

代谢酶抑制剂PX对除草剂防除稗草的增效作用

张静 郭静* 孔令伟 杨柳 郑燕 陶波*

(东北农业大学植物保护学院, 哈尔滨 150030)

摘要: 为解决除草剂防除困难的问题, 采用室内盆栽试验测定了PX、PM和 Mn^{2+} 三种代谢酶抑制剂对精喹禾灵、莠去津、烟嘧磺隆、硝磺草酮和烯禾啶防除稗草*Echinochloa crus-galli*的增效作用, 测定不同用量代谢酶抑制剂PX对这5种除草剂的增效作用及其与莠去津混用后稗草体内谷胱甘肽转移酶(glutathione *S*-transferase, GST)和细胞色素P450(cytochrome P450, CYP450)活性的变化。结果显示, 在3种代谢酶抑制剂中, 代谢酶抑制剂PX对精喹禾灵、莠去津、烟嘧磺隆、硝磺草酮和烯禾啶5种除草剂的增效作用最显著。不同用量代谢酶抑制剂PX对不同除草剂的增效作用不同, 其中75 g (a.i.)/ hm^2 代谢酶抑制剂PX对莠去津的增效最佳, 株防除效果和鲜重防除效果分别增加了35.33个百分点和37.33个百分点。莠去津与代谢酶抑制剂PX混用后, 稗草体内GST和CYP450活性均较对照显著降低。表明除草剂与代谢酶抑制剂PX混用能增加除草剂对稗草的防除效果, 可以达到减施除草剂的目的。

关键词: 代谢酶抑制剂; 除草剂; 稗草; 助剂; 增效作用; 代谢酶

Synergistic effect of metabolic enzyme inhibitor PX on barnyardgrass control

Zhang Jing Guo Jing* Kong Lingwei Yang Liu Zheng Yan Tao Bo*

(College of Plant Protection, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, Heilongjiang Province, China)

Abstract: To solve the problem of herbicide control, an indoor pot test was conducted to investigate the effect of three metabolic enzyme inhibitors on the control of barnyardgrass by quinefolium, atrazine, nicosulfuron, nitroxsulfuron and allylhydrazine, and in particular, to determine the potentiating effect of the metabolism enzyme inhibitor, PX, on the five herbicides at different concentrations, and changes in the activities of glutathione *S*-transferase (GST) and cytochrome P450 (CYP450) of the barnyardgrass after mixing with atrazine. The results showed that among the three metabolic enzyme inhibitors, PX had the most significant synergistic effect on five herbicides, namely, quinefolinate, atrazine, nicosulfuron, nitroxsulfuron and alloxan. Different concentrations of metabolic enzyme inhibitor PX had different synergistic effects on different herbicides, among which 75 g (a.i.)/ hm^2 of metabolic enzyme inhibitor PX was most effective against atrazine, with an increase of 35.33 and 37.33 percentage points in plant control and fresh weight control, respectively. After mixing atrazine with metabolic enzyme inhibitor PX, the GST and CYP450 activities of barnyard grass were significantly reduced compared with the control. It shows that the mixing of herbicide and metabolic enzyme inhibitor PX can increase the effect of herbicide on barnyardgrass, and can achieve the purpose of reducing the application of herbicides.

Key words: metabolic enzyme inhibitor; herbicide; barnyardgrass; adjuvant; synergistic effect; metabolizing enzyme

稗草 *Echinochloa crus-galli* 是一年生禾本科杂草,与农作物共同竞争养分资源,严重影响农作物产量,如崔娟等(2016)研究发现稗草密度越大对大豆 *Glycine max* 产量影响越大,当稗草密度达到100株/m²时,大豆产量减少49.67%;林雪(2015)报道玉米田禾本科杂草野黍 *Eriochloa villosa*、马唐 *Digitaria sanguinalis* 和稗草会导致玉米减产5%~15%,严重时可达20%以上。田间杂草的防除主要以化学药剂为主,近年来随着除草剂的大量使用,稗草已对除草剂产生抗性(孙鹏和赵倩明,2023)。如李拥兵等(2003)发现南方稗草已对二氯喹啉酸产生抗性;郁志博(2011)发现黑龙江省大豆田内稗草对已对精喹禾灵产生抗性;井秋月等(2014)发现黑龙江省不同地区稗草已对烟嘧磺隆产生抗性;孙腾等(2023)报道我国主要水稻产区稻田内稗草已对氰氟草酯和噁唑酰草胺产生抗性。目前,稗草的防除已成为农业生产中的难题。

除草剂与助剂混用能增加除草剂对杂草的防除效果。如激健助剂对机插秧稻封闭除草剂配方丙噁·丁草胺+氟酮磺草胺、丙草胺+苄嘧磺隆、丙嘧磺隆+氰氟草酯,茎叶除草剂配方氯氟吡啶酯+氰氟草酯、噁唑·氟氟+二甲·灭草松和五氟·氟氟草+二甲·灭草松有增效作用(谢志娟等,2023);助剂安融乐配合烯禾啶施用能有效防除紫花苜蓿 *Medicago sativa* 田内杂草马唐,使紫花苜蓿增产23.52%(苏旺苍等,2023);当甲基化植物油类助剂与毒死蜱混用后,毒死蜱使用量可减少20%(王明等,2019);农药助剂克欧森·农药配合噁唑酰草胺乳油对稻田抗性稗草的株防除效果和鲜重防除效果均达到99%以上(朱强国,2023);添加迈丝和渗透者助剂后,苯唑草酮用量可减少30%以上(韩玉军等,2023);添加助剂后,氟啶虫酰胺·啶虫脒的静态表面张力显著降低,用量可降低25%,对辣椒蚜虫的防除效果可提高25%(李彦飞等,2023)。助剂主要通过改善除草剂在靶标植物上的铺展性能和润湿性能来增加除草剂的防除效果。如氯虫苯甲酰胺中添加 Agrosprod 910 助剂后,助剂通过改变药液在玉米叶片上接触角及表面张力提高玉米冠层的雾滴密度、雾滴覆盖率和雾滴沉积量(王潇楠等,2023);甲维·茚虫威悬浮剂和苯甲·嘧菌酯中添加助剂 Aero-mate 320 可增加药液雾滴在水稻冠层的覆盖及沉积,并能显著增加农药的沉积利用率,其中添加0.6% Aero-mate 320 后药液的表面张力以及在水稻叶片上的接触角显著减小(陈奕璇等,2021);助剂通过降低除草剂的表面

张力和接触角来达到增效作用(Castro et al., 2018; Santos et al., 2019)。代谢酶抑制剂作为一种农药助剂,主要通过影响植株体内代谢酶来提高除草剂的活性(苏少泉,2003),此外代谢酶与杂草对除草剂的抗性有关,如早熟禾 *Poa annua* (Wang et al., 2013) 对精噁唑禾草灵、看麦娘 *Alopecurus aequalis* (Zhao et al., 2022) 对甲基二磺隆产生抗性均与杂草体内细胞色素 P450 (cytochrome P450, CYP450) 氧化酶系有关;大穗看麦娘 *Alopecurus myosuroides* (Cummins et al., 1997) 和茵草 *Beckmannia syzigachne* (Pan et al., 2016) 对精噁唑禾草灵产生抗性均与谷胱甘肽转移酶 (glutathione S-transferase, GST) 有关;颜伯俊(2020)研究发现硬稗 *Echinochloa glabrescens* 对五氟磺草胺产生抗性与其体内 CYP450 基因表达上调有关;杨霞等(2015)发现多抗性稗草中 GST 对除草剂有解毒作用。因此,探究杂草体内代谢酶活性可以更好地反应代谢酶抑制剂对杂草的作用效果。

针对当前除草剂用量过高并且单一重复使用除草剂引发杂草的抗药性问题,利用前期研究筛选出的3种代谢酶抑制剂苯甲酰胺类化合物 PM (benzamide)、磷酸酯型阴离子表面活性剂 PX (phosphate ester anionic surfactant) 和 Mn²⁺ 进行试验,测定这3种代谢酶抑制剂对除草剂精喹禾灵、莠去津、烟嘧磺隆、硝磺草酮和烯禾啶的增效作用,筛选增效作用最好的一种代谢酶抑制剂,测定其不同用量对不同除草剂的增效作用及其与莠去津混用后不同抗性稗草体内相关酶活性的变化,明确代谢酶抑制剂 PX 对不同抗性稗草的作用机理,以期对除草剂的减施提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料

供试植物和土壤:敏感、中抗和高抗稗草种子均由东北农业大学农药教研室提供。自东北农业大学未经农药处理过的试验田中采集黑土,有机质含量为4%,pH为6.75。

农药和助剂:5%精喹禾灵 (quizalofop-p-ethyl) 乳油,江苏丰山集团有限公司;38%莠去津 (atrazine) 悬浮剂、15%硝磺草酮 (mesotrione) 悬浮剂,吉林金秋农药有限公司;4%烟嘧磺隆 (nicosulfuron) 悬浮剂,济南天邦化工有限公司;12.5%烯禾啶 (sethoxydim) 乳油,沈阳科创化学品有限公司。代谢酶抑制剂 Mn²⁺、苯甲酰胺类化合物 PM (benzamide)、磷酸酯型阴离子表面活性剂 (phosphate ester anionic

surfactant, PX), 东北农业大学农药教研室提供。

试剂和仪器: GST 试剂盒、CYP450 试剂盒, 上海淳麦生物科技有限公司; 其他试剂均为国产分析纯。PRECISION504L 恒温培养箱, 广东省医疗器械厂; Multiskan FC 酶标仪, 美国 Thermo Fisher Scientific 公司; ST16R 高速冷冻离心机, 美国 Thermo 公司; DW-HL540 超低温冷冻储存箱, 中科美菱低温科技股份有限公司。

1.2 方法

1.2.1 不同代谢酶抑制剂对除草剂的增效作用

2022年于东北农业大学温室内进行盆栽试验。挑选籽粒饱满的敏感稗草种子, 于50℃水浴锅中浸泡2h, 取出后置于25℃恒温培养箱中避光催芽24h; 选择长势相近的露白稗草种子20粒种植于直径10cm、高11cm的盆中, 覆黑土, 待长到3~4叶期时进行茎叶喷雾处理。除草剂分别为精喹禾灵、莠去津、烟嘧磺隆、硝磺草酮和烯禾啶, 用量分别为30、1200、60、100和130g(a.i.)/hm², 分别添加代谢酶抑制剂Mn²⁺、PM和PX, 用量均为45g(a.i.)/hm², 桶混后施用, 喷液量为300L/hm², 以等量清水加入到单一除草剂中作为药剂对照, 以不喷任何药剂作为空白对照, 每个处理重复3次, 每个重复3盆。施药后采取正常的田间管理, 处理后第14天调查盆中存活的株数, 每个处理调查3次, 每次调查3盆; 每盆随机选取10株测量地上部分鲜重, 计算株防除效果、鲜重防除效果及增加防效。鲜重防除效果=(对照区杂草鲜重-药剂处理区杂草鲜重)/对照区杂草鲜重×100%, 株防除效果=(对照区杂草株数-药剂处理区杂草株数)/对照区杂草株数×100%。株防除效果增加=药剂处理区株防除效果-药剂对照区株防除效果, 鲜重防除效果增加=药剂处理区鲜重防除效果-药剂对照区鲜重防除效果。

1.2.2 不同用量代谢酶抑制剂PX对除草剂的增效作用

2022年于东北农业大学温室内进行盆栽试验。挑选籽粒饱满的敏感稗草种子, 于50℃水浴锅中浸泡2h, 取出后置于25℃恒温培养箱中避光催芽24h; 选择长势相近的露白稗草种子20粒种植于直径10cm、高11cm的盆中, 覆黑土, 待长到3~4叶期时进行茎叶喷雾处理。除草剂为精喹禾灵、烯禾啶、莠去津、烟嘧磺隆和硝磺草酮, 用量分别为30、130、1200、60和100g(a.i.)/hm², 均分别添加用量为0、15、30、45、60和75g(a.i.)/hm²的代谢酶抑制剂PX, 桶混后施用, 喷液量均为300L/hm², 以等量清水加入单一除草剂中作为药剂对照, 以不喷施任何药剂作为空白对照,

每个处理重复3次, 每个重复3盆。施药后采取正常的田间管理, 处理后第14天调查盆中存活的株数, 每个处理调查3次, 每次调查3盆, 每盆随机取10株测量地上部分鲜重, 计算株防除效果、鲜重防除效果及增加防效。公式同1.2.1

1.2.3 代谢酶抑制剂PX对稗草代谢酶活性的影响

2022年于东北农业大学温室内进行盆栽试验。挑选籽粒饱满的敏感、中抗和高抗稗草种子, 于50℃水浴锅中浸泡2h, 取出后置于25℃恒温培养箱中避光催芽24h; 选择长势相近的露白稗草种子20粒种植于直径10cm、高11cm的盆中, 覆黑土, 待长到3~4叶期时进行茎叶喷雾处理, 每个品种设3个处理, 即1200g(a.i.)/hm²莠去津、1200g(a.i.)/hm²莠去津+75g(a.i.)/hm²代谢酶抑制剂PX及清水(对照), 每个处理重复3次, 每个重复3盆。施药后进行正常田间管理, 于施药后1、3、5、7、14和28d进行取样, 每个处理取样3次, 每次每个处理随机选择3株稗草地上部分, 于-80℃冰箱保存, 待所有取样完成后统一切割样品。每个样品称取0.1g置于2.0mL离心管中, 加入0.5mL pH 7.4的磷酸盐缓冲液(phosphate buffer solution, PBS), 于液氮中迅速冷冻保存。测量酶活性时, 取出样品融化, 于2~8℃下加入1mL的PBS(pH 7.4)混匀, 以3000r/min离心20min, 收集上清液, 即酶液。取10μL酶液滴到96孔酶标包被板的待测样品孔中, 设空白孔和标准孔, 分别按照GST试剂盒、CYP450试剂盒说明书进行操作, 于450nm波长处测量各孔的吸光度值, 根据标准曲线计算各样品中GST和P450活性。

1.3 数据分析

采用DPS 9.01软件对试验数据进行统计分析, 应用Duncan氏新复极差法进行差异显著性检验。

2 结果与分析

2.1 不同代谢酶抑制剂对除草剂的增效作用

不同代谢酶抑制剂对精喹禾灵、莠去津、烟嘧磺隆、硝磺草酮和烯禾啶防除稗草的增效作用不同, 其中代谢酶抑制剂PX对精喹禾灵、莠去津、烟嘧磺隆、硝磺草酮和烯禾啶防除稗草的增效效果最显著($P<0.05$), 株防除效果分别增加了24.00、27.67、22.67、23.66和31.33个百分点, 鲜重防除效果分别增加了25.26、28.31、20.16、26.67和27.00个百分点; 代谢酶抑制剂PM对精喹禾灵、莠去津、烟嘧磺隆、硝磺草酮和烯禾啶防除稗草的增效效果次之, 分别显著低于代谢酶抑制剂PX的增效作用($P<0.05$); 代

谢酶抑制剂 Mn^{2+} 对精喹禾灵、莠去津、烟嘧磺隆、硝磺草酮和烯禾啶防除稗草的增效最差, 分别显著低于代谢酶抑制剂 PM 和 PX 的增效作用 ($P < 0.05$, 表 1)。

表 1 不同代谢酶抑制剂对不同除草剂的增效作用

Table 1 Synergistic effects of different metabolic enzyme inhibitors on different herbicides

%

除草剂 Herbicide	助剂 Adjuvant	株防除效果 Control effect for plant	株防除效果增加 Increase control effect for plant	鲜重防除效果 Control effect for fresh weight	鲜重防除效果增加 Increase control effect for fresh weight
精喹禾灵 Quizalofop-p-ethyl	未加入抑制剂(CK) No adding inhibitor	60.67±2.52 d	—	60.53±2.72 d	—
	Mn^{2+}	67.33±0.58 c	6.66±0.58 c	66.16±0.50 c	5.63±0.50 c
	PM	78.00±2.65 b	17.33±2.65 b	80.26±1.47 b	19.73±1.47 b
	PX	84.67±1.53 a	24.00±1.53 a	85.79±1.49 a	25.26±1.49 a
莠去津 Atrazine	未加入抑制剂(CK) No adding inhibitor	50.00±2.00 c	—	42.88±0.79 d	—
	Mn^{2+}	51.67±0.58 c	1.67±0.58 c	48.16±0.96 c	5.28±0.96 c
	PM	65.67±1.53 b	15.67±1.53 b	58.79±1.10 b	15.91±1.10 b
	PX	77.67±1.15 a	27.67±1.15 a	71.19±0.60 a	28.31±0.60 a
烟嘧磺隆 Nicosulfuron	未加入抑制剂(CK) No adding inhibitor	42.33±0.58 d	—	44.17±0.76 d	—
	Mn^{2+}	44.00±1.00 c	1.67±1.00 c	47.50±0.50 c	3.33±0.50 c
	PM	56.67±0.58 b	14.34±0.58 b	51.17±1.04 b	12.93±1.04 b
	PX	65.00±1.00 a	22.67±1.00 a	64.33±0.58 a	20.16±0.58 a
硝磺草酮 Mesotrione	未加入抑制剂(CK) No adding inhibitor	48.67±0.58 d	—	47.33±0.42 d	—
	Mn^{2+}	53.33±0.65 c	4.66±0.65 c	52.33±0.58 c	5.00±0.58 c
	PM	60.33±1.00 b	11.66±1.00 b	62.67±1.15 b	15.34±1.15 b
	PX	72.33±0.54 a	23.66±0.54 a	74.00±0.68 a	26.67±0.68 a
烯禾啶 Sethoxydim	未加入抑制剂(CK) No adding inhibitor	52.00±0.24 d	—	49.06±0.34 d	—
	Mn^{2+}	64.67±0.58 c	12.67±0.58 c	63.42±0.55 c	14.36±0.55 c
	PM	69.33±0.26 b	17.33±0.26 b	70.00±0.78 b	20.94±0.78 b
	PX	83.33±2.08 a	31.33±2.08 a	76.06±1.22 a	27.00±1.22 a

表中数据为平均数±标准差。同除草剂下同列不同小写字母表示经 Duncan 氏新复极差法检验差异显著 ($P < 0.05$)。Data are mean±SD. Different lowercase letters in the same column at the same herbicide indicate significant difference by Duncan's new multiple range test ($P < 0.05$).

2.2 不同用量代谢酶抑制剂PX对除草剂的增效作用

不同用量代谢酶抑制剂 PX 对精喹禾灵、莠去津、烟嘧磺隆、硝磺草酮和烯禾啶防除稗草均有一定的增效作用, 且随着代谢酶抑制剂 PX 用量增加, 增效越显著 ($P < 0.05$), 其中 75 g (a.i.)/ hm^2 代谢酶抑制剂 PX 对精喹禾灵、莠去津、烟嘧磺隆、硝磺草酮、烯禾啶的增效最显著, 株防除效果分别增加了 29.66、35.33、33.33、29.00 和 32.66 个百分点, 鲜重防除效果分别增加了 33.75、37.33、29.61、33.32 和 29.82 个百分点(表 2)。

2.3 代谢酶抑制剂PX对稗草体内GST活性的影响

莠去津添加代谢酶抑制剂 PX 与未添加代谢酶抑制剂 PX 对不同敏感性稗草体内 GST 活性影响不同(图 1)。

莠去津添加代谢酶抑制剂 PX 与未添加代谢酶抑制剂 PX 后敏感稗草体内 GST 活性与对照均存在差异(图 1-A)。莠去津未添加代谢酶抑制剂 PX 和添加代谢酶抑制剂 PX 处理 1~7 d 内, 敏感稗草体内 GST 活性均高于对照, 随着处理时间延长敏感稗草体内 GST 活性逐渐下降, 当处理 12 d 时敏感稗草体

内 GST 活性均开始低于对照, 当处理 28 d 时莠去津添加代谢酶抑制剂 PX 处理的敏感稗草体内 GST 活性趋近于 0, 稗草基本接近死亡(图 1-A)。整个处理期内, 莠去津添加代谢酶抑制剂 PX 处理的敏感稗

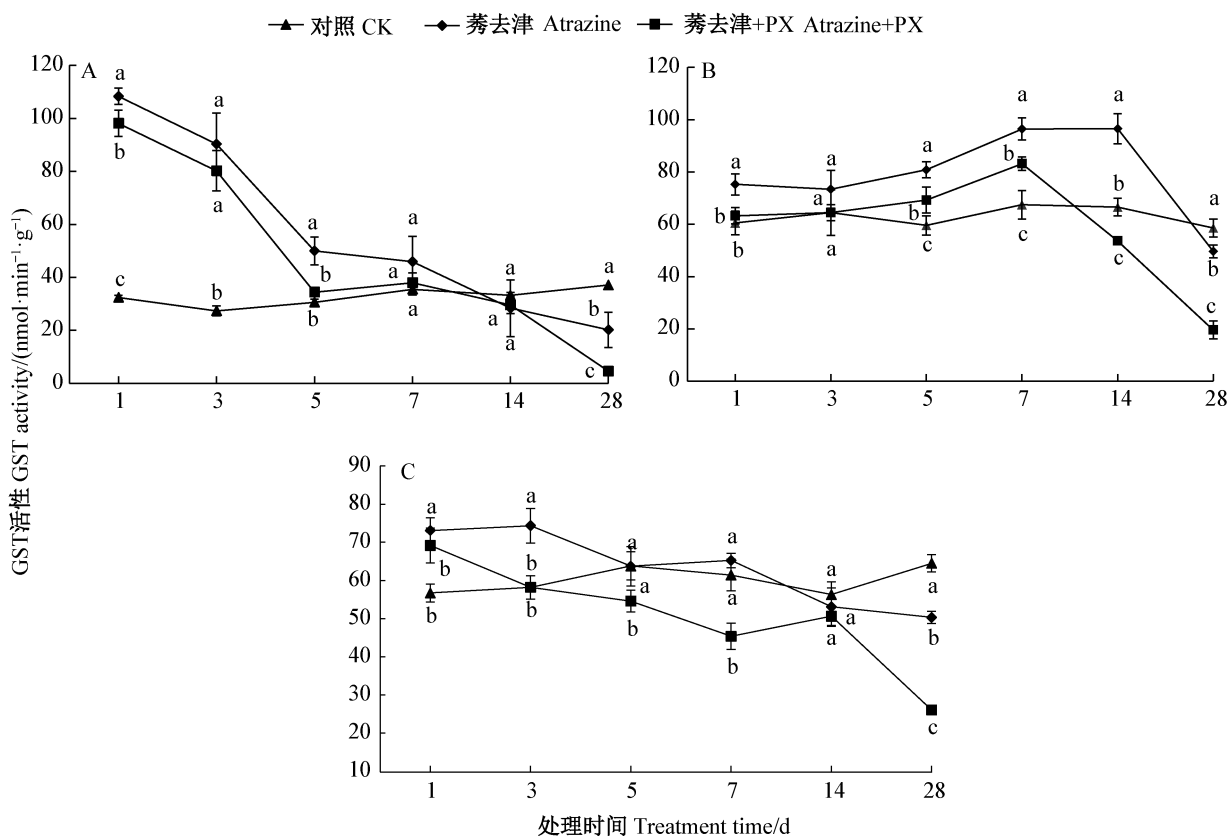
草体内 GST 活性均低于莠去津未添加代谢酶抑制剂 PX 处理的, 表明添加代谢酶抑制剂会抑制敏感稗草体内 GST 活性(图 1-A)。

表 2 不同用量代谢酶抑制剂 PX 对不同除草剂的增效作用

Table 2 Synergistic effects of different concentrations of metabolic enzyme inhibitor PX on different herbicides

除草剂 Herbicide	助剂用量 Concentration of adjuvant/(g (a.i.)/hm ²)	株防除效果 Control effect for plant/%	株防除效果增加 Increase control effect for plant/%	鲜重防除效果 Control effect for fresh weight/%	鲜重防除效果增加 Increase control effect for fresh weight/%
精喹禾灵 Quizalofop-p-ethyl	未加入抑制剂(CK) No adding inhibitor	59.67±1.53 f	—	56.58±1.33 f	—
	15	66.33±0.58 e	6.66±0.58 e	63.32±0.66 e	6.74±0.66 e
	30	73.67±0.58 d	14.00±0.58 d	68.15±0.84 d	11.57±0.84 d
	45	82.67±1.15 c	23.00±1.15 c	74.53±1.21 c	17.95±1.21 c
	60	85.67±0.58 b	26.00±0.58 b	85.79±1.49 b	29.21±1.49 b
	75	89.33±0.58 a	29.66±0.58 a	90.33±1.05 a	33.75±1.05 a
莠去津 Atrazine	未加入抑制剂(CK) No adding inhibitor	51.00±1.00 f	—	46.99±0.90 f	—
	15	56.00±1.00 e	5.00±1.00 e	55.15±0.24 e	8.16±0.24 e
	30	60.67±0.58 d	9.67±0.58 d	63.54±0.54 d	16.55±0.54 d
	45	71.67±1.00 c	20.67±1.00 c	68.58±0.47 c	21.59±0.47 c
	60	77.67±1.15 b	26.67±1.15 b	75.40±0.63 b	28.41±0.63 b
	75	86.33±1.15 a	35.33±1.15 a	84.32±0.68 a	37.33±0.68 a
烟嘧磺隆 Nicosulfuron	未加入抑制剂(CK) No adding inhibitor	50.00±1.00 f	—	45.95±0.21 f	—
	15	55.33±1.15 e	5.33±1.15 e	51.46±0.38 e	5.51±0.38 e
	30	61.33±2.08 d	11.33±2.08 d	57.15±0.21 d	11.20±0.21 d
	45	70.67±0.58 c	20.67±0.58 c	63.31±0.49 c	17.36±0.49 c
	60	74.00±1.00 b	24.00±1.00 b	68.43±0.40 b	22.48±0.40 b
	75	83.33±0.58 a	33.33±0.58 a	75.56±0.56 a	29.61±0.56 a
硝磺草酮 Mesotrione	未加入抑制剂(CK) No adding inhibitor	51.33±1.53 f	—	49.86±0.32 f	—
	15	57.00±1.10 e	5.67±1.10 e	55.24±0.88 e	5.38±0.88 e
	30	61.00±1.00 d	9.67±1.00 d	60.59±0.47 d	10.73±0.47 d
	45	66.33±0.58 c	15.00±0.58 c	67.29±0.19 c	17.43±0.19 c
	60	75.67±0.37 b	24.34±0.37 b	74.20±0.14 b	24.34±0.14 b
	75	80.33±0.71 a	29.00±0.71 a	83.18±0.28 a	33.32±0.28 a
烯禾啶 Sethoxydim	未加入抑制剂(CK) No adding inhibitor	50.67±0.58 f	—	51.29±1.33 e	—
	15	56.67±1.23 e	6.00±1.23 e	54.75±0.44 e	3.46±0.44 e
	30	62.67±0.97 d	12.00±0.97 d	63.44±0.83 d	12.15±0.83 d
	45	68.33±0.58 c	17.66±0.58 c	70.90±0.23 c	19.61±0.23 c
	60	78.00±1.15 b	27.33±1.15 b	76.23±0.75 b	24.94±0.75 b
	75	83.33±0.57 a	32.66±0.57 a	81.11±0.43 a	29.82±0.43 a

表中数据为平均数±标准差。同除草剂下同列不同小写字母表示经 Duncan 氏新复极差法检验差异显著($P<0.05$)。Data are mean±SD. Different lowercase letters in the same column of the same herbicide indicate significant difference by Duncan's new multiple range test ($P<0.05$).



A~C: 敏感、中抗和高抗稗草。A~C: Sensitive, moderately resistant and highly resistant barnyardgrass.

图1 代谢酶抑制剂PX对稗草体内GST活性的影响

Fig. 1 Effects of the metabolic enzyme inhibitor PX on GST activity in barnyardgrass

图中数据为平均数±标准误。不同小写字母表示同时间不同处理之间经Duncan氏新复极差法检验差异显著($P < 0.05$)。Data are mean±SD. Different lowercase letters indicate significant difference among different treatments at the same time by Duncan's new multiple range test ($P < 0.05$).

莠去津添加代谢酶抑制剂PX与未添加代谢酶抑制剂PX后中抗稗草体内GST活性与对照均存在差异(图1-B)。莠去津未添加代谢酶抑制剂PX和添加代谢酶抑制剂PX处理后,中抗稗草体内GST活性均呈现先上升后下降的趋势,其中莠去津未添加代谢酶抑制剂PX处理的中抗稗草体内GST活性在处理14 d时达到最大,为96.48 $\text{nmol}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$,在处理20 d时开始低于对照;莠去津添加代谢酶抑制剂PX处理的中抗稗草体内GST活性在处理7 d时达到最大,为83.17 $\text{nmol}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$,在处理10 d时开始低于对照(图1-B)。整个处理期内,莠去津添加代谢酶抑制剂PX处理的中抗稗草体内GST活性均低于未添加代谢酶抑制剂PX处理的,说明添加代谢酶抑制剂PX会抑制中抗稗草体内GST活性(图1-B)。

莠去津添加代谢酶抑制剂PX与未添加代谢酶抑制剂PX后高抗稗草体内GST活性均与对照存在差异(图1-C)。莠去津未添加代谢酶抑制剂PX处

理的高抗稗草体内GST活性一直呈下降趋势,莠去津添加代谢酶抑制剂PX处理的高抗稗草体内GST活性先下降,在处理14 d时有所上升,而后又下降,但GST活性一直低于未添加代谢酶抑制剂PX处理的,表明添加代谢酶抑制剂PX会抑制高抗稗草体内GST活性(图1-C)。

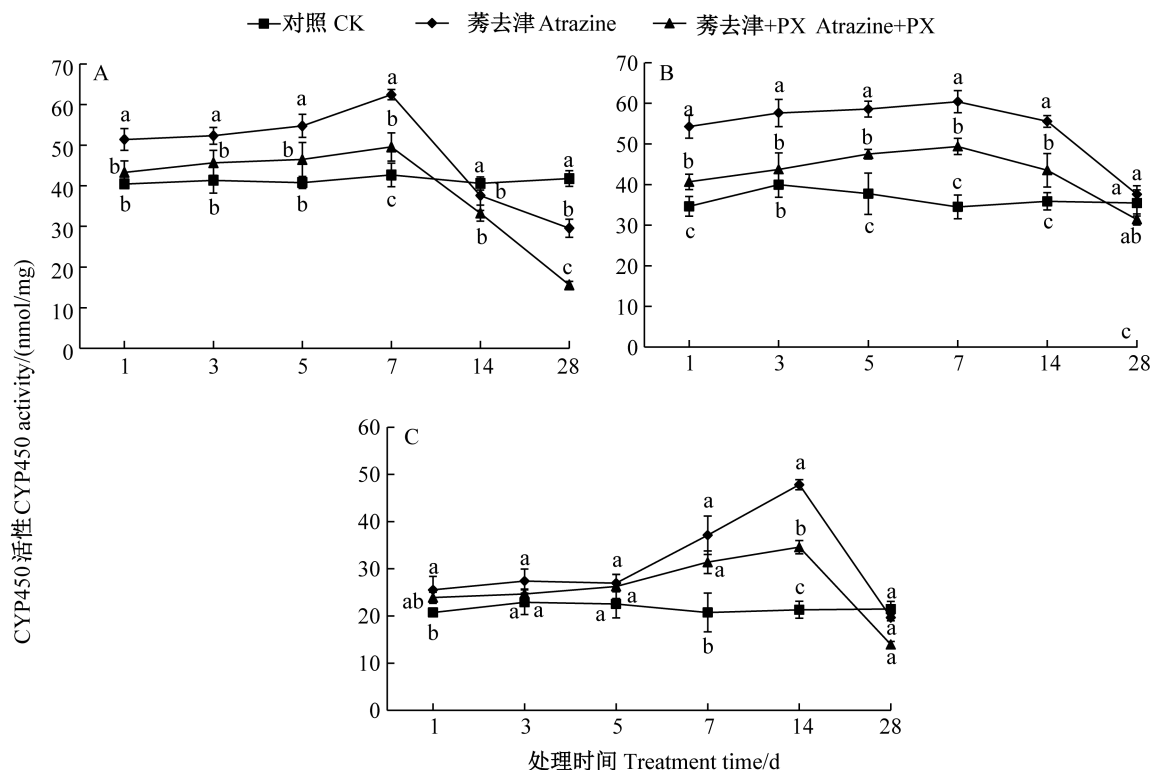
2.4 代谢酶抑制剂PX对稗草体内CYP450活性的影响

莠去津添加代谢酶抑制剂PX与未添加代谢酶抑制剂PX对不同敏感性稗草体内CYP450活性影响不同(图2)。

莠去津添加代谢酶抑制剂PX与未添加代谢酶抑制剂PX处理后敏感稗草体内CYP450活性与对照差异明显(图2-A)。莠去津添加代谢酶抑制剂PX与未添加代谢酶抑制剂PX处理后敏感稗草体内CYP450活性均先上升后下降,其中莠去津未添加代谢酶抑制剂PX处理的敏感稗草体内CYP450活性在处理7 d时达到最大,为62.45 nmol/mg ,在处理13 d时开始低于对照;莠去津添加代谢酶抑制剂PX处理

的敏感稗草体内CYP450活性在处理7 d时达到最大,为49.58 nmol/mg,在处理10 d时开始低于对照(图2-A)。整个处理期内,莠去津添加代谢酶抑制

剂PX处理的敏感稗草体内CYP450活性均低于莠去津未添加处理的,表明添加代谢酶抑制剂PX会抑制敏感稗草体内CYP450活性。



A~C: 敏感、中抗和高抗稗草。A~C: Sensitive, moderately resistant and highly resistant barnyardgrass.

图2 代谢酶抑制剂PX对稗草体内CYP450活性的影响

Fig. 2 Effects of metabolic enzyme inhibitor PX on CYP450 activity of barnyardgrass

图中数据为平均数±标准误。不同小写字母表示同时间不同处理之间经Duncan氏新复极差法检验差异显著($P < 0.05$)。Data are mean±SD. Different lowercase letters indicate significant difference among different treatments at the same time by Duncan's new multiple range test ($P < 0.05$).

莠去津添加代谢酶抑制剂PX与未添加代谢酶抑制剂PX处理后中抗稗草体内CYP450活性与对照差异明显(图2-B)。莠去津添加代谢酶抑制剂PX与未添加代谢酶抑制剂PX处理1~7 d时,中抗稗草体内CYP450活性均呈平稳上升,在处理7 d时达到最大,分别为49.38 nmol/mg和60.40 nmol/mg,随即均开始下降,莠去津添加代谢酶抑制剂PX处理的在处理22 d时开始低于对照,而莠去津未添加代谢酶抑制剂PX处理的,一直高于对照(图2-B)。整个处理期内,莠去津添加代谢酶抑制剂PX处理的中抗稗草体内CYP450活性均低于莠去津未添加代谢酶抑制剂PX处理的,表明添加代谢酶抑制剂PX会抑制中抗稗草体内CYP450活性(图2-B)。

莠去津添加代谢酶抑制剂PX与未添加代谢酶抑制剂PX处理后高抗稗草体内CYP450活性与对照差异明显(图2-C)。莠去津添加代谢酶抑制剂

PX与未添加代谢酶抑制剂PX处理后,高抗稗草体内CYP450活性整体呈先上升后下降的趋势,2个处理均在处理14 d时达到最大,分别为34.57 nmol/mg和47.81 nmol/mg,而后开始下降,莠去津添加代谢酶抑制剂PX处理在处理23 d时体内CYP450活性开始低于对照,莠去津未添加代谢酶抑制剂PX处理在处理27 d时CYP450活性开始低于对照。整个处理期内,莠去津添加代谢酶抑制剂PX处理的高抗稗草体内CYP450活性均低于莠去津未添加代谢酶抑制剂PX处理的,表明添加代谢酶抑制剂PX会抑制高抗稗草体内CYP450活性(图2-C)。

3 讨论

在除草剂中添加助剂可提高对杂草的防除效果,进而减少除草剂用量,从而降低成本,提高经济效益,保护环境。任冬雪等(2023)通过试验发现不

同助剂对玉米田除草剂硝·烟·莠有不同的增效作用,硝·烟·莠减量30%并分别添加橙皮精油、哈速腾和倍加力3种助剂后对杂草的防除效果与对照差异不显著。杨石有等(2024)研究结果显示5%氯虫苯甲酰胺悬浮剂中分别添加有机硅Silwet 408、矿物油和芦荟精油3种助剂均能明显增加该药剂对番茄潜叶蛾 *Tuta absoluta* 的防治效果,而且添加助剂可使该药剂用量减少10%~20%。本研究结果显示, Mn^{2+} 、PM和PX三种代谢酶抑制剂均能显著提高精喹禾灵、莠去津、烟嘧磺隆、硝磺草酮和烯禾啉对稗草的防除效果,其中代谢酶抑制剂PX对除草剂莠去津的增效作用最显著,株防除效果增加了27.67个百分点,鲜重防除效果增加了28.31个百分点。

除草剂添加不同助剂后对杂草的防除效果不同。朱宝林等(2020)研究发现当乙基和甲基酯植物油、有机硅408的添加量分别为甲基二磺隆喷液量的0.5%和0.2%(体积比)时,甲基二磺隆对节节麦 *Aegilops tauschii* 的防除效果最显著,增效分别为15.21个百分点和26.52个百分点;当异十三醇聚氧乙烯醚、聚醚改性七甲基三硅氧烷、乙基和甲基酯植物油的添加量分别为异丙隆喷液量的0.1%、0.05%和0.25%(体积比)时,异丙隆对节节麦的防除效果最显著,增效分别为26.24个百分点、21.80个百分点和25.99个百分点。赵旭等(2023)通过比较试验发现,在新型复合类油剂、新型复合类水剂、有机硅类助剂、非离子表面活性剂和油类助剂5种助剂中,当新型复合类油剂和水剂添加量为硝磺草酮的0.3%(体积比)时,硝磺草酮对玉米杂草的防除增效最明显,其对玉米田杂草的株防除效果和鲜重防除效果均增加20个百分点以上。田雨(2023)研究发现助剂CG-3可以提高除草剂烟嘧磺隆、硝磺草酮和莠去津对杂草的防除效果,其中当烟嘧磺隆中添加0.5%(体积比)的助剂CG-3时,鲜重防除效果增加42.56个百分点,当硝磺草酮中添加1%(体积比)的助剂CG-3时,鲜重防除效果增加16.29个百分点,当莠去津添加助剂CG-3时,鲜重防效效果增加28.07个百分点。本研究发现不同用量代谢酶抑制剂PX对除草剂的增效作用也存在显著差异,随着代谢酶抑制剂PX用量增加,增效作用越显著,当代谢酶抑制剂PX用量为75 g (a.i.)/ hm^2 时,其对莠去津的增效最显著,株防除效果增加了35.33个百分点,鲜重防除效果增加了37.33个百分点。

近几年研究发现杂草对除草剂产生抗性与体内代谢酶相关,如彭谦(2020)研究发现稗草对噁唑啉

草胺产生抗性与稗草体内CYP450和GST活性增强有关;Cummins et al.(2013)结果显示杂草的多重抗性与CYP450和GST活性有关;郇志博(2011)发现853农场R型稗草和五大连池农场R型稗草的抗性机制与GST对精喹禾灵的解毒增强有关,853农场R型稗草GST活性的峰值为1.213,五大连池农场R型稗草GST活性的峰值为1.141,分别为同期对照的2.7倍和4.3倍。González-Torralva & Norsworthy (2023)结果显示稗草对氰氟草酯产生抗性与CYP450基因过表达有关。本研究结果显示,代谢酶抑制剂会抑制稗草体内GST活性,降低稗草体内CYP450活性,推测代谢酶抑制剂PX通过改变稗草体内GST和CYP450活性来影响莠去津对稗草的防除效果。不同抗性稗草种群,其体内GST和CYP450活性对代谢酶抑制剂PX的响应也不同。赵永超(2022)研究发现松脂精油助剂对韭菜迟眼蕈蚊 *Bradysia odoriphaga* 解毒代谢酶有抑制作用,与本研究结果一致。

本研究结果表明添加代谢酶抑制剂PX可以提高药剂对除草剂的防除效果,抑制杂草体内GST和CYP450活性产生。关于代谢酶抑制剂PX对田间杂草的防除效果、对作物的安全性及对稗草代谢酶的影响是否与代谢酶基因表达相关还需下一步深入研究。

参 考 文 献 (References)

- Castro EB, Carbonari CA, Velini ED, Gomes GLGC, Belapart D. 2018. Influence of adjuvants on the surface tension, deposition and effectiveness of herbicides on fleabane plants. *Planta Daninha*, 36: e018166251
- Chen YX, Shi X, Qin GL, Guo YW, Yan XJ, Yuan HZ. 2021. The mechanism and effect of the vegetable oil adjuvant Aero-mate 320 in improving the deposition utilization rate of pesticides applied by plant protection unmanned aerial vehicles in rice field. *Journal of Plant Protection*, 48(3): 510-517 (in Chinese) [陈奕璇, 石鑫, 覃贵亮, 郭永旺, 闫晓静, 袁会珠. 2021. 植物油助剂 Aero-mate 320对植保无人机稻田低容量喷雾沉积利用率的提升效果及其机理分析. *植物保护学报*, 48(3): 510-517]
- Cui J, Dong LH, Wu L, Shi SS. 2016. Influence of *Echinochloa crus-galli* on the growth of spring soybean and its economic threshold in Northeast China. *Soybean Science*, 35(6): 992-996 (in Chinese) [崔娟, 董莉环, 吴磊, 史树森. 2016. 同期稗草对东北春大豆生长的影响及其经济阈值. *大豆科学*, 35(6): 992-996]
- Cummins I, Moss S, Cole DJ, Edwards R. 1997. Glutathione transferases in herbicide-resistant and herbicide-susceptible black-grass (*Alopecurus myosuroides*). *Pesticide Science*, 51(3): 244-250
- Cummins I, Wortley DJ, Sabbadin F, He ZS, Coxon CR, Straker HE,

- Sellars JD, Knight K, Edwards L, Hughes D, et al. 2013. Key role for a glutathione transferase in multiple-herbicide resistance in grass weeds. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 110(15): 5812–5817
- González-Torralva F, Norsworthy JK. 2023. Overexpression of *Acetyl CoA Carboxylase 1* and 3 (*ACCase1* and *ACCase3*), and *CYP81A21* were related to cyhalofop resistance in a barnyardgrass accession from Arkansas. *Plant Signaling & Behavior*, 18(1): 2172517
- Han YJ, Wang WJ, Wang YC, Ma H, Tao B. 2023. Dose-reduced and synergistic effect of spray adjuvants on topramezone on controlling weeds in maize field. *Plant Protection*, 49(2): 371–376 (in Chinese) [韩玉军, 王伟佳, 王月超, 马红, 陶波. 2023. 喷雾助剂对苯唑草酮防除玉米田杂草的减量增效作用. *植物保护*, 49(2): 371–376]
- Huan ZB. 2011. Resistance of barnyardgrass (*Echinochloa crusgalli* (L.) Beauv.) to quizalofop-p-ethyl in soybean fields of Heilongjiang Province. PhD thesis. Tai'an: Shandong Agricultural University (in Chinese) [邹志博. 2011. 黑龙江省大豆田稗草对精喹禾灵的抗性研究. 博士学位论文. 泰安: 山东农业大学]
- Jing QY, Jiao ZZ, Liu LK, Shi H, Feng L, Li W, Liu YG. 2014. The resistance of barnyardgrass and *Amaranthus retroflexus* to four common used herbicides in corn fields in Heilongjiang Province. *Crops*, (5): 128–132 (in Chinese) [井秋月, 焦梓洲, 刘兰坤, 施慧, 冯蕾, 李威, 刘亚光. 2014. 黑龙江省玉米田稗草与反枝苋对四种常用除草剂的抗性测定. *作物杂志*, (5): 128–132]
- Li YB, Wu ZH, Chen X, Liu HB, Huang BQ. 2003. Determination of resistance of *Echinochloa crus-galli* to quinclorac in the rice planting areas of South China. *Chinese Journal of Pesticide Science*, 5(4): 88–92 (in Chinese) [李拥兵, 吴志华, 陈萱, 刘洪斌, 黄炳球. 2003. 我国南方稻区稗草对二氯喹啉酸的抗性测定. *农药学报*, 5(4): 88–92]
- Li YF, Feng ZT, Wang GQ, Zhang XJ. 2023. Decrement and synergistic effect of plant-derived synergists in controlling aphids on pepper plants with flonicamid-acetamiprid 46% WG. *Agrochemicals*, 62(5): 374–377 (in Chinese) [李彦飞, 冯泽腾, 王国强, 张小军. 2023. 几种植物源增效剂对46%氟啶虫酰胺·啶虫脒WG防治辣椒蚜虫的减量增效研究. *农药*, 62(5): 374–377]
- Lin X. 2015. New herbicide efficacy and phytotoxicity test in the maize field. Master thesis. Yanji: Yanbian University (in Chinese) [林雪. 2015. 玉米田新除草剂药效、药害试验. 硕士学位论文. 延吉: 延边大学]
- Pan L, Gao HT, Xia WW, Zhang T, Dong LY. 2016. Establishing a herbicide-metabolizing enzyme library in *Beckmannia syzigachne* to identify genes associated with metabolic resistance. *Journal of Experimental Botany*, 67(6): 1745–1757
- Peng Q. 2020. The role of glutathione s-transferase involved in metabolism-based metamifop resistance in *Echinochloa crusgalli*. Master thesis. Wuhan: Huazhong Agricultural University (in Chinese) [彭谦. 2020. 稗草谷胱甘肽S-转移酶在抗噻唑草胺代谢抗性中的作用. 硕士学位论文. 武汉: 华中农业大学]
- Ren DX, Yang ZH, Mu YS, Liang QH, Li QS. 2023. The application effect of adjuvants in herbicide reduction for weed control in corn fields. *China Plant Protection*, 43(7): 78–79, 95 (in Chinese) [任冬雪, 杨志会, 穆云森, 梁秋华, 李青松. 2023. 助剂在除草剂减量防治玉米田杂草中的应用效果. *中国植保导刊*, 43(7): 78–79, 95]
- Santos RTS, Ferreira MC, Viana RG. 2019. Does the use of adjuvants alter surface tension and contact angle of herbicide spray droplets on leaves of *Sida* spp.? *Planta Daninha*, 37: e019185603
- Su SQ. 2003. Metabolism of herbicides in plants and their selectivity and application. *Modern Agrochemicals*, 2(6): 14–17 (in Chinese) [苏少泉. 2003. 除草剂在植物体内的代谢与选择性及使用. *现代农药*, 2(6): 14–17]
- Su WC, Li DM, Feng CS, Xu HL, Sun LL, Wu RH, Yang GQ. 2023. Synergistic control of crabgrass with four herbicides and adjuvant anringle in alfalfa field. *Plant Protection*, 49(4): 362–368 (in Chinese) [苏旺苍, 李东梅, 冯长松, 徐洪乐, 孙兰兰, 吴仁海, 杨共强. 2023. 4种除草剂与助剂安融乐协同防除紫花苜蓿田马唐的研究. *植物保护*, 49(4): 362–368]
- Sun P, Zhao QM. 2023. Research progress of herbicide resistance mechanism of weeds and countermeasures for resistance management. *Modern Agriculture Research*, 29(1): 94–97 (in Chinese) [孙鹏, 赵倩明. 2023. 杂草对除草剂抗性机制的研究进展及抗性治理对策. *现代农业研究*, 29(1): 94–97]
- Sun T, Mei GL, Zhang JP, Sun JJ, Peng LC, Shen XX, Zhao Y, Duan GF. 2023. Preliminary determination of the resistance of *Echinochloa* spp. to cyhalofop-butyl and metamifop in main paddy fields in China. *World Pesticide*, 45(10): 50–56 (in Chinese) [孙腾, 梅桂龙, 张建萍, 孙进军, 彭立存, 沈晓霞, 赵运, 段桂芳. 2023. 我国主要水稻产区稻田稗草对氟氯草酯和噻唑草胺的抗性初步测定. *世界农药*, 45(10): 50–56]
- Tian Y. 2023. Development of herbicide barrel mixture CG-3 for stem and leaf treatment in corn field. Master thesis. Shenyang: Shenyang Agricultural University (in Chinese) [田雨. 2023. 玉米田茎叶处理除草剂桶混助剂CG-3的研制. 硕士学位论文. 沈阳: 沈阳农业大学]
- Wang HC, Li J, Lv B, Lou YL, Dong LY. 2013. The role of cytochrome P450 monooxygenase in the different responses to fenoxaprop-p-ethyl in annual bluegrass (*Poa annua* L.) and short awned foxtail (*Alopecurus aequalis* Sobol.). *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 107(3): 334–342
- Wang M, Chen YX, Su XJ, Yue HF, Yan XJ, Yuan HZ. 2019. Effects of adjuvants in low volume spraying by unmanned aerial vehicle on the deposition distribution of pesticide droplets and control efficiency against *Aphis spiraeicola* in apple orchards of high-density dwarfing cultivation pattern. *Journal of Plant Protection*, 46(6): 1316–1323 (in Chinese) [王明, 陈奕璇, 苏小计, 岳虎锋, 闫晓静, 袁会珠. 2019. 添加助剂对植保无人机低容量喷雾在矮化密植苹果园中雾滴沉积分布及苹果黄蚜防治效果的影响. *植物保护学报*, 46(6): 1316–1323]
- Wang XN, Xiao Y, Liu YP, Chang H, Gu WJ, Wang SW. 2023. Effects of adjuvants on the physicochemical properties and deposition distribution of chlorantraniliprole solution on maize leaves. *Jour-*

- nal of Plant Protection, 50(5): 1219–1226 (in Chinese) [王潇楠, 肖勇, 刘艳萍, 常虹, 顾文杰, 王思威. 2023. 助剂对氯虫苯甲酰胺药液理化性质及在玉米叶片上沉积分布的影响. 植物保护学报, 50(5): 1219–1226]
- Xie ZJ, Wang L, Zhang HY, Ma LY, Du XJ. 2023. Synergistic effect of Jijian adjuvant on herbicides reduction for the control of weed on machine-transplanted rice fields. Modern Agricultural Science and Technology, (14): 72–75 (in Chinese) [谢志娟, 王律, 张海燕, 马丽云, 杜晓君. 2023. 激健助剂对机插秧稻田除草剂的减量增效作用. 现代农业科技, (14): 72–75]
- Yan BJ. 2020. Cytochrome P450 oxidase-mediated *Echinochloa glabrescens* study on the mechanism of resistance to penoxsulam. Master thesis. Nanjing: Nanjing Agricultural University (in Chinese) [颜伯俊. 2020. 细胞色素 P450 氧化酶介导的硬稃稗 (*Echinochloa glabrescens*) 对五氟磺草胺的抗药性机理研究. 硕士学位论文. 南京: 南京农业大学]
- Yang SY, Zhang R, Li HL, Huang JM, Kong Q, Yuan SY. 2024. Synergism of three spray adjuvants on chlorantraniliprole 5% SC against *Phthorimaea absoluta* Meyrick. Plant Protection, 50(1): 311–315 (in Chinese) [杨石有, 张蕊, 李宏琳, 黄镜梅, 孔琼, 袁盛勇. 2024. 3种喷雾助剂对5%氯虫苯甲酰胺悬浮剂防治番茄潜叶蛾的增效作用. 植物保护, 50(1): 311–315]
- Yang X, Wang X, Guan RZ, Li YF, Dong MC, Zhang ZC. 2015. Cloning and characterization of two glutathione S-transferases genes from herbicide-resistant *Echinochloa crusgalli*. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 31(6): 1296–1303 (in Chinese) [杨霞, 王笑, 管荣展, 李永丰, 董明超, 张自常. 2015. 多抗性稗草中2个谷胱甘肽转移酶基因的克隆与分析. 江苏农业学报, 31(6): 1296–1303]
- Zhao N, Yan YY, Liu WT, Wang JX. 2022. Cytochrome P450 CYP709C56 metabolizing mesosulfuron-methyl confers herbicide resistance in *Alopecurus aequalis*. Cellular and Molecular Life Sciences, 79(4): 205
- Zhao X, Zheng SW, Li QC, He DX, Li SY, Tao B. 2023. Synergistic effect of different adjuvants on herbicide mesotrione. Journal of Maize Sciences, 31(5): 164–172 (in Chinese) [赵旭, 郑生威, 李秋澄, 何冬雪, 李松宇, 陶波. 2023. 不同类型助剂对除草剂硝磺草酮的增效作用研究. 玉米科学, 31(5): 164–172]
- Zhao YC. 2022. Synergistic effect and mechanism of rosin essential oil adjuvant on controlling *Bradyzia cellarum*. Master thesis. Tai'an: Shandong Agricultural University (in Chinese) [赵永超. 2022. 松脂精油助剂对防控韭菜迟眼蕈蚊药剂增效作用及机制研究. 硕士学位论文. 泰安: 山东农业大学]
- Zhu BL, Sun PL, Wang LP, Zhang XL, Wang JX, Liu WT. 2020. Screening of herbicides and synergistic adjuvants for the control of Tausch's goatgrass *Aegilops tauschii*. Journal of Plant Protection, 47(5): 1139–1145 (in Chinese) [朱宝林, 孙鹏雷, 王立鹏, 张晓林, 王金信, 刘伟堂. 2020. 节节麦防除药剂及其增效助剂筛选. 植物保护学报, 47(5): 1139–1145]
- Zhu QG. 2023. Synergistic effect of pesticide assistant keousen pesticide navigation on controlling resistant barnyardgrass in paddy fields. Modern Agricultural Science and Technology, (13): 93–96 (in Chinese) [朱强国. 2023. 农药助剂克欧森·农药导航对防除稻田抗性稗草的增效作用. 现代农业科技, (13): 93–96]

(责任编辑:张俊芳)