

◆ 综述与专论 ◆

双酰胺类杀虫剂在农药复配应用中的研究进展

孙学磊, 郭雪洁, 马 琦

(宿迁市宿豫区农业技术推广中心, 江苏宿迁 223800)

摘要:双酰胺类杀虫剂因具有结构多样、作用机制独特、防虫效果卓越等特点,成为近年来杀虫剂市场上的热点产品。然而,随着双酰胺类杀虫剂被大量使用,抗性逐渐显现,影响生态环境和现代农业的可持续性发展。双酰胺类杀虫剂与其他农药组合应用是解决抗性问题的有效途径之一,同时还能扩大防治谱,提高药效,进而减少农药使用量。本文对双酰胺类杀虫剂在农药复配中的应用进展进行综述,以期为双酰胺类杀虫剂的靶标抗性、减量增效与可持续发展提供科学参考。

关键词:双酰胺类;杀虫剂;复配;增效作用;共毒系数;抗性

中图分类号:S 433; TQ 456 **文献标志码:**A **doi:**10.3969/j.issn.1671-5284.2022.04.003

Application Progress of Diamide Insecticides in Pesticide Combination

SUN Xuelei, GUO Xuejie, MA Qi

(Agricultural Technology Extension Center of Suyu District, Suqian City, Jiangsu Suqian 223800, China)

Abstract: Diamide insecticides have become hot products in the pesticide market in recent years because of diverse structures, unique action mechanism, excellent insect control effect. However, the enhancement of resistance has been observed with the increasing use of diamide insecticides for a long time, affecting sustainable development of ecological environment and modern agriculture. Compounding diamide insecticides with other pesticides was one of the effective ways to solve the above scientific problems, which could delay the generation of resistance, improve the prevention spectrum and insecticidal efficacy, and consequently reduce the pesticides application. This paper reviewed the application progress of diamide insecticides in pesticide combination in order to provide a scientific reference for delaying resistance, decrement and synergism, and sustainable development of neonicotinoids.

Key words: diamide; insecticides; pesticide compounding; synergistic effects; co-toxicity coefficient; pesticide resistance

双酰胺类杀虫剂作为重要的农用化学品,在杀虫剂市场上占有较大比重,2018年的销售额约为22.15亿美元,其中,其销售冠军产品氯虫苯甲酰胺2019年的销售额达17.5亿美元^[1],已经成为近年来的研究热点产品^[2-3]。该类杀虫剂具有特定的靶标位点活性和良好的毒理学特征,高效,杀虫谱广,与传统农药无交互抗性等特点^[4]。双酰胺类杀虫剂作用机理分为2类(表1),一类为作用于害虫最主要的钙离子通道鱼尼丁受体,使昆虫的平滑肌和横纹肌细胞内钙离子失调,从而影响昆虫的肌肉功能,导致其停止活动、取食,出现呕吐、脱水等症状,最终死亡^[1,5]。双酰胺类杀虫剂对哺乳动物具有很好的选择

性,对哺乳动物毒性很低^[1]。因为哺乳动物中存在鱼尼丁受体的结构与昆虫鱼尼丁受体有很大差异。另一类是作用于 γ -氨基丁酸受体,阻止昆虫体内信号正常传递,从而达到杀虫效果。上述2类作用机制的双酰胺类杀虫剂无交互抗性,能高效防治黏虫、蚜虫等鳞翅目、半翅目害虫^[2-3]。双酰胺类杀虫剂发展历史较短,第一个双酰胺类杀虫剂氟苯虫酰胺于2007年上市,但由于其独特的作用机制和优良的产品特点,吸引了大量研发力量。截至2022年6月17日,在国内已经取得登记的双酰胺类杀虫剂产品有氯虫苯甲酰胺(69条)、溴氰虫酰胺(11条)、氟苯虫酰胺(8条)、溴虫氟苯双酰胺(3条)、四氯虫酰胺(2条)、

收稿日期:2022-04-08

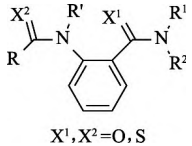
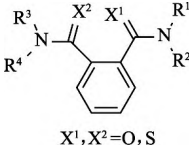
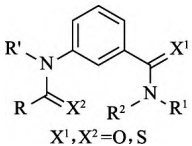
作者简介:孙学磊(1992—),男,江苏宿迁人,硕士,农艺师,主要从事植物保护工作。E-mail: 756744009@qq.com

四唑虫酰胺(2条)、硫虫酰胺(2条)等。

双酰胺类杀虫剂可有效防治二化螟、桃小食心虫、玉米螟等害虫^[6-8],但由于长期大量使用单一药剂,导致使用频次增多,靶标抗性、环境风险等问题也逐步显现。支昊宇等^[9]利用人工饲料浸药法,测定新疆地区亚洲玉米螟田间种群对溴氰虫酰胺的抗性情况,发现在2019采集的田间种群对溴氰虫酰胺都产生了不同水平的抗性,乌鲁木齐和伊宁地区发展为低到高抗性水平,昌吉地区甚至达到极高抗性水平。小菜蛾对氯虫苯甲酰胺和其他二酰胺杀虫剂

产生了极高的抗性。2014年,Guo等^[10]报道表明,采自广东地区的4个小菜蛾不同种群对氯虫苯甲酰胺的抗性水平达303~658倍。此外,研究发现,虽然双酰胺类杀虫剂对脊椎动物毒性低,但氟虫双酰胺、氯虫苯甲酰胺、溴氰虫酰胺对大型蚤和家蚕为剧毒,尤其对大型蚤的寿命、体长、蜕皮数、首胎时长、产胎数、单雌产蚤数等指标都有不同程度的影响;溴氰虫酰胺对意大利蜜蜂高毒^[11-12];氯虫苯甲酰胺对土壤吸附性差,更容易进入地下水中,并且对鱼类慢性毒性高,降解较慢^[13]。

表 1 双酰胺类杀虫剂作用机制

类型	结构通式	代表药剂	作用机制
邻甲酰胺基苯甲酰胺(硫代)双酰胺	 $X^1, X^2 = O, S$	氯虫苯甲酰胺、溴氰虫酰胺、四氯虫酰胺、环丙虫酰胺、四唑虫酰胺、噻虫酰胺、硫虫酰胺、氟氧虫酰胺、环溴虫酰胺、溴苯虫酰胺、丁氯虫酰胺、二氯异丙虫酰胺、氟氯虫双酰胺	昆虫鱼尼丁受体别构激活剂
邻二甲酰胺双酰胺	 $X^1, X^2 = O, S$	氟苯虫酰胺、氯氟虫酰胺	
间甲酰胺基苯甲酰胺双酰胺	 $X^1, X^2 = O, S$	溴虫氟苯双酰胺、环丙氟虫胺	γ -氨基丁酸受体别构抑制剂

2种或者2种以上不同结构或者不同作用机理的农药复配可以提高药效,减少用药量,降低环境暴露风险,扩大防治谱,延缓害虫产生抗药性,延长产品寿命等。为了推动双酰胺类杀虫剂产品的可持续发展,解决其所面临的科学问题,本研究综述了双酰胺类杀虫剂复配研究进展,从与新烟碱类、有机磷杀虫剂、苯甲酰基脲类杀虫剂等7大类药剂复配进行分类总结双酰胺类杀虫剂应用情况,为有效管理和可持续利用双酰胺类杀虫剂提供参考。

1 与新烟碱类杀虫剂的复配及应用

自1978年首个第一代新烟碱杀虫剂被报道以来,该类杀虫剂已经在我国、美国及欧洲等120个国家和地区登记上市。我国已经登记上市的主要新烟碱杀虫剂有噻虫胺、噻虫啉、吡虫啉、噻虫啉、啉虫脒、呋虫胺等12个有效成分。新烟碱类杀虫剂是昆虫烟碱乙酰胆碱受体激动剂,通过作用于有害昆虫的烟碱乙酰胆碱受体,抑制昆虫体内正常神经传递,从而杀死害虫^[14],但随着大量施用新烟碱类杀虫

剂,其造成的抗性问题、生态风险和人类健康问题已显现^[5]。而新烟碱类杀虫剂与双酰胺类杀虫剂复配,可以延缓害虫抗药性的产生,延长产品使用寿命。

双酰胺类杀虫剂与新烟碱类杀虫剂的复配组合详见表2。将氯虫苯甲酰胺与噻虫胺按5:1进行复配,对沟金针虫LC₅₀值为10.317 9 mg/L,共毒系数达133.24;氯虫苯甲酰胺与噻虫啉进行复配,共毒系数达137.55~319.64,可有效防治沟金针虫、小地老虎、稻纵卷叶螟、橘小实蝇、桉小卷蛾,其中对稻纵卷叶螟的防效可达97.41%,同时兼治稻飞虱,兼治防效达66.96%^[16-20]。氯虫苯甲酰胺与呋虫胺复配对梨小食心虫的毒力较高,并且两者增效明显,当两者有效成分剂量分别为12.5、25 mg/kg时,防效可达89.15%^[21]。溴氰虫酰胺与呋虫胺、氟啶虫胺胍及氟吡呋喃酮复配对稻飞虱、柑橘全爪螨和木虱毒性较高,对棉蚜和甘蓝小菜蛾的药后7 d防效分别超过91.3%和92.7%^[22]。由江苏农药研究所股份有限公司创制的噻虫酰胺可以与啉虫脒和烯啶虫胺复配,这种复配方式对小麦蚜虫有较高的杀虫活性。其中,

17%呋虫胺与13%噻虫酰胺复配,使用剂量为90.00~150.00 mL/hm²时,对小麦蚜虫药后7 d的防效为86.37%~92.69%,且对小麦生长发育安全^[23-24]。溴虫氟苯双酰胺与新烟碱类杀虫剂呋虫胺、噻虫啉和吡虫啉复配时,两两增效作用明显,可以有效防治棉蚜、甘蓝蚜虫和柑橘木虱,药后7 d对棉蚜、甘蓝蚜虫的防效分别可达87.8%~95.8%和85.7%~93.2%^[25]。溴虫氟苯双酰胺与氟啶虫胺胍按1:10配置成22%悬浮剂,对棉蚜药后7 d防效超过90.7%;按10:1配置成22%水分散粒剂,对小菜蛾的防效超过91.8%,

防效显著优于两者单剂防效。

综上,双酰胺类杀虫剂常与噻虫胺、呋虫胺、氟啶虫胺胍、氟吡呋喃酮、啉虫脒、烯啶虫胺、啶虫脒和环氧虫啉等新烟碱类杀虫剂进行复配,可以提高防效,延缓害虫抗药性产生,但同时注意不要与吡虫啉、噻虫啉、噻虫啉混配防治稻飞虱,因为稻飞虱已对上述新烟碱类杀虫剂产生较高抗性。建议加强双酰胺类杀虫剂与氟啶虫胺胍、啶虫脒和环氧虫啉等复配产品的研究与开发,进一步发挥复配剂的增效作用等优势。

表 2 双酰胺类杀虫剂与新烟碱类杀虫剂的复配组合汇总

农药名称	靶标害虫	复配比例	LC ₅₀ 值/(mg·L ⁻¹)	共毒系数
氯虫苯甲酰胺:噻虫胺	沟金针虫 (<i>Pleonomus canaliculatus</i>)	3:4~15:2	0.964 4~9.066 6	155.16~335.12
	铜绿丽金龟 (<i>Anomala corpulenta</i>)			
氯虫苯甲酰胺:噻虫啉	沟金针虫 (<i>Pleonomus canaliculatus</i>)	1:4~1:1	0.415~9.244 4	137.55~319.64
	小地老虎 (<i>Agrotis ypsilon</i>)			
	稻纵卷叶螟 (<i>Cnaphalocrocis medinalis</i>)			
	橘小实蝇 (<i>Bactrocera dorsalis</i>)			
氯虫苯甲酰胺:吡虫啉	橘小实蝇 (<i>Bactrocera dorsalis</i>)	1:3~7:3	4.971 4~15.67	151.37~184.95
	桉小卷蛾 (<i>Strepsicrates coriariae</i>)			
氯虫苯甲酰胺:呋虫胺	铜绿丽金龟 (<i>Anomala corpulenta</i>)	1:4	1.567	538.84
溴氰虫酰胺:呋虫胺	2 龄幼虫			
溴氰虫酰胺:呋虫胺	梨小食心虫 (<i>Grapholita molesta</i>)	8:32	3.305 65	180.5
溴氰虫酰胺:氟啶虫胺胍	稻飞虱	1:1	0.34	366.81
溴氰虫酰胺:氟吡呋喃酮	柑橘木虱 (<i>Diaphorina citri</i>)	1:7	2.76 79	166.05
噻虫酰胺:啉虫脒	柑橘全爪螨 (<i>Panonychus citri</i>)	13:2	32.502 66	169.57
噻虫酰胺:烯啶虫胺	小麦蚜虫	2:13	15.552 71	165.7
氯氟氰虫酰胺:啶虫脒	红蜘蛛 (<i>Tetranychus cinnabarinus</i>)	1:50	0.71~0.82	149.71~200.15
氯氟氰虫酰胺:环氧虫啉	红蜘蛛 (<i>Tetranychus cinnabarinus</i>)	1:50	0.71~0.82	149.71~200.15
氯氟氰虫酰胺:噻虫啉	甜菜夜蛾 (<i>Spodoptera exigua</i>)	50:1	0.81~0.92	140.61~160.49
	斜纹夜蛾 (<i>Spodoptera litura</i>)			
	二化螟 (<i>Chilo suppressalis</i>)			
氯氟氰虫酰胺:烯啶虫胺	稻飞虱	1:5	7.23	155.09
氯氟氰虫酰胺:氟啶虫胺胍	二化螟 (<i>Chilo suppressalis</i>)	5:1	9.05	161.06
溴虫氟苯双酰胺:呋虫胺	棉蚜 (<i>Aphis gossypii</i>)	20:1	0.38	187.68
溴虫氟苯双酰胺:噻虫胺	桃蚜 (<i>Aphis gossypii</i>)	5:1	0.18	441.71
溴虫氟苯双酰胺:吡虫啉	柑橘木虱 (<i>Diaphorina citri</i>)	5:1	0.38	198.57
溴虫氟苯双酰胺:氟啶虫胺胍	柑橘木虱 (<i>Diaphorina citri</i>)	1:10	0.25	403.75

2 与有机磷和氨基甲酸酯类农药的复配及应用

有机磷和氨基甲酸酯类农药作为使用最为广泛的农药品种,他们的作用机理均为通过抑制靶标害虫的胆碱酯酶活性,影响神经正常传递,进而杀死害虫。这类农药具有杀虫谱广、高效、作用方式多样等优点,但毒性各不相同,多数为高毒或者剧毒,长期大量使用会对生态环境和人类健康造成巨大威胁。有机磷和氨基甲酸酯类农药与双酰胺类杀虫

剂进行复配时,一方面提高药效;另一方面能有效缓解上述有机磷类农药带来的环境风险问题。

毒死蜱、哒螨灵、甲基毒死蜱、敌百虫和二嗪磷等有机磷类农药常与双酰胺类杀虫剂进行复配(表 3),不仅可以提高杀虫剂产品防效,还可以减缓抗药性的产生,降低有机磷农药的使用量,提高对作物和生态的安全性。例如,王容燕等^[26]研究发现,毒死蜱与氯虫苯甲酰胺配比为1:1~14:1时,均对斜纹夜蛾毒力活性较高,LC₅₀值为1.002 5~5.750 8 mg/L,毒力远高于毒死蜱单剂。其中,毒死蜱与氯虫

苯甲酰胺复配比例为4:1时毒性最好,共毒系数最高。甲基毒死蜱与双酰胺类杀虫剂复配的研究较多,其可以与氯氟氰虫酰胺、氟苯虫酰胺、溴氰虫酰胺和四氯虫酰胺进行复配防治甘蓝甜菜夜蛾、小菜蛾和稻纵卷叶螟。例如,甲基毒死蜱与氯氟氰虫酰胺复配具有增效作用,对防治甜菜夜蛾具有较好的速效性和持效性,防效超过96%,高于三者单剂防效;甲基毒死蜱与四氯虫酰胺、氯虫苯甲酰胺复配对稻纵卷叶螟具有较好的防效,其药后14 d的防效超过90%^[27]。

氨基甲酸酯类农药茚虫威作为钠离子通道抑制剂,对鳞翅目害虫小菜蛾、菜青虫等均表现出较高的活性^[28-29],其与氯虫苯甲酰胺、硫虫酰胺和溴虫

氟苯双酰胺等双酰胺类杀虫剂复配,可以有效防治稻纵卷叶螟、二化螟和小菜蛾^[29-30]。杨莹莹等^[30]采用浸叶法测定了氯虫苯甲酰胺与茚虫威对甜菜夜蛾幼虫的毒力和两者的增效作用,其混配配比为1:9时共毒系数最高,达1 843.24,LC₅₀值为1.01 mg/L,但生产上氯虫苯甲酰胺与茚虫威已经对甜菜夜蛾产生较高抗性,不建议复配使用。欧阳铭勋等^[29]利用浸叶法测定了硫虫酰胺与茚虫威对小菜蛾的最佳复配比,发现当复配比为1:1时,增效作用最显著,共毒系数达200.8,并且在该复配比下,施用剂量为60 g a.i./hm²时对小菜蛾的药后7 d防效为90.07%,远高于两者单剂在同剂量下的防效。

表 3 双酰胺类杀虫剂与有机磷和氨基甲酸酯类杀虫剂的复配组合汇总

类型	农药名称	靶标害虫	复配比例	LC ₅₀ 值(mg·L ⁻¹)	共毒系数
有机磷类农药复配	氯虫苯甲酰胺:毒死蜱	斜纹夜蛾(<i>Spodoptera litura</i>)	1:4	1.002 5	786.094 6
	溴氰虫酰胺:吡蚜灵	白粉虱(<i>Trialeurodes vaporariorum</i>)	10:1		
	氯氟氰虫酰胺:甲基毒死蜱	甘蓝甜菜夜蛾(<i>Spodoptera exigua</i>) 小菜蛾(<i>Plutella xylostella</i>)	4:1	3.56~18.71	189.45~198.74
	氟苯虫酰胺:甲基毒死蜱	甘蓝甜菜夜蛾(<i>Spodoptera exigua</i>)	1:5~20:1	0.36~1.57	162.13~198.25
	氯虫苯甲酰胺:甲基毒死蜱	小菜蛾(<i>Plutella xylostella</i>)	1:5~4:1	2.76~5.90	186.52~198.21
	溴氰虫酰胺:甲基毒死蜱	小菜蛾(<i>Plutella xylostella</i>)	5:1	8.88	196.12
	四氯虫酰胺:甲基毒死蜱	稻纵卷叶螟(<i>Cnaphalocrocis medinalis</i>)	1:10~1:5	8.37~9.21	177.45~197.41
	四氯虫酰胺:敌百虫	水稻二化螟(<i>Chilo suppressalis</i>)	1:12.5	18.24	141.76
	四氯虫酰胺:二嗪磷	水稻二化螟(<i>Chilo suppressalis</i>)	1:12	18.45	139.66
	硫虫酰胺:吡蚜灵	黄曲条跳甲(<i>Phyllotreta striolata</i>)	1:3	62.45	182.14
氨基甲酸酯类农药复配	氯虫苯甲酰胺:茚虫威	甜菜夜蛾(<i>Spodoptera exigua</i>)	1:9~6:4;8:2	0.82~2.97	146.94~1 843.24
	硫虫酰胺:茚虫威	小菜蛾(<i>Plutella xylostella</i>)	1:1	0.073 6	200.80
	氟苯虫酰胺:茚虫威	小菜蛾(<i>Plutella xylostella</i>)	1:1~3:1	2.343~2.524	152.44~183.45
	溴虫氟苯双酰胺:茚虫威	稻纵卷叶螟(<i>Cnaphalocrocis medinalis</i>) 二化螟(<i>Chilo suppressalis</i>)	1:1~3:1	0.063 5~0.332 8	168.62~190.62

3 与苯甲酰基脲类杀虫剂的复配及应用

苯甲酰基脲类杀虫剂为昆虫生长调节剂,通过抑制靶标害虫的几丁质合成酶的活性,影响害虫表皮几丁质合成,进而影响害虫取食、脱皮和化蛹,最终导致害虫死亡。该类杀虫剂具有选择性高,在环境中易分解等优点^[31],可用于防治黑粪蚊、异迟眼蕈蚊、亚洲玉米螟等,对鳞翅目、双翅目害虫有较好的防效^[32-33],但其速效性差,容易产生抗药性。双酰胺类杀虫剂与该类杀虫剂复配可以解决上述科学问题,提高药效,并能延缓产品抗药性产生。

氟啶脲、氟啶脲、丁醚脲、双三氟虫脲和虱螨脲等苯甲酰基脲类杀虫剂与双酰胺类杀虫剂复配具有增效作用,可以用于防治金纹细蛾、小菜蛾、蓟马、菜青虫和稻纵卷叶螟等(表4)。山东省烟台农科院

的科研团队采用浸渍法评价了溴氰虫酰胺与氟啶脲复配剂对金纹细蛾的联合毒力,当复配比为4:1时,共毒系数最高,并且此时毒力也最好,LC₅₀值为7.280 mg/L。田间试验结果表明,两者复配剂2 000倍液防效可达96.0%,且其对人畜毒性较低和对作物安全性较高,为微毒农药^[34]。双三氟虫脲是新型苯基苯甲酰基脲类杀虫剂,由韩国东宝化学公司于2000年开发,目前我国还未获得登记,对白蚁有较好的防效^[35]。其与双酰胺类杀虫剂氟氯虫双酰胺复配可以用于防治白粉虱、小菜蛾、稻蓟马、飞虱、鳞翅目幼虫、蝇类和鞘翅目等害虫。其中氟氯虫双酰胺与三氟虫脲复配比为1:10~10:1时,两者增效作用最明显;复配比为1:1时,对小菜蛾、白粉虱防效最好,防效最高可达90.16%,并且见效快,持效期长^[36]。

表 4 双酰胺类杀虫剂与苯甲酰基脲类杀虫剂的复配组合汇总

农药名称	靶标害虫	复配比例	LC ₅₀ 值/(mg·L ⁻¹)	共毒系数
溴氰虫酰胺: 氟啶脲	金纹细蛾 (<i>Lithocolletis ringoniella</i>)	4 : 1	7.280	209.64
四氯虫酰胺: 氟啶脲	小菜蛾 (<i>Plutella xylostella</i>)	1 : 20~1 : 1	0.92~2.43	251.94~373.57
环溴虫酰胺: 氟啶脲	小菜蛾 (<i>Plutella xylostella</i>)	1 : 10~10 : 1	0.85~3.68	120.35~162.10
氟氯虫双酰胺: 丁醚脲	蓟马 菜青虫 (<i>Pieris rapae</i>)	10 : 1	0.102~0.230	171.50~175.72
氟氯虫双酰胺: 双三氟虫脲	小菜蛾 (<i>Plutella xylostella</i>)	1 : 9	5.535 9	171.93
氟苯虫酰胺: 双三氟虫脲	小菜蛾 (<i>Plutella xylostella</i>)	1 : 4~1 : 3	5.245 9~5.420 9	176.19~180.95
溴虫氟苯双酰胺: 虱螨脲	小菜蛾 (<i>Plutella xylostella</i>) 稻纵卷叶螟 (<i>Cnaphalocrocis medinalis</i>)	2 : 1~10 : 1	1.59~1.95	139.66~156.07

4 与拟除虫菊酯类农药的复配及应用

拟除虫菊酯类农药具有高效、低毒、低残留及易降解等优点,是替代有机磷类等高毒农药的理想品种,其在杀虫剂市场上占有很重要的地位,使用范围仅次于有机磷农药,2010—2014年的销售额在杀虫剂市场排前2名^[37]。其通过干扰害虫神经膜中钠离子通道,影响神经信号传输,最终导致害虫死亡。拟除虫菊酯类杀虫剂可以与氯虫苯甲酰胺、溴氰虫酰胺和丁氯虫酰胺等双酰胺类杀虫剂复配防治黄野螟、黏虫、铜绿丽金龟和朱砂叶螨等(表5)。陈志云等^[38]采用叶浸渍法测定了氯虫苯甲酰胺与高效氯氟氰菊酯复配对防治黄野螟的增效作用,发现复配比为7 : 3时增效作用最佳。防治黏虫时,氯虫苯甲酰胺与高效氯氟氰菊酯或联苯菊酯最佳配比为4 : 1,增效系数分别为1.68和3.10,防效最高分别可达

90.91%和93.94%,均高于单剂防效,说明该2组药剂二元复配可以提高对黏虫的防效^[39]。氯虫苯甲酰胺与联苯菊酯2种杀虫剂作用机理互补,用浸虫法测定其复配剂对铜绿丽金龟的联合毒力发现,复配比为7 : 3时增效作用最明显,共毒系数达326.12,并且在该复配比下的12%氯虫苯甲酰胺·联苯菊酯悬浮种衣剂对玉米表现出很高的安全性,在同剂量下,两者复配防效远高于两者单剂防效^[40]。

综上,拟除虫菊酯类农药与双酰胺类杀虫剂复配在杀虫机理上可以互补,提高药效,降低农药使用量,进而减少对生态环境的风险,并且两者复配安全性高,速效性好,持效期长,有助于克服和缓解害虫抗药性,延长农药使用寿命,但需要注意的是,小菜蛾对高效氯氟菊酯产生较高抗性,因此不建议高效氯氟菊酯与双酰胺类杀虫剂复配用于防治小菜蛾。

表 5 双酰胺类杀虫剂与拟除虫菊酯类农药的复配组合汇总

农药名称	靶标害虫	复配比例	LC ₅₀ 值/(mg·L ⁻¹)	共毒系数
氯虫苯甲酰胺: 高效氯氟菊酯	黄野螟 (<i>Heortia vitessoides</i>) 黏虫 (<i>Mythimna seperata</i>)	1 : 2~8 : 1	2.835 1~3.555 6	
氯虫苯甲酰胺: 联苯菊酯	铜绿丽金龟 (<i>Anomala corpulenta</i>) 黏虫 (<i>Mythimna seperata</i>)	1 : 4~8 : 1	0.525 1~3.218 0	326.12
溴氰虫酰胺: 联苯菊酯	朱砂叶螨 (<i>Tetranychus cinnabarinus</i>)	10 : 1		
丁氯虫酰胺: 氯氟氰菊酯	小菜蛾 (<i>Plutella xylostella</i>)	1 : 2	1.91	206.38
丁氯虫酰胺: 联苯菊酯	小菜蛾 (<i>Plutella xylostella</i>)	1 : 2~2 : 1	1.56~1.82	186.92~200.27

5 与生物杀虫剂的复配及应用

随着人们对生态环境保护意识的提高,生物农药凭借着环境友好,易降解等优势,在农药市场上的地位稳步提高。近年来,我国也大力推进生物农药产业发展,在农药登记评审中设置生物农药绿色通道,并且还加大对生物农药研发的支持力度。截至2021年年底,我国登记的生物农药达43 281个^[41-42]。然而,生物农药存在易受环境影响,见效慢等问题,

因此将与其作用机理互补的双酰胺类杀虫剂等化学农药复配(表6),一方面可以提高药效;另一方面可以延缓化学农药抗性的产生,减少化学农药使用量,降低化学农药带来的农药残留风险,从而更好地保护生态环境。

氨基基阿维菌素苯甲酸盐和阿维菌素是一种杀虫、杀螨生物化学农药,具有高效、广谱性,其两者作用机制相同,均通过影响害虫神经传递,进而使其麻痹,不能正常活动,最终死亡^[43]。甲维盐是防

治迁飞性、暴食性害虫草地贪夜蛾的农业部推荐用药,但是长期使用容易产生抗性,其与氯虫苯甲酰胺复配可以提高防效,延缓抗药性产生。胡飞等^[44]采用浸虫法测定了两者组合物对草地贪夜蛾的室内毒力,发现复配比为2:8~7:3时均表现为增效作用。其中,复配比为3:7时增效作用最大,共毒系数达173,并且在最佳比例下配置成的10%甲维盐·氯虫苯甲酰胺水分散粒剂对草地贪夜蛾防效最高达92.6%,显著高于单剂防效。甲维盐与氯虫苯甲酰胺

按1:3混配时,防治红脉穗螟的增效作用最显著,LC₅₀值为0.70 mg/L,共毒系数达139.68^[45]。甲维盐与四氯虫酰胺对草地贪夜蛾也有较高防效,按7:3复配时增效最明显,共毒系数达162,在此比例下药后7 d防效可达92.96%^[46]。硫虫酰胺与甲维盐复配可以防治小菜蛾,复配比为14:1时联合作用最佳,共毒系数为159.54,在此配比下60 g a.i./hm²施用,对小菜蛾药后3、7 d的防效分别为83.35%和90.07%,显著高于同剂量下单剂防效^[28]。

表 6 双酰胺类杀虫剂与生物杀虫剂的复配组合汇总

农药名称	靶标害虫	复配比例	LC ₅₀ 值/(mg·L ⁻¹)	共毒系数
氯虫苯甲酰胺:甲维盐	草地贪夜蛾(<i>Spodoptera frugiperda</i>)	3:7~8:2	0.287~0.824	122~227.40
	红脉穗螟(<i>Tirathaba rufivena</i>)			
	稻纵卷叶螟(<i>Cnaphalocrocis medinalis</i>)			
四氯虫酰胺:甲维盐	草地贪夜蛾(<i>Spodoptera frugiperda</i>)	3:7	0.076	162
丁氯虫酰胺:甲维盐	小菜蛾(<i>Plutella xylostella</i>)	1:1	1.29	192.17
硫虫酰胺:甲维盐	小菜蛾(<i>Plutella xylostella</i>)	14:1	0.022 7	159.54
溴氰虫酰胺:印楝素	小菜蛾(<i>Plutella xylostella</i>)	1:10		
溴氰虫酰胺:鱼藤酮	桃蚜(<i>Myzus persicae</i>)	20:1		
环溴虫酰胺:苦参碱	蚜虫	4:1	9.04	161.3
氯虫苯甲酰胺:八角茴香油	稻纵卷叶螟(<i>Cnaphalocrocis medinalis</i>)	1:4~4:1	4.94~14.67	129.94~154.04
溴氰虫酰胺:辣椒碱	白粉虱(<i>Trialeurodes vaporariorum</i>)	1:1 558~1:1 169	125.30~128.07	235.23~255.65
溴氰虫酰胺:莴苣提取物	甘蓝小菜蛾(<i>Plutella xylostella</i>)	1:20~1:1	2.45~15.59	126.48~187.80
	菜青虫(<i>Pieris rapae</i>)			
四氯虫酰胺:粗榧生物碱	甘蓝小菜蛾(<i>Plutella xylostella</i>)	1:4~1:1	1.01~1.43	167.45~197.90
	菜青虫(<i>Pieris rapae</i>)			
氯氟氰虫酰胺:透骨草提取物	二化螟(<i>Chilo suppressalis</i>)	5:1~10:1	13.02~20.75	133.4~159.9
	褐飞虱(<i>Nilaparvata lugens</i>)			
	小菜蛾(<i>Pieris rapae</i>)			
	甜菜夜蛾(<i>Spodoptera exigua</i>)			
	菜青虫(<i>Pieris rapae</i>)			
溴虫氟苯双酰胺:椒碱烯酰胺	介壳虫			
溴虫氟苯双酰胺:椒碱烯酰胺	苹果桃小食心虫(<i>Garpovina sosaki</i>)	2:1	0.783	237.845
四氯虫酰胺:金龟子绿僵菌	葱兰夜蛾(<i>Brithhys crini</i>)	1:6~5:1	12.16~15.32	146.2~289.2
氯虫苯甲酰胺:绿僵菌	飞蝗(<i>Locusta migratoria</i>)	2:8;5:5	0.01~0.02	1 454.32~1 860.54
氯虫苯甲酰胺:球孢白僵菌	小菜蛾(<i>Pieris rapae</i>)	0.23 mg/L : 107个/mL	5.20	

印楝素、苦参碱和鱼藤酮等植物源农药具有对生态环境友好,不容易产生抗性,同时还可以促进植物生长的特点,常用在瓜、果、蔬菜、特种作物及有机农业领域^[47]。该类农药与双酰胺类杀虫剂复配时,可以降低化学农药使用量,减小因农药残留带来的环境危害,并能有效延缓害虫对双酰胺类抗药性的产生,延长商品寿命。苦参碱是从苦参中提取制备得到的天然植物农药,兼具胃毒和触杀作用,其与环溴虫酰胺复配对蚜虫有较高的毒力和防效,复配比为1:4时,增效最用最明显,共毒系数达161.3,优于单剂防效,且持效期长,药后7 d防效超过85%,对作物安全性高^[48]。耿鹏^[49]发现,氯虫苯甲酰胺与八角

茴香油复配对防治稻纵卷叶螟具有增效作用,复配比为4:1、2:1、1:1时,对稻纵卷叶螟48 h LC₅₀值分别为4.94、5.25和6.27 μg/mL,共毒系数为130.92~154.04。辣椒碱是从辣椒中分类得到的香草酰胺类生物碱,对昆虫具有胃毒、触杀、驱避等多种作用,对小菜蛾、烟粉虱和棉蚜具有一定防效,与溴氰虫酰胺复配具有增效作用,当复配比为1 558:1时,增效作用最显著,共毒系数达255.65^[50]。椒碱烯酰胺是辣椒素的主要活性物质,由于其具有刺激性和穿透性,常作为驱避剂和胃毒剂来防治桃蚜、菜青虫等。溴虫氟苯双酰胺与椒碱烯酰胺复配比为2:1时,对防治苹果小食心虫增效最显著,共毒系数为237.845;

对番茄棉铃虫、玉米螟也有较好的防效,防效可达94.53%,并且对人畜和作物安全^[51]。

6 与杂环、其他类杀虫剂的复配及应用

杂环杀虫剂由于其具有环境残留期长、难降解等缺陷,常与其他类型农药如新烟碱类、双酰胺类杀虫剂等进行复配,能够减轻对生态环境的危害和对作物的药害。例如,氯氟氰虫酰胺与吡蚜酮按照1:60~60:1进行复配,对防治水稻褐飞虱具有增效作用。其中,复配比为60:1时,增效作用最显著,共毒系数达169.81,并且不同配比下的复配剂14 d防效均超过92%,与单剂相比,提高了防效,延长了持效期^[52]。溴虫氟苯双酰胺可以与虫螨腈复配防治小菜蛾,当复配比为1:30~10:1时均为增效作用,在2:1时增效作用最佳,共毒系数为199.72,对小菜蛾药后3、7和14 d防效均超过85%,持续期超过单剂^[53]。

双酰胺类杀虫剂还可以与沙蚕毒素类农药进行复配,如将氯氟氰虫酰胺与杀虫单复配防治二化螟,当复配比为2:1~30:1时,增效作用较好,其共毒系数为137.64~150.34;在田间防效方面,两者复配剂防效优于单剂防效,药后15 d保苗效果均超过75%,药后25 d保苗效果优于15 d^[54]。因此,两者复配可以延长持效期,并且两者复配还可以延缓沙蚕毒素类农药因无内吸作用和熏蒸作用而产生的抗性。

7 结论与展望

从1998年由拜耳开发的第一个双酰胺类杀虫剂氟苯虫酰胺以来,双酰胺类杀虫剂凭借着高效、广谱、作用机制独特等优点被大量使用,但同时该类杀虫剂导致靶标害虫小菜蛾、斜纹夜蛾和番茄斑潜蝇等抗性的增加,加之由于其对土壤吸附性差,容易进入地下水中,并且对鱼类慢性毒性较高,因而带来了一系列环境风险问题。不同作用机理的农药间进行复配是解决抗性、提高药效和农药减量使用的有效途径,也是在实际农业生产中可持续应用和发展该类农药的重要策略。本研究就典型双酰胺类杀虫剂与氨基甲酸酯类、拟除虫菊酯类、有机磷杀虫剂和生物农药等复配的应用进展进行综述,明确了两两复配后的优势:(1)能产生显著的增效作用,提高药剂的毒性和速效性;(2)提高药效,和生物农药等复配易降解,可以降低残留风险;(3)延缓靶标害虫的抗性,延长产品使用寿命;(4)扩大防

治谱的同时,减低用药量,从而减轻对生态环境的压力和农业生产成本。因此,双酰胺类杀虫剂与不同作用机理的农药复配是提高其在农业生产中作用和市场占有率的重要手段,但同时也需要关注复配剂对环境、非靶标生物和非靶标作物的安全性等问题。

参考文献

- [1] 陈小平,柳爱平,关少飞,等.双酰胺类杀虫剂及其应用市场与防治刺吸式口器害虫前景[J].世界农药,2021,43(11):1-12.
- [2] 赵平,严秋旭,李新,等.双酰胺类杀虫剂的现状与展望[J].农药科学与管理,2015,36(11):23-29.
- [3] 吴明峰,龙楚云,柳爱平,等.新型双酰胺类化合物的杀虫/螨活性研究[J].精细化工中间体,2022,52(1):17-20.
- [4] TEIXEIRA L A, ANDALORO J T. Diamide insecticides: Global efforts to address insect resistance stewardship challenges[J]. Pesticide Biochemistry and Physiology, 2013, 106(3): 76-78.
- [5] 陈鹏,柏亚罗.双酰胺类杀虫剂的研发概况及在中国的登记情况[J].世界农药,2021,43(3):22-34.
- [6] DAS B C, MAHATA S, PATRA S, et al. New diamide insecticides against fruit and shoot borer (*Leucinodes orbonalis* Guen.) in Brinjal [J]. Pesticide Research Journal, 2014, 26(2): 197-201.
- [7] 陆爽,陈时健,张顾旭.几种药剂防治桃园梨小食心虫效果试验简报[J].上海农业科技,2022(2):118-119.
- [8] 董宇奎.氯虫苯甲酰胺200 g/L悬浮剂防治鲁南地区玉米螟效果分析[J].农业科技通讯,2022(2):81-83.
- [9] 支昊宇,王智慧,王兴仔,等.亚洲玉米螟的抗性监测及双酰胺类药剂抗性靶标分子检测[J].新疆农业科学,2021,58(4):690-699.
- [10] GUO L, WANG Y, ZHOU X G, et al. Functional analysis of a point mutation in the ryanodine receptor of *Plutella xylostella* (L.) associated with resistance to chlorantraniliprole[J]. Pest Management Science, 2014, 70(7): 1083-1089.
- [11] 林涛,游泳,郑丽祯,等.三种双酰胺类杀虫剂制剂对环境非靶标生物的急性毒性[J].农药学报,2015,17(6):757-762.
- [12] 陈朗,袁喜奎,姜辉,等.双酰胺类杀虫剂环境风险问题浅析[J].农药科学与管理,2019,40(3):19-26.
- [13] 林涛,游泳,林荣华,等.三种双酰胺类杀虫剂制剂对大型溞生长发育和繁殖的影响[J].生态毒理学报,2016,11(1):306-312.
- [14] 刘子琪,袁龙飞,廖先骏,等.新烟碱类杀虫剂呋虫胺的研究进展[J].现代农药,2021,20(1):7-12.
- [15] 张明浩,康珊珊,郭靖立,等.新烟碱类杀虫剂在农药复配中的应用进展[J].农药,2022,61(5):313-320.
- [16] 何发林.氯虫苯甲酰胺种子处理剂防治三种玉米田地下害虫[D].泰安:山东农业大学,2019.
- [17] 何发林,姜兴印,姚晨涛,等.氯虫苯甲酰胺与6种药剂复配对小地老虎的联合毒力[J].植物保护,2018,44(6):236-241.
- [18] 杨柳,张彦博,胡美英,等.氯虫·噻虫嗪对稻纵卷叶螟的毒力及

- 田间试验[J]. 江苏农业科学, 2010(5): 158-160.
- [19] 张倩楠, 余银芳, 喻欢, 等. 不同杀虫剂对橘小实蝇幼虫的毒力及混配联合作用[J]. 中国植保导刊, 2021, 41(3): 72-75.
- [20] 蒋振环, 吴梅香, 肖锦钰, 等. 12种杀虫剂对桉小卷蛾的室内毒力测定[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2014, 43(2): 128-131.
- [21] 庾琴, 杜恩强, 郭晓君, 等. 不同杀虫剂及其组合对梨小食心虫初孵幼虫的毒及田间防效[J]. 植物保护, 2020, 46(5): 265-269.
- [22] 中国农业科学院植物保护研究所. 一种含有溴氰虫酰胺与氟啶虫胺胍的增效农药组合: CN, 201910162035.8[P]. 2019-07-30.
- [23] 海利尔药业集团股份有限公司. 一种含有噻虫酰胺和噻虫嗪的杀虫组合: CN, 201010528147.X[P]. 2012-05-16.
- [24] 青岛海利尔药业有限公司. 一种含有噻虫酰胺与新烟碱类化合物的杀虫组合: CN, 201110005968.X[P]. 2011-05-18.
- [25] 中国农业科学院植物保护研究所. 一种含有溴虫氟苯双酰胺与新烟碱类杀虫剂的增效农药组合: CN, 201910162206.7[P]. 2019-07-30.
- [26] 王容燕, 马娟, 李秀花, 等. 防治斜纹夜蛾高效药剂及复配配方筛选[J]. 农药, 2017, 56(8): 603-605; 618.
- [27] 浙江新农化工股份有限公司. 含甲基毒死蜱和酰胺类杀虫剂的组合物及其制剂和应用: CN, 201611177754.X[P]. 2017-05-24.
- [28] 欧阳铭勋, 江雅琴, 常慧, 等. 硫虫酰胺防治小菜蛾复配配方筛选及应用[J]. 农药, 2022, 61(1): 61-64.
- [29] WING K D, SACHER M, KGAYA Y, et al. Bioactivation and mode of action of the oxadiazine indoxacarb in insects[J]. Crop Protection, 2000, 19: 537-545.
- [30] 杨莹莹, 赖晓伊, 赖多, 等. 氯虫苯甲酰胺与茚虫威对甜菜夜蛾的混配增效作用[J]. 广东化工, 2017, 44(12): 58-59.
- [31] 梁英, 贺红武, 杨自文. 苯甲酰基脲类化合物研究开发进展[J]. 农药, 2009, 48(9): 625-628.
- [32] 沈登荣, 李佳佳, 哈沙拉丁, 等. 苯甲酰基脲类杀虫剂对黑粪蚊生长发育和繁殖的影响[J]. 河南农业科学, 2020, 49(11): 85-90.
- [33] 游灵, 田生荣, 刘伟, 等. 苯甲酰基脲类杀虫剂对亚洲玉米螟生长发育和繁殖的效用[J]. 应用昆虫学报, 2012, 49(6): 1565-1571.
- [34] 山东省烟台市农业科学研究院. 一种农药组合物及其应用: CN, 201510221365.1[P]. 2015-08-19.
- [35] WEBB G A. Efficacy of bistrifluron termite bait on coptotermes lacteus (isoptera: Rhinotermitidae) in southern australia[J]. Journal of Economic Entomology, 2017, 110(4): 1705-1709.
- [36] 海利尔药业集团股份有限公司. 一种含有氟氯虫双酰胺与双三氟虫脲的杀虫组合: CN, 201710694148.3[P]. 2019-03-01.
- [37] 李新. 拟除虫菊酯类杀虫剂研发及市场概况[J]. 农药, 2016, 55(9): 625-630.
- [38] 陈志云, 郑礼飞, 王玲, 等. 氯虫苯甲酰胺与高效氯氟菊酯复配对黄野螟增效作用研究[J]. 山东林业科技, 2011, 41(6): 48-49.
- [39] 李玉武, 王耀林, 翟玉波, 等. 四种药剂及其复配组合对黏虫的室内毒力测定与田间防效试验[J]. 南方农业, 2021, 15(13): 11-15.
- [40] 何发林, 孙石昂, 尚佃龙, 等. 氯虫苯甲酰胺与联苯菊酯混配对铜绿丽金龟的增效作用及田间药效[J]. 农药, 2019, 58(11): 844-848.
- [41] 张宏军, 陶岭梅, 刘学, 等. 我国生物农药登记管理情况分析[J]. 中国生物防治学报, 2022, 38(1): 9-17.
- [42] 宋俊华, 杨峻. 全球生物农药定义、分类及管理测试准则介绍[J]. 农药科学与管理, 2021, 42(2): 7-10.
- [43] 葛红, 韩娟, 徐莉, 等. 甲氨基阿维菌素苯甲酸盐应用研究概况[J]. 金陵科技学院学报, 2010, 26(1): 90-95.
- [44] 胡飞, 苏贤岩, 胡本进, 等. 甲维盐·氯虫苯甲酰胺组合物对草地贪夜蛾室内毒力测定及田间防治效果[J]. 植物保护, 2020, 46(3): 303-307.
- [45] 潘润东, 刘向蕊, 李培征. 8种杀虫剂对槟榔红脉穗螟的毒力测定及混配比例的筛选[J]. 植物医生, 2021, 34(4): 31-35.
- [46] 高庆远, 杨石有, 张贝贝. 甲维盐与四氯虫酰胺复配对草地贪夜蛾的室内生物活性及田间防效[J]. 农药, 2021, 60(4): 306-309.
- [47] 张兴, 马志卿, 冯俊涛, 等. 植物源农药研究进展[J]. 中国生物防治学报, 2015, 31(5): 685-698.
- [48] 浙江中山化工集团股份有限公司. 一种含环溴虫酰胺和苦参碱的农药组合: CN, 201911201246.4[P]. 2020-04-28.
- [49] 耿鹏. 氯虫苯甲酰胺与八角茴香油复配对稻纵卷叶螟的室内毒力测定[J]. 农业与技术, 2014(10): 15.
- [50] 刘国强, 白冰, 毕于慧, 等. 辣椒碱与3种药剂对温室白粉虱的联合毒力[J]. 植物保护, 2021, 47(4): 305-309.
- [51] 山东省烟台市农业科学研究院. 一种防治鳞翅目害虫的组合物、杀虫剂及应用: CN, 202010107842.2[P]. 2020-05-29.
- [52] 北京燕化永乐生物科技股份有限公司. 一种复配杀虫剂: CN, 201410289181.4[P]. 2014-09-24.
- [53] 海利尔药业集团股份有限公司. 一种含有溴虫氟苯双酰胺与虫螨腈的杀虫组合: CN, 201811218671.X[P]. 2019-01-25.
- [54] 北京燕化永乐生物科技股份有限公司. 一种复配杀虫剂: CN, 201410498713.5[P]. 2015-01-21.

(责任编辑:高蕾)

研究人员发现保护植物免受热应激的蛋白质

根据联合国粮食及农业组织的数据显示,植物病虫害造成的损失占全球作物产量损失的40%,导致每年全球经济损失超过2 200亿美元。高温对植物产生重大影响,某些植物不能抵御高温,容易受到病原体和害虫的侵害。

根据杜克大学的新闻稿,科学家已经在植物细胞中发现了一种蛋白质,可以解释为什么温度升高时免疫力会下降,并且他们已经发现了如何挽回这种损失并增强植物的防御能力。高温会影响植物产生水杨酸的能力,水杨酸是一种防御激素,可以激活免疫系统并防止入侵者造成太大的伤害。

(金兰译)