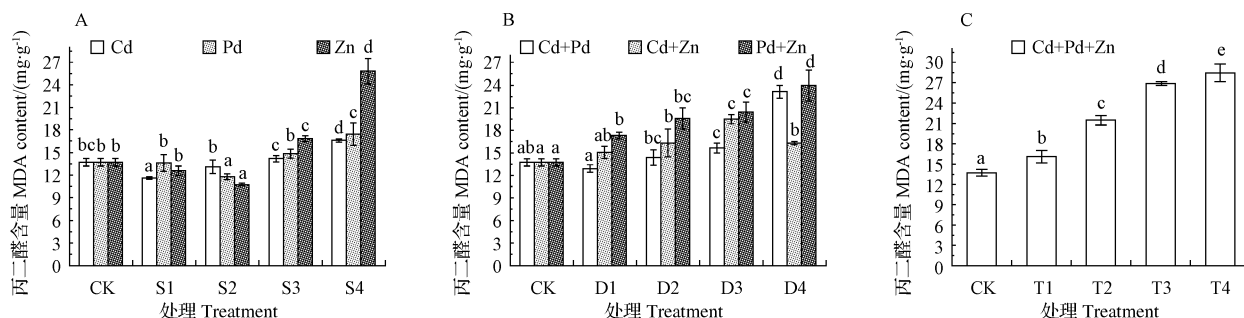


图4 重金属对日本榉木叶片丙二醛含量的影响

Fig. 4 Effect of heavy metals on MDA content in leaves of *Aralia elata* var. *inermis*

2.5 重金属胁迫对日本榉木叶片保护酶活性的影响

植物抗氧化酶系统能在一定范围内及时清除机体内过多的活性氧,维持自由基代谢的动态平衡,抗氧化酶系统中的CAT和POD能有效清除 H_2O_2 ,减少细胞受到的伤害^[15]。

2.5.1 重金属胁迫对日本榉木叶片过氧化氢酶活性的影响 过氧化氢酶(CAT)是一种包含血红素的4聚体酶,存在于所有的植物细胞中,它可将 H_2O_2 迅速分解为 H_2O 和 O_2 。CAT在细胞中主要存在于过氧化体中,负责清除过氧化体中产生的 H_2O_2 ^[16]。由图5A可知,与对照相比,Cd、Pb、Zn单一胁迫均能使CAT活性增强;Cd单一胁迫下日本榉木叶片中CAT活性随Cd浓度的升高而增强,处理浓度最高时比对照升高了70.32%,说明Cd胁迫能促进CAT活性增强;Pb单一胁迫时CAT酶活性随重金属浓度先增强后减弱,Pb浓度为1 000 mg/kg

时达到最大值88.70 $U \cdot g^{-1} \cdot min^{-1}$,比对照升高了21.36%;Zn浓度为500 mg/kg时达到最大值107.63 $U \cdot g^{-1} \cdot min^{-1}$,比对照升高了47.26%。2种重金属复合胁迫时(图5B),Cd+Pb胁迫时CAT活性随浓度先增强后减弱,但重金属处理组间变化不显著($P < 0.05$),Cd+Pb浓度为 $(10+1\ 000)$ mg/kg时达到最大值,CAT活性比对照增加了31.42%;Cd+Zn胁迫时CAT活性也随浓度先增强后减弱,在Cd+Zn浓度为 $(5+500)$ mg/kg达到最大值92.66 $U \cdot g^{-1} \cdot min^{-1}$,比对照升高了26.78%,最小值出现在 $(20+1\ 500)$ mg/kg,比对照降低了14.86%;Pb+Zn和Cd+Pb+Zn的情况与Cd+Pb相似,CAT活性也呈先增强后减弱趋势,分别在 $(1\ 000+1\ 000)$ mg/kg和 $(10+1\ 000+1\ 000)$ mg/kg时达到最大值,此时CAT活性比对照增加了30.39%和58.07%(图5B、C)。

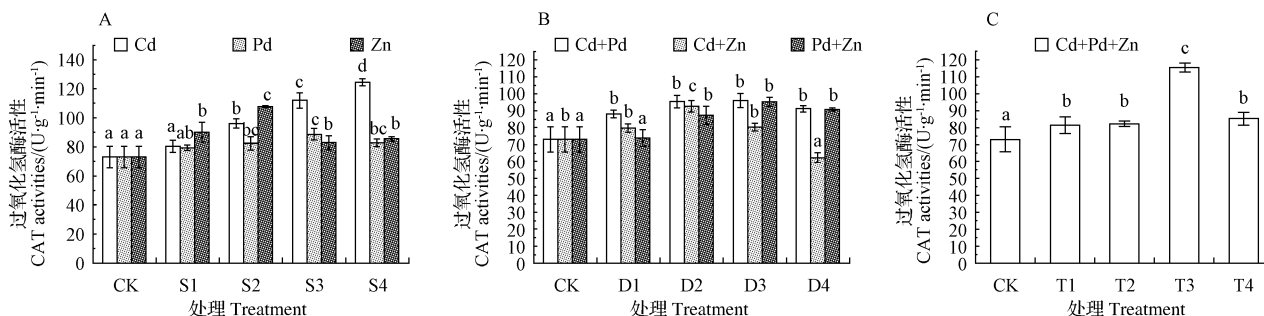


图5 重金属对日本榉木叶片过氧化氢酶活性的影响

Fig. 5 Effect of heavy metals on CAT activities in leaves of *Aralia elata* var. *inermis*

2.5.2 重金属胁迫对日本槲木叶片过氧化物酶活性的影响 过氧化物酶(POD)广泛存在于植物体内不同组织中,它作为活性较高的适应性酶,能够反映植物生长发育的特点、体内代谢状况以及对外界环境的适应性^[15]。由图6可知,重金属处理组日本槲木叶片的 POD 活性与对照相比均有显著降低($P<0.05$)。单一胁迫下 POD 活性均随处理浓度的升高而降低,Cd、Pb、Zn 单一胁迫浓度最高时 POD 活性分别降低了 54.42%、28.31%和 39.50%,Pb 对 POD 活性的影响最小,说明单一胁迫显著抑制了日本槲

木叶片 POD 活性(图 6A)。2 种元素复合胁迫时(图 6B),除 Cd+Pb 浓度为(1+100) mg/kg 和(5+500) mg/kg 时组间变化不显著外,其余组的叶片 POD 活性均随重金属浓度升高而显著降低($P<0.05$),Cd+Pb、Cd+Zn 和 Pb+Zn 在处理浓度最高时分别降低了 47.52%、59.35%和 58.93%。Cd+Pb+Zn 复合胁迫下 POD 活性也随处理浓度增加而降低,最高降低了 54.13%,说明除 Cd+Pb 外,重金属复合胁迫能显著抑制日本槲木叶片 POD 活性,且抑制作用随处理浓度的增加而增强(图 6C)。

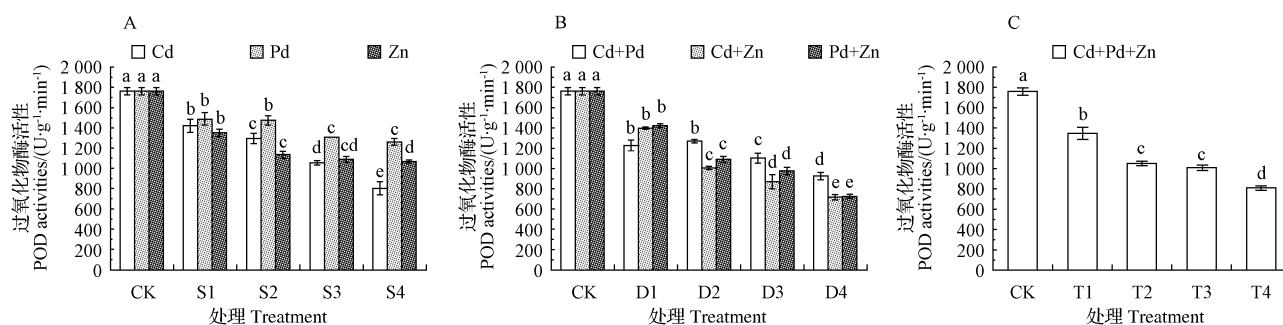


图6 重金属对日本槲木叶片过氧化物酶活性的影响

Fig. 6 Effect of heavy metals on POD activities in leaves of *Aralia elata* var. *inermis*

3 结论与讨论

渗透调节是植物适应干旱、盐渍、低温、重金属等胁迫的重要机制之一,植物通过积累一些小分子有机化合物,如可溶性糖、可溶性蛋白质、脯氨酸等,保持体内细胞与组织的水平衡,稳定生物大分子结构,抵抗环境胁迫^[9]。试验结果表明,除 Cd+Zn 和 Pb+Zn 胁迫下可溶性蛋白质随重金属浓度增大而降低外,其余单一或复合重金属胁迫下日本槲木叶片可溶性蛋白质含量均随重金属含量增大呈先升高后降低趋势,这可能由于低浓度重金属诱导可溶性蛋白质含量增加,在体内合成一类能与重金属特异结合的蛋白质或多肽,减轻重金属毒害,而重金属浓度较高时,重金属抑制了蛋白质合成酶的活性^[8];除 Zn 单一胁迫下可溶性糖含量则随处理浓度增大而增大外,其余重金属单一或复合胁迫下可溶性糖含量均随重金属浓度增加而先升高后降低,但与对照相比均有所增加,说明可溶性糖含量与重金属胁迫程度相关,重金属处理下植物可溶性糖含量增加的原因可能是叶片内不溶性糖降解及光合产物运输受阻的结果^[9-10],另一方面,作为渗透调节物质,可溶性糖含量增加在一定程度上减弱了重金属对植物体的毒害效应;重金属处理浓度较低时,各处理组变化差异较大,但处理浓度较高时,日本槲木叶片脯氨酸含量均有显著升高,这可能由于重金属胁迫改变了植物体内脯氨酸的代谢途径,影响了蛋白质的合成,使得脯氨酸氧化受阻,蛋白质合成

速度减慢,使得脯氨酸含量升高^[17]。

丙二醛(MDA)是膜脂氧化的主要产物之一,是具细胞毒性的物质,能够引起细胞膜功能紊乱,是膜脂氧化的重要指标;抗氧化酶系统能有效地清除胁迫产生的活性氧,保护植物体内膜系统受到过氧化伤害^[14,17]。试验结果表明,Cd、Pb、Zn 单一处理时 MDA 含量均呈先降低后升高趋势,说明单一胁迫处理浓度较低时,对日本槲木叶片的过氧化损伤较小,而高浓度的重金属胁迫则会造成 MDA 的过量积累,复合胁迫的情况较单一胁迫复杂,但在重金属浓度较高时,MDA 含量均有显著升高;抗氧化酶 CAT 和 POD 能有效清除细胞内 H_2O_2 ,植物体内保护酶活性的升高有利于清除细胞内的自由基和活性氧(ROS),是适应胁迫环境的重要机制,试验表明单一胁迫均能使 CAT 活性升高,而复合胁迫下 CAT 活性均随浓度先增强后减弱,说明日本槲木对重金属复合胁迫时的响应比单一胁迫复杂;POD 活性变化与 CAT 变化相反,重金属处理组日本槲木叶片的 POD 活性与对照相比均有显著降低,单一胁迫下 POD 活性均随处理浓度的升高而降低,且 Pb 对 POD 活性的影响最小,2 种元素复合胁迫时,除 Cd+Pb 外,其余组的叶片 POD 活性均随重金属浓度升高而显著降低($P<0.05$),这可能由于复合胁迫下植物体内 ROS 的产生与清除平衡被打破,植物自身的抗逆性下降,导致植物防御体系的酶活性也随之下降。

综上所述,重金属对木本植物造成的伤害是多方面

的,其抗性机理也是十分复杂的,而复合胁迫下日本榉木对重金属胁迫的响应比单一胁迫更为复杂,具体响应机制有待进行深入研究。

参考文献

- [1] 刘刊,王波,权俊娇,等. 土壤重金属污染修复研究进展[J]. 北方园艺,2012(22):189-194.
- [2] SILVIA M M, ZUZANA D, IVANA M, et al. Effect of silicon on growth, photosynthesis, oxidative status and phenolic compounds of maize (*Zea mays* L.) grown in cadmium excess[J]. Water Air Soil Pollut, 2014, 225:2056.
- [3] 张呈祥,陈为峰,裴洪翠. 草地早熟禾对铅的胁迫反应及积累特性[J]. 中国草地学报,2013(1):96-101.
- [4] BARKLA, BRONWYN J, VERA-ESTRELLA, et al. Quantitative proteomics of heavy metal exposure in *Arabidopsis thaliana* reveals alterations in one-carbon metabolism enzymes upon exposure to zinc[J]. Journal of Proteomics, 2014, 111:128-138.
- [5] 高俊凤. 植物生理学实验指导[M]. 北京:高等教育出版社,2006:15-16.
- [6] 陈爱美,施庆珊,欧阳友生,等. 稀土元素 La 和 Ce 对小球藻生长的影响[J]. 现代食品科技,2013(10):2401-2404,2334.
- [7] MEHER H, SIMEEN M. Oxidative stress and antioxidant defense mechanism in mung bean seedlings after lead and cadmium treatments[J]. Turkish Journal of Agriculture and Forestry, 2014, 38:55-61.
- [8] 何晓良,蔡卓,邱霞琳,等. 铅胁迫对狮子草可溶性蛋白质含量的影响[J]. 广西大学学报(自然科学版),2013(3):550-553.
- [9] 郭晓音,严重玲,叶彬彬. 镉锌复合胁迫对秋茄幼苗渗透调节物质的影响[J]. 应用与环境生物学报,2009(3):308-312.
- [10] 张呈祥,陈为峰. 德国鸢尾对 Cd 胁迫的生理生态响应及积累特性[J]. 生态学报,2013,33(7):2165-2172.
- [11] 李培广,周海燕,陈翠云,等. 阿拉善荒漠优势植物可溶性糖的季节变化[J]. 生态学杂志,2012(12):3018-3023.
- [12] MARTA K, RYSZARD C, ALEKSANDRA N, et al. A comparative study of heavy metal accumulation and antioxidant responses in *Vaccinium myrtillus* L. leaves in polluted and non-polluted areas[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2013, 20(7):4920-4932.
- [13] 朱虹,祖元刚,王文杰,等. 逆境胁迫条件下脯氨酸对植物生长的影响[J]. 东北林业大学学报,2009(4):86-89.
- [14] 张景云,白雅梅,缪南生,等. 盐胁迫对不同耐盐性二倍体马铃薯叶片质膜透性、丙二醛和脯氨酸含量的影响[J]. 作物杂志,2013(4):75-80.
- [15] ALEKSANDRA N, BARTOMIEJ P, ANDRZEJ K. Heavy metal bio-accumulation and antioxidative responses in *Cardaminopsis arenosa* and *Plantago lanceolata* leaves from metalliferous and non-metalliferous sites: a field study[J]. Ecotoxicology, 2013, 22(9):1422-1434.
- [16] 尹永强,胡建斌,邓明军. 植物叶片抗氧化系统及其对逆境胁迫的响应研究进展[J]. 中国农学通报,2007(1):105-110.
- [17] 曲木子,谢会成,李际红. 窄冠黑青杨对重金属复合胁迫的生理响应[J]. 西北林学院学报,2013(5):8-12.

Biological Responses of *Aralia elata* var. *inermis* to Heavy Metal Combined Stress

LI Desheng, PENG Ling, ZHANG Sen, MENG Li, RU Liye

(College of Environment Science and Safety Engineering, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384)

Abstract: Taking *Aralia elata* var. *inermis* as materials, with 8 treatments including single and combined stress of cadmium (1, 5, 20, 50 mg/kg), lead (100, 500, 1 000, 1 500 mg/kg) and zinc (100, 500, 1 000, 1 500 mg/kg), a pot experiment was conducted to study the effect of heavy metals cadmium, lead and zinc in the soil on soluble protein and soluble sugar contents, oxidation protective enzyme activity and membrane lipid peroxidation in leaves of *Aralia elata* var. *inermis*. The results showed that the soluble protein content was decreased as heavy metal concentration increased under Cd+Zn or Pb+Zn combined stress, but there was an increasing-decreasing trend for the other groups. The soluble sugar content was increased as heavy metal concentration increased under Zn single stress, and there was an decreasing-increasing trend for the other groups. The malondialdehyde (MDA) content was an increasing-decreasing trend as heavy metal concentration increased under single stress. The catalase (CAT) activity increased as heavy metal concentration increased under single stress, but it was an increasing-decreasing trend for combined stress. The peroxidase (POD) activities decreased with heavy metal concentration increased under single stress, while it increased under combined stress except Cd+Pb.

Keywords: *Aralia elata*; combined stress; malondialdehyde (MDA); catalase (CAT); peroxidase (POD)