

土壤重金属胁迫下 3 种观赏植物生理抗性

郭 晖,王 妞,张家洋*

(新乡学院 生命科学技术学院,河南 新乡 453000)

摘 要:为探讨蔓绿绒(*Philodendron martianum*)、合果芋(*Syngonium podophyllum*)和绿萝(*Scindapsus aureum*)的抗重金属污染能力,采用盆栽试验研究不同浓度铅镉处理对 3 种植物生理生化指标的影响。结果表明:随着铅镉处理浓度的增加,蔓绿绒和绿萝叶片游离脯氨酸含量随之升高,且蔓绿绒的增加幅度大于绿萝,而合果芋叶片游离脯氨酸含量则先升后降;除合果芋可溶性蛋白含量随着处理浓度的增加呈现先升高后下降的趋势外,蔓绿绒和绿萝均呈先升后降再略有上升的趋势;丙二醛和相对电导率含量均随胁迫浓度的增加而增大,增大幅度由高到低依次是合果芋、绿萝、蔓绿绒;SOD 和 POD 活性均随处理浓度的增加先升高后降低,降低幅度由高到低依次是蔓绿绒、绿萝、合果芋。综合各指标变化情况,3 种观赏植物对重金属 Pb²⁺、Cd²⁺ 的抗性排序为:蔓绿绒>绿萝>合果芋。

关键词:铅镉胁迫;观赏植物;生理抗性

中图分类号:S718.516 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2017)03-0062-05

Physiological Resistance of Three Ornamental Plants to Soil Heavy Metal Stress

GUO Hui,WANG Niu,ZHANG Jia-yang*

(School of Life Science and Technology,Xinxiang University,Xinxiang, Henan 45300,China)

Abstract:In order to explore the physiological resistance rule of three ornamental plants (*Philodendron martianum*,*Syngonium podophyllum*,*Scindapsus aureum*) under the stress of two heavy metals (lead and cadmium),a pot experiment was conducted to study relative physiological indices under different stress concentrations. The results showed that the contents of proline of *P. martianum* and *S. aureum* increased with the stress concentration,and the increase range of *P. martianum* was greater than that of *S. aureum*. The content of proline in *S. podophyllum* increased first and then decreased. The content of soluble protein in *S. podophyllum* increased first and then decreased with the increase of stress concentration,while in *P. martianum* and *S. aureum*,it exhibited the tendency of increase-decrease-slight increase. The MDA content and relative conductivity increased with the increase of stress concentration,and the increase range was in the order of *S. podophyllum*>*S. aureum*>*P. martianum*. Superoxide dismutase and peroxidase activity increased first and then decreased,and the decrease range from high to low was *P. martianum*,*S. aureum*,*S. podophyllum*. Considering index changes,the resistant capability of the three plants to heavy metals was *P. martianum*>*S. aureum*>*S. podophyllum*.

Key words:Pb and Cd stress; ornamental plant; physiological resistance

随着工业化和现代化步伐的加快,由人为因素形成的环境变化和污染已直接或间接地威胁到城市的生态系统以及居民的身心健康。在诸多环境胁迫因素中,土壤重金属污染是目前人类所面对的越来

收稿日期:2016-11-09 修回日期:2016-11-24
基金项目:河南省教育厅高等学校科研项目(17A180033);新乡市重点科技攻关项目(ZG14035)。
作者简介:郭 晖,男,讲师,硕士,研究方向:园林植物栽培及生理。E-mail:290711657@qq.com
* 通信作者:张家洋,男,副教授,硕士,研究方向:环境生态学。E-mail:skxsyszr@163.com

越严重的环境问题之一^[1-2]。重金属污染不仅降低了土壤的肥力,使土壤的可利用性降低,而且影响植物生长发育,最终通过食物链的富集作用对人类健康和环境安全造成危害^[3]。在重金属严重污染的土壤上很难构成植物群落的多样性,但是少数植物仍然能够在重金属污染的土壤中可进行正常的生理代谢,并形成特定的耐性机制,以适应环境的变化^[4-5]。

观赏性植物不仅具有美化环境的功能,而且具有修复重金属的作用^[6-7]。全世界广泛栽培的天南星科草本植物在我国各省种植越来越普遍,应用于室内盆栽、绿色支柱造型,更多用于室外半阴处作地被覆盖,是极具发展潜力的观叶植物。目前对于其研究多集中在繁殖方式和栽培技术等方面^[8-10],关于其抗重金属的研究报道尚少。为此,本研究选择3种观赏性的天南星科植物蔓绿绒、合果芋和绿萝为研究对象,采用不同浓度的 $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ 、 CdCl_2 溶液进行处理,就3种植物对重金属 Pb、Cd 的生理耐受性进行研究,为其用于受重金属污染土壤的植物修复提供一定的理论依据和参考。

1 材料与方法

1.1 供试材料与处理

试验于2016年4月10日在新乡学院校内试验实训基地(35.18°N, 113.52°E)内进行。供试植物蔓绿绒(*Philodendron martianum*)、合果芋(*Syn-gonium podophyllum*)和绿萝(*Scindapsus aureum*)均属天南星科(Araceae),植物材料统一采购于新乡市花卉市场。供试土壤取自新乡卫辉市农科院农业示范基地,土壤经自然风干后去除杂物、研磨、过100目筛,测定其基本理化性质及土壤重金属 Cd、Pb 含量背景值。供试土壤为正常耕作的石灰性轻壤质潮土。土壤(0~15 cm)有机质含量9.56%, pH7.83, 全N含量3.50 g·kg⁻¹, 全P含量1.41 g·kg⁻¹, 全K含量21.37 g·kg⁻¹, 碱解N含量135.43 μg·kg⁻¹, 速效P含量13.67 μg·kg⁻¹, 速效K含量210.90 μg·kg⁻¹。土壤 Pb、Cd 含量背景值分别是13.32、0.076 mg·kg⁻¹。

1.2 试验设计

盆栽试验在室外防雨棚内进行,采用 Pb、Cd 2 因素完全设计。Pb 源 [$\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$], Cd 源 (CdCl_2)。以不加 Pb、Cd 为对照(CK), Pb、Cd 处理各设4个水平: Pb1(200 mg·kg⁻¹)、Pb2(500 mg·kg⁻¹)、Pb3(1 000 mg·kg⁻¹)和 Pb4(2 000 mg·kg⁻¹), Cd1(0.3 mg·kg⁻¹)、Cd2(1.0 mg·kg⁻¹)、Cd3(5.0 mg·kg⁻¹)和 Cd4(10.0 mg·kg⁻¹)。每处理重复3次,共90盆,随机区组排列。

盆栽试验用盆为棕色不透光塑料盆,装盆前于盆底垫铺尼龙纱。各处理浓度的 $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ 、 CdCl_2 溶液均匀搅拌至准备好的土壤中,装入塑料盆内,每盆装土折合干重10 kg。将试验材料预培养35 d后选取生长健壮、长势基本一致、无病虫害的植株移栽入塑料盆内进行重金属胁迫试验,每盆1株,每处理栽植6盆,在植株生长期间,每盆适时松土,并根据土壤干湿状况和作物长势情况每次用等量的水进行浇灌养护,并进行病虫害防治。

酸性茚三酮法检测游离脯氨酸(520 nm);考马斯亮蓝染色法测定可溶性蛋白含量(595 nm);硫代巴比妥酸法检测丙二醛(532、600 nm 和 450 nm);电导仪测定相对电导率(浸泡法);氮蓝四唑光化还原法测定超氧化物歧化酶(SOD)活性(560 nm), SOD 活性单位以抑制 NBT 光化还原50%所需酶量为1个酶活单位(U);愈创木酚法测定过氧化物酶(POD)活性(470 nm),以每 min OD 值变化(升高)0.01 为1个酶活性单位(U)^[11]。

2 结果与分析

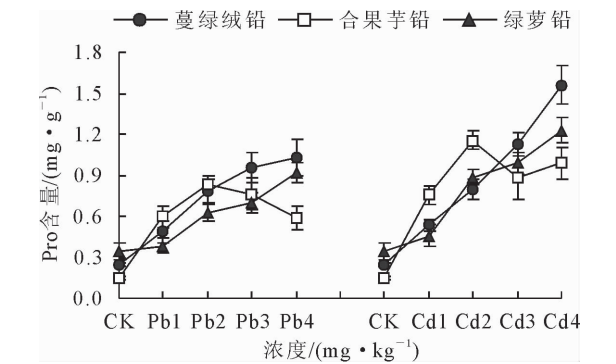
2.1 铅镉胁迫对3种观赏植物游离脯氨酸(Pro)含量的影响

铅胁迫40 d下,蔓绿绒和绿萝叶片游离脯氨酸含量随着铅处理浓度的增加呈现逐渐增加的趋势,均在 Pb4(2 000 mg·kg⁻¹)下达最大值,分别是对照的4.20倍和2.70倍;而合果芋叶片游离脯氨酸含量则呈现先增加后下降的趋势,即在 Pb2(500 mg·kg⁻¹)下达到最大值,是对照的5.51倍,高于该浓度时则迅速下降,但仍是对照的3.88倍。与铅胁迫类似,镉胁迫40 d下也呈现出相应的变化规律,蔓绿绒和绿萝叶片游离脯氨酸含量随着镉处理浓度的增加而迅速增加,均在 Cd4(10.0 mg·kg⁻¹)时达到最大值,分别是对照的6.35倍和3.57倍。而合果芋叶片游离脯氨酸含量则呈现“升→降→升”的变化趋势,在 Cd2(1.0 mg·kg⁻¹)下达到最大值,是对照的7.61倍(图1)。

2.2 铅镉胁迫对3种观赏植物可溶性蛋白(SP)含量的影响

铅镉胁迫下,蔓绿绒和绿萝叶片可溶性蛋白含量均随着处理浓度的增加呈现先迅速上升然后迅速下降最后缓慢上升的变化趋势,且均在 Pb2(500 mg·kg⁻¹)和 Cd2(1.0 mg·kg⁻¹)时达到最大值(图2)。尤其以蔓绿绒的增加幅度最大,其可溶性蛋白的含量分别是对照的5.10倍(Pb2)和5.22(Cd2)倍,之后在高浓度下可溶性蛋白含量有所下降但仍然高于对照。

随着铅镉处理浓度的增加,合果芋可溶性蛋白含量呈现先升后降的趋势,均在 Pb2(500 mg · kg⁻¹)和 Cd2(1.0 mg · kg⁻¹)时达到最大值,在 Pb4(2 000 mg · kg⁻¹)和 Cd4(10.0 mg · kg⁻¹)时达到最小值(与对照相比减少了 33.57%)。



注:Pb1、Pb2、Pb3 和 Pb4 分别为 200、500、1 000 mg · kg⁻¹ 和 2 000 mg · kg⁻¹ 铅 4 个处理水平,Cd1、Cd2、Cd3 和 Cd4 分别为 0.3、1.0、5.0 mg · kg⁻¹ 和 10.0 mg · kg⁻¹ 镉 4 个水平,CK 为对照,下同。

图 1 Pb、Cd 胁迫对 3 种观赏植物脯氨酸(Pro)含量的影响

Fig. 1 Effects of heavy metal stress on free proline content of three ornamental plants

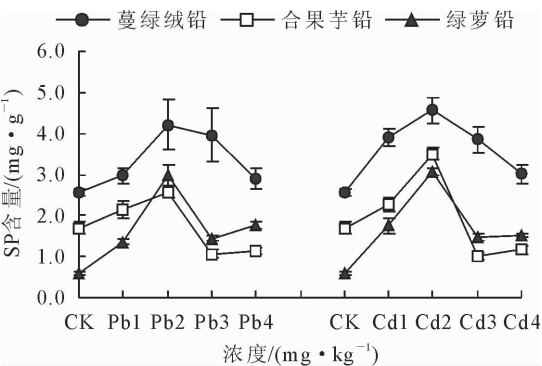


图 2 Pb、Cd 胁迫对 3 种观赏植物可溶性蛋白(SP)含量的影响

Fig. 2 Effects of heavy metal stress on soluble protein content of three ornamental plants

2.3 铅镉胁迫对 3 种观赏植物丙二醛(MDA)含量的影响

随着重金属铅浓度的增大,3 种植物叶片 MDA 的含量均呈现逐渐上升的趋势,蔓绿绒、合果芋和绿萝叶片丙二醛含量分别高于对照 17.85% ~ 87.53%、138.21% ~ 372.76% 和 13.27% ~ 91.73%。同样,随着镉处理浓度的增加,3 种植物叶片丙二醛含量分别高于对照 12.04% ~ 103.87%、151.63% ~ 482.93% 和 10.96% ~ 112.50%(图 3)。

2.4 铅镉胁迫对 3 种观赏植物相对电导率(REC)含量的影响

在铅镉胁迫下,蔓绿绒、合果芋和绿萝叶片的相对电导率均呈现上升的趋势,即从轻度胁迫到重度

胁迫,3 种植物叶片的相对电导率逐渐上升,均在处理水平 4 处达到最大值。即在 Pb4 胁迫下,蔓绿绒、合果芋和绿萝叶片相对电导率分别是对照的 1.24 倍、1.38 倍和 1.29 倍;在 Cd4 下,3 种植物叶片相对电导率分别是对照的 1.28 倍、1.44 倍和 1.37 倍。同丙二醛变化情况一样,铅镉胁迫下 3 种植物相对电导率含量均不同程度增加,增加幅度由高到低依次是合果芋、绿萝、蔓绿绒(图 4)。

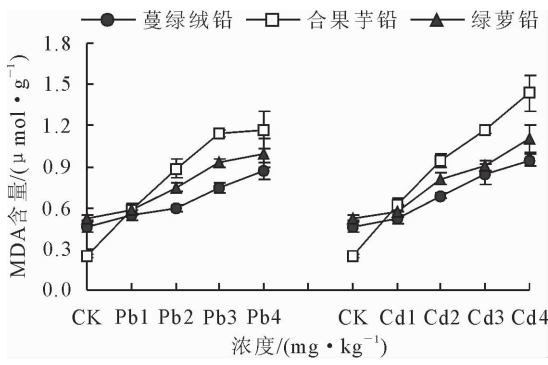


图 3 Pb、Cd 胁迫对 3 种观赏植物丙二醛(MDA)含量的影响

Fig. 3 Effects of heavy metal stress on malondialdehyde content of three ornamental plants

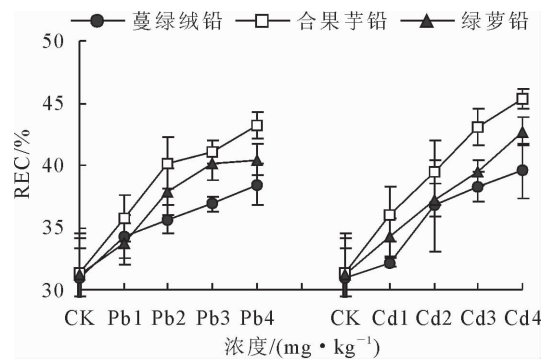


图 4 Pb、Cd 胁迫对 3 种观赏植物电导率(REC)含量的影响

Fig. 4 Effects of heavy metal stress on relative electrical conductivity of three ornamental plants

2.5 铅镉胁迫对 3 种观赏植物超氧化物歧化酶(SOD)含量的影响

在铅胁迫下,蔓绿绒、合果芋和绿萝叶片的 SOD 活性随着处理浓度的升高先增加后降低,其中蔓绿绒在 Pb3(1 000 mg · kg⁻¹)处理时 SOD 活性最高,与对照相比增加 71.64%,之后迅速下降但仍高于对照;而合果芋和绿萝均在 Pb2(500 mg · kg⁻¹)处理时活性最高,与对照相比分别增加 32.24%和 30.65%,之后迅速下降,在最大处理浓度时酶活性最低且低于对照(图 5)。

在镉胁迫下蔓绿绒、合果芋和绿萝叶片的 SOD 活性随着处理浓度的增加先升后降。其中,蔓绿绒和绿萝叶片在 Cd3(5.0 mg · kg⁻¹)处理时 SOD 活性最高,分别比对照增加 73.57%和 32.93%;而合

果芋叶片 SOD 活性在 Cd2(1.0 mg · kg⁻¹)下达到最大值,高于对照 41.44%。在最大处理浓度下,合果芋和绿萝叶片 SOD 活性与对照相比有所降低,分别低于对照 9.31%和 4.97%。

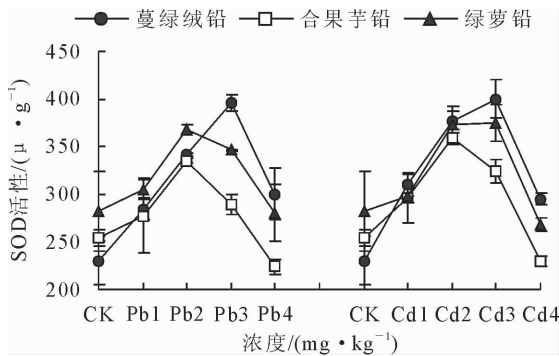


图5 Pb、Cd 胁迫对 3 种观赏植物超氧化物歧化酶(SOD)活性的影响

Fig. 5 Effects of heavy metal stress on SOD activity of three ornamental plants

2.6 铅镉胁迫对 3 种观赏植物过氧化物酶(POD)含量的影响

在铅胁迫下,蔓绿绒 POD 活性随着铅浓度的升高先增加后降低,在 Pb3(1 000 mg · kg⁻¹)处理时 POD 活性最高(是对照的 3.80 倍),之后急剧降低,但仍然显著高于对照(是对照的 2.19 倍)。而合果芋和绿萝叶片 POD 活性则在 Pb2(500 mg · kg⁻¹)时达到最大值,分别是对照的 3.13 倍和 3.63 倍,之后迅速下降且活性接近于对照。镉胁迫下,蔓绿绒、合果芋和绿萝 POD 活性均随着胁迫程度的加剧呈现先升高后下降的趋势,且均在 Cd3(5.0 mg · kg⁻¹)处理时活性最高,分别是对照的 3.62 倍、3.55 倍和 5.01 倍,之后 POD 活性迅速下降,甚至低于对照(合果芋)(图 6)。

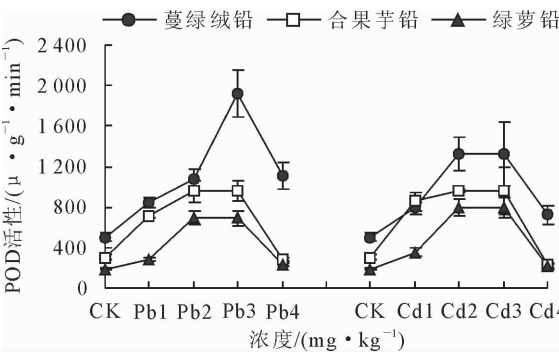


图6 Pb、Cd 胁迫对 3 种观赏植物过氧化物酶(POD)活性的影响

Fig. 6 Effects of heavy metal stress on POD activity of three ornamental plants

3 结论与讨论

游离脯氨酸含量的变化常作为植物逆境生理的

一个重要指标,是植物逆境胁迫下所产生的一种抗性物质。在逆境胁迫下脯氨酸作为一种渗透调节物质,其含量积累的意义在于使细胞和组织的水分保持平衡,进而保持膜结构的完整性使植物免受伤害^[12]。本试验研究结果表明,随着铅镉处理浓度的增加,蔓绿绒和绿萝叶片游离脯氨酸含量随之升高,且蔓绿绒的增加幅度大于绿萝,说明这 2 种植物都表现出了良好的抗污染能力,且蔓绿绒因渗透调节物质含量的增加而在细胞适应性代谢调节能力上最强。而合果芋叶片游离脯氨酸含量则在中等处理浓度(Pb2 和 Cd2)下达到最高值,但在高浓度处理下含量有所下降,说明合果芋对铅、镉污染的吸收和净化是有一定限度的,存在一定的阈值。

逆境胁迫能够造成植物体碳氮代谢功能的紊乱,进而影响可溶性蛋白的含量。一定浓度的重金属离子进入植物体内后,能与蛋白质、酶和核酸等大分子物质结合并替代其在发挥功能时所需的特定元素(如镁离子),从而使其活性降低^[13]。本试验中,合果芋叶片可溶性蛋白含量呈现先升后降的趋势,说明低浓度的重金属胁迫有利于可溶性蛋白含量的积累,而高浓度下可溶性蛋白合成能力减弱;而蔓绿绒和绿萝叶片则均呈“升→降→升”的变化趋势,可能是低浓度的铅作为一种逆境刺激因子促进了可溶性蛋白的合成,而当铅超过一定浓度时则与蛋白质结合使其变性或干扰植物体内的蛋白质代谢,使蛋白质的合成受阻,但随着浓度的进一步升高到防御系统的刺激阈值时,蔓绿绒和绿萝的防御机制开始启动,进而生成相应的解毒物质,从而使可溶性蛋白含量有所回升。

在逆境下,细胞膜发生膜脂过氧化作用,而 MDA 是膜脂过氧化作用的产物,因此 MDA 含量常用来表示植物对逆境条件反应的强弱^[14]。本试验随着重金属浓度的增大,3 种植物丙二醛含量均不同程度增加,尤其是合果芋增加幅度最大,表明其细胞膜脂过氧化伤害程度加剧,清除活性氧的能力有所降低,即受到的受伤害程度最大。关于植物在盐碱及重金属胁迫处理下 MDA 含量的增加报道很多,本研究与张小艾^[15]等二月兰植株体内累积的 MDA 含量呈先降后升的趋势不一致。刘俊^[16]等大豆植株体内累积的 MDA 量增加,与本研究结论相一致。可以看出,植物在逆境胁迫下体内 MDA 的变化情况可因植物种类、胁迫浓度和胁迫时间的不同而有所差异。

生物膜结构和功能的稳定性与植物的抗逆性密切相关。在重金属胁迫下细胞膜受到损伤,导致渗透物质大量外流,引起相对电导率升高^[17]。孔德

政^[18]通过研究铅、镉和锌胁迫对荷花生理生化影响表明,随着处理浓度的增加,荷叶的相对电导率呈逐渐上升的趋势,与之结论类似,本研究表明,随着处理浓度的增加,相对电导率逐渐升高,升高幅度因物种而异,变化幅度依次为合果芋>绿萝>蔓绿绒。

重金属胁迫和其他形式的胁迫相似,也能导致大量活性氧自由基的产生,该类自由基能够对抗重金属的毒害,从而使毒害症状减轻。重金属胁迫下,植物保护酶系统(POD、SOD)会受到不同程度的影响。如陈宏^[19]研究发现 Cd 胁迫可导致小麦保护性酶活性增强。刘大林^[20]等发现镉胁迫可引起 SOD、POD、CAT 活性的改变。本试验研究表明,胁迫强度不同,2 种植物酶活性水平也不相同。如蔓绿绒 POD 和 SOD 活性在中高铅镉浓度的情况下,活性迅速增加,显示了其清除氧自由基能力增强,表明其作为抗氧化保护酶发挥着重要作用,之后活性降低但仍然显著高于对照,说明铅镉胁迫对抗氧化保护酶清除机制未产生明显的抑制作用。而合果芋和绿萝尽管在低浓度的铅镉胁迫下具有较强的消除氧自由基的功能,但在较高浓度胁迫下却表现酶活性降低,甚至低于对照(合果芋),该结果表明在重度重金属胁迫(处理水平 4)下合果芋的生理机能受到了显著的抑制。可见,蔓绿绒在重金属胁迫下,能耐重度胁迫,作为良好的观叶植物在重金属污染土壤中值得进一步开发与利用。

本试验是在盆栽条件下进行的,在自然条件下重金属胁迫对植物生长的影响将更为复杂,这是因为土壤是一个非常复杂的系统,重金属一旦通过废水、污泥、农药和大气沉降等各种途径进入土壤,就会发生一系列物理变化和化学反应,并受到土壤 pH 值、有机质的含量、土壤胶体的种类、数量等因素的影响,以交换态、碳酸盐态、有机态和残渣态等多种形态存在于土壤中。因此,对于在水、肥、气、热等不同的土壤环境条件下,蔓绿绒、合果芋和绿萝抗重金属 Pb、Cd 胁迫能力的大小情况如何,还需进一步研究,以便为胁迫污染修复生态工程植物种类的选择提供更科学的依据。

参考文献:

[1] MANGABEIRA P A, FERREIRA A S, ALEX-ALAN F, *et al.* Compartmentalization and ultrastructural alterations induced by chromium in aquatic macrophytes[J]. *Biometals*, 2011, 24 (6):1017-1026.

[2] CHEN J. Rapid urbanization in China: a real challenge to soft protection and food security[J]. *Catena*, 2007, 69(1):1-15.

[3] 段德超,于明革,施积炎.植物对铅的吸收、转运、累积和解毒机制研究进展[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(1):287-296.

DUAN D C, YU M G, SHI J Y. Research advances in uptake, translocation, accumulation and detoxification of Pb in plants [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25 (1): 287-296. (in Chinese)

[4] 吴志强,顾尚义,李海英,等.重金属污染土壤的植物修复及超积累植物的研究进展[J]. *环境科学与管理*, 2007, 32 (3):67-72.

[5] 杨世勇,王方,谢建春.重金属对植物的毒害及植物的耐性机制[J]. *安徽师范大学学报:自然科学版*, 2004, 27(1):71-74.

YANG S Y, WANG F, XIE J C. Analysis on the types and characteristics and the position in the tourism of the tourism culture[J]. *Journal of Anhui Normal University: Natural Science*, 2004, 27(1):71-74. (in Chinese)

[6] GULZAR S, KHAN M A, UNGAR I A. Salt tolerance of a coastal salt marsh grass [J]. *Commun Soil Sci. Plant Anal.*, 2003, 34(17/18):2595-2605.

[7] GADALLALL M A A. Effects of proline and glycinebetaine on *Vicia faba* responses to salt stress[J]. *Biol Plant*, 1999, 42(2):249-257.

[8] 康月惠.希望蔓绿绒离体快繁技术研究[J]. *亚热带植物科学*, 2012(3):73-75.

[9] 叶飞,建德锋.合果芋组培苗的生根与移栽技术研究[J]. *江苏农业科学*, 2012, 40(11):196-197.

[10] 张玉晶.北方室内盆栽绿萝的栽培养护管理技术[J]. *北方园艺*, 2016(3):208.

[11] 张志良.植物生理学实验指导[M].北京:高等教育出版社, 2010.

[12] 朱红霞,张家洋,张统.绿航绿萝和金边吊兰对铅胁迫的生理响应[J]. *西北林学院学报*, 2015, 30(5):91-97.

ZHU H X, ZHANG J Y, ZHANG T. Physiological responses of *Scindapsus aureus* and *Chlorophytum comosum* to lead stress[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2015, 30 (5):91-97. (in Chinese)

[13] 张义贤.重金属对大麦毒性的研究[J]. *环境科学学报*, 1997, 17(2):199-205.

ZHANG Y X. Toxicity of heavy metals to *Hordeum vulgare* [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1997, 17(2):199-205. (in Chinese)

[14] 沙翠芸,孟庆瑞,王静.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.

SHA C Y, MENG Q R, WANG J. Physiological responses of two colored-leaf species to Pb stress[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2011, 26(4):36-40. (in Chinese)

[15] 张小艾,李名扬,汪志辉,等.重金属及盐碱对二月兰幼苗生长和生理生化影响[J]. *草业学报*, 2013, 22(2):187-194.

ZHANG X A, LI M Y, WANG Z H, *et al.* Effects of heavy metals and saline-alkali on seedlings growth, physiological-biochemical of *Oryzophragmus violaeus* [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2013, 22(2):187-194. (in Chinese)

[16] 刘俊,廖柏寒,周航,等.镉胁迫下大豆生长发育的生理生态特征[J]. *生态学报*, 2010, 30(2):333-340.

LIU J, LIAO B H, ZHOU H, *et al.* Main characteristics of physiological-ecological dynamics of soybean during the growth cycle under Cd stress[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(2):333-340. (in Chinese)

[7] 杨小波,吴庆书,邹伟,等. 城市生态学[M]. 北京:科学出版社, 2001:129-147.

[8] 马树华,王庆成,李亚藏. 汽车尾气对四种北方阔叶树叶叶绿素荧光特性的影响[J]. 生态学杂志,2005,24(1):15-20.
MA S H,WANG Q C,LI Y C. Effects of automobile exhaust on chlorophyll fluorescence of four northern deciduous trees [J]. Chinese Journal of Ecology,2005,24(1):15-20. (in Chinese)

[9] 马树华. 四种北方阔叶树苗木对汽车尾气污染的生理反应及抗性评价[D]. 哈尔滨:东北林业大学,2004.

[10] 顾翠花,王懿祥,白尚斌,等. 四种园林植物对土壤镉污染的耐受性[J]. 生态学报,2015,35(8):2536-2544.
GU C H,WANG Y X,BAI S B,*et al.* Tolerance and accumulation of four ornamental species seedlings to soil cadmium contamination[J]. Acta Ecologica Sinica,2015,35(8):2536-2544.

[11] 王荣,胡海清. 白桦叶片对火烧的的生理响应激活后恢复研究[J]. 北京林业大学学报,2013,35(6):1-6.
WANG R, HU H Q. Physiological response of *betula platyphylla* leaves to fire and the restoration after fire[J]. Journal of Beijing Forestry University,2013,35(6):1-6. (in Chinese)

[12] 王樱琳,韦小丽,段如雁,等. 阔桶幼苗对大量元素缺乏的响应[J]. 西北林学院学报,2014,29(2):61-65.
WANG Y L,WEI X L,DUAN R Y,*et al.* Effect of nutritional deficiency on the growth of *Phoebe bournei* seedling[J]. Journal of Northwest Forestry University,2014,29(2):61-65. (in Chinese)

[13] 葛才林,杨小勇,金阳,等. 重金属胁迫对水稻不同品种超氧化物歧化酶的影响[J]. 核农学报,2003,17(4):286-291.
GE C L,YANG X Y,JIN Y,*et al.* Effects of heavy metals on superoxide dismutase in different rice species [J]. Acta Agriculturae Nucleatae Sinica,2003,17(4):286-291. (in Chinese)

[14] 孔祥生,郭秀璞,张妙霞. 镉胁迫对玉米幼苗生长及生理生化的影响[J]. 华中农业大学学报,1999,18(2):111-113.
KONG X S, GUO X P, ZHANG M X. Effect of cadmium stress on seedling growth and physiology-chemistry of maize [J]. Journal of Huazhong Agricultural University,1999,18(2):111-113. (in Chinese)

[15] 李元,祖艳群,王焕校. 镉、铁及其复合污染对烟草叶片氨基酸含量的影响[J]. 生态学报,1998,18(6):640-647.
LI Y,ZU Y Q,WANG H X. Effects of cadmium and iron on amino acid content in tobacco leaves[J]. Acta Ecologica Sinica,1998,18(6):640-647. (in Chinese)

[16] 罗立新,孙铁珩,靳月华. 镉胁迫下小麦叶中超氧阴离子自由基的积累[J]. 环境科学学报,1998,18(5):495-499.
LUO L X,SUN T H,JIN Y H. Accumulation of superoxide radical in wheat leaves under cadmium stress[J]. Acta Scientiae Circumstantiae,1998,18(5):495-499. (in Chinese)

[17] 秦天才,吴玉树,王焕校,等. 镉、铅及其相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 T C,WU Y S,WANG H X,*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. (in Chinese)

[18] 古红梅,胡述龙,王红星. 重金属铅对玉米种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 广东农业科学,2011(1):36-37.
GU H M,HU S L,WANG H X. Effects of heavy mental lead on corn seed germination and seedling growth[J]. Journal of Guangdong Agri. Sci. ,2011(1):36-37. (in Chinese)

[19] 许大全. 光合作用效率[M]. 上海:上海科学技术出版社, 2002:29-37.

[20] 彭长连,林植芳,林桂珠,等. 旅游和工业化对亚热带森林地区大气环境质量及两种木本植物叶绿素荧光特性的影响[J]. 植物学报,1998,40(3):270-276.
PENG C L,LIN Z F,LIN G Z,*et al.* Effect of tourism and industrialization on the atmospheric quality of subtropical forests and on chlorophyll fluorescence of two species of woody plants[J]. Acta Botanica Sinica,1998,40(3):270-276. (in Chinese)

[21] 种培芳,杨江山. 4 种金色叶树木叶绿素荧光动力学参数对 SO₂ 胁迫的响应[J]. 西北林学院学报,2013,28(6):14-19.
ZHONG P F,YANG J S. Responses of the chlorophyll fluorescence parameters to SO₂ stress in four golden-leaf trees [J]. Journal of Northwest Forestry University,2013,28(6):14-19. (in Chinese)

[22] 蔡志全,曹坤芳,冯玉龙,等. 夜间低温胁迫对两种生长强光下藤黄幼苗叶片荧光特征和活性氧代谢的影响[J]. 应用生态学报,2003,14(3):326-331.
CAI Z Q,CAO K F,FENG Y L,*et al.* Effect of low nocturnal temperature stress on fluorescence characteristics and active oxygen metabolism in leaves of *Garcinia hanburyi* seedlings grown under two levels of irradiance[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2003,14(3):326-331. (in Chinese)

(上接第 66 页)

[17] VITÓRIA A P,DA CUNHAM,AZEVEDO R A. Ultrastructural changes of radish leaf exposed to cadmium[J]. Environ. Exper. Bot. ,2006,58(3):47-52.

[18] 孔德政,裴康康,李永华,等. 铅、镉和锌胁迫对荷花生理生化的影响[J]. 河南农业大学学报,2010,44(4):402-407.
KONG D Z,PEI K K,LI Y H,*et al.* Effect of Cd,Zn and Pb stresses on physiology and biochemistry of lotus[J]. Journal of Henan Agricultural University,2010,44(4):402-407. (in Chinese)

[19] 陈宏,徐秋曼,王葳,等. 镉对小麦幼苗脂质过氧化和保护酶活性的影响[J]. 西北植物学报,2000,20(3):399-403.
CHEN H,XU Q M,WANG W,*et al.* The effect of Cd²⁺ on the activity of protectase and cell membrane lipid peroxidation change of wheat seedlings[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica,2000,20(3):399-403. (in Chinese)

[20] 刘大林,曹喜春,张华,等. 铅镉胁迫对饲用高粱部分生理指标的影响[J]. 草地学报,2014,22(1):43-49.
LIU D L,CAO X C,ZHANG H,*et al.* Effects of lead,cadmium pollution on tested physiological indices of forage sorghum [J]. Acta Agrestia Sinica,2014,22(1):43-49. (in Chinese)