

# 吡虫啉悬浮种衣剂对麦无网长管蚜实验种群的影响

李亚萍, 李祥瑞, 张云慧\*, 朱 勋, 程登发

(中国农业科学院植物保护研究所, 植物病虫害生物学国家重点实验室, 北京 100193)

**摘要** 利用吡虫啉种子包衣技术防治麦蚜是我国小麦主产区一项重要的防控措施, 目前对麦蚜的防控效果评价主要集中在自然混合种群上, 对室内种群尤其是麦无网长管蚜的研究报道较少。为了明确吡虫啉种衣剂对单一蚜虫种类的影响, 本文利用吡虫啉悬浮种衣剂处理的小麦苗接种 4 种蚜虫, 分别于 3、6 和 9 d 后检查死亡率。并采用生命表方法评价种衣剂处理对麦无网长管蚜生长发育、繁殖和种群生命参数的影响。结果表明: 种衣剂处理小麦苗接种的 4 种蚜虫, 3 d 后死亡率大小依次为禾谷缢管蚜>麦长管蚜>麦二叉蚜>麦无网长管蚜, 6 d 后禾谷缢管蚜和麦长管蚜全部死亡; 9 d 后麦二叉蚜全部死亡, 但麦无网长管蚜死亡率仅为 10.3%。生命表结果表明: 麦无网长管蚜大部分个体在种衣剂处理麦苗上可以完成整个世代周期, 但其生长发育延缓, 存活率、寿命和繁殖力显著下降, 内禀增长率( $r_m$ )、周限增长率( $\lambda$ )、净生殖率( $R_0$ )显著降低, 平均世代周期( $T$ )显著延长。研究结果进一步证实吡虫啉包衣处理对麦长管蚜、禾谷缢管蚜、麦二叉蚜具有很好的防治效果, 但对麦无网长管蚜防效较差。

**关键词** 麦无网长管蚜; 吡虫啉种衣剂; 实验种群; 生命参数

**中图分类号:** S 435.122.2 **文献标识码:** A **DOI:** 10.16688/j.zwbh.2018139

## Impacts of seed coating with imidacloprid on laboratory populations of *Metopolophium dirhodum* (Walker) (Hemiptera: Aphididae)

LI Yaping, LI Xiangrui, ZHANG Yunhui, ZHU Xun, CHENG Dengfa

(State Key Laboratory for Biology of Plant Diseases and Insect Pests, Institute of Plant Protection, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China)

**Abstract** Imidacloprid seed coating treatment has been suggested as an important management for wheat aphids in the major grain-producing areas in China. The effect of imidacloprid on the control of aphids was mainly evaluated in mixed natural populations, but few studies were conducted in the laboratory population, especially *Metopolophium dirhodum*. To determine the effect of imidacloprid seed coating on grain aphids, four aphid species were inoculated on wheat plants seed-treated with imidacloprid, and the aphids mortality was calculated after 3, 6 and 9 d, respectively. The development, reproduction and population parameters of *M. dirhodum* were evaluated by using life table test. The mortalities of four aphid species after 3 d were categorized in the order from high to low as follows: *Rhopalosiphum padi*, *Sitobion miscanthi*, *Schizaphis graminum*, *M. dirhodum*. *R. padi* and *S. miscanthi* died out within 6 d, and *S. graminum* died out within 9 d, while the mortality of *M. dirhodum* was only 10.3% at 9 d. Most individuals of *M. dirhodum* completed the entire generation cycle, but delayed developmental time, and significantly declined survival rate, lifespan and fecundity. The intrinsic rate of increase ( $r$ ), finite rate of increase ( $\lambda$ ) and net reproductive rate ( $R_0$ ) were also found significantly decreased, while mean generation time ( $T$ ) was significantly prolonged. The results further confirmed that wheat seeds treated with imidacloprid were effective against *R. padi*, *S. avenae*, and *S. graminum*, but poor to *M. dirhodum*.

**Key words** *Metopolophium dirhodum*; imidacloprid seed coating; laboratory population; life parameter

麦蚜是我国小麦生产中的主要害虫, 其种类主要包括麦长管蚜 *Sitobion miscanthi* (Fabricius)、禾谷缢管蚜 *Rhopalosiphum padi* (Linnaeus)、麦二叉蚜 *Schizaphis graminum* (Rondani) 和麦无网长管蚜 *Metopolophium dirhodum* (Walker)。其中, 麦

无网长管蚜是小麦、燕麦、黑麦等禾本科作物上的重要害虫<sup>[1]</sup>, 是英国、西班牙、德国等欧洲国家和南美洲阿根廷等国家小麦上的蚜虫优势种群, 并有多次暴发为害的记录<sup>[2-3]</sup>。国外对麦无网长管蚜的发生为害规律、生物学习性、防治技术、预测预报模型都开展了相

收稿日期: 2018-03-31

修订日期: 2018-05-10

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFD0201700, 2016YFD0300705); 现代农业产业技术体系(CARS-03)

\* 通信作者 E-mail: yhzhang@ippcaas.cn

关的研究<sup>[4-7]</sup>。国内麦无网长管蚜主要分布在北京、河北、河南、云南、西藏、陕西、内蒙古等地,是我国局部麦区的主要害虫<sup>[8]</sup>。国内对麦无网长管蚜的研究报道较少,主要集中在田间和实验种群方面<sup>[1,9-10]</sup>。

新烟碱类杀虫剂吡虫啉因其独特的作用机理和对蚜虫的良好防效已经成为防治麦蚜的首选药剂<sup>[11]</sup>。自从刘爱芝等<sup>[12-13]</sup>发表了吡虫啉包衣可以有效防控小麦全生育期内麦蚜,对天敌安全且增产作用明显的报道以来,吡虫啉包衣在土壤和植株内的残留动态<sup>[14]</sup>,在不同地区的防治效果<sup>[15]</sup>以及持续控制的机理<sup>[16]</sup>等各方面的研究相继报道,多方证实了吡虫啉包衣对小麦蚜虫的防控效果。近年来,吡虫啉包衣在我国小麦生产上得到了大面积的推广应用,基本实现了全覆盖。随着吡虫啉的大面积推广应用,因个别种类蚜虫产生耐药性导致的田间防效下降的现象已经显现。近年来,关于麦长管蚜、麦二叉蚜、禾谷缢管蚜对吡虫啉抗性相关研究已有大量报道<sup>[17-19]</sup>。麦蚜多以混合种群发生为害,4种麦蚜在不同地区的分布和优势度及对吡虫啉的敏感性存在差异,吡虫啉包衣处理对单一种群麦蚜防治效果报道较少,对麦无网长管蚜种群的影响一直未见报道。本研究将会明确吡虫啉包衣对不同种类麦蚜的药效差异,评估不同种类蚜虫对吡虫啉包衣的抗性程度,能更好地为小麦害虫的区域治理提供技术参考。

本研究团队在河北、北京等地多年的系统调查显示,北京、河北等北方小麦产区吡虫啉包衣后小麦孕穗期到乳熟期麦无网长管蚜的发生为害仍然相对较重,并且呈上升趋势。这些情况一直未得到重视。本文通过室内模拟吡虫啉包衣处理对不同蚜虫的控制效果,并利用生命表研究了吡虫啉包衣处理对麦无网长管蚜种群参数的影响,明确了吡虫啉包衣技术防治麦蚜在麦无网长管蚜发生区存在的潜在风险,本项研究结果可以为吡虫啉包衣技术的合理使用和麦蚜的有效防控提供技术支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

麦长管蚜 *Sitobion miscanthi* (Fabricius)、禾谷缢管蚜 *Rhopalosiphum padi* (Linnaeus)、麦二叉蚜 *Schizaphis graminum* (Rondani) 和麦无网长管蚜 *Metopolophium dirhodum* (Walker) 4种麦蚜于2008年采自河北廊坊(39.524°N, 116.685°E),接种于室内的小麦上同时连续转接3次以保证虫源不带病毒,在温度(18±1)℃、相对湿度60%±10%、光

照L//D=16 h//8 h的条件下(以下试验均在同等温、湿度和光照环境下进行),不接触任何药剂在盆栽麦苗上连续饲养至今。小麦品种为‘轮选987’(中国农业科学院作物研究所选育,丰达种业股份有限公司提供)。600 g/L吡虫啉悬浮种衣剂由拜耳作物科学(中国)有限公司提供。特制的透明聚乙烯生态盒(长×宽×高2.5 cm×2.5 cm×2.5 cm)可以反复打开方便观察,上下两面为铜丝网透气且防止蚜虫逃逸,详见张云慧等<sup>[20]</sup>。

### 1.2 试验方法

#### 1.2.1 种衣剂处理对4种蚜虫室内种群的防治效果测定

根据企业推荐防控蚜虫的剂量(即有效成分用量200 g/100 kg种子)用600 g/L吡虫啉悬浮种衣剂(高巧)2 mL加入水10.5 mL包衣处理1 kg小麦种子,用小型拌种机搅拌,待种子表面均匀着药后,置于通风避光处阴干备用。处理后的种子种植在试验专用瓦盆内(高12 cm,上、下直径15.5 cm、8 cm),自种子发芽露出土壤表面10 d(3叶期)后接种抗逆性较强的4种麦蚜的无翅成蚜。蚜虫接种在特制生态盒内(5头/盒),分别在3、6、9 d后检查蚜虫死亡率,每个处理50头,重复3次。对照组的小麦种子无任何处理。

#### 1.2.2 种衣剂处理对麦无网长管蚜生命参数的影响

小麦出苗10 d(与上述试验相同),将单头无翅成蚜接种在生态盒内,待成蚜产下第一头若蚜,移去成蚜,自初产蚜开始,每日检查1次,记录生长发育情况,随时移去蚜蜕和死蚜,若蚜发育为成蚜产仔后,每日定时准确记录产蚜量,并移除仔蚜,直至成蚜死亡。每个处理40头,重复3次。对照组的小麦种子无任何处理。

### 1.3 数据处理

#### 1.3.1 生命表处理

根据年龄-阶段两性生命表理论<sup>[21]</sup>,原始数据利用软件 TWOSEX-MSChart<sup>[22]</sup> 分析(生命表理论及其软件设计也将蚜虫孤雌生殖的特殊情况考虑在内)。用年龄-阶段特征存活率( $s_{xj}$ ), $x$ 是年龄, $j$ 是阶段;年龄特征存活率( $l_x$ );年龄-阶段特征繁殖力( $f_{xj}$ );年龄特征繁殖力( $m_x$ ),净生殖率( $R_0$ )按下式计算:

$$R_0 = \sum_{x=0}^{\infty} l_x m_x \quad (1)$$

内禀增长率( $r_m$ )用迭代二分法和 Euler-Lotka 方程计算,从蚜虫出生开始:

$$\sum_{x=0}^{\infty} e^{-r_m(x+1)} l_x m_x = 1 \quad (2)$$

周限增长率( $\lambda$ )按下式计算:

$$\lambda = e^{r_m} \quad (3)$$

平均世代周期( $T$ )按下式计算:

$$T = \frac{\ln(R_0)}{r_m}$$

(4)

1.3.2 其他数据处理

采用 SPSS16.0 对 4 种蚜虫死亡率进行方差分析(ANOVA),用 Duncan 法进行显著性分析和多重比较,对照和处理间的生命表参数用 *t* 检验法进行显著性分析。

2 结果与分析

2.1 种衣剂处理对 4 种蚜虫室内种群的防治效果

种衣剂处理麦苗出苗 10 d 后接种 4 种蚜虫的

无翅成虫,接种 3 d 时 4 种麦蚜的死亡率大小依次为禾谷缢管蚜(87.4%)>麦长管蚜(61.1%)>麦二叉蚜(38.1%)>麦无网长管蚜(6.7%),相互之间差异达到显著水平。接种 6 d 时禾谷缢管蚜和麦长管蚜的死亡率达到 100%,麦二叉蚜死亡率为 96.7%,均显著高于麦无网长管蚜 9.6%的死亡率。接种 9 d 时麦二叉蚜死亡率达到 100%,麦无网长管蚜只有 10.3%。接种 6 d 和 9 d 时麦无网长管蚜的死亡率无显著差异( $P<0.05$ )(表 1)。4 种蚜虫空白对照死亡率都在 3.1%以下,相互之间没有显著性差异。

表 1 吡虫啉种衣剂处理麦苗上 4 种麦蚜的死亡率<sup>1)</sup>

Table 1 The mortalities of four wheat aphid species fed on wheat plants treated by imidacloprid seed dressing

| 种<br>Species              | CK 死亡率/% Mortality of aphid in CK |            |            | 处理死亡率/% Mortality of aphid in treatment |             |              |
|---------------------------|-----------------------------------|------------|------------|-----------------------------------------|-------------|--------------|
|                           | 3 d                               | 6 d        | 9 d        | 3 d                                     | 6 d         | 9 d          |
| 禾谷缢管蚜 <i>R. padi</i>      | (1.3±1.2)a                        | (2.1±0.8)a | (2.7±0.7)a | (87.4±1.6)a                             | (100.0±0)a  | —            |
| 麦长管蚜 <i>S. miscanthi</i>  | (0.9±0.3)a                        | (1.4±0.7)a | (1.8±0.5)a | (61.1±1.1)b                             | (100.0±0)a  | —            |
| 麦二叉蚜 <i>S. graminum</i>   | (2.4±0.9)a                        | (2.6±1.4)a | (2.9±0.9)a | (38.1±1.3)c                             | (96.7±0.9)a | (100.0±0.1)a |
| 麦无网长管蚜 <i>M. dirhodum</i> | (2.5±0.4)a                        | (2.7±1.3)a | (3.1±0.9)a | (6.7±1.2)d                              | (9.6±1.6)b  | (10.3±2.1)b  |

1) 表中数据为平均值±标准误,同列数据后不同字母表示差异显著( $P<0.05$ ,Duncan 法)。  
Data in the table are represented as mean±SE. Different letters in the same column indicate significant difference ( $P<0.05$ ,Duncan test).

2.2 种衣剂处理对麦无网长管蚜生长发育和繁殖力的影响

吡虫啉种衣剂处理麦苗上接种的麦无网长管蚜大部分个体可以存活,并能完成世代周期,若虫期1~3龄发育历期分别比对照延长 1.59、0.11 d 和 0.21 d,1 龄和 3 龄发育历期与对照之间差异显著,4 龄历期比对照缩短 0.23 d,未达到显著水平,若蚜期比对照显著

延长 1.7 d( $P<0.05$ )。成蚜期寿命(30.34 d)与对照(30.32 d)差异不显著,产蚜历期(12.30 d)比对照(14.89 d)显著缩短,平均产蚜量(20.08)比对照(34.44)显著减少,单头产蚜量平均减少 14.36 头( $P<0.05$ )(表 2)。吡虫啉种衣剂处理后接种麦无网长管蚜能延缓若蚜期生长发育,对成虫发育历期影响不大,但能显著降低其产仔量,对成虫的繁殖能力具有一定的抑制作用。

表 2 吡虫啉种衣剂处理下麦无网长管蚜不同阶段的发育历期<sup>1)</sup>

Table 2 The developmental durations of *Metopolophium dirhodum* fed on wheat plants treated by imidacloprid seed dressing

| 指标 Index               | CK            | 吡虫啉包衣 Imidacloprid seed dressing |
|------------------------|---------------|----------------------------------|
| 1 龄/d 1st instar nymph | (1.32±0.05)b  | (2.91±0.08)a                     |
| 2 龄/d 2nd instar nymph | (2.02±0.05)a  | (2.13±0.07)a                     |
| 3 龄/d 3rd instar nymph | (1.90±0.08)b  | (2.11±0.05)a                     |
| 4 龄/d 4th instar nymph | (2.87±0.09)a  | (2.64±0.09)a                     |
| 若蚜期/d Pre-adult        | (8.12±0.09)b  | (9.82±0.13)a                     |
| 成蚜期/d Adult            | (30.34±0.77)a | (30.32±0.78)a                    |
| 产蚜历期/d Pre-nymph       | (14.89±0.50)a | (12.30±0.48)b                    |
| 繁殖力/头 Fecundity        | (34.44±1.40)a | (20.08±1.03)b                    |

1) 表中数据为平均值±标准误,标准误用 bootstrapping (100,000)估计。同行不同字母表示差异显著( $P<0.05$ , 独立样本 *t* 检验)。下同。  
Data in the table are represented as mean±SE estimated with bootstrapping (100,000). Different letters in the same row indicate significantly difference ( $P<0.05$ , Student's *t* test). The same below.

2.3 种衣剂处理对麦无网长管蚜存活率的影响

年龄-阶段特征存活率( $s_{xj}$ )曲线表示麦无网长管蚜从初产幼仔能活到年龄 *x* 阶段 *j* 的可能性,曲线重叠部分表示麦无网长管蚜不同发育阶段有时间重叠。种衣剂处理麦苗上麦无网长管蚜若蚜的存活率为

66%,显著低于对照(98%),成蚜期的成活率和对照差异不大,部分个体寿命比对照偏长,种衣剂处理 57 d 成虫全部死亡,对照在 51 d 已经全部死亡(图 1)。  
年龄特征存活率( $l_x$ )曲线为不考虑阶段分化的种群年龄-特征,种衣剂处理和对照在最后都有一段

较陡的斜线,这是种群死亡高发期,对应为成虫后期,种衣剂处理在生长发育前期有一段较陡的斜线,即初产幼仔至4龄若蚜期间种群死亡率较高。对照在整个种群年龄-特征繁殖力( $m_x$ )和种群年龄-阶段特征繁殖值( $l_xm_x$ )数值变化基本一致,种衣剂处理  $l_xm_x$  比  $m_x$  明显偏低。不同处理麦无网长管蚜达到繁殖高峰期时间基本一致,都在11~12日龄,每日最高产仔量种衣剂处理(1.48头)比对照(4.49头)明显减少。

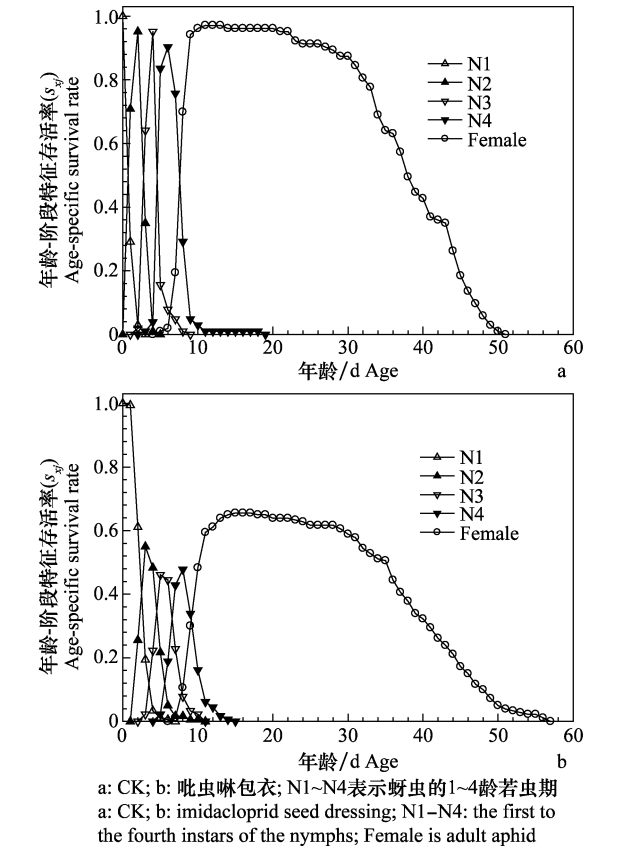


图1 吡虫啉包衣处理的麦苗上麦无网长管蚜的年龄-阶段特征存活率( $s_{xj}$ )

Fig.1 Age-stage-specific survival rates ( $s_{xj}$ ) of *Metopolophium dirhodum* fed on wheat plants treated by imidacloprid seed dressing

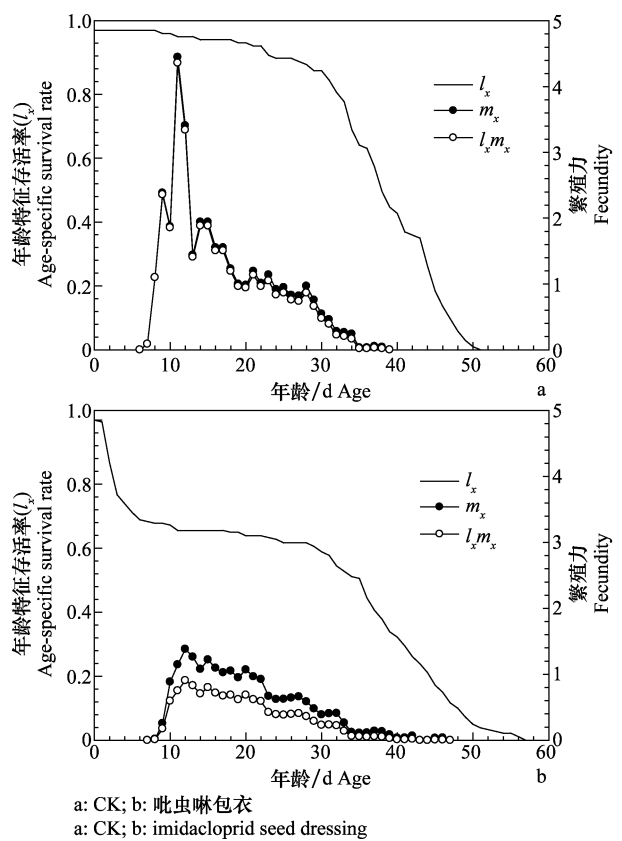


图2 不同处理麦无网长管蚜的年龄特征存活率( $l_x$ ), 年龄特征繁殖力( $m_x$ ), 年龄特征生殖值( $l_xm_x$ )

Fig.2 Age-specific survival rates ( $l_x$ ), age-specific fecundity ( $m_x$ ), and net maternity ( $l_xm_x$ ) of *Metopolophium dirhodum* fed on wheat plants treated by imidacloprid seed dressing

## 2.4 种衣剂处理对麦无网长管蚜种群生命表参数的影响

种衣剂处理麦苗上麦无网长管蚜种群内禀增长率 $r_m$ 下降0.1017,周限增长率 $\lambda$ 下降0.1239,净生殖率 $R_0$ 下降20.62,平均世代周期 $T$ 延长3.36d,与对照的差异都达到显著性水平( $P<0.05$ )(表3)。上述结果表明,种衣剂处理的麦苗对麦无网长管蚜种群发展起到抑制作用。

表3 吡虫啉包衣处理的麦苗上麦无网长管蚜的种群生命表参数

| Table 3 Life table parameters of <i>Metopolophium dirhodum</i> fed on wheat plants treated by imidacloprid seed dressing |  | CK                 | 吡虫啉包衣 Imidacloprid seed dressing |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|--------------------|----------------------------------|
| 参数 Parameter                                                                                                             |  |                    |                                  |
| 内禀增长率( $r$ ) Intrinsic rate of increase                                                                                  |  | (0.248 6±0.003 6)a | (0.146 90±0.004 6)b              |
| 周限增长率( $\lambda$ ) Finite rate of increase                                                                               |  | (1.282 2±0.004 7)a | (1.158 30±0.005 3)b              |
| 净增殖率( $R_0$ ) Net reproductive rate                                                                                      |  | (33.780 0±1.46)a   | (13.16±0.98)b                    |
| 平均世代周期( $T$ )/d Mean generation time                                                                                     |  | (14.160 0±0.16)b   | (17.52±0.21)a                    |

## 3 讨论

种衣剂具有方便播种、避免病虫危害、药物利用率高、持效期长、环境污染少、提高种子抵御逆境(低温、缺

水、缺氧等)的能力、促进作物生长等优点<sup>[23]</sup>,因而在国内外得到广泛应用。种子包衣或种衣剂的使用已成为当今农业的发展趋势。目前我国小麦主产区以吡虫啉包衣防治小麦蚜虫已经基本实现全覆盖。吡虫啉种

衣剂处理田间防控效果对河北田间麦蚜自然种群<sup>[24-26]</sup> (主要包括麦长管蚜、禾谷缢管蚜和麦二叉蚜,其中麦长管蚜在麦蚜发生盛期占比例可达约 90%)、山东和河南地区麦蚜(主要是麦长管蚜和禾谷缢管蚜),表现出超高效、持效的防控效果<sup>[27-30]</sup>。吡虫啉包衣在小麦苗期对麦长管蚜有超强的胃毒致死作用<sup>[31]</sup>。本文通过室内模拟再次印证了吡虫啉包衣对这三种蚜虫的防控效果,但目前的文献报道缺乏对不同种类蚜虫的防效评价结果,本文通过室内的吡虫啉种衣剂包衣处理模拟和种群生命表的方法,首次证实了田间吡虫啉包衣对麦无网长管蚜防控效果不理想现状。

Lu 等<sup>[32]</sup>在吡虫啉亚致死剂量跨多代处理麦长管蚜和禾谷缢管蚜过程中,发现禾谷缢管蚜寿命继续下降的同时繁殖力恢复,这说明在吡虫啉亚致死剂量的长期选择压可能刺激麦蚜繁殖。更有研究表明吡虫啉低剂量在刺激桃蚜增强繁殖力的同时,还延长寿命,增强或减弱解毒基因的表达,并能跨多代传递应对后续杀虫剂的压力<sup>[33-34]</sup>。本研究只做了对当代种群的影响,在建议施用剂量吡虫啉种衣剂处理的情况下,麦无网长管蚜可以完成世代周期,对其耐药性机理方面还需要进一步研究。目前市场化的吡虫啉悬浮种衣剂针对的是麦蚜混合种群(麦长管蚜、禾谷缢管蚜和麦二叉蚜在其中占据绝对优势),随着吡虫啉包衣大面积推广应用,麦蚜抗药性水平的上升,是否会使个别种群产生亚致死效应还需要深入研究。

近年来,本研究团队在北京顺义、河北廊坊、栾城等地多年的田间调查也显示麦无网长管蚜的种群呈明显的上升趋势。本项研究结果也表明吡虫啉种衣剂处理小麦出苗 10 d,室内种群生命表试验结果显示虽然能显著抑制麦无网长管蚜种群的发展,但大部分新生若蚜(66%)能够生存下来并完成世代周期,成蚜的成活率和对照没有显著性差异,室内测定也显示直接处理成蚜的死亡率在 10%左右,说明成蚜比若蚜有更强的耐药性,麦蚜属于典型的 r 对策昆虫,生长发育历期短,繁殖速度快,世代重叠严重,几乎全年都进行孤雌生殖。因此,对吡虫啉包衣产生的抗药性问题和麦蚜种群演替等一系列问题亦不容忽视。国外的研究也表明麦无网长管蚜在生态遗传学上具有广泛的生理可塑性和遗传变异<sup>[35]</sup>,随着吡虫啉包衣技术的推广,麦无网长管蚜在高选择压的作用下产生累积抗性,扩大在麦蚜混合种群的比例,成为其发生为害区的优势种群,造成麦蚜为害的再猖獗的风险增大。因此,吡虫啉包衣技术对麦无网长管蚜的防控效果值得关注,建议麦无网长管蚜发生区要加强其监测和防控。

## 参考文献

[1] 杜予州,毛亚勋. 麦无网长管蚜实验种群生命表研究[J]. 贵州

农学院学报,1997,16(3):16-21.

- [2] DEWAR A, TATCHELL G, TURL L A D. A comparison of cereal aphid migrations over Britain in the summers of 1979 and 1982 [J]. Crop Protection,1984, 3: 379-389.
- [3] PONS X, ALBAJES R, AVILA SARASUA M J, et al. Spring population development of cereal aphids on durum wheat in Lleida, NE of Spain [J]. Journal of Applied Entomology,1989,107:203-210.
- [4] HOWARD M T, DIXON A F G. Forecasting of peak population density of the rose grain aphid *Metopolophium dirhodum* on wheat [J]. Annals of Applied Biology,1990, 117:9-19.
- [5] HONEK A. Factors determining the peak abundance of *Metopolophium dirhodum* (Homoptera: Aphididae) on cereals [J]. Bulletin of Entomological Research,1991, 81: 57-64.
- [6] MA Chunsen, HAU B, POEHLING H M. Effects of pattern and timing of high temperature exposure on reproduction of the rose grain aphid, *Metopolophium dirhodum* [J]. Entomologia Experimentalis et Applicata, 2004, 110(1): 65-71.
- [7] CAROLINA S C, LILIAN R D. Composition and biological activity of essential oils against *Metopolophium dirhodum* (Hemiptera: Aphididae) cereal crop pest [J]. Pest Management Science, 2012, 68:1492-1500.
- [8] 张广学,钟铁森. 中国经济昆虫志,第二十五册同翅目蚜虫类(一)[M]. 北京:科学出版社,1983.
- [9] 胡胜昌,贡素. 温度对麦无网长管蚜实验种群生长的影响[J]. 昆虫学报,1985,28(1):36-44.
- [10] 陈巨莲,郭予元,倪汉祥,等. 麦无网长管蚜田间种群动态的研究[J]. 植物保护学报,1994,21(1):7-13.
- [11] 王建军,韩召军,王荫长. 新烟碱类杀虫剂毒理学研究进展[J]. 植物保护学报,2001, 28(2): 178-182.
- [12] 刘爱芝,李素娟,韩松. 吡虫啉包衣对小麦蚜虫的控制效果及增产作用研究初报[J]. 河南农业科学,2005,34(11): 63-64.
- [13] 刘爱芝,陶岭梅,韩松,等. 吡虫啉包衣控制全生育期小麦蚜虫有效剂量评价[J]. 植物保护, 2009, 35(2): 152-154.
- [14] 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.
- [15] 王亚欣. 吡虫啉包衣全生育期防控麦蚜技术在不同地区的效果差异及其原因分析[J]. 保定:河北农业大学,2014.
- [16] MIAO Jin, DU Zhenbao, WU Yuqing, et al. Sub-lethal effects of four neonicotinoid seed treatments on the demography and feeding behaviour of the wheat aphid *Sitobion avenae* [J]. Pest Management Science, 2014, 70(1):55-59.
- [17] 邱高辉,姚远,韩召军. 麦长管蚜对吡虫啉的抗性机理研究[J]. 南京农业大学学报,2008, 31(2): 67-70.
- [18] 黄钰淞,梁文涛,谢佳燕. 麦二叉蚜吡虫啉抗性选育及其 3 种酶活性变化研究[J]. 武汉轻工大学学报,2014,33(3):13-15.
- [19] ZHANG M, QIAO X F, LI Y T, et al. Cloning of eight *Rhopalosiphum padi* (Hemiptera: Aphididae) nAChR subunit genes and mutation detection of the  $\beta 1$  subunit in field samples from China [J]. Pesticide Biochemistry and Physiology, 2016, 132: 89-95.
- [20] 张云慧,韩二宾,李祥瑞,等. 拌种吡虫啉残留对麦长管蚜实验种群的影响[J]. 昆虫学报,2013, 56(1): 54-59.

(下转 36 页)

- technology, 2018, 102(8): 3687 - 3699.
- [5] DU Lixin, QIU Lili, PENG Qi, et al. Identification of the promoter in the intergenic region between *orf1* and *cry8Ea1* controlled by sigma H factor [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2012, 78(12): 4164 - 4168.
  - [6] ZHOU Changmei, ZHENG Qinyun, PENG Qi, et al. Screening of *cry*-type promoters with strong activity and application in Cry protein encapsulation in a *sigK* mutant [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2014, 98(18): 7901 - 7909.
  - [7] SCHAEFFER P, MILLET J, AUBERT J P. Catabolic repression of bacterial sporulation [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 1965, 54(3): 704 - 711.
  - [8] SHU Changlong, YU Hong, WANG Rongyan, et al. Characterization of two novel *cry8* genes from *Bacillus thuringiensis* strain BT185 [J]. Current Microbiology, 2009, 58(4): 389 - 392.
  - [9] AGAISSE H, LERECLUS D. Structural and functional analysis of the promoter region involved in full expression of the *cryIIIA* toxin gene of *Bacillus thuringiensis* [J]. Molecular Microbiology, 1994, 13(1): 97 - 107.
  - [10] LIU Guiming, SONG Lai, SHU Changlong, et al. Complete genome sequence of *Bacillus thuringiensis* subsp. *kurstaki* strain HD73 [J]. Genome Announcements, 2013, 1(2): e00080 - 13.
  - [11] PERCHAT S, DUBOIS T, ZOUHIR S, et al. A cell-cell communication system regulates protease production during sporulation in bacteria of the *Bacillus cereus* group [J]. Molecular Microbiology, 2011, 82(3): 619 - 633.
  - [12] 王新梅, 杜立新, 彭琦, 等. 四种 *cry* 基因启动子在 *spoIIID* 基因突变株中的活性比较[J]. 微生物学报, 2012, 52(9): 1075 - 1084.
  - [13] BARBOZA-CORONA J E, PARK H W, BIDESHI D K, et al. The 60-kilodalton protein encoded by *orf2* in the *cry19A* operon of *Bacillus thuringiensis* subsp. *jegathesan* functions like a C-terminal crystallization domain [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2012, 78(6): 2005 - 2012.
  - [14] DERVYN E, PONCET S, KLIER A, et al. Transcriptional regulation of the *cryIVD* gene operon from *Bacillus thuringiensis* subsp. *israelensis* [J]. Journal of Bacteriology, 1995, 177(9): 2283 - 2291.
  - [15] WIDNER W R, WHITELEY H R. Two highly related insecticidal crystal proteins of *Bacillus thuringiensis* subsp. *kurstaki* possess different host range specificities [J]. Journal of Bacteriology, 1989, 171(2): 965 - 974.
  - [16] DENG Chao, PENG Qi, SONG Fuping, et al. Regulation of *cry* gene expression in *Bacillus thuringiensis* [J]. Toxins, 2014, 6(7): 2194 - 2209.
  - [17] STAPLES N, ELLAR D, CRICKMORE N. Cellular localization and characterization of the *Bacillus thuringiensis* Orf2 crystallization factor [J]. Current Microbiology, 2001, 42(6): 388 - 392.
  - [18] YU Ziquan, BAI Peisheng, YE Weixing, et al. A novel negative regulatory factor for nematocidal Cry protein gene expression in *Bacillus thuringiensis* [J]. Journal of Microbiology and Biotechnology, 2008, 18(6): 1033 - 1039.

(责任编辑: 田 喆)

(上接 29 页)

- [21] CHI H, SU H Y. Age-stage, two-sex life tables of *Aphidius gifuensis* (Ashmead) (Hymenoptera: Braconidae) and its host *Myzus persicae* (Sulzer) (Homoptera: Aphididae) with mathematical proof of the relationship between female fecundity and the net reproductive rate [J]. Environmental Entomology, 2006, 35(1): 10 - 21.
- [22] CHI H. TWSEX-MSChart: a computer program for the age-stage, two-sex life table analysis. National Chung Hsing University [DB/OL]. <http://140.120.197.173/Ecology/Download/TWosex-M Chart.rat/>. 2016.
- [23] 杜光玲, 赤国彤. 种衣剂及其发展应用的研究[J]. 中国农学通报, 2002, 18(1): 52 - 57.
- [24] 党志红, 李耀发, 潘文亮, 等. 吡虫啉包衣防治小麦蚜虫技术及安全性研究[J]. 应用昆虫学报, 2011, 48(6): 1676 - 1681.
- [25] 高占林, 党志红, 李耀发, 等. 吡虫啉包衣量对小麦蚜虫的防治效果及其在小麦籽粒中的残留研究[J]. 河北农业科学, 2011, 15(10): 57 - 59.
- [26] 李耀发, 党志红, 潘文亮, 等. 新烟碱类杀虫剂噻虫胺拌种防治麦蚜的田间药效及安全性评价[J]. 农药, 2013, 52(9): 689 - 691.
- [27] 都振宝, 苗进, 武予清, 等. 新烟碱类杀虫剂拌种对麦蚜田间药效及药剂残留动态分析[J]. 应用昆虫学报, 2011, 48(6): 1682 - 1687.
- [28] 刘爱芝, 韩松, 梁九进. 新烟碱类杀虫剂拌种防治麦蚜效果及安全性研究[J]. 河南农业科学, 2012, 41(12): 94 - 97.
- [29] 高志山, 张学峰, 刘海涛, 等. 新烟碱类杀虫剂种子包衣防治麦蚜的可行性评价[J]. 植物保护学报, 2016, 43(5): 864 - 872.
- [30] ZHANG Peng, ZHANG Xuefeng, ZHAO Yunhe, et al. Effects of imidacloprid and clothianidin seed treatments on wheat aphids and their natural enemies on winter wheat [J]. Pest Management Science, 2016, 72(6): 1141 - 1149.
- [31] 范文超, 程志, 党志红, 等. 吡虫啉包衣对麦长管蚜控制机制的初步探讨[J]. 河北农业大学学报, 2013, 36(1): 90 - 94.
- [32] LU Y H, ZHENG X S, GAO X W. Sublethal effects of imidacloprid on the fecundity, longevity, and enzyme activity of *Sitobion avenae* (Fabricius) and *Rhopalosiphum padi* (Linnaeus) [J]. Bulletin of Entomological Research, 2016, 106(4): 551 - 559.
- [33] RIX R R, AYYANATH M R, CUTLER G C. Sublethal concentrations of imidacloprid increase reproduction, alter expression of detoxification genes, and prime *Myzus persicae*, for subsequent stress [J]. Journal of Pest Science, 2016, 89(2): 581 - 589.
- [34] RIX R R, CUTLER G C. Does multigenerational exposure to hormetic concentrations of imidacloprid precondition aphids for increased insecticide tolerance? [J]. Pest Management Science, 2018, 74(2): 314 - 322.
- [35] WEBER G. On the ecological genetics of *Metopolophium dirhodum* (Walker) (Hemiptera, Aphididae) [J]. Journal of Applied Entomology, 1985, 100: 451 - 458.

(责任编辑: 田 喆)