

外源水杨酸对毒死蜱胁迫下蔬菜上海青 抗氧化防御反应的影响

刘向阳 李英涛 高飞 赵特 周琳

河南农业大学植物保护学院/河南省新型农药创制与应用重点实验室, 郑州 450002

摘要 在室内栽培条件下, 观察毒死蜱(chlorpyrifos, CPF)对蔬菜上海青造成的胁迫和水杨酸(salicylic acid, SA)对上海青应对毒死蜱胁迫的影响。测定结果显示: 喷施 91.2、182.4、273.6 mg/L 的毒死蜱后, 短期内(2~4 d)上海青中超氧化物歧化酶(SOD)和过氧化氢酶(CAT)活性受到抑制, 而过氧化物酶(POD)活性则有所升高, 且伴随 POD 活性升高的还有丙二醛(MDA)、脯氨酸(Pro)和谷胱甘肽(GSH)含量的增加, 表明毒死蜱在喷施后短期内对上海青具有一定的胁迫; 高浓度外源水杨酸可缓解毒死蜱对上海青 SOD 和 CAT 的直接抑制, 使 SOD 和 CAT 活性增强, 但对 POD 活性和 MDA、Pro 含量无明显影响, 表明在供试浓度范围内, 外源水杨酸可部分缓解毒死蜱对上海青的胁迫。

关键词 上海青; 毒死蜱; 农药胁迫; 水杨酸; 防御反应

中图分类号 S 436.34; S 634.3 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2014)04-0066-06

在蔬菜生产中常常因防治病虫害而大量多次使用农药, 造成蔬菜中农药残留量超标和蔬菜自身的胁迫。目前, 农药在蔬菜上的残留污染虽已受到重视, 但农药胁迫对蔬菜生理生化影响的研究仍较少。水杨酸(salicylic acid, SA), 即邻羟基苯甲酸, 是一种植物体内普遍存在的小分子酚类化合物。作为一种新的植物激素, 在植物遭受温度、水分、盐分、重金属、紫外辐射和臭氧的胁迫时, 外施 SA 可缓解不良胁迫的危害, 提高植物的抗逆性^[1-4]。

毒死蜱(chlorpyrifos, CPF)是一种高效、广谱、低残留杀虫剂, 具有胃毒、触杀、熏蒸三重作用, 是目前使用最多的有机磷农药, 广泛用于防治斜纹夜蛾、甜菜夜蛾、蚜虫、蝼蛄等害虫^[5]。笔者以蔬菜上海青(*Brassica chinensis* L.)为对象, 在室内栽培条件下, 观察了毒死蜱胁迫对上海青抗氧化酶活性及丙二醛(malondialdehyde, MDA)、脯氨酸(proline, Pro)和谷胱甘肽(glutathione, GSH)含量的影响, 旨在寻找上海青在遭受农药胁迫时反应比较敏感的生物标记物, 探讨克服或缓解农药对上海青胁迫的方法, 为蔬菜的科学栽培提供理论依据, 并为深入探索植物对农药胁迫的响应机制奠定基础。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试蔬菜上海青(*Brassica chinensis* L.)品种为青帮新选 1 号, 购自河南省农业科学院园艺研究所; 供试药剂为 48% 毒死蜱乳油, 由广西田园生化股份有限公司出品。

1.2 上海青的培养

将上海青种子在 55℃ 温水中浸泡 30 min, 取出后在自然条件下晾干。然后放入装有泥炭、珍珠岩和蛭石(体积比 2:1:1)培养基的 72 孔盘中催芽。当第一片真叶完全展开时, 将幼苗转移到装有泥炭和蛭石(体积比 2:1)的塑料盆(直径 10 cm)中。每天定时浇水, 每周浇 1 次 Hoagland's 营养液。

1.3 药剂处理

将 48% 毒死蜱乳油用蒸馏水稀释成 3 个不同浓度, 分别为推荐用量(低质量浓度 91.2 mg/L)、2 倍推荐用量(中质量浓度 182.4 mg/L)和 3 倍推荐用量(高质量浓度 273.6 mg/L)。待上海青播种 4 周后, 第 1、3、5、7 天将刚配制的不同浓度药液分别喷施在幼苗的完全叶部分, 相同浓度的处理单独

收稿日期: 2014-03-25

基金项目: 河南省重点科技攻关项目(042102350033)

刘向阳, 博士, 讲师. 研究方向: 生物农药. E-mail: liuxiangyang@henau.edu.cn

通信作者: 周琳, 博士, 教授. 研究方向: 生物农药. E-mail: zhoulin@henau.edu.cn

放置。每个处理植株每次喷施 20 mL 的药液,对照喷施相同量的蒸馏水。共喷施 4 次,每株接受药量 80 mL。于最后一次施药的第 2 天开始取样检测,共测定 4 次(药后 2、4、6、8 d)。每次取样均在上午 8:00 时,取植株相同部位的叶片,然后用蒸馏水冲洗并晾干。

1.4 外源水杨酸处理

设置 1 个对照和 5 个处理,分别为 CK(清水)、0.0 mg/L CPF + 0.069 g/L SA、0.0 mg/L CPF + 0.138 g/L SA、273.6 mg/L CPF + 0 g/L SA、273.6 mg/L CPF + 0.069 g/L SA、273.6 mg/L CPF + 0.138 g/L SA。采用叶面喷施的方法,喷施叶片正反两面,以喷施部位湿润为止。

1.5 测定方法

将 1 g 上海青叶片放入预冷的研钵中,加入 5 mL 的磷酸缓冲液(pH 7.8,含 1%的 PVP),冰浴匀浆后倒入离心管中,4 °C 12 000 r/min 离心 20 min,将上清液(即酶提液)暂置 4 °C 冰箱中备用。

超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)活性测定采用氮蓝四唑(NBT)法^[6],以每克鲜样品抑制 NBT 光化还原的 50% 为 1 个酶活性单位(U_1);过氧化氢酶(catalase, CAT)活性测定采用紫外吸收法^[7],以每克鲜样品每分钟内 D_{240} 变化 0.1 为 1 个酶活性单位(U_2);过氧化物酶(peroxidase, POD)活性测定采用愈创木酚法^[7],以每克鲜样品每分钟内 D_{470} 变化 0.01 为 1 个酶活性单位(U_3);MDA 含量采用硫代巴比妥酸法(TBA)测定^[8],分别测定 600、532、450 nm 下的 D 值;Pro 含量测定参照刘萍等的方法^[7];GSH 的含量测定采用孙群等的方法^[6]。

2 结果与分析

2.1 毒死蜱对抗氧化酶活性的影响

测定结果显示:施药后 2~6 d,分别以 91.2、182.4、273.6 mg/L 毒死蜱处理的上海青,其 SOD 活性均显著下降,表明上海青叶中 SOD 对毒死蜱非常敏感,毒死蜱抑制了 SOD 的活性;施药后 8 d,各处理组 SOD 活性均有所上升,与对照组无明显差异(图 1)。由此可见,毒死蜱在短期内能抑制 SOD 活性。施药后 2~6 d,分别以 91.2、182.4、273.6 mg/L 毒死蜱处理的上海青,其 CAT 活性均显著降低,特别是施药后 2 d,高浓度毒死蜱处理的上海青,其 CAT 活性仅为对照的 42.98%(图 2)。

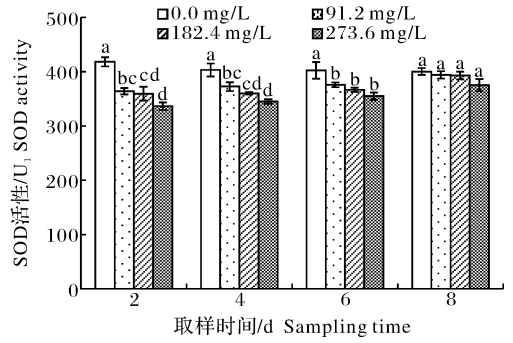


图 1 毒死蜱胁迫对上海青 SOD 活性的影响
Fig.1 Effects of chlorpyrifos stress on SOD activities of *B. chinensis*

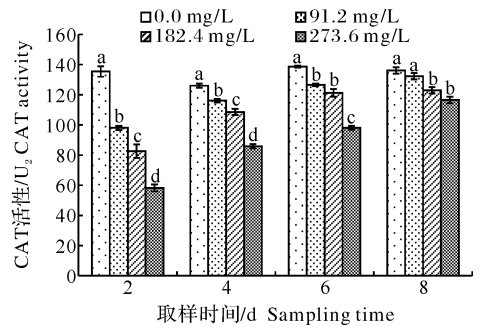


图 2 毒死蜱胁迫对上海青 CAT 活性的影响
Fig.2 Effects of chlorpyrifos stress on CAT activities of *B. chinensis*

施药后 2~4 d,分别以 91.2、182.4、273.6 mg/L 毒死蜱处理的上海青,其 POD 活性均显著高于对照组;而施药后 6~8 d,不同浓度毒死蜱处理组上海青 POD 活性和对照组已无显著差异(图 3)。

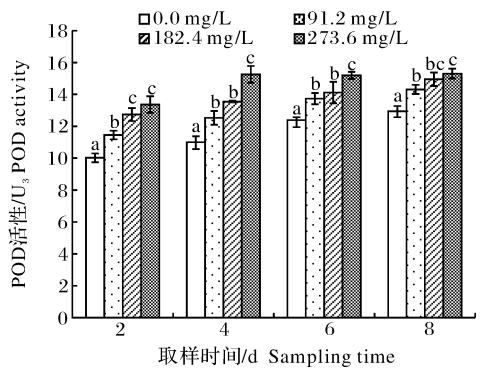


图 3 毒死蜱胁迫对上海青 POD 活性的影响
Fig.3 Effects of chlorpyrifos stress on POD activities of *B. chinensis*

2.2 毒死蜥对 MDA、Pro 和 GSH 含量的影响

测定结果显示:施药后 2~6 d,分别以 91.2、182.4、273.6 mg/L 毒死蜥处理的上海青,其 MDA 含量显著高于对照,特别是药后 2 d,273.6 mg/L 的毒死蜥处理 MDA 含量是对照的 1.75 倍;施药后 8 d,91.2 mg/L 毒死蜥处理的 MDA 含量与对照无明显差异,而 182.4、273.6 mg/L 的毒死蜥处理的 MDA 含量依然高于对照(图 4)。

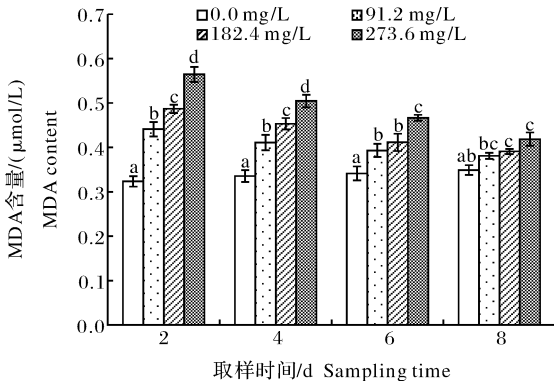


图 4 毒死蜥胁迫对上海青 MDA 含量的影响

Fig. 4 Effects of chlorpyrifos stress on MDA content of *B. chinensis*

测定得到 Pro 标准曲线方程为 $y=168.960x+1.010$ ($r=0.999$)。测定结果显示,施药后 2~6 d,各浓度毒死蜥处理的上海青 Pro 含量显著高于对照(图 5)。

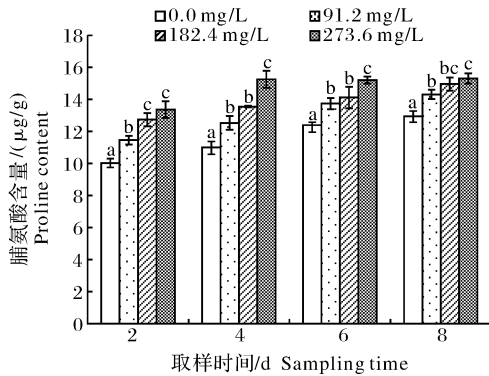


图 5 毒死蜥胁迫对上海青 Pro 含量的影响

Fig. 5 Effects of chlorpyrifos stress on proline content of *B. chinensis*

测定得到 GSH 标准曲线方程为 $y=1.018x-0.034$ ($r=0.996$)。测定结果显示:在毒死蜥的推荐使用剂量(91.2 mg/L)下,施药后上海青的 GSH 含量没有明显变化;在 2 倍和 3 倍推荐使用剂量处理后 2~6 d, GSH 含量显著升高,施药后 8 d 恢复到对照水平(图 6)。GSH 含量升高,表明上海青在

受到高浓度毒死蜥胁迫的情况下,能启动自身调节机制,即可增加 GSH 含量。

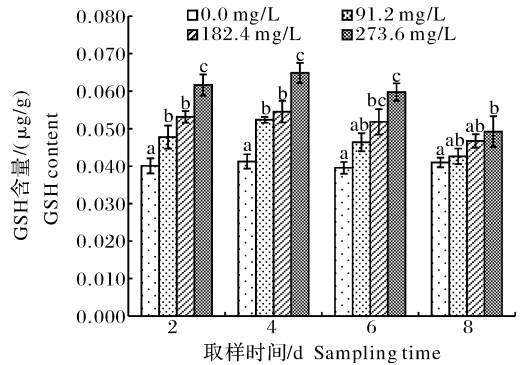


图 6 毒死蜥胁迫对上海青 GSH 含量的影响

Fig. 6 Effects of chlorpyrifos stress on GSH content of *B. chinensis*

2.3 SA 对毒死蜥胁迫下抗氧化酶活性的影响

试验结果显示:施药后 2 d,0.138 g/L 的 SA 能使毒死蜥处理的上海青 SOD 活性显著升高,但 4 d 后则无明显影响;0.069 g/L 的 SA 对毒死蜥处理的上海青 SOD 活性无明显影响;施药后 6 d,各处理的上海青 SOD 活性均无显著差异(表 1)。这表明高浓度外源 SA 在短时间内可以增强上海青应对毒死蜥胁迫的能力。

施药后 2~6 d,不同浓度 SA 对毒死蜥胁迫下上海青的 CAT 活性均无明显影响;施药后 8 d,毒死蜥胁迫下上海青的 CAT 活性为 116.2 U_2 ,而在高浓度 SA 作用下,上海青的 CAT 活性显著升高,为 130.3 U_2 (表 2)。

施药后 2~8 d,低浓度和高浓度的 SA 对毒死蜥处理的上海青 POD 活性均无明显影响,但 3 个毒死蜥处理的 POD 活性显著高于没有毒死蜥胁迫的上海青 POD 活性(表 3)。

2.4 SA 对毒死蜥胁迫下 MDA、Pro 和 GSH 的影响

试验结果显示:施药后 2~8 d,低浓度和高浓度 SA 对毒死蜥胁迫下上海青的 MDA 含量无明显影响(表 4)。这表明 2 种供试浓度的 SA 对上海青在毒死蜥胁迫下没能使 MDA 含量明显降低,也没有诱导抗氧化物质含量的升高。

施药后 2~8 d,低浓度和高浓度 SA 对毒死蜥处理的上海青 Pro 含量均无明显影响,但在施药后 2~6 d,3 个毒死蜥处理的上海青 Pro 含量显著高于没有胁迫的上海青 Pro 含量(表 5)。这个结果与本文“2.2”中毒死蜥对上海青 Pro 含量影响的测定结果一致。

表 1 外源水杨酸对毒死蜱胁迫下上海青 SOD 的影响¹⁾

Table 1 Effect of chlorpyrifos on SOD activities of *B. chinensis* treated with or without SA

U₁

处理(毒死蜱+水杨酸) Treatments (CPF+SA)	SOD 活性 SOD activities			
	2 d	4 d	6 d	8 d
CK	421.5±5.2 c	417.4±7.6 b	382.4±11.1 a	380.2±1.9 a
0.0 mg/L+0.069 g/L	437.0±3.6 cd	433.0±4.6 bc	409.0±3.9 bc	387.8±5.0 a
0.0 mg/L+0.138 g/L	448.9±9.6 d	452.2±6.4 c	419.3±2.9 c	392.5±5.0 a
273.6 mg/L+0.0 g/L	365.3±11.1 a	378.2±11.3 a	371.7±3.2 a	373.0±4.1 a
273.6 mg/L+0.069 g/L	369.2±3.4 ab	384.7±13.6 a	375.8±5.9 a	383.4±5.5 a
273.6 mg/L+0.138 g/L	389.3±3.5 b	393.3±4.9 a	388.4±5.1 ab	390.5±3.8 a

1)表中同列不同字母者表示差异显著(Tukey's 检测, $P < 0.05$), 下表同。The values with different letters in the same column are significantly different (Tukey's test, $P < 0.05$), the same for the following tables.

表 2 外源水杨酸对毒死蜱胁迫下上海青 CAT 的影响

Table 2 Effect of chlorpyrifos on CAT activities of *B. chinensis* treated with or without SA

U₂

处理(毒死蜱+水杨酸) Treatments (CPF+SA)	CAT 活性 SOD activities			
	2 d	4 d	6 d	8 d
CK	135.4±3.6 b	136.1±1.3 b	138.6±2.6 bc	136.1±2.1 cd
0.0 mg/L+0.069 g/L	152.1±5.4 c	149.9±5.5 c	148.1±4.0 cd	144.5±4.7 de
0.0 mg/L+0.138 g/L	163.4±4.1 c	157.3±4.8 c	157.5±4.2 d	151.3±3.0 e
273.6 mg/L+0.0 g/L	84.9±3.5 a	95.9±1.4 a	108.1±1.3 a	116.2±3.4 a
273.6 mg/L+0.069 g/L	90.0±2.7 a	101.0±3.5 a	113.5±4.0 a	122.7±2.9 ab
273.6 mg/L+0.138 g/L	96.2±4.6 a	105.7±3.7 a	118.0±2.6 a	130.3±3.4 b

表 3 外源水杨酸对毒死蜱胁迫下上海青 POD 的影响

Table 3 Effect of chlorpyrifos on POD activities of *B. chinensis* treated with or without SA

U₃

处理(毒死蜱+水杨酸) Treatments (CPF+SA)	POD 活性 SOD activities			
	2 d	4 d	6 d	8 d
CK	11.36±0.44 a	12.34±0.57 a	13.06±0.20 a	13.62±0.21 a
0.0 mg/L+0.069 g/L	11.88±0.30 a	12.68±0.32 a	13.68±0.20 a	13.93±0.36 a
0.0 mg/L+0.138 g/L	12.19±0.32 ab	13.03±0.21 a	13.95±0.09 a	14.07±0.16 a
273.6 mg/L+0.0 g/L	13.36±0.42 b	14.57±0.43 b	15.34±0.25 b	15.60±0.25 b
273.6 mg/L+0.069 g/L	13.91±0.32 b	15.01±0.23 b	15.69±0.24 b	15.99±0.09 b
273.6 mg/L+0.138 g/L	14.20±0.32 b	15.20±0.24 b	16.16±0.19 b	16.19±0.22 b

表 4 外源水杨酸对毒死蜱胁迫下上海青 MDA 含量的影响

Table 4 Effect of chlorpyrifos on MDA content of *B. chinensis* treated with or without SA

μmol/L

处理(毒死蜱+水杨酸) Treatments (CPF+SA)	MDA 含量 MDA content			
	2 d	4 d	6 d	8 d
CK	0.333±0.012 a	0.345±0.031 a	0.351±0.016 a	0.359±0.011 a
0.0 mg/L+0.069 g/L	0.327±0.003 a	0.338±0.003 a	0.345±0.007 a	0.351±0.003 a
0.0 mg/L+0.138 g/L	0.320±0.002 a	0.330±0.006 a	0.335±0.006 a	0.345±0.004 a
273.6 mg/L+0.0 g/L	0.554±0.017 b	0.489±0.014 b	0.465±0.013 b	0.432±0.019 b
273.6 mg/L+0.069 g/L	0.545±0.002 b	0.477±0.003 b	0.457±0.004 b	0.422±0.003 b
273.6 mg/L+0.138 g/L	0.535±0.004 b	0.467±0.004 b	0.446±0.004 b	0.415±0.002 b

表 5 外源水杨酸对毒死蜱胁迫下上海青 Pro 含量的影响

Table 5 Effect of chlorpyrifos on Pro content of *B. chinensis* treated with or without SA

μg/g

处理(毒死蜱+水杨酸) Treatments (CPF+SA)	Pro 含量 Pro content			
	2 d	4 d	6 d	8 d
CK	12.92±0.79 a	13.57±0.59 a	14.09±0.98 a	14.94±0.77 a
0.0 mg/L+0.069 g/L	13.52±0.25 a	14.02±0.15 a	14.66±0.30 a	15.56±0.26 a
0.0 mg/L+0.138 g/L	14.01±0.13 a	14.89±0.13 a	15.08±0.17 a	15.92±0.26 ab
273.6 mg/L+0.0 g/L	20.53±1.01 b	18.34±1.19 b	17.41±0.46 b	16.33±0.35 ab
273.6 mg/L+0.069 g/L	20.93±0.43 b	18.81±0.30 b	17.79±0.16 b	16.74±0.23 b
273.6 mg/L+0.138 g/L	21.41±0.17 b	19.36±0.20 b	18.17±0.24 b	17.32±0.15 b

施药后 2、4、6 d, 毒死蜱处理组上海青 GSH 含量分别为 0.061、0.065、0.060 $\mu\text{g/g}$; 用高浓度 SA 处理后, 上海青 GSH 含量分别为 0.063、0.067、0.063 $\mu\text{g/g}$ (表 6)。由测定结果可知, 高浓度 SA 处理后上海青 GSH 含量有所升高, 但方差分析显示

差异并不显著。施药后 8 d, 毒死蜱处理组上海青 GSH 含量为 0.051 $\mu\text{g/g}$; 经高浓度 SA 处理后, 上海青 GSH 含量为 0.056 $\mu\text{g/g}$, 方差分析表明二者差异显著。这表明高浓度 SA 处理 8 d 后, 上海青 GSH 含量显著升高。

表 6 外源水杨酸对毒死蜱胁迫下上海青 GSH 含量的影响

Table 6 Effect of chlorpyrifos on GSH content of *B. chinensis* treated with or without SA

$\mu\text{g/g}$

处理(毒死蜱+水杨酸) Treatments (CPF+SA)	GSH 含量 GSH content			
	2 d	4 d	6 d	8 d
CK	0.040±0.001 a	0.041±0.001 a	0.040±0.001 a	0.041±0.002 a
0.0 mg/L+0.069 g/L	0.042±0.001 a	0.042±0.001 a	0.042±0.001 a	0.042±0.001 a
0.0 mg/L+0.138 g/L	0.044±0.001 a	0.045±0.001 a	0.045±0.001 a	0.043±0.001 a
273.6 mg/L+0.0 g/L	0.061±0.002 b	0.065±0.001 b	0.060±0.003 b	0.051±0.003 b
273.6 mg/L+0.069 g/L	0.062±0.002 b	0.065±0.001 b	0.061±0.002 b	0.054±0.002 bc
273.6 mg/L+0.138 g/L	0.063±0.002 b	0.067±0.002 b	0.063±0.001 b	0.056±0.002 c

3 讨 论

SOD、CAT 和 POD 是植物体内重要的抗氧化酶。SOD 在植物细胞内主要是通过歧化超氧阴离子 O_2^- 生成 H_2O_2 和 O_2 , 从而降低细胞内活性氧水平^[9]。此外, SOD 还能减少植物体内高活性的氧化剂羟基自由基($-\text{OH}$)的形成, 这与植物体抗逆机制有很大的联系^[10]。本试验结果表明, 施用毒死蜱后, 短期内(2~6 d)上海青叶片中 SOD 活性明显降低, 这样或许能导致上海青体内 O_2^- 累积, H_2O_2 生成量减少。CAT 和 POD 能共同把 H_2O_2 歧化分解为 H_2O 和 O_2 或者其他无毒物质, 从而从根本上消除活性氧的损伤^[11]。完成把 H_2O_2 歧化分解为 H_2O 和 O_2 的工作, 需要 CAT 和 POD 维持稳定与协调一致的活性。毒死蜱使上海青 CAT 活性下降, 却使 POD 活性上升, 打破了二者稳定、协调一致的活性, 导致 H_2O_2 的歧化分解难以顺利进行而造成累积。SOD 和 CAT 的活性降低以及 POD 的活性升高, 说明因毒死蜱胁迫, 严重影响了植物体内活性氧清除系统的活力及作用平衡, 导致了上海青抗氧化防御反应的凌乱, 可能会使植物体内活性氧累积, 促进膜脂过氧化, 破坏膜结构, 最终可能会影响上海青的健康生长。

MDA 是生物体内自由基作用于脂质发生过氧化反应的终产物, 具有很强的细胞毒性, 对细胞膜和细胞中的许多生物功能分子如蛋白质、核酸和酶等均有很强的破坏作用, 并参与破坏生物膜的结构与功能^[12]。MDA 含量高低是反映细胞膜脂过氧化作用强弱的重要指标, 而植物在农药的胁迫下, MDA 含量的多少可反映农药对植物影响程度。本试验中

毒死蜱各处理组上海青 MDA 含量明显升高, 特别是施药后 2 d, 高浓度毒死蜱处理组上海青 MDA 含量是对照组的 1.75 倍, 表明上海青受到了毒死蜱的胁迫, 生物膜的结构与功能受到破坏, 而且随着毒死蜱浓度的增大, 上海青受到的伤害加剧。

Pro 是植物体内重要的渗透调节物质, 可以调节细胞的渗透势, 稳定蛋白的结构。在胁迫条件下 Pro 含量上升, 以维持细胞的正常生理功能, 并在胁迫解除后作为氮素和碳架为植物提供能源^[13], 因此, Pro 可作为农药胁迫下反映植物抗性的生理指标之一。作为另外一个反映植物抗逆性的生理指标, GSH 可在植物受到胁迫的情况下, 成为氧化信号, 诱导植物体内抗氧化酶活性的提高^[14]。GSH 含量与植物对逆境胁迫的耐性相关, 提高 GSH 的水平, 可增加植物的抗逆性, 因此, GSH 含量的多少可直接反映农药胁迫对植物的影响。本试验结果显示, 施用毒死蜱后 2~6 d, 上海青的 Pro 和 GSH 含量均明显升高, 表明上海青体内自身具有调节机制, 在遇到毒死蜱胁迫时, 能启动自身的抗逆调节机制来应对。

SA 在植物的生理和抗逆性方面发挥着重要的作用, 当植物遭受不良因素胁迫时, 外施 SA 可缓解不良胁迫的危害, 提高植物的抗逆性^[1]。本试验结果表明, SA 可以在施用后不同时间提高毒死蜱胁迫下上海青的 SOD 和 CAT 活性以及 GSH 含量, 从而提高上海青对毒死蜱胁迫的抵抗力。但是, 外施 SA 并没有提高上海青 POD 的活性以及 MDA 和 Pro 的含量, 这或许是因为 SA 对上海青生理指标的影响具有选择性。另外, SA 对植物逆境生理过程的影响应该是一个比较复杂的调节过程, 与其

浓度有直接联系^[15]。本试验采用2种浓度的外源SA,只是部分缓解了毒死蜱对上海青的胁迫,因此,在今后的研究中有必要扩大SA浓度范围,以进一步探讨其对植物遭受农药胁迫的影响。

参 考 文 献

- [1] QAISER H, SHAMSUL H, MOHD I, et al. Effect of exogenous salicylic acid under changing environment; a review [J]. *Environ Exp Bot*, 2010, 68(1): 14-25.
- [2] AGAMI R A, MOHAMED G F. Exogenous treatment with indole-3-acetic acid and salicylic acid alleviates cadmium toxicity in wheat seedlings [J]. *Ecotox Environ Safe*, 2013, 94: 164-171.
- [3] TAYEH C, RANDOUX B, BOURDON N, et al. Lipid metabolism is differentially modulated by salicylic acid and heptanoyl salicylic acid during the induction of resistance in wheat against powdery mildew [J]. *J Plant Physiol*, 2013, 170(18): 1620-1629.
- [4] 王瑞霞, 王振中, 纪春艳, 等. 水杨酸诱导水稻抗菌物质对稻瘟病菌的抑制作用[J]. *华中农业大学学报*, 2011, 30(2): 193-196.
- [5] 李亚楠, 刘晶晶, 陈少华, 等. 毒死蜱的应用现状及降解研究进展[J]. *广东农业科学*, 2011, 38(6): 92-96.
- [6] 孙群, 胡景江. 植物生理学研究技术[M]. 杨凌: 西北农林科技大学出版社, 2006.
- [7] 刘萍, 李明军. 植物生理学实验技术[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [8] 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.
- [9] MUTLU S, ATICI O, NALBANTOGLU B. Effects of salicylic acid and salinity on apoplastic antioxidant enzymes in two wheat cultivars differing in salt tolerance [J]. *Biol Plantarum*, 2009, 53(2): 334-338.
- [10] SCANDALIOS J G. Oxygen stress and superoxide dismutases [J]. *Plant Physiol*, 1993, 101(1): 7-12.
- [11] YIN X L, JIANG L, SONG N H, et al. Toxic reactivity of wheat (*Triticum aestivum*) plants to herbicide isoproturon [J]. *J Agric Food Chem*, 2008, 56(12): 4825-4831.
- [12] 陈少裕. 膜脂过氧化与植物逆境胁迫[J]. *植物学通报*, 1989, 6(4): 211-217.
- [13] 王丽媛, 丁国华, 黎莉. 脯氨酸代谢的研究进展[J]. *哈尔滨师范大学学报: 自然科学版*, 2010, 26(2): 85-89.
- [14] MICHELET L, ZAEFAGNINI M, MARCHAND C, et al. Glutathionylation of chloroplast thioredoxin is a redox signaling mechanism in plants [J]. *PNAS*, 2005, 102(45): 16478-16483.
- [15] 孙歆, 曾富春, 胡攀. 水分胁迫下水杨酸对大麦幼苗抗氧化能力的影响[J]. *四川农业大学学报*, 2011, 29(2): 160-163, 206.

Effects of exogenous salicylic acid on anti-oxidant defensive responses of *Brassica chinensis* L. exposed to chlorpyrifos

LIU Xiang-yang LI Ying-tao GAO Fei ZHAO Te ZHOU Lin

College of Plant Protection, Henan Agricultural University/Key Laboratory for Creation and Application of Novel Pesticides, Henan Province, Zhengzhou 450002, China

Abstract The effects of chlorpyrifos and exogenous salicylic acid on anti-oxidant defensive response of *Brassica chinensis* were investigated by indoor cultivation experiments. The activities of superoxide dismutase (SOD) and catalase (CAT) in *B. chinensis* were suppressed significantly, whereas the activity of peroxidase (POD) was increased significantly within 4 days after being sprayed with chlorpyrifos. In addition, the contents of malondialdehyde (MDA), proline and glutathione (GSH) significantly increased in a short period (2-4 day) after the spraying. These results indicated that the usage of chlorpyrifos caused stress on *B. chinensis* seedlings. The inhibitions of chlorpyrifos on activities of SOD, CAT and GSH could be relieved by high concentrations of exogenous salicylic acid, whereas exogenous salicylic acid almost had no influence on the activity of POD and the contents of MDA and proline. These results suggested that exogenous salicylic acid only relieved stress on *B. chinensis* to some extent.

Key words *Brassica chinensis* L.; chlorpyrifos; pesticide stress; salicylic acid; defensive response