

DOI: 10.11931/guihaia.gxzw201709011

引文格式: 吴博涵, 付登高, 段昌群. 铅持续胁迫下不同世代蚕豆生理生化指标的变化 [J]. 广西植物, 2018, 38(6): 719–726
WU BH, FU DG, DUAN CQ. Changes of physiological and biochemical indexes of *Vicia faba* in different generations to continuous stress of lead pollution [J]. *Guihaia*, 2018, 38(6): 719–726

铅持续胁迫下不同世代蚕豆生理生化指标的变化

吴博涵, 付登高, 段昌群*

(云南大学 生态学与环境学院暨云南省高原山地生态与退化环境修复重点实验室, 昆明 650091)

摘要: 为了解长期持续铅胁迫下植物不同世代间生理生化指标的变化, 分析植物对铅污染的适应机制及植物对长期持续污染的响应机理, 该研究以在 $250 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{Pb}$ 持续污染的实验田中种植所得的第 4、第 8、第 10、第 13 和第 15 世代蚕豆种子为材料, 通过盆栽法, 与同世代未受 Pb 胁迫的蚕豆做对照, 分析了与抗氧化酶系统、总代谢等相关的 8 个生理指标, 即叶绿素、蛋白质、可溶性糖、脯氨酸 (PRO)、丙二醛 (MDA) 含量及超氧化物歧化酶 (SOD)、谷胱甘肽还原酶 (GR) 和苹果酸脱氢酶 (MDH) 活力。结果表明: (1) 在长期持续 Pb 胁迫下, 与蚕豆光合作用能力有关的叶绿素含量在第 8 代与第 13 代之间与对照组相比具有显著的差异性 ($P < 0.05$)。 (2) 可溶性糖含量随胁迫时间的延长而逐渐升高, 并在第 10 代时达到最高, 随后开始向无污染的正常水平恢复并趋于稳定; 蛋白质含量在胁迫至第 13 代后开始增加。 (3) MDA 与 PRO 含量在胁迫至第 10 代时达到最高, 并随胁迫时间的延长而降低, 至第 13 代后逐渐趋于稳定。 (4) 抗氧化酶系统中的 SOD、GR 和 MDH 也同样呈现出先高后低的趋势, 且 GR 的变化程度最大, MDH 活力最早表现出与对照组的最大差异。研究认为: 在长期的持续 Pb 污染胁迫下, 蚕豆种群对 Pb 污染胁迫的适应性不断提高。

关键词: 蚕豆, 铅, 世代分化, 生理生化指标, 适应性

中图分类号: Q948 文献标识码: A 文章编号: 1000-3142(2018)06-0719-08

Changes of physiological and biochemical indexes of *Vicia faba* in different generations to continuous stress of lead pollution

WU Bohan, FU Denggao, DUAN Changqun*

(1. Yunnan Key Laboratory for Plateau Mountain Ecology and Restoration of Degraded Environments, School of Ecology and Environmental Sciences, Yunnan University, Kunming 650091, China)

Abstract: In order to understand the change of physiological and biochemical indexes of plants exposed under long-termed continuous heavy metal Pb stress, and to obtain the adaptive mechanism of plants in long-termed heavy metal polluted environment, we selected the fourth, eighth, tenth, thirteenth and fifteenth generation seeds of broad bean harvested from the continuous Pb stress in $250 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{Pb}$ polluted field as experimental materials, and used potted method in comparison

收稿日期: 2017-12-04

基金项目: 国家自然科学基金(31670522); 云南省科技重点研发专项项目(S2017BC041) [Supported by the National Science Foundation of China (31670522); Yunnan Provincial Key S & T Research Program (S2017BC041)].

作者简介: 吴博涵(1993-), 女, 黑龙江绥滨县人, 硕士研究生, 研究方向为污染生态学, (E-mail) 972949459@qq.com。

*通信作者: 段昌群, 博士, 教授, 研究方向为污染与恢复生态学, (E-mail) cn-ecology@qq.com。

with unpolluted broad bean of same generation, and measured eight physiological indexes related to antioxidant enzyme system and metabolism, which included the content of chlorophyll, protein, soluble sugar, proline (PRO), malondialdehyde (MDA), and activities of superoxide dismutase (SOD), glutathione reductase (GR) and malate dehydrogenase (MDH). The results were as follows: (1) Under long-termed Pb pollution, chlorophyll content related to photosynthesis ability of broad bean between the eighth and thirteenth generation had significant differences ($P < 0.05$) with control group. (2) Soluble sugar content increased gradually with the duration of stress, and increased to the highest level in the tenth generation and then began to return to normal unpolluted level. Protein content increased from the thirteenth generation. (3) Long-termed Pb pollution stress also produced significant changes in the membrane of broad bean MDA and PRO, which presented the highest contents in the tenth generation; they decreased after the tenth generation and gradually tended to less change after the thirteenth generation. (4) SOD, GR and MDH in the antioxidant enzyme system also showed the decreasing tendency. GR displayed the largest change, and MDH showed the greatest difference among all experimental and control group at the earliest generations. Through analysis, it can be concluded that under the long-termed continuous heavy metal Pb pollution, the broad bean population has an increasing adaptability to Pb pollution.

Key words: *Vicia faba*, Pb, differentiation between generations, physiological and biochemical indexes, adaptation

土壤重金属污染问题已成为全球各国共同面临的环境问题(赵庆龄等,2010)。重金属污染具有长期性、隐蔽性、积累性、广泛性及不可逆性等特点,使其成为相关领域研究的热点(高健磊和王静,2013;Nagajyoti et al,2010)。云南省矿产资源丰富、蕴藏量大、分布广、种类丰富,被誉为中国的“有色金属王国”,有 54 种矿产保有储量居全国前 10 位,其中铅、锌、磷、铜、银等 25 种矿产储量居前 3 位(熊国焕等,2015)。土壤中的铅(Pb)主要来源是采矿、冶炼工业以及含 Pb 农药化肥和炸药等的生产和使用,同时,含 Pb 的污染物通过污水灌溉、淤泥、大气沉降等途径进入到土壤环境中造成污染(Reddy et al,2005)。含 Pb 污染物对土壤的理化性质、土壤微生物及土壤酶活性均会造成影响,而且会影响农作物产量和质量,间接或直接通过食物链危害人体健康。

植物对 Pb 污染胁迫的影响研究国内外有较多报道。即便植物在浓度很低的 Pb 胁迫下,仍会出现中毒症状,如膜透性的改变、有丝分裂受阻、扰乱酶活性、损伤 DNA 以及改变其他生理过程等(Malar et al,2014;段德超等,2014)。Pb 可以破坏植物超微结构,降低硝酸还原酶和脱氢酶活性及叶绿素含量,对植物光合呼吸作用等生理活动造成影响,继而影响植物的品质(杨刚等,2005),很多植物都会对重金属污染产生毒害反应,无论是

盐生植物如海马齿(严廷良等,2015),还是外来植物凤眼兰,在重金属污染下均会出现生理、生长方面的抑制效应(Srinivasan et al,2014)。当然,植物在重金属胁迫下,也会通过体内代谢调节,可将重金属的毒害作用降到最低(常学秀等,2000)。

已有的关于植物在重金属污染下的研究,大多以不同浓度重金属污染短期处理下展开研究工作,这种方式能展现急性毒害作用,但可能难以反映真实污染环境下的植物的反应和相关的生态效应。因为在自然条件下,植物是在长期持续重金属污染的情况下生长(Duan & Hu,2000)。本研究选取的实验材料为长期持续 Pb(250 mg · kg⁻¹)胁迫下连续培养 15 个世代的蚕豆,以及同环境下无人干扰条件下连续培养 15 个世代的蚕豆为对照。随机选取 5 个世代进行盆栽培养,对其相关生理生化指标进行测定,以分析在长期持续重金属污染下植物生理生化的变化特征,为探讨蚕豆对 Pb 的耐性机制、揭示植物响应长期持续重金属污染环境的机理提供基础数据。

1 材料与方法

1.1 材料

蚕豆(*Vicia faba*)为蝶形花科(Papilionaceae)野豌豆属一年生或越年生草本,是一种严格的自花授

粉植物,是豆类作物中仅次于大豆的一种植物蛋白资源,是重要的粮食、蔬菜、副食、绿肥和养地作物。本研究使用的蚕豆品种为 K0502,该品种蚕豆由云南农业科学研究院提供,并从 2002 年起开始在本实验室连续种植,已在长期持续铅污染下种植 15 个世代。实验田分为无 Pb 污染和 Pb 污染地块,每块样地规格为 6.5 m×3 m×0.4 m(长×宽×厚),以水泥墙隔开,防止因淋溶作用造成土壤溶液扩散,而且该实验田通风及光照情况良好,每个世代种植时土壤中有有机质平均含量为 2.81%,TN 为 133.35 mg·kg⁻¹,TP 为 64.83 mg·kg⁻¹,Pb 为 34.86 mg·kg⁻¹,Cd 为 0.12 mg·kg⁻¹,Zn 为 110.04 mg·kg⁻¹,Hg 为 0.01 mg·kg⁻¹,Mn 为 86.27 mg·kg⁻¹,pH 值为 6.4。按比例加入醋酸铅并混匀,使 Pb 污染地块铅浓度达到 250 mg·kg⁻¹,将蚕豆按每年正常农时播种,次年将收获的种子播在上一年度的相应模拟污染地块内,连续种植 15 个世代,并根据收获的生物量中可能带走的重金属量补加土壤中的重金属 Pb 损耗量,每世代收获的种子晒干后置于-80℃冰箱中储存。

随机选取 Pb 污染地块(即 Pb 胁迫组)第 4、第 8、第 10、第 13 及第 15 世代及对应的正常地块(即对照组)的蚕豆种子为实验材料。取等量实验田相应土壤,将每个世代的种子分别种于相应的 16 cm×20 cm 塑料花盆中,每盆五株,置于光照及通风良好的相同环境中培养。待 1 个月以后,取顶端第一片成熟的蚕豆叶片,用于各项生理生化指标的测定。每个世代每个处理重复 3 次。

1.2 指标测定及方法

可溶性糖检测采用蒽酮比色法(张志良和瞿伟菁,2003);蛋白定量采用考马斯亮蓝法(刘祖琪和张石城,1994);丙二醛(MDA)含量测定采用硫代巴比妥酸(TBA)法(Health & Packer,1968);叶绿素含量测定采用丙酮浸提分光光度法(Hegedus et al,2001);脯氨酸(PRO)含量测定采用酸性茚三酮法(李合生,2000);总超氧化物歧化酶(T-SOD)、谷胱甘肽还原酶(GR)、苹果酸脱氢酶(MDH)活力测定参照南京建成科技有限公司生产的试剂盒的使用方法。

1.3 数据统计分析

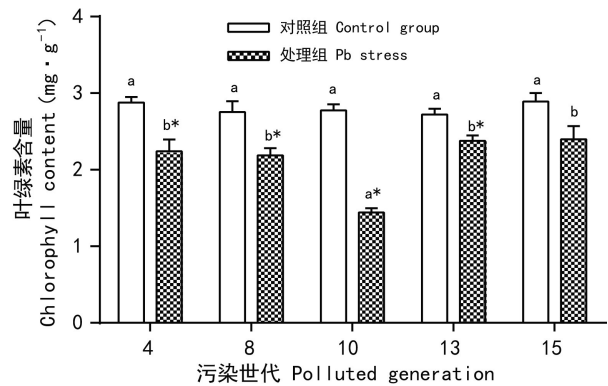
每个参数测出后,对其代间及代内进行数据

分析。采用 Excel 软件进行统计,求出平均值与标准差,GraphPad Prism 制图;使用 SPSS 软件进行 LSD 差异性分析等。

2 结果与分析

2.1 Pb 持续胁迫下不同世代蚕豆叶绿素的变化

Pb 持续胁迫下蚕豆叶片叶绿素含量的变化(图 1)。从图 1 可以看出,在 Pb 胁迫下蚕豆叶片叶绿素含量显著低于对照组($P<0.05$),并随胁迫时间的延长而下降,在胁迫至第 10 代时,叶绿素含量低至 1.42 mg·g⁻¹,相比第 8 代降低了 35%。当胁迫至第 13 世代时,叶绿素含量升高了 67%(达到 2.38 mg·g⁻¹),并且与胁迫至 15 代的叶绿素含量无显著差异($P>0.05$),即污染至第 13 世代后,绿素含量趋于稳定。从图 1 还可以看出,对照组绿素含量并不随时间的延长而改变,平均新鲜叶片叶绿素含量为 2.80 mg·g⁻¹。



注:不同小写字母表示相同处理组不同世代之间在 0.05 水平下差异显著;星号表示同一世代下处理组相对于对照组而言在 0.05 水平下差异显著。下同。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences among different generations of the same treatment group at 0.05 level. The asterisk indicates that the treatment group in the same generation is significantly different than the control group at 0.05 level. The same below.

图 1 Pb 持续胁迫下蚕豆叶片叶绿素含量的变化
Fig. 1 Changes of chlorophyll content in broad bean leaves under Pb continuous stress

2.2 Pb 持续胁迫下不同世代蚕豆可溶性糖和蛋白质含量的变化

Pb 持续胁迫下蚕豆叶片可溶性糖含量的变化

如图 2:A 所示,Pb 胁迫下促进了蚕豆叶片可溶性糖的合成,其含量显著高于对照组($P<0.05$),并随胁迫时间的延长而升高,当胁迫至第 10 代时,可溶性糖含量达到最高(为 $4.46 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$),相对于胁迫至第 8 代时升高了 35%,随后在第 13 代时降低了 37%,此后可溶性糖含量随胁迫时间的延长并无显著差异($P>0.05$)。

图 2:B 显示了 Pb 持续胁迫下蚕豆叶片蛋白质含量的变化。从图 2:B 可以看出,Pb 胁迫至第 10 代时,Pb 胁迫组与对照组蛋白质含量并无显著性差异($P>0.05$),然而随胁迫时间至第 13 代,蛋白质含量比第 10 代时升高了 28%,其含量高达 $1.85 \text{ g prot} \cdot \text{L}^{-1}$,且显著高于对照组($P<0.05$),当胁迫至第 15 代时,蛋白质含量降低了 15%,但仍显著高于对照组($P<0.05$)。

2.3 Pb 持续胁迫下不同世代蚕豆 MDA 和 PRO 含量的变化

Pb 持续污染下蚕豆叶片 MDA 含量的变化如图 3:A 所示,Pb 胁迫的叶片 MDA 含量随着处理时间的延长而呈现先升后降的趋势,且显著高于对照组($P<0.05$);当胁迫至第 10 代时,MDA 含量达到最高(为 $7.23 \text{ nmol} \cdot \text{mg}^{-1} \text{ prot}$),较胁迫至第 8 代时升高了 91%,随胁迫时间延长,第 13 代时 MDA 含量降低了 42%(为 $4.16 \text{ nmol} \cdot \text{mg}^{-1} \text{ prot}$),随后 MDA 的含量趋于稳定,不随胁迫时间的延长而变化。对照组 MDA 平均含量为 $2.66 \text{ nmol} \cdot \text{mg}^{-1} \text{ prot}$,各世代间无显著差异($P>0.05$)。

Pb 持续污染下蚕豆叶片脯氨酸(PRO)含量的变化如图 3:B 所示,蚕豆叶片 PRO 含量随胁迫时间的延长而呈现先高后低的趋势,且胁迫至第 8 代后,PRO 含量显著高于对照组($P<0.05$),胁迫时间至第 10 代时,PRO 含量升高了 21%(为 $45.23 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$),而对照组仅为 $23.42 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$,随后,处理组 PRO 含量随胁迫时间的增长而下降,但仍显著高于对照组含量($P<0.05$)。

2.4 Pb 持续胁迫下不同世代蚕豆 SOD、GR 和 MDH 活力的变化

图 4:A 为在胁迫 Pb 污染下,蚕豆叶片 SOD 活力的变化,从图 4:A 可以看出,胁迫时间从第 4 代至第 8 代 SOD 活力显著低于对照组($P<0.05$),随

着时间的增长,第 13 代 SOD 活力由第 10 代的 $803.91 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1}$ 上升到 $841.74 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1}$ 达到最大,且显著高于对照组,至第 15 代时,处理组 SOD 活力降至 $784.11 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1}$ 。除胁迫至第 10 代时,处理组与对照组无显著差异外($P>0.05$),其它胁迫时间过程中,处理组与对照组均有显著差异($P<0.05$)。

图 4:B 为 Pb 持续胁迫下蚕豆叶片 GR 活力的变化,对照组 GR 活力不随时间的变化而变化,处理 GR 的活力随胁迫时间的延长而升高,胁迫至第 10 代时,GR 活力达到最高(为 $3427.70 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1} \text{ prot}$),而同时间对照组 GR 活力仅为 $402.17 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1} \text{ prot}$,胁迫至第 13 代后,处理组 GR 活力降低了 83%(为 $580.05 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1} \text{ prot}$),且与对照组无显著差异($P>0.05$),处理组至 13 代后 GR 活力无显著变化($P>0.05$)。

Pb 胁迫污染下蚕豆叶片 MDH 活力的变化如图 4:C 所示。从图 4:C 可以看出,蚕豆叶片 MDH 活力显著高于对照组($P<0.05$),且随胁迫时间的延长呈现先升后降的趋势。胁迫至第 8 代时,GR 活力较第 4 代时增强了 48%,达到最大活力(为 $7.66 \text{ U} \cdot \text{mg}^{-1} \text{ prot}$),同时对对照组 MDH 活力仅为 $2.22 \text{ U} \cdot \text{mg}^{-1} \text{ prot}$,第 8 代后 MDH 活力逐渐降低,胁迫至第 13 代后,MDH 活力趋于稳定,不随时间变化而变化,且与对照组无显著差异($P>0.05$)。

3 讨论

3.1 长期持续 Pb 胁迫下蚕豆生理指标的变化特点

通常根系周围土壤溶液中的重金属含量是影响其生物有效性的重要因素之一(杨刚等,2005)。对于壤土、粘土等类的土壤,只要没有水土流失,进入其中的重金属被淋溶排出的速度是很微弱的(段昌群等,1997)。本研究模拟污染所添加的是离子态的重金属 Pb,土壤可以吸附 Pb,且以离子态不断溶出进入土壤溶液,使土壤长期持续保持在一定的 Pb 浓度范围。本研究每个污染世代间均设有对照组,且其他环境条件相同,从而在相同世代或不同世代间以对照组作为参比,从而保证所产生的差异是由重金属 Pb 长期持续污染导致的。

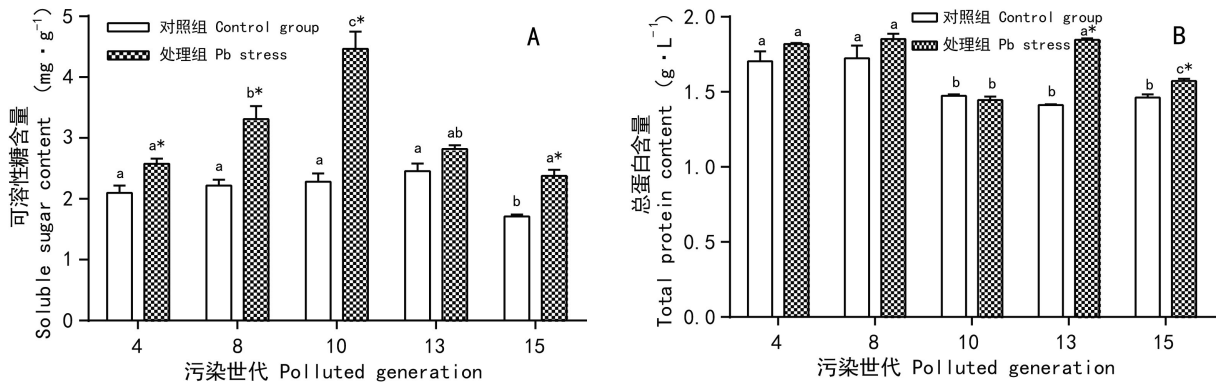


图2 Pb持续胁迫下蚕豆叶片可溶性糖(A)和总蛋白质(B)含量的变化

Fig. 2 Changes of soluble sugar(A) and total protein(B) contents in broad bean leaves under Pb continuous stress

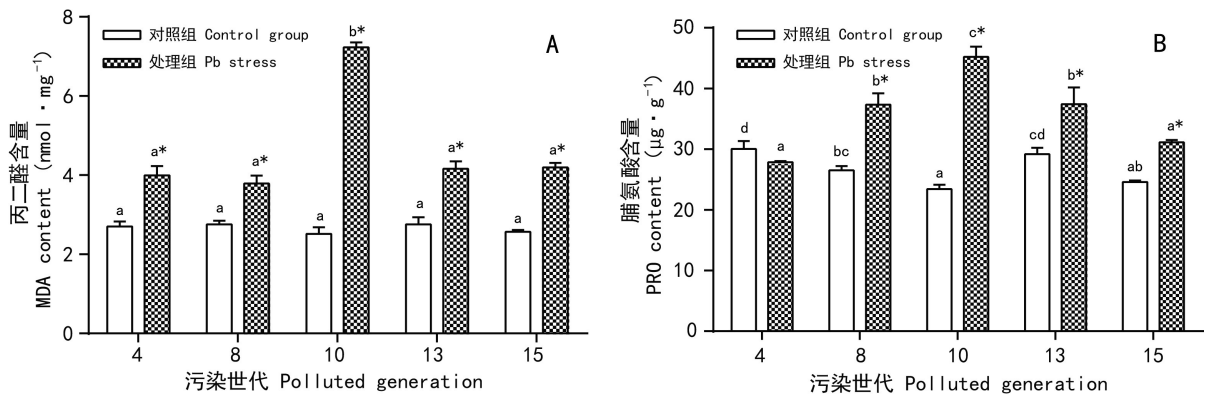


图3 Pb持续胁迫下蚕豆叶片MDA(A)和PRO(B)含量的变化。

Fig. 3 Changes of MDA(A) and PRO (B) contents in broad bean leaves under Pb continuous stress

3.1.1 Pb持续胁迫对蚕豆叶绿素的影响 光合作用是衡量植物合成功能的重要生理指标,叶绿素是植物光合作用的主要色素,叶绿素含量的变化,既可反映植物叶片光合作用功能的强弱,也是植物响应逆境胁迫的重要方式。植物在Pb胁迫下叶绿素含量会降低,孙健等(2007)通过单一重金属对灯心草的胁迫研究可知,Pb对叶绿素的破坏,导致光合速率降低,并且降低效应与胁迫程度成正比。在本研究中,蚕豆在Pb胁迫第8至第13代期间,叶绿素含量变化最剧烈,可能是因为长期持续重金属Pb胁迫下,植物生理功能随胁迫时间不断延长发生损害作用持续积累,达到了影响植物正常光合作用的程度;在胁迫至第13代后,

蚕豆对长期持续的Pb胁迫产生了一定的适应性,并向正常水平恢复,其光合作用可能也逐渐恢复并趋于稳定。

3.1.2 Pb持续胁迫对蚕豆代谢能力的影响 植物体内参与各种代谢的酶类大多是可溶性蛋白,可溶性糖是光合作用的重要产物,并且在植物体内起到渗透调节的作用。通过可溶性蛋白和可溶性糖含量的变化可了解植物体总代谢的情况。在重金属Pb胁迫下,植物细胞内蛋白质和可溶性糖含量升高(Kosobrukhov et al, 2004; 杜天庆等, 2009)。由本研究结果可知,长期持续Pb胁迫对蚕豆叶片可溶性糖和蛋白质的合成具有刺激作用,在Pb胁迫至第10代时,叶片合成的可溶性糖含量达到最

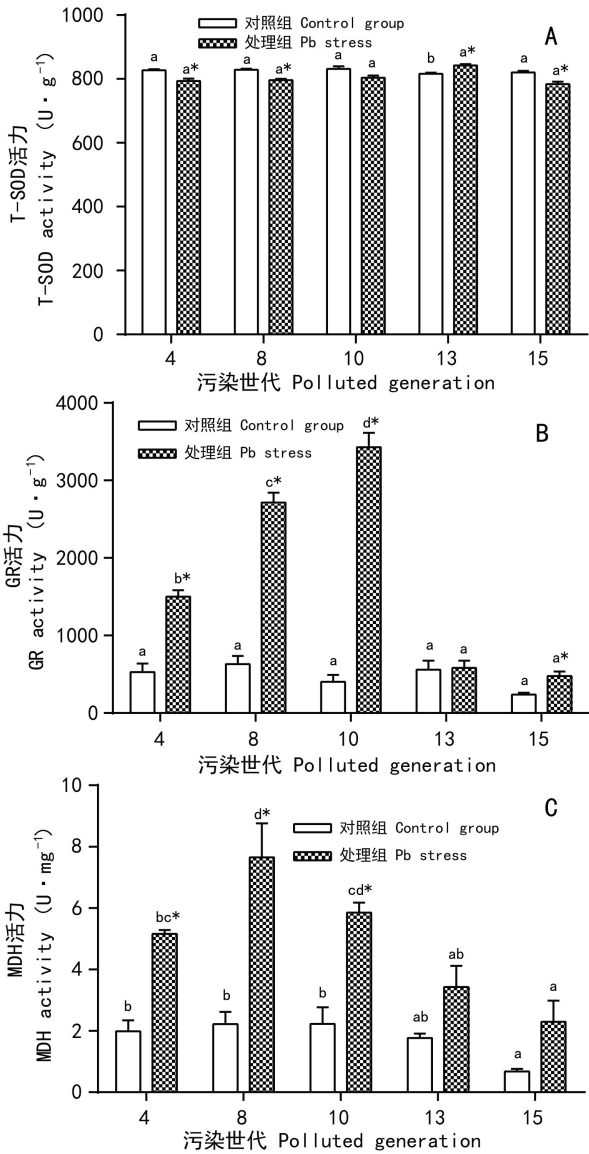


图4 Pb持续胁迫下蚕豆叶片SOD(A)、GR(B)和MDH(C)活力的变化。

Fig. 4 Changes of SOD(A), GR(B) and MDH(C) activity in broad bean leaves under Pb continuous stress

高,同时蛋白质含量开始增加,胁迫至第13代后,可溶性糖含量趋于稳定,蛋白质含量达到最高;蛋白质和可溶性糖含量的提高,可增加细胞渗透调节能力,同时功能蛋白的数量增加,可溶性糖起到保护酶的作用,使细胞维持在正常代谢水平,以减轻Pb的胁迫伤害。然而这种自我保护作用仅仅是在一定范围内的,随着时间的增加,分解蛋白质的速度加快,合成系统遭破坏(刘拥海等,2006),

导致蛋白质和可溶性糖含量开始降低,蚕豆代谢能力逐渐减弱,最后达到稳定状态。

3.1.3 Pb持续胁迫对蚕豆膜脂过氧化及渗透调节能力的影响 丙二醛(MDA)是植物膜脂过氧化的产物,是反映细胞膜脂过氧化程度和植物对逆境条件反应的强弱信号,可间接的反映出细胞损伤的程度(Kanazawa et al,2000)。脯氨酸(PRO)是植物细胞内重要的渗透调节物质,其含量可反映出植物的抗逆性。Pb污染下杨梅的MDA含量在处理第10天后处理显著高于对照,后随着处理时间的延长而逐渐降低(何冰等,2009)。从香豌豆幼苗在Pb胁迫下的研究中可知,PRO含量与细胞膜系统受损有关(司卫静等,2013)。

本研究中,蚕豆经长期持续Pb胁迫后,MDA和PRO含量均升高,并于第10代时达到最高。导致Pb与膜蛋白的-SH结合,或与磷酸酐乙醇胺和单分子层的磷脂丝氨酸反应造成膜蛋白的磷脂结构改变,从而损害了质膜的结构和功能。这说明蚕豆在长期持续Pb胁迫的过程中,体内的活性氧、自由基逐渐增加,MDA、PRO大量积累。当胁迫至第10代时,MDA和PRO含量开始逐渐降低,并向对照组的正常值恢复。其原因可能是在持续Pb污染下细胞保护系统产生了一定的耐受性,使膜的结构和功能开始恢复,细胞代谢逐渐稳定。

3.1.4 Pb持续胁迫对蚕豆抗氧化酶系统的影响

Pb污染可使细胞内的酶变性失活,甚至遭到破坏,最终导致代谢的失衡。Pb胁迫下,植物体内的抗氧化酶活性的变化可反映出污染程度的强弱以及植物自身抗逆潜力(Alscher et al,1997)。植物通过体内抗氧化酶系统清除或减少所产生的活性氧,保护组织细胞不受伤害,从而表现出氧化胁迫的抗性(刘周莉等,2009)。

本研究结果表明,在重金属Pb胁迫下,SOD活力略有降低,GR和MDH活力有所升高,活性氧自由基增加,抗氧化酶活性增强。MDH在胁迫至第8代、GR在胁迫至第10代、SOD在胁迫至第13代后相继达到最高活力,然后开始下降,向对照组的稳定状态趋近。这可能是由于当氧化酶系统相互作用达到一定限度后,抗氧化酶结构改变,活性降低,并随着污染时间的延长,抗氧化酶系统对Pb

胁迫产生了一定的适应性。

3.2 长期持续重金属胁迫下植物适应性探讨

在对照组中,随着种植世代的增加,叶绿素、蛋白质和脯氨酸含量对照组不同世代间也表现出一定的差异,这可能是因为在多代种植后,蚕豆自身发生了一定变化,且这些指标对于该变化敏感,所以在对照组中也表现出一定的差异,但是这与长期持续 Pb 胁迫下的变化相比并不是很大,所以 Pb 胁迫仍占主导因素。在 Pb 胁迫下,蚕豆在生理生化水平上均发生了一定的反应,各项生化指标为了生存和生长,光合能力减弱,代谢与抗氧化能力增强,但随着世代的增加,有些生理指标开始与对照组差异变小,有些生理指标开始向胁迫初始时期恢复且随世代的增加而保持稳定状态,对 Pb 胁迫产生了一定的适应。生物在持续污染下,随着世代的推移,会产生渐进性的适应。如昆虫在长期大气污染条件下产生了“工业黑化”现象;在重金属污染的土壤中,植物对污染产生了适应性,形成耐性群落;或者一些原本不具有耐性的植物群落,由于长期生长在受污染的土壤中,而产生适应性,形成了耐性生态型(Duan & Hu, 2000)。这表明植物在重金属的胁迫下,其生理生化和分子生物学方面会产生一定的变化,从而具有某种特定的耐性及抗性机制。

本研究通过对 Pb 持续胁迫下不同世代蚕豆生理生化指标变化的研究表明,蚕豆随着胁迫时间的增加而形成了某种特定的适应机制,而且这种适应是由重金属 Pb 所诱发。蚕豆是严格的自花授粉,导致各项生理生化在代内和代间有如此显著的差异,既有可能是基因突变的结果,也有可能是基因的差异性表达引起的。相形之下,在相对较短的时间内,基因突变引起这种定向适应可能性不大,因此,本研究出现的这种情形主要是重金属 Pb 在持续污染条件下,诱导了蚕豆种群内多基因的差异表达。

对于蚕豆对 Pb 的适应机制的遗传变异基础是什么,不同世代间差异表达的基因有哪些,在长期持续胁迫下,这些差异表达基因的表达量随世代的增加会有怎样的变化等问题,目前还了解甚少,需在后续实验研究中继续探索。未来应将生

理生化水平与分子水平相结合,进一步分析长期持续 Pb 胁迫条件下,不同世代蚕豆适应性机制及其遗传结构变化特征,并从种群角度了解其生态分化及微进化趋势,以阐明在重金属胁迫条件下植物的适应机制,为重金属污染下的植物进化方向提供依据,为培育抗性品种以及污染环境的修复提供理论支持。

参考文献:

- ALSCHER C, DONAHUE L, CRAMER L, 1997. Reactive oxygen species and antioxidant: relationship in green cells [J]. *Physiol Plant*, 100:224-233.
- CHANG XX, DUAN CQ, WANG HX, 2000. Root excretion and plant resistance to metal toxicity [J]. *Chin J Appl Ecol*, 11(2):315-320. [常学秀,段昌群,王焕校, 2000. 根分泌作用与植物对金属毒害的抗性 [J]. *应用生态学报*, 11(2):315-320.]
- DU TQ, YANG JZ, HAO JP, et al, 2009. Influences of multiple stress by Cd, Pb and Cr on physiological-biochemical characters of wheat seedlings [J]. *Acta Ecol Sin*, 29(8):4475-4482. [杜天庆,杨锦忠,郝建平,等, 2009. Cd、Pb、Cr 三元胁迫对小麦幼苗生理生化特性的影响 [J]. *生态学报*, 29(8):4475-4482.]
- DUAN CQ, WANG HX, JIANG HQ, 1997. Differentiation of quantitative characters of *Vicia faba* contaminated with heavy metals [J]. *Acta Ecol Sin*: 23-34. [段昌群,王焕校,姜汉侨, 1997. 蚕豆在重金属污染条件下数量性状的分化研究 [J]. *生态学报*: 23-34.]
- DUAN CQ, HU B, 2000. Changes of reliability and efficiency of micronucleus bioassay in *Vicia faba* after exposure to metal contamination for several generations [J]. *Environ Experim Bot*, 44(1):83-92.
- DUAN DC, YU MG, SHI JY, 2014. Research advances in uptake, translocation, accumulation and detoxification of Pb in plants [J]. *Chin J Appl Ecol*, 25(1): 287-296. [段德超,于明革,施积炎, 2014. 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*, 25(1): 287-296.]
- GAO JL, WANG J, 2013. Two assessment methods of heavy metal pollution of river sediment ecological risk [J]. *Environ Eng*, 31(2):119-121. [高健磊,王静, 2013. 两种河道底泥重金属污染生态危害评价方法比较研究 [J]. *环境工程*, 31(2):119-121.]
- HE B, HE JX, HE XH, 2009. Effect of lead on physiological characteristics of Baylerry (*Myrica rubra*) seedlings [J]. *J Agro-Environ Sci*, 28(6):1263-1268. [何冰,何计兴,何新华, 2009. 铅胁迫对杨梅生理特性的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 28(6):1263-1268.]
- HEALTH RL, PACKER L, 1968. Photoperoxidation in isolated

- chloroplasts. I. Kinetics and stoichiometry of fatty acid peroxidation [J]. Arch Biochem Biophys, 125:189-198.
- HEGEDUS A, ERDEI S, HORVATH G, et al, 2001. Comparative studies of H₂O₂ detoxifying enzymes in green and greening barley seedling under cadmium stress [J]. Plant Sci, 160:1085-1093.
- HUANG SZ, HAN YL, YU SL, 2011. The effect of lead and copper on the growth and physiological response of water flower *Lris pseudacorus* L. [J]. Fresen Environ Bull, 20(9): 2246-2250.
- KANAZAWA S, SANO S, KOSHIBA T, et al, 2000. Changes in antioxidative enzymes in cucumber cotyledons during natural senescence: Comparison with those during dark induced senescence [J]. Physiol Plant, 109:211-216.
- KOSOBRUKHOV A, KNYAZEVA I, MUDRIK V, 2004. Plantago major plants response to increase content of lead in soil: Growth and photosynthesis [J]. Plant Growth Regul, 42: 145-151.
- LARA L, LUCA S, 2005. Toxicity in *Prunus cerasifera*: Growth and antioxidant enzymes responses of *in vitro* grown plants [J]. Plant Sci, 168:797-802.
- LI HS, 2000. Principle and technology of plant physiological and biochemical test [M]. Beijing: Higher Education Press. [李合生, 2000. 植物生理生化试验原理与技术 [M]. 北京: 高等教育出版社.]
- LIU YH, YU L, CHEN YB, et al, 2006. Lead tolerance of different *Fagopyrum esculentum* cultivars [J]. Chin J Ecol, 25 (11):1344-1347. [刘拥海, 俞乐, 陈奕斌, 等, 2006. 不同荞麦品种对铅胁迫的耐性差异 [J]. 生态学杂志, 25 (11):1344-1347.]
- LIU ZL, HE XY, CHEN W, 2009. Effects of cadmium stress on the growth and physiological characteristics of *Lonicera japonica* [J]. Chin J Appl Ecol, 20(1):40-44. [刘周莉, 何兴元, 陈玮, 2009. 镉胁迫对金银花生理生态特征的影响 [J]. 应用生态学报, 20(1):40-44.]
- LIU ZQ, ZHANG SC, 1994. The physiology of plant resistance [M]. Beijing: Agricultural Press: 71-372. [刘祖琪, 张石城, 1994. 植物抗性生理学 [M]. 北京: 农业出版社: 371-372.]
- LOUIS F, PIETA, 1988. Evolutionary response of plants to anthropogenic pollutants [J]. Trends Ecol Evol, 2(9):233-236.
- MALAR S, VIKRAM S, FAVAS C, et al, 2014. Lead heavy metal toxicity induced changes on growth and antioxidative enzymes level in water hyacinths [J]. Bot Stud, 55:1-11.
- NAGAJYOTI C, LEE D, SREEKANTH M, 2010. Heavy metal, occurrence and toxicity for plants: A review [J]. Environ Chem Lett, 8: 199-216.
- REDDY AM, KUMAR SG, JYOTHSNAKUMARI G, et al, 2005. Lead induced changes in antioxidant metabolism of horsegram and bengalaram [J]. Chemosphere, 60:97-104.
- SI WJ, YUAN HY, HAN YL, et al, 2013. Effect of Pb stress on some growth and physiological biochemical indexes of *Lathyrus odoratus* seedling [J]. J Plant Resour Environ, 22 (2):86-91. [司卫静, 原海燕, 韩玉林, 等, 2013. Pb胁迫对香豌豆幼苗部分生长和生理生化指标的影响 [J]. 植物资源与环境学报, 22(2):86-91.]
- SRINIVASAN M, SAHI SV, PAULO JCF, et al, 2014. Lead heavy metal toxicity induced changes on growth and antioxidative enzymes level in water hyacinths [J]. Bot Stud, 55: 54.
- SUN J, TIE BQ, QIAN Z, et al, 2007. Effects of Cu, Cd, Pb, Zn and As single stress on the growth and physiological and biochemical characteristics of *Juncus effuses* [J]. Chin J Soil Sci, 38(1): 121-127. [孙健, 铁柏清, 钱湛, 等, 2007. 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, 38(1): 121-127.]
- XIONG GH, HUANG K, HU RP, et al, 2015. The industry actuality and development tendency of zinc smelting in Yunnan Province [J]. Yunnan Metall, 44(4):26-29. [熊国焕, 黄凯, 胡若鹏, 等, 2015. 云南省铅锌冶炼行业现状及发展趋势 [J]. 云南冶金, 44(4):26-29.]
- YAN TL, ZHONG CR, LIU Q, 2015. Effects of Pb and Zn on the growth and physiological response of *Sesuvium portulacastrum* [J]. Guihaia, 35(5):668-672. [严廷良, 钟才荣, 刘强, 2015. 海马齿对重金属 Pb, Zn 胁迫的生长及生理生化响应 [J]. 广西植物, 35(5):668-672.]
- YANG G, WU J, TANG Y, 2005. Research advances in plant resistance mechanisms under lead stress [J]. Chin J Ecol, 24 (12):1507-1512. [杨刚, 伍钧, 唐亚, 2005. 铅胁迫下植物抗性机制的研究进展 [J]. 生态学杂志, 24(12):1507-1512.]
- ZHANG ZL, QU WJ, 2003. Experimental guide of plant physiology [M]. Beijing: China Higher Education Press: 127-128. [张志良, 瞿伟菁, 2003. 植物生理学实验指导 [M]. 北京: 中国高等教育出版社: 127-128.]
- ZHAO QL, ZHANG ND, LU WR, 2010. Research review and prospect on soil heavy metals pollution II—research focus and analysis based on three major disciplines [J]. Environ Sci Technol, 33(7): 102-106. [赵庆龄, 张乃弟, 路文如, 2010. 土壤重金属污染研究回顾与展望 II——基于三大学科的研究热点与前沿分析 [J]. 环境科学与技术, 33(7): 102-106.]