

防治芹菜上重要害虫的替代药剂筛选及其膳食暴露风险评估

李晓贝¹, 周昌艳¹, 苟春林^{2*}, 杨静², 赵晓燕¹, 李健英¹

(1. 上海市农业科学院农产品质量标准与检测技术研究所, 上海 201403;

2. 宁夏农产品质量标准与检测技术研究所, 银川 750002)

摘要 为了筛选防治芹菜上重要害虫的替代药剂, 在上海市及银川市开展 5%吡虫啉颗粒剂、0.5%阿维菌素颗粒剂及 5%氯虫苯甲酰胺悬浮剂在芹菜上的田间试验, 通过液相色谱-串联质谱法检测 3 种农药在芹菜上的残留量, 并分别对 3 种农药进行膳食暴露风险评估。结果表明, 5%吡虫啉颗粒剂、0.5%阿维菌素颗粒剂及 5%氯虫苯甲酰胺悬浮剂分别以推荐剂量施用于芹菜后, 收获期吡虫啉及阿维菌素在芹菜上最大残留量分别为 0.97 mg/kg 及 0.01 mg/kg, 氯虫苯甲酰胺安全间隔期内(1 d)在芹菜上的最大残留量为 5.24 mg/kg, 均低于其在芹菜上的最大残留限量值。中国居民摄入吡虫啉、阿维菌素、氯虫苯甲酰胺的慢性暴露风险(%ADI)最大值为 5.17%, 急性暴露风险(%ARfD)最大值为 11.20%, 均远低于 100%, 膳食暴露风险低。结果表明吡虫啉、阿维菌素、氯虫苯甲酰胺可替代高毒农药用于芹菜上关键虫害的防治。

关键词 芹菜; 吡虫啉; 阿维菌素; 氯虫苯甲酰胺; 风险评估

中图分类号: S433 **文献标识码:** A **DOI:** 10.16688/j.zwbh.2021206

Screening and dietary intake risk assessment of alterative insecticides for *Apium graveolens* var. *dulce*

LI Xiaobei¹, ZHOU Changyan¹, GOU Chunlin^{2*}, YANG Jing², ZHAO Xiaoyan¹, LI Jianying¹

(1. Institute for Agri-food Standards and Testing Technology, Shanghai Academy of Agricultural Sciences, Shanghai 201403, China; 2. Ningxia Institute of Quality Standards and Testing Technology for Agricultural Products, Yinchuan 750002, China)

Abstract The objective of this study was to discover alterative insecticides for celery (*Apium graveolens* var. *dulce*). Residue experiments of imidacloprid 5% GR, abamectin 0.5% GR and chlorantraniliprole 5% SC in celery were carried out in Shanghai and Yinchuan. The ultra-high performance liquid chromatography-tandem mass spectrum (UPLC-MS/MS) was used to determine the residues of these insecticides in celery. Dietary intake risk assessments were performed. Field experiments showed that the final maximal residues of imidacloprid 5% GR, abamectin 0.5% GR and chlorantraniliprole 5% SC in celery collected at safe intervals were 0.97 mg/kg, 0.01 mg/kg, and 5.24 mg/kg respectively, when they were applied at their recommended dosages. All of the final concentrations were below their maximum residue limits in celery. The risk assessments showed that the maximum value of %ADI of imidacloprid, abamectin and chlorantraniliprole was 5.17%, and that of %ARfD was 11.2%, which were far below 100% with a low exposure risk. Therefore, imidacloprid, abamectin and chlorantraniliprole were applicable as alterative insecticides for celery.

Key words *Apium graveolens* var. *dulce*; imidacloprid; abamectin; chlorantraniliprole; risk assessment

芹菜 *Apium graveolens* var. *dulce* 广泛种植于全球各地, 含有多酚、黄酮、抗氧化物等多种活性成

分, 具有抗炎、保护消化系统及心脑血管系统甚至减重的作用^[1-3]。芹菜在生产过程中易受到蝼蛄、蚜虫、

甜菜夜蛾、小菜蛾等害虫为害,在我国主要以化学农药防治为主^[4-5]。由于农药的不合理使用以及芹菜中相关登记产品的缺失,导致芹菜成为蔬菜类产品不合格的主体,不合格的主要原因为毒死蜱、甲拌磷、克百威、氧乐果等禁限用农药超标^[6]。克百威、甲拌磷均为广谱杀虫剂,主要用于防治蝼蛄等地下害虫^[7-8];氧乐果、毒死蜱主要用于防治蚜虫等多种地上及地下害虫^[9-10],这些农药由于毒性高、易残留超标等原因已被禁止用于蔬菜上。目前,登记于芹菜中可合法使用的杀虫剂仅啶虫脒、噻虫嗪、吡虫啉、吡蚜酮及苦皮藤素 5 种^[11],前 4 种均用于防治蚜虫。尚无可用于防治地下害虫及甜菜夜蛾、小菜蛾等地上害虫的农药以及良好的农业规范。徐维红等^[12]研究发现,相较于叶面喷雾处理,吡虫啉颗粒剂播种前进行 1 次土壤处理即可较好地控制小麦整个生育期的麦蚜发生,防治效果可超过 90%。阿维菌素是具有强触杀、胃毒作用的广谱杀虫剂,通过刺激目标生物大量释放 γ -氨基丁酸而抑制其正常神经冲动传导以致神经麻痹死亡^[13]。氯虫苯甲酰胺主要用于防治鳞翅目及鞘翅目的部分害虫,在甘蓝、花椰菜等多种蔬菜上已通过登记,属于特异性强且对哺乳动物低毒的广谱杀虫剂^[14]。芹菜中禁限用农药的持续检出与超标严重威胁消费者健康以及芹菜产业发展,为同时保证芹菜产品的产量与安全,需筛选出安全高效的替代药剂以杜绝高毒农药的继续使用。本研究选择吡虫啉、阿维菌素及氯虫苯甲酰胺对芹菜开展土壤处理及叶面喷雾田间残留试验,拟提出针对芹菜上关键虫害的替代药剂及推荐安全使用规范,为进一步提升芹菜产品的质量安全水平提供数据支撑。

1 材料与方法

1.1 试剂与仪器

5%吡虫啉颗粒剂(GR)购自江苏克胜集团股份有限公司,0.5%阿维菌素颗粒剂(GR)购自深圳诺普信农化股份有限公司,5%氯虫苯甲酰胺悬浮剂(SC)购自美国富美实公司;吡虫啉、阿维菌素、氯虫苯甲酰胺标准品(1 000 mg/L 于甲醇中),购自天津环境科学研究所;色谱纯甲醇、乙腈,购自上海安谱公司,甲酸(优级纯)购自美国安捷伦公司,乙酸铵购自国药集团;提取盐包(4 g MgSO₄, 1 g NaCl, 1 g TSCD, 0.5 g DHS)及 SinCHERS 固相萃取柱(400 mg C18,

100 mg GCB, 200 mg BIPH, 1 400 mg MgSO₄)购自上海润葱珀;Waters 120—C18 色谱柱,美国 Waters 公司。

1.2 主要仪器

Triple Quad™ 5500 液相色谱-串联质谱仪(Waters UPLC + AB 5500);Sorval ST 16R 高速离心机,美国 Thermo Fisher 公司;EFOF-945205 涡旋仪,美国 Talboys 公司;超纯水仪,英国 ELGA PureLab 公司;前处理电动工具,天津安邦键合科技有限公司;998B 全营养破壁料理机,欧斯麦电器集团(香港)实业有限公司。

1.3 田间试验方法

田间试验于 2020 年 10 月—2021 年 1 月在上海市松江区新浜镇及宁夏回族自治区银川市进行。上海芹菜品种为‘赛妃’(河北环农种业有限公司),试验期间(2020 年 9 月 29 日—11 月 29 日)气温为 7~27℃,试验地土壤类型为壤土,pH 6.9,有机质含量为 3.3%,阳离子交换量为 19.04 cmol/kg;银川芹菜品种为‘皇后’(天津德惠农种业科技发展有限公司),试验期间(2020 年 10 月 19 日—2021 年 1 月 28 日)气温为-15~17℃,试验地土壤类型为轻壤土/淡灰钙土,pH 8.47,有机质含量 1.5%,阳离子交换量 9.8 cmol/kg。参照农作物中农药残留试验准则设置 2 个试验小区^[15],每个小区面积 50 m²,另设空白对照小区,各小区栽培条件一致,施药方案详见表 1。每次采样时每个试验小区至少采集 2 个样品,每个样品采用 5 点采样原则,采集 1 kg 以上可食用样本,采集后匀浆装瓶,并置于一 20℃ 冰箱中贮存待测。

1.4 农药残留分析方法

1.4.1 样品前处理

提取:称取(10±0.05) g 匀浆后的样品置于 50 mL 离心管中,加入 10 mL 乙腈振荡约 30 s 后加入提取盐包,手摇快速振荡混匀约 1 min 后于室温下 4 000 r/min 离心 5 min。净化:将 SinCHERS 固相萃取柱插入离心管中,取柱内净化后的有机相根据实际情况适当稀释,涡旋混匀后过 0.22 μm 的滤膜,装入进样小瓶中进行 LC-MS/MS 分析。

1.4.2 仪器条件

色谱条件:Waters 120—C18 色谱柱(100 mm×2.1 mm,1.7 μm);柱温为 40℃;进样量为 5 μL;流速为 0.4 mL/min;梯度洗脱条件如表 2 所示。

表 1 3 种农药在芹菜上残留的田间试验方案¹⁾

Table 1 Experimental design of field trials of three insecticides on celery

处理小区 Treatment plot	小区面积/m ² Plot area	施用药剂 Insecticide	施药方式 Method for applying pesticide	有效施药 浓度/g·(hm ²) ⁻¹ Application concentration	施药次数/次 Application number	采收距末次施药 间隔时间/d Days after the last treatment
A	50	5%吡虫啉 GR	移栽时撒施	750	1	14, 21, 28, 60
		0.5%阿维菌素 GR	移栽时撒施	225	1	14, 21, 28, 60
		5%氯虫苯甲酰胺 SC	生长期喷雾	45	2	2 h, 1, 3, 5, 7
B	50	5%吡虫啉 GR	移栽时撒施	1 125	1	14, 21, 28, 60
		0.5%阿维菌素 GR	移栽时撒施	262.5	1	14, 21, 28, 60
		5%氯虫苯甲酰胺 SC	生长期喷雾	45	3	2 h, 1, 3, 5, 7
C	15	空白对照	—	—	—	施药, 收获各 1 次

1) 5%氯虫苯甲酰胺悬浮剂施药浓度为 45 mL/hm²。下同。

The application concentration of chlorantraniliprole 5% SC is 45 mL/hm². The same applies below.

表 2 梯度洗脱程序

Table 2 Procedure for gradient elution

时间/min Time	流速/mL·min ⁻¹ Flow rate	流动相(体积比) Mobile phase (V:V)	
		0.1%甲酸乙腈/% 0.1% formic acid in acetonitrile	0.1%甲酸+10 mmol/L 乙酸铵水溶液/% 0.1% formic acid and 10 mmol/L ammonium acetate in water
0	0.4	50	50
1	0.4	50	50
4	0.4	90	10
8	0.4	90	10
8.5	0.4	50	50
10	0.4	50	50

质谱条件:电喷雾离子源,正离子模式,毛细管电压为 5.5 kV,离子源温度 450℃,气帘气压力为 30 psi,碰撞气为氩气,鞘气温度为 500℃,鞘气流速

为 50 L/min,检测方式为多重反应监测(multiple reaction monitoring, MRM),吡虫啉、阿维菌素及氯虫苯甲酰胺的质谱参数如表 3 所示。

表 3 吡虫啉、阿维菌素及氯虫苯甲酰胺的质谱参数¹⁾

Table 3 Mass spectrum parameters of imidacloprid, abamectin and chlorantraniliprole

农药 Insecticide	母离子(<i>m/z</i>) Parent ion	子离子(<i>m/z</i>) Daughter ion	碰撞电压/V Collision voltage	碰撞能量/eV Collision energy
吡虫啉 imidacloprid	256.2	209.0*	61	23
		175.2	61	23
阿维菌素 abamectin	890.5	567.4*	120	20
		305.1	120	32
氯虫苯甲酰胺 chlorantraniliprole	483.9	452.9*	80	28
		285.9	80	28

1) * 为定量离子对。

* Quantitative ion pair.

1.5 膳食暴露评估

通过农药日膳食暴露量与其每日允许摄入量 and 急性参考剂量的比较对其长期慢性和短期急性摄入风险进行评估,通过公式(1)~(4)进行计算^[16-17]。

$$NEDI = \sum (STMR_i \times F_i) / bw \quad (1)$$

$$\%ADI = NEDI / ADI \quad (2)$$

$$IESTI = LP \times HR \times v / bw \quad (3)$$

$$\%ARfD = IESTI / ARfD \quad (4)$$

式(1)中:*NEDI*(national estimated daily intake)为国家估算每日摄入量[mg/(kg bw · d)];*F_i*(food intake)为第*i*种食物在全人群的每日平均消费量(kg/d)^[18]; *STMR*(supervised trials median residue)为农药在第*i*种食物中的规范残留试验中值(mg/kg),蔬菜的规范残留试验中值取芹菜的*STMR*数据,其他食物取相应已登记作物的最大残留限量值;*bw*(body weight)为人群平均体重(kg)^[18]。

式(2)中:*ADI*(acceptable daily intake)为每日允许摄入量[mg/(kg bw · d)]。当%*ADI*> 100%时表明存在慢性摄入风险,值越大风险越高;当%*ADI*< 100%时表明慢性摄入风险可以接受,值越小风险越低。

式(3)中:*IESTI*(international estimated of short term intake)为急性膳食暴露量[mg/(kg bw · d)];*LP*(large portion)为芹菜的大份餐消费量(kg/d),参考全球环境监测规划/食品污染监测与评估规划(GEMS/Food)^[19]; *HR*(highest residue)为农药在芹菜中最大残留值(mg/kg);*bw*(body weight)为人群平均体重(kg),其中儿童及一般人群体重参考GEMS/Food^[19],孕龄妇女体重参考国内数据^[18];

v(variability factor)为变异因子。

式(4)中:*ARfD*(acute reference dose)为急性毒性参考剂量[mg/(kg bw · d)]。当%*ARfD*> 100%时表明存在急性摄入风险,值越大风险越高;当%*ARfD*< 100%时表明急性摄入风险可以接受,值越小风险越低。

2 结果与分析

2.1 检测方法结果表述

将吡虫啉、阿维菌素、氯虫苯甲酰胺配制为100 mg/L的混合标准溶液,在芹菜空白样品中,添加0.01、0.1、1.0 mg/kg 3个水平的混标溶液,开展添加回收试验。以空白样品为基质提取液配制0.001~0.1 mg/L基质标准溶液,以标准溶液的浓度为横坐标,相应峰面积的丰度值为纵坐标绘制标准曲线。最低添加浓度为定量限(limit of quantitation, LOQ)^[20],以3倍信噪比(S/N=3)计算方法的检出限(limit of detection, LOD),结果详见表4。由表4可得,在0.01~1.0 mg/kg的添加水平下,芹菜中3种农药的添加回收率为80.6%~106%,相对标准偏差为0.6%~9.8%,LOD为0.000 1~0.002 7 mg/kg,LOQ=0.01 mg/kg,可满足检测需求^[15]。

表4 方法的添加回收率、检出限(LOD)及定量限(LOQ)(*n*=6)

Table 4 Recovery, limit of detection (LOD) and limit of quantitation (LOQ) (*n*=6)

农药 Insecticide	线性范围/ mg · L ⁻¹ Linear range	线性回归方程 Equation of linear regression	线性回归 系数 <i>R</i> ²	回收率/% Recovery rate			检出限/ mg · kg ⁻¹ LOD	定量限/ mg · kg ⁻¹ LOQ
				0.01 mg/kg	0.10 mg/kg	1.0 mg/kg		
吡虫啉 imidacloprid	0.001~0.1	<i>y</i> =44 660 <i>x</i> +15 540	0.999 8	81.9±6.5	89.8±3.1	84.8±4.9	0.000 1	0.01
阿维菌素 abamectin	0.001~0.1	<i>y</i> =712 <i>x</i> +468	0.999 9	85.5±2.2	98.7±9.8	106±3.2	0.002 7	0.01
氯虫苯甲酰胺 chlorantraniliprole	0.001~0.1	<i>y</i> =66 640 <i>x</i> +153 100	0.999 7	80.6±4.0	98.4±0.6	97.2±0.8	0.000 5	0.01

2.2 3种农药在芹菜中的最终残留量

3种农药以推荐剂量和施药方式施用于芹菜后,其在芹菜上的最终残留量如表5所示。撒施后14~60 d内吡虫啉在两地芹菜上的最大残留量为4.09 mg/kg,在整个生长期均有检出,整体上施药浓度越高最终残留量越高。而阿维菌素在两地的最大残留量为0.01 mg/kg,最终残留量与施药浓度无显著相关性,上海地区样品未检出阿维菌素。GB 2763-2019规定吡虫啉及阿维菌素在芹菜

上的最高残留限量(MRL)分别为5 mg/kg和0.05 mg/kg^[21],两种农药均无残留超标风险。最后1次施药2 h~7 d两地芹菜上氯虫苯甲酰胺残留量最大值为8.13 mg/kg,GB 2763-2019规定氯虫苯甲酰胺在芹菜上的MRL为7 mg/kg^[21],施药1 d后无残留超标风险。

2.3 膳食暴露评估

阿维菌素在芹菜中的残留试验中值低于检出限。吡虫啉在中国登记可使用的可食作物为:谷物

(水稻、玉米、小麦)、蔬菜(马铃薯、豇豆、甘蓝、韭菜、黄瓜、番茄、节瓜、茄子、萝卜、莲藕、芹菜、菠菜、小白菜、白菜、十字花科蔬菜、小葱)、水果(香蕉、冬枣、草莓、芒果、苹果、柑橘、梨、桃)、花生、大豆、甘蔗、枸杞、铁皮石斛、杭白菊^[11]。氯虫苯甲酰胺在中国登记可使用的可食作物为:谷物(水稻、玉米)、蔬菜(甘薯、甘蓝、花椰菜、辣椒、豇豆、菜用大豆、小白菜、番茄、姜)、苹果树、甘蔗、棉花^[11]。通过公式(1)~(2)分别计算中国成年人群(平均体重 61.8 kg)2 种农药

的慢性摄入风险,评估结果见表 6。吡虫啉取高、低浓度收获期(60 d)两地的 *STMR*, 计算所得吡虫啉在食物中总的 *NEDI* 值为 0.003 mg/(kg·d), 占其 *ADI* 的 5.17%, 其中芹菜的贡献率为 34.9%, 无慢性摄入风险。氯虫苯甲酰胺取高、低浓度安全间隔期(1 d)两地的 *STMR*, 显示氯虫苯甲酰胺在食物中总的 *NEDI* 值为 0.013 mg/(kg·d), 占其 *ADI* 的 0.67%, 其中芹菜的贡献率为 77.8%, 无慢性摄入风险。

表 5 3 种农药在芹菜上的最终残留量

Table 5 Final residue of three pesticides in celery

农药 Insecticide	施药浓度/ g·(hm ²) ⁻¹ Application concentration	施药次数/次 Application times	采收距末次 施药间隔时间/d Days after the last treatment	残留量/mg·kg ⁻¹ Residual amount	
				上海 Shanghai	银川 Yinchuan
5%吡虫啉 GR imidacloprid 5% GR	750	1	14	1.58±0.08	1.99±0.06
			21	0.64±0.06	2.44±0.14
			28	0.08±0.01	1.00±0.56
	1 125	1	60	0.01±0.01	0.06±0.04
			14	1.03±0.24	4.09±0.18
			21	1.07±0.03	3.44±0.20
0.5%阿维菌素 GR abamectin 0.5% GR	225	1	28	nd	nd
			60	nd	0.01±0.005
			60	nd	0.01±0.01
	262.5	1	14	nd	nd
			21	nd	nd
			28	nd	nd
5%氯虫苯甲酰胺 SC chlorantraniliprole 5% SC	45	2	2 h	2.18±0.18	2.40±0.82
			1	2.21±0.13	2.39±0.05
			3	2.06±0.23	2.81±0.67
			5	1.47±0.35	2.15±0.51
			7	1.45±0.31	2.62±0.62
	45	3	2 h	2.66±0.08	8.13±2.82
			1	2.68±0.49	5.24±0.35
			3	4.23±0.60	4.87±0.56
			5	3.20±0.50	4.86±0.26
			7	2.40±0.57	4.91±1.01

1) nd 表示未检出。

nd represents not detected.

农药残留专家联席会议(JMPR)认为氯虫苯甲酰胺不需要制定急性参考剂量,不需要评估急性摄入风险^[22]。鲜食芹菜的单体重为 861 g, 大于其大份餐消费量, 变异因子取 3^[19]。将吡虫啉及阿维菌

素收获期的残留最大值及芹菜大份餐消费量数据代入公式(3)和(4), 分别计算儿童、孕龄妇女及一般人群通过芹菜摄入吡虫啉、阿维菌素的急性摄入风险, 评估结果见表 7。评估结果显示吡虫啉在各

人群中的急性膳食暴露量最大值为 0.033 mg/(kg · d), 占其 *ARfD* 的 8.15%, 远低于 100%, 无急性摄入风险。阿维菌素在各人群中的急性膳食暴

露量最大值为 3.36×10^{-4} mg/(kg · d), 占其 *ARfD* 的 11.20%, 远低于 100%, 无急性摄入风险。

表 6 吡虫啉、氯虫苯甲酰胺的慢性膳食摄入风险¹⁾

Table 6 Chronic exposure to imidacloprid and chlorantraniliprole from daily diet

杀虫剂 Insecticide	食物种类 Food category	摄入量/ g · d ⁻¹ Food intake	参考限量/ mg · kg ⁻¹ MRL	限量来源 MRL source	每日摄入量/ mg · (kg · d) ⁻¹ NEDI	日允许摄入量/ mg · (kg · d) ⁻¹ Acceptable daily intake	%ADI/ %		
吡虫啉 imidacloprid	米类	177.7	0.05 (糙米)	中国	1.44×10^{-4}	0.06 ^[22]			
	面类	142.8	0.05 (小麦)	中国	1.16×10^{-4}				
	其他谷类	16.8	0.05 (玉米)	中国	1.36×10^{-5}				
	薯类	35.8	0.50 (马铃薯)	中国	2.90×10^{-4}				
	大豆类及制品	10.9	0.05 (大豆)	中国	8.82×10^{-6}				
	新鲜蔬菜	269.4	0.25	残留中值	0.001				
	水果	40.7	1.00 (柑)	中国	6.59×10^{-4}				
	植物油	37.3	0.50 (花生仁)	中国	3.02×10^{-4}				
	糖/淀粉	6.4	0.20 (甘蔗)	中国	2.07×10^{-5}				
	饮料	14.4	2.00 (干菊花)	中国	4.66×10^{-4}				
	其他食物	217							
	合计	969.2			0.003			0.06	5.17
氯虫苯甲酰胺 Chlorantraniliprole	米类	177.7	0.50 (稻谷)	中国	0.001	2 ^[22]			
	其他谷类	142.8	0.02 (玉米)	中国	5.44×10^{-6}				
	薯类	16.8	0.02 (甘薯)	中国	1.16×10^{-5}				
	大豆类及制品	35.8	0.05 (大豆)	中国	8.82×10^{-6}				
	新鲜蔬菜	10.9	2.39	中国	0.010				
	水果	269.4	2.00 (苹果)	残留中值	0.001				
	植物油	40.7	0.30 (棉籽)	中国	1.81×10^{-4}				
	糖/淀粉	37.3	0.05 (甘蔗)	中国	5.18×10^{-6}				
	酱油	6.4	0.02 (姜)	中国	2.56×10^{-6}				
	其他食物	217							
	合计	969.2			0.013			2	0.67

1) * 将未进行登记的食物种类合计为其他食物。

* The food classifications not registered are listed as other foods.

表 7 通过芹菜摄入吡虫啉、阿维菌素的急性暴露风险

Table 7 Acute exposure to imidacloprid and abamectin from celery

农药 Insecticide	人群分类 Population group	平均体重/kg Average body weight	大份餐消费量/ g · 人 ⁻¹ Large portion	最大残留量/ mg · kg ⁻¹ Max residue	<i>ARfD</i> / mg · (kg · d) ⁻¹	<i>IESTI</i> / mg · (kg · d) ⁻¹	% <i>ARfD</i> / %
吡虫啉 imidacloprid	儿童, 1~6 岁	16.1	180.3	0.97	0.4 ^[22]	0.033	8.15
	孕龄妇女, 18~44 岁	56.7	305.9	0.97	0.4	0.016	3.92
	一般人群, >1 岁	53.2	305.9	0.97	0.4	0.017	4.18
阿维菌素 abamectin	儿童, 1~6 岁	16.1	180.3	0.01	0.003 ^[22]	3.36×10^{-4}	11.20
	孕龄妇女, 18~44 岁	56.7	305.9	0.01	0.003	1.62×10^{-4}	5.40
	一般人群, >1 岁	53.2	305.9	0.01	0.003	1.73×10^{-4}	5.75

3 结论与讨论

前期实地调研发现, 蚜虫是上海地区芹菜生产中最常发生的虫害, 常聚集在芹菜叶背、茎秆或嫩叶

上吸食汁液, 为害作物生长, 而目前登记在芹菜上防治蚜虫的吡虫啉产品均为常规喷雾施用方式的可湿性粉剂, 不能高效地消灭叶背及茎秆上的蚜虫, 且存在持效期短、多次用药、污染环境、伤害天敌等风

险^[23]。吡虫啉内吸性强,用于土壤处理可由植物通过根部吸收并转移至植物体内,并可在植株体内存在较长时间从而拥有更长的持效期^[24]。本研究在芹菜整个生长期均能检出吡虫啉,且未超出相应限量值。

阿维菌素是由土壤中的阿维链霉素发酵产生的大环内酯类广谱杀虫剂,对内寄生线虫、外寄生节肢动物都具有较强的活性^[25]。阿维菌素颗粒剂对芹菜根结线虫的防效及产量均有显著提高^[26]。阿维菌素通过触杀、胃毒作用消灭害虫,内吸性较弱,施用于土壤中不易在植株体内残留,与本文中施药后 14 d 开始采集的芹菜样品中基本未检出阿维菌素残留规律一致。Fang 等^[27]研究发现氯虫苯甲酰胺是国内芹菜产品中检出率相对较高的农药,但是由于毒性较低其膳食风险亦极低,%ADI 为 0.007%,与本文研究结果一致。

风险评估具有一定的不确定性,在本文中主要体现在 3 个方面:一是进行慢性暴露评估时部分作物的 STMR 以其 MRL 为参考值,通常 MRL 远高于 STMR,会导致风险估值偏高;二是 3 种农药的残留数据仅为上海、银川两地所得,且未考虑相应代谢产物的残留情况,以及清洗、烹饪等加工因子对农药残留的去除效果,残留风险有待进一步确认;三是作物并非农药对于人群的唯一暴露途径,肉类摄入、空气、水等环境因素也会引入农药暴露风险。

综上所述,吡虫啉、阿维菌素及氯虫苯甲酰胺在芹菜上残留量低、膳食暴露风险低,可替代高毒农药用于芹菜上重要害虫的防治。5%吡虫啉颗粒剂可用于芹菜蚜虫的防治,移栽期撒施,施药有效剂量为 750~1 125 g/hm²,每季最多施用 1 次,收获时产品安全;0.5%阿维菌素颗粒剂可用于芹菜根结线虫的防治,移栽期撒施,施药有效剂量为 225~262.5 g/hm²,每季最多施用 1 次,收获时产品安全;5%氯虫苯甲酰胺悬浮剂可用于芹菜上甜菜夜蛾、小菜蛾等鳞翅目昆虫的防治,生长期喷雾施用,施药有效剂量为 22.5~45 mL/hm²,最多施用 3 次(施药间隔 7 d),安全间隔期 1 d。《农药管理条例》(2017 修订)^[28]规定需严格按照农药登记的标签标注使用,目前吡虫啉(颗粒剂)、阿维菌素(颗粒剂)及氯虫苯甲酰胺均未在芹菜上登记,需进一步开展登记工作以合法用于芹菜上虫害防治。

参考文献

- [1] LI Mengyao, HOU Xilin, WANG Feng, et al. Advances in the research of celery, an important Apiaceae vegetable crop [J]. *Critical Reviews in Biotechnology*, 2018, 38(2): 172-183.
- [2] CLEGG M E, COOPER C. Exploring the myth: Does eating celery result in a negative energy balance? [J/OL]. *Proceedings of the Nutrition Society*, 2012, 71(OCE3): E217. DOI: 10.1017/S0029665112003084.
- [3] LAU H, LASERNA A K C, LI S F Y. ¹H NMR-based metabolomics for the discrimination of celery (*Apium graveolens* L. var. *dulce*) from different geographical origins [J/OL]. *Food Chemistry*, 2020, 332: 127424. DOI: 10.1016/j.foodchem.2020.127424.
- [4] 代艳娜. 我国芹菜上农药登记情况及现状分析[J]. *农药市场信息*, 2020(4): 34.
- [5] 刘刚. 芹菜农药安全使用技术[J]. *农药市场信息*, 2020(11): 56.
- [6] 国家市场监督管理总局. 市场监管总局关于食品不合格情况的通报[EB/OL]. (2021-01-20) [2021-04-08]. <http://www.samr.gov.cn/zw/wjfb/tg/index.html>.
- [7] MISHRA S, ZHANG Wenping, LIN Ziqiu, et al. Carbofuran toxicity and its microbial degradation in contaminated environments [J/OL]. *Chemosphere*, 2020, 259: 127419. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2020.127419.
- [8] RATN A, AWASTHI Y, KUMAR M, et al. Phorate induced oxidative stress, DNA damage and differential expression of *p53*, *apaf-1* and *cat* genes in fish, *Channa punctatus* (Bloch, 1793) [J]. *Chemosphere*, 2017, 182: 382-391.
- [9] YU Lili, WANG Lina, ZHAO Yang, et al. Identification and dissipation of omethoate and its main metabolite DMP in wheat determined by UPLC-QTOF/MS [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2019, 67(20): 5891-5898.
- [10] HUANG Yaohua, ZHANG Wenping, PANG Shimei, et al. Insights into the microbial degradation and catalytic mechanisms of chlorpyrifos [J/OL]. *Environmental Research*, 2021, 194: 110660. DOI: 10.1016/j.envres.2020.110660.
- [11] 中国农药信息网. 行业数据[EB/OL]. (2021-01-25) [2021-04-08]. <http://www.chinapesticide.org.cn/hysj/index.jhtml>.
- [12] 徐维红, 许静杨, 邹德玉, 等. 吡虫啉不同施药方式对麦蚜防治效果及小麦产量的影响[J]. *农业与技术*, 2020, 40(18): 18-20.
- [13] 刘广. 阿维菌素纳米囊的制备及对黄瓜根结线虫病防治作用[D]. 泰安: 山东农业大学, 2020.
- [14] 赵民娟, 王猛强, 邵华, 等. 氯虫苯甲酰胺在菜薹中的残留及消解动态研究[J]. *农产品质量与安全*, 2019(1): 35-38.
- [15] 农业农村部农药检定所, 山西省农业科学院农产品质量安全与检测技术研究所. 农作物中农药残留试验准则: NY/T 788-2018[S]. 北京: 中国农业出版社, 2018.

- [21] BUCKLEY L B, HUEY R B. How extreme temperatures impact organisms and the evolution of their thermal tolerance [J]. *Integrative and Comparative Biology*, 2016, 56(1): 98 - 109.
- [22] GENG Shubao, JUNG C. Effect of temperature on longevity and fecundity of *Phyllonorycter ringoniella* (Lepidoptera: Gracillariidae) and its oviposition model [J]. *Journal of Asia-Pacific Entomology*, 2017, 20(4): 1294 - 1300.
- [23] LEE J, BAEK S, KANG C, et al. Temperature-dependent development and oviposition models of *Ramulus irregulariterdentatus* (Phasmida: Phasmatidae) [J]. *Journal of Asia-Pacific Entomology*, 2018, 21(3): 903 - 913.
- [24] NOOR-UL-ANE M, KIM D S, ZALUCKI M P. Fecundity and egg laying in *Helicoverpa armigera* (Lepidoptera: Noctuidae): model development and field validation [J]. *Journal of Economic Entomology*, 2018, 111(5): 2208 - 2216.
- [25] KIM H, BAEK S, KIM S J, et al. Temperature-dependent development and oviposition models of *Riptortus clavatus* (Thunberg) (Hemiptera: Alydidae) [J]. *Applied Entomology and Zoology*, 2009, 44(4): 515 - 523.
- [26] KIM H, BAEK S, LEE J H. Temperature-dependent development and oviposition models of *Leptocoris chinensis* Dallas (Hemiptera: Alydidae) [J]. *Journal of Asia-Pacific Entomology*, 2017, 21(1): 244 - 251.
- [27] JU Ruiting, WANG Feng, LI Bo. Effects of temperature on the development and population growth of the sycamore lace bug, *Corythucha ciliata* [J/OL]. *Journal of Insect Science*, 2011, 11(1): 16. DOI: 10.1673/031.011.0116.
- [28] BAEK S, HWANG A, KIM H, et al. Temperature-dependent development and oviposition models of *Halymorpha halys* (Hemiptera: Pentatomidae) [J]. *Journal of Asia-Pacific Entomology*, 2017, 20(2): 367 - 375.
- [29] NISHI A, TAKAHASHI K. Effects of temperature on oviposition and development of *Amphibolus venator* (Klug) (Hemiptera: Reduviidae), a predator of stored product insects [J]. *Applied Entomology and Zoology*, 2002, 37(3): 415 - 418.
- [30] 乔利, 秦道正, 卢兆成, 等. 温度对茶小绿叶蝉成虫存活率及保护酶系的影响[J]. *植物保护学报*, 2015, 42(2): 223 - 228.
- [31] BERGER D, WALTERS R J, GOTTHARD K. What limits insect fecundity? Body size- and temperature-dependent egg maturation and oviposition in a butterfly [J]. *Functional Ecology*, 2008, 22(3): 523 - 529.
- [32] 王竑晟. 温度和营养对甜菜夜蛾生殖的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2003.
- [33] 唐继洪, 程云霞, 罗礼智, 等. 蛾龄、温度和相对湿度对草地螟自主飞行能力的影响[J]. *植物保护*, 2016, 42(2): 79 - 83.
- [34] 戴钊萱, 李子园, 田耀加, 等. 不同品种玉米对草地贪夜蛾生长发育及繁殖的影响[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(10): 3273 - 3281.
- [35] 苏湘宁, 李传瑛, 黄少华, 等. 草地贪夜蛾人工饲料及饲养条件的优化[J]. *环境昆虫学报*, 2019, 41(5): 992 - 998.
- [36] 邸宁, 魏瑜岭, 王甦, 等. 米蛾人工饲养技术优化[J]. *中国生物防治学报*, 2018, 34(6): 831 - 837.
- [37] 耿书宝, 侯贺丽, 贺雨婧, 等. 补充营养对茶银尺蠖成虫寿命和产卵量的影响[J]. *茶叶科学*, 2020, 40(4): 501 - 509.

(责任编辑: 杨明丽)

(上接 117 页)

- [16] 吴永宁, 刘沛, 孙金芳, 等. 膳食暴露评估技术与总膳食研究 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2019: 28 - 33.
- [17] 中华人民共和国农业农村部. 食品中农药残留风险评估指南 [EB/OL]. (2015 - 10 - 08) [2021 - 04 - 08]. http://www.zzys.moa.gov.cn/gzdt/201510/t20151012_6310013.htm.
- [18] 国家卫生计生委疾病预防控制局. 中国居民营养与慢性病状况报告(2015年)[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2015.
- [19] WHO/FAO. Global Environment Monitoring System (GEMS) / Food Contamination Monitoring and Assessment Programme [DB/OL]. (2019 - 11 - 10) [2021 - 04 - 08]. <https://www.who.int/teams/nutrition-and-food-safety/databases/global-environment-monitoring-system-food-contamination>.
- [20] European Commission, Directorate-General for Health and Food Safety. Guidance document on analytical quality control and method validation procedures for pesticides residues analysis in food and feed; EU SANTE/11945/2015 [S]. 2015.
- [21] 中华人民共和国国家卫生健康委员会, 中华人民共和国农业农村部, 国家市场监督管理总局. 食品安全国家标准食品中农药最大残留限量: GB 2763-2019 [S]. 北京: 中国农业出版社, 2019.
- [22] Joint Meeting on Pesticide Residues (JMPR). List of pesticides evaluated by JMPR and JMPS - A [EB/OL]. (2021 - 01 - 25) [2021 - 04 - 08]. <http://www.fao.org/agriculture/crops/thematic-sitemap/theme/pests/lpe/en/>.
- [23] 杨庆喜, 李东阳, 纪明山, 等. 喷雾和灌根施药后吡虫啉在草莓植株中的分布及其对草莓蚜虫的防效[J]. *植物保护*, 2019, 45(4): 250 - 254.
- [24] 郎立宁. 吡虫啉种衣剂对小麦蚜虫的防效及其在小麦上的消解动态[D]. 保定: 河北农业大学, 2014.
- [25] DIONISIO A C, RATH S. Abamectin in soils: analytical methods, kinetics, sorption and dissipation [J]. *Chemosphere*, 2016, 151: 17 - 29.
- [26] 王松. 几种药剂对温室芹菜根结线虫病的防治效果[J]. *中国植保导刊*, 2017, 37(1): 66 - 67.
- [27] FANG Liping, ZHANG Shuqiu, CHEN Zilei, et al. Risk assessment of pesticide residues in dietary intake of celery in China [J]. *Regulatory Toxicology & Pharmacology*, 2015, 73(2): 578 - 586.
- [28] 中华人民共和国国务院. 农药管理条例[EB/OL]. (2017 - 04 - 05) [2021 - 04 - 08]. http://www.moa.gov.cn/gk/zc/g/xzfg/201704/t20170405_5549362.htm.

(责任编辑: 杨明丽)