

萘二甲酐减轻咪唑乙烟酸对油菜
药害的效果和解毒机理初报

黄春艳¹,王 宇¹,李 静¹,黄元炬¹,丛 林¹,朴德万¹,叶 非²

(1. 黑龙江省农业科学院植物保护研究所,黑龙江 哈尔滨,150086;2. 东北农业大学理学院,黑龙江 哈尔滨,150030)

摘要:采用模拟咪唑乙烟酸土壤残留,以油菜盆栽试验研究萘二甲酐对咪唑乙烟酸土壤残留的解毒效果和解毒机理。结果表明,咪唑乙烟酸 25g ai/hm² 用量下对油菜有较重药害,可使油菜苗的株高、鲜重等生长指标和谷胱甘肽(GSH)含量、谷胱甘肽-S-转移酶(GST)活力、氨基酸含量等生理指标明显降低。用种子重量 0.5% 的萘二甲酐(NA)湿润拌种处理油菜种子能减轻咪唑乙烟酸对油菜苗的药害。萘二甲酐+咪唑乙烟酸处理的油菜苗株高和鲜重明显高于咪唑乙烟酸处理。萘二甲酐和咪唑乙烟酸都能导致油菜苗的氨基酸含量发生变化,并对 GSH 含量和 GST 活力有不同程度的影响。与咪唑乙烟酸 25g ai/hm² 处理相比,萘二甲酐加入咪唑乙烟酸后,使 16 种氨基酸含量升高,只有脯氨酸含量降低,氨基酸总量升高;GSH 含量略有增加,但 GST 活力有显著提高。可以认为提高油菜苗氨基酸含量和 GST 的活力是萘二甲酐对咪唑乙烟酸解毒的重要途径。

关键词:萘二甲酐;咪唑乙烟酸;解毒效果;谷胱甘肽(GSH);谷胱甘肽-S-转移酶(GST)

中图分类号:S482.4 **文献标识码:**A **文章编号:**1007-9084(2014)03-0398-06

Alexipharmic effect of 1,8 – naphthalic anhydride on rape from phytotoxicity of imazethapyr

HUANG Chun – yan¹, WANG Yu¹, LI Jing¹, HUANG Yuan – ju¹, CONG Lin¹, PIAO De – wan¹, YE Fei²

(1. Plant Protection Institute of Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Harbin 150086, China;

2. College of Science, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: Simulated experiment was carried out to investigate the alexipharmic effect and mechanism of 1,8 – naphthalic anhydride (NA) on the imazethapyr residues in soil using potted rape as bioassay material. The rape seedling height, fresh weight, activity of glutathione – S – transferase (GST), amount of amino acids, and content of glutathione (GSH) were reduced with 25g ai/hm² imazethapyr. The damage was alleviated under seed dressing with 0.5% (seed weight) NA. Compared to the treatment of imazethapyr, rape seedling height and fresh weight were increased under NA + imazethapyr. The amount of amino acids, content of GSH, and activity of GSTs were induced by both NA and imazethapyr. Under NA + imazethapyr, 16 amino acids (except proline) were increased, GSH was slightly accumulated, while GST activity was significantly stimulated. Results indicated that imazethapyr detoxification was resulted from high amount of amino acid and more active GSTs.

Key words: 1,8 – Naphthalic anhydride (NA); Imazethapyr; Alexipharmic effect and mechanism; GSH; GST

咪唑乙烟酸是一种活性高、杀草谱广且残留期长的咪唑啉酮类除草剂,曾经是大豆田最常用的除草剂品种之一,在黑龙江省大豆田的化学除草中发挥了重要作用。但由于咪唑乙烟酸在土壤中残留时

间长,常常会对后茬敏感作物如油菜、甜菜、马铃薯等造成药害^[1~3]。随着农业经济的发展和种植业结构的调整,油菜和马铃薯等作物的种植比例不断扩大,但施用过咪唑乙烟酸的大豆田在后茬作物的选

收稿日期:2013-10-14
基金项目:黑龙江省自然科学基金(C0315)
作者简介:黄春艳(1959 –),女,黑龙江省勃利县人,研究员,主要从事杂草科学、农田杂草防除及除草剂应用技术研究,E – mail: huangchunyan@126.com

择上受到了严重的限制。因此,如何解决咪唑乙烟酸土壤残留对轮作作物的残留药害问题,已成为当前的重要课题。

除草剂安全剂在不影响除草剂对靶标杂草活性的前提下能有选择地保护作物免受除草剂的药害^[4]。萘二甲酰(1,8-naphthalic anhydride, NA)属于羧酸衍生物类安全剂,是最先试验成功、最早工业化而且应用最广的化学解毒剂之一,作为硫代氨基甲酸酯类、酰胺类、磺酰脲类等 8 类除草剂的解毒剂,对燕麦畏、异丙甲草胺、异噁草松、苯磺隆、烟嘧磺隆等除草剂具有解毒作用;作为异噁草松的安全剂,对玉米具有较好的保护作用,对抗性玉米的保护系数为 3.4 倍,对敏感性玉米的保护系数为 7.5 倍^[5-11]。我们曾评价了 6 种除草剂安全剂对咪唑乙烟酸的解毒效果,从中筛选出了解毒效果较好的化学安全剂萘二甲酰,在一定范围内可以部分地解除咪唑乙烟酸对玉米的伤害^[12],这一结果与以往报道的萘二甲酰对玉米、小麦、大麦、水稻、高粱等禾谷类作物具有保护作用的结果相一致^[13-16]。

关于安全剂的作用机制曾有多种假说,其中结构活性理论、谷胱甘肽结合论和细胞色素 P450 单氧酶催化的羟基化作用机制被普遍认可^[17]。近年来,随着生物化学领域分离、纯化等技术的提高以及分子生物学技术的快速发展,不仅从安全剂对作物的吸收、传导,对作物体内微粒体 P450 单氧酶(P450)、谷胱甘肽(GSH)、谷胱甘肽-S-转移酶(GST)和磺酰脲类除草剂靶标酶乙酰乳酸合成酶(ALS)的影响等方面进行了大量的研究^[18-20],在分子水平上也对安全剂的作用机制进行了解释^[21,22]。如张金艳等发现,用解毒剂 3-二氯乙酰基-2,5-二甲基-2-乙基-1,3-噁唑烷浸种,可使受氯磺隆伤害的玉米幼苗中缬氨酸、异亮氨酸、亮氨酸等 3 种支链氨基酸含量有所提高^[23]。在玉米的 8 种 GST 同工酶中,有 2 种是安全剂诱导产生的;而小麦的 8 种二聚体 GST 同工酶中,有 5 种由安全剂诱导产生^[24]。叶非、赵李霞等的研究显示,安全剂 AD-67 和 R-28725 在玉米中能增强 GSH 的含量,减轻氯磺隆、氯嘧磺隆和咪唑乙烟酸对作物药害的影响^[25-28]。

前人对除草剂安全剂解毒作用及解毒机理的研究对象多为禾谷类作物,如玉米、水稻、高粱等,但有关萘二甲酰对阔叶作物(如油菜)是否具有保护作用,以及对咪唑乙烟酸的解毒机理报道甚少。本文是在研究 3 种化学安全剂对咪唑乙烟酸土壤残留的解毒效果的基础上^[12],进一步对萘二甲酰保护油菜

等阔叶作物的效果进行研究,目的是探索萘二甲酰在保护阔叶作物方面的作用及在油菜中对咪唑乙烟酸的解毒机理。

1 材料与方法

1.1 材料

除草剂 5% 咪唑乙烟酸水剂(imazethapyr, 德国巴斯夫公司产品);安全剂萘二甲酰(1,8-Naphthalic anhydride, NA),市场购买(上海谱振生物科技有限公司产品,中文别名,4-溴-1,8-萘酐)。

油菜品种为青油 14 号,由青海省农林科学院植物保护研究所提供。

土壤取自黑龙江省农业科学院(哈尔滨市)近年内没有施用过除草剂的试验田,土壤类型为黑土,中等质地,有机质含量 2.88%, pH6.87。

1.2 模拟咪唑乙烟酸土壤残留的药土制备方法

咪唑乙烟酸用量为 25g ai/hm²(药剂推荐剂量的 1/3 计算),另设不施药的空白对照。土壤风干过筛后装入直径 28cm、高 27cm 底部带孔的塑料桶,将该塑料桶放入 20m² 范围内,用带有 4 个扁平扇形喷嘴,喷幅 2m 的小区专用背负压缩式喷雾器,设定工作压力 4kg/cm²,将药液均匀喷于塑料桶中土表后人工混拌于 5~10cm 土层,作为盆栽模拟试验的药土。

1.3 萘二甲酰拌种

选择籽粒饱满、无病虫的油菜种子进行拌种。NA 用量为种子重量的 0.5%,采用湿润拌种的方法,在种子表面喷清水,使种子均匀湿润后,将 NA 与种子混拌均匀。另设不拌 NA 的种子为空白对照。

1.4 播种及管理

分别在咪唑乙烟酸药土桶和空白对照桶中,播种用萘二甲酰处理过的种子和空白对照种子。每桶均匀播种 50 粒,覆土 2~3cm,桶口用报纸盖上以保持土壤湿润,在油菜出苗后把报纸揭开。放在露天盆栽场内自然生长,视土壤水分状况浇水,使土壤保持适宜植物生长的湿润状态,土壤含水量约为 20%~25%^[29]。每处理 4 次重复(即 4 个桶)。

1.5 调查记载项目

油菜出苗后观察记录咪唑乙烟酸对油菜的药害和安全剂萘二甲酰对咪唑乙烟酸的解毒效果。分别于油菜出苗后 25d 和 55d,每重复调查 10 株油菜的株高和株鲜重。

用出苗后 25d 的油菜苗测定氨基酸含量、GSH 含量和 GST 活力。依据国标 GB5009.124-2003 的方法,测定 17 种氨基酸含量(天门冬氨酸、苏氨酸、

丝氨酸、谷氨酸、甘氨酸、丙氨酸、胱氨酸、缬氨酸、蛋氨酸、异亮氨酸、亮氨酸、酪氨酸、苯丙氨酸、赖氨酸、组氨酸、精氨酸、脯氨酸)及氨基酸总量。按文献[30]的方法测定 GSH 含量(吸光度)和 GST 活力。

1.6 统计分析

利用 SPSS21 软件对数据进行方差分析,新复极差法(Duncans)比较不同处理的差异显著性。

2 结果与分析

2.1 萘二甲酰减轻咪唑乙烟酸对油菜药害的效果

油菜出苗后观察发现,经过咪唑乙烟酸处理的油菜苗生长受到较严重的抑制,叶片呈紫红色,质地变硬。从表 1 可以看到,咪唑乙烟酸处理油菜苗的株高和鲜重均明显低于不施药空白对照,萘二甲酰处理及萘二甲酰 + 咪唑乙烟酸处理油菜苗的株高和株鲜重均明显高于咪唑乙烟酸处理。说明萘二甲酰

可以显著改善油菜苗的生长指标,有效地减轻咪唑乙烟酸对油菜的药害,有明显的解毒效果(表 1)。

2.2 萘二甲酰减轻咪唑乙烟酸对油菜药害的解毒机理

2.2.1 萘二甲酰和咪唑乙烟酸对油菜苗中氨基酸含量的影响 表 2 是 17 种氨基酸的测定结果。与空白对照相比,咪唑乙烟酸处理有 3 种氨基酸含量升高,6 种降低,8 种没有变化,氨基酸总量降低。萘二甲酰处理只有脯氨酸含量升高,11 种降低,5 种没有变化,氨基酸总量降低。萘二甲酰 + 咪唑乙烟酸处理有 4 种氨基酸含量没有变化,13 种升高,氨基酸总量升高。

与咪唑乙烟酸处理相比,萘二甲酰处理有 10 种氨基酸含量降低,7 种没有变化,氨基酸总量降低。萘二甲酰 + 咪唑乙烟酸处理有 16 种氨基酸含量升高,只有脯氨酸含量降低,氨基酸总量升高。

表 1 萘二甲酰减轻咪唑乙烟酸对油菜药害的效果
Table 1 Effect of NA protecting rape seedlings from phytotoxicity of imazethapyr

处理 Treatment	播种后 25d 25d after sowing		播种后 55d 55d after sowing	
	株高 Plant height/cm	鲜重 Fresh weight/(g/plant)	株高 Plant height/cm	鲜重 Fresh weight/(g/plant)
空白对照 Control	15.80 abA	1.63 abA	33.69 aA	7.66 aA
咪唑乙烟酸 Imazethapyr 25g ai/hm ²	10.75 bA	0.81 bA	17.66 bA	2.41 bB
萘二甲酰 NA	15.76 abA	1.70 aA	31.32 aA	4.68 bAB
萘二甲酰 + 咪唑乙烟酸 NA + imazethapyr 25g ai/hm ²	14.95 aA	2.09 aA	26.14 abA	3.21 bB

注:表中数据为 4 次重复平均值。同一列中不同字母代表差异显著,小写字母表示 P<0.05 水平,大写字母表示 P<0.01 水平。表 3 同
Notes:Data are the average of 4 replications. Lowercase letters and capital letters in the same column indicate significant and highly significant differences at 0.05 and 0.01 levels. Same as table 3

表 2 萘二甲酰和咪唑乙烟酸对油菜苗中氨基酸含量的影响
Table 2 Effect of NA and imazethapyr on amino acid content in rape seedlings

氨基酸 Amino acid	空白对照 Control	咪唑乙烟酸 Imazethapyr	萘二甲酰 NA	NA + 咪唑乙烟酸 NA + imazethapyr
天门冬氨酸 Aspartic acid	0.19 aA	0.20 aA	0.19 aA	0.23 bA
苏氨酸 Threonine	0.11 aA	0.11 aA	0.10 aA	0.12 aA
丝氨酸 Serine	0.10 aA	0.10 aA	0.09 aA	0.11 aA
谷氨酸 Glutamic acid	0.25 aA	0.26 aA	0.25 aA	0.30 aA
甘氨酸 Glycin	0.11 aA	0.11 aA	0.11 aA	0.12 aA
丙氨酸 Alanine	0.13 aA	0.13 aA	0.13 aA	0.14 aA
胱氨酸 Cystine	0.06 aA	0.04 aA	0.04 aA	0.06 aA
缬氨酸 Valine	0.16 aA	0.16 aA	0.14 aA	0.17 aA
蛋氨酸 Methionine	0.03 aA	0.03 aA	0.03 aA	0.04 aA
异亮氨酸 Isoleucine	0.10 aA	0.09 aA	0.09 aA	0.11 aA
亮氨酸 Leucine	0.19 aA	0.18 aA	0.17 aA	0.20 aA
酪氨酸 Tyrosine	0.11 aA	0.09 aA	0.09 aA	0.11 aA
苯丙氨酸 Phenylalanine	0.17 aA	0.15 aA	0.14 aA	0.17 aA
赖氨酸 Lysine	0.14 aA	0.14 aA	0.13 aA	0.15 aA
组氨酸 Histidine	0.05 aA	0.04 aA	0.04 aA	0.05 aA
精氨酸 Arginine	0.11 aA	0.11 aA	0.10 aA	0.12 aA
脯氨酸 Proline	0.10 aA	0.15 cB	0.13 bcAB	0.12 abAB
总量 Total	2.11 bA	2.09 bA	1.97 aA	2.32 cB

注:同一行不同字母代表差异显著,小写字母表示 P<0.05 水平,大写字母表示 P<0.01 水平
Note:Lowercase letters and capital letters in the same line indicate significance at 0.05 and 0.01 levels respectively

从表 2 结果看出,虽然萘二甲酰 + 咪唑乙烟酸处理有 16 种氨基酸含量值高于咪唑乙烟酸单独处理,但只有天门冬氨酸和脯氨酸有显著差异,其余 15 种氨基酸含量的差异均未达到显著水平,但氨基酸总量差异显著。说明增加油菜植株体内绝大部分氨基酸种类(约占 94.12%)的含量,是萘二甲酰减轻除草剂咪唑乙烟酸对油菜药害的途径之一。

方差分析结果表明,4 个不同处理之间有 15 种氨基酸含量差异不显著,只有 2 种氨基酸有显著差异,分别是天门冬氨酸和脯氨酸。咪唑乙烟酸处理与空白对照之间氨基酸总量无显著差异,二者与 NA 及 NA + 咪唑乙烟酸处理之间差异显著,且 NA + 咪唑乙烟酸处理与咪唑乙烟酸、NA 及空白对照之间差异达到极显著水平。

2.2.2 萘二甲酰和咪唑乙烟酸对油菜苗 GSH 含量的影响 表 3 结果显示,萘二甲酰和咪唑乙烟酸均可使油菜苗 GSH 含量增加。萘二甲酰处理 GSH 含量为空白对照的 103.43%,咪唑乙烟酸处理 GSH 含量为空白对照的 107.29%。萘二甲酰 + 咪唑乙烟酸处理 GSH 含量增加为空白对照的 108.58%,为萘二甲酰处理的 104.98%,为咪唑乙烟酸处理的 101.20%,只比咪唑乙烟酸单独使用时略有增加。由此可见萘二甲酰对油菜苗 GSH 含量的影响并不十分明显,但也印证了安全剂可以增加植物体内 GSH 含量的理论。GSH 可以与除草剂结合为无毒化合物而实现对除草剂的解毒作用。

在 $P < 0.05$ 水平上的方差分析结果表明,空白对照与 NA 处理之间 GSH 含量无显著差异,咪唑乙烟酸处理与 NA 处理及 NA + 咪唑乙烟酸处理之间无显著差异。咪唑乙烟酸处理和萘二甲酰 + 咪唑乙烟酸处理与空白对照之间差异达显著水平。4 个处理在 $P < 0.01$ 水平均无显著差异。

2.2.3 萘二甲酰和咪唑乙烟酸对油菜苗 GST 活力的影响 从表 3 结果可以看出,GST 活力由高到低的顺序是,萘二甲酰 > 空白对照 > NA + 咪唑乙烟酸 > 咪唑乙烟酸。萘二甲酰能够大幅度提高油菜苗 GST 活力,其 GST 活力可提高为空白对照的 1 293.55%。而咪唑乙烟酸则使油菜苗 GST 活力显著下降,其 GST 活力只为空白对照的 12.90%。咪唑乙烟酸加入萘二甲酰可以使 GST 活力明显增加,可达到空白对照的 512.90%,咪唑乙烟酸处理的 3 975.00%。因为咪唑乙烟酸使油菜苗 GST 活力下降,所以萘二甲酰加入咪唑乙烟酸后 GST 活力只为萘二甲酰处理的 39.65%。说明萘二甲酰是通过激发油菜苗的 GST 活力来提高对咪唑乙烟酸的抵抗

力,从而达到解毒的目的。

方差分析结果,4 个处理之间在 $P < 0.05$ 时差异均达显著水平。在 $P < 0.01$ 水平上,咪唑乙烟酸与空白对照之间无显著差异,二者与 NA 处理及 NA + 咪唑乙烟酸处理之间差异极显著,NA 与 NA + 咪唑乙烟酸处理之间差异极显著。

表 3 萘二甲酰和咪唑乙烟酸对油菜苗 GSH 含量和 GST 活力的影响

Table 3 Effect of NA and imazethapyr on glutathione content and glutathione -S - transfer in rape seedlings

试验处理 Experimental treatment	GSH	GST /($\mu\text{mol}/\text{min}$)
空白对照 Control	0.233 aA	0.000 31 bA
咪唑乙烟酸 Imazethapyr 25g ai/hm ²	0.250 bA	0.000 04 aA
萘二甲酰 NA	0.241 abA	0.004 01 dC
萘二甲酰 + 咪唑乙烟酸 NA + Imazethapyr 25g ai/hm ²	0.253 bA	0.001 59 cB

3 讨论

我国除草剂使用历史已有 50 多年,生产中除草剂对作物的药害经常发生,尤其是长残留除草剂对后茬敏感作物的残留药害越来越突出,迫切需要除草剂安全剂的推广应用。萘二甲酰是一个成熟的安全剂,但并未在生产中广泛应用,有关萘二甲酰对长残留除草剂的解毒效果和解毒机理及对作物的保护作用,尚有较多待研究的课题。已有的研究证明了萘二甲酰对玉米、小麦、大麦、水稻、高粱等禾谷类作物具有保护作用^[13~16],但对阔叶作物是否具有保护作用,以及作用机理的研究鲜有报道。

GSH 是生物细胞中普遍存在的一种具有特殊功能的多肽,GST 是一个同工酶家族,广泛分布于原核生物和真核生物中,在生物的许多代谢生理过程中起到重要的生理作用。GSH 和 GST 可受多种因素的诱导,对农药、除草剂等有毒物质起到解毒的作用。在高等植物的代谢生理过程中发现,植物在抵御不良环境及提高抗逆作用中,GSH 和 GST 起着非常重要的作用。研究表明:安全剂可以刺激玉米和其他植物中的 GSH 和 GST 水平,达到解毒的目的^[31]。安全剂对除草剂的解毒作用机理并不是一个简单的线性化作用过程,也不是由一种物质或一个原因引起的。参与这一过程的各种物质交织在一起,相互作用和牵制,形成一种复杂的网式过程,从而出现解毒差异—表征^[32]。

本研究初步探讨了萘二甲酰对保护阔叶作物油菜免受咪唑乙烟酸药害的解毒效果和解毒机理。结果表明:在模拟咪唑乙烟酸土壤残留 25g ai/hm² 用量下,咪唑乙烟酸对油菜苗的生长指标(株高、株鲜

重)和生理指标(GSH 含量、GST 活性、氨基酸含量)都有抑制作用。在安全剂萘二甲酰拌种处理下,油菜苗的生长指标、GSH 含量、GST 活性、氨基酸含量均有不同程度的提高。这一结果与叶非等对安全剂 AD-67、R-28725 的研究结果是一致的^[25~28]。萘二甲酰能够提高油菜苗体内 GSH 和一些氨基酸的含量,并能增加 GST 的活性,从而缓解了咪唑乙烟酸土壤残留对油菜苗产生的药害,表明了这是减轻咪唑乙烟酸对油菜药害的重要解毒途径之一,即安全剂萘二甲酰的解毒和代谢过程与作物体内的 GSH、GST 和氨基酸含量密切相关。以上结果与玉米、水稻、高粱等禾谷类作物安全剂的解毒过程相似,为除草剂安全剂保护油菜的解毒机理提供了理论基础。

有关除草剂解毒剂对植物氨基酸含量影响的研究资料较少。本试验的结果与张金艳^[23]是一致的。不同的是本研究分析了解毒过程中 17 种氨基酸含量的变化情况,以丰富除草剂安全剂的解毒机理。

参考文献:

[1] 苏少泉,宋顺祖. 中国农田杂草化学防治[M]. 北京: 中国农业出版社,1996. 183-187.

[2] 王险峰. 进口农药应用手册[M]. 北京:中国农业出版社,2000:429-435.

[3] 黄春艳,陈铁保,王 宇,等. 咪唑啉酮类除草剂对后茬作物安全性研究初报[J]. 农药学学报,2001,3(2): 29-34.

[4] 晓岚编译. 除草剂安全剂的评述(上)[J]. 世界农药: 原《农药译丛》,2000,22(3):29-33.

[5] 姬学仪. 除草剂解毒剂的概况及发展建议[J]. 江苏农药,1997,(2):7-10.

[6] 姜 林,李正名. 除草剂安全剂应用研究近况[J]. 农药学学报,1999,1(2):1-8.

[7] 郑伯霖,余燕霞. 除草剂解毒剂的新进展[J]. 农药译丛,1989,11(2):17-24.

[8] Keifer D W. Safening of corn against clomazone injury with naphthalic anhydride; Examination of possible hybrid effects[J]. Acta Phytopathologica et Entomologica Hungarica,1993,28(2): 481-484.

[9] Kotoulaz S E, Hatzios K K. Interactions of tribenuron with four safeners and piperonyl butoxide on corn (*Zea mays*) [J]. Weed Sci,1996, 44:215-218.

[10] Siminszky B, Corbin F T, Sheldon Y. Nicosulfuron resistance and metabolism in terbufos- and naphthalic anhydride-treated corn[J]. Weed Sci,1995,43:163-168.

[11] Simarmata M, Penner D. Protection from primisulfuron

injury to corn (*Zea mays*) and sorghum (*Sorghum bicolor*) with herbicide safeners[J]. Weed Technology, 1993,7:174-179.

[12] 黄春艳,李 静,王 宇,等. 6 种除草剂“安全剂”对咪唑乙烟酸的解毒效果评价[J]. 农药,2008,47(9): 682-685.

[13] 黄春艳. 除草剂安全剂研究概况[J]. 黑龙江农业科学,2005,(05):26-29.

[14] 叶 非,李 柏,徐宝荣. 除草剂解毒剂进展评述[J]. 东北农业大学学报,1995,26(4):407-413.

[15] 范志金,钱传范,陈俊鹏,等. 1, 8-萘二甲酰酐对高浓度单啞磺隆胁迫下玉米的解毒作用[J]. 农药学学报,2004,6(4):55-61.

[16] 路 凯,钱传范. 萘二甲酰酐减轻胺苯磺隆对水稻药害的作用机制[J]. 植物保护学报,2000,27(3):268-272.

[17] 许阳光,李学锋,吕明明. 除草剂中的安全剂研究进展[J]. 中国植保导刊,2004,24(1):8-11.

[18] 叶 非,徐伟钧. 除草剂安全剂的生理生化作用机制研究进展[J]. 植物保护学报,2008,35(4):367-372.

[19] 刘玉琛,叶 非. 除草剂安全剂作用机制研究进展[J]. 植物保护,2007,33(6):5-10.

[20] 毕洪梅,张金艳,叶 非,等. 除草剂安全剂的作用机制研究进展[J]. 农药科学与管理,2007,25(1):32-35.

[21] Kandel S, Morant M, Benveniste I, et al. Cloning functional expression, and characterization of CYP709C1, the first sub-terminal hydroxylase of long chain fatty acid in plants. Induction by chemicals and methyl jasmonate[J]. The Journal of Biological Chemistry,2005, 280(43):35 881-35 889.

[22] Persans M W, Wang J, Schuler M A. Characterization of maize cytochrome P450 monooxygenases induced in response to safeners and bacterial pathogens[J]. Plant Physiology,2001,125(2):1 126-1 138.

[23] 张金艳,毕洪梅,叶 非. 除草剂解毒剂对玉米氯磺隆残留药害的解毒效果初报[J]. 中国农学通报, 2007,23(7):447-451.

[24] Cummins I, O'Hagan D, Jablonkai I, et al. Cloning, characterization and regulation of a family of phi class glutathione transferases from wheat[J]. Plant Molecular Biology,2003,52(3):591-603.

[25] 叶 非,付 颖,徐伟钧,等. 安全剂 AD-67 保护玉米免受单啞磺隆药害的作用及其机理[J]. 植物保护,2010,36(4):90-93.

[26] 叶 非,曲虹云. 安全剂 R-28725 保护玉米免受绿磺隆药害的机理[J]. 植物保护学报,2003, 30(2): 187-192.

[27] 叶 非,曲虹云. 安全剂 R-28725 保护玉米免受咪唑乙烟酸药害的机理研究[J]. 农药学学报,2002,4(1):18-22.

[28] 赵李霞,刘程国,付 颖,等. 安全剂 R-28725 保护玉米免受氯磺隆药害的作用[J]. 植物保护,2013,39(1):29-32.

[29] 黄春艳,陈铁保,王 宇,等. 土壤湿度对乙草胺药害的影响[J]. 中国农学通报,2006,22(8):393-396.

[30] Gronwald J W, Fuerst E P, Charlotte V, et al. Effect of herbicide antidotes on glutathione content and glutathion S-transferase activity of sorghum shoot[J]. Pestic Biochem and Physiol,1987,29(1):66-76.

[31] Matola T, Jablonkai I. Safening efficacy of halogenated acetals, ketals and amides and relationship between the structure and effect on glutathione-S-transferases in maize[J]. Crop Protection,2007,26(3):278-284.

[32] Scarponi L, Quagliarini E, Del Buono D. Induction of wheat and maize glutathione S-transferase by some herbicide safeners and thieir effect on enzzyme activity against butachlor and terbuthylazine [J]. Pest Management Science,2006,62(10):927-932.

(责任编辑:郭学兰)