



微波辐射对桃蚜生长发育和繁殖的影响

张 宣^{1,2}, 易 蓬³, 褚平富⁴, 袁向群¹, 展恩玲¹, 冷春蒙¹,
李 引¹, 胡 迪¹, 李怡萍^{1,2,*}

(1. 西北农林科技大学, 植保资源与病虫害治理教育部重点实验室, 陕西杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学, 农业部西北黄土高原作物有害生物综合治理重点实验室, 陕西杨凌 712100; 3. 西安展意信息科技有限公司, 西安 710075; 4. 西安正平植保科技有限公司, 西安 710003)

摘要:【目的】研究筛选对桃蚜 *Myzus persicae* 有致死作用的安全微波频率和照射时长, 以为探究新型物理防蚜技术, 弥补化学防治上的缺陷提供参考依据。【方法】在暗箱中, 应用微波发射仪分别发射 1 375, 2 750, 5 500 和 11 000 MHz 4 个不同频率的微波照射桃蚜 1 日龄无翅成蚜, 每个频率的照射时长分别为 15, 30, 60 和 120 s; 照射后在人工气候箱中饲养, 分别于照射后 8, 24, 48 和 72 h 观察其生长发育及繁殖状况, 统计桃蚜死亡率、繁殖力(累计产蚜量)及子代有翅蚜率。【结果】4 个不同频率的微波分别在 4 个不同照射时长下, 对桃蚜 1 日龄无翅成蚜的死亡率、繁殖力和子代翅型分化都有不同程度的影响。照射后 72 h, 5 500 MHz 微波照射时间为 15 s 时对桃蚜 1 日龄无翅成蚜的致死作用最强, 死亡率达到 55.00%, 在照射时间为 30 和 120 s 时可抑制子代桃蚜向有翅蚜的分化。2 750 MHz 微波照射 30 和 60 s 时促进桃蚜 1 日龄成蚜繁殖, 照射 30 s 时繁殖力最强, 而照射 15 和 120 s 时却表现为抑制繁殖, 且 2 750 MHz 微波照射 30 s 能抑制子代桃蚜向有翅蚜分化。【结论】微波辐射能够影响桃蚜 1 日龄成蚜的存活、繁殖和子代翅型分化。本研究初步筛选出了对桃蚜 1 日龄无翅成蚜有致死作用的微波频率和照射时长。

关键词: 桃蚜; 物理防治; 微波; 辐照; 微波频率; 生长发育; 繁殖力

中图分类号: Q968 文献标识码: A 文章编号: 0454-6296(2020)10-1215-08

Effects of microwave irradiation on the growth, development and reproduction of the green peach aphid, *Myzus persicae* (Hemiptera: Aphididae)

ZHANG Xuan^{1,2}, YI Peng³, CHU Ping-Fu⁴, YUAN Xiang-Qun¹, ZHAN En-Ling¹, LENG Chun-Meng¹, LI Yin¹, HU Di¹, LI Yi-Ping^{1,2,*} (1. Key Laboratory of Plant Protection Resources and Pest Management, Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Key Laboratory of Integrated Pest Management on Crops in Northwestern Loess Plateau, Ministry of Agriculture, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. Xi'an Zhanyi Information Technology Company Limited, Xi'an 710075, China; 4. Xi'an Zhengping Plant Protection Technology Company Limited, Xi'an 710003, China)

Abstract: 【Aim】 This study aims to screen out the safe microwave frequencies and irradiation duration that have a lethal effect on the green peach aphid, *Myzus persicae*, so as to provide references for exploring new physical prevention technology for aphids to make up for deficiencies in chemical control.

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFD0200900); 陕西省重点研发计划(2017ZDCXL-NY-03-02); 陕西省农业科技创新与攻关项目(2016NY-058)

作者简介: 张宣, 男, 1996 年 1 月生, 陕西汉中, 硕士研究生, 研究方向为农业昆虫与害虫防治, E-mail: 938466860@qq.com

* 通讯作者 Corresponding author, E-mail: liyiping@nwsuaf.edu.cn

收稿日期 Received: 2020-02-25; 接受日期 Accepted: 2020-05-20

【Methods】The 1-day-old apterous adults of *M. persicae* were subjected to microwave irradiation at four different frequencies (1 375, 2 750, 5 500, and 11 000 MHz) for different duration (15, 30, 60, and 120 s) in a dark box. Then, they were reared in an artificial climate cabinet, and their growth, development, and reproduction were observed at 8, 24, 48 and 72 h post irradiation, the mortality, the fertility (cumulative aphid yield), and the rate of alate progeny were counted and analyzed. 【Results】Microwave irradiation at the four different frequencies for different duration had varying effects on the mortality rate and reproduction of the 1-day-old apterous adults of *M. persicae*, and the wing morph differentiation of their progeny. At 72 h post irradiation, the microwave irradiation at a frequency of 5 500 MHz for 15 s had the strongest lethal effect on the 1-day-old apterous adults of *M. persicae*, causing a mortality rate of 55.00%, and the microwave irradiation at this frequency for 30 and 120 s inhibited the differentiation of the progeny to alate aphids. The microwave irradiation at a frequency of 2 750 MHz for 30 and 60 s promoted the reproduction of the 1-day-old apterous adults of *M. persicae*, the apterous aphids had the strongest fertility when subjected to microwave irradiation at this frequency for 30 s, but their reproduction was inhibited when subjected to microwave irradiation at this frequency for 15 and 120 s. In addition, the microwave irradiation at 2 750 MHz for 30 s inhibited the differentiation of the progeny of *M. persicae* to alate aphids. 【Conclusion】Microwave irradiation can affect the survival and reproduction of the 1-day-old apterous adults of *M. persicae* and the wing morph differentiation of the progeny. The microwave frequency and irradiation duration that have a lethal effect on the 1-day-old apterous adults of *M. persicae* have been preliminarily screened out in this study.

Key words: *Myzus persicae*; physical control; microwave; irradiation; microwave frequency; growth and development; fecundity

桃蚜 *Myzus persicae* 又称烟蚜, 属半翅目 (Hemiptera) 蚜科 (Aphididae), 是一种多食性害虫。其寄主植物范围广, 主要为害十字花科、蔷薇科、茄科、豆科、菊科、藜科等 50 科 400 多种植物, 可造成一定的经济损失 (Weber, 1985; 张利军等, 2015)。桃蚜常以成、若蚜集中在寄主嫩芽、新梢等处吸食汁液, 造成叶片卷缩、变黄, 影响开花和结实, 致使植株生长发育缓慢, 受害严重的全株枯死, 分泌的蜜露会引起煤污病, 影响寄主光合作用 (李明桃, 2013; 李姝等, 2014)。据报道在宁夏枸杞主产区, 桃蚜常与棉蚜、豆蚜混合发生, 严重危害当地枸杞产量和有机枸杞生产 (张润志和张蓉, 2016)。此外, 桃蚜还可传播 55 种非持久性或半持久性植物病毒, 如黄瓜花叶病毒 (cucumber mosaic virus, CMV)、马铃薯 Y 病毒 (potato virus Y, PVY)、番木瓜环斑病毒 (papaya ringspot virus, PRSV) 等, 且传毒效率高达 40% ~ 60% (田兆丰等, 2011; 赵锟等, 2013; 梁彦, 2017)。目前, 我国对于桃蚜的防治主要以化学防治为主, 但由于桃蚜具有世代周期短、繁殖能力强的特点, 频繁大量地使用化学农药已经使桃蚜对化学农药产生了不同程度的抗药性, 导致化学防治效果不佳。北京地区不同桃蚜种群对高效氯氰菊酯、毒

死蜱、吡虫啉、阿维菌素、甲氨基阿维菌素苯甲酸盐 5 种农药均产生不同程度的抗性, 其中不同种群的桃蚜对高效氯氰菊酯均为高水平抗性 (宫亚军等, 2011; 常静等, 2016)。刘晓岚等 (2018) 在研究我国多地区桃蚜种群对抗蚜威的抗性水平时发现, 从 2015 至 2016 年, 河北宽城种群的抗性倍数由 0.80 上升到 67.51, 由敏感变为高抗。同时, 化学防治对环境和人畜安全产生了一定的负面影响, 因此, 蚜虫防治工作面临着新的挑战, 需要探寻新的可替代的技术来解决问题。

物理防治技术是使用物理因子抑制昆虫生长繁殖的害虫防治方法, 其作为害虫综合治理的重要组成部分, 起着辅助或替代化学防治的作用, 具有比较安全、方便、无公害等优点。防治措施主要包括灯光诱捕技术、气调防治技术、辐照防治技术、机械阻隔技术和温控防治技术等 (桑文等, 2018)。微波是一种高频电磁波, 频率在 300 MHz ~ 300 GHz 之间。微波的生物效应分为热效应和非热效应两种。热效应是指生物体内的水分、蛋白质和脂质等电解质在吸收微波后, 这些极性分子在外加电场的作用下发生重排, 在这种高速运动中, 极性分子间相互摩擦, 产生大量热量, 使得温度升高。进而引发生物体内

细胞膜的结构、通透性和功能的相应变化,使得细胞膜两侧的离子浓度梯度和跨膜物质的运输等生命活动发生变化,加快某些生命活动等。此外,这种热效应还会导致生物体内细胞分裂和繁殖速率加快,有利于处于分裂期的细胞(庞小峰和张安英, 2001)。微波对生物的非热效应是指在没有明显温度变化情况下,生物体内产生的其他变化,如膜电位变化、生化反应的改变、代谢速率的改变,这种效应也称为微波的生物学效应,不同频率的微波对生物产生的效应不同(杭锋等, 2009)。近年来,由于微波对生物体的热效应和非热效应,使得利用微波杀虫杀菌这种新型有害生物治理方式受到广泛关注(王首峰和梁海曼, 1998; 李巧玲等, 2001)。

目前,微波技术在储粮害虫的防治方面研究较多。栗克森和叶炳元(1992)探究了 2 450 MHz 微波加热对小麦中谷象 *Sitophilus granarius*、谷斑皮蠹 *Trogoderma granarium* 和赤拟谷盗 *Tribolium castaneum* 的致死作用。张洪亮等(2010)探究了微波辐射对麦长管蚜 *Sitobion avenae* 生态学特性和抗氧化酶同工酶的影响。张民照等(2007)通过不同时间和功率的微波处理绿豆象 *Callosobruchus chinensis* 成虫、豆内幼虫及卵后,绿豆象成虫死亡率随照射时间及功率的增加而上升,绿豆象成虫产卵量、幼虫羽化率、卵孵化率均有所降低。但有关微波辐射对农田害虫桃蚜的生长发育的影响探究却鲜有报道。本研究以室内甘蓝饲养的桃蚜为供试昆虫,采用不同频率和照射时长的微波处理,期望筛选出对桃蚜存活、繁殖和翅型分化有影响的微波频率和照射时长,为进一步研究微波的杀虫机理和利用微波防治害虫提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 供试昆虫:西北农林科技大学北校区温室用甘蓝续代饲养的桃蚜 1 日龄无翅成蚜,甘蓝品种为“秦甘 70”。温室内饲养环境条件:温度 22 ± 1℃,相对湿度 70% ± 5%,光周期 16L: 8D。

1.1.2 实验仪器:微波发射仪 FREQ55-13000(西安展意信息科技有限公司;工作范围: 54 ~ 13 600 MHz;输出功率: - 10 ~ 0 dBm;输入功率波动: ± 1 dBm);秒表;人工气候箱(ZPQ-280B;控温范围: 0 ~ 50℃;控温精度: ± 0.1℃;控温波动度: ± 0.5 ~ ± 1℃;控湿范围: 50% ~ 95% RH;控湿精度: ± 1%

RH;控湿波动度: ± 3% ~ ± 7% RH)。
1.2 微波辐照处理后桃蚜生长发育和繁殖指标观测

频率的选取参考栗克森和叶炳元(1992)研究的 2 450 MHz 微波具有致死作用,基本在该频率上下梯度设置了 1 375, 2 750, 5 500 和 11 000 MHz 4 个不同频率的微波,每个频率分别照射桃蚜 15, 30, 60 和 120 s,共 16 组实验处理,设置不照射为对照。每个处理照射桃蚜 20 头,重复 3 次。

具体处理方法:将新鲜甘蓝叶片剪成长 10 cm 宽 2.5 cm 的长条放置在微波发射仪的暗箱中,用小毛笔轻轻挑选蛻皮第 1 天的无翅成蚜(1 日龄)20 头置于甘蓝叶片上,将甘蓝叶片放置于微波发射仪中,分别用上述不同频率和时间的微波照射处理。处理后将桃蚜每 2 头移入一个直径为 3.5 cm 的培养皿中,每个皿中预先放 3 ~ 5 mm 厚的 15 g/L 琼脂(起保湿作用)和同样大小的新鲜甘蓝叶片,盖上皿盖,用胶带缠绕固定,统一放置于人工气候箱中(温度 22 ± 1℃,相对湿度 70% ± 5%,光周期 16L: 8D)饲养。于照射后 8, 24, 48 和 72 h 观察记录桃蚜生长发育及繁殖状况,包括死亡数、产蚜量、子代有翅蚜数 3 个指标。调查时发现虫体僵硬蚜虫,以毛笔尖轻触虫体,不动者视为死亡,记录结果后清除死亡桃蚜。根据统计结果,计算出微波照射后每组平均死亡率、子代有翅蚜率,繁殖力以产生子代的数量(产蚜量)来计。

$$\text{死亡率}(\%) = \frac{\text{死亡蚜虫数}}{\text{总蚜虫数}} \times 100\%;$$
$$\text{子代有翅蚜率}(\%) = \frac{\text{子代有翅蚜虫数}}{\text{产蚜量}} \times 100\%。$$

1.3 数据分析

所有数据处理通过 Excel 和 SPSS 20.0 软件程序进行,利用 SPSS 20.0 软件的单因素方差分析(one-way ANOVA)程序进行方差分析,多重比较采用 LSD 方法进行,选择 95% 的置信区间。

2 结果

2.1 不同频率微波处理对桃蚜 1 日龄无翅成蚜的致死作用

1 375, 2 750, 5 500 和 11 000 MHz 4 种不同频率的微波分别照射 15, 30 和 60 和 120 s,照射后 8, 24, 48 和 72 h 桃蚜的死亡率如表 1 所示,各组结果差异性显著,表现为微波照射对桃蚜 1 日龄无翅成

表 1 不同频率微波辐照不同时长后桃蚜 1 日龄无翅成蚜的死亡率 (%)
Table 1 The mortality (%) of the 1-day-old apterous adults of *Myzus persicae* subjected to microwave irradiation at different frequencies for different duration

频率 (MHz)	辐照时长 (s)	辐照处理后时间 Time post irradiation (h)			
Frequency	Irradiation duration	8	24	48	72
不辐照 (CK) Non-irradiation	0	0.00 ± 0.00 d	3.33 ± 1.67 fg	6.67 ± 1.67 f	8.33 ± 1.67 f
1 375	15	5.00 ± 0.00 cd	6.67 ± 0.67 efg	15.00 ± 0.00 de	31.67 ± 1.67 b
	30	3.33 ± 1.67 cd	3.33 ± 1.67 fg	11.67 ± 0.67 def	20.00 ± 1.15 cd
	60	1.67 ± 1.67 cd	3.33 ± 1.67 fg	10.00 ± 0.58 ef	21.67 ± 0.67 cd
	120	1.67 ± 1.67 cd	6.67 ± 1.67 efg	8.33 ± 1.67 ef	23.33 ± 1.67 c
2 750	15	1.67 ± 1.67 cd	13.33 ± 1.67 abc	30.00 ± 2.89 b	33.33 ± 1.67 b
	30	1.67 ± 1.67 cd	5.00 ± 2.89 fg	16.67 ± 1.67 b	23.33 ± 0.67 c
	60	11.67 ± 3.33 b	18.33 ± 0.67 a	23.33 ± 1.67 c	25.00 ± 2.89 c
	120	3.33 ± 1.67 cd	10.00 ± 1.15 cde	15.00 ± 5.00 de	16.67 ± 0.89 de
5 500	15	6.67 ± 1.67 bc	15.00 ± 2.89 ab	43.33 ± 3.33 a	55.00 ± 2.89 a
	30	15.00 ± 2.89 a	15.00 ± 2.89 ab	26.67 ± 1.67 bc	36.67 ± 1.67 b
	60	3.33 ± 1.67 cd	11.67 ± 1.67 bcd	26.67 ± 1.67 bc	35.00 ± 1.73 b
	120	6.67 ± 1.67 bc	8.33 ± 1.67 def	23.33 ± 1.67 c	35.00 ± 1.15 b
11 000	15	3.33 ± 1.67 cd	5.00 ± 2.89 fg	13.33 ± 0.33 de	21.67 ± 1.67 cd
	30	1.67 ± 1.67 cd	1.67 ± 1.67 g	16.67 ± 1.33 b	20.00 ± 1.73 cd
	60	1.67 ± 1.67 cd	1.67 ± 1.67 g	8.33 ± 0.88 ef	10.00 ± 1.15 f
	120	1.67 ± 1.67 cd	3.33 ± 1.67 fg	8.33 ± 1.67 ef	13.33 ± 1.33 ef

表中数据分别为 3 组重复实验数据的平均值 ± 标准误, 相同列中数据后不同小写字母表示桃蚜 1 日龄无翅成蚜经不同频率微波辐照不同时长后死亡率差异显著 ($P < 0.05$, one-way ANOVA, LSD)。Data in the table are means ± SE of three replicates. Different lowercase letters following the data in the same column indicate significant differences in the mortality of the 1-day-old apterous adults subjected to microwave irradiation at different frequencies for different duration ($P < 0.05$, one-way ANOVA, LSD)。

蚜有一定的致死作用。其中 5 500 MHz 微波辐照对桃蚜的致死作用较强, 在处理 8 h, 5 500 MHz 微波辐照 30 s 的处理组中, 桃蚜死亡率为 15.00%, 显著高于其他处理组 ($P < 0.05$)。处理后 48 和 72 h, 5 500 MHz 微波辐照 15 s 的处理组中, 桃蚜死亡率均显著高于其他处理组, 且随着照射时间的延长, 死亡率增长, 处理后 72 h, 死亡率达到最高, 为 55.00%。处理后 24 h, 2 750 MHz 微波辐照 60 s 的处理组中桃蚜的死亡率为 18.33%, 显著高于其他处理组 ($P < 0.05$)。11 000 MHz 微波照射 4 个时长下桃蚜的死亡率均较低, 说明这个频率对桃蚜的致死作用较弱。

2.2 不同频率微波处理对桃蚜繁殖力的影响

1 375, 2 750, 5 500 和 11 000 MHz 4 种不同频率的微波分别辐照 15, 30, 60 和 120 s, 辐照后 8, 24, 48 和 72 h 的累计产蚜量结果如图 1 所示。微波处理后 8 h, 2 750 MHz 微波照射 30 s ($P = 0.000$), 5 500 MHz 微波照射 30 s ($P = 0.005$) 和 120 s ($P = 0.016$) 这 3 个处理组的桃蚜累计产蚜量显著高于对照组, 促进桃蚜产蚜 (图 1: A)。

微波处理后 24 h, 2 750 MHz 微波照射 30 s ($P = 0.001$) 和 60 s ($P = 0.002$) 的处理组中, 桃蚜累计产蚜量显著高于对照组, 促进桃蚜产蚜, 且照射 30 s 的处理组桃蚜累计产蚜量最高; 2 750 MHz 微波照射 15 s ($P = 0.001$) 和 5 500 MHz 微波照射 60 s ($P = 0.019$) 2 个处理组的桃蚜累计产蚜量显著低于对照组, 表现为抑制桃蚜产蚜 (图 1: B)。

微波处理后 48 h, 2 750 MHz 微波照射 30 s ($P = 0.002$) 和 60 s ($P = 0.040$), 5 500 MHz 微波照射 30 s ($P = 0.046$) 和 120 s ($P = 0.040$), 11 000 MHz 微波照射 15 s ($P = 0.028$) 和 120 s ($P = 0.015$) 这 6 个处理组中桃蚜累计产蚜量均显著高于对照组, 促进桃蚜产蚜, 其中 2 750 MHz 微波照射 30 s 的处理组累计产蚜量最高; 2 750 MHz 微波照射 120 s 的处理组累计产蚜量显著低于对照组 ($P = 0.014$), 表现为抑制桃蚜产蚜 (图 1: C)。

微波处理后 72 h, 2 750 MHz 微波照射 30 s ($P = 0.000$) 和 60 s ($P = 0.000$), 5 500 MHz 微波照射 30 s ($P = 0.009$), 11 000 MHz 微波照射 15 s ($P = 0.002$), 60 s ($P = 0.014$) 和 120 s ($P = 0.000$)

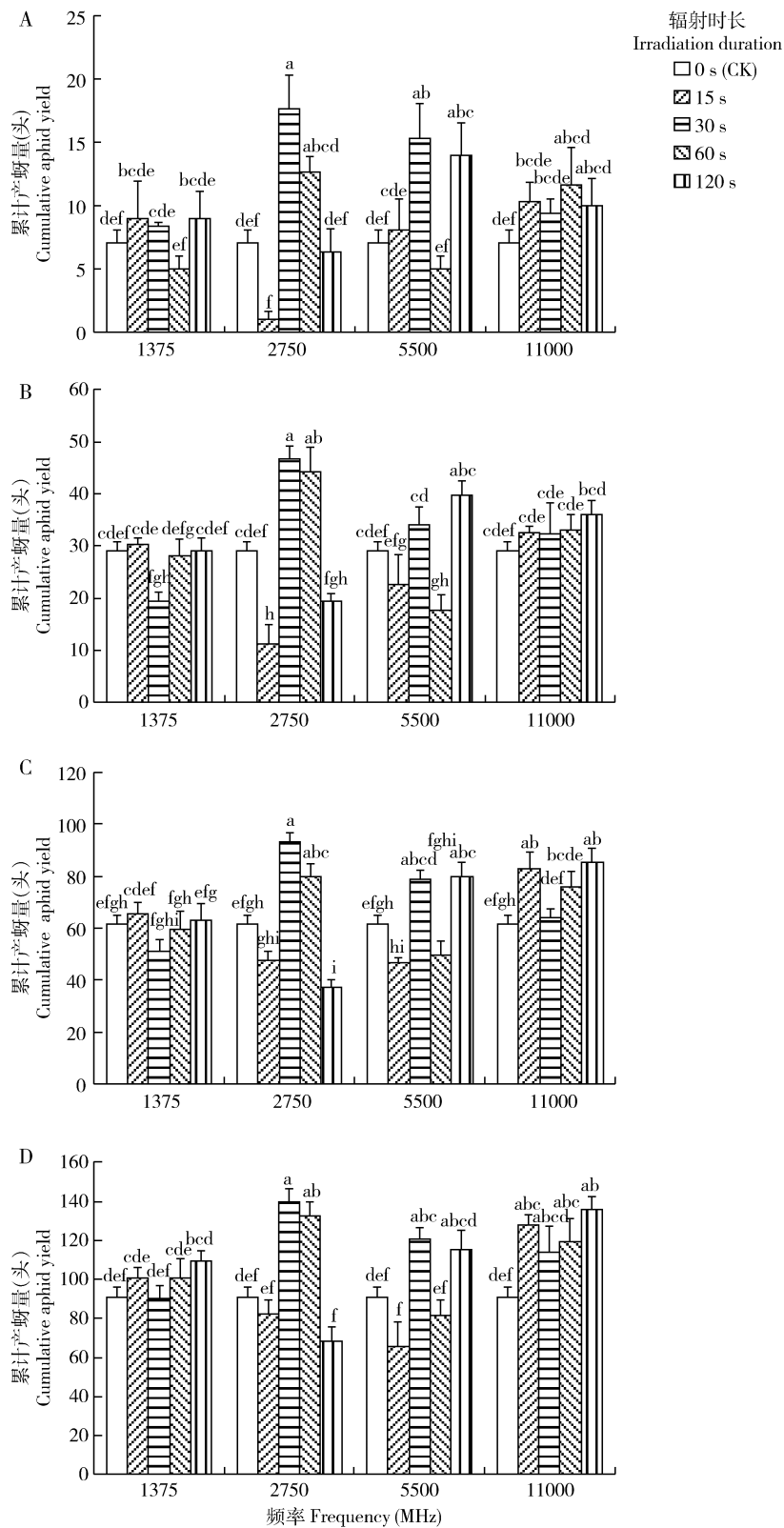


图 1 桃蚜 1 日龄无翅成蚜经不同频率微波辐照不同时长后的累计产蚜量
Fig. 1 Cumulative aphid yield of the 1-day-old apterous adults of *Myzus persicae* subjected to microwave irradiation at different frequencies for different duration
A: 辐照后 8 h (8 h post irradiation); B: 辐照后 24 h (24 h post irradiation); C: 辐照后 48 h (48 h post irradiation); D: 辐照后 72 h (72 h post irradiation). CK: 未经微波辐照 Not subjected to microwave irradiation. 图中数据分别为 3 组重复实验数据的平均值 $\pm$ 标准误; 不同小写字母表示桃蚜 1 日龄无翅成蚜经不同频率微波辐照不同时长后累计产蚜量差异显著 ($P < 0.05$, one-way ANOVA, LSD). Data in the figure are means $\pm$ SE of three replicates. Different lowercase letters above bars indicate significant differences in the cumulative aphid yield of the 1-day-old apterous adults subjected to microwave irradiation at different frequencies for different duration ($P < 0.05$, one-way ANOVA, LSD).

这 6 个处理组累计产蚜量显著高于对照组,表现为促进桃蚜产蚜,其中 2 750 MHz 微波照射 30 s 的处理组中累计产蚜量最高,促进作用最强,60 s 的处理组次之;其他处理组与对照组无显著性差异 ($P > 0.05$) (图 1: D)。

2.3 不同频率微波处理对桃蚜翅型分化的影响

1 375, 2 750, 5 500 和 11 000 MHz 4 种不同频率的微波分别辐照 15, 30, 60 和 120 s,辐照后 72 h 桃蚜的子代有翅蚜率如图 2 所示。微波处理后 72

h, 1 375 MHz 微波处理组子代有翅蚜率与对照组差异不显著 ($P > 0.05$),但 2 750 MHz 微波照射 30 s ($P = 0.003$), 5 500 MHz 微波照射 30 s ($P = 0.001$) 和 120 s ($P = 0.002$) 以及 11 000 MHz 微波照射 120 s ($P = 0.011$) 这 4 个处理组子代有翅蚜率显著低于对照组,表现为抑制子代桃蚜长翅,其中 5 500 MHz 微波照射 30 s 的处理组子代有翅蚜率最低,抑制效果最强;其他处理组与对照组无显著性差异 ($P > 0.05$)。

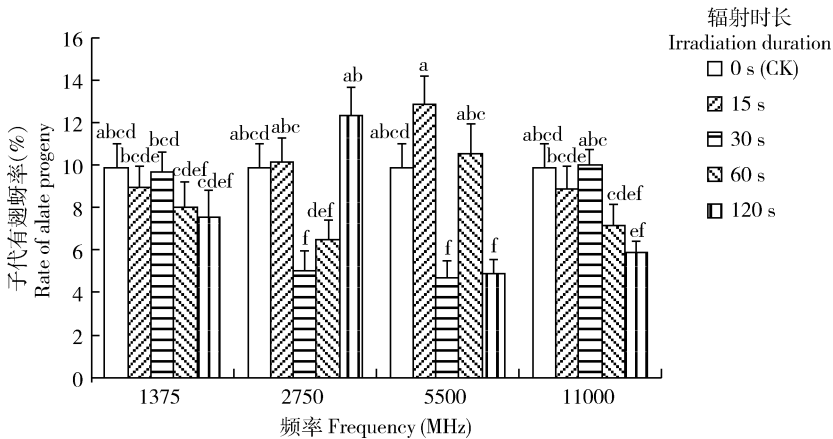


图 2 桃蚜 1 日龄无翅成蚜经不同频率微波辐照不同时长后子代有翅蚜率
Fig. 2 The rate of alate progeny of the 1-day-old apterous adults of *Myzus persicae* subjected to microwave irradiation at different frequencies for different duration

CK: 未经微波辐照 Not subjected to microwave irradiation. 图中数据分别为 3 组重复实验数据的平均值 $\pm$ 标准误; 柱上不同小写字母表示桃蚜 1 日龄无翅成蚜经不同频率微波辐照不同时长后子代有翅蚜率差异显著 ($P < 0.05$, one-way ANOVA, LSD). Data in the figure are means $\pm$ SE of three replicates. Different lowercase letters above bars indicate significant differences in the rate of alate progeny of the 1-day-old apterous adults subjected to microwave irradiation at different frequencies for different duration ($P < 0.05$, one-way ANOVA, LSD).

3 讨论

利用微波防治害虫的研究多见于仓储害虫。田琳等(2013)研究发现,915 MHz 下 6 min 的隧道式微波处理,对 PE/PP 膜包装袋中的大米中的米象 *Sitophilus oryzae*、谷蠹 *Rhizopertha dominica*、锯谷盗 *Oryzaephilus surinamensis*、印度谷螟 *Plodia interpunctella*、锈赤扁谷盗 *Cryptolestes ferrugineus*、烟草甲 *Lasioderma serricorne* 等仓储害虫不同虫态均有 100% 的杀灭效果。栗克森和叶炳元(1992)探究了小麦害虫谷象、谷斑皮蠹、赤拟谷盗受 2 450 MHz 微波照射,在功率分别为 700, 630, 560, 490, 420, 350, 280 和 210 W,时间分别为 3, 3.5, 3.5, 4.5, 5, 6, 7.5 和 10 min 时试虫的死亡率,结果全部死亡。本研究中,5 500 MHz 微波照射 15 s 对桃蚜的致死作用最强,与上述研究结果相似,证明微波可以作为一种物理防治技术控制桃蚜种群数量。另外,

张民照等(2007)通过微波处理绿豆象成虫、豆内幼虫及卵后,发现绿豆象成虫死亡率随照射时间及功率的增加而上升,成虫产卵量有所降低。Abdelaal 和 El-Dafrawy (2014) 用高功率 (700 W) 高频率 (2.45 GHz) 的微波照射面粉中的赤拟谷盗和锥胸豆象甲 *Bruchidius incarnates*, 两种害虫的成虫幼虫死亡率均达到 90% 以上,致死作用明显。上述对仓储害虫的研究基本上都是频率越高或者功率越大、处理时间越长,对昆虫的致死作用越强。本研究首次探索在安全剂量下微波用于大田害虫的防治理论,但发现并没有此类现象,照射后 72 h, 5 500 MHz 微波照射 15 s 的处理组桃蚜的死亡率最高,致死作用最强,达到 55.00%,而在高频率 11 000 MHz 微波照射后,桃蚜死亡率却较低,而累计产蚜量均显著高于对照组(表 1; 图 1),一方面可能由于昆虫种类和辐射环境的不同,另一方面也可能是高频刺激下,蚜虫为了种的延续,以提高繁殖力来适应不良环境。本研究还发现,我们筛选的 5 500 MHz 微波照

射 15 s 的处理组对桃蚜的防治效果是最佳的,但相对上面结果和理想的防治效果来说,致死作用相对较差,说明还没找到最佳防治频率和照射时长,试验还需要继续进行探索。

桃蚜具有较强的环境适应能力,能在 15 ~ 25℃ 之间保持较高的活力,在 22.4℃ 时繁殖率最高(刘树生, 1991)。实验证明微波照射会引起生物细胞内一些酶结构和功能的改变,进而引起生命活动的变化(李巧玲等, 2000)。本研究实验处理均在室温(22 ± 1℃)下进行,1 375 MHz 微波处理组桃蚜死亡率低,累计产蚜量与对照组无显著差异;5 500 MHz 微波处理组死亡率高,累计产蚜量低;11 000 MHz 微波处理组死亡率低,累计产蚜量高(表 1; 图 1)。由此可以看出,低频率微波对桃蚜影响不大,稍高频率微波刺激可导致桃蚜死亡从而影响产蚜量,而高频率微波会导致桃蚜对外界刺激作出反应——繁殖力增加,从而保护种群能够延续。

多型是昆虫界广泛存在的一种现象,在昆虫种群扩散、繁殖、竞争中起着至关重要的作用。蚜虫翅型分化主要受外部环境和内部激素调节这两方面的影响(万两等, 2012)。刘树生和吴晓晶(1994)在探究温度对桃蚜和萝卜蚜 *Lipaphis erysimi* 孤雌胎生型翅型分化的影响时发现,低温有助于桃蚜翅的发育,而高温则抑制翅的发育。郭圆(2016)发现 25℃ 时吡虫啉和抗病毒制剂氨基寡糖素能有效降低萝卜蚜有翅蚜比例。本研究中,处理后 72 h,微波对桃蚜翅型分化的影响表现为 1 375 MHz 处理组子代有翅蚜率与对照组无显著差异,而 5 500 MHz 微波照射 30 和 120 s,以及 11 000 MHz 照射 120 s 的处理组子代有翅蚜率显著低于对照组(图 2),说明桃蚜在面对不良环境时会分化为有翅蚜来逃避不良环境,但微波辐照可以抑制桃蚜向有翅蚜的分化,从而抑制桃蚜转移危害,但微波辐照抑制长翅的机理有待进一步研究。

本着能够杀死害虫且对人类及其他生物健康无害的原则,本研究输入负载的微波功率 0 dBm,在微波发射仪的暗箱中辐射桃蚜后经负载输出,实际辐射在暗箱中的功率远小于《中华人民共和国环境电磁波卫生标准》(GB 9175-88)规定的最大微波功率 10 μW/cm²,所以实验是在操作人员安全范围内完成的。另外,利用微波杀虫时还应考虑对植物和田间其他昆虫的影响。尹新明等(2006)发现微波处理后,虽然可使板栗腐烂程度和虫蛀率降低,但其蛋白质等成分有变化。张民照等(2007)发现微波处

理可降低仓储红小豆发芽率。而邓树华等(2017)在 47 ~ 60℃ 的微波加热处理籼米,其垩白率、黄米率及食味评分均无显著变化。奚家勤等(2007)用微波辐照烟草甲后,各虫态烟草甲全部死亡情况下,微波辐照对片烟质量无不良影响。本研究也曾将有桃蚜的盆栽甘蓝直接放在微波下辐射处理,观察 20 d 后,桃蚜的死亡率、繁殖力和子代有翅蚜的分化与前述实验结果基本一致,甘蓝外观与对照无差异,生长正常,但是否也会引起甘蓝成分的变化,这是我们在筛选到理想的频率和辐射时长后应该进一步研究的。

微波照射防治害虫是一种具有广大发展前景的新型物理防治技术,具有较大的应用价值。本研究发现微波能够影响桃蚜的存活、繁殖和子代翅型分化,初步筛选出了对桃蚜有致死作用的微波频率和照射时长,为微波照射防治农业害虫技术提供了理论依据。但更理想的微波频率和辐射时长以及微波照射杀灭桃蚜的分子机理有待进一步研究。

参考文献 (References)

Abdelaal AAA, El-Dafrawy BM, 2014. Effect of nonionizing electromagnetic waves on some stored grain pests. *J. Entomol.*, 11 (2): 102 – 108.

Chang J, Zhang W, Li HP, Diao QY, 2016. Study on susceptibility to pyrethroids and carboxylesterase activity in *Myzus persicae* on potato. *Chin. J. Pestic. Sci.*, 18(2): 201 – 206. [常静, 张薇, 李海平, 刁青云, 2016. 马铃薯桃蚜对拟除虫菊酯类杀虫剂的敏感性及其体内羧酸酯酶活性研究. *农药学报*, 18(2): 201 – 206]

Deng SH, Wu SH, Yang C, Zhang XY, 2017. Effect of microwave conditions on the quality of milled long-grain nonglutinous rice. *Cereals Oils*, 30(10): 44 – 46. [邓树华, 吴树会, 杨超, 张晓燕, 2017. 微波处理条件对籼米质量的影响研究. *粮食与油脂*, 30(10): 44 – 46]

Gong YJ, Wang ZH, Shi BC, Kang ZJ, Zhu L, Guo XJ, Liu JH, Wei SJ, 2011. Resistance status of *Myzus persicae* (Sulzer) (Hemiptera: Aphididae) populations to pesticide in Beijing. *Sci. Agric. Sin.*, 44(21): 4385 – 4394. [宫亚军, 王泽华, 石宝才, 康总江, 朱亮, 郭晓军, 刘建华, 魏书军, 2011. 北京地区不同桃蚜种群的抗药性研究. *中国农业科学*, 44(21): 4385 – 4394]

Guo Y, 2016. The Effects of Insecticides and Antiviral Agents on Wing Dimorphism, Development and Reproduction of Aphids. MSc Thesis, Huazhong Agricultural University, Wuhan. [郭圆, 2016. 杀虫剂和抗病毒制剂对蚜虫翅型分化及发育和生殖的影响. 武汉: 华中农业大学硕士学位论文]

Hang F, Chen W, Gong GY, Wang YY, Zhang H, Guo BH, 2009. Mechanisms of microwave inactivation and biological effects. *Sci. Technol. Food Ind.*, 30(1): 333 – 337. [杭锋, 陈卫, 龚广予, 王荫榆, 张瀚, 郭本恒, 2009. 微波杀菌机理与生物学效应. *食品工业科技*, 30(1): 333 – 337]

Li KS, Ye BY, 1992. Experiments on killing several pests by microwave

- heating. *Plant Quarant.*, 6(2): 114–117. [栗克森, 叶炳元, 1992. 微波加热对几种害虫的杀虫试验. 植物检疫, 6(2): 114–117]
- Li MT, 2013. Biological characteristics and control method of *Myzus persicae* (Sulzer). *J. Agric. Catast.*, 3(2–3): 1–4. [李明桃, 2013. 桃蚜的生物学特性与防治措施. 农业灾害研究, 3(2–3): 1–4]
- Li QL, Li L, Guo SY, Cai MY, 2000. Influence of microwave biological effects upon cells. *Chin. Bull. Life Sci.*, 12(5): 231–240. [李巧玲, 李琳, 郭祀远, 蔡妙颜, 2000. 微波生物效应对细胞的影响. 生命科学, 12(5): 231–240]
- Li QL, Li L, Guo SY, Cai MY, 2001. Microwave biological effects – Current status and application. *Chin. Bull. Life Sci.*, 13(3): 126–128. [李巧玲, 李琳, 郭祀远, 蔡妙颜, 2001. 微波生物效应研究的现状及应用. 生命科学, 13(3): 126–128]
- Li S, Wang S, Zhao J, Yang LW, Gao XW, Zhang F, 2014. Efficacy of multicolored Asian lady beetle *Harmonia axyridis* (Coleoptera: Coccinellidae) against green peach aphid *Myzus persicae* (Hemiptera: Aphididae) on vegetables under greenhouse conditions. *Acta Phytophy. Sin.*, 41(6): 699–704. [李姝, 王甦, 赵静, 杨丽文, 高希武, 张帆, 2014. 释放异色瓢虫对北京温室甜椒和圆茄上桃蚜的控害效果. 植物保护学报, 41(6): 699–704]
- Liang Y, 2017. The Mechanism of *Myzus Persicae* Transmitting Cucumber Mosaic Virus. PhD Dissertation, China Agricultural University, Beijing. [梁彦, 2017. 桃蚜传播黄瓜花叶病毒机理的研究. 北京: 中国农业大学博士学位论文]
- Liu SS, 1991. The effect of temperature on population growth of *Myzus persicae* and *Lipaphis erysimi*. *Acta Entomol. Sin.*, 34(2): 189–197. [刘树生, 1991. 温度对桃蚜和萝卜蚜种群增长的影响. 昆虫学报, 34(2): 189–197]
- Liu SS, Wu XJ, 1994. The influence of temperature on wing dimorphism in *Myzus persicae* and *Lipaphis erysimi*. *Acta Entomol. Sin.*, 37(3): 292–297. [刘树生, 吴晓晶, 1994. 温度对桃蚜和萝卜蚜翅型分化的影响. 昆虫学报, 37(3): 292–297]
- Liu XL, Tian ZF, Li YD, 2018. Analysis of resistance to pirimicarb and AChE sensitivity variation of *Myzus persicae* from different areas. *Jiangsu Agric. Sci.*, 46(20): 112–116. [刘晓岚, 田兆丰, 李永丹, 2018. 我国多地区桃蚜种群对抗蚜威的抗性及乙酰胆碱酯酶敏感度检测. 江苏农业科学, 46(20): 112–116]
- Pang XF, Zhang AY, 2001. Study on the mechanism and characteristics of biological thermal effect of microwave. *Chin. J. Atom. Mol. Phys.*, 18(4): 421–425. [庞小峰, 张安英, 2001. 微波的生物热效应的机理和特性研究. 原子与分子物理学报, 18(4): 421–425]
- Sang W, Liu YM, Qiu BL, 2018. Advances in the eco-friendly management of *Diaphorina citri*. *Chin. J. Appl. Entomol.*, 55(4): 557–564. [桑文, 刘燕梅, 邱宝利, 2018. 柑橘木虱绿色防控技术研究进展. 应用昆虫学报, 55(4): 557–564]
- Tian L, Chen YQ, Cao Y, Yu YL, Wang Y, 2013. Study on the technology of tunnel microwave controlling stored grain pests in bagged rice. *Grain Sci. Technol. Econ.*, 38(6): 34–36. [田琳, 陈玉麒, 曹阳, 于艳麟, 王颖, 2013. 隧道式微波防治袋装大米中储粮害虫技术研究. 粮食科技与经济, 38(6): 34–36]
- Tian ZF, Liu WC, Luo C, Yu JL, 2011. Transmission comparison of Cucumber Mosaic Virus subgroup I and II isolates by different aphid species. *Acta Agric. Bor.-Sin.*, 26(5): 234–238. [田兆丰, 刘伟成, 罗晨, 于嘉林, 2011. 不同蚜虫对黄瓜花叶病毒(CMV)亚组 I、II 分离物传播效率比较研究. 华北农学报, 26(5): 234–238]
- Wan L, Sheng HZ, Cai AA, Xiao TG, 2012. External factors affecting the wing morph differentiation of *Nilaparvata lugens* and aphids. *Crop Res.*, 26(5): 620–622. [万两, 盛洪珍, 蔡媛安, 肖铁光, 2012. 影响褐飞虱和蚜虫翅型分化的外部因素. 作物研究, 26(5): 620–622]
- Wang SF, Liang HM, 1998. Prospects of application of microwave energy in agriculture. *J. Microw.*, 14(3): 264–270. [王首锋, 梁海曼, 1998. 微波能在农业上的应用前景. 微波学报, 14(3): 264–270]
- Weber G, 1985. Genetic variability in host plant adaptation of the green peach aphid, *Myzus persicae*. *Entomol. Exp. Appl.*, 38(1): 49–56.
- Xi JQ, Song JZ, Yin QS, Li KS, Xu JM, 2007. Control effect of microwave on *Lasioderma serricornis*. *Tobacco Sci. Technol.*, (11): 70–73. [奚家勤, 宋纪真, 尹启生, 李康胜, 许敏敏, 2007. 微波对烟草甲的杀虫效果. 烟草科技, (11): 70–73]
- Yin XM, Tian CH, Li MQ, Li JJ, 2006. Effect of microwave treatment on chestnut quality. *J. Henan Agric. Univ.*, 40(3): 254–257. [尹新明, 田彩红, 李梦琴, 李静静, 2006. 微波处理对板栗品质的影响. 河南农业大学学报, 40(3): 254–257]
- Zhang HL, Li D, Chen Q, Zhao HY, 2010. Effects of microwave radiation on the ecological characteristics and antioxidant isoenzyme of *Stöbion avenae* Fabricius. *J. Northwest A&F Univ. (Nat. Sci. Ed.)*, 38(12): 155–160. [张洪亮, 李丹, 陈玺, 赵惠燕, 2010. 微波辐射对麦长管蚜生态学特征及抗氧化酶同工酶的影响. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 38(12): 155–160]
- Zhang LJ, Li YY, Ma RY, Zhao ZG, Liu TX, 2015. Performance and morphological differentiation of *Myzus persicae* (Hemiptera: Aphididae) on three types of host plants. *Acta Ecol. Sin.*, 35(5): 1547–1553. [张利军, 李丫丫, 马瑞燕, 赵志国, 刘同先, 2015. 3 种寄主上桃蚜的选择性及形态分化. 生态学报, 35(5): 1547–1553]
- Zhang MZ, Jin WL, Wang JZ, Sun SL, Qin XC, Zhang ZY, 2007. Insecticidal efficacy of microwave treatment against *Callosobruchus chinensis* (L.) (Coleoptera: Bruchidae) and its effects on the germination rate of adzuki beans. *Acta Entomol. Sin.*, 50(9): 967–974. [张民照, 金文林, 王进忠, 孙淑玲, 覃晓春, 张志勇, 2007. 微波处理对绿豆象的杀虫效果及对红小豆发芽率的影响. 昆虫学报, 50(9): 967–974]
- Zhang RZ, Zhang R, 2016. Aphids infested *Lycium chinense* Miller are *Aphis gossypii* Glover, *Myzus persicae* (Sulzer) and *A. craccivora* Koch. *Chin. J. Appl. Entomol.*, 53(1): 218–222. [张润志, 张蓉, 2016. 宁夏危害枸杞的蚜虫种类为棉蚜、桃蚜和豆蚜. 应用昆虫学报, 53(1): 218–222]
- Zhao K, Zhang MX, Ling B, 2013. Influences of plant virus-plant interactions on biological characteristics and virus transmission mechanism of homopteran vectors. *J. Tianjin Normal Univ. (Nat. Sci. Ed.)*, 33(4): 51–57. [赵锟, 张茂新, 凌冰, 2013. 病毒-植物互作对同翅目媒介昆虫生物学及其传毒机制的影响. 天津师范大学学报(自然科学版), 33(4): 51–57]