敌敌畏烟剂熏蒸防治韭菜迟眼蕈蚊的条件优化

徐 蕾, 赵彤华, 刘培斌, 许国庆*, 王 哲, 钟 涛

(辽宁省农业科学院植物保护研究所, 沈阳 110161)

摘要:【目的】本研究旨在探索提高敌敌畏烟剂熏蒸防治韭菜迟眼蕈蚊 *Bradysia odoriphaga* 成虫效果及效率的条件。【方法】采用正交试验法研究了温度、相对湿度、处理时间和烟剂剂量 4 因素对韭菜迟眼蕈蚊成虫死亡率的影响,筛选出了最优处理方案;通过多元回归分析建立了拟合模型,并且进行了试验验证。【结果】正交试验结果通过主效应分析表明,4 因素对敌敌畏烟剂熏蒸防效影响大小的排列顺序为烟剂剂量 > 温度 > 相对湿度 > 处理时间。通过方差分析和单因素多重比较,筛选得到了熏蒸优化处理方案:温度为 32℃,相对湿度为 70%,剂量为 0.0878 g a.i./m^3,熏蒸处理 2 h。回归分析结果表明,温度与相对湿度、温度与烟剂剂量、相对湿度与烟剂剂量之间存在交互作用,交互效应指数分别为 3, -4.4 和 -3.25,同时得到了试虫死亡率与影响因素的回归方程。采用优化熏蒸条件组合方案得到的试虫死亡率达到 96.59%,且试验实测值与模型拟合值间的 Pearson 相关系数为 0.9749,表明多元回归方程经试验验证为准确有效。【结论】敌敌畏烟剂防治韭菜迟眼蕈蚊成虫可以通过优化熏蒸条件实现增效,并且本研究得到的回归模型能够用于预测成虫的致死效果。

关键词: 韭菜迟眼蕈蚊; 敌敌畏烟剂; 正交试验; 方差分析; 多元回归分析

中图分类号: Q966 **文献标识码:** A **文章编号:** 0454-6296(2017)10-1198-10

Optimization of fumigation conditions of dichlorvos smoke agent in controlling *Bradysia odoriphaga* (Diptera: Sciaridae)

XU Lei, ZHAO Tong-Hua, LIU Pei-Bin, XU Guo-Qing*, WANG Zhe, ZHONG Tao (Institute of Plant Protection, Liaoning Academy of Agricultural Sciences, Shenyang 110161, China)

Abstract:【Aim】This study aims to explore the conditions for improving the fumigation effect and efficiency of dichlorvos smoke agent in controlling *Bradysia odoriphaga* adults.【Methods】Four factors including temperature, relative humidity, period and dosage were optimized by the orthogonal experiment, and the fitted model was established by multiple regression analysis and verified by a set of experiments.【Results】The main effect analysis of the orthogonal experiment results showed that the influence order on the efficacy of dichlorvos smoke agent was dosage > temperature > relative humidity > period. Determined by analysis of variance and multiple comparison, the optimal conditions for fumigation were the temperature of 32℃, relative humidity of 70%, dosage of 0.0878 g a.i./m^3 and period of 2 h. Regression analysis showed that there were interactions between temperature and relative humidity, temperature and dosage, and relative humidity and dosage, with the interaction effect indices of 3, -4.4 and -3.25, respectively. At the same time, the regression equation of the mortality of test insects and the related factors was established. The mortality under the optimized fumigation conditions was 96.59%. Moreover, the Pearson's correlation coefficient between the measured value and the

基金项目: 国家公益性行业(农业)科研专项(201303027-09)

作者简介: 徐蕾, 女, 1981 年 4 月生, 辽宁鞍山人, 硕士, 助理研究员, 研究方向为油料作物虫害防治, E-mail: syxlei81@126.com

* 通讯作者 Corresponding author, E-mail: xgq66@126.com

收稿日期 Received: 2017-06-13; 接受日期 Accepted: 2017-09-14

predictive value was 0.9749, showing that the regression model was verified to be accurate and effective by the experiments. 【Conclusion】The control efficacy of dichlorvos smoke agent in controlling *B. odoriphaga* adults can be promoted by optimizing fumigation conditions, and the regression model obtained in this study can be used to predict the mortality of *B. odoriphaga* adults.

Key words: *Bradysia odoriphaga*; dichlorvos smoke agent; orthogonal experiment; variance analysis; multiple regression analysis

韭菜迟眼蕈蚊 *Bradysia odoriphaga* 属双翅目眼蕈蚊科(Sciaridae),是我国北方特色蔬菜韭菜、大蒜、圆葱和大葱的重要地下害虫,其中以韭菜受害最为严重(薛明等, 2005)。其幼虫俗称韭蛆,主要取食韭菜的根茎和鳞茎,可造成植株大量死亡,严重影响韭菜的质量和产量。成虫生活史以交配和产卵为主,不进行取食活动(徐蕾等, 2016),一直以来未受到足够重视,研究主要偏重幼虫。幼虫由于个体小,营钻蛀为害和隐蔽式生活,防治难度较大,目前生产上主要采用有机磷类化学药剂喷洒或灌根,由此带来的"3R"[抗性(resistance)、残留(residue)和再猖獗(resurgence)]问题严重(张清智等, 2008)。实际上,如果能够及时有效地做好成虫防控,即可有效减少其产卵量、降低下一代幼虫的为害基数,从而极大缓解后期的防治压力,对遏制韭菜迟眼蕈蚊的全年为害有重要意义。

烟剂的扩散性好,分布均匀,更适合在温室、仓库等相对密闭的环境中使用,而且用药量少、操作方便(杨田堂, 2004),对成虫具有"防"和"治"的双重功效,同时对人、畜和环境安全。国外对烟剂的研究重点多集中在储粮害虫及居室卫生类害虫(Zettler and Arthur, 2000; Lee *et al*., 2003)。中国农业科学院蔬菜花卉研究所在 1986 年通过了安全性能测试,成功研发了 22% 敌敌畏烟剂,温室药效试验结果表明其对黄瓜蚜 *Aphis gossypii* 防治效果可达 95% 以上,明显优于敌敌畏乳油(剧正理等, 1990)。本课题组则在 1995 年即自行配制有效成分为敌敌畏的 68% 灭虱宁乳悬液用于熏蒸防治温室白粉虱 *Trialeurodes vaporariorum*(孙承钧等, 1995),并取得优异效果,但没有开发烟剂剂型。此后,在我国主要设施生产基地陆续开展了应用烟剂处理技术防治蔬菜虫害的多项较为系统的研究,包括利用敌敌畏烟剂、敌·溴混合烟剂、异丙威烟剂等对温室瓜蚜 *A. gossypii* 进行熏蒸药效试验,对筛选出的防治效果最好的敌敌畏烟剂通过正交试验确定了最优处理温湿度条件和使用剂量组合,处理后黄瓜中的药剂残留量比使用敌敌畏乳油喷雾防治降低了 43.5%(任娜等, 2006);利用 20% 异丙威烟剂对温室番茄进行熏棚处理后发现烟粉虱 *Bemisia tabaci* 虫量减退明显,但药剂持效期短且对其主要天敌丽蚜小蜂 *Encarsia formosa* 杀伤力较大(杨琼, 2014)。植物源烟剂应用方面,利用苦参·烟碱烟剂对温室烟粉虱 *B. tabaci* 进行了防治研究,通过正交试验分析了温度、相对湿度和剂量 3 因素 5 水平对死亡率的影响,结果发现处理方案优化后杀虫效率得到了很大提升(张国财等, 2007);采用苦皮藤素原药,辅以定量的助燃剂和降温剂等配制成 6.2% 苦皮藤素烟剂成品,对小菜蛾 *Plutella xylostella* 进行熏蒸防控,室内毒力测定和田间药效试验均表现出良好的防治效果(路强等, 2011)。韭菜是重要的出口创汇蔬菜品种之一(李春杰等, 2013),最大限度地减少农药残留、保证食品安全在农产品贸易中发挥着决定性的作用,烟剂处理作为一种可有效平衡温室蔬菜生产中病虫害防治及药剂残留污染控制的技术策略,还未见应用于防治韭菜迟眼蕈蚊的报道。

本团队已在前期完成了敌敌畏烟剂和异丙威烟剂对韭菜迟眼蕈蚊的室内毒力测定及温室药效试验,确定了敌敌畏烟剂是温室内防治韭菜迟眼蕈蚊的安全、理想型熏蒸剂(待发表数据)。作为后续研究,本试验采用正交试验设计,通过调节温度、相对湿度、处理时间和烟剂剂量 4 因素的 5 个水平,探索了各影响因素不同水平间的差异显著性,筛选了 15% 敌敌畏烟剂熏蒸防治韭菜迟眼蕈蚊成虫的最优条件组合方案,对正交试验结果进行回归分析并进行试验验证,以期为提高敌敌畏烟剂处理技术的防治效果及效率提供数据依据和理论保障。

1　材料与方法

1.1　供试虫源

在辽宁省北镇市中安镇韭菜棚内采集韭菜迟眼蕈蚊幼虫,带回辽宁省农业科学院植物保护研究所实验室内(温度 25 ± 1℃,相对湿度 70%,光周期 14L: 10D),用自有温室大棚栽种的无公害韭菜作饲

料继代饲养 30 代以上作为备用种群。

1.2 供试试剂及主要仪器

供试药剂 15% 敌敌畏烟剂,购自邢台市农药有限责任公司。

试验用人工气候室为山东济南科益试验设备有限公司生产的型号为 QHS(C) 20/Z 的增强型可调节智能养虫室,温度调节范围 4 ~ 40℃(误差为 ±0.5℃)、相对湿度调节范围 40% ~90%(误差为 ±0.5%),光照强度 1 500 ~ 3 000 Lx;仪器另附配套的玻璃小方箱装置(长 × 宽 × 高 = 70 cm × 120 cm × 70 cm)。

1.3 敌敌畏烟剂熏蒸防治韭菜迟眼蕈蚊正交试验

正交试验以温度(A)、相对湿度(B)、处理时间(C)和烟剂剂量(D)为调节因素,每因素设置 5 个水平,正交设计采用 $L_{25}(5^6)$ 正交表的前 4 列,在可调节智能养虫室内共进行 25 项正交试验,每项设置 3 次重复(不设置空列),每次重复在玻璃小方箱内进行。测定参照国家标准 GB/T 13917.3-2009"农药登记用卫生杀虫剂室内药效试验及评价之第 3 部分:烟剂及烟片"规定的方法进行:选取健康的韭菜迟眼蕈蚊成虫 50 头,由放虫孔释放于方箱中,随即用胶塞塞紧,在方箱底部中心位置的托盘上按试验剂量点燃烟剂,关闭箱门,密封,计时。熏蒸完毕后,收集被击倒成蚊并移至清洁的养虫笼中,在温度 25 ± 1℃、相对湿度 70%、光周期 14L∶10D 的条件下恢复标准饲养,24 h 后检查记录死亡虫数。死亡率 = 死亡虫数/供试虫数 × 100%。每次试验完毕后,清洗玻璃小方箱装置,自然晾干备用。

1.4 正交试验各因素水平的确定

正交试验各因素水平设置如表 1 所示,温度的 5 个水平分别设定为 15, 20, 25, 28 和 32℃;相对湿度的 5 个水平分别设定为 50%, 60%, 70%, 80% 和 90%;处理时间的 5 个水平分别设定为 0.5, 1.0, 2.0, 3.0 和 4.0 h;参考前期已经完成的温室药效试验结果,15% 敌敌畏烟剂防治韭菜迟眼蕈蚊成虫的推荐用量为 4 500 g/hm^2(温室棚高 1 m),折算成药剂有效成分空间用量为 0.0675 g a.i./m^3,以 0.0675 g a.i./m^3 作为剂量的中间水平,其余水平分别为 0.0675 的 ± 15% 和 ± 30% 的倍值,即 0.0473, 0.0574, 0.0776 和 0.0878 g a.i./m^3。

1.5 正交试验结果回归模型的验证试验

为了验证韭菜迟眼蕈蚊成虫死亡率的多元回归模型及烟剂熏蒸条件优化方案的可靠性,在可调节智能养虫室内进行一组对比试验(操作方法同 1.3 节),统计和计算模型拟合死亡率值和试验实测死亡率值间的相对误差,并进行距离相关性分析,计算 Pearson 值。

相对误差 = 绝对误差/实测值。

表 1 正交试验的影响因素及其水平

Table 1 Experimental factors and their levels for the orthogonal experiment

水平 Level	温度(℃) Temperature (A)	相对湿度(%) Relative humidity (B)	处理时间(h) Period (C)	烟剂剂量 (g a.i./m^3) Dosage (D)
1	15	50	0.5	0.0473
2	20	60	1.0	0.0574
3	25	70	2.0	0.0675
4	28	80	3.0	0.0776
5	32	90	4.0	0.0878

1.6 数据处理与分析

A 的主效应指数 = A 处于高水平时因变量的均值 − A 处于低水平时因变量的均值;AB 交互效应指数 = (B 处于高水平时 A 的主效应指数 − B 处于低水平时 A 的主效应指数)/2。效应指数为 0 时表现无效应,效应指数大于 0 时表现正向效应,效应指数小于 0 时表现反向效应(闵亚能, 2011)。

应用 IBM SPSS Statistics 23 统计软件,将试虫死亡率经过 $\arcsin(y/300)^{1/2}$ 反正弦转换后,采用 Duncan 氏新复极差法进行单因素方差分析和多重比较(徐蕾等, 2015);应用 Minitab 17 软件进行主效应图和交互作用图绘制及多元回归分析。

2 结果

2.1 敌敌畏烟剂防治韭菜迟眼蕈蚊成虫室内正交试验

2.1.1 正交试验结果:正交试验结果表明(表 2),温度、相对湿度、处理时间和烟剂剂量对韭菜迟眼蕈蚊成虫死亡率均有着不同程度的影响,因此通过调节各相关因素的水平对敌敌畏烟剂熏蒸实现增效是可行的。结果中 4 因素分别在 2(20℃), 3(70%), 4(3.0 h), 5(0.0878 g a.i./m^3)水平组合条件下(试验号为 8)得到的试虫死亡率最大为 95.01%,且与其他各处理差异显著($P < 0.05$)。

表 2　15%敌敌畏烟剂防治韭菜迟眼蕈蚊成虫 $L_{25}(5^6)$ 正交试验设计与结果

Table 2　$L_{25}(5^6)$ Orthogonal design and the results of 15% dichlorvos smoke agent in controlling *Bradysia odoriphaga* adults

试验序号 Number	影响因素 Related factors				试虫死亡率(%) Mortality
	温度(℃) Temperature (A)	相对湿度(%) Relative humidity (B)	处理时间(h) Period (C)	烟剂剂量(g a. i./m^3) Dosage (D)	
1	1 (15)	1 (50)	1 (0.5)	1 (0.0473)	75.63 ± 5.46 e
2	1	2 (60)	2 (1.0)	2 (0.0574)	78.93 ± 6.21 d
3	1	3 (70)	3 (2.0)	3 (0.0675)	84.96 ± 8.22 bc
4	1	4 (80)	4 (3.0)	4 (0.0776)	82.57 ± 6.01 c
5	1	5 (90)	5 (4.0)	5 (0.0878)	86.19 ± 4.58 bc
6	2 (20)	1	2	3	82.15 ± 4.92 c
7	2	2	3	4	87.42 ± 7.17 bc
8	2	3	4	5	95.01 ± 9.23 a
9	2	4	5	1	82.62 ± 5.30 c
10	2	5	1	2	81.09 ± 4.88 c
11	3 (25)	1	3	5	90.26 ± 6.48 b
12	3	2	4	1	82.25 ± 3.97 c
13	3	3	5	2	87.68 ± 5.16 bc
14	3	4	1	3	85.17 ± 3.29 bc
15	3	5	2	4	87.33 ± 4.77 bc
16	4 (28)	1	4	2	83.69 ± 2.94 c
17	4	2	5	3	85.31 ± 5.08 bc
18	4	3	1	4	89.11 ± 8.61 bc
19	4	4	2	5	91.26 ± 9.46 b
20	4	5	3	1	86.45 ± 5.49 bc
21	5 (32)	1	5	4	86.68 ± 7.66 bc
22	5	2	1	5	90.38 ± 7.48 b
23	5	3	2	1	86.88 ± 6.45 bc
24	5	4	3	2	88.62 ± 6.92 bc
25	5	5	4	3	87.52 ± 5.44 bc

按 $L_{25}(5^6)$ 正交表安排 25 个处理组合进行试验；每个处理重复 3 次，每个重复测定 3 次。表中最后一列数据为平均值 ± 标准误；数据后标注不同小写字母表示 $P<0.05$ 水平差异显著(Duncan 氏多重检验法)。The orthogonal experiment was designed for 5 (factor) × 25 (number). Every number was replicated three times and every replicate was measured three times. Data of the last column in the table are mean ± *SE*, and followed by different lowercase letters indicate significant difference at $P<0.05$ by Duncan's multiple tests.

2.1.2　正交试验结果的主效应分析：将各因素各水平的响应均值连成折线，得到主效应图(图 1)，以查看各因子对响应变量的效应大小，其原理与极差分析相同。当折线水平时(与 x 轴平行)，该因子不存在主效应；当折线不水平时(与 x 轴不平行)，该因子存在主效应。数据点(各因子水平的响应均值)之间垂直位置的差异越大，折线斜率越大，则该因子主效应越大，反之则越小。通过计算，温度、相对湿度、处理时间和烟剂剂量 4 因子的极差分别为 6.49，4.24，3.44 和 7.91，在主效应图中，极差由对应折线的斜率得到了直观的表现和反映，由此判断，各因子对韭菜迟眼蕈蚊成虫死亡率影响大小的排列顺序为烟剂剂量 > 温度 > 相对湿度 > 处理时间。此外，随着温度和烟剂剂量 2 因素水平值的提高，因变量呈上升的趋势，试虫死亡率均在第 5 水平达到最大；相对湿度和处理时间 2 因素在前 3 个水平时与因变量呈正相关，试虫死亡率均在第 3 水平达到最大，而第 4 和第 5 水平的试虫死亡率间相差很小，折线斜率接近于 1。

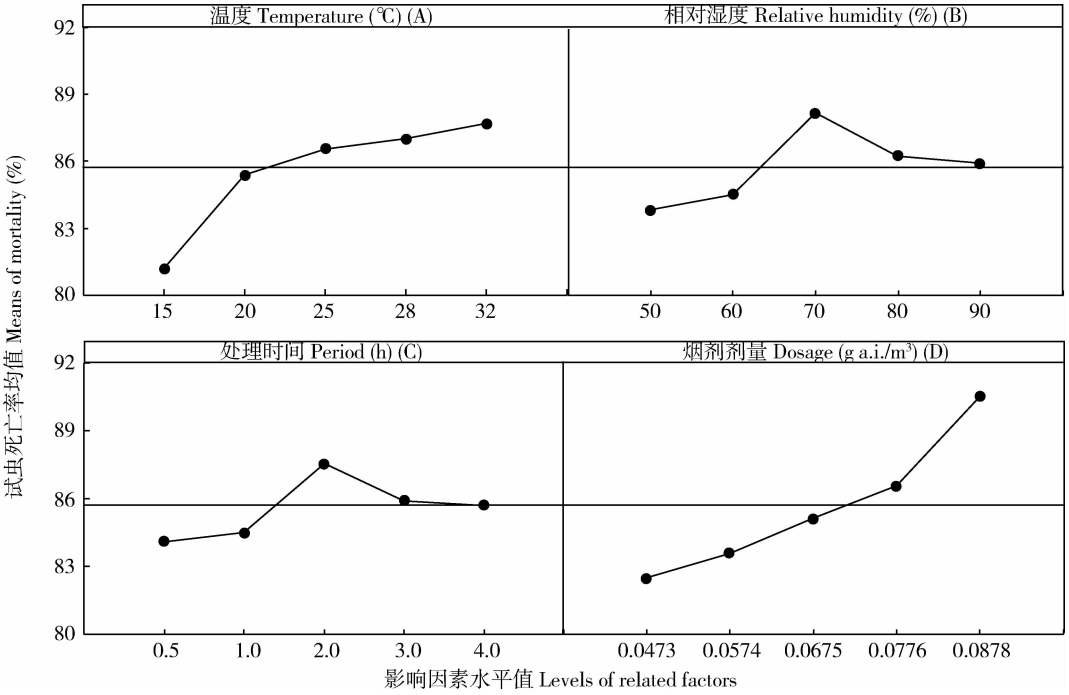

图 1 影响韭菜迟眼蕈蚊成虫死亡率的主效应图

Fig. 1 Main effects plot of the mortality of *Bradysia odoriphaga* adults

2.1.3 正交试验结果的方差分析：为了检验影响熏蒸效果的各条件因素对试虫死亡率是否有显著性影响，对正交试验结果进行方差分析（表 3），可见，各变异项的 F 值均大于 1，说明假设检验的灵敏度较高；P 值均小于 0.01，说明变量关联的偶然误差很小，具有高度统计学意义。结果表明，4 个因素对韭菜迟眼蕈蚊成虫死亡率均有极显著影响，根据各因素的 F 值大小，影响顺序为烟剂剂量 > 温度 > 相对湿度 > 处理时间，此结论与主效应分析结果完全一致。

表 3 正交试验结果方差分析

Table 3 Analysis of the data from the orthogonal experiment with ANOVA

影响因素 Related factors	离差平方和 Sum of squares	均方 Mean square	自由度（*df*） Degrees of freedom	*F* 值 *F*-value	*P* 值 *P*-value
校正模型 Corrected model	406.244	25.390	16	28.150 **	0.000
截距 Intercept	184 068.457	184 068.457	1	204 072.908 **	0.000
温度 Temperature（A）	122.542	30.636	4	33.965 **	0.000
相对湿度 Relative humidity（B）	70.074	17.519	4	19.422 **	0.000
处理时间 Period（C）	28.872	7.218	4	8.002 **	0.007
烟剂剂量 Dosage（D）	184.756	46.189	4	51.209 **	0.000
误差 Error	7.216	0.902	8	–	–
总变异 Total	184 481.917	–	25	–	–
校正总变异 Corrected total	419.872	–	24	–	–

** 差异极显著 Extremely significant difference（$P < 0.01$）.

2.1.4 正交试验结果的单因素多重比较：经过方差分析，4 个因素对试虫死亡率的影响均达到了极显著（$P < 0.01$），为了确定最优增效处理的条件组合，分别对各因子进行单因素多重比较以确定不同水平间的差异显著性。结果表明（表 4），温度因子第 5（32℃）与第 4（28℃）水平相比对死亡率影响差异不显著（$P > 0.05$），与第 3（25℃）水平相比差异显著（$0.01 < P < 0.05$），与第 1（15℃）和第 2（20℃）

水平相比差异极显著($P<0.01$)，因此最优温度条件为 32℃，其次为 28℃；相对湿度因子在第 3(70%)水平对死亡率影响极显著高于其他各水平($P<0.01$)，因此最优相对湿度条件为 70%；处理时间因子在第 3(2.0 h)与第 4(3.0 h)水平相比对死亡率影响差异不显著($P>0.05$)，与第 5(4.0 h)水平相比差异显著($0.01<P<0.05$)，与第 1(0.5 h)和第 2(1.0 h)水平相比差异极显著($P<0.01$)，因此最优处理时间为 2.0 h，其次为 3.0 h；剂量因子在第 5(0.0878 g a.i./m^3)水平对死亡率影响极显著高于其他各水平($P<0.01$)，因此最优剂量条件为 0.0878 g a.i./m^3。

表 4　正交试验单因素多重比较及统计量

Table 4　Multiple comparisons and statistics of four factors in the orthogonal experiment

影响因素 Related factors	处理 Treatments	样本容量 Sample space	试虫死亡率 Mortality (%)	
			平均值±标准误 Mean ± *SE*	95% 置信区间 95% Confidence interval
温度(℃) Temperature (A)	1 (15)	5	81.656 ± 0.257 dC	80.677 – 82.635
	2 (20)		85.658 ± 0.386 cB	84.679 – 86.637
	3 (25)		86.538 ± 0.414 bcAB	85.559 – 87.517
	4 (28)		87.164 ± 0.501 abAB	86.185 – 88.143
	5 (32)		88.016 ± 0.339 aA	87.037 – 88.995
相对湿度(%) Relative humidity (B)	1 (50)	5	83.682 ± 0.416 cC	82.703 – 84.661
	2 (60)		84.858 ± 0.633 bcBC	83.879 – 85.837
	3 (70)		88.728 ± 0.518 aA	87.749 – 89.707
	4 (80)		86.048 ± 0.417 bB	85.069 – 87.027
	5 (90)		85.716 ± 0.296 bBC	84.737 – 86.695
处理时间(h) Period (C)	1 (0.5)	5	84.276 ± 0.304 cB	83.297 – 85.255
	2 (1.0)		85.310 ± 0.538 bcB	84.331 – 86.289
	3 (2.0)		87.542 ± 0.449 aA	86.563 – 88.521
	4 (3.0)		86.208 ± 0.573 abAB	85.229 – 87.187
	5 (4.0)		85.696 ± 0.482 bcAB	84.717 – 86.675
烟剂剂量(g a.i./m^3) Dosage (D)	1 (0.0473)	5	82.766 ± 0.207 dD	81.787 – 83.745
	2 (0.0574)		84.002 ± 0.331 cdCD	83.023 – 84.981
	3 (0.0675)		85.022 ± 0.394 cBC	84.043 – 86.001
	4 (0.0776)		86.622 ± 0.418 bB	85.643 – 87.601
	5 (0.0878)		90.620 ± 0.552 aA	89.641 – 91.599

表中数据后不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)，不同大写字母表示差异极显著($P<0.01$)(Duncan 氏多重检验法)。Different lowercase letters following data indicate significant difference ($P<0.05$), while different capital letters indicate extremely significant difference ($P<0.01$) by Duncan's multiple test.

2.1.5　正交试验结果的多元回归分析：为了揭示熏蒸条件相互作用对韭菜迟眼蕈蚊成虫死亡率的影响，对正交试验结果进行多元回归分析，对各影响因素进行定量拟合，结果(图 2)发现温度与相对湿度、温度与烟剂剂量、相对湿度与烟剂剂量相互之间存在交互作用。由公式计算得出，AB(温度与相对湿度)交互效应指数 = [(87.5 – 80) – (83.5 – 82)]/2 = 3，AD(温度与烟剂剂量)交互效应指数 = [(92.2 – 92) – (88 – 79)]/2 = –4.4，BD(相对湿度与烟剂剂量)交互效应指数 = [(88 – 90.5) – (83 – 79)]/2 = –3.25。由此，温度与相对湿度间表现正向交互效应，而温度与烟剂剂量、相对湿度与烟剂剂量间表现反向交互效应。

正交试验结果经过多元回归分析，得到试虫死亡率(y)和各影响因素(x)的回归模型表达式为 $y = 28.3 + 0.604x_1 + 0.992x_2 + 170x_4 - 0.00628x_2^2 + 4\,578x_4^2 + 0.00835x_1x_2 - 12.91x_1x_4 - 3.98x_2x_4$，$R^2 = 0.9264$，其中，$x_1$ 为温度，x_2 为相对湿度，x_4 为烟剂剂量。回归模型经方差分析达到极显著水平($F = 80.17$，$P<0.01$)，说明温度、相对湿度和烟剂剂量 3 因子与韭菜迟眼蕈蚊成虫死亡率间存在极显著的回归关系。

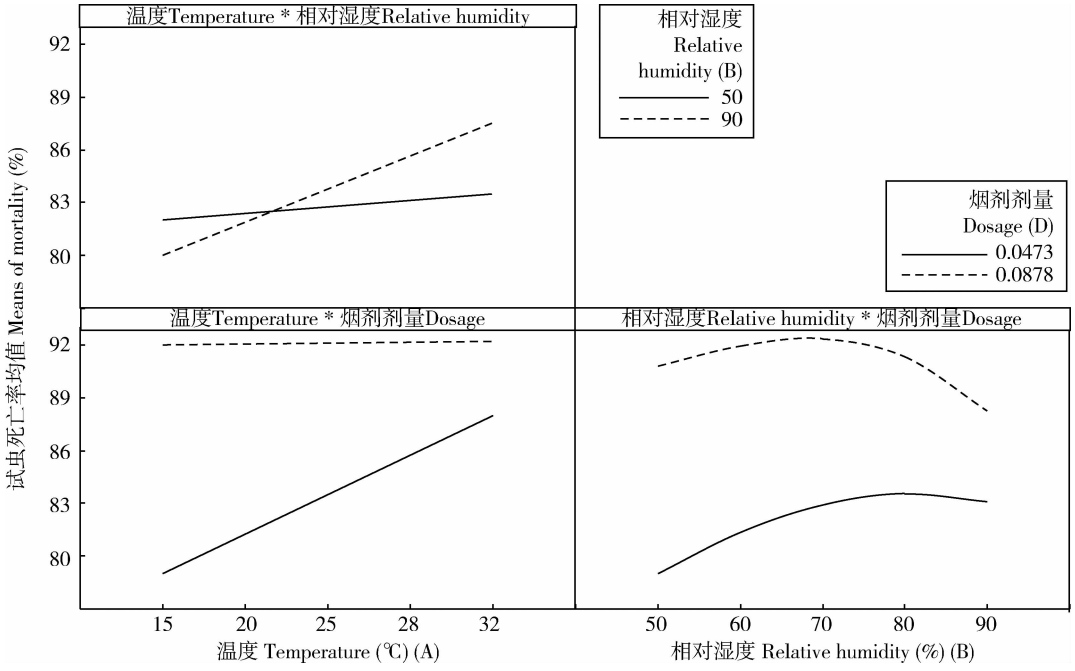

图 2 多元回归分析各因素对韭菜迟眼蕈蚊成虫死亡率的交互作用图

Fig. 2 Interaction plot with multiple regression interaction of factors on the mortality of *Bradysia odoriphaga* adults

2.2 正交试验多元回归模型的验证试验

为验证多元回归模型的有效性,随机进行一组敌敌畏烟剂熏蒸防治韭菜迟眼蕈蚊的验证试验,结果(表 5)采用最优熏蒸条件组合方案(试验号 8)得到的试虫死亡率达到了 96.59%。此外,试验实测值与模型拟合值间的相对误差的最大值和最小值分别为 3.62% 和 0.66%;经过计算,实测值与拟合值间的 Pearson 相关系数为 0.9749,大于 0.8,二者呈高度正相关,表明模型拟合的多元回归方程经试验验证为准确有效。

表 5 韭菜迟眼蕈蚊成虫死亡率与各影响因素多元回归方程的模型验证

Table 5 Model validation of the multiple regression equation for the mortality of *Bradysia odoriphaga* adults and the related factors

试验号 Number	影响因素 Related factors				试虫死亡率 Mortality (%)		绝对误差 (%) Absolute error	相对误差 (%) Relative error
	温度(℃) Temperature (A)	相对湿度(%) Relative humidity (B)	处理时间(h) Period (C)	烟剂剂量 (g a.i./m^3) Dosage (D)	拟合值 Predictive value	实测值 Measured value		
1	15	50	0.5	0.0473	77.23	75.26	1.97	2.62
2	20	50	1.0	0.0574	81.23	84.28	3.05	3.62
3	20	60	2.0	0.0675	86.10	87.92	1.82	2.07
4	25	60	1.0	0.0675	87.27	85.39	1.88	2.20
5	28	70	2.0	0.0878	94.26	93.64	0.62	0.66
6	32	90	4.0	0.0776	90.99	92.53	1.54	1.66
7	28	80	3.0	0.0776	91.08	93.42	2.34	2.50
8	32	70	2.0	0.0878	94.48	96.59	2.11	2.18

3 讨论

东北地区冬长夏短,为了满足消费者对反季节蔬菜的市场需求,温室种植是韭菜生产中的重要环节。韭菜根蛆类害虫是制约温室韭菜生长的最大障碍,一直以来治理难度很大。敌敌畏是一种高效、广谱性的有机磷类杀虫剂,其蒸汽压高,熏蒸效果尤为

突出，且在环境中易降解、残留期短。应用敌敌畏烟剂处理防治韭菜迟眼蕈蚊成虫，药剂有效成分的颗粒可以凭借多向穿透和沉积性能均匀分散到虫体表面，从而通过抑制昆虫胆碱酯酶（cholinesterase）活性达到杀虫的目的。本研究通过正交试验在室内调控温度、相对湿度、处理时间和烟剂剂量 4 因素的 5 个水平，筛选得到了应用 15% 敌敌畏烟剂熏杀成虫死亡率达到最大的优化处理方案：温度为 32℃、相对湿度为 70% 条件下，使用烟剂剂量为 0.0878 g a.i./m^3，熏蒸处理 2 h；对正交试验结果进行回归分析表明，温度与相对湿度、温度与烟剂剂量、相对湿度与烟剂剂量相互之间存在交互作用，经过试验验证，得到的回归模型准确有效，从而量化了各因素与死亡率之间的数理统计关系。

一般认为有机磷类杀虫剂的毒力与温度呈正相关（Johnson, 1990），但也有该类药剂对某些昆虫如桃蚜 *Myzus persicae* 和玉米螟 *Ostrinia nubilalis* 的温度效应表现出轻微负系数的现象（Sweeden and McLeod, 1997; Musser and Shelton, 2005）；提升杀虫剂的活性除了温度这一重要因子影响外，还与试验对象（虫种）、施药方法及使用剂量等因素有关（马云华, 2012）。因此，在田间应用时，应根据靶标昆虫与作物，针对特定的栽培模式，采用适宜的剂型和操作方法，在适当的温度下施用适当的剂量浓度，既可以取得良好的防治效果使药效发挥到最大，又可以节约成本，还可以延缓害虫的抗药性增长速度（林仁振等, 2001; 刘佳等, 2014）。本研究表明适当提高环境温度有助于烟剂提升杀虫效果，这与其他多种熏蒸制剂比如利用磷化氢熏蒸防治木瓜实蝇 *Bactrocera papayae*（刘涛等, 2013）和桃小食心虫 *Carposina niponensis*（刘波等, 2016）、利用苯并噻唑室内熏蒸防治韭菜迟眼蕈蚊（陈澄宇等, 2014）的研究结果相一致，分析是由于昆虫呼吸代谢功能所主导的影响呼吸速率发生变化所致。几乎所有促进昆虫呼吸速率的措施都可以通过增加熏蒸剂的吸入量而加强毒性（Bond, 1984）。与温度相比，湿度则未对此表现出简单的正协同作用，这也与利用敌敌畏烟剂熏蒸防治瓜蚜（任娜等, 2006）、利用硫酰氟熏蒸防治德国小蠊 *Blattella germanica*（李金有等, 2013）的研究结果相一致，湿度过大会影响烟剂颗粒的沉降和分散，作物及虫体表面形成的水膜阻碍烟雾的穿透效果，不利于药效的发挥。任娜等（2006）使用敌敌畏烟剂室内密闭熏蒸处理超过 1 h 后，发现瓜蚜致死率再无显著差异；陈澄宇等（2014）使用苯并噻唑对韭菜迟眼蕈蚊成虫熏蒸处理 0.5 ~ 1.0 h 时毒力变化较大，而在处理 1.0 ~ 2.0 h 时变化不大，这也与本研究中适当延长熏蒸时间可以显著提高试虫死亡率，但处理一定时长后，死亡率便再无显著差异的现象相一致，分析原因是由于药剂有效成分颗粒与虫体接触后，试虫出现中毒症状，随着时间的延长，处理组呼吸速率与空白对照组趋于接近，试虫起先进入麻痹状态，然后才逐渐死亡，此机制与利用简易热电偶双控热量仪对黄粉虫 *Tenebrio molitor* 蛹进行热胁迫生理反应调查（Kuusik *et al*., 1994）、利用灵敏双差热仪对大菜粉蝶 *Pieris brassicae* 进行呼吸速率监测（Harak *et al*., 1999）、利用微电解呼吸记录仪对松树皮象 *Hylobius abietis* 进行呼吸代谢率与间歇气体循环记录（Sibul *et al*., 2004）等研究中所阐述的原理相一致。

温室大棚作为调节植物生长的特殊建筑，营造了一个相对封闭、异于露地的局部小气候；作为一种人工系统，它的可控性强，光、温、水、肥、气均可调控（何德良, 2007）。基于理论数据，在实际农事操作中可以通过悬挂屏显式温湿度记录仪来实时监控棚室内的环境条件变化。常规管理下可以通过加盖、收揭草帘和闭棚、放风等方式调控温度，通过覆地膜、通风、控制灌水量等方式调控湿度（薛志成, 2008）；科学管理下可以通过加铺地热线、安装通风机和增设温室智能调控系统等方法调节环境条件至最适水平，以此为烟剂处理增效。在实际生产中使用烟剂时，农民习惯在傍晚点烟，然后闭棚过夜，杀虫效果虽好但却对人员健康和环境安全带来隐患，本研究结果表明，在优化温湿度条件的基础上，施用敌敌畏烟剂 0.0878 g a.i./m^3 熏棚处理 2 h 时，韭菜迟眼蕈蚊成虫死亡率即可达到最大，随后棚室应当适当通风换气，以便后续进行其他农事活动，降低了药剂污染的风险，同时也预防韭菜产生药害。

韭菜迟眼蕈蚊寄主范围较广，在北方温室内常常是葱蒜类蔬菜的主要害虫之一。对月形天蚕蛾 *Actias luna*（Lindroth, 1989）、棉铃虫 *Helicoverpa armigera*（谭维嘉和赵焕香, 1990）、小菜蛾 *P. xylostella*（Abro and Wright, 1989; 李云寿等, 1997）等的研究发现，害虫取食不同寄主植物可以对杀虫剂的毒力产生显著影响，因此，研究韭菜以外的其他寄主植物上的越冬种群对敌敌畏表现出的药剂敏感性是杀虫剂田间毒理学的一个重要内容，也是全面防控工作的必要理论补充。随着敌敌畏烟剂处理防控温室韭菜迟眼蕈蚊技术的推广和普及，种群的抗药性监测不容忽

视。乙酰胆碱酯酶(acetylcholinesterase, AChE)是有机磷类杀虫剂的重要靶标酶,由变构引起的AChE敏感度降低是种群对敌敌畏产生抗性的重要原因(何玉仙等, 2009),鉴于此,接下来可以将AChE作为抗药性生化检测的一个重要参考指标,研究敌敌畏对韭菜迟眼蕈蚊AChE活性的抑制作用,用于早期抗性检测和后期田间种群抗性监测,从而为农药安全、合理、有效的施用提供科学指导。

参考文献(References)

Abro GH, Wright DJ, 1989. Host plant preference and the influence of different cabbage cultivars on the toxicity of abamectin and cypermethrin against *Plutella xylostella* Lepidoptera: Plutellidae. *Ann. Appl. Biol.*, 115(3): 481-487.

Bond EJ, 1984. Manual of Fumigation for Insect Control. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome. 54 pp.

Chen CY, Zhao YH, Li H, Zhang P, Mu W, Liu F, 2014. Biological activity of benzothiazole against *Bradysia odoriphaga* (Diptera: Sciaridae) at different developmental stages. *Acta Entomol. Sin.*, 57(1): 45-51. [陈澄宇, 赵云贺, 李慧, 张鹏, 慕卫, 刘峰, 2014. 苯并噻唑对不同虫态韭菜迟眼蕈蚊的生物活性. 昆虫学报, 57(1): 45-51]

Harak M, Lamprecht I, Kuusik A, Hiiesaar K, Metspalu L, Tartes U, 1999. Calorimetric investigations of insect metabolism and development under the influence of a toxic plant extract. *Thermochim. Acta*, 333(1): 39-48.

He DL, 2007. Occurrence characteristics and integrated management of diseases and pests of greenhouse vegetables. *Vegetable*, (1): 24-26. [何德良, 2007. 大棚蔬菜病虫害的发生特点及综合防治. 蔬菜, (1): 24-26]

He YX, Zhao JW, Huang J, Weng QY, Liang ZS, 2009. Frequency distribution of residual acetylcholinesterase activity in presence of inhibitor and its relationship with insecticide resistance in different populations of *Bemisia tabaci* (Gennadius) (Homoptera: Aleyrodidae). *Acta Entomol. Sin.*, 52(12): 1373-1378. [何玉仙, 赵建伟, 黄建, 翁启勇, 梁智生, 2009. 抑制剂存在下不同种群烟粉虱乙酰胆碱酯酶残余活性频率分布及其与抗药性的关系. 昆虫学报, 52(12): 1373-1378]

Johnson DL, 1990. Influence of temperature on toxicity of two pyrethroids to grasshoppers (Orthoptera: Acrididae). *J. Econ. Entomol.*, 83(2): 366-373.

Ju ZL, Zhu GR, Qiao DL, Zhao JZ, 1990. A successful development in high efficient fumigating pesticide suitable for protected culture. *Sci. Agric. Sin.*, 23(3): 88. [剧正理, 朱国仁, 乔德禄, 赵建周, 1990. 一种适用于保护地的高效杀虫烟雾剂研制成功. 中国农业科学, 23(3): 88]

Kuusik A, Tartes U, Harak M, Hiiesaar K, Metspalu L, 1994. Developmental changes during metamorphosis in *Tenebrio molitor* (Coleoptera: Tenebrionidae) studied by calorimetric thermography. *Eur. J. Entomol.*, 91(3): 297-305.

Lee S, Peterson CJ, Coats JR, 2003. Fumigation toxicity of monoterpenoids to several stored product insects. *J. Stored. Prod. Res.*, 39(1): 77-85.

Li CJ, Wang Y, Xu YL, Zhang ZM, Meng J, Yao Q, Song J, 2013. Efficacy of a mixed formulation of *Heterorhabditis bacteriophora* ZT (Heilongjiang isolate) and *Steinernema carpocapsae* All against *Bradysia odoriphaga*. *Chin. J. Appl. Entomol.*, 50(1): 235-241. [李春杰, 王义, 许艳丽, 张志明, 孟洁, 姚钦, 宋洁, 2013. 寒区昆虫病原线虫对韭菜迟眼蕈蚊的防治研究. 应用昆虫学报, 50(1): 235-241]

Li JY, Wang L, Pang QY, Chen CT, Cheng JJ, Ci Y, Chang L, Guo WJ, 2013. Killing effect of sulfuryl fluoride on *Blattella germanica* under different conditions. *Chin. J. Hyg. Insect Equip.*, 19(1): 44-45. [李金有, 王林, 庞秋艳, 陈春田, 程晶晶, 慈颖, 常琳, 郭文静, 2013. 不同条件下硫酰氟对德国小蠊熏杀效果的研究. 中华卫生杀虫药械, 19(1): 44-45]

Li YS, Luo WC, Zhao SH, 1997. The change of dipterex and dichlorvos susceptibility of *Plutella xylostella* L. feeding on different host plants. *Entomol. Knowl.*, 34(1): 8-11. [李云寿, 罗万春, 赵善欢, 1997. 取食不同寄主植物的小菜蛾对敌百虫和敌敌畏敏感性的变化. 昆虫知识, 34(1): 8-11]

Lindroth RL, 1989. Chemical ecology of the luna moth: effects of host plant on detoxification enzyme activity. *J. Chem. Ecol.*, 15(7): 2019-2029.

Lin RZ, Wu GX, Zhao JW, 2001. Efficacy of four insecticides against the larvae of *Plutella xylostella* (Linnaeus) at different temperatures. *Fujian Agric. Sci. Technol.*, (6): 18-19. [林仁振, 吴国星, 赵景玮, 2001. 不同温度下四种杀虫剂对小菜蛾幼虫的药效试验. 福建农林科技, (6): 18-19]

Liu B, Zhan GP, Ren LL, Li BS, Niu M, Wang YJ, 2016. Toxicity of pure phosphine to *Carposina sasakii* Matsumura (Lepidoptera: Carposinadae). *Plant Prot.*, 42(6): 191-196. [刘波, 詹国平, 任荔荔, 李柏树, 牛墨, 王跃进, 2016. 纯磷化氢熏蒸对桃小食心虫的毒力作用. 植物保护, 42(6): 191-196]

Liu J, Gao ZL, Ma YH, Dang ZH, Pan XH, Pan WL, Li YF, 2014. Primary study on the temperature coefficient of different mode pesticides to *Apolygus lucorum*. *J. Agric. Univ. Hebei*, 37(6): 73-84. [刘佳, 高占林, 马云华, 党志红, 潘小花, 潘文亮, 李耀发, 2014. 不同作用方式杀虫剂对绿盲蝽毒力温度系数初探. 河北农业大学学报, 37(6): 73-84]

Liu T, Li L, Zhang FH, Dong SJ, Wang YJ, 2013. Research on the toxicity of low temperature phosphine fumigation against papaya fruit fly. *Plant Quarant.*, 27(6): 56-59. [刘涛, 李丽, 张凡华, 董书军, 王跃进, 2013. 低温磷化氢熏蒸对木瓜实蝇的毒力研究. 植物检疫, 27(6): 56-59]

Lu Q, Li SY, Zhao GH, 2011. Preliminary screening on the optimum formula of celangulin smoke agent. *J. Gansu Agric. Univ.*, 46(1): 78-81. [路强, 李生英, 赵国虎, 2011. 苦皮藤素烟剂最佳配方的初步筛选. 甘肃农业大学学报, 46(1): 78-81]

Ma YH, 2012. Effect of Temperature on the Toxicity of Several Insecticides to *Sitobion avenae* (Fabricius) and *Apolygus lucorum* (Meyer-Dur) and on the Enzyme Activity. MSc Thesis, Agricultural

University of Hebei, Baoding, Hebei. [马云华, 2012. 几种杀虫剂对麦长管蚜和绿盲蝽的温度系数及温度对主要代谢酶的影响. 河北保定: 河北农业大学硕士学位论文]

Min YN, 2011. Application Guide of Design of Experiments (DOE). China Machine Press, Beijing. 34 – 43. [闵亚能, 2011. 实验设计(DOE)应用指南. 北京: 机械工业出版社. 34 – 43]

Musser FR, Shelton AM, 2005. The influence of post-exposure temperature on the toxicity of insecticides to *Ostrinia nubilalis* (Lepidoptera: Crambidae). *Pest Manag. Sci.*, 61(5): 508 – 510.

Ren N, Yang X, Liu XY, Ma CS, 2006. Study on physical synergisticl technique of dichlorvos smoking agents against cucumber *Aphis gossypii* in the greenhouse. *Plant Prot.*, 32(4): 109 – 111. [任娜, 杨修, 刘晓英, 马春森, 2006. 敌敌畏烟剂防治大棚黄瓜瓜蚜的物理增效技术研究. 植物保护, 32(4): 109 – 111]

Sibul I, Kuusik A, Voolma K, 2004. Monitoring of gas exchange cycles and ventilatory movements in the pine weevil *Hylobius abietis*: respiratory failures evoked by a botanical insecticide. *Entomol. Exp. Appl.*, 110(2): 173 – 179.

Sun CJ, Xu GQ, Zhang YB, Zhao Q, Zhao JQ, 1995. Test of a new formulation of delousing against *Trialeurodes vaporariorum* Westwood. *Entomol. Knowl.*, 32(1): 20 – 23. [孙承钧, 许国庆, 张一兵, 赵奇, 赵季秋, 1995. 新剂型灭虱宁防治温室白粉虱试验. 昆虫知识, 32(1): 20 – 23]

Sweeden MB, McLeod PJ, 1997. Systemic toxicity and field efficacy of imidacloprid, pymetrozine, and triazamate against *Myzus persicae* (Homoptera: Aphididae) on spinach. *J. Agric. Entomol.*, 14(4): 421 – 433.

Tan WJ, Zhao HX, 1990. Changes of sensitivity of cotton bollworms feeding on different host plants to decamethrin. *Acta Entomol. Sin.*, 33(2): 155 – 160. [谭维嘉, 赵焕香, 1990. 取食不同寄主植物的棉铃虫对溴氰菊酯敏感性的变化. 昆虫学报, 33(2): 155 – 160]

Xu L, Zhao JQ, Xu GQ, Zhong T, Zhao TH, 2015. Artificial induction of sexuales in *Aphis glycines* (Hemiptera: Aphididae). *Chin. J. Appl. Entomol.*, 52(6): 1429 – 1437. [徐蕾, 赵季秋, 许国庆, 钟涛, 赵彤华, 2015. 室内人工诱导大豆蚜产生有性世代的研究. 应用昆虫学报, 52(6): 1429 – 1437]

Xu L, Zhao TH, Liu PB, Zhong T, Wang Z, Xu GQ, 2016. Olfactory behavioral responses of *Bradysia odoriphaga*. *Chin. J. Appl. Entomol.*, 53(6): 1190 – 1197. [徐蕾, 赵彤华, 刘培斌, 钟涛, 王哲, 许国庆, 2016. 韭菜迟眼蕈蚊 *Bradysia odoriphaga* 嗅觉行为反应. 应用昆虫学报, 53(6): 1190 – 1197]

Xue M, Pang YH, Wang CX, Li Q, 2005. Biological effect of liliaceous host plants on *Bradysia odoriphaga* Yang *et* Zhang (Diptera: Sciaridae). *Acta Entomol. Sin.*, 48(6): 914 – 921. [薛明, 庞云红, 王承香, 李强, 2005. 百合科寄主植物对韭菜迟眼蕈蚊的生物效应. 昆虫学报, 48(6): 914 – 921]

Xue ZC, 2008. Control techniques of temperature and humidity in the greenhouse. *Shanxi Agric.*, (10): 23. [薛志成, 2008. 棚室温湿度调控技巧. 山西农业, (10): 23]

Yang Q, 2014. Occurrence Dynamics of Insect Pests and Their Natural Enemies in Greenhouses Vegetable and the Influence of Insecticides on the Major Natural Enemies. MSc Thesis, Shandong Agricultural University, Tai'an, Shandong. [杨琼, 2014. 温室大棚蔬菜害虫和天敌发生动态及药剂对主要害虫天敌的影响. 山东泰安: 山东农业大学硕士学位论文]

Yang TT, 2004. The application technique of smoke generator in greenhouse vegetables. *J. Changjiang Veget.*, (2): 30 – 31. [杨田堂, 2004. 烟剂农药在棚室蔬菜上的应用技术. 长江蔬菜, (2): 30 – 31]

Zettler JL, Arthur FH, 2000. Chemical control of stored product insects with fumigants and residual treatments. *Crop Prot.*, 19(8): 577 – 582.

Zhang GC, Yan L, Liu L, Cheng G, Duan WQ, 2007. Use of 1.2% matrine · smoke agent from *Sophora flavescens* Ait. for prevention of *Bemisia tabaci*. *Forest By-Prod. Special. China*, 90(5): 5 – 7. [张国财, 颜丽, 刘丽, 程功, 段文琴, 2007. 利用1.2%苦参·烟碱烟剂防治温室烟粉虱的研究. 中国林副特产, 90(5): 5 – 7]

Zhang QZ, Chen ZD, Wang WJ, Liu HY, 2008. Effects of chlorpyrifos stress on antioxidant enzyme activities and some related compound contents in pakchoi. *Acta Ecol. Sin.*, 28(9): 4524 – 4530. [张清智, 陈振德, 王文娇, 刘红玉, 2008. 毒死蜱胁迫对小白菜抗氧化酶活性和相关生理指标的影响. 生态学报, 28(9): 4524 – 4530]

(责任编辑: 赵利辉)