

高粱田主要杂草对 HPPD 抑制剂类除草剂 喹草酮的抗性

高兴祥¹ 耿月锋² 李 美^{1*} 李 健¹ 张悦丽¹ 李向海³

(1. 山东省农业科学院植物保护研究所, 山东省植物病毒学重点实验室, 济南 250100;

2. 聊城市农技推广中心, 聊城 252000; 3. 山东万豪肥业有限公司, 商河 251600)

摘要: 为明确高粱田主要杂草对 HPPD 抑制剂类除草剂喹草酮的抗性, 采用整株生物测定法测定马唐 *Digitaria sanguinalis*、稗 *Echinochloa crusgalli*、狗尾草 *Setaria viridis*、野稷 *Panicum miliaceum*、反枝苋 *Amaranthus retroflexus* 和藜 *Chenopodium album* 六种主要杂草的敏感种群对喹草酮的敏感基线, 同时测定全国不同生态区高粱田中这 6 种杂草对喹草酮的抗性水平。结果显示, 喹草酮对野稷、稗、反枝苋和藜的防除效果较好, GR_{50} 介于 12.76~32.72 g (a.i.)/ hm^2 之间, GR_{90} 介于 68.04~193.54 g (a.i.)/ hm^2 之间, 对马唐的防除效果略低, GR_{50} 介于 44.23~56.19 g (a.i.)/ hm^2 之间, GR_{90} 介于 472.26~849.24 g (a.i.)/ hm^2 之间。采自全国不同生态区高粱田的马唐、稗、狗尾草、野稷、反枝苋和藜 6 种杂草所有种群对喹草酮均未产生抗性, 相对抗性指数均在 2.00 以下, 无抗性产生。对烟嘧磺隆产生抗性的马唐种群对 HPPD 抑制剂类除草剂喹草酮和硝磺草酮仍敏感, 未产生抗性。表明喹草酮作为低风险药剂用于高粱田防除杂草, 杂草产生抗药性的速度可能会很慢, 产生抗药性的程度可能会很轻, 产生抗药性概率可能会很低。

关键词: 喹草酮; 高粱; 抗性水平; 杂草; 相对抗性指数

Risk assessment of weed resistance to herbicide quinotrione in sorghum field

Gao Xingxiang¹ Geng Yuefeng² Li Mei^{1*} Li Jian¹ Zhang Yueli¹ Li Xianghai³

(1. Shandong Key Laboratory of Plant Virology, Institute of Plant Protection, Shandong Academy of Agricultural Sciences, Jinan 250100, Shandong Province, China; 2. Liaocheng Agricultural Technology Extension Service Center, Liaocheng 252000, Shandong Province, China; 3. Shandong Wanhao Fertilizer Co., Ltd., Shanghe 251600, Shandong Province, China)

Abstract: In order to assess the risk of resistance to quinotrione, a new type of HPPD herbicide, the sensitivity baselines of six weed sensitive populations, *Digitaria sanguinalis*, *Echinochloa crusgalli*, *Setaria viridis*, *Panicum miliaceum*, *Amaranthus retroflexus* and *Chenopodium album*, to quinotrione were determined in greenhouse, and the resistance levels of weed populations in sorghum field were also determined. The sensitive baseline test showed that *E. crusgalli*, *P. miliaceum*, *A. retroflexus* and *C. album*, were more sensitive to quinotrione with GR_{50} from 12.76 to 32.72 g (a.i.)/ hm^2 and GR_{90} from 68.04 to 193.54 g (a.i.)/ hm^2 , than *D. sanguinalis* with GR_{50} from 44.23 to 56.19 g (a.i.)/ hm^2 and GR_{90} from 472.26 to 849.24 g (a.i.)/ hm^2 . The resistance level test showed that all populations of six weeds collected from sorghum fields in China were not resistant to quinotrione, and the relative resistance index was below 2.00. The populations which were resistant to nicosulfuron were still sensitive to quinotrione and mesot-

rione. The results showed that quinotrione, as a low-risk herbicide, used to control weeds in sorghum fields, the risk of weeds develop resistance to it would be very slow.

Key words: quinotrione; sorghum; resistance level; weed; relative resistance index

高粱是我国重要的旱粮作物,不仅可以直接食用,还可以用来酿造白酒,经济价值极高,具有抗旱、耐盐碱和耐贫瘠等特性(刘静等,2019),主要分布在东北3省和内蒙古自治区,每年产量约280万t(景小兰等,2015)。杂草一直制约着高粱产业的发展,主要种类有野稷 *Panicum miliaceum*、虎尾草 *Rabdosia eriocalys*、马唐 *Digitaria sanguinalis*、狗尾草 *Setaria viridis* 和稗 *Echinochloa crusgalli* 等(高兴祥等,2020),而高粱对除草剂敏感,登记用于高粱田的除草剂较少(刘天朋等,2012),如乙草胺、莠去津及其复配制剂作为土壤封闭除草剂用于高粱田(刘宾等,2018;唐永清等,2004),可防除禾本科杂草的二氯喹啉酸和用于防除阔叶杂草的有氯氟吡氧乙酸和2甲4氯钠等可作为茎叶处理除草剂用于高粱田(丁超等,2017)。二氯喹啉酸仅对稗防除效果好,对广泛分布的马唐、野稷和虎尾草等防除效果差,而氯氟吡氧乙酸和2甲4氯钠只能防除阔叶杂草,不能防除禾本科杂草,因此现有登记的除草剂已不能满足高粱实际生产的需要。

对羟基苯丙酮酸双加氧酶(4-hydroxyphenylpyruvate dioxygenase, HPPD)是一种铁-酪氨酸蛋白,它在有机体中催化植物体内质体醌与生育酚生物合成的起始反应,即催化对羟基苯丙酮酸转化为尿黑酸的过程,同时释放出 CO_2 (Neidig et al., 2004)。HPPD 抑制剂类除草剂上市多年,已在各种作物上大面积应用(Witschel, 2009; Woodyard et al., 2009; 柏亚罗, 2021),国内玉米田中应用的常规药剂硝磺草酮和苯唑草酮等均属于该类药剂,但关于其抗性报道的研究较少。截至目前,全球共519种杂草对不同类除草剂产生抗性,包括270种双子叶杂草和249种单子叶杂草,其中166种杂草对乙酰乳酸合成酶(acetolactate synthetase, ALS)抑制剂类除草剂产生抗性,49种单子叶杂草对乙酰辅酶A羧化酶(acetyl-CoA carboxylase, ACCase)抑制剂类除草剂产生抗性,而对于HPPD抑制剂类除草剂来说,仅有苋属 *Amaranthus* 的长芒苋 *A. palmeri* 和糙果苋 *A. tuberculatus* 两种杂草对HPPD抑制剂类除草剂异恶唑草酮产生抗性(Hausman et al., 2011)以及野生萝卜对吡氟酰草胺产生抗性(Lu et al., 2020),这除了与该类除草剂应用时间较短有关,更重要的是

HPPD抑制剂独特的作用机制及其与现有除草剂无交互抗性等多重优点(刘学贵等,2020)。喹草酮是一种HPPD抑制剂类除草剂(Wang et al., 2014; Lin et al., 2019),由山东先达农化股份有限公司开发并已登记用于高粱田,是目前唯一登记用于高粱田的HPPD抑制剂类除草剂(冯义志等,2019)。高兴祥等(2020)通过温室及田间试验发现,HPPD抑制剂类除草剂可用于高粱田,对高粱安全性高,且对狗尾草、野稷和虎尾草等杂草的防控效果均很好,在高粱田具有很高的推广价值和应用价值。一种新的除草剂能够生存和发展的前提是具有广阔的应用前景和稳定的市场,而靶标杂草对除草剂产生抗性的风险是影响其应用前景的主要因素(付步礼等,2017;李京等,2020),因此评价高粱对HPPD抑制剂类除草剂的抗性风险等级,对于该除草剂的大面积推广应用具有重要意义。

为明确高粱田主要杂草对HPPD抑制剂类除草剂喹草酮的抗性,本研究拟采用整株生物测定法测定高粱田马唐、狗尾草、稗、反枝苋 *A. retroflexus*、野稷和藜 *Chenopodium album* 六种主要杂草的敏感种群对喹草酮的敏感基线和抗性水平及抗烟嘧磺隆的马唐种群对喹草酮的抗性水平,以期喹草酮用于高粱田的大面积推广应用提供理论依据和指导。

1 材料与方法

1.1 材料

供试杂草:杂草马唐、狗尾草、稗、反枝苋和藜5种杂草的10个敏感种群均分别自山东省潍坊市潍北靶场、泰安市泰山、临沂市蒙山、烟台市蓬莱县丘陵地、寿光市沿海滩涂、沂水县沙沟镇丘陵地、平邑县山区、济南市平阴县山区、蒙阴县山区和沂源县沂山的不用药区域采集种子;杂草野稷的5个敏感种群分别自黑龙江省肇源县头台镇、黑龙江省肇州县二井镇、辽宁省鞍山市甘泉镇、内蒙古通辽市开鲁县和吉林省通化市丘陵或者山区的不用药区域采集种子。抗性水平测定的6种杂草种子分别自山东、江苏、内蒙古、湖北和黑龙江省等省用药水平较高的玉米田或高粱田中采集,其中马唐、狗尾草、稗、反枝苋和藜为5个种群,野稷为4个种群。5个马唐种群种子分别采自江苏省南京市高淳区(JS-NJ-GC)、内蒙古

通辽市开鲁县(NMG-TL-KL)、湖北省襄阳市谷城县(HB-XY-GC)、黑龙江省嫩江市九三管理局(HLJ-NJ-JS)和山东省聊城市高唐县(SD-LC-GT);5个狗尾草种群种子分别采自黑龙江省嫩江市九三管理局(HLJ-NJ-JS)、内蒙古通辽市开鲁县(NMG-TL-KL)、江苏省南京市高淳区(JS-NJ-GC)、山东省聊城市高唐县(SD-LC-GT)和湖北省襄阳市谷城县(HB-XY-GC);5个稗种群种子分别采自山东省济南市历城区(SD-JN-LC)、黑龙江省嫩江市九三管理局(HLJ-NJ-JS)、内蒙古通辽市开鲁县(NMG-TL-KL)、湖南省宁乡市白马桥乡(HN-NX-BMQ)和江苏省南京市高淳区(JS-NJ-GC);5个反枝苋种群种子分别采自内蒙古通辽市开鲁县(NMG-TL-KL)、湖南省宁乡市白马桥乡(HN-NX-BMQ)、江苏省南京市高淳区(JS-NJ-GC)、黑龙江省嫩江市九三管理局(HLJ-NJ-JS)和山东省聊城市高唐县(SD-LC-GT);5个藜种群种子分别采自江苏省南京市高淳区(JS-NJ-GC)、山东省聊城市高唐县(SD-LC-GT)、黑龙江省嫩江市九三管理局(HLJ-NJ-JS)、内蒙古通辽市开鲁县(NMG-TL-KL)和山东省济南市历城区(SD-JN-LC);4个野稷种群种子分别采自辽宁省鞍山市甘泉镇(LN-AS-GQ)、内蒙古通辽市开鲁县(NMG-TL-KL)、吉林省通化市金斗镇(JL-TH-JD)和黑龙江省嫩江市九三管理局(HLJ-NJ-JS)。2016年自山东省青岛莱西市(SD-QD-LX)、山东省德州市平原县(SD-DZ-PY)、山东省聊城市高唐县(SD-LC-GT)、山东省临沂市费县(SD-LY-F)、山东省临沂市兰陵县(SD-LY-LL)、河南省许昌市襄城县(HN-XC-XC)、河南省新乡市卫辉市(HN-XX-WH)、河南省开封兰考县(HN-KF-LK)、河南省商丘市永城市(HN-SQ-YC)和河南省鹤壁市善堂镇(HN-HB-ST)玉米田中采集对烟嘧磺隆已产生不同程度抗性的10个马唐种群种子,于本实验室保存。

药剂和仪器:98%喹草酮(quinotrione)原药,山东先达农化股份有限公司;95%烟嘧磺隆(nicosulfuron)原药,浙江天丰生物科学有限公司;97%硝磺草酮(mesotrione)原药,山东潍坊润丰化工股份有限公司;乳化剂EL-12,江苏省海安石油化工厂。ASS-4型自动控制喷洒系统,国家信息化工程技术研究中心。

1.2 方法

1.2.1 6种主要杂草对喹草酮敏感基线的测定

2018年11月—2019年3月在山东省农业科学院植物保护研究所控温控湿的人工气候室内采用整株生物测定法测定未用过除草剂的马唐、稗、狗尾

草、野稷、反枝苋和藜6种靶标杂草各种群对喹草酮的敏感基线,其中马唐、稗、狗尾草、反枝苋和藜为10个种群,野稷为5个种群。2018年11月25日将6种杂草各种群的种子分别播于直径9 cm、高8 cm的塑料盆中,每盆播种20粒,每个种群种4盆,覆土1~2 mm,土壤采自农田表层土,将塑料盆放入装有水的搪瓷盘中,采用底部渗灌的方式浇水,将搪瓷盘置于光周期12 L:12 D、白天温度30℃、晚上温度25℃的人工气候室内培养。2018年12月11日,待禾本科杂草马唐、稗、狗尾草和野稷长至2叶1心期及阔叶杂草反枝苋和藜长出2个真叶时喷药。

喹草酮田间推荐剂量为90~150 g (a.i.)/hm²。称取1.02 g喹草酮原药,加入2滴乳化剂EL-12乳化,再加入2.0 mL N,N-二甲基甲酰胺溶剂,混匀后用吐温水溶液定容至100 mL,制成1%喹草酮母液。用母液配置试验所需的喹草酮6个浓度,即8.89、26.67、80、240、360和720 g (a.i.)/hm²。采用ASS-4型自动控制喷洒系统喷施药剂,喷药量按实际喷药面积1.1 m²喷洒50 mL药液来折算,调试运行速度,将待喷药的塑料盆均匀排在喷雾台上,喷雾压力0.35 MPa,扇形喷头流量800 mL/min,由低量至高量依次喷施,每个种群每个浓度喷4盆,即重复4次,以不施药的处理为空白对照。喷药后晾晒1 d后置于人工气候室中培养,每天浇水1次保持土壤湿润。施药后逐日观察并记录杂草的受害症状,于施药20 d后称量各处理杂草地上部分鲜重,计算鲜重防效。鲜重防效=(空白对照杂草鲜重-处理区杂草鲜重)/空白对照杂草鲜重×100%。应用DPS 9.5统计软件计算抑制杂草生长50%所需的药剂剂量(GR₅₀)、抑制杂草生长90%所需的药剂剂量(GR₉₀)及95%置信区间,建立杂草对喹草酮的敏感基线。

1.2.2 高粱田6种主要杂草对喹草酮抗性水平的测定

于2019年3—5月在山东省农业科学院植物保护研究所控温控湿的人工气候室内测定高粱田6种主要杂草对喹草酮的抗性水平。从全国不同生态区高粱田用药水平较高的农田采集靶标杂草马唐、野稷、狗尾草、稗、反枝苋和藜,测定这6种杂草对喹草酮的抗性水平,其中野稷为4个种群,其他5种杂草均为5个种群,靶标杂草种子的种植和培养、喹草酮施药浓度和方法以及调查方法同1.2.1,计算相对抗性指数,相对抗性指数=抗性种群的GR₅₀/敏感种群的GR₅₀,所有种群中GR₅₀最低的种群为敏感种群,以此为敏感种群计算其他种群的相对抗性指数。抗性水平判定参考高兴祥等(2021)方法并略作改动,

相对抗性指数 ≥ 10.00 ,为高抗水平; $5.00 \leq$ 相对抗性指数 < 10.00 ,为中抗水平; $2.00 \leq$ 相对抗性指数 < 5.00 ,为低抗水平; 相对抗性指数小于2.00,为无抗性水平。

1.2.3 抗烟嘧磺隆马唐对喹草酮抗性水平的测定

杂草马唐为玉米田最主要的杂草之一,已有马唐种群对烟嘧磺隆产生抗性,而硝磺草酮与喹草酮都属于HPPD抑制剂类除草剂。2019年3—5月测定对烟嘧磺隆有不同程度抗性的10个马唐种群对喹草酮和硝磺草酮的抗性水平,靶标杂草种子种植和培养、喹草酮施药浓度和方法以及调查方法同1.2.1,抗性指数的计算方法同1.2.2。烟嘧磺隆浓度分别设置为8.89、26.67、80、240、360和720 g (a.i.)/hm²,

硝磺草酮浓度分别设置为6.67、20、60、180、270和540 g (a.i.)/hm²。

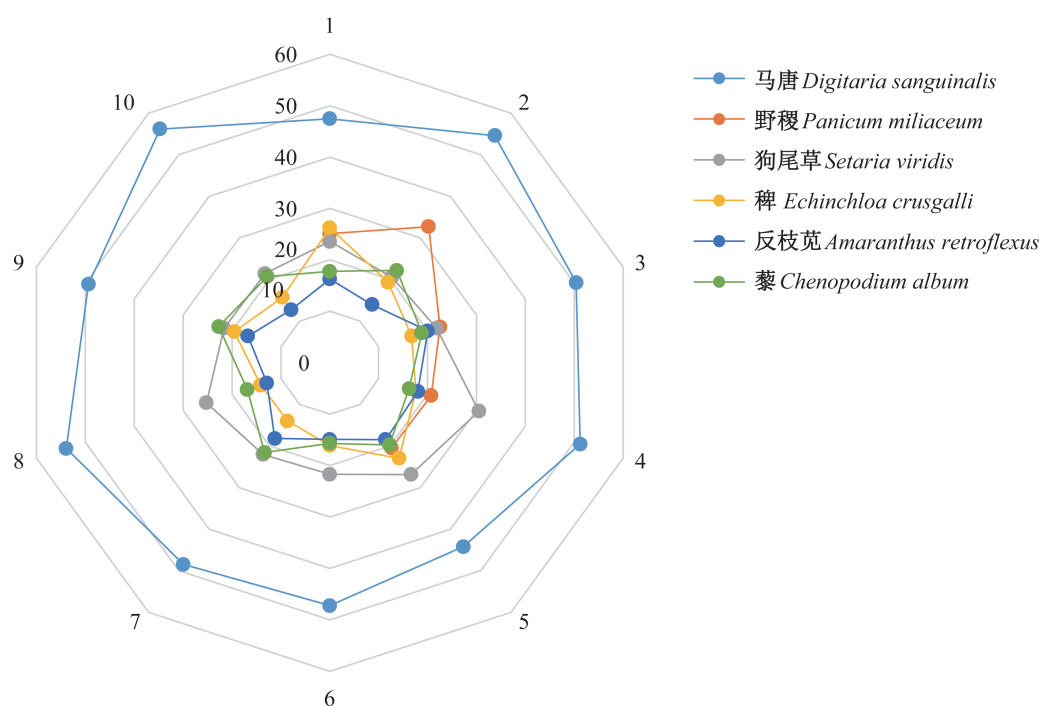
1.3 数据分析

采用WPS 2016和SPSS 13.0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 6种主要杂草对喹草酮的敏感基线

喹草酮对6种主要靶标杂草的防除效果均较好,其中对马唐的防除效果略低于其他5种杂草,同种杂草不同种群对喹草酮的敏感性基本一致(图1)。



雷达轴数值0~60为GR₅₀值, 外围数值1~10为10个种群。

Radar axis values 0~60 are GR₅₀ values, and peripheral values 1~10 correspond to 10 population data.

图1 6种主要杂草对喹草酮敏感基线的雷达图

Fig. 1 Determination of sensitivity baseline to quinotriene in six weeds

喹草酮对马唐的GR₅₀和GR₉₀分别为44.23~56.19 g (a.i.)/hm²和472.26~849.24 g (a.i.)/hm²;喹草酮对野稷的GR₅₀和GR₉₀分别介于20.45~32.72 g (a.i.)/hm²和142.95~159.96 g (a.i.)/hm²之间;喹草酮对狗尾草的GR₅₀和GR₉₀分别介于20.53~30.52 g (a.i.)/hm²和228.72~372.74 g (a.i.)/hm²之间;喹草酮对稗的GR₅₀和GR₉₀分别介于14.01~26.22 g (a.i.)/hm²和91.92~193.54 g (a.i.)/hm²之间;喹草酮对反枝苋的GR₅₀和GR₉₀分别介于12.76~20.02 g (a.i.)/hm²和85.64~121.75 g (a.i.)/hm²之间;喹草酮对藜的GR₅₀和GR₉₀分别

为16.25~22.73 g (a.i.)/hm²和68.04~131.52 g (a.i.)/hm²。虽然同种杂草不同种群敏感性无差异,但采自潍坊市潍北靶场的种群效果相对最好,所以本试验选择山东省潍坊市潍北靶场采集的马唐、狗尾草、稗、反枝苋和藜种群及采自黑龙江省嫩江市九三管理局的野稷种群为敏感种群来进行后续试验。

2.2 高粱田6种主要杂草对喹草酮的抗性水平

喹草酮对采自全国不同生态区高粱田的稗、狗尾草、野稷、反枝苋和藜5种杂草的不同种群的防除效果均较好,对马唐的防除效果略低,但同种杂草的

不同种群对喹草酮的敏感性与敏感种群对喹草酮的敏感性无明显差异。施药后,杂草叶片白化,生长受到抑制,而后逐渐干枯死亡。

喹草酮对5个马唐种群的 GR_{50} 和 GR_{90} 分别为53.91~74.13 g (a.i.)/ hm^2 和668.50~1 043.29 g (a.i.)/ hm^2 ,对敏感种群的 GR_{50} 和 GR_{90} 分别为47.44 g (a.i.)/ hm^2 和695.56 g (a.i.)/ hm^2 ,5个马唐种群对喹草酮的相对抗性指数介于1.14~1.56之间,均小于2.00,未产生抗性;喹草酮对4个野稷种群的 GR_{50} 和 GR_{90} 分别介于24.30~39.16 g (a.i.)/ hm^2 和132.98~242.24 g (a.i.)/ hm^2 之间,对敏感种群的 GR_{50} 和 GR_{90} 分别为25.10 g (a.i.)/ hm^2 和142.95 g (a.i.)/ hm^2 ,4个野稷种群对喹草酮的相对抗性指数介于0.97~1.56之间,均小于2.00,未产生抗性;喹草酮对5个狗尾草种群的 GR_{50} 和 GR_{90} 分别为21.68~33.11 g (a.i.)/ hm^2 和260.79~408.29 g (a.i.)/ hm^2 ,对敏感种群的 GR_{50} 和 GR_{90} 分别为23.60 g (a.i.)/ hm^2 和333.14 g (a.i.)/ hm^2 ,5个狗尾草种群对喹草酮的相

抗性指数介于0.92~1.26之间,均小于2.00,未产生抗性;喹草酮对5个稗种群的 GR_{50} 和 GR_{90} 分别为35.31~65.68 g (a.i.)/ hm^2 和188.75~276.64 g (a.i.)/ hm^2 ,对敏感种群的 GR_{50} 和 GR_{90} 分别为36.22 g (a.i.)/ hm^2 和193.54 g (a.i.)/ hm^2 ,5个稗种群对喹草酮的相对抗性指数介于0.97~1.81之间,均小于2.00,未产生抗性;喹草酮对5个反枝苋种群的 GR_{50} 和 GR_{90} 分别为11.79~20.44 g (a.i.)/ hm^2 和76.25~106.33 g (a.i.)/ hm^2 ,对敏感种群的 GR_{50} 和 GR_{90} 分别为16.27 g (a.i.)/ hm^2 和89.96 g (a.i.)/ hm^2 ,5个反枝苋种群对喹草酮的相对抗性指数介于0.72~1.26之间,均小于2.00,未产生抗性;喹草酮对5个藜种群的 GR_{50} 和 GR_{90} 分别为17.59~33.00 g (a.i.)/ hm^2 和142.44~193.16 g (a.i.)/ hm^2 ,对敏感种群的 GR_{50} 和 GR_{90} 分别为17.77 g (a.i.)/ hm^2 和121.93 g (a.i.)/ hm^2 ,5个藜种群对喹草酮的相对抗性指数介于0.99~1.86之间,均小于2.00,未产生抗性(表1)。

表1 高粱田6种主要杂草对喹草酮的抗性水平

Table 1 Resistance level of six weeds in sorghum field to quinotriane

杂草 Weed	种群 Population	$GR_{50}/$ (g (a.i.)/ hm^2)	$GR_{90}/$ (g (a.i.)/ hm^2)	相对抗性指数 Resistance index	抗性水平 Resistance level
马唐 <i>Digitaria sanguinalis</i>	JS-NJ-GC	74.13	1 043.29	1.56	无No
	NMG-TL-KL	72.81	1 015.98	1.53	无No
	HB-XY-GC	53.91	668.50	1.14	无No
	HLJ-NJ-JS	66.52	831.87	1.40	无No
	SD-LC-GT	65.04	863.42	1.37	无No
野稷 <i>Panicum miliaceum</i>	LN-AS-GQ	24.30	138.15	0.97	无No
	NMG-TL-KL	39.16	242.24	1.56	无No
	JL-TH-JD	38.93	150.83	1.55	无No
	HLJ-NJ-JS	35.63	132.98	1.42	无No
狗尾草 <i>Setaria viridis</i>	HLJ-NJ-JS	29.72	282.17	1.26	无No
	NMG-TL-KL	27.47	304.18	1.16	无No
	JS-NJ-GC	25.32	408.29	1.07	无No
	SD-LC-GT	33.11	355.80	1.40	无No
	HB-XY-GC	21.68	260.79	0.92	无No
稗 <i>Echinochloa crusgalli</i>	SD-JN-LC	52.48	201.71	1.45	无No
	HLJ-NJ-JS	65.68	276.64	1.81	无No
	NMG-TL-KL	39.77	234.84	1.10	无No
	HN-NX-BMQ	36.25	217.48	1.00	无No
	JS-NJ-GC	35.31	188.75	0.97	无No
反枝苋 <i>Amaranthus retroflexus</i>	NMG-TL-KL	11.79	89.24	0.72	无No
	HN-NX-BMQ	13.35	76.25	0.82	无No
	JS-NJ-GC	12.21	84.36	0.75	无No
	HLJ-NJ-JS	15.11	92.66	0.93	无No
藜 <i>Chenopodium album</i>	SD-LC-GT	20.44	106.33	1.26	无No
	JS-NJ-GC	17.59	148.98	0.99	无No
	SD-LC-GT	20.92	158.51	1.18	无No
	HLJ-NJ-JS	27.43	142.44	1.54	无No
	NMG-TL-KL	33.00	145.56	1.86	无No
	SD-JN-LC	25.57	193.16	1.44	无No

2.3 抗烟嘧磺隆的马唐种群对喹草酮的抗性水平

除 SD-LC-GT 种群外,其他 9 个马唐种群对烟嘧磺隆均产生了不同程度的抗性,其中山东省 SD-QD-LX、SD-DZ-PY、SD-LY-F 和 SD-LY-LL 四个马唐种群对烟嘧磺隆的抗性指数分别为 3.46、8.80、16.66 和 8.42,抗性水平分别为低抗、中抗、高抗和中抗;河南省 HN-XC-XC、HN-XX-WH、HN-KF-LK、HN-SQ-YC 和 HN-HB-ST 五个马唐种群对烟嘧磺隆的抗性

指数分别为 3.30、15.62、10.63、3.92 和 4.19,抗性水平分别为低抗、高抗、高抗、低抗和低抗。喹草酮对 10 个马唐种群的活性差异不明显,GR₅₀ 介于 49.00~71.63 g (a.i.)/hm² 之间,10 个马唐种群对喹草酮的抗性指数介于 1.00~1.46 之间,均小于 2.00,未产生抗性(表 2);同样为 HPPD 抑制剂类的硝磺草酮对 10 个种群的活性差异也不大,抗性指数在 1.00~1.90 之间,均小于 2.00,未产生抗性(表 2)。

表 2 10 个马唐种群对喹草酮、烟嘧磺隆和硝磺草酮的抗性水平

Table 2 Resistance level of ten populations of *Digitaria sanguinalis* to quinotrione, nicosulfuron and mesotrione

药剂 Herbicide	种群 Population	回归方程 Regression equation	GR ₅₀ / (g (a.i.)/hm ²)	相对抗性指数 Resistance index	抗性水平 Resistance level
烟嘧磺隆 Nicosulfuron	SD-QD-LX	$y=3.085+1.157x$	45.30	3.46	低抗 Low resistance
	SD-DZ-PY	$y=1.639+1.631x$	115.25	8.80	中抗 Moderate resistance
	SD-LC-GT	$y=3.442+1.395x$	13.09	1.00	无 No
	SD-LY-F	$y=1.853+1.346x$	218.02	16.66	高抗 High resistance
	SD-LY-LL	$y=2.524+1.213x$	110.18	8.42	中抗 Moderate resistance
	HN-XC-XC	$y=3.267+1.060x$	43.17	3.30	低抗 Low resistance
	HN-XX-WH	$y=1.334+1.585x$	204.47	15.62	高抗 High resistance
	HN-KF-LK	$y=2.587+1.126x$	139.09	10.63	高抗 High resistance
	HN-SQ-YC	$y=3.090+1.117x$	51.36	3.92	低抗 Low resistance
	HN-HB-ST	$y=2.883+1.217x$	54.79	4.19	低抗 Low resistance
喹草酮 Quinotrione	SD-QD-LX	$y=2.558+1.338x$	66.95	1.36	无 No
	SD-DZ-PY	$y=2.508+1.343x$	71.63	1.46	无 No
	SD-LC-GT	$y=2.931+1.141x$	65.04	1.32	无 No
	SD-LY-F	$y=3.243+1.028x$	51.20	1.04	无 No
	SD-LY-LL	$y=2.678+1.294x$	62.25	1.26	无 No
	HN-XC-XC	$y=3.131+1.105x$	49.21	1.00	无 No
	HN-XX-WH	$y=2.833+1.214x$	60.99	1.24	无 No
	HN-KF-LK	$y=3.079+1.137x$	49.00	1.00	无 No
	HN-SQ-YC	$y=3.196+1.065x$	49.49	1.01	无 No
	HN-HB-ST	$y=3.488+0.988x$	49.93	1.02	无 No
硝磺草酮 Mesotrione	SD-QD-LX	$y=1.691+2.024x$	33.13	1.39	无 No
	SD-DZ-PY	$y=2.330+1.718x$	35.86	1.51	无 No
	SD-LC-GT	$y=1.516+2.068x$	38.21	1.61	无 No
	SD-LY-F	$y=2.230+1.783x$	35.75	1.50	无 No
	SD-LY-LL	$y=1.655+2.021x$	45.24	1.90	无 No
	HN-XC-XC	$y=2.148+1.968x$	28.15	1.18	无 No
	HN-XX-WH	$y=2.564+1.770x$	23.76	1.00	无 No
	HN-KF-LK	$y=1.843+2.208x$	26.91	1.13	无 No
	HN-SQ-YC	$y=1.695+2.101x$	37.43	1.58	无 No
	HN-HB-ST	$y=2.058+1.933x$	33.26	1.40	无 No

3 讨论

于高粱出苗后对杂草幼苗茎叶进行喷雾处理, HPPD 抑制剂类除草剂啶草酮对禾本科杂草马唐、稗、狗尾草和野稷及阔叶杂草反枝苋和藜的敏感种群均有较好的防除效果, 且对同种杂草的 10 个种群效果相当, 无明显差异。啶草酮对阔叶杂草反枝苋和藜的防除效果较优, 其中对阔叶杂草反枝苋的防除效果与高兴祥等(2020)的研究结果一致; 啶草酮对野稷和稗的防除效果优, 对马唐的防除效果略差, 与高兴祥等(2020)的研究结果一致。针对高粱田中啶草酮对禾本科杂草狗尾草和马唐的防除效果较差, 可考虑与莠去津复配来提高防除效果(高兴祥等, 2020)。本研究结果显示, 采自全国五大生态区高粱田的马唐、狗尾草、稗、反枝苋、藜和野稷 6 种主要杂草不同种群的相对抗性指数均在 2.00 以下, 均未对啶草酮产生抗性, 进一步证实杂草对 HPPD 抑制剂类除草剂不易产生抗性(柏亚罗和石凌波, 2018)。

恶性杂草马唐是黄淮海区域玉米田最严重的杂草, 部分区域的马唐已对玉米田主要除草剂烟嘧磺隆产生明显抗性, 但未对另一种玉米田除草剂硝磺草酮产生抗性。虽然烟嘧磺隆和硝磺草酮这 2 种药剂不能用于高粱田, 但以对烟嘧磺隆已产生抗性的马唐为试材, 研究这些抗烟嘧磺隆的马唐种群对啶草酮的敏感性对明确啶草酮的抗性风险仍具有重要意义。本研究发现在 10 个马唐种群中, 9 个对烟嘧磺隆产生明显抗性, 最高相对抗性指数为 16.66, 但所有马唐种群对啶草酮和硝磺草酮均敏感, 其对啶草酮的 GR_{50} 介于 49.00~71.63 g (a.i.)/hm² 之间, 无抗性产生, 这意味着 HPPD 抑制剂类除草剂啶草酮用于高粱田后, 杂草产生抗药性的速度可能会很慢, 产生抗药性的程度应该会很轻, 产生抗药性的概率应该会很低。

虽然 HPPD 抑制剂类除草剂啶草酮作为低风险药剂用于高粱田防除杂草, 但是为最大程度的减缓抗药性发生, 啶草酮应与不同作用机理的药剂进行混配使用, 高粱田还需采用作物轮作、机械除草、生物防治以及人工除草等综合治理技术措施防除杂草, 这也是下一步计划开展的研究。

参 考 文 献 (References)

Bai YL. 2021. R & D and market profile on HPPD inhibitor herbicides. *World Pesticide*, 43(5): 1-13, 56 (in Chinese) [柏亚罗. 2021.

HPPD 抑制剂类除草剂的产品研发及市场概况. *世界农药*, 43(5): 1-13, 56]

Bai YL, Shi LB. 2018. Global market and development prospect on triazine herbicides. *Modern Agrochemicals*, 17(3): 1-8, 21 (in Chinese) [柏亚罗, 石凌波. 2018. 三嗪类除草剂的全球市场及发展前景. *现代农药*, 17(3): 1-8, 21]

Ding C, Zhang JH, Bai WB, Guo RF, Cao CL. 2017. Effects of commonly used herbicides on physiological, biochemical and yield quality of sorghum. *Crops*, (5): 149-155 (in Chinese) [丁超, 张建华, 白文斌, 郭瑞峰, 曹昌林. 2017. 高粱田常用除草剂对高粱生理生化及产量品质的影响. *作物杂志*, (5): 149-155]

Feng YZ, Zhang AJ, Wang CM, Wang W, Qi XX, Pan JJ, Han JF, Liang L, Liu W. 2019. Analysis of quinotrione residues in sorghum by HPLC-MS/MS. *Agrochemicals*, 58(1): 54-56 (in Chinese) [冯义志, 张爱娟, 王赐明, 王伟, 齐晓雪, 潘金菊, 韩济峰, 梁林, 刘伟. 2019. 高效液相色谱-串联质谱检测高粱中啶草酮残留量. *农药*, 58(1): 54-56]

Fu BL, Xia XY, Li Q, Qiu HY, Tang LD, Xie YX, Zeng DQ, Liu K. 2017. Selection and risk assessment of spinetoram resistance in *Thrips hawaiiensis*. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 54(2): 325-331 (in Chinese) [付步礼, 夏西亚, 李强, 邱海燕, 唐良德, 谢艺贤, 曾东强, 刘奎. 2017. 黄胸蓟马对乙基多杀菌素的抗性选育及抗性风险评估. *应用昆虫学报*, 54(2): 325-331]

Gao XX, Li J, Zhang S, Zhang YL, Fang F, Li M, Bai LY, Zhang SY. 2021. Spread and resistance level of *Aegilops tauschii* to mesosulfuron-methyl in winter wheat field of Shandong Province. *Scientia Agricultura Sinica*, 54(5): 969-979 (in Chinese) [高兴祥, 李健, 张帅, 张悦丽, 房锋, 李美, 柏连阳, 张双应. 2021. 节节麦在山东省冬小麦田的扩散蔓延及对甲基二磺隆抗性测定. *中国农业科学*, 54(5): 969-979]

Gao XX, Zhang JW, Li M, Li J, Fang F. 2020. Effect and safety of the combination of quinotrione with atrazine in sorghum fields. *Journal of Plant Protection*, 47(6): 1370-1376 (in Chinese) [高兴祥, 张纪文, 李美, 李健, 房锋. 2020. 啶草酮与莠去津复配防除杂草效果及对高粱的安全性. *植物保护学报*, 47(6): 1370-1376]

Hausman NE, Singh S, Tranel PJ, Riechers DE, Kaundun SS, Polge ND, Thomas DA, Hager AG. 2011. Resistance to HPPD-inhibiting herbicides in a population of waterhemp (*Amaranthus tuberculatus*) from Illinois, United States. *Pest Management Science*, 67(3): 258-261

Jing XL, Dong LL, Zhang JH, Cao CL, Guo RF, Shi LJ, Peng ZD, Fan N, Li G, Bai WB. 2015. Development status of herbicides in China and its application in sorghum. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 31(25): 182-185 (in Chinese) [景小兰, 董良利, 张建华, 曹昌林, 郭瑞峰, 史丽娟, 彭之东, 范娜, 李光, 白文斌. 2015. 中国除草剂的发展现状及其在高粱上的应用. *中国农学通报*, 31(25): 182-185]

Li J, Ji MS, Liu YC, Wang GX, Sun ZH, Guo HX, Wang WJ. 2020. Risk assessment of resistance to florypyrauxifen-benzyl in *Sagittaria trifolia* L. of Liaoning Province. *Agrochemicals*, 59(7): 541-546 (in Chinese) [李京, 纪明山, 刘煜财, 王广祥, 孙中华, 郭红霞, 王维静. 2020. 辽宁省野慈姑对氯氟吡啶酯抗性风险

- 评估. 农药, 59(7): 541–546]
- Lin HY, Chen X, Chen JN, Wang DW, Wu FX, Lin SY, Zhan CG, Wu JW, Yang WC, Yang GF. 2019. Crystal structure of 4-hydroxyphenylpyruvate dioxygenase in complex with substrate reveals a new starting point for herbicide discovery. *Research*, 2019: 2602414
- Liu B, Wang HL, Guan YN, Yang YB, Qin L, Chen EY, Wang RF, Zhang HW. 2018. Control effects of different herbicides on weeds in sorghum fields. *Shandong Agricultural Sciences*, 50(4): 108–111 (in Chinese) [刘宾, 王海莲, 管延安, 杨延兵, 秦岭, 陈二影, 王润丰, 张华文. 2018. 不同除草剂对高粱地杂草防除效果研究. *山东农业科学*, 50(4): 108–111]
- Liu J, Cao X, Li T, Liang XH, Huang MJ, Zhang RD. 2019. Correlation analysis of main agronomic traits and yield of different sorghum varieties. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 47(20): 29–30, 36 (in Chinese) [刘静, 曹雄, 李婷, 梁晓红, 黄敏佳, 张瑞栋. 2019. 不同高粱品种主要农艺性状及产量的相关分析. *安徽农业科学*, 47(20): 29–30, 36]
- Liu TP, Zhao GL, Ni XL, Chen GM, Hu B, Ding GX. 2012. Weeding effect of different herbicides at different periods of sorghum and effect on the growth of sorghum. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 40(36): 17564–17566 (in Chinese) [刘天朋, 赵甘霖, 倪先林, 陈国民, 胡斌, 丁国祥. 2012. 不同除草剂在不同时期施用的除草效果及对高粱生长的影响. *安徽农业科学*, 40(36): 17564–17566]
- Liu XG, Zhou JY, Huang MY, Yue DD, Lü MC, Sun YQ, Gao PY, Li DQ. 2020. Virtual screening of HPPD lead compounds from natural products based on molecular docking. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 48(24): 95–102 (in Chinese) [刘学贵, 周静瑶, 黄明远, 岳丹丹, 吕梦超, 孙羽隼, 高品一, 李丹琦. 2020. 基于分子对接从天然产物中虚拟筛选 HPPD 先导化合物. *江苏农业科学*, 48(24): 95–102]
- Lu H, Yu Q, Han HP, Owen MJ, Powles SB. 2020. Non-target-site resistance to PDS-inhibiting herbicides in a wild radish (*Raphanus raphanistrum*) population. *Pest Management Science*, 76(6): 2015–2020
- Neidig ML, Kavana M, Moran GR, Solomon EI. 2004. CD and MCD studies of the non-heme ferrous active site in (4-hydroxyphenyl) pyruvate dioxygenase: correlation between oxygen activation in the extradiol and alpha-KG-dependent dioxygenases. *Journal of the American Chemical Society*, 126(14): 4486–4487
- Tang YQ, Wang P, Wang JW, Li ZJ. 2004. Chemical weeding technology of closed herbicides in sorghum field. *Weed Science*, 22(4): 40–41 (in Chinese) [唐永清, 王朴, 王家武, 李征杰. 2004. 高粱苗前化学除草技术. *杂草科学*, 22(4): 40–41]
- Wang DW, Lin HY, Cao RJ, Yang SG, Chen Q, Hao GF, Yang WC, Yang GF. 2014. Synthesis and herbicidal evaluation of triketone-containing quinazoline-2, 4-diones. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 62(49): 11786–11796
- Witschel M. 2009. Design, synthesis and herbicidal activity of new iron chelating motifs for HPPD-inhibitors. *Bioorganic & Medicinal Chemistry*, 17(12): 4221–4229
- Woodyard AJ, Hugie JA, Riechers DE. 2009. Interactions of mesotrione and atrazine in two weed species with different mechanisms for atrazine resistance. *Weed Science*, 57(4): 369–378

(责任编辑:张俊芳)