

铅胁迫对金银花生长、生理及积累特性的影响

毛雪飞, 何金娇, 韩忠康, 武峰峰

(新乡学院生命科学技术学院, 河南 新乡 453000)

摘要:为探讨不同浓度铅(Pb)胁迫对金银花生长、生理及积累特性的影响,利用盆栽法研究了不同Pb处理浓度(0、400、600、800、1 000 mg/kg)对封丘金银花生长、生理代谢及吸收积累的影响,检测其株高增量、单株产量、渗透调节物质、抗氧化酶活性等指标,并用隶属函数法对其耐铅性进行综合评价。结果表明:金银花对铅的积累主要在根部,富集能力大小表现为根>叶>花,隶属函数法分析表明,封丘金银花对铅胁迫具有中度耐性。低浓度铅胁迫对金银花的生长影响不显著,当铅浓度 ≥ 800 mg/kg时,株高增量、生物量等与对照相比下降明显($P < 0.05$);铅浓度为1 000 mg/kg时,金银花单株产量与对照相比下降了54.90%,达到最大值。金银花叶片中叶绿素含量随铅浓度升高呈下降趋势,游离脯氨酸、可溶性糖、可溶性蛋白含量有所增加,尤以高浓度时(≥ 800 mg/kg)差异最为显著;铅胁迫造成金银花叶片丙二醛(MDA)和抗氧化酶活性升高,当Pb浓度为600 mg/kg时,MDA含量与对照没有明显差异;SOD活性比对照提高了41.65%;Pb浓度为1 000 mg/kg时,MDA含量达到最大值,与对照差异显著,POD、CAT活性分别比对照提高78.92%、45.60%。

关键词:金银花;铅胁迫;株高增量;叶绿素;渗透调节物质;抗氧化酶

中图分类号:S567.79

文献标识码:A

文章编号:2096-5877(2019)05-0069-07

Effects of Lead Stress on Growth and Physiological Metabolism and Accumulation Characteristics of *Lonicera Japonica*

MAO Xuefei, HE Jinjiao, HAN Zhongkang, WU Fengfeng

(School of Life Science and Technology, Xinxiang University, Xinxiang 453000, China)

Abstract: The aim of this study was to investigate the effects of different concentrations of lead (Pb) stress on the growth, physiology and accumulation characteristics of *Lonicera japonica*, the effects of different concentrations of lead (0 mg/kg, 400 mg/kg, 600 mg/kg, 800 mg/kg, 1 000 mg/kg) on the growth, physiological metabolism and absorption and accumulation of *Lonicera japonica* were studied by pot culture. The plant height increment, yield per plant, osmotic regulators and antioxidant enzyme activities were measured. The membership function method was used to evaluate its lead resistance comprehensively. The results showed that the accumulation of lead in *Lonicera japonica* was mainly in the root, and the accumulation capacity was root > leaf > flower. Subordinate function analysis showed that *Lonicera japonica* had moderate tolerance to lead stress. The growth of *Lonicera japonica* was not significantly affected by low concentration of lead. When the concentration of lead was more than 800 mg/kg, plant height increment and biomass decreased significantly compared with the control ($P < 0.05$); when the concentration of lead was 1 000 mg/kg, the yield of *Lonicera japonica* decreased by 54.90% compared with the control, reaching the maximum value. The content of chlorophyll in *Lonicera japonica* leaves decreased with the increase of lead concentration, but the content of free proline, soluble sugar and soluble protein increased, especially at high concentration (> 800 mg/kg); the activity of MDA and antioxidant enzymes in *Lonicera japonica* leaves increased under lead stress, and there was no significant difference between the content of MDA and the control when the concentration of lead was 600 mg/kg. The activity of POD and CAT increased by 41.65% and 78.92% and 45.60% respectively when the concentration of Pb was 1 000 mg/kg.

Key words: *Lonicera japonica*; Lead stress; Plant height; Chlorophyll; Antioxidative enzyme; Osmosis substances

收稿日期:2019-04-23

基金项目:河南省科技攻关项目(152102310018)

作者简介:毛雪飞(1970-),女,副教授,硕士,从事植物逆境生理及其分子机制研究。

随着我国工业化与城市化进程的加快,土壤、水和空气的重金属污染已经对农业和环境造成了严重危害。在我国,重金属污染农作物时有报道,尤其以铅(Pb)、镉(Cd)污染最为常见^[1]。据环境保护部和国土资源部2014年调查统计显示,我国土壤中重金属点位超标率为16.1%,其中铅污染点位超标率为1.5%,主要分布在我国中部和东部地区^[2]。土壤中铅污染主要来源于含铅岩石风化、铅矿开发、含铅制品的制造和使用以及含铅汽油、垃圾处理和污水灌溉等^[3]。

Pb在土壤中滞留时间长,易在表土积累,可被植物吸收,是土壤-作物生态系统中主要的重金属污物。Pb在植物体各器官中大量积累,会改变细胞膜透性,对叶绿体、线粒体、细胞核等亚显微结构都有一定程度的破坏^[4],并且竞争性地取代某些酶活性中心的金属元素而影响酶的正常活性,从而引起植物光合作用、呼吸作用、氮素代谢、核酸代谢等一系列生理生化过程的紊乱^[5]。Pb不仅能引起植物形态、生理生化及结构改变,还会通过食物链危及人类的健康^[6]。

金银花(*Lonicera japonica* Thunb)是我国一种历史悠久的著名中药材,其干燥花蕾具有清热、解毒、消炎之功效^[7-8],随着中药逐渐走出国门,被世界认可和重视,其安全性尤其是重金属的超标现象得到越来越多的关注。重金属的超标不仅关系到中药材的质量,还涉及到中成药药用的安全^[9-11]。《中华人民共和国药典》(2015年版)对金银

花中重金属含量有了明确的限定^[12]。河南省封丘县作为我国金银花主产地,传统金银花种植农田面临重金属污染的威胁,在中原地区铅污染是土壤中最常见的重金属污染,影响和威胁到金银花的产量和品质。目前,关于金银花的研究主要集中在药用成分的功效、提取和加工方面,有关逆境条件特别是重金属胁迫对金银花生长、生理代谢的影响研究较少。赵洁等^[13]、马雪梅等^[14]研究了干旱对金银花光合生理生化特性的影响;孟衡玲等^[15]研究了金银花幼苗对盐胁迫的生理响应;在重金属胁迫方面,刘周莉等^[16-17]研究了镉胁迫下金银花的生长反应及积累特性以及镉胁迫对金银花叶片含水量及微量元素吸收积累的影响。铅污染对金银花的影响还未见报道。本研究旨在探讨金银花在铅胁迫下的生理生化反应及耐受性,为科学评估金银花种植条件,合理控制金银花质量、提高其产量、保证其临床用药安全性提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

“豫封一号”树型金银花1年生苗由中国河南省封丘县贾庄镇四季金银花苗木公司提供。供试土壤为采自封丘贾庄镇金银花种植基地的农田土,自然风干后,经筛检、粉碎、过5 mm筛,测定其理化值及重金属pb背景值。结果见表1。

表1 供试土壤理化性质

pH	有机质(mg/kg)	铅含量(mg/kg)	阳离子交换量(mmol/kg)	主要营养元素(mg/kg)		
				碱解氮	有效磷	速效钾
7.8	11.40	92.40	200.16	91.40	20.40	376

1.2 实验设计

试验地位于河南省新乡市红旗区新乡学院内(35.26°N, 113.97°E),属暖温带大陆性季风气候,年均气温14.2℃,年均降水量573.4 mm,年均日照时间2 400 h,年均湿度68.0%,无霜期220 d。

重金属离子以Pb(NO₃)₂形式加入。根据每盆土中Pb的施入量(每公斤干土中含纯金属量计)设置4个处理水平,每个处理重复5次。以不加Pb为对照(CK)。T₁(Pb 400 mg/kg)、T₂(Pb 600 mg/kg)、T₃(Pb 800 mg/kg)、T₄(Pb 1 000 mg/kg)。外源金属铅按各处理浓度以溶液形式喷洒入准备好的土壤中,搅拌均匀,装入上口径为25 cm、下口径14 cm、高

19 cm的花盆内,每盆装土8 kg。为保证植物在生长期能获得充足的养分,每kg土壤中施入0.1 g尿素、0.05 g磷酸二氢钾,平衡30 d后,选取生长健壮、形态、大小、长势基本一致的金银花苗(平均株高(41.21±1.13) cm,根长(10.06±1.22) cm)进行移栽,每盆种1棵苗,所有供试材料于2018年2月10日统一置于室外防雨棚中,每天每盆浇去离子水300~500 mL。实验期间采用自然光源和通风,温度与外界温度一致。2018年5月,待其头茬花蕾处于二白期时进行各项指标的测定。

1.3 指标测定方法

1.3.1 生长参数的测定

1.3.1.1 株高增量、根长增量的测定

用卷尺测量株高和根长,每株移植前测量一次,处理结束后测量一次,共测两次,计算其株高和根长增量。

1.3.1.2 叶片相对含水量的测定^[18]

每个处理组摘取3组叶片,迅速放入已知重量的铝盒中,称出鲜重(W_f),将叶片浸泡于去离子水中,遮光静置6~9 h,取出后滤纸吸干表面水分,迅速放入已知重量的铝盒称量叶片饱和鲜重(W_t);105℃杀青15 min,80℃烘干至恒重,称出干重(W_d),计算叶片相对含水量(RWC)。

RWC=(W_f-W_d)/(W_t-W_d)×100%(1)

1.3.1.3 干物质量的测定

称重法测定干物质量。挖取金银花苗木,洗净,晾干,将所有材料放置在烘箱中70℃干燥直到恒重,然后称重,记录干物质量。

1.3.1.4 金银花产量的测定

于5月12日上午9:00~10:00进行采摘,从各处理组采摘5株处于二白期金银花花蕾,统计单株花蕾数,取平均值,称量千蕾湿重和干重。

千蕾鲜重(g)=(花蕾总重量×1000)/花蕾总数(2)

单株产量(g)=千蕾重/1000×单株花蕾数(3)

1.3.2 生理生化指标的测定

1.3.2.1 叶绿素含量的测定

采用张志良等^[19]丙酮浸提法。

1.3.2.2 渗透调节物质的测定

可溶性糖含量采用蒽酮法测定^[19],脯氨酸含量采用酸性茚三酮法检测^[19],可溶性蛋白含量采用考马斯亮蓝染色法测定^[19]。

1.3.2.3 丙二醛(MDA)及抗氧化酶活性测定

分别于胁迫后90 d时,对每个处理组金银花进行取叶测定。每盆采集生长、位置较一致的成熟叶片迅速装入塑料袋,密封送入实验室待测。测定MDA含量和抗氧化酶活性,包括超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)、过氧化物酶(POD)。丙二醛含量采用硫代巴比妥酸法检测^[19];SOD活性采用氮蓝四唑光化还原法测定^[19],以抑制NBT光化还原50%所需酶量为1个酶活单位(U);POD活性采用愈创木酚法测定^[19],以每分钟OD值变化(升高)0.01为1个酶活性单位(U);CAT活性采用过氧化氢法测定^[19],以每分钟OD值减少0.01为1个酶活性单位(U)。指标的测定均进行3次重复并取平均值。

1.3.3 铅积累量的测定

将金银花植株的地上部用去离子水洗涤干

净,根部用20mM EDTA-2Na浸泡润洗20 min,以交换根部吸附的Pb²⁺,再用去离子水冲洗干净。所有材料在70℃烘箱干燥24 h,研磨成粉末状。取0.5 g磨碎的根、叶和花分别置于锥形瓶中,按体积比为3:1加入10 mL的HNO₃:HCOL₄混合物,静置1晚。第二天,所有的样品都在热板上加热并使材料变得清澈。然后冷却,所有材料倒入容量瓶中,用蒸馏水定容至50 mL。以硫酸铅标准液为对照,原子吸收分光光度计测定铅含量。

1.3.4 封丘金银花对铅的耐性评价

单项指标耐Pb系数^[18]计算如下:

ω=不同浓度处理下的平均测定值/对照测定值(4)

运用模糊隶属函数法对金银花的耐铅性进行综合评价。运用公式(5)、(6)对单项指标耐铅系数进行标准化处理,计算出其隶属函数值^[20,21],并求其平均值;按照公式(7)计算隶属函数总值。

μ(X_j)=(X_j-X_{min})/(X_{max}-X_{min})(5)

μ(X_j)=(X_{max}-X_j)/(X_{max}-X_{min}) j=1,2,3...n(6)

M = ∑μ(X_j)(7)

式中,X_j为指标测定值;X_{min}和X_{max}分别为参试材料某一指标的最小值和最大值;X_j为某指标隶属函数平均值。指标与耐铅性呈正相关用公式(5),指标与耐铅性呈负相关用公式(6)。

1.4 数据处理

采用spss 22.0进行多重比较及方差分析,采用Excel 2010、GraphPad Prism 5 绘制图表。

2 结果与分析

2.1 铅胁迫对金银花生长、产量的影响

在所设浓度范围内,各处理组金银花均可正常生长,没有出现死亡现象。只有在铅超出国家土壤三级标准2倍(1 000 mg/kg)时,金银花植株出现生长缓慢、植株矮小、叶片稀疏、新枝少等特征。由图1可知,与对照相比,随着铅浓度的升高,各处理水平的株高增量、根长增量、叶片相对含水量、干物质量均呈现下降趋势。株高增量、叶片相对含水量、干物质量在铅浓度较低时(≤600 mg/kg)下降趋势不明显,各处理浓度之间也无显著差异;当铅浓度≥800 mg/kg时株高增量、叶片相对含水量、干物质量与对照相比下降明显(P<0.05),尤以铅浓度为1 000 mg/kg时影响最为显著,株高增量、叶片相对含水量、干物质量与对照相比分别下降了46.91%、17.78%、45.62%。在铅浓度≤800 mg/kg时,根长增量与对照相比下降趋势不明显,在铅浓度为1 000 mg/kg时才表现出明

显差异 ($P < 0.05$), 与对照相比减少了 54.43%。说明金银花对铅胁迫有一定的耐性^[16]。结果表明, 铅对金银花的生长有一定影响, 尤以铅浓度为 1 000 mg/kg 最为显著。

图 2 显示, 铅胁迫对金银花产量有显著影响,

无论是千蕾鲜重、千蕾干重和单株产量, 均呈明显减少趋势。铅的毒害效应随着铅浓度的增加而增加。与对照组相比, 铅浓度为 1 000 mg/kg 时, 单株产量下降 54.90%, 达到最大值。

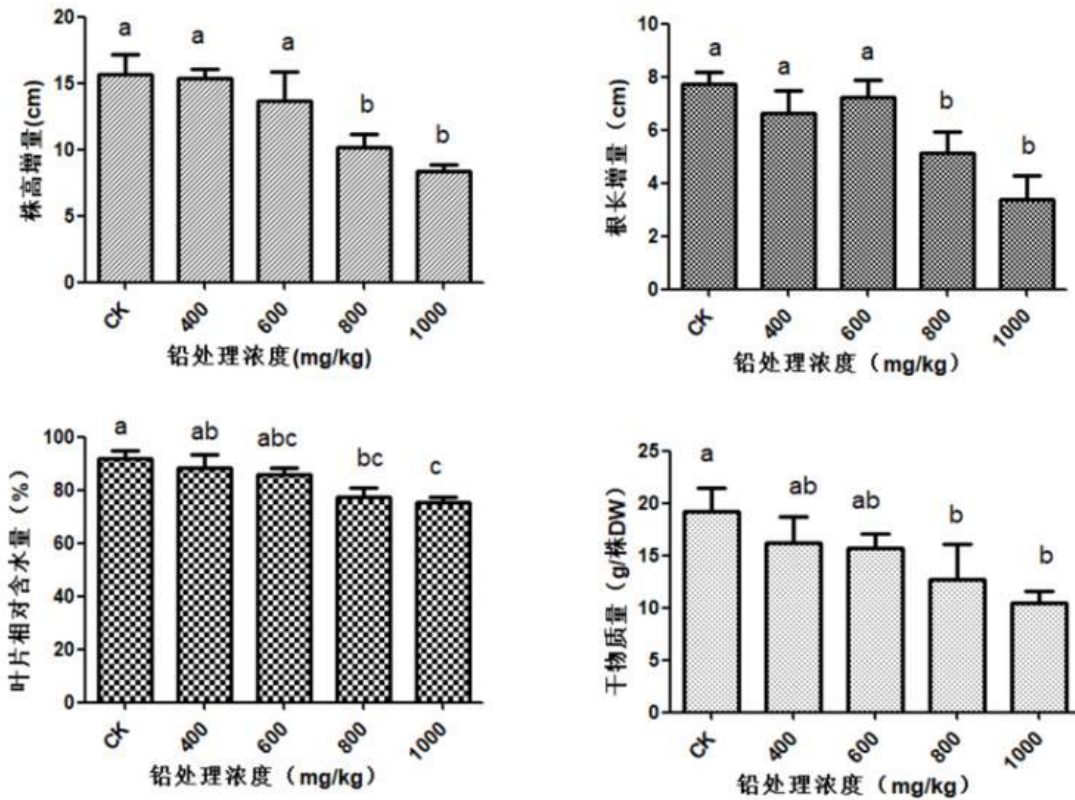


图 1 不同铅浓度处理对金银花生长的影响

注: 图中不同字母, 表示在 $P < 0.05$ 水平差异显著。图中数值均为 5 次平均值 \pm 标准差, 下同

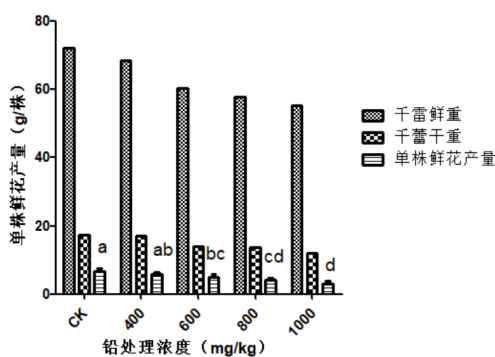


图 2 不同浓度铅处理对金银花产量的影响

2.2 金银花对铅的积累及耐性研究

由表 2 可见, 随着铅处理浓度的增加, 金银花根、叶、花中铅的积累量都有所增加, 且差异显著。在相同浓度处理下, 对铅的积累特性表现出根 > 叶 > 花。当土壤中铅含量达到 800 mg/kg、1 000 mg/kg 时, 花中铅的积累量达到 5.75 mg/kg、10.22 mg/kg, 减去背景值, 接近和超过了国家药典中规定的铅

含量 (≤ 5 mg/kg) 标准。因此笔者谨慎地认为在含铅量 ≥ 800 mg/kg 土壤中种植金银花, 会影响金银花蕾的药用安全性。

利用单项指标方法不能准确反映金银花对铅的耐性, 因此本研究采用模糊隶属函数法对金银花的多项生长指标进行综合评价。由表 3 可知, 金银花各项生长指标的耐性系数变化范围在 0.67 ~ 0.89 之间, 单项指标隶属度值变化范围为 0.63 ~ 0.80, 均高于 0.5, 说明金银花对铅具有一定的耐性^[16, 18]。

2.3 铅胁迫对金银花生理代谢的影响

2.3.1 铅胁迫对叶绿素含量的影响

叶绿素是植物进行光合作用的色素, 其含量的多少是反映植物叶片光合能力的一个重要指标。从表 4 可以看出, 与对照相比, 各处理组金银花叶片中叶绿素 a、叶绿素 b、总叶绿素都呈现明显降低趋势, 但各处理组之间差异不显著。当铅

表2 金银花根、叶、花中铅积累量 mg/kg

处理水平 Pb(mg/kg)	根	叶	花
CK	8.50±1.36c	2.65±0.21d	0.38±0.04c
400	15.33±2.43bc	8.45±0.11cd	1.55±0.06c
600	23.8±5.82b	10.70±0.13c	2.04±0.09c
800	40.3±7.76a	25.30±2.12b	5.75±0.27b
1000	53.9±1.96a	36.50±3.45a	10.22±1.67a

注:表格中同一列不同字母,表示在 $P<0.05$ 水平差异显著。表中数值均为5次平均值±标准差,下同。

表3 金银花耐铅性综合评价

耐性评价	生长指标				
	株高增量	根长增量	干物质量	叶片相对含水量	产量
耐性系数	0.83	0.75	0.71	0.89	0.67
单项隶属度均值	0.73	0.80	0.63	0.64	0.65
隶属函数总值	3.45				

表4 铅胁迫对金银花叶绿素含量的影响 mg/g

处理水平(mg/kg)	叶绿素a	叶绿素b	总叶绿素
CK	1.64±0.01a	1.17±0.07a	2.81±0.16a
400	1.09±0.13b	0.34±0.03b	1.43±0.16b
600	1.20±0.08b	0.37±0.04b	1.57±0.13b
800	1.01±0.02b	0.29±0.01b	1.30±0.00b
1000	0.99±0.05b	0.29±0.05b	1.28±0.10b

物体内重要的渗透调节物质。由表5可知,金银花在受到铅胁迫后,叶片中游离脯氨酸、可溶性糖、可溶性蛋白含量随着铅处理浓度的增加,呈现先升高后降低的趋势。在铅浓度 ≥ 600 mg/kg时,游离脯氨酸含量显著升高($P<0.05$),铅浓度在800 mg/kg时,是对照的4.4倍,达到最高值,随之略有下降,但仍是对照的2.2倍。可溶性糖含量随着铅处理浓度的增加逐渐增高,各处理组之间差异显著($P<0.05$)。在铅浓度为800 mg/kg时,可溶性糖的含量是对照的4.2倍。可溶性蛋白对

表5 铅胁迫对金银花渗透调节物质含量的影响

处理水平 Pb(mg/kg)	mg/g		
	游离脯氨酸	可溶性蛋白	可溶性糖
CK	0.15±0.03d	57.86±9.9b	1.81±0.24d
400	0.21±0.05cd	77.8±1.12a	4.38±0.00c
600	0.31±0.00bc	74.78±0.71a	5.55±0.02b
800	0.66±0.03a	69.32±0.48ab	7.64±0.22a
1000	0.33±0.01b	67.64±0.6ab	1.03±0.41d

浓度为1 000 mg/kg时,叶绿素a、b降幅最大,分别达到39.63%、75.21%;叶绿素b含量的降幅远大于叶绿素a的降幅,表明在受到铅胁迫时,金银花叶片中叶绿素b比叶绿素a更为敏感。各处理组之间总叶绿素含量没有明显差异,说明铅处理对叶绿素的合成抑制作用有一个先快后慢到逐渐适应的过程。

2.3.2 铅胁迫对金银花叶片渗透调节物质的影响

铅胁迫后,植物会通过调节体内的渗透调节物质来维持体内的渗透平衡,减缓铅离子对植株的伤害,游离脯氨酸、可溶性糖、可溶性蛋白是植

物耐铅较敏感,在较低浓度(400 mg/kg)时,其含量即急剧升高($P<0.05$),是对照的1.34倍。随着铅处理浓度的升高,其含量逐渐下降,当铅浓度为1 000 mg/kg时,与对照相比没有显著差异。

2.3.3 铅胁迫对金银花叶片丙二醛含量、抗氧化酶活性的影响

植物在重金属胁迫时,导致活性氧的大量积累,损伤细胞膜,致使膜脂过氧化产物增加,作为脂质过氧化指标,丙二醛(MDA)的多少代表了细胞膜脂过氧化程度和植物对逆境条件反应的强弱。图3所示,随着铅胁迫浓度的增加,金银花叶片中丙二醛含量略有增多,但与对照相比没有明显差异。当铅浓度为1 000 mg/kg时,丙二醛含量显著高于对照($P<0.05$),说明金银花对铅的耐性较强。过量的Pb会诱导活性氧(ROS)的积累,植物体内的抗氧化酶(SOD、POD、CAT)能够有效消除过量的活性氧自由基,缓解植物中毒特征^[22]。随着Pb处理浓度的升高,金银花叶片内SOD活性呈先升后降趋势。这与黄亚萍等^[23]的研究结果相似。当Pb处理浓度为600 mg/kg时,SOD活性达到最大,比对照提高了41.65%;差异显著($P<0.05$);随着Pb处理浓度的增加,SOD活性有所降低,当处理浓度为1 000 mg/kg时,SOD活性与对照无明显差异。POD、CAT活性随着Pb处理浓度的增加而升高,当Pb处理浓度为1 000 mg/kg时,POD、CAT活性达到最大值,分别比对照提高了78.92%、45.60%,差异显著($P<0.05$)。

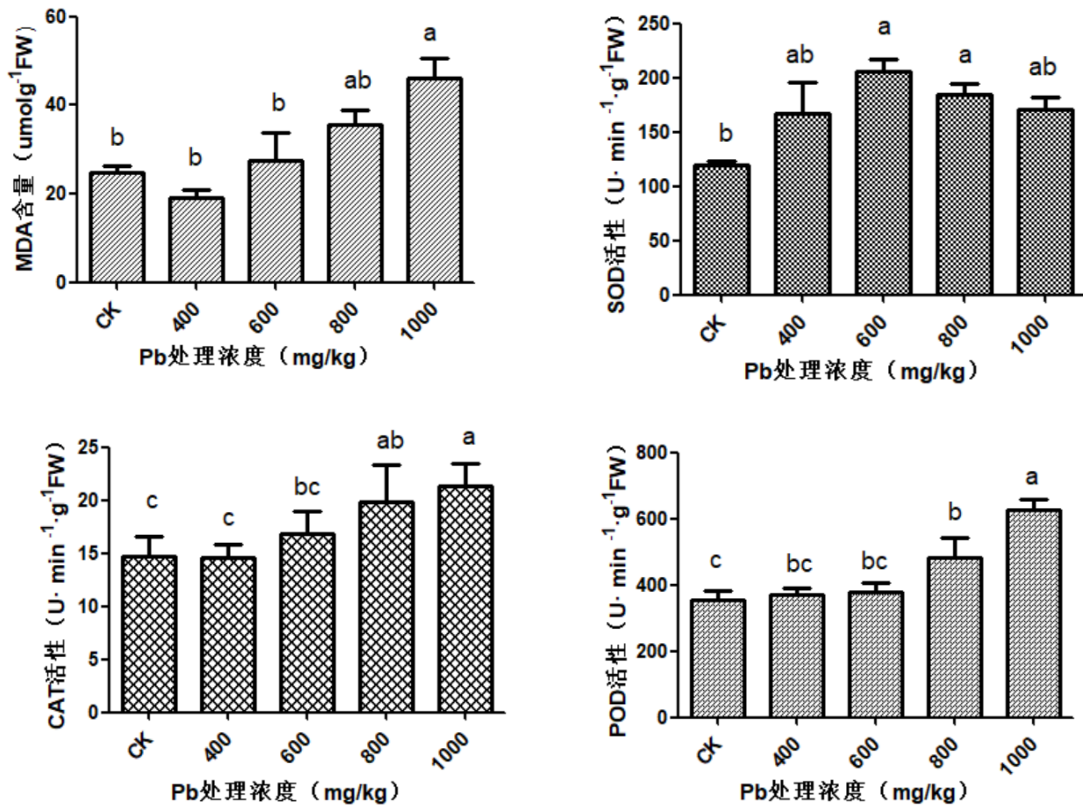


图3 不同铅浓度处理对MDA含量、抗氧化酶活性的影响

3 讨论

铅对植物生长的影响是一个综合作用的结果。本研究显示,在低浓度胁迫时,株高增量、根长增量、叶片相对含水量、干物质量与对照相比差异不显著,当Pb浓度 ≥ 800 mg/kg时,株高增量、叶片相对含水量、干物质量与对照相比下降明显($P < 0.05$),尤以Pb浓度为1 000 mg/kg时影响最为显著。高浓度的Pb胁迫可以引起金银花生长和产量的降低,这与Muhammad等^[24]、Kaur^[25]的研究结果一致。Pb胁迫引起金银花生长和产量的下降,可能是由于铅减少了植物对营养物质的吸收,妨碍了呼吸作用的正常进行,降低了植物的光合活性,干扰了细胞膜的通透性^[26];Pb也会影响参与卡尔文循环、糖和氮代谢的酶活性^[27];Pb还导致植物结构损伤、生化和生理活动降低和生长抑制^[28]。高浓度的Pb也可能导致活性氧簇(ROS)的产生,如超氧化物自由基、羟基自由基和过氧化氢^[29]。活性氧可引起氧化应激,破坏细胞膜和DNA链,最终降低植物的生长和产量^[24]。

叶绿素含量的多少是植物光合强度的一个重要指标。本研究中,与对照相比各处理组金银花叶片中叶绿素a、叶绿素b、总叶绿素含量都呈现明显降低趋势,这与蒋霞^[30]、Jaleel等^[31]的研究结果

一致。Pb污染造成叶绿素含量的减少可能是由于铅阻止了铁分子进入叶绿素的卟啉环,并减少了叶绿素的合成^[31]。Pb也可以通过降低叶绿素酶的活性或减少植物对镁和铁的吸收来减少叶绿素分子的产生^[32]。

植物在逆境如盐胁迫、干旱胁迫、重金属胁迫时会造成细胞渗透压失衡,细胞失水,因此细胞通过积累渗透性物质(脯氨酸、可溶性糖、可溶性蛋白、甜菜碱等)维持渗透压^[33]。本试验结果表明,游离脯氨酸、可溶性糖和可溶性蛋白在铅胁迫下能在金银花叶片内迅速积累,其中可溶性糖和可溶性蛋白反应较敏感,在低浓度铅胁迫下就迅速增高($P < 0.05$)。游离脯氨酸的积累有一个由低到高的过程。渗透调节物质的积累,可以降低细胞内渗透势,增强植物渗透调节能力,促进植物吸收水分,保证植物能够正常生长。但当处理浓度较高时,植物细胞膜的通透性遭到破坏;呼吸作用和光合作用受到抑制,有关糖和氮代谢的酶活性降低,导致植物细胞生化和生理活动降低,所以渗透调节物质的量不能长期保持在高位,在升高后会慢慢降低。

植物为保护自身免受ROS的伤害,存在着内源抗氧化防护系统,包括非酶抗氧化剂和抗氧化酶类。抗氧化剂与抗氧化酶类协同作用,使体内

的ROS产生与淬灭处于一种动态平衡,从而减轻或缓解逆境伤害^[34]。抗氧化酶类主要包括过氧化物酶、超氧化物歧化酶、过氧化氢酶。SOD是植物体内清除ROS的第一道防线,在保护酶系统中处于核心地位。其主要功能是清除 $\cdot\text{O}_2^-$,可以将 $\cdot\text{O}_2^-$ 歧化生成 H_2O_2 。CAT和POD的主要功能是清除生物体内的 H_2O_2 ^[35]。夏雪娇^[29]、蒋霞^[30]、韩航等^[36]的研究表明,Pb胁迫会不同程度地引起植物体内抗氧化酶活性升高。本研究中,铅污染增加了金银花叶片内抗氧化酶的活性,金银花叶片内SOD活性呈先升后降趋势,在低浓度Pb胁迫下SOD活性呈增加趋势,而在高浓度胁迫下呈下降趋势。这与韩航^[36]、曾俊^[37]、Kaur^[38]的研究结果一致。SOD活性随着Pb浓度的增加而降低,可能是因为金银花叶片中 H_2O_2 、 $\cdot\text{O}_2^-$ 含量的增加造成酶催化位点或蛋白质结构的改变及合成金属酶的必需离子如锌、铁、锰等的吸收发生紊乱^[23]。随着 H_2O_2 的积累和增加,CAT和POD活性随Pb浓度的升高而持续增加,且在铅浓度为1 000 mg/kg时达到最大值。作为氧化应激信号的MDA的含量在低浓度时增加不明显,可能是因为抗氧化酶活性的升高,部分消除了 H_2O_2 、 $\cdot\text{O}_2^-$ 的积累,使得MDA的含量增加不显著。但当高浓度Pb胁迫时(大于800 mg/kg)时, H_2O_2 、 $\cdot\text{O}_2^-$ 的大量积累导致细胞膜结构受损、代谢失调,植物体内稳态平衡遭到破坏,因此MDA的含量显著增加。

金银花体内铅含量随着铅浓度的升高而显著增加,相同处理水平不同器官中铅含量不同,积累能力表现为根>叶>花,这与黄亚萍等^[23]、夏雪娇^[29]、吴晓薇等^[39]的研究结果一致,这也与重金属富集的一般规律相符合。金银花对铅的富集能力有限,可能是种植金银花的土壤偏碱性,对重金属离子有沉淀和钝化作用,减少了土壤中铅的有效性^[40]。本研究中,当铅含量 ≥ 800 mg/kg,金银花花蕾中铅积累量达到5.75 mg/kg、10.22 mg/kg,均超过国家药典中规定的 ≤ 5 mg/kg的限定值,这应引起重视。金银花对铅的富集能力有限,减少了铅的毒害效应,因此提高了其耐铅性,这与笔者前面的分析结果是一致的。

参考文献:

- [1] 孔四新,崔旭盛,李海奎.中国当代生态文明建设中的农业问题及其对策[J].农学学报,2013,3(11):14-19.
- [2] 梁 玥.环保部和国土部发布全国土壤污染状况调查公报.http://www.ahtv.cn/c/2014/0418/0025_8912.html[2014-04-18]
- [3] Ehsan N, Nawaz R, Ahmad S, et al. Use of ornamental plant "Vinca" (*Vinca rosea* L.) for remediation of lead contaminated soil[J]. Biodiv Environ Sci, 2016, 8 (3):46--54.
- [4] 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.
- [5] 韩玉林.Pb-Cu复合胁迫对马蔺幼苗生长和生理指标的影响[J].植物资源与环境学报,2010,19(4):24-30.
- [6] Zeng F R, Mao Y, Cheng W D. Genotypic and environmental variation in chromium, cadmium and lead concentrations in rice [J]. Environmental Pollution, 2008, 153(2): 309-314.
- [7] 王 旭,周洪雷,容 蓉.金银花化学成分研究[J].中药材,2016,39(9):2030-2032.
- [8] 王林青,崔保安,张红英.金银花、山银花黄酮类提取物体外抗伪狂犬病毒作用研究[J].中国畜牧兽医,2011,38(3):183.
- [9] 洪 兰,庄 严.欧盟植物药的技术性贸易壁垒对中药出口的影响[J].中国药房,2008,19(15):1211-1213.
- [10] 赵连华,杨银慧,胡一晨,等.我国中药材中重金属污染现状分析及对策研究[J].中草药,2014,45(9):1199-1206.
- [11] 钟 源,赵 蓉,李前慧,等.基于污染指数法的8种中药材重金属污染情况文献研究[J].中国中医药信息杂志,2018,25(5):101-104.
- [12] 国家药典委员会.中华人民共和国药典:一部[M].北京:中国医药科技出版社,2015:221.
- [13] 赵 洁,郎 莹,吴 畏,等.土壤极端干旱对金银花光合生理生化特性的影响[J].西北植物学报,2017,37(12):2444-2451.
- [14] 马雪梅,吴朝峰.干旱胁迫对金银花叶片叶绿素含量及荧光特性的影响[J].江苏农业科学,2018,46(17):133-136.
- [15] 孟衡玲,张 薇,卢丙越,等.金银花幼苗对盐胁迫的生理响应[J].江苏农业科学,2015,43(4):247-249.
- [16] 刘周莉,何兴元,陈 玮,等.镉胁迫下金银花的生长反应及积累特性[J].生态学杂志,2009,28(8):1579-1583.
- [17] 刘周莉,何兴元,陈 玮.镉胁迫对金银花叶片含水量及微量元素吸收积累的影响[J].生态学杂志,2010,29(10):2077-2080.
- [18] 鲜靖苹,柴澎杰,王 勇,等.镉胁迫对草地早熟禾生长与生理代谢的影响[J].核农学报,2019,33(1):176-186.
- [19] 张志良,瞿伟菁,李小芳.植物生理学实验指导(第4版)[M].北京:高等教育出版社,2009:98-103.
- [20] Gulzar S, Khan M A, Ungar I A. Salt tolerance of acoastal salt marsh grass [J]. Commun Soil Sci Plant Anal, 2003, 34(18): 2595-2605.
- [21] 郭 晖,郭孝茹,柴光东,等.重金属短期胁迫下5种观赏植物积累特性与生理抗性研究[J].西南林业大学学报,2017,37(4):28-34.
- [22] 耿艳秋,李大勇,吴 莹,等.低温胁迫对玉米萌发出苗期生理生化指标的影响[J].东北农业科学,2016,41(6):11-15.
- [23] 黄亚萍,俎丽红,沈广爽,等.铅胁迫对蜀葵重金属积累及抗氧化酶活性的影响[J].农业环境科学学报,2017,36(9):1746-1752.

- 2016(7): 1753-1756.
- [15] 王小平,朱 叶.基于VAR模型下农业产业结构调整对农民增收的影响[J].贵州农业科学,2009,37(7):210-213.
- [16] 柳 民.欠发达地区粮食安全和农业产业结构调整均衡问题研究—以甘肃省为例[J].开发研究,2008(3):92.
- [17] 李松青,刘异玲.湖南省农业产业结构调整优化研究[J].湖南社会科学,2013(6):145-147.
- [18] 肖腾姣,赵慧峰.基于灰色关联分析模型的河北省农业产业结构调整研究[J].农业展望,2014(2):52-53.
- [19] 葛新元.中国经济结构变化对经济增长的贡献的计量分析[J].北京师范大学学报(自然科学版),2000(1):43-48.
- [20] 张冬平.中国农业结构改革与效率研究[D].杭州:浙江大学,2001.
- [21] 鲁建彪.傣族社区经济发展及其农业产业结构调整探析—以云南省武定县插甸乡安乐德村为例[J].经济问题探索,2007(1):100-101.
- [22] 李世鹏,罗 帅.新疆农业产业结构调整对农业经济增长的影响分析[J].安徽农业科学,2012,40(8):4907-4915.
- [23] 田文勇,张会岷,赵圣文.贵州省农业产业结构调整对农业经济增长影响的实证分析[J].广东农业科学,2015(4):175-180.
- [24] 马成忠,邓继峰,魏亚伟,等.基于灰色理论的辽宁省农业产业结构调整分析与预测[J].东北农业科学,2016,41(4):106-112.
- [25] 刘后平,何宇飞,陈月澈.农业内部产业结构调整的经济增长效应分析—以四川省为例[J].江苏农业科学,2017,45(19):76-80.
- [26] 李 军,韩成伟.浅析农业结构调整与农机化发展[J].吉林

(上接第75页)

- [24] Muhammad S, Hafiz N A, Zahir A Z, et al. Impact of lead tolerant plant growth promoting rhizobacteria on growth, physiology, antioxidant activities, yield and lead content in sunflower in lead contaminated soil[J]. Chemosphere, 2018, 195: 606-614.
- [25] Kaur G. Pb-induced toxicity in plants: effect on growth, development, and biochemical attributes[J]. Glob Biosci, 2014, 3(6): 881-889.
- [26] Sharma P, Dubey R S. Lead toxicity in plants Braz. V. [J]. Plant Physiol, 2005, 17(1):35-52.
- [27] Verma S, Dubey R S. Lead toxicity induces lipid peroxidation and alters the activities of antioxidant enzymes in growing rice plants[J]. Plant Sci, 2003, 164:645-655.
- [28] Jayasri M A, Suthindhiran K. Effect of zinc and lead on the physiological and biochemical properties of aquatic plant Lemna minor: its potential role in phytoremediation[J]. Appl Water Sci, 2017, 7(3): 1247-1253.
- [29] 夏雪娇.镉、铅胁迫对小麦形态发育和生理代谢的影响及富集特性研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2018.
- [30] 蒋 霞.铅胁迫对金花茶苗木生长和生理特性的影响[D].南宁:广西大学,2018.
- [31] Jaleel C A, Jayakumar K, Chang-Xing Z, et al. Low Concentration of cobalt increases growth, biochemical constituents, mineral status and yield in *Zea mays*[J]. Sci Res, 2009, 1: 128-137.
- [32] Dogan M, Colak. Effect of lead applied to *Triticum aestivum* L. cv. tosunbey on some physiological characteristics[J]. Ekoloji, 2009, 19(73):98-104.
- [33] 张 磊,侯云鹏,王立春.盐碱胁迫对植物的影响及提高植物耐盐碱性的方法[J].东北农业科学,2018,43(4):11-16.
- [34] 魏志刚,王玉成.植物干旱胁迫响应机制[M].北京:科学出版社,2015,118-121.
- [35] 郝曦煜,梁杰,陈 剑,等.Cu²⁺、Mg²⁺、Fe²⁺浸种及喷施对绿豆产量及叶片部分生理指标的影响[J].东北农业科学,2017,42(5):25-29.
- [36] 韩 航,陈顺钰,薛凌云,等.铅胁迫对金丝草生长及生理生化的影响[J].草业学报,2018,27(4):131-138.
- [37] 曾 俊.Cd、Pb胁迫对不同月季品种生长和生理生化特性的影响[D].南京:南京农业大学,2011.
- [38] Kaur G, Singh H P, Batish D R, et al. A time course assessment of changes in reactive oxygen species generation and antioxidant defense in hydroponically grown wheat in response to lead ions (Pb²⁺) [J]. Proto-plasma, 2012, 249(4):1091-1100.
- [39] 吴晓薇,裴红宾,张永清,等.酸模叶蓼对重金属Pb胁迫的生理响应[J].河南农业科学,2013,42(10):105-109,141.
- [40] 冯 鹏,孙 力,申晓慧,等.多年生黑麦草对Pb、Cd胁迫的响应及富集能力研究[J].草业学报,2016,25(1):153-162.