

· 专论与综述 ·

doi: 10.16801/j.issn.1008-7303.2022.0121

双酰胺类农药生物活性、生态毒性及 残留行为研究进展

张琳^{1,2}, 张紫溪^{1,2}, 陈秀³, 程有普^{*2}, 李薇¹, 赵莉茵¹, 陈增龙^{*1}

(1. 中国科学院动物研究所农业虫害鼠害综合治理研究国家重点实验室, 北京 100101; 2. 天津农学院园艺园林学院, 天津 300380; 3. 上海市农业技术推广服务中心, 上海 201103)

摘要: 双酰胺类农药是继新烟碱类农药之后备受关注的一类杀虫剂, 作用靶标为鱼尼丁受体和 γ -氨基丁酸受体, 对鳞翅目害虫的防治效果优异。随着双酰胺类农药的广泛应用, 其对非靶标生物和水生生态环境产生了潜在威胁, 且靶标害虫的抗药性问题也日益凸显。本文综合国内外研究进展, 从生物活性、生态毒性、分析方法、环境行为和风险评估 5 个方面对双酰胺类农药的研究进行了综述, 对后续研究方向进行了展望, 可为该类农药的精准应用、风险规避和有效管理提供科学参考。

关键词: 双酰胺类杀虫剂; 生物活性; 生态毒性; 环境行为; 风险评估

中图分类号: TQ450.1 文献标志码: A

Advances in bioactivity, ecotoxicity and residual fate of diamide pesticides

ZHANG Lin^{1,2}, ZHANG Zixi^{1,2}, CHEN Xiu³, CHENG Youpu^{*2},LI Wei¹, ZHAO Lilin¹, CHEN Zenglong^{*1}

(1. State Key Laboratory of Integrated Control of Agricultural Pest and Rodent, Institute of Zoology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. School of Horticulture and Landscape Architecture, Tianjin Agricultural University, Tianjin 300380, China; 3. Shanghai Agricultural Technology Extension Service Center, Shanghai 201103, China)

Abstract: Diamide pesticides are a class of insecticides attracting great attention after neonicotinoids. The action target of diamide insecticides is ryanodine receptor or γ -aminobutyric acid receptor, which exhibits extraordinary potency on lepidopteran pests. With the widespread application of diamide pesticides, the potential threat to non-target organisms and aquatic ecosystems and the resistance of target pests have been observed. This study summarizes the biological activity, ecological toxicity, analytical methodology, environmental fate and risk assessment of diamide pesticides based on the research progress at home and abroad and prospects the research orientations in future in order to provide scientific references for accurate application, risk aversion and effective management of diamide pesticides.

收稿日期: 2022-08-11; 录用日期: 2022-10-01; 网络首发日期: 2022-10-22.

Received: August 11, 2022; Accepted: October 1, 2022; Published online: October 22, 2022.

URL: <https://doi.org/10.16801/j.issn.1008-7303.2022.0121>

<http://www.nyxxb.cn/cn/article/doi/10.16801/j.issn.1008-7303.2022.0121>

基金项目: 国家自然科学基金 (31801771); 国家重点研发计划 (2021YFC2600100).

Funding: Supported by the National Natural Science Foundation of China (31801771); National Key Plan for Scientific Research and Development of China (2021YFC2600100).

第一作者 (First author): 张琳, zhanglin990823@163.com. *通信作者 (Corresponding authors): 程有普, chengyoupu@tjau.edu.cn; 陈增龙, chenzenglong@ioz.ac.cn.

The authors declare that they have no competing interests.



Keywords: diamide insecticides; biological activity; ecological toxicity; environmental fate; risk assessment

0 引言

双酰胺类农药是继新烟碱类农药后最受市场关注的杀虫产品。据 McDougall 统计, 2018 年双酰胺类杀虫剂销售额 22.15 亿美元, 占当年全球杀虫剂市场 12.8%, 预测 2023 年将超越新烟碱类农药占据全球杀虫剂产品首位^[1]。该类杀虫剂始于 2001 年, 首例是由日本农药株式会社与德国拜耳共同研发作用于鱼尼丁受体 (ryanodine receptor, RyR) 的氟苯虫酰胺 (亦称氟虫双酰胺)^[2]。目前全球范围内双酰胺类杀虫剂有 10 个, 已正式登记的有 9 个, 国际标准化组织 (ISO) 临时批准 1 个, 其中归属邻苯二甲酰胺类的有 2 个 (氟苯虫酰胺、氯氟氰虫酰胺)、邻甲酰胺基苯甲酰胺类 7 个 (氯虫苯甲酰胺、溴氰虫酰胺、四氯虫酰胺、四唑虫酰胺、硫虫酰胺、环溴虫酰胺和氯氟虫双酰胺)、间甲酰胺基苯甲酰胺类 1 个 (溴虫氟苯双酰胺)^[3], 详见表 1。双酰胺类农药对靶标害虫表现出高效的杀虫活性, 且与传统农药无交互抗性, 登记作物已有 200 余种, 应用前景良好^[4]。

然而, 双酰胺类农药在土壤中的残留期较长, 移动性也较强, 长期大量施用可能会产生富集作用^[5]。近年来美国国家环境保护局 (Environmental Protection Agency, EPA) 指出, 氟苯虫酰胺及其脱碘代谢物 (des-iodo) 会对水生无脊椎动物造成急性和慢性风险, 威胁到水生食物链 (尤其鱼类), 因此美国全境禁用氟苯虫酰胺^[6]。同时, 随着害虫体内靶标突变和解毒代谢酶活性升高, 已造成其对双酰胺类杀虫剂的抗性达到 16~2778 倍^[7]。为了对双酰胺类农药的精准应用及其科学管理, 本文结合国内外研究进展, 从生物活性、生态毒性、分析方法、环境行为和风险评估 5 个方面展开综述, 旨在对双酰胺类农药的科学精准应用与暴露风险规避提供参考。

1 双酰胺类农药的生物活性

生物活性是判别双酰胺类农药防效的首要标准。邻苯二甲酰胺类和邻甲酰胺基苯甲酰胺类农药通过持续开放 RyR 通道, 导致肌细胞质内 Ca^{2+} 水平过高, 肌质网上的 Ca^{2+} 泵消耗大量能量, 导致虫体收缩直至死亡^[8]; 而间甲酰胺基苯甲酰胺类农药则通过作用于 γ -氨基丁酸受体 (GABAR), 抑

制氯离子的通透性, 使细胞膜电位去极化, 最终导致昆虫因过度兴奋而死亡^[9]。

由表 2 可见, 双酰胺类农药对鳞翅目害虫的杀虫活性高且持效期长, 亦可应用于鞘翅目和半翅目等害虫。首先, 邻甲酰胺基苯甲酰胺类杀虫剂氯虫苯甲酰胺、溴氰虫酰胺、四氯虫酰胺、四唑虫酰胺和硫虫酰胺研究最为广泛, 在推荐剂量下对鳞翅目害虫的田间防效为 52.0%~99.0%, 室内杀虫活性 LC_{50} (致死中浓度) 值在 0.07~11.81 mg/L 之间; 新型品种四唑虫酰胺在 20~40 g/hm² 剂量下对稻纵卷叶螟、二化螟等水稻作物上的鳞翅目害虫的防效最高可达 96.4%^[10-11], 极具应用前景; 溴氰虫酰胺的防治范围最为广泛, 对缨翅目、双翅目等害虫均具有良好的防效, 对于刺吸式口器害虫枸杞蚜虫, 在 6.7~10 g/hm² 剂量处理时的防效显著高于 3.3 g/hm² 吡虫啉的防效 2%~38%^[12]。其次, 间甲酰胺基苯甲酰胺类杀虫剂溴虫氟苯双酰胺, 在 15~24 g/hm² 剂量下对小菜蛾和棉铃虫的田间防效为 87.2%~96.5%, LC_{50} 值在 0.04~0.07 mg/L 之间^[13-14], 对鳞翅目害虫防效优异, 而且 3~5 g/hm² 的溴虫氟苯双酰胺对黑刺粉虱、小贯小绿叶蝉等害虫的田间防效在 77.6%~90.7% 之间^[15]。此外, 邻苯二甲酰胺类杀虫剂氟苯虫酰胺、氯氟氰虫酰胺在 15~45 g/hm² 时对鳞翅目害虫的田间防效为 53.1%~99.0%, LC_{50} 值在 0.13~0.93 mg/L 之间。总体来看, 双酰胺类农药针对鳞翅目害虫防效优异, 在推荐剂量下溴氰虫酰胺、溴虫氟苯双酰胺具有广谱性, 对缨翅目、鞘翅目、双翅目和半翅目害虫也具有较好的防效 (53.8%~99.9%), 6.67~10 g/hm² 溴氰虫酰胺对刺吸式口器害虫 (枸杞蚜虫) 的防效 (94.5%~99.8%) 甚至超过 1.67 g/hm² 传统新烟碱类农药吡虫啉 (93.7%)^[12], 今后可进一步拓宽双酰胺类农药的防治范围, 而不仅仅局限于鳞翅目害虫。

近年来, 双酰胺类杀虫剂的抗性问题日趋严重, 其主要原因可能是靶标害虫体内靶标位点发生突变, 或是靶标害虫体内解毒代谢酶活性的增强, 抑制了药剂的防治效果。研究表明, 将小菜蛾 RyR 突变菌株 (G4946E、I4790M 和 I4790K) 导入到其敏感品系中, 相较于未导入之前, 靶标位点单独突变可导致小菜蛾对氟苯虫酰胺、氯虫苯

表 1 双酰胺类农药分类、结构及其在我国的登记信息

Table 1 Classification, structure and registration information of diamide pesticides in China

农药类别 Pesticide category	农药名称 Pesticide name	化学结构 Chemical structure	登记时间 Registration time	登记作物 Registered crop	靶标害虫 Target pest	研发国家 R & D countries
邻苯二甲酰胺 Phthalamide	氟苯虫酰胺 flubendiamide		2009年 The year 2009	小白菜、玉米、甘蓝、甘蔗、白菜 Pakchoi, corn, cabbage, sugarcane, Chinese cabbage	甜菜蛾、小菜蛾、玉米螟、甜菜夜蛾、蔗螟 <i>Helicoverpa armigera</i> , Diamondback moth, Corn borer, Beet armyworm, Sugarcane borer	德国 Germany
	氯氟虫酰胺 cyhalodiamide		未登记 Unregistered	—	—	中国 China
间甲酰胺基苯甲酰胺 <i>m</i> -Formamidobenzamide	溴虫氟苯双酰胺 broflanilide		2020年 The year 2020	甘蓝、白菜 Cabbage, Chinese cabbage	小菜蛾、菜青虫、甜菜夜蛾、黄条跳甲 Diamondback moth, <i>Pteris rapae</i> , Beet armyworm, <i>Phyllotreta</i> spp.	日本、德国 Japan, Germany
	氯虫苯甲酰胺 chlorantraniliprole		2007年 The year 2007	大豆、小白菜、小青菜、桃、棉花、水稻、烟草、玉米、甘蓝、甘蔗、甘薯、番茄、花椰菜、花生、苹果、荔枝树、菜用大豆、西瓜、豇豆、辣椒、与铃薯 Soybean, ginger, pakchoi, small vegetables, peach, cotton, rice, tobacco, corn, cabbage, sugarcane, sweet potato, tomato, cauliflower, peanut, apple, water bamboo, Litchi, vegetable soybean, watermelon, cowpea, pepper, potato	甜菜夜蛾、小地老虎、粘虫、蚜虫、蔗螟、稻纵卷叶螟、三化螟、金纹细蛾、桃小食心虫、蔗蛾、斜纹夜蛾、棉铃虫、草地贪夜蛾、小菜蛾、豆荚螟、玉米螟、白蚁、稻水象甲、大螟、二点委夜蛾、蒂蛀虫 Beet armyworm, <i>Agrotis ypsilon</i> , <i>Mythimna separata</i> , <i>Holtrichia diomphalia</i> Bates, <i>Chilo suppressalis</i> , Sugarcane borer, <i>Cnaphalocrocis medinalis</i> , <i>Scirpophaga incertulas</i> , <i>Lithocolletis ringonella</i> , Peach fruit moth, <i>Squamura discipuncta</i> , <i>Spodoptera litura</i> , <i>H. armigera</i> , Fall armyworm, Diamondback moth, <i>Maruca testulalis</i> Geyer, <i>Corn borer</i> , Termite, <i>Lissorhoptus oryzophilus</i> , <i>Sesamia inferens</i> , <i>Aethis lepigone</i> , <i>Conopomorpha sinensis</i> Bradley.	美国 America
邻甲酰胺基苯甲酰胺 <i>o</i> -Carboxamidobenzamide	溴氰虫酰胺 cyantraniliprole		2012年 The year 2012	南瓜、大葱、小白菜、棉花、水稻、玉米、甘蓝、番茄、西瓜、豇豆、豌豆、辣椒、黄瓜、Pumpkin, welsh onion, pakchoi, cotton, rice, corn, cabbage, tomato, watermelon, cowpea, pea, pepper, cucumber	甜菜夜蛾、棉铃虫、蓟马、蚜虫、小菜蛾、白粉虱、烟草蚜、草地贪夜蛾、二点委夜蛾、小地老虎、瓜绢螟、美洲斑潜蝇、黄条跳甲、潜叶蝇、三化螟、菜青虫、稻纵卷叶螟、二化螟 Beet armyworm, <i>H. armigera</i> , Thrips, Aphid, Diamondback moth, <i>Trialeurodes vaporariorum</i> , <i>Bemisia tabaci</i> , Fall armyworm, <i>A. lepigone</i> , <i>A. ypsilon</i> , <i>Diaphania indica</i> , <i>Liriomyza sativae</i> , <i>Phyllotreta</i> spp., Flies, <i>S. incertulas</i> , <i>P. rapae</i> , <i>C. medinalis</i> , <i>C. suppressalis</i>	美国 America

续表 1

Table 1 (Continued)

农药类别 Pesticide category	农药名称 Pesticide name	化学结构 Chemical structure	登记时间 Registration time	登记作物 Registered crop	靶标害虫 Target pest	研发国家 R & D countries
	四氯虫酰胺 tetrachlorantraniliprole		2017年 The year 2017	水稻、玉米、甘蓝 Rice, corn, cabbage	甜菜夜蛾、玉米螟、稻纵卷叶螟 Beet armyworm, Corn borer, <i>C. medinalis</i>	中国 China
	四唑虫酰胺 tetraniliprole		2020年 The year 2020	柑橘、水稻、甘蓝、番茄(保护地)、苹果、辣椒(保护地) Mandarin orange, rice, cabbage, tomato (protected), apple, pepper (protected)	甜菜夜蛾、稻纵卷叶螟、潜叶蛾、棉铃虫、桃小食心虫、烟青虫、二化螟 Beet armyworm, <i>C. medinalis</i> , Leaf miner, <i>H. armigera</i> , Peach fruit moth, <i>Helicoverpa assulta</i> , <i>C. suppressalis</i>	德国 Germany
	硫虫酰胺 thioantraniliprole		2021年 The year 2021	甘蓝 Cabbage	小菜蛾 Diamondback moth	中国 China
	环溴虫酰胺 cyclaniliprole		未登记 (专利期内) Unregistered (Patent period)	—	—	日本 Japan
	氟氯虫双酰胺 fluchloridiniliprole		未登记 (临时批准) Unregistered (Temporary approval)	—	—	中国 China

注：以上信息来源于中国农药信息网 (<http://www.chinapesticide.org.cn/>) 和英国作物生产委员会 (<https://www.bcpc.org/>)。

Note: The above information comes from China Pesticide Information Network (<http://www.chinapesticide.org.cn/>) and the British Crop Production Council (<https://www.bcpc.org/>).

表2 双酰胺类农药田间防效和室内杀虫活性汇总

Table 2 Summary of the field efficacy and indoor insecticidal activity of diamide pesticides

农药类别 Pesticide category	农药品种 Agrochemical	有效含量 Active dosage/ (g/hm ²)	靶标害虫 Target pest	田间防效 Control efficacy/ %	室内杀虫活性 Insecticidal activity		
					方法 Method	致死中浓度 LC ₅₀ /(mg/L)	
氯虫苯甲酰胺 chlorantraniliprole		33.75	甜菜夜蛾 ^[32] Beet armyworm	80.8~98.1	—	—	
		33.75	斜纹夜蛾 ^[33] <i>S. litura</i>	87.1~95.3	人工饲料混药法 Artificial feed mixed drug method	1.12 μg/g	
		45	棉铃虫 ^[34] <i>H. armigera</i>	82.5~95.4	浸渍法 Immersion method	0.14	
		30~45	草地贪夜蛾 ^[35] Fall armyworm	96.9	人工饲料混药法 Artificial feed mixed drug method	0.07	
		50	美国白蛾 ^[36] <i>Hyphantria cunea</i>	88.9~92.9	浸叶法 Leaf dipping method	0.32~1.10	
		30	小菜蛾 ^[37] Diamondback moth	63.5~97.7	浸渍法 Immersion method	0.99~11.81	
		30	玉米螟 ^[38] Corn borer	79.9~89.4	药膜法/茎秆喷雾法 Film method/Stem spray method	0.14~0.19	
		17.5	桃小食心虫 ^[39-40] Peach fruit moth	80.3~86.7	浸渍法 Immersion method	2.01~5.84	
		26.6	蒂蛀虫 ^[41] <i>C. sinensis</i>	92.68	—	—	
		30	稻纵卷叶螟 ^[42] <i>C. medinalis</i>	92.0~97.1	浸渍法 Immersion method	0.23	
		30	二化螟 ^[42] <i>C. suppressalis</i>	93.0~93.2	浸渍法 Immersion method	0.45	
		42	二化螟、三化螟 ^[43] <i>C. suppressalis</i> , <i>S. incertulas</i>	93.2~96.3	—	—	
	邻甲酰胺基苯甲酰胺类 o-Carboxamidobenzamide		—	大螟 ^[42] <i>S. inferens</i>	—	浸渍法 Immersion method	0.25
			—	小地老虎 ^[44] <i>A. ypsilon</i>	—	浸叶法 Leaf dipping method	2.73
		—	黏虫 ^[45] <i>Mythimna separata</i>	—	浸叶法 Leaf dipping method	0.57~1.64	
		—	—	—	—	—	
溴氰虫酰胺 cyantraniliprole		5~25	柑橘木虱 ^[46] <i>C. psylla</i>	77.2~98.3	药膜法 Film method	1.49	
		5~10	枸杞蚜虫 ^[12] <i>Aphis</i> spp.	56.9~99.9	浸虫法 Dip method	48.93	
		6.67~13.33	西花蓟马 ^[47] <i>Frankliniella occidentalis</i>	53.8~77.8	—	—	
		30~45	草地贪夜蛾 ^[35] Fall armyworm	93.8	人工饲料混药法 Artificial feed mixed drug method	0.11	
		—	烟青虫 ^[48] <i>H. assulta</i>	—	饲料混毒法 Feed mixed poison method	0.09	
		3	桃小食心虫 ^[39] Peach fruit moth	72.9~83.6	—	—	
四氯虫酰胺 tetrachlorantraniliprole		15~60	玉米螟 ^[38] Corn borer	67.6~90.4	药膜法/茎秆喷雾法 Film method/Stem spray method	0.61~1.03	
		0.2~4	美国白蛾 ^[49] <i>H. cunea</i>	90.1~98.5	喷雾法 Nebulization	0.50	
		30	水稻螟虫 ^[43] Rice pests	67.3~83.6	—	—	
		22.5~37.5	棉铃虫 ^[50] <i>H. armigera</i>	60.7~94.6	—	—	
		2.5~10	瓜绢螟 ^[51] <i>C. cucurbitalis</i>	52.0~90.8	—	—	

续表 2
Table 2 (Continued)

农药类别 Pesticide category	农药品种 Agrochemical	有效含量 Active dosage/ (g/hm ²)	靶标害虫 Target pest	田间防效 Control efficacy/ %	室内杀虫活性 Insecticidal activity	
					方法 Method	致死中浓度 LC ₅₀ /(mg/L)
	四唑虫酰胺 tetraniliprole	13.5~27	斜纹夜蛾 ^[31] <i>S. litura</i>	76.9~94.0	人工饲料混药法 Artificial feed mixed drug method	0.58 μg/g
			甜菜夜蛾 ^[52] Beet armyworm		人工饲料混药法 Artificial feed mixed drug method	0.04~5.51
		24~30	稻纵卷叶螟 ^[11] <i>C. medinalis</i>	81.2~96.4	—	—
		20~40	二化螟 ^[10] <i>C. suppressalis</i>	79.1~93.7	—	—
		8	桃小食心虫 ^[39] Peach fruit moth	78.0~89.9	—	—
	硫虫酰胺 thiorantraniliprole	4~6.7	美国白蛾 ^[36] <i>H. cunea</i>	79.5~94.5	浸叶法 Leaf dipping method	0.26~1.14
间甲酰胺苯甲酰胺类 M-formamide benzamide bisamides	溴虫氟苯双酰胺 broflanilide	15~24	小菜蛾 ^[14] Diamondback moth	87.2~94.5	药膜法 Film method	0.04
		/	棉铃虫 ^[13] <i>H. armigera</i>	—	—	0.04~0.07
		3~5	黑刺粉虱 ^[15] <i>Aleurocanthus spiniferus</i>	61.8~94.6	—	—
		3~5	小贯小绿叶蝉 ^[15] <i>Empoasca onukii</i>	83.6~95.7	—	—
邻苯二甲酰胺类 Phthalamide	氟苯虫酰胺 flubendiamide	45	棉铃虫 ^[34] <i>H. armigera</i>	79.7~92.6	浸渍法 Immersion method	0.13
		30~45	草地贪夜蛾 ^[35] Fall armyworm	53.1	人工饲料混药法 Artificial feed mixed drug method	0.93
	氯氟氰虫酰胺 cyhalodiamide	15~45	草地贪夜蛾 ^[53] Fall armyworm	86.1~99.0	浸叶法 Leaf dipping method	0.30

注：“—”表示该数据缺失。

Note: “—” indicates the lack of data.

甲酰胺、溴氰虫酰胺、四唑虫酰胺和环溴虫酰胺产生中高水平的抗性，抗性强度 I4790K (1199~2778 倍) > G4946E (39~739 倍) > I4790M (16~57 倍)^[7]。目前研究发现，主要起抗性作用的解毒代谢酶有多功能氧化酶 (MFO)、酯酶 (EST)、谷胱甘肽-S-转移酶 (GSTs) 和细胞色素 P450 (CYP450) 等^[16-17]。对此，有研究用增效醚、脱叶磷和顺丁烯二酸二乙酯 3 种增效剂来抑制 MFO、EST 和 GSTs 的活性，以此来增强氯虫苯甲酰胺对小菜蛾的毒杀作用，发现其对小菜蛾抗性种群的增效作用可分别达到 2.03、3.93 和 2.42 倍，表明 3 种解毒代谢酶在小菜蛾对氯虫苯甲酰胺的抗性形成及提升中均起到一定作用^[16,18]。

综上所述，双酰胺类农药作用机制独特，对鳞翅目等咀嚼式口器害虫防治效果优异，今后可继续扩大研究其防治谱，如可针对双翅目、半翅目等害虫进行防治；针对靶标害虫 RyR 突变现象，建议在田间应用时，将双酰胺类杀虫剂与不

同类型杀虫剂复配使用，以延缓田间种群对该类药剂抗性的产生；针对解毒代谢酶活性增强的问题，建议结合使用增效剂来抑制酶的活性。后续建议进一步挖掘靶标害虫对双酰胺类杀虫剂产生抗性的机理，可从靶标害虫表皮穿透速率降低方面切入。

2 生态毒性

双酰胺类农药对非靶标生物的毒性，是评价其安全使用的重要要素之一。目前，双酰胺类杀虫剂的生态毒性研究集中在家蚕、大型蚤、鱼类、藻类、蚯蚓、鸟类、蜜蜂和赤眼蜂等 (表 3)，本文结合国内外双酰胺类农药生态毒理学数据，统一采用《化学农药环境评价实验准则》进行急性毒性分级^[19]。

首先，研究表明，双酰胺类农药氟苯虫酰胺、氯虫苯甲酰胺、溴氰虫酰胺、四氯虫酰胺和硫虫酰胺对家蚕表现为剧毒级，LC₅₀ 值为 0.061~

表 3 双酰胺类农药对非靶标生物毒性分级汇总表
Table 3 Summary of the toxicity classification of diamide pesticides to non-target organisms

非靶标生物 Non-target organism	氟苯虫酰胺 flubendiamide		氯虫苯甲酰胺 chlorantraniliprole		溴氰虫酰胺 cyantraniliprole		四氯虫酰胺 tetracloranthraniliprole		四唑虫酰胺 tetraniliprole		硫虫酰胺 thioanthraniliprole		环溴虫酰胺 cyclaniliprole		溴虫氟苯双酰胺 broflumide	
	毒性 Toxicity	分级 Grading	毒性 Toxicity	分级 Grading	毒性 Toxicity	分级 Grading	毒性 Toxicity	分级 Grading	毒性 Toxicity	分级 Grading	毒性 Toxicity	分级 Grading	毒性 Toxicity	分级 Grading	毒性 Toxicity	分级 Grading
家蚕 <i>Bombyx mori</i>	96 h-LC ₅₀ = 0.06 mg/L	剧毒 ^[21] hypertoxic	96 h-LC ₅₀ = 0.12 mg/L	剧毒 ^[21] hypertoxic	96 h-LC ₅₀ = 0.30 mg/L	剧毒 ^[21] hypertoxic	24 h-LC ₅₀ = 0.07 mg/L	剧毒 ^[20] hypertoxic	—	—	96 h-LC ₅₀ = 0.49 mg/L	剧毒 ^[21] hypertoxic	—	—	—	—
大型蚤 <i>Daphnia magna</i>	48 h-EC ₅₀ = 0.02 mg/L	剧毒 ^[21] hypertoxic	48 h-EC ₅₀ = 0.003 mg/L	剧毒 ^[21] hypertoxic	48 h-EC ₅₀ = 0.08 mg/L	剧毒 ^[21] hypertoxic	—	—	EC ₅₀ = 0.071 mg/L	剧毒 ^[24] hypertoxic	48 h-EC ₅₀ = 0.04 mg/L	剧毒 ^[21] hypertoxic	48 h-EC ₅₀ = 0.08 mg/L	剧毒 ^[23] hypertoxic	—	—
鱼类(斑马鱼、鲤鱼) Pisces (Zebrafish, carp)	96 h-LC ₅₀ = 100 mg/L	低毒 ^[21] Low toxicity	96 h-LC ₅₀ = 40.18 mg/L	低毒 ^[21] Low toxicity	96 h-LC ₅₀ = 63.75 mg/L	低毒 ^[21] Low toxicity	96 h-LC ₅₀ = 89.11 mg/L	低毒 ^[20] Low toxicity	LC ₅₀ > 10 mg/L	低毒 ^[24] Low toxicity	96 h-LC ₅₀ > 0.16 mg/L	高毒 ^[21] High toxicity	96 h-LC ₅₀ > 0.63 mg/L	高毒 ^[23] High toxicity	96 h-LC ₅₀ > 10 mg/L	低毒 ^[21] Low toxicity
藻类(斜生栅藻、羊角月芽藻) Alga (<i>Tetradasmus obliquus</i> , <i>Selenastrum capricornutum</i>)	72 h-EC ₅₀ = 100 mg/L	低毒 ^[21] Low toxicity	72 h-EC ₅₀ > 100 mg/L	低毒 ^[21] Low toxicity	72 h-EC ₅₀ > 100 mg/L	低毒 ^[21] Low toxicity	—	—	EC ₅₀ = 1.4 mg/L	中毒 ^[24] Moderate toxicity	72 h-EC ₅₀ > 0.1 mg/L	高毒 ^[21] High toxicity	72 h-EC ₅₀ > 0.17 mg/L	高毒 ^[23] High toxicity	—	—
蜜蜂(意大利蜜蜂) Honey bee (Italian bee)	48 h-LC ₅₀ = 2000 mg/L	低毒 ^[21] Low toxicity	48 h-LC ₅₀ > 2000 mg/L	低毒 ^[21] Low toxicity	48 h-LC ₅₀ = 2.90 mg/L	高毒 ^[21] High toxicity	—	—	LD ₅₀ = 0.01-0.05 µg/蜂	高毒 ^[24] High toxicity	48 h-LD ₅₀ = 40.2 µg/蜂	低毒 ^[21] Low toxicity	48 h-LD ₅₀ = 3.8 µg/蜂	中毒 ^[23] Moderate toxicity	—	—
蚯蚓(赤子爱胜蚓) Earthworm (<i>Eisenia foetida</i>)	14 d-LC ₅₀ = 100 mg/kg	低毒 ^[21] Low toxicity	14 d-LC ₅₀ > 100 mg/kg	低毒 ^[21] Low toxicity	14 d-LC ₅₀ = 100 mg/kg	低毒 ^[21] Low toxicity	—	—	LC ₅₀ > 4000 mg/kg	低毒 ^[24] Low toxicity	14 d-LC ₅₀ = 100 mg/kg	低毒 ^[21] Low toxicity	14 d-LC ₅₀ > 500 mg/kg	低毒 ^[23] Low toxicity	—	—
鸟类(鹌鹑、山齿鹑) Birds (<i>Coturnix japonica</i> , <i>Cotinus virginianus</i>)	—	—	LD ₅₀ > 2250 mg/kg	低毒 ^[24] Low toxicity	LD ₅₀ > 2250 mg/kg	低毒 ^[24] Low toxicity	—	—	LD ₅₀ > 2000 mg/kg	低毒 ^[24] Low toxicity	7 d-LD ₅₀ = 2000 mg/kg	低毒 ^[21] Low toxicity	14 d-LD ₅₀ > 2000 mg/kg	低毒 ^[23] Low toxicity	—	—
赤眼蜂(松毛虫赤眼蜂、蚜黄赤眼蜂) Trichogrammatid (<i>Trichogramma dendrolimi</i> , <i>T. chilonis</i>)	1 h-LC ₅₀ = 0.99 mg/L	低毒 ^[20] Low toxicity	1 h-LC ₅₀ = 1.01 mg/L	低毒 ^[20] Low toxicity	LC ₅₀ = 2.44 mg/L	低毒 ^[21] Low toxicity	—	—	1 h-LC ₅₀ = 1.15 mg/L	低毒 ^[20] Low toxicity	24 h-LR ₅₀ > 30000 g/hm ²	低毒 ^[21] Low toxicity	—	—	—	—

注：“—”表示该数据缺失。
Note: “—” indicates the lack of data.

0.49 mg/L, 在暴露早期家蚕会出现抽搐萎缩、吐出黄色体液等中毒症状, 其中氟苯虫酰胺的毒性最强^[20-22]; 氟苯虫酰胺、氯虫苯甲酰胺、溴氰虫酰胺、四唑虫酰胺、硫虫酰胺、环溴虫酰胺对大型溞均表现为剧毒级, EC_{50} 值为 0.003~0.081 mg/L, 其中毒表现为原地打转、无蜕皮等症状^[21-23]。其次, 针对双酰胺类农药的高等和中等毒性主要集中在溴氰虫酰胺、四唑虫酰胺、硫虫酰胺、环溴虫酰胺 4 种药剂和鱼类、藻类、蜜蜂 3 种非靶标生物上, 硫虫酰胺和环溴虫酰胺对鱼类和藻类表现为高等毒性^[22-23], 其中硫虫酰胺毒性更高, 溴氰虫酰胺和四唑虫酰胺对蜜蜂表现为高毒, 且溴氰虫酰胺对蜜蜂的毒性是氟苯虫酰胺和氯虫苯甲酰胺的 100 倍以上^[21,24], 因此应该注意在花期谨慎使用该两种药剂。四唑虫酰胺对藻类和环溴虫酰胺对蜜蜂均表现为中等毒性^[24-25]。氟苯虫酰胺、氯虫苯甲酰胺、溴氰虫酰胺、四氯虫酰胺、四唑虫酰胺和溴虫氟苯双酰胺对鱼类均表现为低毒^[21,24,26-27], 但高浓度的氯虫苯甲酰胺和溴氰虫酰胺会使斑马鱼出现侧卧缸底和游动缓慢等症状^[21], 暴露在质量浓度为 0.2 mg/L 的溴虫氟苯双酰胺中的斑马鱼, 稳定状态下生物富集指数 (BCFSS) 为 69.40, 显著高于 2.0 mg/L 时的 BCFSS 值 10.02, 可见在低浓度环境下, 溴虫氟苯双酰胺会导致鱼类的富集风险^[21,24,26-27]。氟苯虫酰胺、氯虫苯甲酰胺和溴氰虫酰胺对藻类表现为低毒, 氟苯虫酰胺、氯虫苯甲酰胺和硫虫酰胺对蜜蜂均为低毒。氟苯虫酰胺、氯虫苯甲酰胺、溴氰虫酰胺、四唑虫酰胺、硫虫酰胺和环溴虫酰胺对蚯蚓和鸟类也均表现为低毒^[21-24], 四氯虫酰胺即使在 1000 mg/kg 下, 也不会引起蚯蚓的显著性死亡^[28], 但氟苯虫酰胺在土壤中的含量大于 5.0 mg/kg 时, 会在蚯蚓体内造成脂质过氧化、蛋白质碳基化和 DNA 损伤, 产生很高风险^[29]。有研究表明: 氟苯虫酰胺、氯虫苯甲酰胺和四唑虫酰胺对松毛虫赤眼蜂的毒性 1h- LC_{50} 值为 0.9933~1.154 mg/L, 表现出较高的安全性^[30]; 95% 溴氰虫酰胺原药对螟黄赤眼蜂表现为低毒, 但另一研究发现使用 10% 溴氰虫酰胺的油悬浮剂对螟黄赤眼蜂毒性较强, 接触 6 h 后死亡率均超过 96%, 造成该差异的原因可能与药剂的剂型有关^[31], 但具体原因还未明确, 需进一步探究。

综上所述, 双酰胺类农药对水生生物大型溞剧毒, 且硫虫酰胺和环溴虫酰胺对鱼类和藻类高毒, 该类农药可能对水生生态环境造成潜在威胁, 应注重该类农药在使用过程中的环境风险监

测。此外, 溴虫氟苯双酰胺对鱼类低毒, 而有关氯氟氰虫酰胺和氟氯虫双酰胺对水生生物的毒性暂未见报道, 后续可深入开展相关研究, 为其科学精准应用提供理论支撑。

3 分析方法

建立快速、高灵敏度的分析方法, 对于追踪动植物、环境样本等介质中双酰胺类农药的行为规律具有重要意义。双酰胺类农药的分析方法主要涵盖植物源、动物源、食用菌、环境等介质, 其中在植物源介质中的研究最为广泛, 涉及到液相色谱-串联质谱法 (LC-MS/MS)^[56-66]、液相色谱法 (LC)^[60,67-68]、气相色谱-串联质谱法 (GC-MS/MS)^[69-70]、气相色谱法 (GC)^[71]、电化学方法^[72], 方法定量限 (LOQ) 和检出限 (LOD) 最低为 0.16 和 0.048 $\mu\text{g}/\text{kg}$ ^[66]。有研究采用 1% 甲酸-乙腈作为提取剂, 经 C_{18} 、*N*-丙基乙二胺和硅藻土填料净化, Accucore aQ 柱进行分离, 电喷雾正离子多反应监测模式检测, 建立了氯虫苯甲酰胺等 38 种农药在水果中的 LC-MS/MS 定性定量方法, LOD 为 0.3~26.2 $\mu\text{g}/\text{kg}$, LOQ 为 0.6~52.4 $\mu\text{g}/\text{kg}$ ^[63]; 还有采用 LC-MS/MS 方法建立了检测蜂花粉中的氟苯虫酰胺, 该方法洗脱时间 < 4 min, LOQ (4 $\mu\text{g}/\text{kg}$) 远低于蜂花粉中该药剂的最高残留水平 (50 $\mu\text{g}/\text{kg}$), 他们首次采用了增强型脂类去除材料作为吸附剂用于降低复杂基质蜂花粉的基质效应, 有效提高了方法灵敏度^[64]。在动物源介质中多采用 LC-MS/MS 和 LC, 通过分散固相萃取前处理技术, 建立了同时测定动物源食品中氟苯虫酰胺、氯虫苯甲酰胺、溴氰虫酰胺、四氯虫酰胺和环溴虫酰胺的分析方法, 该方法采用电喷雾离子源负离子多反应监测模式检测, 结果表明 5 种双酰胺类农药的回收率为 79.6%~112.4%, 相对标准偏差为 0.4%~6.9%, LOD 和 LOQ 分别为 0.7~1.0 和 2.0~3.0 $\mu\text{g}/\text{kg}$ ^[73], 该方法为动物源食品中此类农药的最大残留限量值的制定和日常监控提供技术支持。针对食用菌的残留测定, 有研究基于 LC-MS/MS 在 5 min 内完成 5 种双酰胺类农药在食用菌中的定性定量分析, 其中溴氰虫酰胺和氯虫苯甲酰胺采用正离子模式, 四氯虫酰胺、环溴虫酰胺和氟苯虫酰胺采用负离子模式, LOQ 为 5 $\mu\text{g}/\text{kg}$, LOD 为 0.05~2 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 该方法可以快速筛查农药残留, 确保食品安全^[71]; 在水、土壤和沉积物等环境介质^[74-77]中多采用 LC-MS/MS 和 LC 法, 已有研究针对环境水中的双酰胺类农药检测, 以金属有机

框架(MOFs)作为痕量吸附剂,检出限低至0.01~0.03 $\mu\text{g}/\text{kg}$,回收率85.0%~110.1%,RSD小于10%^[4],正确度和精密度优异,该方法为建立基于纳米材料的双酰胺类农药分析样品制备方法开辟了新视角;其他针对双酰胺类农药制剂的有效含量测定多采用LC和GC法^[78-81]。

综上所述,LC-MS/MS法在双酰胺类农药痕量分析中灵敏度和分析效率最优,应用最广,其次为GC-MS/MS法,LC和GC法应用相对较少。该类农药分析方法学研究的不断优化完善,为后续残留行为和风险评估研究奠定了基础,

此外,电化学方法成本低、操作简便,可进一步补充到方法学研究中,以获得更佳的分分析效果。

4 残留行为

残留行为是评价双酰胺类农药风险评估的重要指标,也是食品安全性评价的重要依据。双酰胺类农药的残留行为研究主要集中在植物体、水以及土壤介质中,涉及到消解、光解及残留水平等方面。

研究表明,双酰胺类农药的消解半衰期大致在0.5~27.7 d(表4),其中在作物上的消解半衰期

表4 双酰胺类农药残留行为汇总

Table 4 Summary of residual behavior of diamide pesticides

基质 Matrix	农药品种 Agrochemical	消解半衰期 Degradation half life/ d	残留量 Amount of residue/ (mg/kg)	规范试验 残留中值 STMR/ (mg/kg)	最高 残留值 HR/ (mg/kg)	最大残留 限量 MRL/ (mg/kg)	
辣椒 ^[88] Pepper	氟苯虫酰胺 flubendiamide	4.3~6.6	0~25 d: 0.08~0.61	0.19	0.61	0.7	
甘蓝 ^[103] Cabbage	氟苯虫酰胺 flubendiamide	3.4~3.6	—	—	—	0.2	
龙眼 ^[104] Longan	氯虫苯甲酰胺 chlorantraniliprole	—	7~21 d: 0.02~0.43	0.11	0.43	—	
铁皮石斛 ^[99] Medicinal dendrobium herb	氯虫苯甲酰胺 chlorantraniliprole	—	3~120 d: 1.00~11.5	2.58	11.5	—	
烟草、土壤 ^[87] Tobacco, soil	氯虫苯甲酰胺 chlorantraniliprole	12~27.7	5~14 d: 0.08~12	3.6	12	—	
植物源性介质 Medium of plant origin	毛豆、土壤 ^[105] Soybeans, soil	3.1~10.2	1~7 d: 0.003~1.01	0.28	1.01	2	
豇豆、土壤 ^[95] Soybeans, soil	氯虫苯甲酰胺 chlorantraniliprole	5.3~17.3	3~7 d: <0.001~0.33	0.04	0.33	0.5	
秋葵、土壤 ^[86] Okra, soil	氯虫苯甲酰胺 chlorantraniliprole	2.21~2.16	0~7 d: 0.01~0.31	0.09	0.31	0.6	
花椰菜 ^[106] Cauliflower	溴氰虫酰胺 cyantraniliprole	3.9	0~14 d: 0.07~3.04	0.32	3.04	2	
南瓜 ^[107] Pumpkin	溴氰虫酰胺 cyantraniliprole	10.2	7~21 d: <0.01~0.03	0.02	0.03	0.3	
番茄 ^[108] Tomato	四唑虫酰胺 tetraniliprole	2.7~3.5	1~15 d: 0.05~1.75	0.33	1.75	—	
黄瓜 ^[109] Cucumber	四氯虫酰胺 tetrachlorantraniliprole	5.5	38 d: 0.05	—	—	—	
糙米、土壤、植株 ^[90] Brown rice, soil, plant	氯虫苯甲酰胺 chlorantraniliprole	0.85~16.0	7~21 d: 0.01~0.03	0.01	0.03	0.5	
稻田水、土壤、植株 ^[91] Rice field water, soil, plant	四唑虫酰胺 tetraniliprole	1.4~4.7	14~28 d: 0.01~0.84	0.02	0.84	—	
稻田水、土壤、植株 ^[89] Rice field water, soil, plant	氯氟氰虫酰胺 cyhalodiamide	1.5~15.4	—	—	—	—	
环境介质 Environmental medium	稻田水、土壤、植株、稻壳 ^[92] Rice field water, soil, plant, rice hull	溴虫氟苯双酰胺 broflanilide	0.5~5.3	14~30 d: 0.01~1.20	0.02	1.20	—
不同缓冲溶液(pH=4、6.86、9.18)、地表水、稻田水、水库水、湖水、重蒸水 ^[93] Different buffer solutions (pH = 4, 6.86, 9.18), surface water, paddy field water, reservoir water, lake water, redistilled water	氟苯虫酰胺 flubendiamide	3.0~6.9	—	—	—	—	
	氯虫苯甲酰胺 chlorantraniliprole	3.6~7.5	—	—	—	—	

注: “—”表示该数据缺失。

Note: “—” indicates the missing data.

为 2.21~13.3 d、土壤中为 2.16~27.7 d, 在土壤中的消解半衰期普遍比在作物植株上的要长, 这可能是由于土壤有机质、阳离子交换能力和较多的黏粒使土壤吸附能力增强所致^[82-85], 其中秋葵及其土壤的消解半衰期最短, 为 2.21 和 2.16 d^[86]; 烟草及其土壤消解半衰期最长, 为 12~13.3 d 和 24.8~27.7 d^[87], 氟苯虫酰胺在田间辣椒果实中的消解速率大于室内, 半衰期分别为在田间 4.3~4.7 d, 室内 5.6~6.6 d, 该研究表明, 在室内免受降雨等环境效应的保护, 可能导致田间土壤中的农药积累, 而在田间降雨可以促进农药的淋溶和径流^[88], 这说明消解速率可能与生长稀释、雨水冲刷及气候因子有关。在水稻栽培体系中, 氯氟氰虫酰胺^[89]、氯虫苯甲酰胺^[90]的消解速率表现为稻田水 > 稻田植株 > 稻田土, 四唑虫酰胺^[91]、溴虫氟苯双酰胺^[92]的消解速率则表现为稻田土 > 稻田植株 > 稻田水, 出现这些差异与作物品种、地理位置、气候以及光照强度等因素有关。此外, 有研究表明, 氯虫苯甲酰胺和氟苯虫酰胺在 5 种不同自然水体中的光解半衰期由长到短依次是重蒸水、稻田水、水库水、地表水和湖水, 造成该差异的原因是受到水体 pH 值以及水中有机质对光能的吸收和传导的影响^[93]。双酰胺类农药在作物上的最终残留量为 0.01~12 mg/kg, 在土壤中的为 0.003~9.70 mg/kg。双酰胺类农药规范试验残留中值 (STMR) 为 0.01~3.6 mg/kg, 最高残留值 (HR) 为 0.03~12 mg/kg, 氯虫苯甲酰胺在烟草中的 HR 为最高, 根据 GB 2763^[94] 和欧盟官网^[95] 所得的最大残留限量 (MRLs), 所汇总药剂均满足作物已有的 MRLs 标准。

综上所述, 双酰胺类农药属于易降解农药, 消解速率受到生长稀释及气候条件、土壤属性等多种环境因子的影响; 在土壤中的吸附能力, 受到土壤有机质、阳离子交换能力和土壤质地的影响; 关于双酰胺类农药在环境中的迁移、分布、转化等研究甚少, 尚需加强; 大多数药剂符合其 MRL 标准, 针对双酰胺类农药的 MRLs 缺失较多, 建议加快相关限量标准制定。

5 风险评估

风险评估是双酰胺类农药残留限量标准制定和应用风险管控的重要技术手段。目前双酰胺类农药的风险评估主要涵盖膳食风险和生态风险两

大范畴, 涉及部分职业暴露风险评估。2014—2019 年多项研究根据氯虫苯甲酰胺在登记作物中的 MRLs、STMR 和每日允许摄入量 (ADI, 2 mg/kg), 结合我国居民膳食结构及平均体重, 采用确定性风险评估模型持续关注其慢性膳食暴露风险。2014 年研究采用豇豆 STMR (0.044 mg/kg) 以及水稻、甘蓝、花椰菜、菜用大豆、甘蔗、玉米和苹果 7 种登记作物的 MRLs (0.02~7 mg/kg)^[96] 评估得出, 氯虫苯甲酰胺慢性膳食风险为 0.69%^[97]; 2016 年, 氯虫苯甲酰胺在我国的登记作物新增大豆、番茄、姜、辣椒、马铃薯、西瓜、小白菜和豇豆, 结合铁皮石斛的 STMR (2.58 mg/kg) 和登记作物的 MRLs (0.02~20 mg/kg)^[98] 评估得出其慢性膳食风险增加为 3.59%^[99]; 2019 年进一步扩大登记棉花、小青菜、番茄、茭白和甘薯 5 种作物, 结合山楂的 STMR (0.19 mg/kg) 评估指出, 氯虫苯甲酰胺在 20 种登记作物中的膳食总风险为 1.80%^[100]。风险商 (RQ) 值的波动主要是由于作物 STMR 归属作物种类不同导致。上述研究中 RQ 值均远小于 100%, 可见, 氯虫苯甲酰胺的短期和长期膳食摄入不会对消费者产生不可接受的暴露风险。农药残留联席会议 (JMPR) 指出, 氯虫苯甲酰胺、溴氰虫酰胺、环溴虫酰胺等的急性毒性较低, 不具有发育毒性和单次给药可能引起的其他毒理学效应 (如遗传毒性、神经毒性等)。在生态风险评估方面, 研究通过田间模拟稻蟹共养体系描述氯虫苯甲酰胺对浮游动植物和螃蟹的暴露风险, 根据稻田水和沉积物中氯虫苯甲酰胺大范围监测浓度分别为 0.02~0.09 和 0.24~0.56 $\mu\text{g/L}$, 运用生态结构活动关系模型 (ECOSAR) 计算其在水生生态系统中预测无效应浓度 (PNEC), 评估得出其对浮游植物、浮游动物和中华绒螯蟹的 RQ 值分别为 0.7%~3.5%、0.1%~0.4% 和 22.8%~50.9%, 表明该环境暴露水平对中华绒螯蟹和浮游动植物没有生存风险, 但需关注其对螃蟹生长存在潜在风险^[101]。此外, 研究针对稻农常用的氯虫苯甲酰胺等药剂, 采用 McCammon 等提出的空气污染物采样方法, 应用美国 EPA 的估值模型, 评估指出氯虫苯甲酰胺的职业暴露 RQ 值为 2.94×10^{-5} , 表明稻农连续 3 个月吸入被污染的空气不会产生明显的慢性非致癌风险^[102]。

综上所述, 按照良好农业规范 (GAP) 推荐用药, 氯虫苯甲酰胺等双酰胺类农药的膳食和生态

暴露风险是可接受的, 职业暴露等健康效应风险分析研究甚少, 亟待完善; 伴随双酰胺类农药环境投放量持续加大, 登记作物不断增加, 建议后续加强多农药、多作物、多途径与多模型联合暴露风险评估, 为其科学合理应用与精准评价体系建设提供有力支撑。

6 小结

双酰胺类农药作为当全球备受关注的杀虫药剂之一, 在鳞翅目害虫防治领域前景广阔。现因害虫的靶标突变和解毒代谢酶活性的增强, 其对该类药剂产生了中高水平的抗性, 建议与不同品种、不同类型的农药轮换或复配施用, 以延缓或降低害虫抗性的发生, 同时可以将降低表皮穿透速率作为切入点进行抗性机理研究; 双酰胺类农药对水生生物毒性明显, 因此应加强监测水生生态系统, 并深入开展毒理学研究; 在双酰胺类农药中, 采用 LC-MS/MS 进行痕量分析, 效果最优, 常量分析多用 LC 和 GC 法, 而电化学方法成本低、操作简便, 具有良好的应用潜力。对分析方法进行不断优化, 以期建立完善的监测管理网络提供技术支撑。双酰胺类农药的消解速率受到生长稀释、环境因子、作物品种等多因素的影响, 在土壤中的吸附能力与土壤有机质、阳离子交换能力和黏粒含量有关。目前研究表明, 按照农业规范施用药剂, 双酰胺类农药对一般人群的风险是可接受的, 今后应对膳食风险评估进行持续关注, 且进行生态风险和职业暴露风险评估, 应加强建立多作物多农药联合的风险评估体系, 推动 MRLs 制定, 为双酰胺类农药的科学进准应用和暴露风险规避提供理论支撑。

参考文献 (References):

- [1] PHILLIP MC MCDUGALL. Agri Service Products Section-2018 Market[R]. PHILLIPS MC DOUGALL, 2019.
- [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.
ZHAO P, YAN Q X, LI X, et al. Status and perspective of diamide insecticides[J]. *Pestic Sci Adm*, 2015, 36(11): 23-29.
- [3] IRAC. Compendium of Pesticide Common Names[R]. British Crop Production Council, 2018.
- [4] MA W, LI J, LI X J, et al. Enrichment of diamide insecticides from environmental water samples using metal-organic frameworks as adsorbents for determination by liquid chromatography tandem mass spectrometry[J]. *J Hazard Mater*, 2021, 422: 126839.
- [5] USEPA. Pesticide fact sheet: chlorantraniliprole [R]. Environmental Protection Agency, 2008.
- [6] USEPA. Flubendiamide: notice of intent to cancel and other supporting documents[R]. Environmental Protection Agency, 2016.
- [7] JIANG D, QIAN C, WANG D H, et al. Varying contributions of three ryanodine receptor point mutations to diamide insecticide resistance in *Plutella xylostella*[J]. *Pest Manag Sci*, 2021, 77(11): 4874-4883.
- [8] ALMÁSSY J, CSERNOCH L, NÁNÁSI P P. Safety concerns of diamide insecticides[J]. *Toxicol Sci*. 2019: kfz061.
- [9] NAKAO T, BANBA S. Broflanilide: A meta-diamide insecticide with a novel mode of action[J]. *Bioorg Med Chem*, 2016, 24(3): 372-377.
- [10] 李卫, 张月, 贾浩然, 等. 18%四唑虫酰胺悬浮剂对水稻二化螟的田间防效[J]. *农药*, 2019, 58(3): 221-222.
LI W, ZHANG Y, JIA H R, et al. Field efficacy of tetraniliprole 18% SC on rice *Chilo suppressalis*[J]. *Agrochemicals*, 2019, 58(3): 221-222.
- [11] 睦丹, 李慧敏, 洪素娣. 不同药剂对稻纵卷叶螟的防治效果[J]. *中国植保导刊*, 2022, 42(2): 58-59.
SUI D, LI H M, HONG S D. Control effect of different chemicals on rice leaf roller[J]. *China Plant Prot*, 2022, 42(2): 58-59.
- [12] 王芳, 杨旭东, 陈佳斌, 等. 溴虱虫酰胺对枸杞蚜虫室内毒力和田间防效[J]. *农药*, 2019, 58(9): 687-689.
WANG F, YANG X D, CHEN J B, et al. Toxicity tests and field efficacy trials of cyantraniliprole 10% OD against Chinese wolfberry aphids[J]. *Agrochemicals*, 2019, 58(9): 687-689.
- [13] TANG T, HU F, WANG P, et al. Broflanilide effectively controls *Helicoverpa armigera* and *Spodoptera exigua* exhibiting diverse susceptibilities to chlorantraniliprole and emamectin benzoate[J]. *Pest Manag Sci*, 2021, 77(3): 1262-1272.
- [14] 齐浩亮, 崔丽, 王芹芹, 等. 溴虱虫酰胺对小菜蛾的毒力及相关酶活性的影响[J]. *植物保护*, 2017, 43(1): 112-116.
QI H L, CUI L, WANG Q Q, et al. Toxicity of broflanilide to *Plutella xylostella* and its influence on the activities of related enzymes in *P. xylostella*[J]. *Plant Prot*, 2017, 43(1): 112-116.
- [15] 王洪涛, 曲恒华, 王英姿, 等. 新型杀虫剂溴虱虫酰胺对2种茶园主要害虫的田间药效评价[J]. *农药*, 2018, 57(9): 696-698.
WANG H T, QU H H, WANG Y Z, et al. Field control efficacy of broflanilide against two major pests in tea plantations[J]. *Agrochemicals*, 2018, 57(9): 696-698.
- [16] 谭晓伟. 小菜蛾对氯虫苯甲酰胺的抗性风险及亚致死效应研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2012.
TAN X W. Resistance risk and sublethal effect of chlorantraniliprole in diamondback moth, *Plutella xylostella* (Lepidoptera: Plutellidae)[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2012.
- [17] GUO L, LIANG P, ZHOU X G, et al. Novel mutations and mutation combinations of ryanodine receptor in achlorantraniliprole resistant population of *Plutella xylostella* (L.)[J]. *Sci Rep*, 2014, 4: 6924.
- [18] 冯国蕾. 害虫抗药性的生化机理[J]. *生物学通报*, 1995, 30(3): 6-8.
FENG G L. Biochemical mechanism of insect resistance[J]. *Bull Biol*, 1995, 30(3): 6-8.
- [19] 化学农药环境安全评价试验准则: GB/T 31270—2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
Experimental guidelines for environmental safety assessment of chemical pesticides: GB/T 3127—2014[S]. Beijing: Standards Press

- of China, 2015.
- [20] 陈伟国, 戴建忠, 董瑞华, 等. 5种双酰胺类杀虫剂对家蚕的毒性比较和安全性评价[J]. 蚕业科学, 2016, 42(2): 288-293.
CHEN W G, DAI J Z, DONG R H, et al. Toxicity comparison and safety evaluation of five diamide insecticides to silkworm, *Bombyx mori*[J]. Sci Seric, 2016, 42(2): 288-293.
- [21] 林涛, 游泳, 郑丽祯, 等. 三种双酰胺类杀虫剂对环境非靶标生物的急性毒性[J]. 农药学报, 2015, 17(6): 757-762.
LIN T, YOU Y, ZHENG L Z, et al. Acute toxicity of three diamide insecticides preparations to environmental non-target organisms[J]. Chin J Pestic Sci, 2015, 17(6): 757-762.
- [22] 硫虫酰胺[J]. 农药科学与管理, 2022, 43(2): 52.
Thiamethoxam [J]. Pestic Sci Adm, 2022, 43(2): 52.
- [23] European Food Safety Authority. Peer review of the pesticide risk assessment of the active substance cyclaniliprole[J]. EFSA, 2016, 14(4): 4452.
- [24] 谭海军. 双酰胺类杀虫剂四唑虫酰胺的特点、合成与应用[J]. 世界农药, 2021, 43(9): 32-42.
TAN H J. Characteristics, synthesis and application of a diamide insecticide: tetraniliprole[J]. World Pestic, 2021, 43(9): 32-42.
- [25] 農林水産省消費・安全局農産安全管理課, 独立行政法人農林水産消費安全技術センター. 審査報告書シクラニプロール[R/OL], 2018.
Department of Consumption and Safety, Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries, Agricultural Production Safety Management Course, Independent Administrative Law Agricultural, Forestry and Fisheries Consumption Technical Book [R/OL], 2018.
- [26] 张琦. 两种双酰胺类农药对家蚕和鲤鱼的毒性安全评价[J]. 基层农技推广, 2020, 8(1): 47-52.
ZHANG Q. Toxicity and safety evaluation of two diamide pesticides to silkworm and carp[J]. Prim Agric Technol Ext, 2020, 8(1): 47-52.
- [27] JIA Z Q, ZHANG Y C, HUANG Q T, et al. Acute toxicity, bioconcentration, elimination, action mode and detoxification metabolism of broflanilide in zebrafish, *Danio rerio*[J]. *J Hazard Mater*, 2020, 394: 122521.
- [28] TENG H Y, YUAN Y D, ZHANG T S, et al. Evaluation of the sublethal effect of tetrachlorantraniliprole on *Spodoptera exigua* and its potential toxicity to two non-target organisms[J]. *PLoS One*, 2020, 15(11): e0242052.
- [29] 刘修园, 赵海刚, 陈志厚, 等. 氟虫双酰胺对蚯蚓的生化毒性与细胞毒性研究[J]. 生态毒理学报, 2017, 12(4): 293-301.
LIU X Y, ZHAO H G, CHEN Z H, et al. Biochemical toxicity and cytotoxicity of flubendiamide on earthworms(*Eisenia fetida*)[J]. *Asian J Ecotoxicol*, 2017, 12(4): 293-301.
- [30] 党志红, 高占林, 赵玉敬, 等. 双酰胺类杀虫剂对棉铃虫和松毛虫赤眼蜂的选择毒力[J]. 环境昆虫学报, 2021, 43(1): 233-238.
DANG Z H, GAO Z L, ZHAO Y J, et al. Selective toxicity of diamide insecticides to *Helicoverpa armigera* and *Trichogramma dendrolimi*[J]. J Environ Entomol, 2021, 43(1): 233-238.
- [31] 李增鑫, 李亮, 何月平. 11种杀虫剂对螟黄赤眼蜂的急性毒性和安全性评价[J]. 热带生物学报, 2021, 12(1): 83-87.
LI Z X, LI L, HE Y P. Toxicity and safety evaluation of four new insecticides on *Trichogramma chilonis*[J]. J Trop Biol, 2021, 12(1): 83-87.
- [32] 姜策, 孟威, 王兴亚, 等. 3种双酰胺类杀虫剂防治甘蓝甜菜夜蛾的防效评价[J]. 农药, 2021, 60(1): 61-62.
JIANG C, MENG W, WANG X Y, et al. The field control efficiency of 3 novel diamide insecticides to control *Spodoptera exigua* in cabbage[J]. *Agrochemicals*, 2021, 60(1): 61-62.
- [33] 徐丽娜, 吴晨源, 胡飞, 等. 四唑虫酰胺对棉田斜纹夜蛾的防治效果[J]. 新疆农业科学, 2020, 57(6): 1090-1094.
XU L N, WU C Y, HU F, et al. Effects of tetraniliprole on the control of *Spodoptera litura* in cotton fields[J]. Xinjiang Agric Sci, 2020, 57(6): 1090-1094.
- [34] 邢家华, 袁静, 郁季平, 等. 新型杀虫剂氟氧氟虫酰胺对棉铃虫的毒力和田间防效[J]. 农药, 2015, 54(11): 842-843.
XING J H, YUAN J, YU J P, et al. Bioactivity and field efficacy of cyhalodiamide against *Helicoverpa armigera*[J]. *Agrochemicals*, 2015, 54(11): 842-843.
- [35] JARROD, T, HARDKE, et al. Laboratory toxicity and field efficacy of selected insecticides against Fall Armyworm (Lepidoptera: Noctuidae)[J]. *FLA ENTOMOL*, 2011, 94(2): 272-278.
- [36] 雷启阳, 江雅琴, 吴华龙, 等. 硫虫酰胺对美国白蛾的杀虫活性和田间防效[J]. 农药, 2021, 60(1): 63-65.
LEI Q Y, JIANG Y Q, WU H L, et al. Bioactivity and field efficacy of HY366 against *Hyphantria cunea*[J]. *Agrochemicals*, 2021, 60(1): 63-65.
- [37] 成燕清, 王培, 唐涛, 等. 小菜蛾对氯虫苯甲酰胺抗药性与田间防治效果的相关性研究[J]. 应用昆虫学报, 2016, 53(2): 320-324.
CHENG Y Q, WANG P, TANG T, et al. Study of the relationship between resistance to chlorantraniliprole and efficacy of control of the diamondback moth(*Plutella xylostella*)[J]. *Chin J Appl Entomol*, 2016, 53(2): 320-324.
- [38] 宋瑞利, 常秀辉. 新型杀虫剂四氯虫酰胺对玉米螟的室内活性及田间药效评价[J]. 农药, 2018, 57(3): 217-218.
SONG R L, CHANG X H. Bioactivity and efficacy of the novel compound tetrachlorantraniliprole against *Ostrinia furnacalis*[J]. *Agrochemicals*, 2018, 57(3): 217-218.
- [39] 刘宴弟, 孙丽娜, 张怀江, 等. 氯虫苯甲酰胺对桃小食心虫生长发育的亚致死效应[J]. 植物保护, 2021, 47(5): 158-163.
LIU Y D, SUN L N, ZHANG H J, et al. Sublethal effects of chlorantraniliprole on the growth and development of *Carpocapsa sasakii*[J]. *Plant Prot*, 2021, 47(5): 158-163.
- [40] 翟浩, 王金政, 李晓军, 等. 桃小食心虫在苹果免套袋果园发生动态及双酰胺类杀虫剂的防治效果[J]. 果树学报, 2019, 36(8): 1058-1066.
ZHAI H, WANG J Z, LI X J, et al. Population dynamics of *Carpocapsa sasakii* Matsumura and the control efficiency of diamide insecticides in an apple orchard without fruit bagging[J]. *J Fruit Sci*, 2019, 36(8): 1058-1066.
- [41] 赵亚, 郭利军, 胡福初, 等. 荔枝蒂蛀虫的田间药效试验[J]. 农药, 2019, 58(4): 300-302.
ZHAO Y, GUO L J, HU F C, et al. Preliminary report on the results of field trials of synergistic reduction and reduction of fungicides to *Conopomorpha sinensis* Bradley[J]. *Agrochemicals*, 2019, 58(4): 300-302.
- [42] 袁静, 郁季平, 张晓铭, 等. 氟氧氟虫酰胺对水稻害虫的杀虫活性及田间防效[J]. 农药, 2015, 54(1): 76-78.
YUAN J, YU J P, ZHANG X M, et al. Bioactivity and field efficacy of ZJ3757 against rice pests[J]. *Agrochemicals*, 2015, 54(1): 76-78.
- [43] 张春容, 鄞勤, 邓荣平, 等. 不同药剂对水稻螟虫的田间防效[J]. 中国植保导刊, 2021, 41(9): 75-77.
ZHANG C R, YAN Q, DENG R P, et al. Field control effect of different pesticides on rice stem borers[J]. *China Plant Prot*, 2021,

- 41(9): 75-77.
- [44] 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.
HE F L, JIANG X Y, YAO C T, et al. Co-toxicity of chlorantraniliprole with six insecticides against *Agrotis ipsilon*[J]. Plant Prot, 2018, 44(6): 236-241.
- [45] 董杰, 岳瑾, 乔岩, 等. 5种杀虫剂对北京地区黏虫的室内毒力测定[J]. 中国植保导刊, 2014, 34(10): 71-73.
DONG J, YUE J, QIAO Y, et al. Indoor toxicity test of five insecticides to myxomycetes in Beijing[J]. China Plant Prot, 2014, 34(10): 71-73.
- [46] 程晓琴, 赵政, 夏长秀, 等. 叶喷和土施化学药剂对柑橘木虱的防效研究[J]. 应用昆虫学报, 2018, 55(4): 646-653.
CHENG X Q, ZHAO Z, XIA C X, et al. Comparison of the effectiveness of applying different pesticides to foliar spraying and soil-drench to control *Diaphorina citri* Kuwayama[J]. Chin J Appl Entomol, 2018, 55(4): 646-653.
- [47] 王帅宇, 贾峰勇, 吴迪, 等. 7种杀虫剂对茄子西花蓟马的防治效果[J]. 农药, 2018, 57(8): 617-619.
WANG S Y, JIA F Y, WU D, et al. Control effect of seven pesticides on *Frankliniella occidentalis* in eggplant field[J]. Agrochemicals, 2018, 57(8): 617-619.
- [48] 王凯. 溴氰虫酰胺对烟青虫的亚致死效应[D]. 洛阳: 河南科技大学, 2015.
WANG K. Sublethal effect of cyantraniliprole on *H. assulta* [D]. Luoyang: Henan University of Science and Technology, 2015.
- [49] 常秀辉, 范晓溪, 班兰凤, 等. 杀虫剂四氯虫酰胺对美国白蛾的室内活性及田间药效评价[J]. 农药, 2018, 57(10): 762-763.
CHANG X H, FAN X X, BAN L F, et al. Bioactivity and field efficacy of the novel compound tetrachlorantraniliprole against *Hyphantria cunea*[J]. Agrochemicals, 2018, 57(10): 762-763.
- [50] 吴莉莉, 陈艳, 才才, 等. 4种杀虫剂对辣椒田棉铃虫的防治效果[J]. 中国植保导刊, 2022, 42(3): 80-82.
WU L L, CHEN Y, CAI C, et al. Control effect of four insecticides on *Helicoverpa armigera* in pepper field[J]. China Plant Prot, 2022, 42(3): 80-82.
- [51] 范晓溪, 宋玉泉, 常秀辉, 等. 10%四氯虫酰胺SC对黄瓜瓜绢螟药效评价[J]. 农药, 2017, 56(6): 459-460.
FAN X X, SONG Y Q, CHANG X H, et al. Efficacy evaluation of 10% tetrachlorantraniliprole SC on cucumber stem borer[J]. Agrochemicals, 2017, 56(6): 459-460.
- [52] JING M, HUANG Y X, ZHAO H, et al. Monitoring and mechanisms of insecticide resistance in *Spodoptera exigua* (Lepidoptera: Noctuidae), with special reference to diamides[J]. Pestic Biochem Physiol, 2021, 174: 104831.
- [53] 胡冬松, 赵灵杰, 郁季平, 等. 氯氟氰虫酰胺对草地贪夜蛾的室内活性及田间防效[J]. 农药, 2020, 59(3): 226-227.
HU D S, ZHAO L J, YU J P, et al. The toxicity and field efficacy of ZJ4042 against *Spodoptera frugiperda*[J]. Agrochemicals, 2020, 59(3): 226-227.
- [54] MA D C, YANG S, JIANG J G, et al. Toxicity, residue and risk assessment of tetraniliprole in soil-earthworm microcosms[J]. Ecotoxicol Environ Saf, 2021, 213: 112061.
- [55] 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.
CHEN J, BAI Y L. Overview on R & D of diamide insecticides and their registrations in China[J]. World Pestic, 2021, 43(3): 22-34.
- [56] 贺敏, 贾春虹, 马志宏, 等. 土壤中噻虫嗪和氯虫苯甲酰胺的残留分析方法[J]. 农药, 2013, 52(6): 431-433.
HE M, JIA C H, MA Z H, et al. Analytical method for thiamethoxam and chlorantraniliprole residues in soil[J]. Agrochemicals, 2013, 52(6): 431-433.
- [57] KUMAR N, NARAYANAN N, BANERJEE T, et al. Quantification of field-incurred residues of cyantraniliprole and IN-J9Z38 in cabbage/soil using QuEChERS/HPLC-PDA and dietary risk assessment[J]. Biomed Chromatogr, 2021, 35(12): e5213.
- [58] 贺敏, 景子伟, 贾春虹, 等. 超高液相色谱-串联质谱法检测番茄和甘蓝中溴虫氟苯双酰胺的残留[J]. 农药, 2019, 58(4): 279-281.
HE M, JING Z W, JIA C H, et al. Simultaneous determination of broflanilide residues in tomato and cabbage by UPLC-MS/MS[J]. Agrochemicals, 2019, 58(4): 279-281.
- [59] 张聪, 游菁菁, 陈亮, 等. 多壁碳纳米管 QuEChERS-液相色谱-串联质谱法快速检测茶叶中氯虫苯甲酰胺残留量[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(20): 8062-8067.
ZHANG C, YOU J J, CHEN L, et al. Rapid determination of chlorantraniliprole in tea by multi-walled carbon nanotubes QuEChERS-liquid chromatography-tandem mass spectrometry[J]. J Food Saf Qual, 2021, 12(20): 8062-8067.
- [60] 梁宇, 司露露, 汪文龙, 等. 高效液相色谱-串联质谱法和高效液相色谱法测定蜂蜜中氯虫苯甲酰胺残留量[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(2): 492-497.
LIANG Y, SI L L, WANG W L, et al. Determination of chlorantraniliprole residues in honey by high performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry and high performance liquid chromatography[J]. J Food Saf Qual, 2022, 13(2): 492-497.
- [61] 王思威, 王潇楠, 常虹, 等. QuEChERS-高效液相色谱-串联质谱法检测荔枝中氯虫苯甲酰胺、溴氰虫酰胺及代谢物残留[J]. 农药学报, 2022, 24(2): 395-403.
WANG S W, WANG X N, CHANG H, et al. Determination of chlorantraniliprole, cyantraniliprole and its metabolites residues in litchi using QuEChERS and high performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry[J]. Chin J Pestic Sci, 2022, 24(2): 395-403.
- [62] 马婧玮, 马欢, 安莉, 等. QuEChERS-高效液相色谱-串联质谱法测定主要谷物和油料作物中氯虫苯甲酰胺的残留[J]. 农药学报, 2018, 20(1): 129-134.
MA J W, MA H, AN L, et al. QuEChERS-determination of chlorantraniliprole residues in primary grain and oilseed crops by high performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry[J]. Chin J Pestic Sci, 2018, 20(1): 129-134.
- [63] 梁秀美, 张维一, 张微, 等. QuEChERS-HPLC-MS/MS法同时测定水果中38种农药的残留量[J]. 食品科学, 2020, 41(8): 288-296.
LIANG X M, ZHANG W Y, ZHANG W, et al. Simultaneous determination of residues of 38 pesticides in fruits by QuEChERS combined with high performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry[J]. Food Sci, 2020, 41(8): 288-296.
- [64] BERNAL J, Nozal M J, MARTIN M T, et al. Trace analysis of flubendiamide in bee pollen using enhanced matrix removal-lipid sorbent clean-up and liquid chromatography-electrospray ionization mass spectrometry[J]. Microchem J, 2019, 148: 541-547.
- [65] 钱兵, 赵婧, 何燕, 等. 超高液相色谱-串联质谱法测定植物源调味料中氯虫苯甲酰胺残留[J]. 热带作物学报, 2019, 40(7): 1455-1459.
QIAN B, ZHAO J, HE Y, et al. Determination of chlorantraniliprole

- residues in plant-derived condiment by UPLC-MS/MS[J]. *Chin J Trop Crops*, 2019, 40(7): 1455-1459.
- [66] 崔淑华, 李瑞娟, 张晓梅, 等. 液相色谱-串联质谱法测定果蔬中双三氟虫脒、四氯虫酰胺和氰虫酰胺残留[J]. *分析化学*, 2017, 45(4): 545-552.
CUI S H, LI R J, ZHANG X M, et al. Determination of new bistrifluron, tetrachlorantraniliprole and cyantraniliprole residues in fruits and vegetables by liquid chromatography tandem mass spectrometry[J]. *Chin J Anal Chem*, 2017, 45(4): 545-552.
- [67] 张云, 陈俊玉, 陈泽宇, 等. 植物油中邻氨基苯甲二酰胺类农药残留检测技术研究[J]. *中国粮油学报*, 2017, 32(8): 118-122.
ZHANG Y, CHEN J Y, CHEN Z Y, et al. Detection technology of *o*-amino benzoic diamide pesticide residues in vegetable oil[J]. *J Chin Cereals Oils Assoc*, 2017, 32(8): 118-122.
- [68] 占绣萍, 陈建波, 马琳, 等. 高效液相色谱法测定糙米和土壤中6种杀虫剂的残留[J]. *农药学学报*, 2013, 15(5): 541-545.
ZHAN X P, CHEN J B, MA L, et al. Residues of six novel insecticides in unpolished rice and soil by high-performance liquid chromatography method[J]. *Chin J Pestic Sci*, 2013, 15(5): 541-545.
- [69] 崔淑华, 郭庆龙, 王英华, 等. 气相色谱-质谱法测定果蔬中四氯虫酰胺和腈吡嘧啶[J]. *分析实验室*, 2019, 38(6): 670-674.
CUI S H, GUO Q L, WANG Y H, et al. Determination of tetrachlorantraniliprole and cyenopyrafen residues in fruits and vegetables by GC-MS[J]. *Chin J Anal Lab*, 2019, 38(6): 670-674.
- [70] 杨松, 王瑶, 禾丽菲, 等. QuEChERS-气相色谱-串联质谱法分析鲜茶叶中6种杀虫剂的残留及消解动态[J]. *分析实验室*, 2019, 38(12): 1459-1464.
YANG S, WANG Y, HE L F, et al. Residue and dissipation dynamics of six insecticides in fresh tea by QuEChERS-gas chromatography tandem mass spectrometry[J]. *Chin J Anal Lab*, 2019, 38(12): 1459-1464.
- [71] Liu T, Dong M, Zhou F, et al. Development and validation of an analytical method for detecting chlorantraniliprole residues in fresh tea leaves[J]. *Food Sci Hum Wellness*, 2019, 8(4): 362-367.
- [72] TUMAY S O, SENOCAK A, SARI E, et al. A new perspective for electrochemical determination of parathion and chlorantraniliprole pesticides *via* carbon nanotube-based thiophene-ferrocene appended hybrid nanosensor[J]. *Sens Actuat B Chem*, 2021, 345: 130344.
- [73] 何旭峰, 黄小兰, 肖琦, 等. QuEChERS-超高效液相色谱-串联质谱法同时测定动物源性食品中5种双酰胺类杀虫剂的残留[J]. *食品安全质量检测学报*, 2021, 12(20): 7977-7985.
HE X F, HUANG X L, XIAO Q, et al. Simultaneous determination of 5 kinds of diamide insecticides residues in animal-derived foods by QuEChERS-ultra performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry[J]. *J Food Saf Qual*, 2021, 12(20): 7977-7985.
- [74] LI W, ZHANG Y, JIA H R, et al. Residue analysis of tetraniliprole in rice and related environmental samples by HPLC/MS[J]. *Microchem J*, 2019, 150: 104168.
- [75] 李策, 蔡磊明, 赵华, 等. 环境中氯氟氰虫酰胺的残留检测方法[J]. *农药*, 2016, 55(5): 366-369.
LI C, CAI L M, ZHAO H, et al. The method for determination of cyhalodiamide residues in environmental samples[J]. *Agrochemicals*, 2016, 55(5): 366-369.
- [76] 丁金凤, 徐春梅, 张薇, 等. QuEChERS-超高效液相色谱-串联质谱法测定玉米植株和土壤中溴氰虫酰胺及其代谢物残留[J]. *农药学学报*, 2018, 20(1): 83-89.
DING J F, XU C M, ZHANG W, et al. Determination of cyantraniliprole and its metabolite in maize plant and soil by QuEChERS and ultra-performance liquid chromatography tandem mass spectrometry[J]. *Chin J Pestic Sci*, 2018, 20(1): 83-89.
- [77] 吕磊, 彭婕, 甘金华, 等. 分散固相萃取-液质联用法测定稻渔综合种养环境中四种农药残留[J]. *环境化学*, 2019, 38(11): 2443-2448.
LYU L, PENG J, GAN J H, et al. Determination of four pesticide residues in rice-aquaculture integrated cultivation environment using dispersion solid phase extraction-high performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry method[J]. *Environ Chem*, 2019, 38(11): 2443-2448.
- [78] 徐赛, 韩冲冲, 李飞, 等. 5%溴虫氟苯二酰胺悬浮剂的高效液相色谱分析方法[J]. *农药*, 2018, 57(1): 29-30.
XU S, HAN C C, LI F, et al. Analysis of broflanilide 5% SC by HPLC[J]. *Agrochemicals*, 2018, 57(1): 29-30.
- [79] 葛家成, 张永芳, 闫欣欣, 等. 5%氟氯虫双酰胺悬浮剂的高效液相色谱分析[J]. *现代农药*, 2022, 21(2): 40-42.
GE J C, ZHANG Y F, YAN X X, et al. Analysis of fluchloridiniliprole 5% suspension concentrate by HPLC[J]. *Mod Agrochem*, 2022, 21(2): 40-42.
- [80] 董燕. 四氯虫酰胺原药高效液相色谱分析[J]. *农药*, 2018, 57(11): 817-819.
DONG Y. Analysis of tetrachlorantraniliprole TC by HPLC[J]. *Agrochemicals*, 2018, 57(11): 817-819.
- [81] 汪建良, 崔彦丽, 岑江杰, 等. 氯氟氰虫酰胺原药气相色谱分析方法[J]. *农药*, 2019, 58(10): 735-736.
WANG J L, CUI Y L, CEN J J, et al. Analytical method for ZJ4042 by GC[J]. *Agrochemicals*, 2019, 58(10): 735-736.
- [82] XIE G, LI B T, TANG L M, et al. Adsorption-desorption and leaching behaviors of broflanilide in four texturally different agricultural soils from China[J]. *J Soils Sediments*, 2021, 21(2): 724-735.
- [83] HARTUNG S, IWASAKI M, OGAWA N, et al. Laboratory tests on sorption and transformation of the insecticide flubendiamide in Japanese tea field soil[J]. *Sci Total Environ*, 2013, 443: 904-909.
- [84] 王廷廷, 余向阳, 刘贤进, 等. 氯虫苯甲酰胺在5种土壤中的吸附和解吸特性[J]. *江苏农业学报*, 2012, 28(1): 204-209.
WANG T T, YU X Y, LIU X J, et al. Sorption and desorption behavior of chlorantraniliprole in five typical soils of China[J]. *Jiangsu J Agric Sci*, 2012, 28(1): 204-209.
- [85] 郭南, 吕珍珍, 周雨杭, 等. 溴氟虫酰胺在土壤中的吸附特性[J]. *农业环境科学学报*, 2022, 41(8): 1750-1757.
GUO N, LYU Z Z, ZHOU Y H, et al. Adsorption characteristics of cyantraniliprole in various soils[J]. *J Agro Environ Sci*, 2022, 41(8): 1750-1757.
- [86] MARIAPPAN P, KAITHAMALAI B. Dissipation kinetics, decontamination and risk assessment of chlorantraniliprole in okra and soil under open field condition using GC-MS[J]. *Int J Environ Anal Chem*, 2022, 102(16): 3694-3706.
- [87] 黄丽, 邓毅书, 浦恩堂, 等. HPLC 测定氯虫苯甲酰胺在烟草和土壤中的残留与消解动态[J]. *西南农业学报*, 2020, 33(2): 395-400.
HUANG L, DENG Y S, PU E T, et al. Residue detection and digestion dynamics of chlorantraniliprole in tobacco plants and soil by HPLC[J]. *Southwest China J Agric Sci*, 2020, 33(2): 395-400.
- [88] BUDDIDATHI R, MOHAPATRA S, SIDDAMALLAIAH L, et al. Dissipation pattern of flubendiamide residues on Capsicum fruit (*Capsicum annum* L.) under field and controlled environmental conditions[J]. *J Environ Sci Health*, 2016, 51(1): 44-51.

- [89] 曹梦超, 王全胜, 王义虎, 等. 氯氟氰虫酰胺在稻田环境中的残留及消解特性[J]. 农药学报, 2015, 17(4): 447-454.
CAO M C, WANG Q S, WANG Y H, et al. Residue and dissipation of cyhalodiamide in rice paddy[J]. Chin J Pestic Sci, 2015, 17(4): 447-454.
- [90] ZHANG J M, CHAI W G, WU Y L. Residues of chlorantranilprole in rice field ecosystem[J]. Chemosphere, 2012, 87(2): 132-136.
- [91] 李卫. 四唑虫酰胺对水稻二化螟的防效及其环境行为研究[D]. 南昌: 江西农业大学, 2020.
LI W. Field efficacy of tetranilprole on rice *Chilo suppressalis* and its environmental behavior[D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2020.
- [92] 徐赛. 溴虫氟苯双酰胺对水稻主要害虫的生物活性及其在水稻环境中的残留[D]. 南昌: 江西农业大学, 2018.
XU S. Bioactivity of broflanilide on main rice pests and its residue in rice field[D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2018.
- [93] 孟志远, 王平, 陈小军, 等. 氯虫苯甲酰胺、氟虫苯甲酰胺在不同水体中降解特性[J]. 江西农业大学学报, 2015, 37(1): 79-83.
MENG Z Y, WANG P, CHEN X J, et al. Degradation characteristics of chlorantranilprole and flubendiamide in different waters[J]. Acta Agric Univ Jiangxiensis, 2015, 37(1): 79-83.
- [94] 食品中农药最大残留限量: GB 2763—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.
Maximum residue limits of pesticides in food: GB 2763—2021[S]. Beijing: Standards Press of China, 2022.
- [95] USEPA. EU Pesticides database: MRLs [R]. Environmental Protection Agency, 2008.
- [96] 食品中农药最大残留限量: GB 2763—2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
Maximum residue limits of pesticides in food: GB 2763—2014[S]. Beijing: Standards Press of China, 2015.
- [97] 张希跃, 吴迪, 潘洪吉, 等. 氯虫苯甲酰胺和高效氯氟氰菊酯在豇豆和土壤中的残留行为[J]. 农药学报, 2016, 18(4): 481-489.
ZHANG X Y, WU D, PAN H J, et al. Residual behavior of chlorantranilprole and λ -cyhalothrin in cowpea and soil[J]. Chin J Pestic Sci, 2016, 18(4): 481-489.
- [98] 食品中农药最大残留限量: GB 2763—2016 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
Maximum residue limits of pesticides in food: GB 2763—2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.
- [99] 许振岚, 陈丽萍, 徐明飞, 等. 氯虫苯甲酰胺和吡唑醚菌酯在铁皮石斛中的残留及消解动态[J]. 农药学报, 2018, 20(2): 223-231.
XU Z L, CHEN L P, XU M F, et al. Residues and dissipation dynamics of chlorantranilprole and pyraclostrobin in *Dendrobium officinale*[J]. Chin J Pestic Sci, 2018, 20(2): 223-231.
- [100] 付岩, 王全胜, 张亮, 等. 氯虫苯甲酰胺在山楂中的残留行为及膳食暴露风险评估[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(12): 4735-4741.
FU Y, WANG Q S, ZHANG L, et al. Residue behaviours and dietary exposure risk assessment of chlorantranilprole in hawthorn[J]. J Food Saf Qual, 2021, 12(12): 4735-4741.
- [101] SONG C, ZHANG J W, HU G D, et al. Risk assessment of chlorantranilprole pesticide use in rice-crab coculture systems in the basin of the lower reaches of the Yangtze River in China[J]. Chemosphere, 2019, 230: 440-448.
- [102] HAMSAN H, HO Y B, ZAIDON S Z, et al. Occurrence of commonly used pesticides in personal air samples and their associated health risk among paddy farmers[J]. Sci Total Environ, 2017, 603-604: 381-389.
- [103] PARAMASIVAM M, BANERJEE H. Dissipation of flubendiamide residues in/on cabbage (*Brassica oleracea* L.)[J]. Environ Monit Assess, 2013, 185(2): 1577-1581.
- [104] 刘艳萍, 王潇楠, 常虹, 等. 螺虫乙酯及其代谢物和氯虫苯甲酰胺在龙眼上的残留动态[J]. 农药学报, 2021, 23(6): 1235-1240.
LIU Y P, WANG X N, CHANG H, et al. Residue dynamics of spirotetramat and its metabolites & chlorantranilprole in Longan(*Dimocarpus longan* Lour.)[J]. Chin J Pestic Sci, 2021, 23(6): 1235-1240.
- [105] 陈国峰, 刘峰, 张晓波, 等. 氯虫苯甲酰胺在大豆和土壤中的残留及降解行为[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(5): 894-900.
CHEN G F, LIU F, ZHANG X B, et al. Residue analysis and degradation dynamics of chlorantranilprole in soybean and soil[J]. J Agro Environ Sci, 2016, 35(5): 894-900.
- [106] 洪文英, 吴燕君, 尉吉乾, 等. 溴氰虫酰胺对小菜蛾的田间防效及其在花椰菜中的残留与消解动态[J]. 农药学报, 2017, 19(2): 211-216.
HONG W Y, WU Y J, YU J Q, et al. Efficiency of cyantranilprole on *Plutella xylostella*(L.) and its residual dissipation dynamics in *Brassica oleracea*[J]. Chin J Pestic Sci, 2017, 19(2): 211-216.
- [107] 李安英, 张少军, 陈勇达, 等. 溴氰虫酰胺和吡蚜酮在南瓜中的残留消解动态[J]. 中国蔬菜, 2021(1): 79-83.
LI A Y, ZHANG S J, CHEN Y D, et al. Residues and digestion dynamics of cyantranilprole and pymetrozine in pumpkin[J]. China Veg, 2021(1): 79-83.
- [108] KAUSHIK E, DUBEY J K, PATYAL S K, et al. Persistence of tetranilprole and reduction in its residues by various culinary practices in tomato in India[J]. Environ Sci Pollut Res, 2019, 26(22): 22464-22471.
- [109] 郑鸿薇. 黄瓜中氟吗啉和四氯虫酰胺的代谢研究[D]. 沈阳: 沈阳化工大学, 2019.
ZHENG H W. Metabolism of flumorph and tetrachlorantranilprole in cucumber[D]. Shenyang: Shenyang University of Chemical Technology, 2019.

(责任编辑: 张莉)