

专 论 与 综 述

Reviews

吡啶甲酸类除草剂应用研究进展

安 楷, 林雨婷, 陈国奇*

(扬州大学农学院, 江苏省作物遗传生理重点实验室, 江苏省作物栽培生理重点实验室,
江苏省粮食作物现代产业技术协同创新中心, 扬州 225009)

摘要 吡啶甲酸类除草剂属合成激素类, 目前登记使用的有效成分包括氯氟吡啶酸、二氯吡啶酸和氯氟吡啶酸, 分别于 1963 年、1977 年和 2005 年上市, 主要用于阔叶杂草和灌木的茎叶处理防控, 其中氯氟吡啶酸具有土壤封闭活性。吡啶甲酸类除草剂的作用靶标仍未明确, 有可能来自生长素结合蛋白家族。全世界报道的抗吡啶甲酸类除草剂杂草共涉及 7 种 8 个生物型。目前, 我国登记的除草剂品种中共有 13 个复配剂含氯氟吡啶酸和二氯吡啶酸, 1 个含氯氟吡啶酸、氯氟吡啶酸和二氯吡啶酸; 国外登记的吡啶甲酸类除草剂复配剂主要为与其他激素型除草剂、ALS(乙酰乳酸合酶)抑制剂、ACCase(乙酰辅酶 A 羧化酶)抑制剂的组合。该类除草剂仍然具有较好的应用前景, 在主要应用场景下常见杂草对氯氟吡啶酸、二氯吡啶酸、氯氟吡啶酸的敏感性仍需系统研究, 该类除草剂主要靶标杂草种群的抗药性水平也亟须检测。

关键词 氯氟吡啶酸; 二氯吡啶酸; 氯氟吡啶酸; 除草剂抗性; 除草剂复配剂

中图分类号: TQ 457 **文献标识码:** A **DOI:** 10.16688/j.zwbh.2022718

A review on the application of pyridinecarboxylic acid herbicides

AN Kai, LIN Yuting, CHEN Guoqi*

(Agricultural College of Yangzhou University, Jiangsu Key Laboratory of Crop Genetic Physiology, Jiangsu
Key Laboratory of Crop Cultivation Physiology, Jiangsu Food Crop Modern Industrial Technology
Collaborative Innovation Center, Yangzhou 225009, China)

Abstract Pyridinecarboxylic acids are a group of synthetic auxin herbicides. To date, there are three effective ingredients, picloram, clopyralid, and aminopyralid were registered, and introduced to the market in 1963, 1977, and 2005 respectively, mainly for the prevention and control of broadleaf weeds or shrubs. Among them aminopyralid also has soil sealing activity. The accurate action targets of pyridinecarboxylic acid herbicides are still unclear, although the auxin-binding protein family is a possible candidate. Seven weed species with eight biotypes were reported to hold resistance to pyridinecarboxylic acid herbicides all over the world. In China, there are 13 registered herbicide formulations containing picloram and clopyralid, and one formulation containing picloram, aminopyralid, and clopyralid. And pyridinecarboxylic acid herbicides are frequently mixed with other hormone herbicides, ALS (acetolactate synthase) inhibitors or ACCase (acetyl-CoA carboxylase) inhibitors in the herbicides registered abroad. Pyridinecarboxylic acid herbicides still have good market potential for weed management practice worldwide, but the sensitivities of common weeds populations to picloram, clopyralid, and aminopyralid should be systematically tested and resistance level of the main target weed species to these herbicides are also needs to be tested.

Key words picloram; clopyralid; aminopyralid; herbicide resistance; herbicide formulation

合成激素类除草剂具有吸收和传导性好, 杀草谱广、成本低、不易产生抗性等特点, 吡啶类除草

剂是激素型除草剂的重要分支。吡啶类衍生物包括吡啶甲酸(pyridinecarboxylic acid)和吡啶氧基乙

收稿日期: 2022-11-14

修订日期: 2022-12-20

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFD1700105); 江苏省重点研发计划(现代农业)(BE2022338); 江苏省高校重点学术计划开发项目(PAPD)

* 通信作者 E-mail: chenguoqi@yzu.edu.cn

酸(pyridinoxyacetic acid),从结构性质上分析,用吡啶环代替苯环可以带来更好的内吸性,从而大幅提高生物活性^[1],在实际生产中有很高的应用价值。吡啶甲酸类除草剂(图1)主要包括氨氯吡啶酸(picloram, 5-amino-3,4,6-trichloropicolinic acid),二氯吡啶酸(clopyralid, 3,6-dichloropicolinic acid)和氯氨吡啶酸(aminopyralid, 5-amino-3,6-dichloropicolinic acid)。氨氯吡啶酸于1963年由道化学公司研制,具有较强的内吸活性和较长的持效性,但其较长的持效性容易影响下茬作物的正常种植,导致氨氯吡啶酸的应用受限^[2]。氯氨吡啶酸于2005年由美国陶氏益农公司研制,具有高效性和选择性,易被植物的茎、根快速吸收,引起植物生长停滞并导

致死亡^[3-4]。二氯吡啶酸于1977年由道化学公司研制,其在植物体内传导时具有较好的持久性,二氯吡啶酸的除草机制主要是刺激植物产生过量的核糖核苷酸,最终破坏维管束组织,导致植物死亡^[5]。吡啶氧基乙酸类代表性除草剂包括三氯吡氧乙酸(triclopyr, 3,4,6-trichloro-2-pyridyloxyacetic acid)和氯氟吡氧乙酸(fluroxypyr, 4-amino-3,5-dichloro-6-fluoro-2-pyridyloxyacetic acid),分别于1975年和1983年上市;这类除草剂中的最新代表是两种吡啶甲酸酯类活性成分,即2014年上市,2015年引入我国的氟氯吡啶酯(halauxifen-methyl)和2016年上市,2018年引入我国的氯氟吡啶酯(florpyrauxifen-benzyl)^[6-7]。

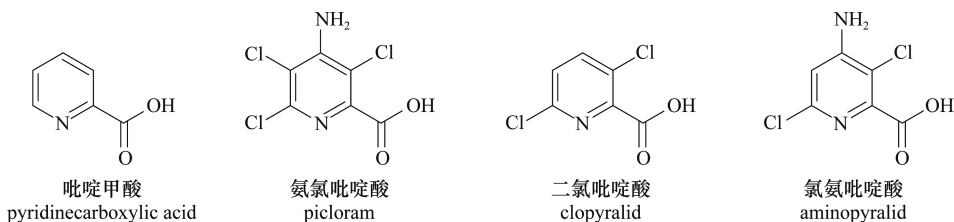


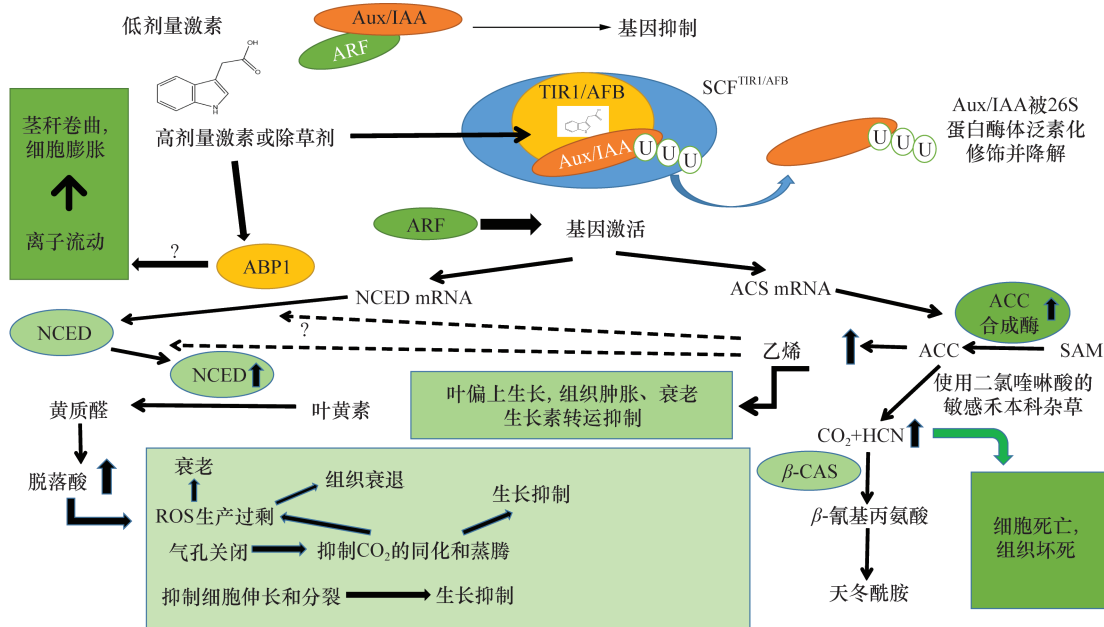
图1 吡啶甲酸、氨氯吡啶酸、二氯吡啶酸、氯氨吡啶酸结构^[8]

Fig. 1 Structures of pyridinecarboxylic acid, picloram, clopyralid and aminopyralid^[8]

1 吡啶甲酸类除草剂的作用机理

作为激素类除草剂中的一类,吡啶甲酸类除草剂的作用靶标仍然未明确^[9]。研究表明,抗氨氯吡啶酸与二氯吡啶酸的基因分别由不同的单基因控制,且基因所处位置紧密相连^[10]。如图2所示,激素类除草剂分子被植物体内的生长素受体 TIR1/AFB (transport inhibitor response 1/auxin signaling F-box)识别,诱导 TIR1/AFB 与 IAA 及 Aux/IAA 转录抑制蛋白(transcriptional repressor proteins)结合,并进一步与 SCF(E3 泛素连接酶复合体,含 Skp1, cullin, F-box 3 个亚基)结合,形成 SCF^{TIR1/AFB}-生长素-Aux/IAA 复合体,使 Aux/IAA 转录抑制蛋白被泛素-蛋白酶体系统(ubiquitin-proteasome pathway)降解。Aux/IAA 转录抑制蛋白缺失导致转录激活蛋白(auxin response factors, ARFs)抑制状态取消,促进下游 9-顺式环氧类胡萝卜素双加氧酶(9-cis-epoxycarotenoid dioxygenase, NCED)和 1-氨基环丙烷羧酸合成酶(1-aminocyclopropane-1-carboxylate synthase, ACS)的 mRNA 转录。过量的 ACS mRNA 促使植物茎组织中 ACS

过表达,导致过量的 S-腺苷甲硫氨酸(S-adenosyl-methionine, SAM)转化为乙烯,过量乙烯致使叶片向下卷曲、组织膨胀并抑制激素向外转运。同时,积累的激素导致茎水平方向卷曲。细胞膨胀过程中伴随快速的激素诱导的离子流现象,推测是由膜结合生长素结合蛋白 1(membrane-bound auxin-binding protein 1, ABP1)介导。过量转录的 NCED mRNA 促使 NCED 过表达,NCED 催化叶黄素裂解导致黄质醛(xanthoxin)和 ABA 的合成增加。同时乙烯刺激 NCED 转录后活化,导致持续地合成 ABA;ABA 在植株内扩散并介导气孔关闭,进而限制蒸腾作用和 C 同化,并伴随活性氧自由基(reactive oxygen species, ROS)过量积累。并且,ABA 直接抑制细胞分裂和生长,并与乙烯一起推动叶片衰老,表现为叶绿体、膜结构和维管完整性被破坏,最终导致生长被抑制、组织坏死及植株枯亡。在敏感的禾本科植物中氰化物积累导致的植物毒性是二氯喹啉酸刺激乙烯生物合成中的副产品。许多研究表明,杂草对激素类除草剂吸收和转运效率下降,以及抑制除草剂处理后乙烯生物合成均可导致抗药性^[11-12]。



Aux/IAA: ARF基因的转录抑制因子; TIR1/AFB: 生长素受体; ARF: 激素响应因子; SCF: 泛素蛋白连接酶复合体; U: 泛素化修饰; ABP1: 膜结合生长素结合蛋白1; NCED: 9-顺式环氧类胡萝卜素双加氧酶; ACC: 1-氨基环丙烷羧酸; SAM: S-腺苷甲硫氨酸; β -CAS: β -氰基丙氨酸合酶。Aux/IAA: Transcriptional repressor of ARF; TIR1/AFB: Auxin receptors; ARF: Auxin response factor; SCF: Skp1-cullin-F-box protein; U: Ubiquitination; ABP1: Membrane-bound auxin-binding protein 1; NCED: 9-*cis*-epoxycarotenoid dioxygenase; ACC: 1-aminocyclopropane-1-carboxylic acid; SAM: S-adenosylmethionine; β -CAS: β -cyanoalanine synthase.

图 2 激素类除草剂可能的作用机理(引自参考文献[6])

Fig. 2 Possible mechanisms of auxin herbicides (Cited from reference [6])

不同的激素类除草剂活性成分的作用靶标和作用机制不尽相同^[13]。有研究发现抗氨氯吡啶酸杂草对三氯吡氧乙酸和 2,4-滴无交互抗性,但对二氯吡啶酸、氯氟吡氧乙酸、麦草畏有交互抗性^[14]。另一份研究发现,抗氨氯吡啶酸的长刺矢车菊 *Centaurea solstitialis* 对三氯吡氧乙酸和 2,4-滴有交互抗性,但对麦草畏依旧敏感^[15]。Kathare 等^[9]鉴定到一个拟南芥 *Arabidopsis thaliana* 株系高抗氨氯吡啶酸,但对其他供试激素类除草剂均敏感;Walsh 等^[16]的研究也发现拟南芥中存在对不同激素分子具有特异性的信号通路。De Queiroz 等^[17]对一个抗 2,4-滴的苏门白酒草 *Erigeron sumatrensis* 种群进行检测,发现其对麦草畏、氯氟吡啶酯、氯氟吡氧乙酸、氟氯吡啶酯、三氯吡氧乙酸、氨氯吡啶酸等激素类除草剂均敏感。

2 吡啶甲酸类除草剂的登记应用场景

氨氯吡啶酸在我国登记于多种作物田、非耕地、森林及草坪,治理一年生阔叶杂草及小型灌木,如刺儿菜 *Cirsium arvense* var. *integrifolium*、密花香薷 *Elsholtzia densa*、苣荬菜 *Sonchus wightianus*、藜

Chenopodium album、猪殃殃 *Galium spurium*、紫茎泽兰 *Ageratina adenophora*、飞机草 *Chromolaena odorata*、三叶鬼针草 *Bidens pilosa* 等。主要剂型有水剂和可溶液剂。杨卫东等^[18]的研究表明,24%氨氯吡啶酸水剂有效成分用量 1 200~3 600 g/hm²,对林地一年生及多年生阔叶杂草防效可达 90%以上,对灌木防效达 70%以上。同时,在花器官发育期施用 25 g/hm² 的氨氯吡啶酸水剂可以影响菊科杂草紫茎泽兰有性生殖,从而抑制其来生长,且对三叶鬼针草具有一定的土壤封闭活性^[19-20]。氯氨吡啶酸在我国登记于禾本科草原牧场治理恶性阔叶类杂草,主要包括无鞘橐吾 *Vickifunkia narynensis*、天山假狼毒 *Diarrhron tianschanicum*、准噶尔乌头 *Aconitum soongaricum*、黄花棘豆 *Oxytropis ochrocephala*、白喉乌头 *Aconitum leucostomum* 等,其可有效提高禾本科牧草的产量及繁殖效率^[21-25]。其主要应用剂型为水剂、可溶液剂。此外,研究发现,氯氨吡啶酸也可用于降低草坪草制种田中禾本科杂草多花黑麦草 *Lolium multiflorum* 结实种子粒重、活力及萌发速率,并对毛茛茄 *Solanum viarum* 具有土壤封闭活性^[26-27]。二氯吡啶酸在我国登记于小麦、

水稻、玉米及油菜田等治理阔叶杂草且对后茬作物比较安全^[28-32],主要剂型为水剂、可溶粒剂、可溶液剂及可溶粉剂。二氯吡啶酸可有效控制油菜田及胡麻田中刺儿菜、玉米田中苣荬菜、草地风毛菊 *Saussurea amara*、丝路蓟 *Cirsium arvense*、藜、大巢菜 *Vicia sativa*、稻槎菜 *Lapsanastrum apogonoides* 等阔叶杂草^[28-29, 33-36]。

通过查阅农药信息网数据(<http://www.chinapesticide.org.cn/hysj/index.jhtml?from=singlemessage>),我国登记含氯吡啶酸的复配除草剂品种主要为:氯吡啶酸+二氯吡啶酸(PD20180283)、氯吡啶酸+氯吡啶酸+二氯吡啶酸(EX20220114)、氯吡啶酸+二氯吡啶酸+草除灵(PD20212603)、氯吡啶酸+二氯吡啶酸+烯草酮(PD20200969)、氯吡啶酸+氯氟吡氧乙酸异辛酯(PD20150255)、氯吡啶酸+2,4-滴(PD20150686)。含氯吡啶酸复配除草剂品种主要为:氯吡啶酸+氯吡啶酸+二氯吡啶酸(EX20220114)。二氯吡啶酸复配除草剂品种主要为氯吡啶酸+二氯吡啶酸(PD20183258)、氯吡啶酸+二氯吡啶酸+草除灵(PD20212603)、氯吡啶酸+二氯吡啶酸+烯草酮(PD20183820)、二氯吡啶酸+烟嘧磺隆+莠去津(PD20182761)、二氯吡啶酸+2,4-滴(PD20131085)、二氯吡啶酸+烯草酮(PD20132535)、二氯吡啶酸+烯草酮+草除灵(PD20140604)、二氯吡啶酸+乙氧氟草醚(PD20180513)、二氯吡啶酸+硝磺草酮(PD20172702)。

通过查阅美国国家环境保护局数据库(<https://www.epa.gov/ingredients-used-pesticide-products/registration-review-pyridine-and-pyrimidine-herbicides>)和科迪华公司美国官网(<https://www.corteva.us/content/corteva/na/us/en/homepage.html>),含氯吡啶酸的复配登记除草剂类型主要包括:氯吡啶酸+2,4-滴、氯吡啶酸+氯氟吡氧乙酸、三氯吡氧乙酸+氯吡啶酸+氯吡啶酸。含二氯吡啶酸的复配登记除草剂类型主要包括:啶嘧磺草胺+二氯吡啶酸、啶嘧磺草胺+二氯吡啶酸+乙草胺、氟氯吡啶酯+二氯吡啶酸+氯氟吡氧乙酸、二氯吡啶酸+2,4-滴、二氯吡啶酸+2甲4氯、二氯吡啶酸+三氯吡氧乙酸、二氯吡啶酸+氯氟吡氧乙酸+啶嘧磺草胺。含氯吡啶酸的复配登记除草剂类型主要包

括:氯吡啶酸+三氯吡氧乙酸、氯吡啶酸+甲磺隆、氯吡啶酸+2,4-滴、三氯吡氧乙酸+氯吡啶酸+氯吡啶酸、氯氟吡啶酯+氯吡啶酸。

因此,目前生产中使用的吡啶甲酸类除草剂复配剂以与其他激素型除草剂复配产品为主,并有与ALS(乙酰乳酸合酶)抑制剂、ACCase(乙酰辅酶A羧化酶)抑制剂的混配剂型。

3 吡啶甲酸类除草剂在抗性杂草治理中的应用研究进展

Fernandez 等^[14]的研究发现,在抗草甘膦银胶菊 *Parthenium hysterophorus* 种群的治理中,氯吡啶酸对银胶菊的控制率可达 100%;二氯吡啶酸的控制率为 89%~98%。Patton 等^[37]发现二氯吡啶酸可以有效防控对 2,4-滴存在抗性的长叶车前 *Plantago lanceolata* 种群,证明 2,4-滴与二氯吡啶酸之间无交互抗性。Aves 等^[38]的研究发现,二氯吡啶酸可用于治理对草甘膦、氯磺隆、甲磺隆等除草剂具有多抗性的野塘蒿 *Erigeron bonariensis* 种群。Aulakh 等^[39]的研究发现二氯吡啶酸可用于治理对草甘膦及 ALS 类除草剂具有多抗性的长芒苋 *Amaranthus palmeri*。吡啶甲酸类除草剂也可用于抗 2,4-滴、麦草畏、草甘膦等除草剂的杂草种群的治理,以及通过切割乔木形成层施药来对乔木进行防控^[11, 14, 29, 40-44]。

4 杂草对吡啶甲酸类除草剂抗药性情况

到目前为止,国际抗性杂草数据库(<http://weedscience.org/>)中记录的抗吡啶甲酸类除草剂杂草共 7 种 8 个生物型(表 1);其中抗氯吡啶酸杂草共 3 种 3 个生物型,抗二氯吡啶酸杂草共 3 种 3 个生物型,抗氯吡啶酸杂草共 5 种 6 个生物型。截至 2022 年 11 月 11 日氯吡啶酸、二氯吡啶酸、氯吡啶酸分别已上市使用了 59 年、45 年、17 年,因此,这 3 种除草剂的抗药性风险低。

通过检索 WOS 数据库(<https://www.webof-science.com/wos/alldb/basic-search>),发现仅有 4 篇研究论文报道了对吡啶甲酸类除草剂存在交互抗性的杂草,分别为抗氯吡啶酸的长刺矢车菊对二氯吡啶酸存在交互抗性^[45],抗麦草畏的藜对氯吡啶酸、氯吡啶酸和二氯吡啶酸具有交互抗性^[46];

抗 2,4-滴的蔓菁 *Brassica rapa* 对二氯吡啶酸、麦草畏、氨氯吡啶酸存在交互抗性;抗二氯吡啶酸的斑点矢车菊 *Centaurea stoebe* 种群对氨氯吡啶酸存在较强的交互抗性(27.85)^[47],对氯氨吡啶酸存在较弱

的交互抗性(2.25)^[48]。而中文研究论文数据库中 中国知网(<https://epub.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=CJFQ>)中未检索到关于这 3 种除草剂抗药性杂草的研究文献。

表 1 国际抗性杂草数据库中记录的抗吡啶甲酸类除草剂杂草¹⁾

Table 1 Pyridinecarboxylic acid-resistant weeds recorded in the international herbicide-resistant weed database						
杂草 Weed	年份 Year	国家 Country	杂草所抗的除草剂 Herbicide resistant by weeds	除草剂类型 Herbicide type	生境 Habitat	
直穗苋 <i>Amaranthus powellii</i>	2019	加拿大	氯氨吡啶酸、2,4-滴丙酸、咪唑乙烟酸、2甲4氯、2甲4氯丙酸	激素类、ALS抑制剂	大豆田	
虞美人 <i>Papaver rhoeas</i>	2015	法国	2,4-滴、氯氨吡啶酸	激素类	小麦田	
	2016	法国	甲磺隆、2甲4氯、2,4-滴、甲基二磺隆、氯氨吡啶酸、甲基磺隆钠盐	激素类、ALS抑制剂	谷类作物田	
藜 <i>Chenopodium album</i>	2005	新西兰	麦草畏、二氯吡啶酸、氯氨吡啶酸	激素类	玉米田	
长芒苋 <i>Amaranthus tuberculatus</i>	2009	美国	咪唑乙烟酸、莠去津、2,4-滴、氨氯吡啶酸、氯氨吡啶酸、氯嘧磺隆	激素类、ALS抑制剂	牧场	
斑点矢车菊 <i>Centaurea stoebe</i> ssp. <i>micranthos</i>	2013	加拿大	二氯吡啶酸、氯氨吡啶酸	激素类	草场	
<i>Soliva sessilis</i>	1999	新西兰	氨氯吡啶酸、二氯吡啶酸、三氯吡氧乙酸	激素类	高尔夫草坪	
新疆白芥 <i>Rhamphospermum arvense</i>	1990	加拿大	麦草畏、2甲4氯、2,4-滴、2,4-滴丙酸、2甲4氯丙酸、氨氯吡啶酸	激素类	小麦、春大麦田	

1) 数据来源: <https://weedsscience.org/Pages/filter.aspx> (查阅日期:2022-11-11)。
Date source: <https://weedsscience.org/Pages/filter.aspx> (Available date: 2022-11-11).

由于氨氯吡啶酸、二氯吡啶酸、氯氨吡啶酸的分子靶标仍然不明,相关的杂草抗性机理无法准确阐明^[9]。Horsman 等^[49]研究转基因抗氨氯吡啶酸烟草 *Nicotiana tabacum* 发现,与野生型烟草相比抗性烟草吸收氨氯吡啶酸后药剂在处理叶片上较多,但在顶端分生组织中较少;然而二氯吡啶酸在抗性烟草的叶片和顶端分生组织中的积累量与野生型烟草无显著差异;由此可见氨氯吡啶酸和二氯吡啶酸虽然结构相似,但其在植物体内的转运途径存在差异。Ghanizadeh 等^[46]研究发现对麦草畏存在抗性的黎种群对二氯吡啶酸和氯氨吡啶酸存在交互抗性,但其对 2,4-滴和 2-甲-4-氯丙酸不存在交叉抗性。Valenzuela-Valenzuela 等^[50]发现华盛顿州非耕地牧场中的长刺矢车菊具有氨氯吡啶酸和二氯吡啶酸交互抗性背景,对氨氯吡啶酸抗性种群(R)和氨氯吡啶酸易感种群(S)的研究显示,2 h 内 R 种群与 S 种群对二氯吡啶酸的吸收量和转化量无显著差异,96 h 后 R 种群比 S 种群代谢更多的二氯吡啶酸,这表明除草剂代谢可能在交互抗性中起作用。此外,有报道高抗二氯吡啶酸的 *Soliva sessilis* 对麦草畏具有中抗性,但不抗氨氯吡啶酸^[51]。

5 总结与展望

综上所述,吡啶甲酸类除草剂广泛用于各类作物或非耕地场景防控阔叶杂草或灌木,氨氯吡啶酸、二氯吡啶酸、氯氨吡啶酸尽管已在全世界广泛应用了 40 多年,全世界关于抗吡啶甲酸类除草剂杂草的报道相对稀少。因此,该类除草剂仍然具有较好的应用前景,我国登记的吡啶甲酸类除草剂种类目前仍较少,相关的复配应用研究仍可拓展。

3 种吡啶甲酸类除草剂氨氯吡啶酸、二氯吡啶酸、氯氨吡啶酸在主要应用场景下对常见杂草的敏感性仍需系统研究检测,以便于更好地开发实用复配剂型。另一方面,尽管我国尚未有关于抗吡啶甲酸类除草剂杂草种群的报道,然而生产中该类除草剂药效欠佳的情况屡见不鲜,系统检测该类除草剂主要靶标杂草种群的抗药性也亟须开展。

参考文献

[1] 尚尔才,刘长令,杜英娟. 吡啶类农药的研究进展(下)[J]. 化工进展,1996(6): 24-26.
[2] 许明. 除草剂部分品种世界市场表现[J]. 农药,2013, 52 (11): 826-828.

- [3] 丁骞. 几种氯代吡啶类除草剂的应用现状[J]. 安徽科技, 2012(10): 29-30.
- [4] 檀思佳. 氯氨吡啶酸分子印迹聚合物的制备及应用[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2018.
- [5] 王晓菁, 牛艳, 赵子丹, 等. 二氯吡啶酸在油菜和土壤中的消解动态研究[J]. 河南农业科学, 2013, 42(12): 94-97.
- [6] GROSSMANN K. Auxin herbicides: current status of mechanism and mode of action [J]. Pest Management Science, 2010, 66(2): 113-120.
- [7] 叶萱. 杂草对合成生长素类除草剂的抗性[J]. 世界农药, 2018, 40(6): 1-8.
- [8] EPP J B, ALEXANDER A L, BALKO T W, et al. The discovery of Arylex™ active and Rinskor™ active: Two novel auxin herbicides [J]. Bioorganic & Medicinal Chemistry, 2016, 24(3): 362-371.
- [9] KATHARE P K, DHARMASIRI S, VINCILL E D, et al. *Arabidopsis* PIC30 encodes a major facilitator superfamily transporter responsible for the uptake of picolinate herbicides [J]. Plant Journal, 2020, 102(1): 18-33.
- [10] SABBA R P, RAY I M, LOWND S N, et al. Inheritance of resistance to clopyralid and picloram in yellow starthistle (*Centaurea solstitialis* L.) is controlled by a single nuclear recessive gene [J]. Journal of Heredity, 2003, 94(6): 523-527.
- [11] REY-CABALLERO J, MENENDEZ J, GINE-BORDONABA J, et al. Unravelling the resistance mechanisms to 2,4-D (2,4-dichlorophenoxyacetic acid) in corn poppy (*Papaver rhoeas*) [J]. Pesticide Biochemistry and Physiology, 2016, 133: 67-72.
- [12] GAO Yuan, LI Jun, PAN Xukun, et al. Quinclorac resistance induced by the suppression of the expression of 1-aminocyclopropane-1-carboxylic acid (ACC) synthase and ACC oxidase genes in *Echinochloa crus-galli* var. *zelayensis* [J]. Pesticide Biochemistry and Physiology, 2018, 146: 25-32.
- [13] LUDWIG-MUELLER J, RATTUNDE R, ROESSLER S, et al. Two auxinic herbicides affect *Brassica napus* plant hormone levels and induce molecular changes in transcription [J/OL]. Biomolecules, 2021, 11(8): 1153. DOI: 10.3390/biom11081153.
- [14] FERNANDEZ J V, ODERO D C, MACDONALD G E, et al. Confirmation, characterization, and management of glyphosate-resistant ragweed parthenium (*Parthenium hysterophorus* L.) in the everglades agricultural area of south Florida [J]. Weed Technology, 2015, 29(2): 233-242.
- [15] MILLER T W, SHINN S L, THILL D C. Cross-resistance in and chemical control of auxinic herbicide-resistant yellow starthistle (*Centaurea solstitialis*) [J]. Weed Technology, 2001, 15(2): 293-299.
- [16] WALSH T A, NEAL R, MERLO A O, et al. Mutations in an auxin receptor homolog AFB5 and in SGT1b confer resistance to synthetic picolinate auxins and not to 2,4-dichlorophenoxyacetic acid or indole-3-acetic acid in *Arabidopsis* [J]. Plant Physiology, 2006, 142(2): 542-552.
- [17] DE QUEIROZ A R S, DELATORRE C A, LUCIO F R, et al. Rapid necrosis: a novel plant resistance mechanism to 2,4-D [J]. Weed Science, 2020, 68(1): 6-18.
- [18] 杨卫东, 曲俊山, 尹国龙, 等. 24%氯氨吡啶酸水剂防治林地阔叶杂草试验[J]. 森林工程, 2006(3): 8-11.
- [19] 田学军, 李珣, 沈云玫, 等. 氯氨吡啶酸对三叶鬼针草种子活力和幼苗抗氧化酶活性的影响[J]. 农药, 2014, 53(7): 485-486.
- [20] 李小艳. 氯氨吡啶酸对紫茎泽兰有性繁殖的影响[J]. 贵州农业科学, 2015, 43(4): 95-99.
- [21] 李宏, 陈卫民, 王华, 等. 四种吡啶类除草剂防除白喉乌头的筛选试验[J]. 现代农药, 2010, 9(3): 48-50.
- [22] 陈卫民, 王杰花, 荆琚. 氯氨吡啶类除草剂不同浓度对草原毒草-准噶尔乌头防效及安全性评价[C]//第十二届全国杂草科学大会论文摘要集, 2015: 109-115.
- [23] 陈卫民, 徐林林, 吴加军, 等. 2种吡啶类除草剂对天山假狼毒群落影响和禾本科牧草产草量及安全性评价[J]. 杂草学报, 2016, 34(1): 43-46.
- [24] 刘艳丽, 董乙强, 安沙舟, 等. 氯氨吡啶酸防除纳里橐吾的效果及对草地植被特征的影响[J]. 中国草食动物科学, 2022, 42(4): 37-41.
- [25] 陈超, 王庆海, 武菊英, 等. 21%氯氨吡啶酸水剂对不同生育期黄花棘豆的防控效果及对草地植被的影响[J]. 植物保护, 2016, 42(6): 219-224.
- [26] BOBADILLA L K, HULTING A G, CURTIS D W, et al. Application of synthetic auxin herbicides to suppress seed viability of Italian ryegrass (*Lolium perenne* ssp. *multiflorum*) in tall fescue seed production [J]. Weed Technology, 2020, 34(4): 489-497.
- [27] FERRELL J A, MULLAHEY J J, LANGE LAND K A, et al. Control of tropical soda apple (*Solanum viarum*) with aminopyralid [J]. Weed Technology, 2006, 20(2): 453-457.
- [28] SOLTANI N, DIEBOLD S, ROBINSON D E, et al. Sweet corn hybrid sensitivity to clopyralid [J]. Weed Technology, 2005, 19(2): 342-345.
- [29] SPRING J F, THORNE M E, BURKE I C, et al. Rush skeletonweed (*Chondrilla juncea*) control in pacific northwest winter wheat [J]. Weed Technology, 2018, 32(4): 360-363.
- [30] VETTAKKORUMAKANKAV N N, DESHPANDE S, WALSH T A, et al. Physiological effect of clopyralid on corn as determined by bioassay and light-scattering spectroscopy [J]. Weed Science, 2002, 50(6): 713-720.
- [31] MILLER B R, LYM R G. Using the rosette technique for Canada thistle (*Cirsium arvense*) control in row crops [J]. Weed Technology, 1998, 12(4): 699-706.
- [32] 郭良芝, 郭青云, 张兴. 二氯吡啶酸防除春油菜田刺儿菜和苣荬菜的效果[J]. 杂草科学, 2009(1): 53-54.
- [33] 李玮. 30%二氯吡啶酸水剂对免耕甘蓝型油菜田杂草刺儿菜的防除效果研究[J]. 现代农业科技, 2014(16): 113.

- [58] 张辉元, 马明, 董铁, 等. 胡瓜钝绥螨对苹果全爪螨的生物防治效果[J]. 应用生态学报, 2010, 21(1): 191–196.
- [59] 王宇人, 李亚新, 张乃鑫, 等. 应用伪钝绥螨防治苹果全爪螨的试验[J]. 生物防治通报, 1990, 6(3): 102–106.
- [60] 吴元善, 柳玉莲, 张领耘. 应用伪钝绥螨防治苹果全爪螨初报[J]. 生物防治通报, 1991, 7(4): 160–162.
- [61] 张帆, 唐斌, 陶淑霞, 等. 中国植绥螨规模化饲养及保护利用研究进展[J]. 昆虫知识, 2005(2): 139–143.
- [62] 张守友, 曹信稳, 韩志强, 等. 东方钝绥螨对苹果园两种叶螨自然控制作用研究[J]. 昆虫天敌, 1992, 14(1): 21–24.
- [63] 张丹, 林文忠, 刘巍巍, 等. 巴氏新小绥螨对苹果树苹果全爪螨的生物防治效果[J]. 中国果树, 2021(7): 62–64.
- [64] 李锋, 王春良, 马建国, 等. 巴氏钝绥螨控制苹果全爪螨技术初报[J]. 中国果树, 2010(3): 46–47.
- [65] SILVA D E, DO NASCIMENTO J M, DA SILVA R T L, et al. Impact of vineyard agrochemicals against *Panonychus ulmi* (Acari: Tetranychidae) and its natural enemy, *Neoseiulus californicus* (Acari: Phytoseiidae) in Brazil [J]. Crop Protection, 2019, 123: 5–11.
- [66] 黄婕, 王蔓, 门兴元, 等. 加州新小绥螨对苹果全爪螨各螨态的捕食作用[J]. 植物保护学报, 2020, 47(1): 46–52.
- [67] CROFT B A, MACRAE I V. Biological control of apple mites by mixed populations of *Metaseiulus occidentalis* (Nesbitt) and *Typhlodromus pyri* Scheuten (Acari: Phytoseiidae) [J]. Environmental Entomology, 1992, 21(1): 202–209.
- (责任编辑: 杨明丽)
- ~~~~~
- (上接 14 页)
- [34] 王建平, 张玉慧, 赵志英, 等. 75%二氯吡啶酸可溶性粉剂防除春玉米田阔叶杂草效果研究[J]. 现代农业科技, 2015(20): 99.
- [35] 张炜, 陆俊武, 曹秀霞, 等. 二氯吡啶酸防除胡麻田刺儿菜的药效及安全性评价[J]. 植物保护, 2018, 44(3): 220–224.
- [36] 柳建伟, 王宗胜, 史广亮, 等. 几种除草剂对当茬玉米生长发育的影响[J]. 中国农学通报, 2020, 36(15): 142–146.
- [37] PATTON A J, WEISENBERGER D V, SCHORTGEN G P. 2,4-D-resistant buckhorn plantain (*Plantago lanceolata*) in managed turf [J]. Weed Technology, 2018, 32(2): 182–189.
- [38] AVES C, BROSTER J, WESTON L, et al. *Conyza bonariensis* (flax-leaf fleabane) resistant to both glyphosate and ALS inhibiting herbicides in north-eastern Victoria [J]. Crop & Pasture Science, 2020, 71(9): 864–871.
- [39] AULAKH J S, CHAHAL P S, KUMAR V, et al. Multiple herbicide-resistant palmer amaranth (*Amaranthus palmeri*) in Connecticut: confirmation and response to POST herbicides [J]. Weed Technology, 2021, 35(3): 457–463.
- [40] ENLOE S F, LAUER D K. Seasonal variation in macartney rose (*Rosa bracteata*) response to herbicide treatment [J]. Weed Technology, 2016, 30(3): 758–764.
- [41] FERRELL J, SELLERS B, JENNINGS E. Herbicidal control of largeleaf lantana (*Lantana camara*) [J]. Weed Technology, 2012, 26(3): 554–558.
- [42] HARMONEY K R. Controlling honey locust (*Gleditsia triacanthos*) with cut stump- and basal bark-applied herbicides for grazed pasture [J]. Weed Technology, 2016, 30(3): 801–806.
- [43] KESOUJ S R, BOYDSTON R A, GREENE S L. Effect of synthetic auxin herbicides on seed development and viability in genetically engineered glyphosate-resistant alfalfa [J]. Weed Technology, 2016, 30(4): 860–868.
- [44] PETER D H, HARRINGTON T B. Effects of forest harvesting, logging debris, and herbicides on the composition, diversity and assembly of a western Washington, USA plant community [J]. Forest Ecology and Management, 2018, 417: 18–30.
- [45] FUERST E P, STERLING T M, NORMAN M A, et al. Physiological characterization of picloram resistance in yellow starthistle [J]. Pesticide Biochemistry and Physiology, 1996, 56(2): 149–161.
- [46] GHANIZADEH H, HARRINGTON K C. Cross-resistance to auxinic herbicides in dicamba-resistant *Chenopodium album* [J]. New Zealand Journal of Agricultural Research, 2017, 60(1): 45–53.
- [47] JUAN V F, NÚÑEZ FRÉ F R, SAINT-ANDRÉ H M, et al. Responses of 2,4-D resistant *Brassica rapa* L. biotype to various 2,4-D formulations and other auxinic herbicides [J/OL]. Crop Protection, 2021, 145: 105621. DOI: 10.1016/j.cropro.2021.105621.
- [48] MANGIN A R, HALL L M. First report: spotted knapweed (*Centaurea stoebe*) resistance to auxinic herbicides [J]. Canadian Journal of Plant Science, 2016, 96(6): 928–931.
- [49] HORSMAN J, MCLEAN M D, OLEA-POPELKA F C, et al. Picloram resistance in transgenic tobacco expressing an anti-picloram scFv antibody is due to reduced translocation [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2007, 55(1): 106–112.
- [50] VALENZUELA-VALENZUELA J M, LOWND S N K, STERLING T M. Clopyralid uptake, translocation, metabolism, and ethylene induction in picloram-resistant yellow starthistle (*Centaurea solstitialis* L.) [J]. Pesticide Biochemistry and Physiology, 2001, 71(1): 11–19.
- [51] GHANIZADEH H, LI Fengshou, HE Luhui, et al. Characterization of clopyralid resistance in lawn burweed (*Soliva sessilis*) [J/OL]. PLoS ONE, 2021, 16(6): e0253934. DOI: 10.1371/journal.pone.0253934.
- (责任编辑: 杨明丽)