

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2019.13.043

李 聪¹, 杨爱江^{1,2}, 陈蔚洁¹, 王 丽¹

(1. 贵州大学资源与环境工程学院, 贵州贵阳 550025; 2. 贵州大学环境工程规划设计研究所, 贵州贵阳 550025)

摘要:采用水培方法研究不同浓度(5、10、15、20、30、50 mg/L) Sb(Ⅲ)和 Sb(V)处理下鱼腥草丙二醛(MDA)含量、超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT)活性、可溶性糖(SS)、可溶性蛋白(SP)、游离脯氨酸(Pro)含量的变化,表征鱼腥草对镉胁迫作出生理响应和抗氧化调节反应。结果表明,MDA含量随胁迫浓度升高,呈现先升高后下降再升高的趋势;SOD、POD、CAT活性均随胁迫浓度的升高,呈现先增强再减弱的趋势;镉浓度与SS含量呈正相关,与SP含量呈负相关,Pro含量随镉浓度的升高呈先升高再降低到稳定水平的趋势。鱼腥草在镉胁迫下通过提高抗氧化酶活性和渗透调节物质含量,在共同作用下增强其对镉的耐受性,减缓所受伤害。另外,鱼腥草体内的SOD活性、SS含量、SP含量对Sb(Ⅲ)、Sb(V)的胁迫敏感度较高,可将这3个指标作为鉴定鱼腥草在镉胁迫下生理长势的首要表征指标。

关键词:鱼腥草; 梯胁泊; 丙二醛; 抗氧化酶; 渗透调节物质; 生理指标; 耐受性; 综合利用

中图分类号:X173:X53 文献标志码:A 文章编号:1002-1302(2019)13-0175-04

我国是世界上锑矿资源最为丰富的国家,锑矿保有储量占世界的 60%^[1],年产量占世界总产量的 80%^[2],而中国 79% 的锑产于西南大面积低温成矿域的湘、黔锑矿带^[3-6],该区著名的锑矿有湖南锡矿山、广西大厂锑矿与贵州独山锑矿等。西南局部地表环境可能是我国乃至世界上锑污染较为典型的地区,锑矿的开采冶炼向环境中释放了大量的锑,锑胁迫使周边植物体内活性氧的产生和清除系统失衡,进一步导致植物的生理代谢紊乱,抑制植物的生长和光合作用等基础生命过程。有研究表明,植物体内可产生毒性的锑含量范围为 5~10 mg/kg^[7],但 He 指出在植物体内 5 mg/kg 锑就能产生毒性^[8]。植物锑中毒的症状主要表现为生长缓慢、植株矮小、叶片瘦小及根系生长不良,严重时还会出现叶片发黄乃至植物枯萎^[9-11]。

鱼腥草(*Houttuynia cordata* Thunb.) 属三白草科蕺菜属植物, 又名岑草、侧耳根、臭腥草等, 野生于林下、草丛、田埂和沟溪边, 地下根状茎及嫩茎叶不仅可作为直接食用的美味蔬菜, 也可直接入药或经蒸馏提取制成注射剂应用, 具有抗菌消炎作用, 对呼吸道等疾病也有积极的治疗作用, 是中医药行业不可多得的药材^[12-13]。卫生部 2002 年公布的《关于进一步规范保健食品原料管理的通知》文件中明确规定鱼腥草入选药食同源目录, 说明鱼腥草具有较高的综合开发利用价值。

本试验采用水培试验法研究 Sb(Ⅲ)和 Sb(Ⅴ)胁迫下鱼

收稿日期:2018-03-30

基金项目:贵州省普通高等学校喀斯特环境生态工程研究中心项目(编号:黔教合 KY 字[2016]011);贵州省环境功能材料与设备研发研究生工作站项目(编号:黔教研合 GZZ 字[2016]07)。

作者简介:李 聪(1992—),女,河北衡水人,研究方向为环境污染控制。E-mail:549781845@qq.com。

通信作者:杨爱江,副教授,研究方向为环境污染与控制。E-mail:
yangaij8818@sina.com。

腥草体内丙二醛(MDA)含量、抗氧化酶[超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)]活性以及渗透调节物质[可溶性糖(SS)、可溶性蛋白(SP)、游离脯氨酸(Pro)]含量的变化规律,表征鱼腥草在锑胁迫下体内自由基的动态变化,同时探讨在Sb(Ⅲ)和Sb(Ⅴ)胁迫下与以上生理指标的相关性,探究鱼腥草对锑的耐受性,为其综合开发利用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试植物为鱼腥草,2017年5月统一购买于贵州省贵阳市花溪区某菜市场,均为根茎部分。购买后先用自来水仔细清洗,然后用去离子水清洗2~3遍,接着将植物移至500 mL透明塑料杯中进行水培,水培介质为50%改良霍格兰(Hoagland-Arnon)溶液,每3 d更换1次,放置于贵州大学环境生态修复试验场避雨栽培大棚中。

1.2 试验设计

待供试鱼腥草充分适应成长 2 周并长出新叶时,选取大小一致的鱼腥草,加入浓度为 5、10、15、20、30、50 mg/L 的 Sb(Ⅲ) 和 Sb(V) 作为试验组,以不加 Sb 的 50% 改良霍格兰溶液为空白对照,为保证溶液中锑的价态基本不变,每 3 天更换 1 次营养液^[14],植物生长 14 d 后收获,共计 13 个处理,每个浓度处理 3 次重复。

1.3 试验测定指标及方法

丙二醛(MDA)含量采用硫代巴比妥酸比色法测定^[15];超氧化物歧化酶(SOD)活性采用氮蓝四唑法(NBT)测定;过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)活性均采用苏州科铭生物科技有限公司生产的试剂盒测定;可溶性糖含量采用蒽酮比色法测定;可溶性蛋白含量采用紫外分光光度法测定;游离脯氨酸含量采用磺基水杨酸法测定。试验测定在贵州大学资源与环境工程学院完成。

1.4 数据统计分析

制图采用 Origin 8.5 完成。

2 结果与分析

2.1 镉胁迫对鱼腥草组织细胞膜脂过氧化的影响

如图 1 所示,在 Sb(Ⅲ)和 Sb(V)胁迫下,随着处理水平升高,MDA 含量均是先上升后降低最后又上升。在 Sb(Ⅲ)处理下,浓度为 0~5 mg/L 时,MDA 含量略有上升;5~15 mg/L 时,MDA 含量缓慢降低并达到最低值 1.87 $\mu\text{mol/g}$,但相比对照组仍增加 29.96%;随后在 15~50 mg/L 浓度范围内,MDA 含量逐渐上升,50 mg/L 时达到最高值 2.46 $\mu\text{mol/g}$,高于对照组 71.09%。在 Sb(V)处理下,MDA 含量同样先缓慢上升,随后下降并在胁迫浓度为 20 mg/L 时显著下降到最低值 1.57 $\mu\text{mol/g}$,相比对照组无显著变化,最后逐渐升高,50 mg/L 时高于对照组 58.53%。对比研究 Sb(Ⅲ)和 Sb(V)试验发现,低浓度(0~10 mg/L)镉胁迫时,Sb(Ⅲ)试验组的 MDA 含量低于 Sb(V)试验组;而在高浓度(15~50 mg/L)范围内,Sb(Ⅲ)试验组的 MDA 含量高于 Sb(V)试验组。

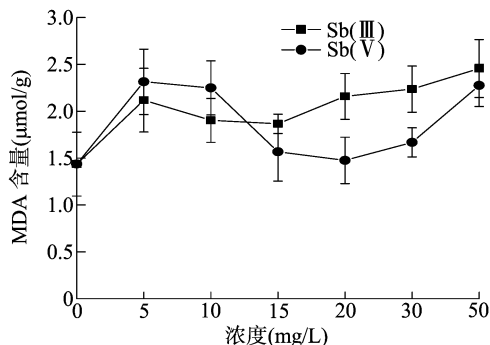


图1 Sb(Ⅲ)和 Sb(V)对鱼腥草丙二醛含量的影响

2.2 镉胁迫对抗氧化酶活性的影响

如图 2-a 所示,随着 Sb(Ⅲ)和 Sb(V)浓度升高,鱼腥草体内 SOD 活性均先显著升高再缓慢下降,且明显高于对照组,表明鱼腥草对其毒性有一定的耐受范围。在 Sb(Ⅲ)处理下,胁迫浓度 30 mg/L 时,SOD 活性最高,为 251.46 U/g,明显高于对照组;胁迫浓度 50 mg/L 时,SOD 活性较最高值下降 16.27%。在 Sb(V)处理下,胁迫浓度同样在 30 mg/L 时,SOD 活性最高,为 245.70 U/g;胁迫浓度 50 mg/L 时,SOD 活性较最高值下降 12.72%。对比研究 Sb(Ⅲ)和 Sb(V)试验发现,Sb(Ⅲ)试验组鱼腥草体内的 SOD 活性与 Sb(V)试验组差异不显著,说明镉的价态对鱼腥草体内 SOD 清除自由基能力没有显著差别。

如图 2-b 所示,随着 Sb(Ⅲ)和 Sb(V)浓度升高,其体内 POD 活性均呈现先上升再下降的趋势。由于价态不同,达到最大的酶活性的最大值也不同,Sb(Ⅲ)、Sb(V)胁迫试验中分别在 10、20 mg/L 时分别达到其最大值 2 909.98、1 178.44 U/g,且显著高于对照组。由于 Sb(Ⅲ)毒性比 Sb(V)大,在较低浓度(10 mg/L)就能达到其 POD 活性的最大值,随着胁迫浓度增加产生过量的 H_2O_2 ,造成的伤害超过了防御酶系统的清除能力,从而导致酶活性下降^[16]。在低浓度镉胁迫时,鱼腥草体内过氧化物酶活性增强,说明其清除氧自

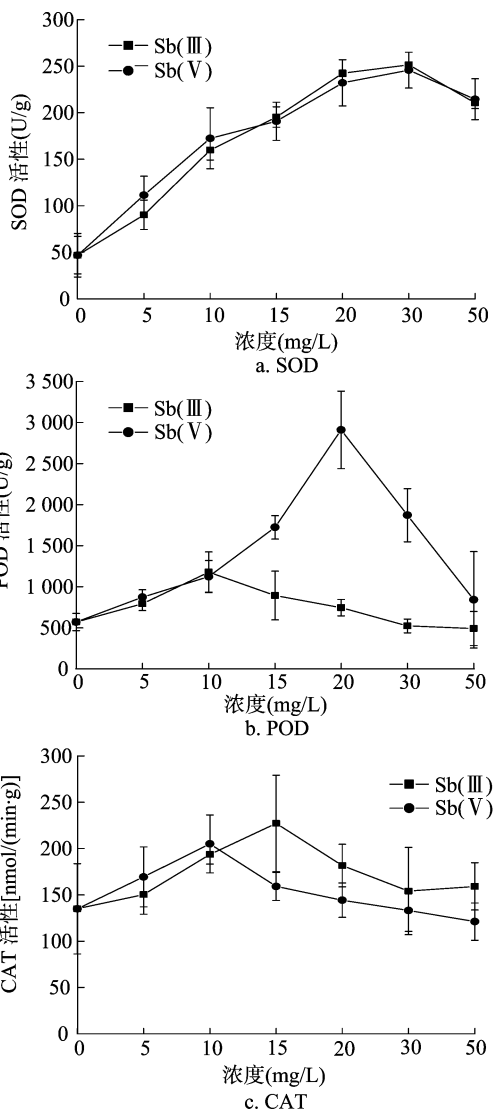


图2 Sb(Ⅲ)和 Sb(V)对鱼腥草抗氧化酶活性的影响

由基能力增强,但在较高浓度时,其活性开始下降,说明其抗性保护能力有一定限度范围^[17]。

如图 2-c 所示,CAT 活性随着 Sb(Ⅲ)和 Sb(V)浓度的增加呈先升高再下降的趋势。在 Sb(Ⅲ)胁迫下,0~15 mg/L 范围内 CAT 活性逐渐上升到最高值,为 227.14 nmol/(min·g),为对照组的 168.2%;15~50 mg/L 范围内逐渐降低,但 50 mg/L 时 CAT 活性仍高于对照组 17.9%。在 Sb(V)胁迫下,浓度 10 mg/L 时,CAT 活性达到最高值 205.05 nmol/(min·g),为对照组的 151.9%;50 mg/L 时 CAT 活性达到其最小值,为 121.10 nmol/(min·g),为对照组的 90.3%。低浓度(5~10 mg/L)胁迫时,Sb(V)试验组 CAT 活性高于 Sb(Ⅲ)试验组;在高浓度(10~50 mg/L)胁迫时,Sb(V)试验组低于 Sb(Ⅲ)试验组。此外,本研究中 Sb(Ⅲ)和 Sb(V)胁迫浓度较低时植物体内 CAT 活性增速较快,而当 Sb(Ⅲ)和 Sb(V)浓度增加到一定水平时,CAT 活性增速减缓,表明高浓度(10~15 mg/L)镉胁迫会使鱼腥草内的多种功能膜及酶系统受到一定程度的破坏,严重影响其生长发育。

2.3 镉胁迫对渗透调节物质的影响

如图 3 - a 所示, Sb(Ⅲ)、Sb(Ⅴ)胁迫下, 鱼腥草体内可溶性糖含量随镉浓度增加而升高。在 Sb(Ⅲ) 试验组中, 胁迫浓度在 0 ~ 15 mg/L 范围内, 可溶性糖含量上升显著; 随后上升速率减慢, 在 50 mg/L 时其含量达到最高值 25.55 mmol/g, 为对照组的 2.775 倍, 显著高于对照组。在 Sb(Ⅴ) 试验组中, 胁迫浓度在 0 ~ 20 mg/L 范围内, 可溶性糖含量上升显著; 50 mg/L 时含量达到最高值 24.52 mmol/g, 为对照组的 2.663 倍, 显著高于对照组。研究发现, 毒性更强的 Sb(Ⅲ) 胁迫下鱼腥草可溶性糖的含量略高于毒性较弱的 Sb(Ⅴ) 胁迫, 这是由于较强的毒性须合成较多的可溶性糖, 以减少细胞损伤的危害, 与李德生等研究 Zn²⁺ 胁迫下日本榉木可溶性糖含量的

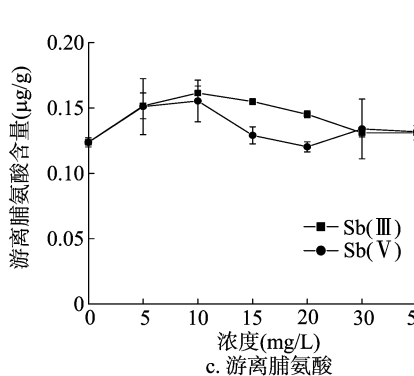
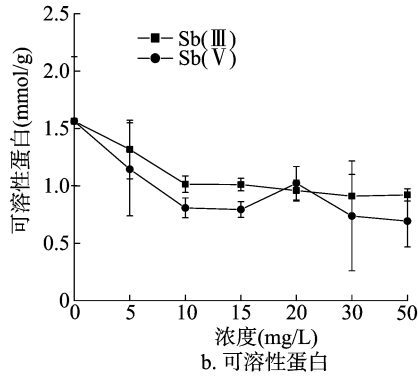
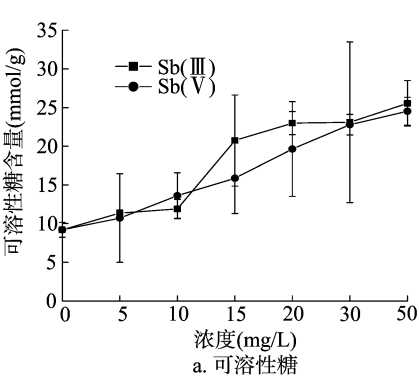


图3 Sb(Ⅲ) 和 Sb(Ⅴ) 对鱼腥草渗透调节物质的影响

2.4 镉含量、抗氧化酶活性及渗透调节物质的相关性

如表 1 所示, Sb(Ⅲ) 胁迫下, Sb(Ⅲ) 浓度与鱼腥草体内的 MDA 含量、SOD 活性、CAT 活性、SS 含量呈正相关, 而与 POD 活性、SP 含量、Pro 含量呈负相关; 其中 SOD 活性、SS 含量、SP 含量的变化与 Sb(Ⅲ) 浓度显著相关, 说明这 3 个指标对 Sb(Ⅲ) 的敏感度较强, 可以作为鉴定鱼腥草在 Sb(Ⅲ) 胁迫下的生理长势的指标。3 种抗氧化酶活性之间均没有相关性; 3 种调节物质中可溶性糖含量与可溶性蛋白含量呈显著负相关。细胞膜脂过氧化程度与 POD 活性、游离脯氨酸含量

变化趋势^[18]一样。

如图 3 - b 所示, Sb(Ⅲ)、Sb(Ⅴ)胁迫下, 鱼腥草体内可溶性蛋白含量随镉浓度的增加逐渐下降, 在浓度 50 mg/L 时, 可溶性蛋白含量分别达到最小值 0.92、0.69 mg/g, 显著低于对照组, 与谌金吾研究的结论^[19]相似。由于 Sb(Ⅲ) 毒性更强, 对鱼腥草细胞膜造成的损害更严重, 造成植物细胞膜蛋白水解, 呈现出 Sb(Ⅲ) 试验组可溶性蛋白含量整体高于 Sb(Ⅴ)。

如图 3 - c 所示, 在 Sb(Ⅲ) 和 Sb(Ⅴ) 胁迫下, 鱼腥草体内游离脯氨酸含量呈先升再降的趋势, 均在 10 mg/L 时达到最高值, 分别高于对照组 30.56%、25.63%, 与对照相比存在显著性差异; 30 ~ 50 mg/L 胁迫范围内与对照组含量相同。

分别呈显著负相关, POD 活性越强, 说明鱼腥草体内活性氧清除速率越快, 而游离脯氨酸作为一种渗透调节物质, 在植物体内大量积累, 稳定生物大分子结构, 也具有清除活性氧的能力^[19], 可以保持细胞膜结构的完整性, 因此在 POD 与游离脯氨酸的共同作用下, 鱼腥草的细胞膜脂过氧化程度越低; SOD 活性与可溶性糖含量呈显著正相关, 而与可溶性蛋白含量呈显著负相关, 说明可溶性糖的积累对鱼腥草 SOD 活性的保持具有重要的作用; POD 活性与游离脯氨酸含量呈显著正相关, 同样在清除活性氧自由基和稳定细胞结构方面起共同作用。

表 1 抗氧化酶活性、渗透调节物质含量与 Sb(Ⅲ) 浓度变化的相关性

指标	相关系数							
	Sb(Ⅲ) 浓度	MDA 含量	SOD 活性	POD 活性	CAT 活性	SS 含量	SP 含量	Pro 含量
Sb(Ⅲ) 浓度	1.000							
MDA 含量	0.321	1.000						
SOD 活性	0.893 **	0.143	1.000					
POD 活性	-0.536	-0.929 **	-0.393	1.000				
CAT 活性	0.071	0.143	0.071	-0.321	1.000			
SS 含量	1.000 **	0.321	0.893 **	-0.536	0.071	1.000		
SP 含量	-0.964 **	-0.250	-0.964 **	0.500	-0.107	-0.964 **	1.000	
Pro 含量	-0.126	-0.901 **	-0.072	0.883 **	-0.450	-0.126	0.126	1.000

注: ** 表示在 0.01 置信度(双侧)上显著相关。

如表 2 所示, 在 Sb(Ⅴ) 胁迫下, Sb(Ⅴ) 浓度与鱼腥草体内的 SOD 活性、POD 活性、SS 含量呈正相关, 而与 MDA 含量、CAT 活性、SP 含量、Pro 含量呈负相关; 其中 SOD 活性、SS 含量、SP 含量与 Sb(Ⅴ) 浓度显著相关, 说明这 3 个指标对 Sb(Ⅴ) 的敏感度较强, 可以作为鉴定鱼腥草在 Sb(Ⅴ) 胁迫下的生理长势的指标。3 种抗氧化酶活性之间均没有相关

性; 3 种调节物质之间, 可溶性糖含量与可溶性蛋白含量呈显著负相关。细胞膜脂过氧化程度仅与 POD 活性呈显著负相关, POD 活性越强, 活性氧清除速率越快, 对细胞膜脂的氧化伤害就越小; SOD 活性与可溶性糖含量呈显著正相关, 可溶性糖的积累对鱼腥草 SOD 活性的保持具有重要的作用。

表 2 抗氧化酶活性、渗透调节物质含量与 Sb(V) 浓度变化的相关性

指标	相关系数							
	Sb(V) 浓度	MDA 含量	SOD 活性	POD 活性	CAT 活性	SS 含量	SP 含量	Pro 含量
Sb(V) 浓度	1.000							
MDA 含量	-0.536	1.000						
SOD 活性	0.893 **	-0.750	1.000					
POD 活性	0.429	-0.929 **	0.750	1.000				
CAT 活性	-0.607	-0.071	-0.464	0.143	1.000			
SS 含量	1.000 **	-0.536	0.893 **	0.429	-0.607	1.000		
SP 含量	-0.893 **	0.393	-0.714	-0.250	0.464	-0.893 **	1.000	
Pro 含量	-0.107	-0.179	0.179	0.464	0.429	-0.107	0.000	1.000

注: ** 表示在 0.01 置信度(双侧)上显著相关。

3 讨论与结论

镉进入鱼腥草会使其体内活性氧的产生和清除系统失衡,鱼腥草的抗氧化酶与渗透调节物质便产生相应的变化,起到缓解调节危害的作用。随着镉浓度增加,鱼腥草体内 MDA 含量先升高随后下降再升高,主要原因是低浓度(0 ~ 10 mg/L)Sb(Ⅲ)和 Sb(V)胁迫对鱼腥草的细胞会产生破坏作用,加剧膜脂化,MDA 含量逐渐上升;但随着抗氧化酶系统的启动,抗氧化酶对 MDA 起到了一定的抑制作用,其含量随之降低到最小值;而重金属浓度继续增大,抗氧化酶系统活性逐渐降低,对 MDA 抑制作用减弱,因此 MDA 含量表现为上升趋势,直至重金属浓度达到 50 mg/L 时,MDA 含量达到最大值。焦铁男等研究发现,黑藻在重金属 Cd²⁺ 胁迫下丙二醛含量也有相同的变化规律^[20]。由于低浓度 Sb(Ⅲ)更能刺激植物的生长发育,因此在 0 ~ 10 mg/L 范围内 Sb(Ⅲ)处理下的 MDA 含量更低,随着浓度升高,Sb(Ⅲ)毒性比 Sb(V)强,对鱼腥草细胞膜脂过氧化程度更严重,呈现出 Sb(Ⅲ)组 MDA 含量高于 Sb(V)的现象。

鱼腥草体内的 3 种抗氧化酶 SOD、POD 和 CAT 活性均随胁迫浓度的升高,呈现先上升后下降的趋势,在重金属低浓度处理下 3 种抗氧化酶活性升高,有人把这种现象解释为低浓度重金属对植物积极的“刺激作用”,其机制被认为是活性氧信号作为第二信使,启动了细胞的防御反应,采取各种措施,提高抗性以适应不良环境。但这种“积极作用”受到处理浓度的限制,随处理浓度的增大,重金属离子在机体内积累量加大,从而对植物的毒害加剧,重金属胁迫使植物细胞内产生的活性氧自由基超过抗氧化酶系统的清除能力时,就会导致自由基在细胞内大量积累,从而诱导对植物细胞的过氧化损伤^[21],表明重金属胁迫条件下植物体内活性氧清除系统对植物细胞的保护作用是有其一定限度的。本研究在低浓度时,鱼腥草体内的抗氧化酶机制已开始对镉产生抗性,而在较高浓度时,虽然 3 种抗氧化酶活性降低,但鱼腥草表现并未出现较为明显的损伤表征,因此鱼腥草对镉有较好的耐性。

可溶性糖、可溶性蛋白与游离脯氨酸作为渗透调节物质,在植物处于胁迫条件下时具有调节代谢过程,保持细胞和组织水分平衡,稳定生物大分子结构,使植物细胞免受伤害的作用。镉胁迫浓度升高,鱼腥草体内积累可溶性糖和游离脯氨酸等小分子有机物参与渗透调节,可溶性糖可以有效地提高细胞渗透浓度,降低水势,使其细胞免受伤害,也是构成生物

大分子的碳架和重要的能量来源,而游离脯氨酸是一种水溶性的氨基酸、渗透调节物质和细胞质渗透物质,同样可保持植物受环境胁迫时的膨压^[22],镉胁迫下鱼腥草体内的可溶性糖和游离脯氨酸含量升高,以保持细胞和组织水平衡,稳定生物大分子结构,使细胞免受伤害。而游离脯氨酸含量随后缓慢降低到初始水平,也许是和可溶性糖共同作用的原因。可溶性蛋白属于参与各种代谢的酶类,SOD、POD 和 CAT 等 3 种抗氧化酶活性呈现出上升的趋势,可能导致可溶性蛋白含量与镉胁迫浓度呈负相关。

本研究通过分析抗氧化酶活性、渗透调节物质含量与镉浓度变化的相关系数发现,鱼腥草体内的 SOD 活性、可溶性糖含量、可溶性蛋白含量对 Sb(Ⅲ)、Sb(V)的胁迫敏感度较高,可将这 3 个指标作为鉴定鱼腥草在镉胁迫下的生理长势的指标。

参考文献:

[1]陈 臻,吕文英. 镉的环境毒理效应研究进展[J]. 广东化工, 2014,41(10):78-79.

[2]吴丰昌,郑 建,潘响亮,等. 镉的环境生物地球化学循环与效应研究展望[J]. 地球科学进展,2008,23(4):350-356.

[3]宋叔和. 中国矿床[M]. 北京:地质出版社,1994.

[4]Fan D,Zhang T,Ye J. The Xikuangshan Sb deposit hosted by the upper devonian black shale series, hunan, China[J]. Ore Geology Reviews,2004,24(1/2):121-133.

[5]杨瑞琰,马东升,潘家永. 锡矿山锡矿床成矿流体的热场研究[J]. 地球化学,2003,32(6):509-519.

[6]涂光炽. 低温地球化学[M]. 北京:科学出版社,1998.

[7]Kabata P A,Pendias H K. Trace elements in soils and plants[M]. Florida:CRC Press,2011:951-974.

[8]Distribution H M. Phytoavailability of antimony at an antimony mining,area s. hunan,China[J]. Environmental Geochemistry and Health,2007,29(3):209-219.

[9]何孟常,谢南岳,余维德,等. 土壤中镉对水稻的污染及改良措施[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版),1994,20(1):47-51.

[10]Feng R W,Wei C Y,Tu S X,et al. Antimony accumulation and antioxidative responses in four fern plants[J]. Plant and Soil,2009, 317(1/2):93-101.

[11]宋书巧,吴浩东,蓝唯源. 土壤镉污染对桑树的影响初探[J]. 资源开发与市场,2008,24(1):1-3,88.

[12]潘 莹,江海燕. 鱼腥草药理作用及临床应用研究进展[J]. 中西医结合心脑血管病杂志,2002,18(4):52-53.

马存金,陈剑秋,李曰鹏,等. 水溶肥中镁不同含量对辣椒产量、品质和根系发育的影响[J]. 江苏农业科学,2019,47(13):179-182.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2019.13.044

水溶肥中镁不同含量对辣椒产量、品质和根系发育的影响

马存金^{1,2}, 陈剑秋^{1,2,3}, 李曰鹏¹, 任士伟^{1,2,3}

(1. 金正大生态工程集团股份有限公司, 山东临沭 276700; 2. 养分资源高效开发与综合利用国家重点实验室, 山东临沭 276700;

3. 农业部植物营养与新型肥料创制重点实验室, 山东临沭 276700)

摘要:采用盆栽的方法,研究镁元素在水溶肥中不同添加量对辣椒产量、品质和根系发育的影响。以线椒 8819 品种为试验材料,设置镁元素不同添加量为 0、0.25%、0.50%、1.00%、2.00%、4.00% (均以 MgO 计),整盆取样并进行各指标测定。试验结果表明:在低添加量(0~2.00%)下,镁元素的添加促进了辣椒的生长发育及产量和品质的提升,随着镁元素含量的增加,辣椒生长各指标[株高、茎粗、叶绿素含量(以 SPAD 计)、净光合速率]、果实产量、果实品质、根系形态指标和根系生理活性指标均呈先升后降的趋势,其中以镁元素添加量为 1.00% 的处理效果最好;当镁元素添加量达到 4.00% 时,各指标均低于对照,说明高添加量镁元素对辣椒的生长发育产生了抑制作用。综上,在镁元素添加量为 0~2.00% 范围内,镁元素的添加促进了辣椒的生长发育及产量、品质的提高,其中以镁元素添加量为 1.00% 的处理效果最好,超过 4.00% 后对辣椒生长发育及产量、品质的提高产生了抑制作用。

关键词:辣椒;镁含量;水溶肥;生长指标;产量;根系发育;形态指标;生理活性指标;品质;镁元素添加量

中图分类号:S641.306 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2019)13-0179-04

镁是植物必需的中量营养元素,是植物体内叶绿素和许多酶的重要组成成分,在植物的光合作用、酶的活化、碳水化合物与蛋白质合成、脂肪代谢等诸多方面均有重要作用^[1]。随着化肥用量增加和有机肥用量的减少,高产耐肥品种大面积种植以及复种指数不断提高,镁元素不断携出土壤,同时土壤又长期缺少镁肥补充,因而土壤中镁元素逐渐耗竭,作物的缺镁现象在各地不断出现,并已成为限制作物产量和品质提高的一个重要因素。据系统研究^[2]发现,我国目前缺

镁土壤 0.26 亿 hm^2 ,要补充 984 万 t MgO,约占亚洲镁肥料用量的 1/4。随着镁肥料研究的深入、推广应用工作的展开,镁肥料的研发逐步加强,镁肥料的产销量和施用量大幅提高^[3]。

植物根系的生长发育不仅受到遗传基因的控制,而且强烈地受到生长环境如养分、水分状况等诸多因素的影响^[4]。矿质元素的生物有效性可直接影响到植物根系的生长、分布和功能^[5],镁作为植物必需的一种矿质元素,可直接或间接地影响根系的生长状况和活力水平,进而影响地上部的生长及作物最终产量和品质^[6]。有研究表明,适量的镁不仅能够促进植株根系的形态建成和活力提高,建成强大的根系^[7],增强作物对矿质元素的吸收,加强生长发育进程,还能提高叶绿素的含量,增加光合作用的强度,促进植株体内碳水化合物的合成与转化^[8]。镁素不仅能增加作物根系生物量、根尖数、根系体积和表面积^[9],促进水分和养分的吸收,还能提高作物果实产量和品质^[10]。

国内对于镁肥料的研究与应用起步较晚,目前镁肥料的

收稿日期:2018-03-30

基金项目:国家重点研发计划(编号:2016YFD0222405-7);山东省重点研发计划(编号:2016ZDJQ0701)。

作者简介:马存金(1989—),男,山东新泰人,硕士,中级农艺师,主要从事作物栽培生理及新型肥料研究。E-mail: macunjin@kingenta.com。

通信作者:任士伟,硕士,中级农艺师,主要从事植物营养和新型肥料研究。E-mail: renshiwei@kingenta.com。

[13]冯平安,叶寿山,韩传环,等. 复方鱼腥草滴丸解热抗炎作用实验研究[J]. 安徽教育学院学报,2002,20(6):66-68.

[14]王晓丽,韦朝阳,冯人伟,等. 白玉凤尾蕨与印度芥菜对不同形态砷的富集与转化特征[J]. 环境科学学报,2014,34(3):720-727.

[15]郝再彬,苍晶,徐仲. 植物生理实验[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2004:1-147.

[16]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.

[17]张文娟,李悦,陈忠林,等. 重金属胁迫对高羊茅和黑麦草种子萌发及幼苗生理特性的影响[J]. 安徽农业科学,2017,45

(6):1-4.

[18]李德生,何安,彭玲,等. 重金属对日本榉木内渗透调节物质的影响[J]. 江苏农业科学,2018,46(1):101-104.

[19]谌金吾. 三叶鬼针草(*Bidens pilosa* L.)对重金属 Cd、Pb 胁迫的响应与修复潜能研究[D]. 重庆:西南大学,2013:1-141.

[20]焦铁男,朱宏. 黑藻(*Hydrilla verticillata*)对重金属 Cd^{2+} 的积累及生理响应[J]. 中国农学通报,2014,30(5):249-253.

[21]黄玉山,罗广华,关荣文. 镉诱导植物的自由基氧化损伤[J]. 植物学报,1997,39(6):522-526.

[22]焦蓉,刘好宝,刘贵山,等. 论脯氨酸累积与植物抗渗透胁迫[J]. 中国农学通报,2011,27(7):216-221.