

水分和铅交互胁迫对国槐幼苗生理生化特性的影响

张 青, 王进鑫*, 邹 朋, 初江涛, 周芙蓉

(西北农林科技大学 资源环境学院, 农业部西北植物营养与农业环境重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘 要:为了探讨在水分和铅交互胁迫条件下,国槐(*Sophora japonica* L.)幼苗抗氧化酶系统活性及渗透调节物质含量的变化,采用盆栽实验,研究不同水分处理(土壤相对含水率为40%、60%、80%、100%)及5个铅胁迫水平(0、300、500、1 000、2 000 mg·kg⁻¹)交互作用对抗氧化酶活性、MDA含量、可溶性糖含量和脯氨酸含量的影响。结果表明:在水分和铅的交互胁迫下,国槐幼苗叶片POD、SOD酶活性表现先升后降的趋势,与单一的水分胁迫、铅胁迫相比,交互作用对SOD、POD活性的影响规律性不明显,在一定程度上表现出协同或拮抗效应;随着水分胁迫的加剧和铅胁迫的增大,国槐幼苗叶片的MDA含量变化呈现升高的趋势。在铅含量<2 000 mg·kg⁻¹条件下,交互胁迫的国槐幼苗叶片MDA含量低于单一水分胁迫处理,表明国槐在交互胁迫下受到的膜伤害比单一水分胁迫下受到的膜伤害小;国槐幼苗叶片可溶性糖含量对水分胁迫较不敏感,且随着水分胁迫的加剧和铅胁迫的增加,叶片可溶性糖含量的变化比较复杂,但总体上呈先升后降的趋势;在铅含量500 mg·kg⁻¹和40%水分胁迫处理下,可溶性糖含量显著高于对照($P<0.01$),MDA含量与对照无明显差异;随着水分胁迫的加剧和铅胁迫的增大,脯氨酸含量逐渐升高;在40%水分胁迫下,重金属铅和水分胁迫对叶片中脯氨酸的积累有协同促进作用。适当的交互胁迫(铅含量300、500 mg·kg⁻¹和40%水分处理)有利于提高国槐的抗逆性。

关键词:干旱;铅;国槐;交互胁迫;生理生化特性

中图分类号:Q945.78 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2012)03-0476-08

Effects of Interactive Stress of Drought and Lead on Physiological and Biochemical Characteristics of *Sophora japonica* L. Seedlings

ZHANG Qing, WANG Jin-xin*, ZOU Peng, CHU Jiang-tao, ZHOU Fu-rong

(College of Resources and Environment, Northwest A & F University, Key Laboratory of Plant Nutrition and the Agri-environment in North-west China, Ministry of Agriculture, Yangling 712100, China)

Abstract: The objective of this experiment is to study changes in the antioxidant enzyme activity and the osmotic solute concentration in *Sophora japonica* L. seedlings grown under drought and heavy metal(Pb) stress. The pot study used four soil water contents(40%, 60%, 80%, 100% of soil water holding capacity) and five Pb concentrations(0, 300, 500, 1 000, 2 000 mg·kg⁻¹). The results showed that peroxidase(POD) and superoxide dismutase(SOD) activity initially increased and then decreased under the combined effects of drought and Pb stress. The combination of drought and Pb stress had less effect than only drought or Pb stress on POD and SOD activity in *S. japonica* seedlings. The combination of drought and Pb stress had either synergistic or antagonistic effects depending on the conditions. Malondialdehyde(MDA) concentrations gradually increased under the combination of drought and Pb stress, however the MDA concentrations in the drought plus Pb stress(<2 000 mg·kg⁻¹) treatments were still less than those of *S. japonica* seedlings grown under drought stress alone. This indicated that the interactive effects of drought and Pb caused more membrane damage to *S. japonica* seedlings than drought stress alone. Drought stress had little effect on soluble sugar concentrations in *S. japonica* seedlings; however interaction between drought and Pb stress caused soluble sugar contents to increase and then decrease. The soluble sugar concentration of *S. japonica* seedlings grown under 500 mg·kg⁻¹ Pb stress and 40% of soil water holding capacity was greater than that of *S. japonica* seedlings in the control treatment($P<0.01$). In contrast, the MDA concen-

收稿日期:2011-09-06

基金项目:国家自然科学基金项目(81170179)

作者简介:张 青(1988—),女,湖北荆门人,在读硕士研究生,主要从事生态环境工程研究。E-mail:zhangqing134@sina.cn

* 通讯作者:王进鑫 E-mail:jwang118@126.com

tration of *S. japonica* seedlings grown under 500 mg·kg⁻¹ Pb stress and 40% of soil water holding capacity was not significantly different from that of *S. japonica* seedlings in the control treatment ($P>0.05$). Proline concentrations gradually increased over time in the 500 mg·kg⁻¹ Pb stress plus 40% of soil water holding capacity treatment, indicating that the combination of drought and Pb stress had synergistic effects. In summary, *S. japonica* was resistant to the combined effects of drought(40% of soil water holding capacity) and Pb(300, 500 mg·kg⁻¹) stress.

Keywords: drought; lead; *Sophora japonica*; interaction stress; physiological-biochemical characteristic

随着矿产资源开发规模的不断扩大以及全球水资源的日益匮乏,干旱地区的土壤重金属污染问题日趋严重^[1]。采用植被恢复与植物修复技术来解决土壤重金属污染问题已成为目前环境生态研究的热点^[2]。然而,我国重金属污染耐性植物研究主要集中在气候环境适宜、物种丰富的南部矿区^[3-5],对于降雨稀少的西北地区的耐性植物研究甚少。近几年来,国内外在铅对生长周期较短的农作物、蔬菜等经济植物及一年生草本植物的生理生化影响机制方面进行了大量的研究^[6-9],但是有关铅对木本植物生理生化的影响及其机制的研究少有报道。木本植物的生物产量高,有巨大的根、茎、叶面积作用于环境,在治理土壤重金属污染方面有着草本植物难以替代的优势。同时,目前的相关研究都是针对铅胁迫或干旱胁迫而进行单一研究,或是将铅与其他重金属元素结合研究其复合效应,而针对西北铅锌矿区普遍存在的干旱和重金属污染交互胁迫问题,缺乏必要的研究。

为此,本研究选择干旱地区普遍存在的耐旱性较强的木本植物国槐,研究铅和水分交互作用下国槐幼苗的生理生化响应机制,阐明国槐幼苗对逆境的抗性和适应能力,为充分利用木本植物资源,恢复矿业废弃地生态环境提供理论依据和技术参考。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 供试植物

为一年生国槐(*Sophora japonica* L.)。为了减少苗木基础生长所引起的系统误差,起苗前对圃地苗木进行了调查、逐一标记,起苗后精心挑选,基本确保了苗高、地径与长势的一致性。国槐平均苗高 118.0±12 cm,平均地径 1.02±0.25 cm。苗木定植前,用清水冲洗根系表面所附土壤。

1.1.2 供试土壤

为壤土,质地粘壤,田间持水量 22.3%,土壤铅的背景值^[10]为(16.3±2.96)mg·kg⁻¹,土壤有机质含量 13.70 g·kg⁻¹,全氮含量为 0.73 g·kg⁻¹,速效磷含量为 15.91 mg·kg⁻¹,速效钾含量为 96.52 mg·kg⁻¹。风干土过筛,除

去石砾、结核及林草根系,充分混匀备用;在试验前向土样中加入 99%的分析纯 Pb(CH₃COO)₂·3H₂O,充分混匀后钝化 2 个月备用;试验期间栽培基质保持自然肥力,不施肥。

1.2 方法

试验地位于暖温带半湿润气候区的陕西杨凌西北农林科技大学主校区内,采用旱棚人工控水的方法进行试验布设。试验设置 5 个重金属铅胁迫水平(0、300、500、1 000、2 000 mg·kg⁻¹);土壤相对含水率上限 100%、下限 40%^[11-13],分设 4 个水平,分别为 100%(CK)、80%(轻微水分胁迫)、60%(轻度水分胁迫)、40%(重度水分胁迫)^[14-16];采用随机区组设计,共 20 个处理(表 1)。塑料栽培容器高 30 cm、口径 27 cm,按 0~30 cm 平均土壤密度 1.15 g·cm⁻³ 装土,保持各容器干土重相同。每盆栽植国槐 1 株,每一处理重复 3 次,共 60 盆。土壤相对含水率采用称重法控制,3 d 称量 1 次,以便及时调整每日补充灌水量。为保持各处理土壤水分相对稳定,除每天补充灌水量外,土壤表面用小砂石覆盖(厚约 2 cm)。

表 1 试验处理与处理代码表

Table 1 Experimental treatment and code

Pb 含量/ mg·kg ⁻¹	供水率/%			
	100(CK)	80(T1)	60(T2)	40(T3)
0(CK)	CK	T1	T2	T3
300(A)	A	AT1	AT2	AT3
500(B)	B	BT1	BT2	BT3
1 000(C)	C	CT1	CT2	CT3
2 000(D)	D	DT1	DT2	DT3

1.3 测定项目及方法

酶液的制备^[8]:取 0.5 g 新鲜叶片于预冷的研钵中,先加入冷磷酸缓冲液(pH7.8)5 mL 及少量石英砂,冰浴研磨至匀浆,并用 0.05 mol·L⁻¹ 的冷磷酸缓冲液(pH7.8)5 mL 冲洗,转移至离心管中;10 000 r·min⁻¹、4 ℃离心 15 min,取上层清液测定各种酶活性及丙二醛含量。

超氧化物歧化酶(SOD)活性采用氮蓝四唑(NBT)

比色法测定,SOD活性以抑制NBT光氧化还原50%的酶量为1个活性单位,用 $\text{U}\cdot\text{g}^{-1}$ 为单位表示^[17];过氧化物酶(POD)采用愈创木酚法测定,用 ΔA_{470} 表示POD活性^[17];丙二醛(MDA)采用硫代巴比妥酸比色法^[17];可溶性糖含量采用苯酚硫酸法测定^[18];脯氨酸含量采用酸性茚三酮法测定^[17]。

1.4 数据处理

采用Microsoft Excel软件对所测的3个重复数据取平均值,再进行作图,并运用SPSS17.0软件中的Duncan法进行差异显著性分析。

2 结果与分析

2.1 水分和铅胁迫对国槐幼苗叶片POD活性的影响

POD通过催化其他底物与过氧化氢反应,以消耗过氧化氢,POD在逆境胁迫中被激活的程度大,且持续的时间长,在逆境胁迫中起关键作用^[1]。研究表明(图1),在单一铅胁迫时,随着铅胁迫的增加,国槐幼苗叶片POD活性整体呈升高趋势,但与对照(除D处理外)的差异不显著($P>0.05$),表明国槐幼苗的POD活性对低浓度 $\text{Pb}(<2\,000\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1})$ 胁迫较不敏感。在单一水分胁迫时,随着水分胁迫的加剧,国槐幼苗叶片POD活性先升高后下降,但明显高于对照($P<0.01$),表明POD活性对水分胁迫比较敏感。随着水分胁迫程度的加剧和铅胁迫的增加,国槐幼苗叶片POD活性总体趋势表现为先升后降,但都显著高于对照($P<0.05$)。在铅含量 $300(\text{A})$ 、 $2\,000\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}(\text{D})$ 处理下,随着水分胁迫程度的加剧,POD活性呈现先升高后降低的趋势,且均在轻度水分胁迫(T2)时取得高值,AT2处理和DT2处理明显高于对照($P<0.01$),分别为对照处理的254.72%和246.00%;在铅含量 $500\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}(\text{B})$ 处理下,随着水分胁迫程度的加剧,POD

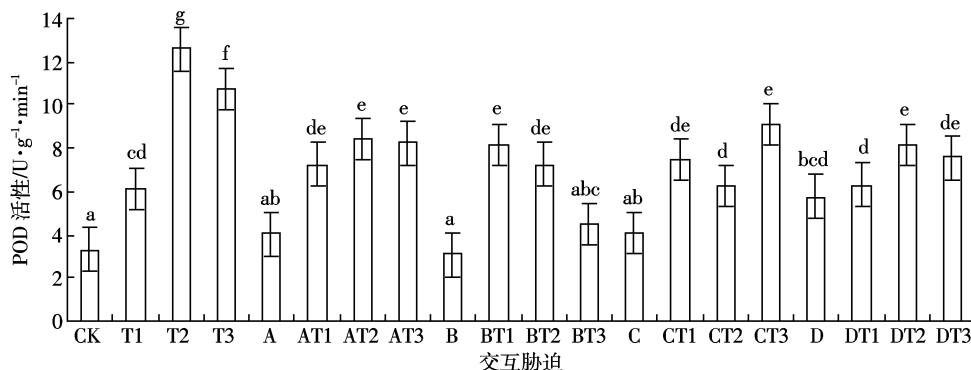
活性呈现先升高后降低的趋势,在轻微水分胁迫(T1)时取得高值,明显高于对照($P<0.01$),为对照处理的245.60%;在CT3处理下,国槐幼苗叶片POD活性达到交互胁迫的最大值,明显高于对照($P<0.01$),为对照处理的274.39%。在轻微水分胁迫处理下(T1),交互胁迫下的国槐幼苗叶片POD活性都明显高于单一轻微水分胁迫处理,表明这时的交互胁迫对POD活性有激活作用;在轻度水分胁迫处理下(T2)和重度水分胁迫处理下(T3),交互胁迫下的国槐幼苗叶片POD活性均分别低于单一轻度、重度水分胁迫处理($P<0.05$),表明这时的交互胁迫对POD活性有拮抗作用。

2.2 水分和铅胁迫对国槐幼苗叶片SOD活性的影响

SOD是存在于植物细胞中最重要的清除自由基的酶类之一^[6]。SOD活性的增强,表明植物幼苗清除 $\text{O}_2\cdot$ 的能力提高。实验结果表明(图2),在单一铅胁迫时,随铅胁迫的增加,国槐幼苗叶片SOD活性先逐渐升高后下降。在单一水分胁迫时,随着水分胁迫的加剧,国槐幼苗叶片SOD活性略有下降。随着铅胁迫的增加和水分胁迫的加剧,SOD活性变化较复杂,但呈现先升高后降低的趋势。在铅含量 $1\,000\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}(\text{C})$ 处理下,随着水分胁迫的加剧,国槐幼苗叶片SOD活性呈现逐渐增高的趋势,国槐幼苗叶片SOD活性在CT3处理下达到最高值,明显高于CK和C处理,为对照处理的110.19%,为C处理的108.23%。交互胁迫下的国槐幼苗叶片SOD活性均分别高于单一水分胁迫处理T1、T2、T3($P<0.05$),可能是由于交互胁迫对SOD活性有激活作用。

2.3 水分和铅胁迫对国槐幼苗叶片MDA含量的影响

丙二醛(MDA)是膜脂过氧化的产物。细胞内MDA水平间接表明了植物体内的活性氧水平和细胞



不同小写字母表示差异显著($P<0.05$),下同

图1 交互胁迫对国槐幼苗叶片POD活性的影响
Figure 1 Effects of interactive stress on POD activity in the leaves of *Sophora japonica*

的受损程度^[19]。图3表明,在单一铅胁迫时,国槐幼苗叶片的MDA含量逐渐升高。在单一水分胁迫时,国槐幼苗叶片的MDA含量也呈现逐渐升高的趋势。随着水分胁迫的加剧和铅胁迫的增大,国槐幼苗叶片的MDA含量变化呈现升高的趋势,表明水分胁迫、铅胁迫会使国槐幼苗体内的活性氧水平上升,细胞受损。在轻度水分胁迫处理下(T2),铅含量 $<2\ 000\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 处理下(A、B、C)的国槐幼苗叶片MDA含量均高于其他水分胁迫处理(T1、T3)的国槐幼苗叶片MDA含量。在CT2处理下国槐幼苗叶片MDA含量达到最大值,明显高于CK和C处理($P<0.01$),为对照处理的196.10%,为C处理的132.29%;在BT3处理下国槐幼苗叶片MDA含量达到交互胁迫的最小值,与对照的差异不显著($P>0.05$),但明显低于B处理($P<0.01$),为B处理的90.06%。在重度水分胁迫处理下(T3),交互胁迫下的国槐幼苗叶片MDA含量都低于单一重度水分胁迫处理。在铅含量 $<2\ 000\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 处理下(A、B、C),交互胁迫下的国槐幼苗叶片MDA含量(除CT2处理外)低于单一水分胁迫处理T1、T2、

T3,表明国槐对适当的交互胁迫具有一定的自我保护能力。

2.4 水分和铅胁迫对国槐幼苗叶片可溶性糖含量的影响

在单一铅胁迫时,随着铅胁迫的增加,国槐幼苗叶片可溶性糖含量先下降后升高再下降,这表明铅含量 $>500\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时抑制国槐幼苗叶片可溶性糖含量的合成(图4)。在单一水分胁迫时,随着水分胁迫的加剧,国槐幼苗叶片可溶性糖含量总体趋势是升高的,但差异不显著($P>0.05$),表明国槐幼苗叶片可溶性糖含量对水分胁迫较不敏感。随着水分胁迫的加剧和铅胁迫的增加,国槐幼苗叶片可溶性糖含量的变化比较复杂,但总体上呈先升后降的趋势。在铅含量 $500\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (B)处理下,随着水分胁迫的加剧,国槐幼苗叶片可溶性糖含量逐渐升高,且可溶性糖含量平均值高于其他铅含量处理A、C、D,在BT3处理下,国槐幼苗叶片可溶性糖含量达到最大值,显著高于CK和B处理($P<0.01$),为对照处理的116.16%,为B处理的123.37%。在不同水分胁迫处理下,交互胁迫下的

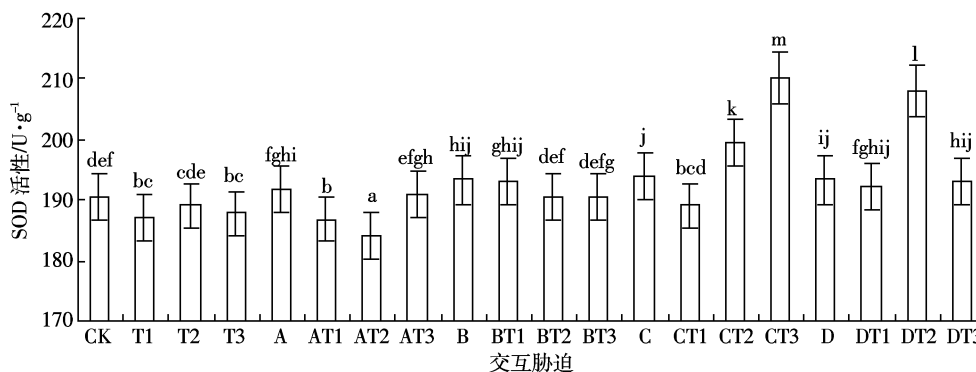


图2 交互胁迫对国槐幼苗叶片SOD活性的影响

Figure 2 Effects of interactive stress on SOD activity in the leaves of *Sophora japonica*

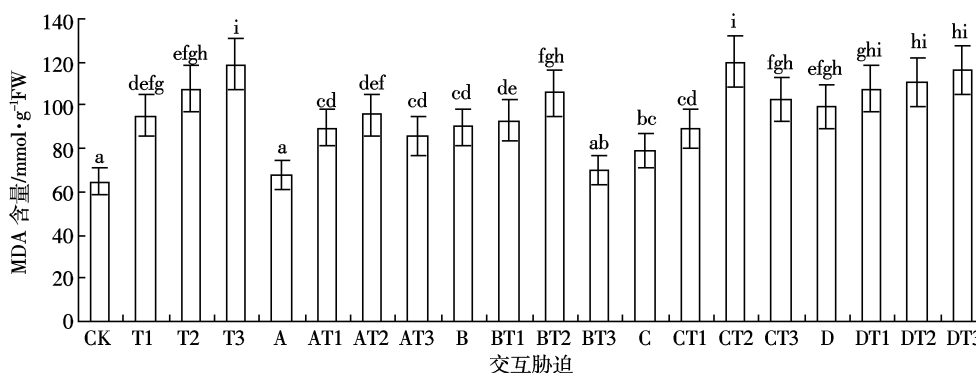


图3 交互胁迫对国槐幼苗叶片MDA含量的影响

Figure 3 Effects of interactive stress on MDA content in the leaves of *Sophora japonica*

国槐幼苗叶片可溶性糖含量(除 BT2、BT3 处理外)分别低于单一水分胁迫处理 T1、T2、T3, 表明只有在适当的交互胁迫(BT2、BT3)下才会促进国槐幼苗叶片可溶性糖的合成。

2.5 水分和铅胁迫对国槐幼苗叶片脯氨酸含量的影响

在单一铅胁迫时,随着铅胁迫的增加,国槐幼苗叶片脯氨酸含量先升高后下降,但与对照差异不显著($P>0.05$),表明国槐幼苗脯氨酸含量对铅胁迫较不敏感(图 5)。在单一水分胁迫时,随着水分胁迫的加剧,国槐幼苗叶片脯氨酸含量呈升高趋势,且变化显著($P<0.01$),表明国槐幼苗脯氨酸含量对水分胁迫比较敏感。随着水分胁迫的加剧和铅胁迫的增加,国槐幼苗叶片脯氨酸含量表现逐渐升高的趋势。在轻微水分胁迫处理下(T1),交互胁迫下的国槐幼苗叶片脯氨酸含量与单一轻微水分胁迫处理下的差异不明显($P>0.05$),表明这时国槐幼苗叶片脯氨酸含量受铅胁迫影响较小。在轻度水分胁迫处理下(T2),交互胁迫下的国槐幼苗叶片脯氨酸含量显著低于单一轻度水分胁迫处理($P<0.01$),说明这时的交互胁迫使植物细胞受到伤害,导致植物细胞内游离脯氨酸含量降低。在

重度水分胁迫的处理下(T3),随着铅胁迫的增加,国槐幼苗叶片脯氨酸的含量逐渐升高,且显著高于对照处理($P<0.01$),在 DT3 处理下脯氨酸含量达最大值,为对照处理的 28.06 倍,为 T3 处理的 110.10%,表明这时的交互胁迫有助于植物细胞内游离脯氨酸含量的积累。

3 讨论

POD、SOD 是植物体内清除活性氧的重要保护酶,抑制 MDA 含量的积累,维持细胞的稳定和完整,提高植物对逆境的适应能力,因此保护酶活性的高低及 MDA 的含量在一定程度上反映植物的耐逆境的能力。本研究中,国槐幼苗的 POD 活性对 Pb 胁迫较不敏感。陈丽娜等^[8]对花芽甜麦菜的研究表明,在 24~240 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Pb 胁迫条件下 POD 活性对 Pb 胁迫不太敏感;张金彪等^[20]也报道了一些蔬菜和水果的 POD 活性对 Pb 胁迫不敏感。本实验与此结论一致。各交互胁迫水平 POD 活性均高于对照,有利于提高国槐受交互胁迫的自我保护能力,表明国槐对水分和铅交互胁迫有较高的耐性。国槐幼苗叶片的 POD、

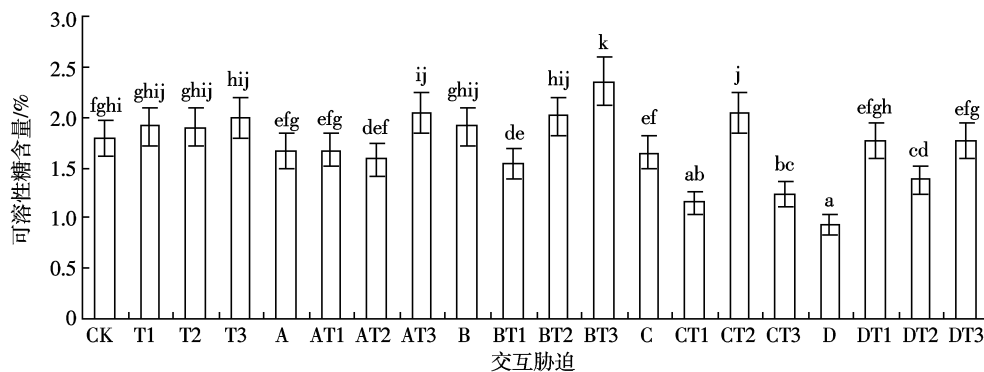


图 4 交互胁迫对国槐幼苗叶片可溶性糖含量的影响

Figure 4 Effects of interactive stress on soluble sugar content in the leaves of *Sophora japonica*

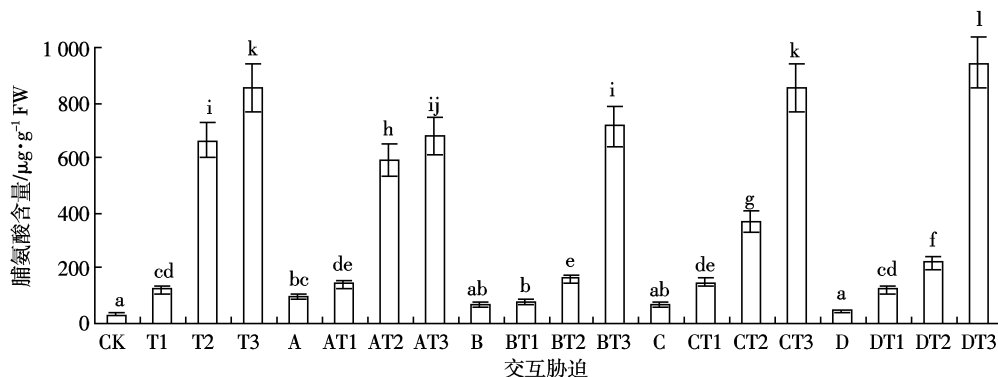


图 5 交互胁迫对国槐幼苗叶片脯氨酸含量的影响

Figure 5 Effects of interactive stress on proline content in the leaves of *Sophora japonica*

SOD 活性呈现先升后降的趋势,房娟等^[21]研究发现,垂柳和苏柳 172 叶片的 POD、SOD 活性均随 Pb 处理浓度的增大先升后降;何冰等^[22]报道铅胁迫下杨梅叶片的 POD、SOD 活性均随着处理时间的延长而呈先升后降的变化趋势,与本研究结果一致。这可能与 POD、SOD 酶活性的提高是一种急性解毒效应有关,在逆境条件下其调节能力是有限的,如果超过其限度,细胞内酶会受到损伤而使活性下降,这与植物一般的应激规律相符^[1]。但是各交互胁迫水平 SOD 活性没有 POD 活性的变化幅度明显,可能是由于国槐主要通过增强 POD 活性来清除活性氧,以提高对交互胁迫的耐性。与单一的水分胁迫、铅胁迫相比,水分胁迫与铅胁迫间的交互作用对 SOD、POD 活性的影响规律性不明显。POD 活性受到轻微水分胁迫条件下(T1)的交互胁迫的诱导相比单一水分胁迫、铅胁迫条件下有所增加,表明此时的水分胁迫与铅胁迫间的交互作用对 POD 活性的诱导表现为协同作用,而 POD 活性受到轻度水分胁迫处理下(T2)和重度水分胁迫处理下(T3)的交互胁迫的诱导相比单一水分胁迫、铅胁迫条件下有所降低,表明此时的水分胁迫与铅胁迫间的交互作用对 POD 活性的诱导表现为拮抗作用;SOD 活性受到交互胁迫的诱导相比单一水分胁迫条件下有所增加,表明水分胁迫与铅胁迫间的交互作用对 SOD 活性的诱导表现为协同作用。

随着水分胁迫的加剧和铅胁迫的增加,国槐幼苗叶片的 MDA 含量变化呈升高趋势,赵杨迪等^[23]报道玉竹叶片的 MDA 含量随着 Pb 处理浓度的升高而增加,与本研究结果相一致。其原因可能是由于水分胁迫、铅胁迫的增加,使植物体内自由基的含量逐渐积累,不能及时被清除,造成细胞膜脂严重氧化,细胞受到伤害^[7]。在铅含量 $1\ 000\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 60%水分胁迫处理下,国槐幼苗叶片 MDA 含量明显增加,与对照的差异达到了极显著水平($P<0.01$),说明铅离子和水分胁迫对生物膜系统造成伤害,影响植株的正常代谢。同时,钟楠等^[1]报道镉离子和水分胁迫会对刺槐幼苗生物膜系统造成伤害,与本研究结果相类似。但是交互胁迫下的国槐幼苗叶片 MDA 含量基本上都低于单一水分胁迫处理,有利于国槐在交互胁迫下提高自我保护能力,这可能与国槐较强的耐性有关。

可溶性糖含量是造成植物体内总溶质浓度变化的主要因素。在逆境条件下,植物体内可溶性糖累积增多,植株细胞液浓度增大,有利于其抗性的提高^[24]。

本研究结果显示,国槐幼苗叶片可溶性糖含量的变化比较复杂,但总体上呈先升后降的趋势。张义贤等^[9]曾报道大麦可溶性糖含量随着 Pb 处理浓度的升高而呈先增加后下降的趋势;刘秀梅等^[25]对小麦研究也表明,可溶性糖含量随着 Pb 胁迫的加剧呈先升后降的趋势,这些均与本研究结果相一致。其原因可能是由于适度的逆境胁迫能够促进植物正常的生理代谢活动,茎叶内可溶性糖的含量有不同程度的增加,但随着逆境胁迫的加剧,其促进作用又逐渐变为抑制作用^[25]。在铅含量 $2\ 000\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 处理下,各水分处理下的可溶性糖含量都低于对照,可能由于 Pb 及其交互胁迫急剧地降低国槐幼苗叶片的光合作用、叶内不溶性糖和蛋白质的分解以及运输受阻原因引起^[26]。但是在铅含量 $500\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 40%水分胁迫处理下,可溶性糖含量显著高于对照($P<0.01$),且 MDA 含量与对照无明显差异,说明国槐在适度的交互胁迫下具有很好的保护自身的能力。

自由基能损伤细胞膜中的不饱和脂肪酸和蛋白质,使细胞渗透压发生变化,细胞内的一些物质外流,并使重金属更易进入细胞内,引起更严重的毒害作用。而脯氨酸的积累有助于调节细胞渗透压,保持膜结构的完整性,保护蛋白质分子,增加蛋白质分子间的水合作用,并为植物体从胁迫中恢复提供能量^[27]。本研究结果显示,在 40%水分胁迫下,各交互胁迫水平的国槐幼苗叶片脯氨酸的含量都与对照呈极显著差异($P<0.01$),且随着铅胁迫的增加,脯氨酸含量逐渐升高,在铅含量 $2\ 000\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 40%水分胁迫处理下,脯氨酸含量为对照的 28.06 倍,可见,重金属 Pb 和水分胁迫对叶片中脯氨酸的积累有协同促进作用,是国槐幼苗对交互胁迫的一种生理适应^[27]。同时,这也显示了国槐具有种植于干旱、半干旱地区铅污染土壤的潜力。

4 结论

在水分和铅交互胁迫下,国槐幼苗叶片内保护酶 POD、SOD 活性的变化以及 MDA 含量、可溶性糖含量、脯氨酸含量的变化都表明了国槐幼苗对水分和铅交互胁迫有一定的耐受性,适当的交互胁迫(铅含量 $300、500\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 40%水分处理)有利于提高国槐的抗逆性,而且,鉴于国槐生物产量大,有巨大的根、茎、叶面积作用于环境,因此,国槐具有种植于干旱、半干旱地区铅污染土壤的潜力。本研究仅对幼苗生长初期,水分和铅交互胁迫条件下国槐的生理生化特性

进行了初步探索,其他生长阶段的生理生化响应特征及其机理还有待于进一步研究。

参考文献:

- [1] 钟楠,王进鑫,马惠芳,等.水分和镉交互胁迫对刺槐幼苗抗氧化酶活性的影响[J].西北林学院学报,2010,25(6):5-9.
ZHONG Nan, WANG Jin-xin, MA Hui-fang, et al. Effects of interactive stress of drought and cadmium on antioxidant enzyme activity of *Robinia pseudoacacia* seedlings[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2010, 25(6):5-9.
- [2] 陈红琳,张世熔,李婷,等.汉源铅锌矿区植物对Pb和Zn的积累及耐性研究[J].农业环境科学学报,2007,26(2):505-509.
CHEN Hong-lin, ZHANG Shi-rong, LI Ting, et al. Heavy metal accumulation and tolerance of plants at zinc-lead mine tailings in Hanyuan[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(2):505-509.
- [3] 束文圣,叶志鸿,张志权,等.华南铅锌尾矿生态恢复的理论与实践[J].生态学报,2003,23(8):1629-1639.
SHU Wen-sheng, YE Zhi-hong, ZHANG Zhi-quan, et al. Restoration of lead and zinc mine tailings in South China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(8):1629-1639.
- [4] 孙庆业,任冠举,杨林章,等.自然植物群落对铜尾矿废弃地土壤酶活性的影响[J].土壤学报,2005,42(1):37-43.
SUN Qing-ye, REN Guan-ju, YANG Lin-zhang, et al. Effect of natural plant communities on soil enzyme activities in deserted copper mine tailings dumps[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42(1):37-43.
- [5] 曹德菊,王光宇,汪琰,等.安徽铜陵矿区优势植物的重金属富集特性研究[J].农业环境科学学报,2005,24(6):1079-1082.
CAO De-ju, WANG Guang-yu, WANG Yan, et al. Accumulation of heavy metals in dominant plants growing on mine tailing areas in Anhui Tongling[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(6):1079-1082.
- [6] 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 stress on the activity of antioxidant enzymes in wheat seedling[J]. *Environmental Science*, 2001, 22(5):108-111.
- [7] 秦建桥,赵华荣,胡萌,等.铅胁迫下不同生态型五节芒(*Miscanthus floridulus*)的抗氧化系统的差异研究[J].生态环境学报,2011,20(3):525-531.
QIN Jian-qiao, ZHAO Hua-rong, HU Meng, et al. Physiological metabolism and protective enzyme activity of different ecotypes of *Miscanthus floridulus* under Pb stress[J]. *Ecology and Environmental Science*, 2011, 20(3):525-531.
- [8] 陈丽娜,唐明灯,艾绍英,等. Pb胁迫条件下3种叶菜的生长和生理响应及其抗性差异[J].植物资源与环境学报,2010,19(4):78-83.
CHEN Li-na, TANG Ming-deng, AI Shao-ying, et al. Growth and physiological responses and variance of Pb resistance of three leaf vegetables under Pb stress[J]. *Journal of Plant Resources and Environment*, 2010, 19(4):78-83.
- [9] 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):43-46.
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]. *Bulletin of Botanical Research*, 2008, 28(1):43-46.
- [10] 夏增禄,李森照.土壤元素背景值及其研究方法[M].北京:气象出版社,1987:320.
XIA Zeng-lu, LI Sen-zhao. Background values of elements in soils and its research methods[M]. Beijing: Meteorological Press, 1987:320.
- [11] Verplancke H J W, De Strooper E B A, De Boodt M F L. Water saving techniques for plant growth[M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1992:170-194.
- [12] 余新晓.土壤动力水文学及其应用[M].北京:中国林业出版社,1995:148-166.
YU Xin-xiao. Dynamic hydrology of soil and its application[M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 1995:148-166.
- [13] 王进鑫,黄宝龙,王明春,等.侧柏幼树不同生长阶段对水分的敏感性与蒸腾效率[J].生态学报,2005,25(4):711-718.
WANG Jin-xin, HUANG Bao-long, WANG Ming-chun, et al. Sensitivity of *Platycladus orientalis* young tree to water stress and its transpiration efficiency at different growth stages during annual growth period[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(4):711-718.
- [14] Hisao T C. Plant responses to water stress[J]. *Ann Rev Plant Physiology*, 1973, 24:519-570.
- [15] 余新晓,张建军,朱金兆.黄土地区防护林生态系统土壤水分条件的分析与评价[J].林业科学,1996,32(4):289-296.
YU Xin-xiao, ZHANG Jian-jun, ZHU Jin-zhao. Analysis and evaluation of soil water conditions of protective forest ecosystem[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 1996, 32(4):289-296.
- [16] 中华人民共和国水利部.中华人民共和国水利行业标准:SL 424—2008 旱情等级标准[S].北京:中国水利水电出版社,2009.
The Ministry of the People's Republic of China. SL 424—2008. Industry standards of water resources of People's Republic of China: Standard of classification for drought severity[S]. Beijing: China Water Power Press, 2009.
- [17] 高俊凤.植物生理学实验技术[M].西安:世界图书出版社,2000.
GAO Jun-feng. Experimental technology of plant physiology[M]. Xi'an: World Book Publishing House, 2000.
- [18] 邵雪玲,毛歆,郭一清.生物化学与分子生物学实验指导[M].武汉:武汉大学出版社,2003:159-160.
SHAO Xue-ling, MAO Xin, GUO Yi-qing. Experimental instruction in biochemistry and molecular biology[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2003:159-160.
- [19] 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 Hai-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.
- [20] 张金彪,周黎青,雷永强,等.植物源 POD 和 CAT 的筛选及其与重金属的相互作用[J].福建农林大学学报:自然科学版,2009,38

- (3):295-300.
- ZHANG Jin-biao, ZHOU Bi-qing, LEI Yong-cheng, et al. Screening of botanical POD and CAT and their interaction with heavy metals[J]. *Journal of Fujian Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition)*, 2009, 38(3):295-300.
- [21] 房 娟, 陈光才, 楼 崇, 等. Pb 胁迫对柳树根系形态和生理特性的影响[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(15):8951-8953, 8989.
- FANG Juan, CHEN Guang-cai, LOU Chong, et al. Effect of lead stress on root morphology and physical characteristic of willow (*Salix* spp.) [J]. *Journal of Anhui Agri Sci*, 2011, 39(15):8951-8953, 8989.
- [22] 何 冰, 何计兴, 何新华, 等. 铅胁迫对杨梅生理特性的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(6):1263-1268.
- HE Bing, HE Ji-xing, HE Xin-hua, et al. Effects of lead on physiological characteristics of baylerry (*Myrica rubra*) seedlings[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(6):1263-1268.
- [23] 赵杨迪, 潘远智, 刘碧英. 玉竹对土壤 Cd Pb 的吸收和耐性研究[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(11):2087-2093.
- ZHAO Yang-di, PAN Yuan-zhi, LIU Bi-ying. Absorption and tolerance of polygonatum odoratum to Cd and Pb in soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(11):2087-2093.
- [24] 李 洁, 武杭菊, 胡景江, 等. 干旱-低温交叉逆境下小麦渗透调节能力的变化与交叉适应的关系[J]. 干旱地区农业研究, 2009, 27(6):149-153.
- LI Jie, WU Hang-ju, HU Jing-jiang, et al. Relationship between changes of osmotic adjustment ability of wheat under drought and cold cross-stress and cross-adaptation[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2009, 27(6):149-153.
- [25] 刘秀梅, 聂俊华, 王庆仁. Pb 对农作物的生理生态效应 [J]. 农业环境保护, 2002, 21(3):201-203.
- LIU Xiu-mei, NIE Jun-hua, WANG Qing-ren. Eco-physiological response of several crops to lead[J]. *Agro-environmental Protection*, 2002, 21(3):201-203.
- [26] 李荣春. Cd、Pb 及其复合污染对烤烟叶片生理生化及细胞亚显微结构的影响[J]. 植物生态学报, 2000, 24(2):238-242.
- LI Rong-chun. Effects of cadmium and lead on physiological and ultra-structural features in tobacco leaves[J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2000, 24(2):238-242.
- [27] 寇士伟, 倪高风, 马岚婷, 等. Cd-Pb-Cu 复合污染对芥菜生长及生理特性的影响[J]. 环境科学研究, 2011, 24(3):281-286.
- KOU Shi-wei, NI Gao-feng, MA Lan-ting, et al. Effects of Cd, Pb and Cu compound pollution on the growth and physiological characteristics of mustard plants[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2011, 24(3):281-286.