烟粉虱对双丙环虫酯的田间抗性监测及抗性风险评估

汤 娟[1,2] 卢 鹏[2] 李 仁[2] 王 然[2*] 渠 成[1,2*]

（1. 河北大学生命科学学院，保定 071002；2. 北京市农林科学院植物保护研究所，北京 100097）

摘要：为明确烟粉虱*Bemisia tabaci*对双丙环虫酯的田间抗性现状及潜在抗性风险，通过浸叶法测定北京、天津、河北、辽宁和河南省（市）9个地区烟粉虱田间种群对该药剂的抗性水平，并对室内敏感种群进行连续15代抗性筛选，估算抗性现实遗传力h^2，预测抗性发展速率，同时检测对阿维菌素、溴氰虫酰胺、噻虫嗪、氟啶虫胺腈、氟吡呋喃酮和联苯菊酯6种杀虫剂的交互抗性。结果显示：北京通州、北京昌平、北京平谷、天津西青、天津武清、张家口崇礼、张家口怀来和辽宁铁岭8个种群对双丙环虫酯的抗性倍数为1.1~2.7倍，处于敏感水平；河南杞县种群对其的抗性倍数为3.9倍，处于敏感性下降阶段。经过连续15代抗性筛选，烟粉虱SEL-R种群对双丙环虫酯的抗性倍数为5.4倍，h^2为0.107；在50%、60%、70%、80%和90%的选择压下，抗性上升10倍所需的代数分别为22.09、18.15、15.12、12.60和10.00代；抗性上升100倍所需的代数分别为44.18、36.30、30.25、25.20和20.00代。双丙环虫酯抗性种群对阿维菌素、溴氰虫酰胺、噻虫嗪、氟啶虫胺腈、氟吡呋喃酮和联苯菊酯的抗性倍数为0.9~1.2倍，无交互抗性。综上，烟粉虱对双丙环虫酯存在一定抗性风险，田间应合理控制用量与施药频次，建议与不同作用机制杀虫剂混用或轮用。

关键词：烟粉虱；双丙环虫酯；抗性监测；风险评估；交互抗性

Field monitoring and risk assessment of the resistance in tobacco whitefly *Bemisia tabaci* to afidopyropen

Tang Juan[1,2] Lu Peng[2] Li Ren[2] Wang Ran[2*] Qu Cheng[1,2*]

（1. College of Life Sciences, Hebei University, Baoding 071002, Hebei Province, China;
2. Institute of Plant Protection, Beijing Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Beijing 100097, China）

Abstract: To clarify the current field resistance status and potential risk of resistance in tobacco whitefly *Bemisia tabaci* to afidopyropen, the leaf-dip method was used to determine the resistance levels of field populations collected from nine regions across Beijing, Tianjin, Hebei, Liaoning, and Henan provinces/municipalities. A susceptible laboratory strain was subjected to continuous resistance selection with afidopyropen for 15 generations to estimate the realized heritability (h^2) and predict the rate of resistance development. Cross-resistance to six insecticides (abamectin, cyantraniliprole, thiamethoxam, sulfoxaflor, flupyradifurone, and bifenthrin) was also evaluated. The results indicated that the resistance ratios of eight populations—Tongzhou (Beijing), Changping (Beijing), Pinggu (Beijing), Xiqing (Tianjin), Wuqing (Tianjin), Chongli (Zhangjiakou), Huailai (Zhangjiakou), and Tieling (Liaoning)—ranged from 1.1 to 2.7-fold (<3-fold), suggesting susceptible levels. The population from Qixian (Henan) exhibited a resistance ratio of 3.9-fold, indicating a stage of reduced sensitivity. After 15 generations of resis-

基金项目：国家自然科学基金项目（32472548）

* 通信作者（Authors for correspondence），E-mail：quch1990@sina.com，wangran@baafs.net.cn

收稿日期：2026-05-22

tance selection, the resistance ratio of *B. tabaci* SEL-R population to afidopyropen reached 5.4-fold, with an h^2 value of 0.107. Under selection pressures of 50%, 60%, 70%, 80%, and 90%, the numbers of generations required for a 10-fold increase in resistance were 22.09, 18.15, 15.12, 12.60, and 10.00 generations, respectively; for a 100-fold increase, the corresponding numbers were 44.18, 36.30, 30.25, 25.20, and 20.00 generations, respectively. The afidopyropen-selected strain showed cross-resistance ratios ranging from 0.9 to 1.2 (<3-fold) to the six insecticides, indicating an absence of cross-resistance. In conclusion, *B. tabaci* poses a discernible risk of developing resistance to afidopyropen. Therefore, the application dosage and frequency in the field should be rationally regulated, and it is advisable to use afidopyropen in rotation or combination with insecticides featuring distinct modes of action.

Key words: *Bemisia tabaci*; afidopyropen; resistance monitoring; risk assessment; cross resistance

烟粉虱*Bemisia tabaci*属半翅目粉虱科小粉虱属*Bemisia*，是一种分布广泛且危害严重的世界性农业害虫，被称为“超级害虫”。烟粉虱寄主范围广泛，可为害600余种植物，其不仅通过刺吸寄主植物汁液造成直接损伤，还分泌蜜露诱发煤污病，并且能够传播包括番茄黄化曲叶病毒（tomato yellow leaf curl virus，TYLCV）、番茄褪绿病毒（tomato chlorosis virus，ToCV）在内的多种植物病毒，对农业生产构成严重威胁（Hogenhout et al.，2008；De Barro et al.，2011）。烟粉虱是由40余个隐种组成的一个复合体，其中以Middle East-Asia Minor 1（MEAM1）隐种（B型）和Mediterranean（MED）隐种（Q型）的入侵性最强、危害最重（Alemandri et al.，2015；Xue et al.，2022；刘军伟等，2026）。在我国，20世纪90年代中后期，主要发生的是MEAM1隐种烟粉虱；2003年，MED隐种入侵我国，该隐种凭借更强的环境适应能力和抗药性逐渐取代MEAM1隐种，成为我国的优势烟粉虱隐种（褚栋和张友军，2018）。

虽然防治烟粉虱的方法众多，如农业防治、生物防治和物理防治等，但由于见效快、防控效率高，化学药剂仍是防治烟粉虱的主要手段。然而，由于化学药剂的大量、频繁及不合理使用，致使烟粉虱在全球范围内对多种类型杀虫剂产生不同程度的抗性（Horowitz et al.，2020；Wang et al.，2023）。例如，在国外，澳大利亚的田间烟粉虱种群对吡丙醚产生抗性（Hopkinson et al.，2023）；希腊的田间种群对氟吡呋喃酮、氟啶虫胺腈、溴氰虫酰胺、噻虫嗪、噻虫啉等杀虫剂产生不同程度的抗性（Stavrakaki et al.，2023）；美国佛罗里达州的大部分田间种群对螺虫乙酯产生了不同程度的抗性（Dimase et al.，2024b）。在我国，烟粉虱抗性问题同样严峻，如湖南省长沙市和新疆维吾尔自治区和田市的烟粉虱种群对吡虫啉产生高水平抗性（谈星等，2021）；广东省中山市的田间种群对呋虫胺产生高水平抗性（Li et al.，2023）。烟粉虱抗药性的增强提高了其防控难度，因此筛选新型杀虫剂对于烟粉虱的有效防治具有重要意义。

双丙环虫酯是由日本明治制果药业株式会社和北里研究所共同研发的一种针对刺吸式口器害虫的新型生物源杀虫剂。该药剂通过干扰昆虫香草酸瞬时受体通道（transient receptor potential vanilloid，TRPV）复合物的调控，导致昆虫对重力、平衡、声音、位置和运动等失去感应，丧失协调性和方向感，进而影响取食，最终因饥饿而死亡（Kandasamy et al.，2017；Horikoshi et al.，2025）。研究表明，双丙环虫酯对多种半翅目昆虫具有很好的杀虫活性和防控效果，如柑橘木虱*Diaphorina citri*（Chen et al.，2018）、大豆蚜*Aphis glycines*（Koch et al.，2020）、桃蚜*Myzus persicae*（Liu et al.，2022；2023），并且对二星瓢虫*Adalia bipunctata*、集栖瓢虫*Hippodamia convergens*、狡小花蝽*Orius insidiosus*等多种天敌昆虫表现出很好的安全性（Joseph，2020；Koch et al.，2020）。鉴于双丙环虫酯对半翅目害虫的高防效，开展烟粉虱对该药剂的田间抗性监测和抗性风险评估研究，对于有效防治烟粉虱具有重要参考价值。

本研究对来自我国北京、天津、河北、辽宁和河南5省（市）9个采样点的烟粉虱种群进行双丙环虫酯抗性监测，以明确其田间抗性现状；通过使用双丙环虫酯对室内敏感种群进行连续15代的抗性筛选，估算其抗性现实遗传力，评估烟粉虱对双丙环虫酯的抗性风险；并检测双丙环虫酯抗性筛选种群对阿维菌素、溴氰虫酰胺、噻虫嗪、氟啶虫胺腈、氟吡呋喃酮和联苯菊酯6种杀虫剂的交互抗性，以期为田间合理使用双丙环虫酯防治烟粉虱，延缓其抗性发展提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

供试虫源及植物：烟粉虱MED隐种来源于中国农业科学院蔬菜花卉研究所（Pan et al.，2011），在北京市农林科学院人工气候室内建立敏感种群Lab-MED，不接触任何药剂继代饲养10年以上，寄主植物为棉花*Gossypium hirsutum*品种新植1号（王然等，2016），生长至7~8片真叶用于饲养烟粉虱。田间种群于2025年分别采自北京市通州区、北京市昌平区、北京市平谷区、天津市西青区、天津市武清区、河北省张家口市崇礼区、河北省张家口市怀来县、辽宁省铁岭市铁岭县、河南省开封市杞县的大棚蔬菜上。每个田间种群采集后随机挑取30头成虫保存于100%乙醇中，通过测定烟粉虱线粒体*COI*基因的部分片段进行隐种鉴定（罗晨等，2002），发现均为MED隐种。

药剂、试剂及仪器：92.5%双丙环虫酯（afidopyropen）原药，巴斯夫欧洲公司；97%阿维菌素（abamectin）原药，江苏龙灯化学有限公司；94%溴氰虫酰胺（cyantraniliprole）原药，富美实（上海）农业科技有限公司；98%噻虫嗪（thiamethoxam）原药，江苏龙灯化学有限公司；95.9%氟啶虫胺腈（sulfoxaflor）原药，科迪华农业科技有限责任公司；96%氟吡呋喃酮（flupyradifurone）原药，拜耳股份公司；98%联苯菊酯（bifenthrin）原药，南京红太阳生物化学有限责任公司。试剂均为国产分析纯。S1000™ PCR仪，伯乐生命医学产品（上海）有限公司。

1.2 方法

1.2.1 烟粉虱成虫毒力测定方法

采用浸叶琼脂保湿法测定双丙环虫酯对室内敏感和田间烟粉虱种群的毒力。供试药剂梯度稀释5个浓度，其中Lab-MED、北京昌平和天津西青种群的处理浓度分别为10、5、2.5、1.25、0.625 mg/L，北京通州、北京平谷、河北怀来、河南杞县种群的处理浓度分别为20、10、5、2.5、1.25 mg/L，天津武清种群的处理浓度分别为40、20、10、5、2.5 mg/L，河北崇礼种群的处理浓度分别为30、15、7.5、3.75、1.875 mg/L，辽宁铁岭种群的处理浓度分别为16、8、4、2、1 mg/L，每个浓度设置4次重复，以清水作为对照。配制2%琼脂溶液，将棉花叶片用打孔器打成直径1.5 cm的圆形叶片，将叶片分别置于上述不同浓度的供试药剂溶液内20 s后，叶背朝上晾干，用干净的镊子将其加入到带2%琼脂的平底玻璃管中，叶背朝上，紧密贴合，不要留有任何气泡或空隙。每管随机接入7 d内羽化的烟粉虱成虫30头（雌雄比约为1∶1），管口用棉塞封口；将接好烟粉虱的玻璃管倒扣于温度（26±1）℃、相对湿度60%±10%、光周期16 L∶8 D的培养箱中培养。48 h后检查结果，记录玻璃管内死亡虫数和总虫数，试虫不能正常活动或不动视为死亡。采用PoloPlus 1.0软件计算各烟粉虱种群对杀虫剂的致死中浓度（median lethal concentration，LC_{50}）、95%置信区间、斜率以及标准误。抗性倍数=药剂对田间种群的LC_{50}/药剂对室内敏感种群的LC_{50}。抗性水平分级参照闫文茜等（2012）的分级标准：抗性倍数小于3.0倍时，为敏感水平；抗性倍数为3.1~5.0倍时，为敏感性下降；抗性倍数为5.1~10.0倍时，为低水平抗性；抗性倍数为10.1~40.0倍时，为中等水平抗性；抗性倍数为40.1~160.0倍时，为高水平抗性；抗性倍数为160.0倍以上时，为极高水平抗性。

1.2.2 烟粉虱成虫抗药性汰选

采用吕欢欢等（2020）汰选方法并加以改进，将烟粉虱室内敏感种群采用琼脂保湿法进行连续15代的抗性筛选，每代测定LC_{50}值，每代筛选参考1.2.1方法对LC_{50}值进行计算，筛选死亡率介于40%~60%之间。配制2%琼脂溶液加入至直径为4 cm的培养皿中冷却凝固，将棉花叶片打取直径为4 cm的叶碟，浸入药液20 s后取出，放置于室温下晾干并放在凝固的琼脂表面上，叶背朝上，紧密贴合，不留任何气泡或空隙。每个培养皿中随机接入7 d内羽化的烟粉虱成虫80头（雌雄比约为1∶1），共40个培养皿。将培养皿置于温度（26±1）℃、光照16 L∶8 D的养虫室中培养。48 h后将培养皿中存活的成虫转移至高65 cm、长35 cm、宽35 cm的养虫笼内，置于含7~8片真叶的健康棉花植株上继续饲养，养虫笼放置于温度（26±1）℃、光照16 L∶8 D的养虫室中，直至饲养至下一代成虫进行抗性筛选，连续进行筛选15代后获得双丙环虫酯筛选种群SEL-R。

1.2.3 抗性风险评估和抗性发展预测

根据Tabashnik & Mcgaughey（1994）改进的阈值分析法，计算抗性现实遗传力h^2。$h^2=R/S$，式中，R为选择反应，S为选择差异；$R=(\log(\text{终}\ LC_{50})-\log(\text{始}\ LC_{50}))/n$，$S=i\times\sigma_p$，式中，$n$为筛选代数，终$LC_{50}$为杀虫剂对筛选$n$代后的$LC_{50}$值，始$LC_{50}$为筛选前杀虫剂对亲代的$LC_{50}$值，$i$为选择强度，$i\approx1.583-0.0\ 193\ 336P+0.0\ 000\ 428P^2+3.65\ 194/P$，$\sigma_p$为平均离差，$\sigma_p=(1/2(\text{初斜率}+\text{终斜率}))^{-1}$，式中，初斜率为筛选前杀虫剂对亲代的毒力回归方程斜率，终斜率为杀虫剂对筛选

n代后的种群的毒力回归方程斜率，P=(1−平均校正死亡率)×100%，校正死亡率=(处理死亡率−对照死亡率)/(1−对照死亡率)×100%。

参考Tabashnik & Mcgaughey(1994)的抗性分级标准划分，当h^2≥0.3时，药剂属于高风险药剂；当0.1≤h^2<0.3时，药剂属于中风险药剂；当h^2<0.1时，药剂属于低风险药剂。在现实遗传力一定条件下，不同选择强度i下抗性发展速率也不同，用双丙环虫酯处理后致死率为50%~90%情况下，预测烟粉虱对其产生10倍、100倍抗性所需的代数，上升100倍，n=2/R=2/h^2S=2/$h^2\times i\times\sigma_p$，上升10倍，$n$=1/$R$=1/$h^2S$=1/$h^2\times i\times\sigma_p$。

1.2.4　杀虫剂交互抗性测定

采用1.2.1中毒力测定方法测定双丙环虫酯、阿维菌素、溴氰虫酰胺、噻虫嗪、氟啶虫胺腈、氟吡呋喃酮和联苯菊酯不同药剂对室内敏感种群Lab-MED和双丙环虫酯筛选种群SEL-R的毒力，Lab-MED和SEL-R种群对应的双丙环虫酯浓度分别为10、5、2.5、1.25、0.625 mg/L和40、20、10、5、2.5 mg/L，阿维菌素浓度分别为0.4、0.2、0.1、0.05、0.025 mg/L和0.8、0.4、0.2、0.1、0.05 mg/L，溴氰虫酰胺浓度均为8、4、2、1、0.5 mg/L，噻虫嗪浓度均为50、25、12.5、6.25、3.125 mg/L，氟啶虫胺腈浓度均为40、20、10、5、2.5 mg/L，氟吡呋喃酮分别为40、20、10、5、2.5 mg/L和50、25、12.5、6.25、3.125 mg/L，联苯菊酯浓度分别为500、250、125、62.5、31.25 mg/L和400、200、100、50、25 mg/L。通过计算抗性倍数确定是否存在交互抗性，抗性倍数计算方法及抗性水平分级标准同1.2.1。

2　结果与分析

2.1　烟粉虱对双丙环虫酯的田间抗性监测

田间抗性监测结果显示，在采集的9个烟粉虱田间种群中，除河南杞县种群对双丙环虫酯处于敏感性下降阶段，抗性倍数为3.9倍；北京通州、北京昌平、北京平谷、天津西青、天津武清、张家口崇礼、张家口怀来和辽宁铁岭这8个种群对双丙环虫酯处于敏感阶段，抗性倍数介于1.1~2.7倍之间(表1)。

表1　我国烟粉虱田间种群对双丙环虫酯的抗性水平

Table 1　Resistance in field population of *Bemisia tabaci* to afidopyropen in China

种群 Population	斜率±标准误 Slope±SE	LC_{50}(95%置信限) LC_{50} (95% fiducial limit)/(mg/L)	抗性倍数 Resistance ratio
Lab-MED	1.595±0.139	2.050(1.738−2.400)	−
北京通州 Tongzhou, Beijing	1.634±0.143	3.108(2.600−3.642)	1.5
北京昌平 Changping, Beijing	1.571±0.141	3.634(3.093−4.340)	1.8
北京平谷 Pinggu, Beijing	1.875±0.146	5.460(4.755−6.281)	2.7
天津西青 Xiqing, Tianjin	1.134±0.129	2.545(2.048−3.167)	1.2
天津武清 Wuqing, Tianjin	1.877±0.158	4.901(4.118−5.695)	2.4
河北崇礼 Chongli, Hebei	1.928±0.160	3.730(3.155−4.316)	1.8
河北怀来 Huailai, Hebei	1.730±0.154	2.276(1.870−2.682)	1.1
辽宁铁岭 Tieling, Liaoning	1.608±0.142	2.717(2.283−3.183)	1.3
河南杞县 Qixian, Henan	1.321±0.135	7.955(6.580−9.907)	3.9

2.2　烟粉虱对双丙环虫酯的抗性选育及风险评估

通过对室内敏感种群使用双丙环虫酯进行连续15代的抗性筛选，在F_0代，LC_{50}为2.012 mg/L，在连续筛选了12代后，抗性水平增长较慢，其LC_{50}为5.836 mg/L，抗性倍数仅为F_0代的2.9倍；从第13代开始，抗性水平增加逐渐加快，筛选15代后获得SEL-R种群，抗性倍数达到5.4倍(表2)。

通过计算抗性现实遗传力h^2，经过连续15代筛选，h^2为0.107。根据不同筛选阶段的抗性现实遗传力值预测烟粉虱对双丙环虫酯的抗性风险。在双丙环虫酯对烟粉虱的致死率分别为50%、60%、70%、80%和90%条件下，当h^2为0.107时，预计烟粉虱对双丙环虫酯抗性增加10倍分别需要22.09、18.15、15.12、12.60和10.00代；抗性增加100倍分别需要44.18、36.30、30.25、25.20和20.00代(图1)。

2.3　烟粉虱抗性种群对其他杀虫剂的交互抗性

与室内敏感种群Lab-MED相比，双丙环虫酯筛选种群SEL-R对双丙环虫酯的抗性倍数为5.1倍。交互抗性测定结果表明，阿维菌素、溴氰虫酰胺、噻虫嗪、氟啶虫胺腈、氟吡呋喃酮和联苯菊酯6种杀虫剂对双丙环虫酯室内筛选种群的交互抗性倍数分别仅为1.1倍、1.1倍、1.2倍、1.1倍、0.9倍和1.2倍，交互抗性水平均处于敏感阶段(表3)。

表2 双丙环虫酯对烟粉虱室内种群的抗性筛选

Table 2 Resistance selection of *Bemisia tabaci* laboratory populations to afidopyropen

种群 Population	LC_{50} (95%置信限)/ LC_{50} (95% fiducial limit)/ (mg/L)	斜率±标准误 Slope±SE	卡方值(自由度) Chi-square value (degrees of freedom)	筛选死亡率 Selection mortality/%	抗性倍数 Resistance ratio
F_0	2.012 (1.715−2.341)	1.669±0.142	2.134 (3)	47.6	−
F_1	2.747(2.277−3.383)	1.309±0.133	0.308(3)	55.8	1.4
F_2	2.922(2.464−3.399)	1.756±0.149	1.151(3)	52.6	1.5
F_3	3.105(2.584−3.653)	1.587±0.142	0.434(3)	49.2	1.5
F_4	3.251(2.756−3.776)	1.734±0.146	1.432(3)	57.1	1.6
F_5	3.538(2.944−4.180)	1.508±0.138	1.564(3)	54.2	1.8
F_6	3.824(3.267−4.434)	1.720±0.143	1.723(3)	55.6	1.9
F_7	4.039(3.546−4.582)	1.806±0.148	1.883(3)	52.9	2.0
F_8	4.312(3.723−4.971)	1.802±0.145	2.005(3)	56.3	2.1
F_9	4.715(4.126−5.383)	1.983±0.151	2.990(3)	57.4	2.3
F_{10}	5.384(4.511−6.451)	1.402±0.135	1.257(3)	55.8	2.7
F_{11}	5.478(4.743−6.346)	1.779±0.144	0.819(3)	53.5	2.7
F_{12}	5.836(4.917−6.980)	1.445±0.136	1.358(3)	49.8	2.9
F_{13}	7.324(6.298−8.561)	1.678±0.141	2.698(3)	52.9	3.6
F_{14}	9.250(7.992−10.846)	1.773±0.146	1.035(3)	56.9	4.6
F_{15}(SEL-R)	10.860(9.570−12.349)	2.096±0.154	1.199(3)	−	5.4

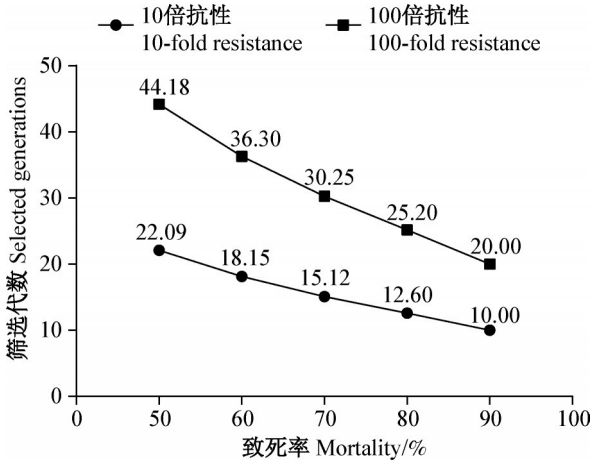


图1 不同选择压力下烟粉虱对双丙环虫酯抗性发展10、100倍所需代数

Fig. 1 Generations for *Bemisia tabaci* to develop 10-fold, 100-fold resistance to afidopyropen under different selection pressures

3 讨论

本研究通过监测2025年田间烟粉虱种群对双丙环虫酯的抗性发现,除了河南杞县种群对该药剂处于敏感性下降阶段外,其余8个种群均为敏感水平。河南杞县番茄种植大多采用设施栽培模式,为烟粉虱提供了适宜的周年发生条件。在设施环境下,烟粉虱寄主种类复杂,用药频率和用药量相对较高,加之当地可能使用双丙环虫酯或吡蚜酮等作用于TRPV的杀虫剂,这些因素均可能与河南杞县种群对双丙环虫酯的敏感性下降有关。目前国内外也对烟粉虱和其他半翅目昆虫开展了田间抗性监测工作。2019年对棉蚜 *Aphis gossypii* 的抗性监测发现,所有田间种群对双丙环虫酯均处于敏感阶段,而在2020—2021年,多个田间种群对其已产生低至中等水平的抗性,且抗性呈逐年上升趋势(Li et al.,2022)。2022—2023年,刘新新等(2024)对桃蚜的抗性监测发现,不同地区间LC_{50}值存在显著差异,表明部分种群已产生抗性。对于烟粉虱,Zhang et al.(2021)在2019—2020年监测中发现33个田间种群抗性均处于敏感阶段。作者团队前期于2021年对9省(市)18个地区的烟粉虱种群进行监测,发现17个烟粉虱种群对双丙环虫酯处于敏感阶段,而北京海淀种群对该药产生高水平抗性(Wang et al.,2022a)。国外也陆续有关于烟粉虱对双丙环虫酯产生抗性的报道。如印度的部分烟粉虱Asia隐种田间种群对双丙环虫酯产生中等水平抗性(19.09~35.27倍)(Mahalanobish et al.,2022);美国佛罗里达州2个烟粉虱MEAM1隐种种群对其分别产生38倍和51倍的抗性(Dimase et al.,2024a)。上述抗性差异可能与各地区用药历史、环境因素和种群间遗传多样性等因素有关。建议后续加强监测烟粉虱对双丙环虫酯的抗性,并在对双丙环虫酯已产生抗性的地区轮换使用其他类型杀虫剂,以延缓抗药性的进一步发展。

表3 室内双丙环虫酯筛选种群SEL-R对常用杀虫剂的交互抗性谱

Table 3 Resistance spectrum of the lab-selected population SEL-R to commonly used insecticides

药剂 Insecticide	种群 Population	LC_{50}（95%置信限） LC_{50} (95% fiducial limit)/(mg/L)	斜率±标准误 Slope±SE	卡方值（自由度） Chi-square value (degrees of freedom)	抗性倍数 Resistance ratio
双丙环虫酯 Afidopyropen	Lab-MED	2.053（1.705−2.446）	1.409±0.135	0.716（3）	−
	SEL-R	10.541（9.008−12.360）	1.609±0.139	1.070（3）	5.1
阿维菌素 Abamectin	Lab-MED	0.065（0.052−0.080）	1.224±0.132	0.747（3）	−
	SEL-R	0.072（0.054−0.089）	1.429±0.147	2.437（3）	1.1
溴氰虫酰胺 Cyantraniliprole	Lab-MED	1.025（0.825−1.228）	1.604±0.252	1.066（3）	−
	SEL-R	1.107（0.935−1.285）	1.817±0.152	2.101（3）	1.1
噻虫嗪 Thiamethoxam	Lab-MED	7.672（6.330−9.082）	1.524±0.140	1.170（3）	−
	SEL-R	9.079（7.545−10.748）	1.480±0.137	1.377（3）	1.2
氟啶虫胺腈 Sulfoxaflor	Lab-MED	6.720（5.671−7.841）	1.662±0.143	0.830（3）	−
	SEL-R	7.446（6.114−8.911）	1.374±0.135	2.141（3）	1.1
氟吡呋喃酮 Flupyradifurone	Lab-MED	8.733（7.411−10.232）	1.583±0.139	1.268（3）	−
	SEL-R	8.293（7.109−9.553）	1.851±0.149	1.111（3）	0.9
联苯菊酯 Bifenthrin	Lab-MED	113.813（95.830−134.559）	1.489±0.137	0.772（3）	−
	SEL-R	138.180（116.991−165.619）	1.524±0.141	0.347（3）	1.2

通过对害虫室内品系进行抗性筛选，评估其抗性风险，预测潜在的抗药性发展趋势，从而为科学制订田间用药方案与抗性治理策略提供理论依据。本研究通过对烟粉虱室内敏感品系使用双丙环虫酯进行连续15代的抗性筛选，发现抗性比为5.4倍，处于低水平抗性；抗性现实遗传力为0.107，表明存在中等抗性风险。其他半翅目昆虫中也有对双丙环虫酯产生抗性风险的报道，如棉蚜在室内筛选18代后，抗性倍数上升为23.033倍，抗性现实遗传力为0.063，当群体死亡率为60%~80%时，抗性倍数增加至10倍仅需要20~26代（Zha et al.，2024）；而桃蚜经30代抗性筛选后，与敏感种群相比抗性上升不显著（Kirkland et al.，2024）。不同物种间抗性风险评估结果的差异，可能与害虫种类、杀虫剂选择压等因素有关。尽管室内抗性筛选无法完全模拟田间抗性的实际发展过程，但其结果在一定程度上能够反映杀虫剂的基本特点，因此仍可为预防性抗性治理提供有价值的理论参考。

交互抗性是指害虫在对某一种杀虫剂产生抗性后，进而对其他从未接触过的杀虫剂也表现出抗性的现象。该现象对新型杀虫剂的推广应用及抗性治理措施的有效性具有重要影响。本研究发现经双丙环虫酯抗性筛选后的烟粉虱，对阿维菌素、溴氰虫酰胺、噻虫嗪、氟啶虫胺腈、氟吡呋喃酮和联苯菊酯6种杀虫剂均无交互抗性。作者团队前期发现，对双丙环虫酯抗性倍数为37.3倍的北京海淀烟粉虱种群，对氟啶虫酰胺、吡蚜酮、溴氰虫酰胺、吡虫啉、噻虫嗪无交互抗性，而对氟啶虫胺腈有中等水平的交互抗性，抗性倍数为14.5倍（Wang et al.，2022a）；Wang et al.（2022b）进一步研究表明，北京海淀抗性筛选种群对氟啶虫胺腈同样有中等水平的交互抗性，而对溴氰虫酰胺、氟吡呋喃酮、吡虫啉、噻虫嗪等5种杀虫剂无交互抗性。上述差异可能源于不同地理种群的背景差异。此外，也可能与北京海淀种群对双丙环虫酯的抗性水平较高有关，该种群中细胞色素P450单加氧酶（简称P450）介导的代谢抗性起主导作用，而P450酶活性的升高也可能导致了对氟啶虫胺腈的交互抗性。综合烟粉虱对双丙环虫酯的抗性风险评估和交互抗性结果，并结合目前田间烟粉虱种群已对双丙环虫酯产生抗性的现状，建议在田间防治烟粉虱时，注意与溴氰虫酰胺、氟吡呋喃酮等其他类型杀虫剂轮换使用，同时结合农业防治、生物防治和物理防治等其他防控措施，以延长双丙环虫酯的田间有效使用周期。

参 考 文 献（References）

Alemandri V, Vaghi Medina CG, DumOn AD, Arguello Caro EB, Mattio MF, Medina SG, Lopez Lambertini PM, Truol G. 2015. Three members of the *Bemisia tabaci* (Hemiptera: Aleyrodidae) cryptic species complex occur sympatrically in Argentine horticul-

tural crops. Journal of Economic Entomology, 108(2): 405−413

Chen XD, Ashfaq M, Stelinski LL. 2018. Susceptibility of Asian citrus psyllid, *Diaphorina citri* (Hemiptera: Liviidae), to the insecticide afidopyropen: a new and potent modulator of insect transient receptor potential channels. Applied Entomology and Zoology, 53(4): 453−461

Chu D, Zhang YJ. 2018. Research progress on the damages and management of *Bemisia tabaci* (Gennadius) in China over the past 10 years. Plant Protection, 44(5): 51−55 (in Chinese) [褚栋, 张友军. 2018. 近10年我国烟粉虱发生为害及防治研究进展. 植物保护, 44(5): 51−55]

De Barro PJ, Liu SS, Boykin LM, Dinsdale AB. 2011. *Bemisia tabaci:* a statement of species status. Annual Review of Entomology, 56(1): 1−19

Dimase M, De Marchi BR, da Silva FB, Lahiri S, Beuzelin J, Hutton S, Smith HA. 2024a. Monitoring the susceptibility of *Bemisia tabaci* Middle East-Asia Minor 1 (Hemiptera: Aleyrodidae) to afidopyropen, cyantraniliprole, dinotefuran, and flupyradifurone in south Florida vegetable fields. Journal of Economic Entomology, 117(4): 1606−1615

Dimase M, Marchi BRD, Lahiri S, Beuzelin J, Hutton S, Silva FBD, Smith HA. 2024b. First report of *Bemisia tabaci* MEAM1 (Hemiptera: Aleyrodidae) resistance to spirotetramat in Florida. Crop Protection, 180: 106661

Hogenhout SA, Ammar ED, Whitfield AE, Redinbaugh MG. 2008. Insect vector interactions with persistently transmitted viruses. Annual Review of Phytopathology, 46: 327−359

Hopkinson J, Balzer J, Fang C, Walsh T. 2023. Insecticide resistance management of *Bemisia tabaci* (Hemiptera: Aleyrodidae) in Australian cotton-pyriproxyfen, spirotetramat and buprofezin. Pest Management Science, 79(5): 1829−1839

Horikoshi R, Goto K, Mitomi M, Sunazuka T, Omura S. 2025. Research and development of an insecticide, afidopyropen. Journal of Pesticide Science, 50(1): 14−17

Horowitz AR, Ghanim M, Roditakis E, Nauen R, Ishaaya I. 2020. Insecticide resistance and its management in *Bemisia tabaci* species. Journal of Pest Science, 93(3): 893−910

Joseph SV. 2020. Effect of afidopyropen against *Myzus persicae* (Hemiptera: Aphididae) and its predator, *Adalia bipunctata* (L.) in a greenhouse. Journal of Entomological Science, 55(4): 584−587

Kandasamy R, London D, Stam L, von Deyn W, Zhao XL, Salgado VL, Nesterov A. 2017. Afidopyropen: new and potent modulator of insect transient receptor potential channels. Insect Biochemistry and Molecular Biology, 84: 32−39

Kirkland LS, Babineau M, Ward SE, Van Rooyen AR, Chirgwin E, Mata L, Umina PA. 2024. Assessing the risk of resistance to flonicamid and afidopyropen in green peach aphid (Hemiptera: *Myzus persicae*) via *in-vivo* selection. Crop Protection, 184: 106783

Koch RL, da Silva Queiroz O, Aita RC, Hodgson EW, Potter BD, Nyoike T, Ellers-Kirk CD. 2020. Efficacy of afidopyropen against soybean aphid (Hemiptera: Aphididae) and toxicity to natural enemies. Pest Management Science, 76(1): 375−383

Li KX, Liu JT, Geng ZQ, Xu W, Zhang Z, Chu D, Guo L. 2023. Resistance to dinotefuran in *Bemisia tabaci* in China: status and characteristics. Pest Management Science, 79(2): 833−844

Li R, Cheng SH, Liang PZ, Chen ZB, Zhang YJ, Liang P, Zhang L, Gao XW. 2022. Status of the resistance of *Aphis gossypii* Glover, 1877 (Hemiptera: Aphididae) to afidopyropen originating from microbial secondary metabolites in China. Toxins, 14(11): 750

Liu JW, Wang HL, Deng SF, Wang WB, Zhai X, Ren RD, Yu H. 2026. Survey and drought adaptability evaluation of *Bemisia tabaci* cryptic species. Journal of Biosafety, 35(1): 56−66 (in Chinese) [刘军伟, 王宏亮, 邓书芳, 王文博, 翟欣, 任荣栋, 余昊. 2026. 烟粉虱隐种调查与干燥适应性研究. 生物安全学报, 35(1): 56−66]

Liu XL, Ban N, Fu ZX, Gao XW, Liu TX, Liang P. 2023. Persistent toxicity and dissipation dynamics of afidopyropen against the green peach aphid *Myzus persicae* (Sulzer) in cabbage and chili. Ecotoxicology and Environmental Safety, 252: 114584

Liu XL, Fu ZX, Zhu YF, Gao XW, Liu TX, Liang P. 2022. Sublethal and transgenerational effects of afidopyropen on biological traits of the green peach aphid *Myzus persicae* (Sluzer). Pesticide Biochemistry and Physiology, 180: 104981

Liu XX, Wu MM, Xue L, Wang S, Guo XJ, Xiao D, Xu QX. 2024. Examination of the sensitivity of peach orchard aphids to imidacloprid and afidopyropen. Journal of Fruit Science, 41(9): 1836−1845 (in Chinese) [刘新新, 吴萌萌, 薛丽, 王甦, 郭晓军, 肖达, 徐庆宣. 2024. 桃园蚜虫对吡虫啉和双丙环虫酯的敏感度监测. 果树学报, 41(9): 1836−1845]

Luo C, Yao Y, Wang RJ, Yan FM, Hu DX. 2002. The use of mitochondrial cytochrome oxidase mtCOI gene sequences for the identification of biotypes of *Bemisia tabaci* (Gennadius) in China. Acta Entomologica Sinica, 45(6): 759−763 (in Chinese) [罗晨, 姚远, 王戎疆, 阎凤鸣, 胡敦孝, 张芝利. 2002. 利用mtDNA COI基因序列鉴定我国烟粉虱的生物型. 昆虫学报, 45(6): 759−763]

Lü HH, Zhou CS, Yang L, Liu ZY, Ma DY. 2020. Cross-resistance and realized heritability analysis of whitefly *Bemisia tabaci* MEAM1 cryptic species to three neonicotinoids. Xinjiang Agricultural Sciences, 57(9): 1734−1745 (in Chinese) [吕欢欢, 周成松, 杨柳, 刘祯妍, 马德英. 2020. MEAM1烟粉虱隐种对3种新烟碱类杀虫剂交互抗性及交互现实遗传力的分析. 新疆农业科学, 57(9): 1734−1745]

Mahalanobish D, Dutta S, Roy D, Biswas A, Sarkar S, Mondal D, Gaber A, Hossain A, Sarkar PK. 2022. Field-evolved resistance and mechanisms in *Bemisia tabaci* Asia I to a novel pyropene insecticide, afidopyropen, in India. Crop Protection, 162: 106078

Pan HP, Chu D, Ge DQ, Wang SL, Wu QJ, Xie W, Jiao XG, Liu BM,

Yang X, Yang NN, et al. 2011. Further spread of and domination by *Bemisia tabaci* (Hemiptera: Aleyrodidae) biotype Q on field crops in China. Journal of Economic Entomology, 104(3): 978−985

Stavrakaki M, Tsagkarakou A, Vontas J, Roditakis E. 2023. A multi-year monitoring survey on insecticide resistance for cotton whitefly *Bemisia tabaci*. Entomologia Generalis, 43(3): 567−574

Tabashnik BE, McGaughey WH. 1994. Resistance risk assessment for single and multiple insecticides: responses of Indian-meal moth (Lepidoptera: Pyralidae) to *Bacillus thuringiensis*. Journal of Economic Entomology, 87(4): 834−841

Tan X, Zheng HX, Ji Y, Xie W, Zhang YJ. 2021. Monitoring of resistance in field populations of *Bemisia tabaci* to 5 insecticides in China. China Vegetables, (5): 64−69 (in Chinese) [谈星, 郑慧新, 季尧, 谢文, 张友军. 2021. 田间烟粉虱种群对5种杀虫剂的抗性监测. 中国蔬菜, (5): 64−69]

Wang Q, Luo C, Wang R. 2023. Insecticide resistance and its management in two invasive cryptic species of *Bemisia tabaci* in China. International Journal of Molecular Sciences, 24(7): 6048

Wang R, Gao BL, Che WN, Qu C, Zhou X, Luo C. 2022a. First report of field resistance to afidopyropen, the novel pyropene insecticide, on *Bemisia tabaci* Mediterranean (Q biotype) from China. Agronomy, 12(3): 724

Wang R, Zhang QH, Zhou X, Zhang M, Yang QY, Su Q, Luo C. 2022b. Characterization of field-evolved resistance to afidopyropen, a novel insecticidal toxin developed from microbial secondary metabolites, in *Bemisia tabaci*. Toxins, 14(7): 453

Wang R, Zhang XM, Li FQ, Wu F, Li HL, Luo C. 2016. Cloning and prokaryotic expression of odorant binding protein OBP8 in MED cryptic species *Bemisia tabaci* and the binding characteristics with plant volatiles. Journal of Plant Protection. 43(1): 32−39 (in Chinese) [王然, 张晓曼, 李峰奇, 吴帆, 李红亮, 罗晨. 2016. 烟粉虱MED隐种气味结合蛋白OBP8的克隆、原核表达及与植物挥发物的结合特性. 植物保护学报, 43(1): 32−39]

Xue YT, Lin CT, Wang YZ, Zhang YB, Ji LQ. 2022. Ecological niche complexity of invasive and native cryptic species of the *Bemisia tabaci* species complex in China. Journal of Pest Science, 95(3): 1245−1259

Yan WQ, Wang XJ, Zhang YJ, Wang SL. 2012. Population dynamics of the vegetable whitefly, *Bemisia tabaci*, and its resistance to neonicotinoid insecticides in Beijing area. Plant Protection. 38(5): 154−157, 169 (in Chinese) [闫文茜, 王相晶, 张友军, 王少丽. 2012. 北京地区蔬菜烟粉虱种群动态及其对烟碱类杀虫剂的抗药性监测. 植物保护, 38(5): 154−157, 169]

Zha H, Wang XL, Ren XC, Wang JG. 2024. Risk assessment of *Aphis gossypii* (Hemiptera: Aphididae) development of resistance to afidopyropen1. Journal of Entomological Science, 59(3): 258−274

Zhang Z, Shi HJ, Xu W, Liu JT, Geng ZQ, Chu D, Guo L. 2021. Pymetrozine-resistant whitefly *Bemisia tabaci* (Gennadius) populations in China remain susceptible to afidopyropen. Crop Protection, 149: 105757

（责任编辑：王 璇）