



小麦与蔬菜蚜虫新型防控技术研究进展*

范佳¹ 刘勇² 曾建国³ 郭梅⁴ 孙京瑞¹ 程辟³ 陈巨莲^{1**}

(1. 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; 2. 山东农业大学植物保护学院, 泰安 271018; 3. 湖南农业大学, 国家植物功能成分利用工程技术研究中心, 长沙 410128; 4. 黑龙江省农业科学院植物脱毒苗木研究所, 哈尔滨 150086)

摘要 近几年通过国内外科研协作, 小麦及蔬菜蚜虫基础及防控技术研究有了长足进展: 在害虫行为调控技术方面, 通过蚜虫报警激素反- β -法尼烯[(E)- β -Farnesene, EBF]等挥发物缓释对蚜虫及其天敌种群调查, 明确了田间应用剂量及持效期、释放点间距、释放器放置高度, 以及 EBF 与化学农药协调应用对蚜虫控制及对天敌的引诱效果及其作用机理, 发展了防控小麦、蔬菜蚜虫的“推-拉”技术; 在利用作物多样性布局对害虫生态调控技术方面, 研究明确小麦与多种作物间、套及混种对蚜虫具有良好控制作用及其最佳作物布局模式, 并揭示其降低蚜虫密度、保护天敌及提高土地利用当量等增产效果; 筛选了植物源杀虫活性成分, 发现博落回提取物中血根碱及植物凝集素对麦蚜具有强杀虫活性, 开发获得了一种博落回提取物 (*Macleaya cordata* extract, 简称 MCE) 与烟碱复配配方, 杀蚜虫效果达 98.9%; 通过技术集成研究与示范, 在河南、河北与山东推广应用; 并采用可量化评价体系, 获得当地农民及农技推广部门的反馈意见, 对区域集成技术进行调整。研究结果对改变目前过度依赖化学农药防治小麦、蔬菜病虫害的现状, 减少农药使用和残留、促进农民增收等小麦、蔬菜病虫害绿色防控技术的开发推广及食品安全具有重要意义。

关键词 小麦, 蔬菜, 博落回, 蚜虫, 反- β -法尼烯, 挥发物缓释器, 推-拉策略, 生态调控, 作物多样性布局, 植物源杀虫剂

Advancement of new prevent and control technologies for aphids in wheat and vegetable

FAN Jia¹ LIU Yong² ZENG Jian-Guo³ GUO Mei⁴ SUN Jing-Rui¹
CHENG Pi³ CHEN Ju-Lian^{1**}

(1. State Key Laboratory for Biology of Plant Diseases and Insect Pests, Institute of Plant Protection, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China; 2. Shandong Agricultural University, Taian 271018, China; 3. National Plant Functional Component Utilization Engineering Center, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China; 4. Virus-Free Seedling Research Institute of Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Haerbin 150086, China)

Abstract Domestic and international scientific collaboration over recent years has led to important achievements in basic research and control techniques for wheat and vegetable aphids. Behavioral manipulation technology has improved through the investigation of the effectiveness of slow released infochemicals, e.g. aphid alarm pheromone [(E)- β -Farnesene, EBF)], in repelling aphids and attracting their natural enemies. This research has clarified the correct dose of infochemical oil in the slow releaser and the effective height of infochemical dispensers above host plants, plus the possibility of coordination with the application of EBF and insecticides. In addition, “push-pull” techniques have been developed that use crop diversity to control

* 资助项目: 国家国际科技合作专项 (2010DFA32810、2014DFG32270); 比利时政府国际合作项目 (CUD/PICShandong); 国家自然科学基金项目 (31371946); 国家转基因专项 (2014ZX0800201B-003) 与国家小麦产业体系项目 (CARS-3)

**通讯作者, E-mail: jlchen@ippcaas.cn

收稿日期: 2014-10-13, 接受日期: 2014-10-28

aphids. These unequivocally demonstrate that intercropping, or mixing wheat with other crops, has a valuable control effect on aphids, and allows optimal models to be selected based on the required aphid population decrease, the importance of preserving natural enemies and the Land Equivalent Ratio. Plant resource insecticidal component screening has found some bioactive components in *Macleaya cordata* extracts (MCE), e.g. alkaloids, and plant lectins that are highly toxic to wheat aphids. A formula containing sanguinarine from MCE and nicotine has been developed that can achieve a mortality among aphid populations of 98.9%; New crop protection technologies have been integrated and demonstrated in wheat and vegetable fields in Henan, Hebei and Shandong provinces, and a socio-economic survey and evaluation system adopted to adjust control methods based on feedback from farmers and technology transfer agencies. The final proposed solutions are adapted to local conditions and are therefore more sustainable and efficient, limit the negative effects of the conventional pesticide use, enhance farmers' income, and ensure food safety.

Key words wheat, vegetable, *Macleaya cordata*, aphid, (E)- β -Farnesene, push-pull strategy, slow releaser of infochemicals, ecological manipulation, crops diversity allocation, botanical insecticide

《国家中长期科技发展规划纲要》指出现代农业发展需求是“高产、优质、高效、生态、安全”，“建设现代植保，服务现代农业”以及“病虫害科学防控、绿色防控”是当代植物保护的主题和理念。《国家粮食中长期规划纲要（2008—2020）》特别提出，要通过加强监测预报，提高病虫害的防控能力，到2020年，使重大病虫害造成的产量损失再减少一半。这就迫切要求我们尽快提高对作物病虫害的防控能力，制定科学的防控决策，提升作物病虫害控制的技术水平，减少农产品损失，保障国家粮食安全和主要农产品安全。

小麦是我国重要的粮食作物，占我国粮食产量的五分之一；而蔬菜生产对我国农业和农产品贸易至关重要，山东省蔬菜业的总产值已经超过粮食，成为山东种植业中的第一大产业。蚜虫是小麦和蔬菜上重要害虫，由于蚜虫发生和繁殖速度极快，不仅直接取食植物汁液，同时传播多种植物病毒，对小麦和蔬菜产量和品质造成严重损失。麦蚜主要种类包括麦长管蚜 *Sitobion avenae*、麦二叉蚜 *Schizaphis graminum*、禾谷缢管蚜 *Rhopalosiphum padi* 和麦无网长管蚜 *Metopolophium dirhodum* 4种，通常在小麦生长季节混合发生。据统计，我国每年小麦蚜虫危害面积可达0.17亿 hm^2 ，造成减产15%~30%，严重时可达60%。菜蚜主要种类包括萝卜蚜 *Lipaphis erysimi*、桃蚜 *Myzus persicae* 和马铃薯长管蚜 *Macrosiphum euphorbiae*，常混合发生，

是十字花科、葫芦科和茄科蔬菜主要害虫，损失也十分严重。目前，小麦、蔬菜上蚜虫防治主要采用化学防治，吡虫啉是防治蚜虫的有效剂之一，其常规施药方法是在蚜虫发生期进行全株喷雾，其副作用是不仅直接杀伤天敌、污染环境，并且在过度依赖化学农药且使用不合理的现状下导致残留超标，严重影响食品安全。因此，为了降低农药引发的诸多严重负面影响，小麦与蔬菜害虫的防治迫切需要开发无公害防控技术。

当今的害虫防治理念已从传统的“杀灭”转向科学的“调控”，生态调控成为可持续农业领域中的研究热点之一。农作物的多样性是作物虫害生态调控途径之一，主要是由于农田生物多样性增加，天敌种类和数量增加；此外作物混种品种间气味互相掩盖，蚜虫需花费更多的时间去寻找最适寄主植物，通过延长蚜虫搜寻寄主的时间，抑制蚜虫种群增长。一些植物挥发性物质，特别是虫害诱导植物挥发物具有化学防御功能，除了利用驱避作用对植食性昆虫进行直接防御外，还可以通过吸引第三级营养水平（天敌昆虫）间接防御害虫。一些昆虫取食诱导的挥发物和昆虫自身分泌物（如外激素和蜜露）具有驱避/吸引害虫、吸引天敌的特点。例如，国际上应用昆虫性信息素进行田间虫情监测，迷向/诱捕/干扰成虫交配来防控害虫，应用蚜虫报警激素反- β -法尼烯[(E)- β -Farnesene，简称EBF]干扰蚜虫寄主定位，增强天敌寻找蚜虫线索的推-拉策略，成为环境友好、活性专一的无公害防控害虫新举

措。同时,在食品安全越来越被关注的今天,植物源杀菌剂和杀虫剂在有机农产品生产中病虫害防治有重要作用。在药用植物博落回中,主要含有血根碱、白屈菜红碱等生物碱,而已有研究显示博落回生物碱植物源杀虫剂对多种害虫具有毒杀活性。由于博落回生物碱属于天然物质,使用后易降解,低毒,其作为生物农药的研究和应用也已受到越来越多的关注。

欧洲生物科学在世界居领先地位,欧盟各国一直十分重视农产品生产质量和有机农产品生产。比利时列日大学让布鲁农业科学与生物工程学院昆虫功能与进化学系 Frederic Francis 教授研究团队,在昆虫化学、分子生态学研究、小麦和蔬菜蚜虫为害以及挥发物组分、蚜虫的生物控制策略,以及基于“推-拉”策略,利用昆虫外激素如蚜虫性信息素(如荆芥内脂)、EBF 以及一些绿叶气味物质如己烯醇的衍生物等的配比研发挥发物释放器,控制蚜虫方面进行了大量研究。比利时鲁汶大学的 Claude Bragard 教授在蚜虫传播的病毒研究领域开展了大量研究。

目前我国在利用蚜虫报警激素及植物次生化合物控制蚜虫方面研究较少。加强小麦与蔬菜主要蚜虫新型防控技术的研发迫在眉睫。从 2008 年开始,先后在比利时瓦隆大区及中国科技部的政府间科技合作项目及国家科技项目支持下,中国农业科学院植物保护研究所、山东农业大学、湖南农业大学、黑龙江农业科学院、比利时列日大学和鲁汶大学通过专家交流、研究生互派以及合作研究等途径,以引进与自主研发相结合的方式,在利用信息化合物对蚜虫行为调控的“推-拉”策略、作物间(套)作或者条带种植的生态调控以及农药减量使用后生态系统的生物防治功能等领域进行了基础研究及防控技术研发协作,并采用可量化评价体系对最新技术示范应用提供反馈。现将研究结果报道如下。

1 主要研究进展

小麦、蔬菜上蚜虫尽管种类不同,但是蚜虫防治方法相似、蚜虫天敌相似。而且我国小麦、蔬菜生产的主产区如山东、河北等地,小麦和蔬

菜在生产上常常间作或邻作。因此,以小麦、蔬菜(大白菜、马铃薯)两类作物为研究对象,采用农艺学途径(如田间病虫害系统评估与实验室研究)和社会经济学途径(农民问卷调查)相结合,通过作物多样性布局的生态调控、应用驱避性挥发物缓释器行为调控、化学农药减量使用保护天敌的生物防治和植物凝集素及博落回提取物等植物源农药测定及应用等小麦、蔬菜病虫害防控技术创新研究,为建立小麦、蔬菜病虫害无公害防控技术体系,降低或替代以化学农药为主植物病虫害防控模式奠定了基础。

1.1 挥发物缓释剂及缓释器的研制和应用技术

挥发性信息化合物(简称挥发物)是植物-昆虫-天敌三级营养水平间信息传递的重要媒介,对植食性昆虫-天敌的相互关系起着调控作用。加强对活性挥发物在田间应用的研究,发掘其对蚜虫的行为调控,及吸引天敌提高生物防治的效果。为研发控制蚜虫的“推-拉”策略,即害虫综合治理新途径奠定基础。

1.1.1 基于“推-拉”策略的挥发物缓释技术取得显著进展 已有研究发现,小麦、大蒜等作物释放多种挥发物对蚜虫有驱避作用、对天敌有引诱作用。但由于挥发物不稳定、易失效,实际应用上难度大。通过田间系统调查和缓释诱捕器监测,综合评价了大蒜提取物、大蒜素(二烯丙基二硫)、水杨酸甲酯、(顺)-3-己烯醇、(顺)-3-己酰醋酸酯、1-己醇和 EBF 等近 10 种挥发物对蚜虫的行为调控及生物防治作用。发现大蒜素、水杨酸甲酯和 EBF 具有应用于“推-拉”策略的开发潜力(王万磊等, 2008; 董洁等, 2012a, 2012b; Cui *et al.*, 2012a, 2012b; Wang *et al.*, 2011; Zhou, 2012; Zhou *et al.*, 2013a)。

蚜虫报警激素是蚜虫遇到天敌或其他干扰物时从腹管分泌的一种粘稠液滴,释放到体外具有挥发性,能引起同类其他个体骚动并从栖息地迅速逃散、或从植株上脱落,并能作为天敌寻找蚜虫的重要线索(图 1:A)。EBF 是绝大多数蚜虫报警激素主要成分(Francis *et al.*, 2005),是蚜虫驱避剂和蚜虫天敌引诱剂。EBF 不仅在蚜虫

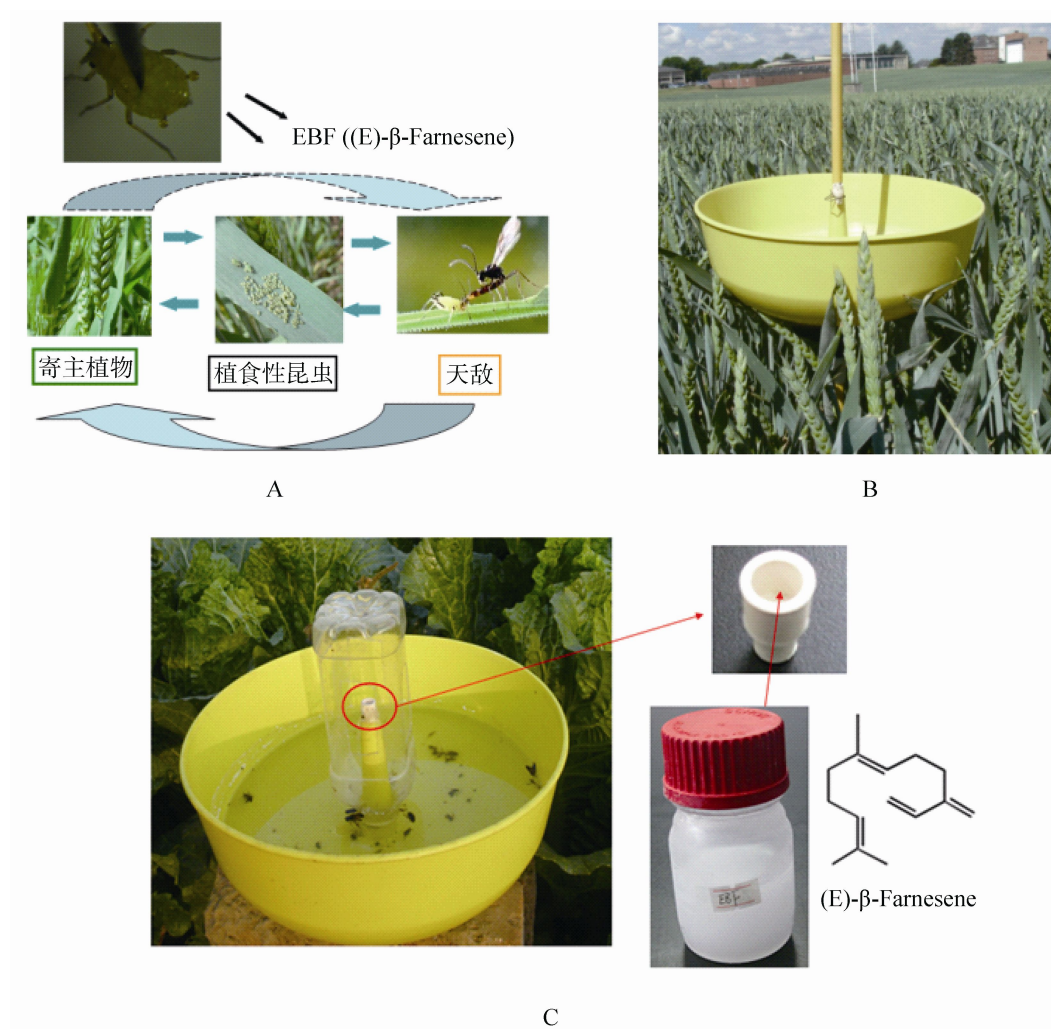


图 1 蚜虫分泌 EBF 及缓释装置示意图

Fig. 1 EBF secretion from aphid cornicle and slow releaser equipment

- A. 蚜虫报警激素 Aphid alarm pheromone; B. 麦田挥发物缓释器 Infochemical slow releaser in wheat field;
C. 菜田挥发物缓释器 Infochemical slow releaser in vegetable field.

挥发物中存在,在许多植物体内或其挥发物中也存在。比利时的 Georges Lognay 团队及英国洛桑 John Pickett 团队率先开展 EBF 防控蚜虫的基础及技术研究。比利时分析化学专家 Georges Lognay 团队从母菊属植物洋甘菊 *Matricaria chamomilla* 中提取 EBF 精油,并利用石蜡油或海藻微珠制作成缓释剂 (Heuskin *et al.*, 2009,

2010, 2012)。目前, John Pickett 团队及夏兰琴研究员团队已研发出转 EBF 合成酶基因的小麦和烟草 (Beale *et al.*, 2006; Yu *et al.*, 2012a, 2012b)。

EBF 缓释技术的研发与应用:为了检测 EBF 缓释器在田间应用效果,将 EBF 缓释装置与黄盆结合起来制成缓释器,如图 1 (B) 所示。将

* 资助项目: 国家国际科技合作专项 (2010DFA32810、2014DFG32270); 比利时政府国际合作项目 (CUD/PICShandong); 国家自然科学基金项目 (31371946); 国家转基因专项 (2014ZX0800201B-003) 与国家小麦产业体系项目 (CARS-3)

**通讯作者, E-mail: jlchen@ippcaas.cn

收稿日期: 2014-10-13, 接受日期: 2014-10-28

黄盆固定在木棒支架上, 放置在距小麦植株表面 10 cm 处, 黄盆 (直径 26 cm, 深 10 cm) 内添加清水, 并加入少量洗洁精。将 100 μ L EBF 缓释剂添加于小塑料钮中, 每隔 7 d 更换 1 次, 小塑料钮固定于黄盆正上方, 上覆透气塑料罩防雨。通过对田间的蚜虫、天敌种群数量及空间分布格局调查与分析, 评价缓释器在小麦及蔬菜田对蚜虫为害的生态调控作用。

在麦田调查发现, EBF 释放对主要蚜虫如麦长管蚜、麦无网长管蚜的有翅蚜具有强的驱避作用, 百株蚜量显著低于对照; 对天敌如草蛉、食蚜蝇、蚜茧蜂均有一定的引诱作用, 对瓢虫的吸引作用不明显。EBF 在麦蚜发生的高峰期驱蚜效果更加明显 (Zhou, 2012)。

在大白菜田为了明确 EBF 缓释器的驱蚜及引诱天敌的有效作用范围, 于大白菜莲座期开始使用 EBF 缓释器 (图 1:C), 分别在距离缓释器 5 m、10 m、15 m 和 20 m 处监测大白菜上菜蚜数量分布动态。结果表明, 距离释放点 5 m 处, 处理区蚜量显著低于对照区, 对蚜虫的最高忌避率达 60% 以上, 距离释放点 10 m、15 m 和 20 m, 处理与对照区蚜量差异不明显 (Cui *et al.*, 2012a)。采用地统计学分析方法研究了 EBF 缓释器应用对菜蚜及其主要天敌瓢虫空间分布格局影响, 结果 (图 2) 表明, EBF 释放对距离释

放点 1~6 m 范围内的菜蚜种群动态具有显著调控作用 (刘英杰等, 2013)。EBF 释放区瓢虫出现频率较高的区域除了表现出对菜蚜种群的追随效应, 还显著地向地块中央 (即 EBF 释放点) 迁移。在 EBF 释放区大白菜上, 瓢虫数量显著高于对照田 (图 3:A) (Cui *et al.*, 2012b); 蚜茧蜂 (即僵蚜) 在 EBF 缓释器黄盆内的数量显著高于在对照缓释器; 瓢虫在不同处理区缓释器黄盆内的数量没有显著差异 (图 3:B) (Cui *et al.*, 2012b)。

在马铃薯田为了检测 EBF 对蚜虫扩散及传毒效率的影响, 使用 EBF 缓释器与带有病毒的植株 (即释放株) 结合起来研究发现, 在距离缓释器 5 m 范围内, EBF 释放区马铃薯植株上的蚜虫数量显著低于对照区 (林芳静, 2014)。EBF 处理后, 驱避率和距 EBF 释放点距离之间的关系拟合为 Quadratic 曲线, 其中, 桃蚜: $Y = 87.870 + 1.316x^3 - 0.162x^2$ ($P=0.003$, $F=18.012$, $R^2=0.857$), 马铃薯长管蚜: $Y = 63.056 + 4.588x - 0.304x^2$ ($P=0.002$, $F=21.180$, $R^2=0.876$)。在距离释放点 10 cm 和 20 cm 处, EBF 处理组桃蚜和马铃薯长管蚜对马铃薯 Y 病毒 (Potato virus Y, PVY) 的传毒效率都显著性提高, 但对马铃薯卷叶病毒 (Potato leaf roll virus Y, PLRV) 的传毒效率无显著影响 (图 4) (林芳静, 2014)。鉴于 EBF

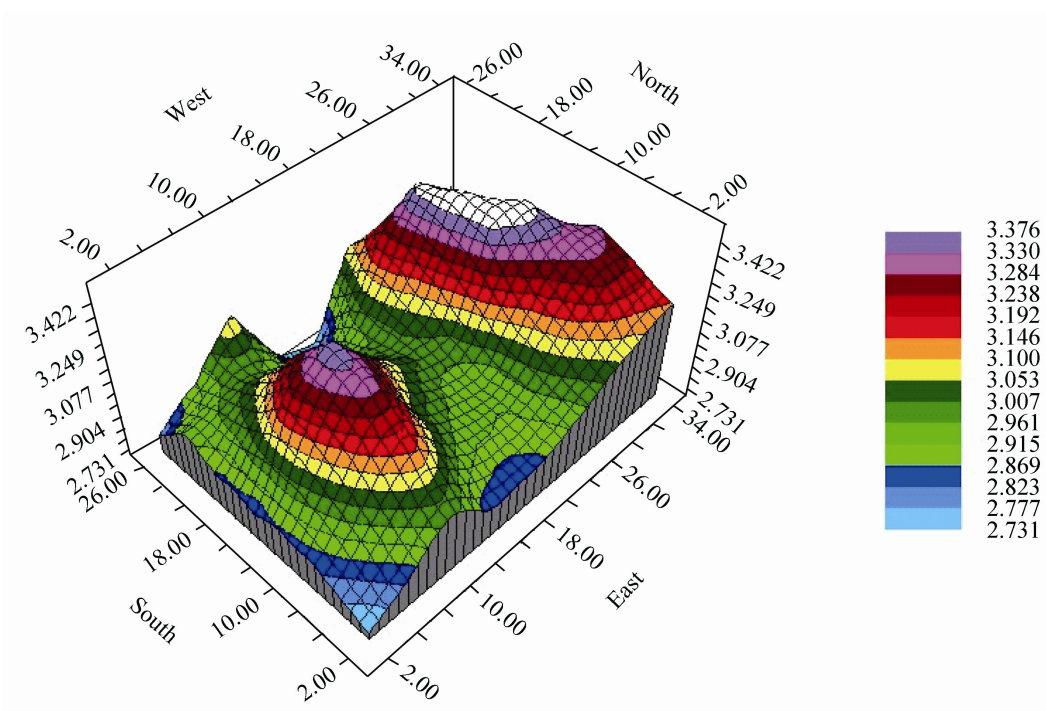


图2 EBF释放田块内菜蚜种群动态的三维空间分布图

Fig. 2 The three-dimensional maps of the aphids population in the EBF released field

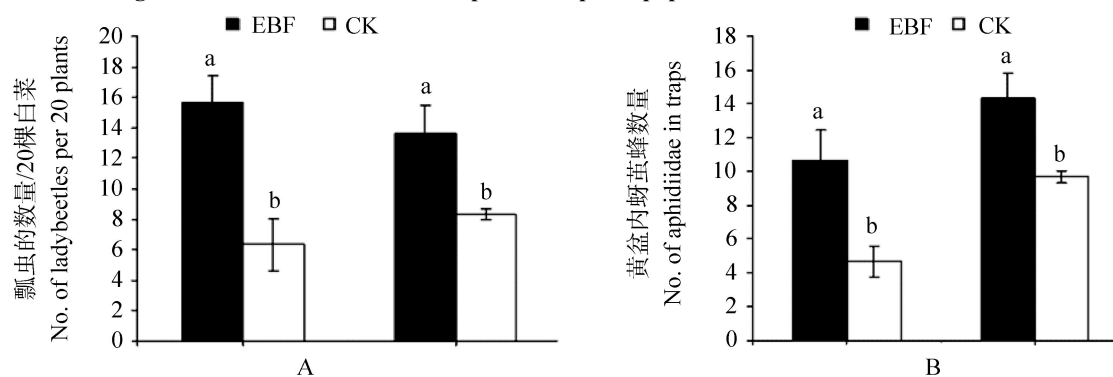


图3 EBF释放对大白菜田间天敌数量的影响

Fig. 3 Effects of EBF on the natural enemies of aphids in the Chinese cabbage fields

A:瓢虫 Ladybeetles; B:蚜茧蜂 Aphidiidae.

柱上标有不同字母表示在 $P < 0.05$ 水平上差异显著。Bars with different letters are significantly difference at 0.05 level.

* 资助项目：国家国际科技合作专项（2010DFA32810、2014DFG32270）；比利时政府国际合作项目（CUD/PICShandong）；国家自然科学基金项目（31371946）；国家转基因专项（2014ZX0800201B-003）与国家小麦产业体系项目（CARS-3）

**通讯作者，E-mail: jlchen@ippcaas.cn

收稿日期：2014-10-13，接受日期：2014-10-28

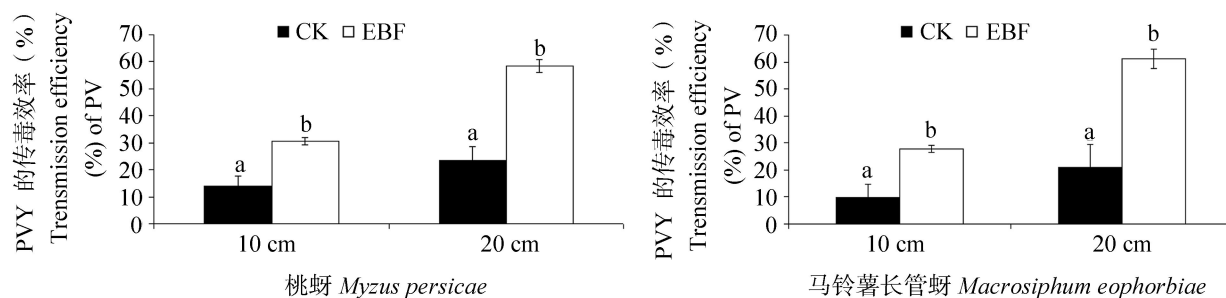


图 4 EBF 对桃蚜和马铃薯长管蚜传播 PVY 传毒效率的影响

Fig. 4 Effects of EBF on PVY transmission efficiency of *Myzus persicae* and *Macrosiphum euphorbiae*

释放会在距释放器一定范围内提高某些蚜传病毒的传播效率, 因此, 在病毒病发生的作物田 EBF 缓释技术需慎用, 并合理选择释放位置和时间。

综上所述, 小麦、大白菜与马铃薯田间应用 EBF 缓释器对蚜虫及其天敌有一定的调控作用。EBF 对蚜虫特别是有翅蚜表现出驱避作用; 对于草蛉、瓢虫、食蚜蝇与蚜茧蜂表现出吸引作用, 明显提高了天敌的种群密度。以地质统计学的方法构建了 EBF 释放田块以及对照田块内的菜蚜及瓢虫类天敌昆虫的三维空间分布图, 能够直观地模拟并反映昆虫种群在田间的发生动态及空间格局分布情况。这为制定更合理的田间取样方法, 研究田间释放昆虫信息素 EBF 的虫害控制效果, 以及提高其生态效益提供更进一步的理论依据与技术支持。

通过合作引进比利时的 EBF 缓释器及制作技术, 进行 EBF 缓释器——粘蚜黄板相结合的创新改造 (图 5), 优化缓释器在小麦及蔬菜田间放置高度 (距植株表面 10 cm) 及密度 (间隔 5 m), 使 EBF 持效期由 7 d 延长至 14 d。为蚜虫报警激素、性外激素及植物次生化合物多组分缓释器制作、特效驱避剂缓释器应用技术的研发以及更好利用“推-拉”策略对小麦、蔬菜蚜虫进行无公害防治提供了技术基础。

1.1.2 转 EBF 合成酶基因小麦对麦长管蚜的驱避作用评价方法建立 对于利用 EBF 驱避蚜虫的策略, 除了采用 EBF 精油的缓释技术以外, 国内外已开展转 EBF 合成酶基因植物的研究, 通过让植物表达并释放 EBF 来实现驱避蚜虫的目

的。为了应对转基因驱蚜小麦产业化需求, 尽快



图 5 基于“推-拉”策略挥发物缓释器在麦田示范应用

Fig. 5 Demonstration application of infochemical releaser based on the “push-pull” strategy in wheat field

建立转基因小麦抗蚜评价技术规范迫在眉睫。通过建立麦蚜种群生命表、寄主选择行为实验、嗅觉行为测定以及抗蚜性多目标综合判别法, 评价了转 EBF 合成酶基因小麦 17 个株系对麦长管蚜及 12 个株系对禾谷缢管蚜驱避作用特性。结果表明, 转 EBF 合成酶基因小麦对蚜虫具有一定的驱避作用, 使蚜虫种群净生殖率和周限增长率减小、种群加倍时间延长; 不同株系驱避特性存在差异, 可能与植株 EBF 释放量有关 (邓青, 2012)。为了验证此假设, 采用非转基因亲本小麦苗暴露于不同浓度的 EBF 标样中发现, EBF 浓度 400 ng/μL 以上极显著抑制麦长管蚜种群数量, 600 ng/μL 以上对蚜虫有明显的排斥作用, 且显著诱导了有翅蚜的产生, 可以推断 EBF 600 ng/μL 为驱避麦长管蚜的阈值浓度 (结果另文发表)。转 EBF 合成酶基因小麦对蚜虫驱避作用

实验过程涉及的检测手段,为转基因小麦的推广应用提供必要的技术储备。

1.1.3 EBF 在蚜虫“推-拉”策略中作用的分子机理 为了解析蚜虫及其天敌对特效挥发物 EBF 感受的分子生态机制,在对昆虫气味结合蛋白全面综述的基础上 (Fan *et al.*, 2011), 利用基因同源克隆及蛋白结合反应、昆虫触角蛋白 2D 电泳等技术,对 3 种麦蚜(麦长管蚜、禾谷缢管蚜及麦二叉蚜)、萝卜蚜及其主要天敌(异色瓢虫 *Leis axyridis* Pallas、七星瓢虫 *Coccinella septempunctata* Linnaeus、黑带食蚜蝇 *Epistrophe baloteara* De Geer、烟蚜茧蜂 *Aphidius gifuensis* Ashmead) 的 2 种感受 EBF 气味结合蛋白 OBP3、OBP7 的基因克隆及功能验证,发现麦蚜及蚜虫专性寄生天敌烟蚜茧蜂存在上述 2 种 OBPs 基因(范佳, 2011)。经蛋白结合反应试验发现,禾谷缢管蚜及烟蚜茧蜂的重组蛋白 OBP7 具有强烈结合 EBF 的能力,而重组蛋白 OBP3 则未与 EBF 特异结合,表明 OBP7 在蚜虫及专性寄生天敌烟蚜茧蜂对 EBF 的识别过程中起重要作用。此项研究结果初步揭示了报警信息素 EBF 驱避蚜虫和吸引天敌的分子生态机制(结果另文发表)。

1.2 麦田生物多样性布局对麦蚜的生态调控技术及机理

在农田生态系统中,利用增加物种多样性来控制作物害虫、保护天敌的实例很多。在小麦蚜虫的生态调控技术研发中,已有利用小麦品种多样性、小麦与不同作物如大蒜及油菜间作、邻作的研究报告(王万磊等, 2008; 周海波等, 2009a; Wang *et al.*, 2009; Zhou *et al.*, 2011)。如何通过麦蚜、天敌、小麦产量等多因素系统调查评估作物多样性最佳布局,开发适宜生产应用的生态调控技术,并了解其控害机理成为植保领域的热点。以小麦与豆科作物(豌豆、绿豆)设置不同行比的模式间作或混作,研究①对麦蚜及其主要天敌影响,比较其生态调控、生物防治效果;②

对农田小气候的影响;③结合室内嗅觉反应生测实验,测定非寄主气味在麦蚜对寄主搜寻定位过程中的干扰作用。

1.2.1 小麦与豌豆间作/混作 菜用豌豆 *Pisum sativum* 作为一种新兴特种蔬菜在我国各地发展迅速,栽培面积逐年扩大,小麦与豌豆进行间作已经作为一种种植模式被提出,在生产中利用小麦与豌豆间作的可操作性和合理配置等还未见报道。为此分别设置小麦与豌豆以 2:2、4:2、6:2、8:2 行比间作(分别记作 2-2 间作、4-2 间作、6-2 间作与 8-2 间作),以及小麦与豌豆混作等 5 种模式,通过系统监测蚜虫与天敌种群数量及分布格局、作物产量以及对蚜虫及天敌选择、嗅觉行为的影响,明确不同模式下控蚜效果及最佳模式(Zhou *et al.*, 2013b)。

1.2.1.1 小麦与豌豆不同行比间作田间调查 连续两年设计小麦与豌豆 2-2、4-2、6-2、8-2 间作,调查结果显示,与小麦单作田相比,小麦与豌豆间作可以显著地降低田间麦长管蚜有翅蚜和无翅蚜的种群数量,以 2-2、8-2 间作的蚜虫密度最低(图 6)(周海波等, 2009b)。间作显著增加天敌昆虫种群丰富度,2-2、4-2、6-2、8-2 间作与单作的天敌多样性指数分别为 3.0、2.9、3.0、3.4 与 2.9,其中 8-2 间作显著高于小麦单作($P<0.05$),其他各间作处理间无显著差异。间作能提高作物产量(表 1),从小麦单位面积产量来看,所有间作处理均极显著高于小麦单作处理($P<0.01$);2-2 间作与 8-2 间作显著高于 4-2 间作与 6-2 间作($P<0.05$)。间作处理中,豌豆单位面积的产量也极显著高于豌豆单作($P<0.01$)。2-2、4-2、6-2、8-2 间作的土地当量比(Land equivalent ratio, LER, 单作为 1)分别为:1.21、1.15、1.11、1.18,说明小麦和豌豆间作能明显提高土地利用率,提高幅度 11%~21%。因此,初步提出了小麦与豌豆以 8-2 间作为最佳模式(周海波等, 2009c; Zhou *et al.*, 2013b)。

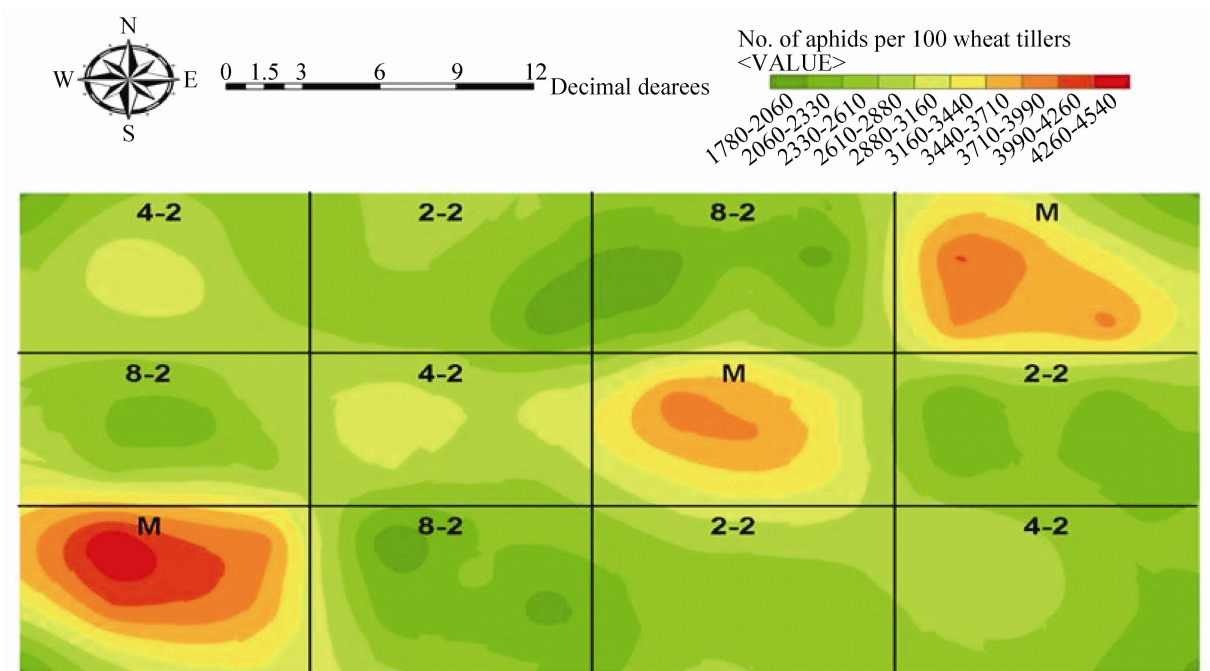


图 6 麦长管蚜发生高峰期的种群田间分布 GIS 图像
Fig. 6 GIS image of *Sitobion avenae* densities estimate during peak period

4-2:4-2 间作 4-2 intercropping; 2-2:2-2 间作 2-2 intercropping; 8-2: 8-2 间作 8-2 intercropping; M:单作 Monoculture.

表 1 小麦和豌豆间作对小麦及豌豆产量及土地利用量的影响
Table 1 Crop yields (mean ±SE) and land equivalent ratio in different wheat-pea intercropping patterns

间作模式 Intercropping pattern	小麦产量 Wheat yield (kg/hm ²)	豌豆产量 Pea yield (kg/hm ²)	LER*
2-2 间作 2-2 intercropping	6 940± 213(3 239)aA	1 770± 171(944)abA	1.187
4-2 间作 4-2 intercropping	6 032± 190 (3 734) bB	1 822± 86(694)abA	1.121
8-2 间作 8-2 intercropping	6 197± 31(4 695)bB	1 881± 87(456)aA	1.148
单作 Monoculture	5 448± 100cC	1 593± 136bA	

*LER 土地当量比 (Land equivalent ratio) ；小写与大写字母分别表示在 $P<0.05$, $P<0.01$ 水平上差异显著; 圆括号的值为每公顷实际产量。

Data with small and capitation letters indicate significant different at $P<0.05$, $P<0.01$ level, respectively; The values in parentheses mean actual yields of crops per hectare.

LER 是指多作群体资源利用效率。以 Willey (1979) 提出的土地当量比 (Land equivalent ratio, LER) 最为常用, 其公式为 $LER = \sum_{i=1}^n (Y_i / Y_i')$, Y_i 为多作物群体第 i 个作物单产; Y_i' 为第 i 个作物单作群体单产; i 为多作群体中的各个作物; n 为

多作群体中作物的个数。当 $LER=1$ 时表明多作群体与相应单作群体具有相同的资源利用效率; 当 $LER>1$ 时表明比相应的单作群体高; 反之亦反。
1.2.1.2 小麦与豌豆混作田间调查 在生产中小麦与豌豆混作, 收获后小麦与豌豆籽粒混和作为饲料。为了探讨小麦与豌豆混作优势, 设计了小

* 资助项目：国家国际科技合作专项 (2010DFA32810、2014DFG32270)；比利时政府国际合作项目 (CUD/PICShandong)；国家自然科学基金项目 (31371946)；国家转基因专项 (2014ZX0800201B-003) 与国家小麦产业体系项目 (CARS-3)

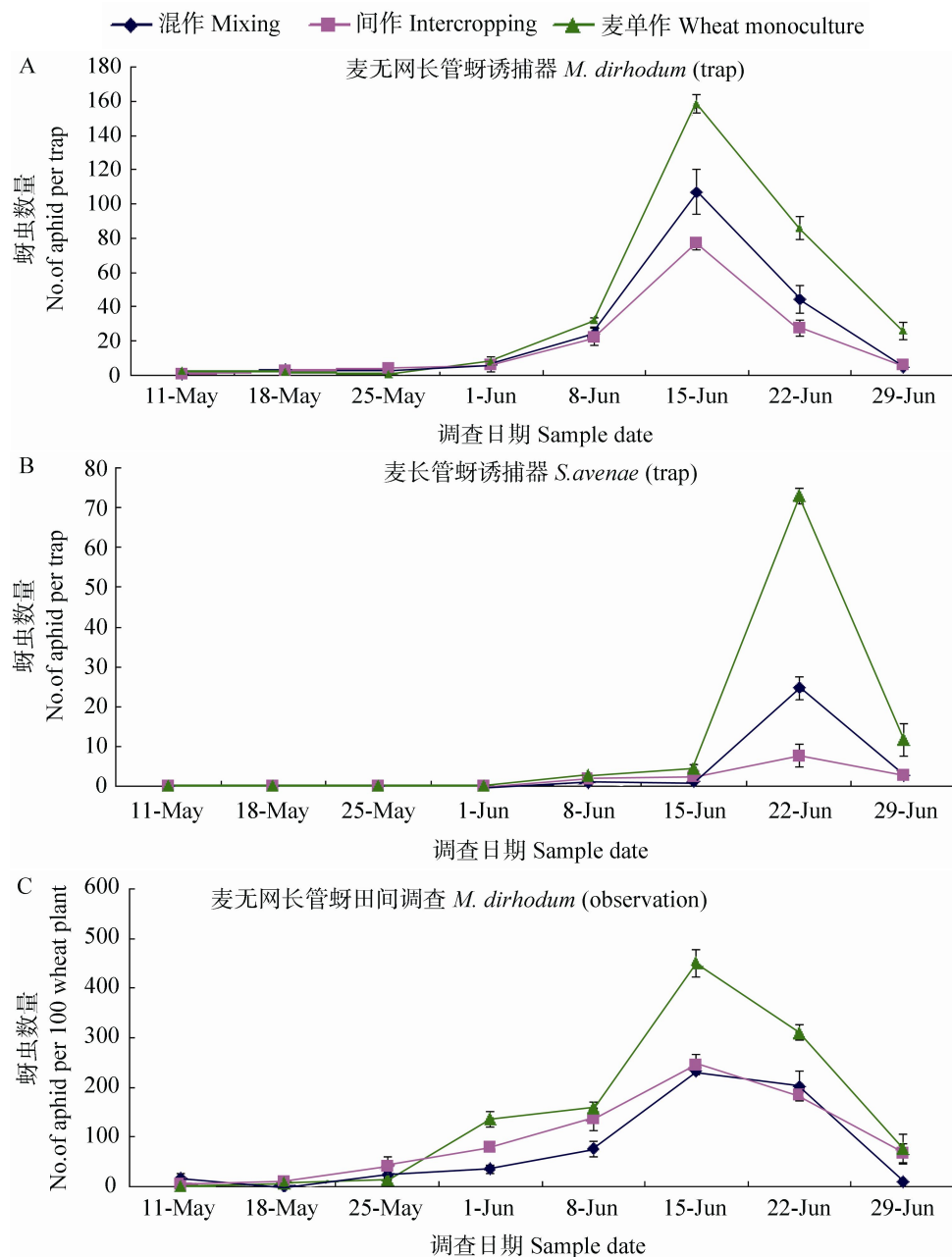
**通讯作者, E-mail: jlchen@ippcaas.cn

收稿日期：2014-10-13, 接受日期：2014-10-28

麦与豌豆混种模式,并以 8:2 间作、小麦、豌豆单作作为对照,采用诱捕器及田间调查相结合,调查小麦蚜虫(麦长管蚜、麦无网长管蚜)、豌豆蚜及主要天敌昆虫(如瓢虫、食蚜蝇、草蛉)

的种类和数量的影响(Zhou *et al.*, 2012)。

对蚜虫:对麦蚜而言,田间调查结果(图 7)显示,小麦单作田内麦无网长管蚜、麦长管蚜的种群数量明显高于小麦与豌豆混/间作



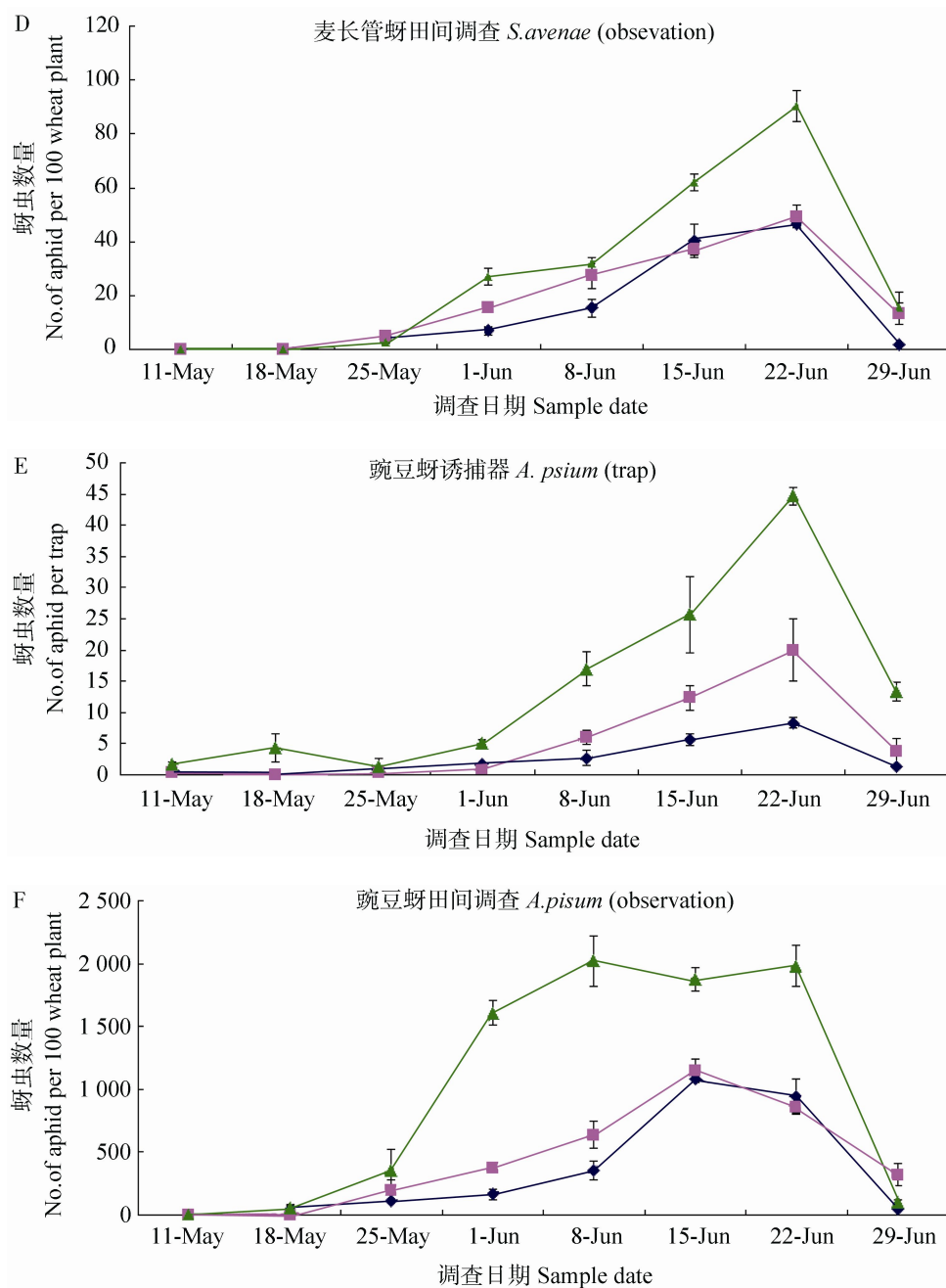


图 7 不同处理对蚜虫种群动态变化的影响 (田间调查, 诱捕器诱捕)

Fig. 7 Seasonal occurrence and abundance (mean±SE) of aphids recorded according to kinds of wheat-pea association (field observation, trap)

田, 与诱捕器调查结果一致。间作对麦蚜控制作用略优于混作。对豌豆蚜而言, 间作和混作均具较好的控制作用, 而混作的控制作用略优于间作。

对天敌: 草蛉高峰前期及高峰期的种群数量 (图 8: A), 在小麦与豌豆间作田显著高于其他

处理田块, 其总量在小麦与豌豆间/混作田显著高于单作田。食蚜蝇高峰期及之后的种群数量 (图 8: B) 在小麦与豌豆间/混作田均高于单作田, 但高峰前差异不显著; 其总量间作田明显高于其他田块。瓢虫总量 (图 8: C) 在小麦与豌豆间/混作田显著高于单作田。

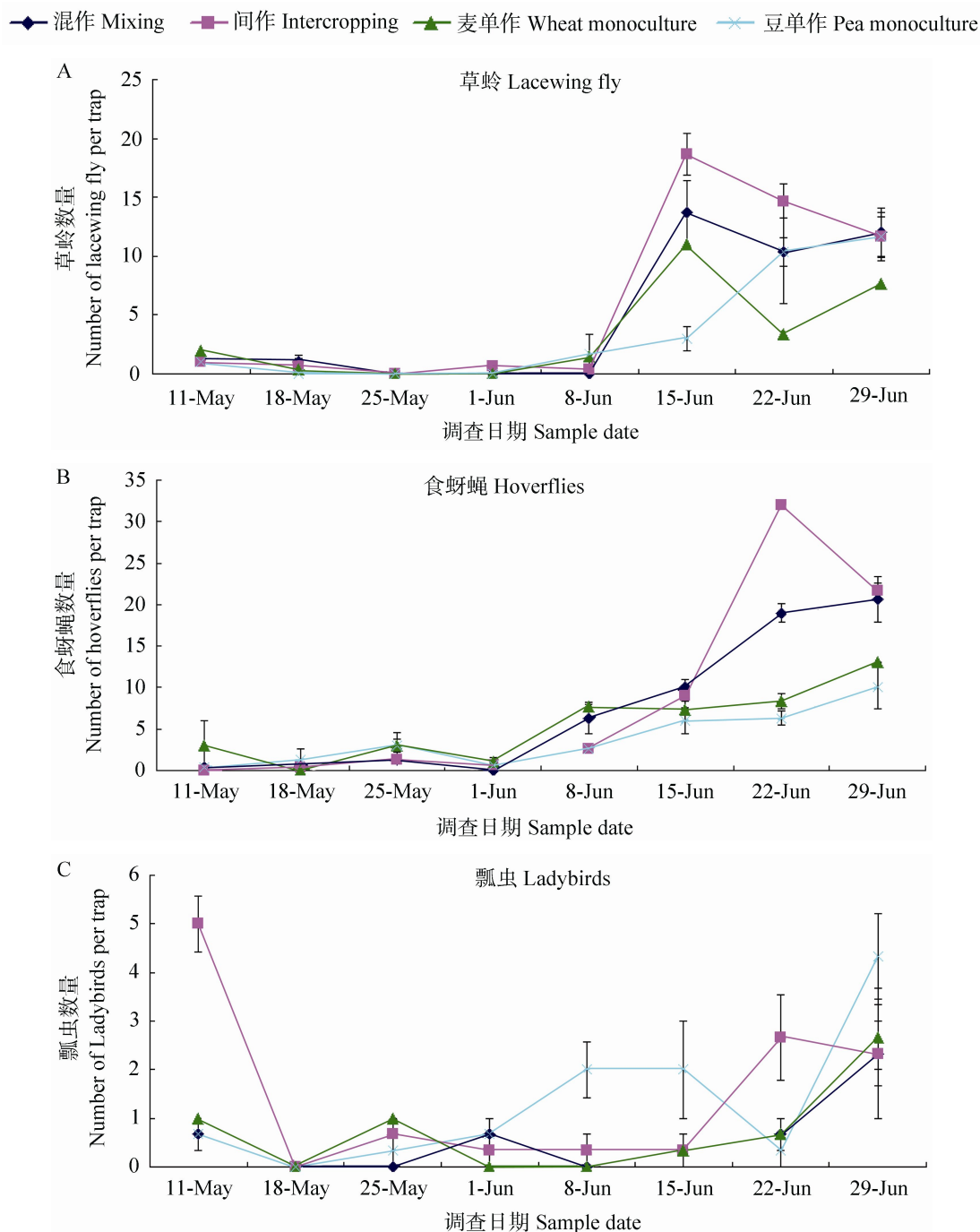


图 8 不同处理对天敌昆虫种群动态变化的影响

Fig. 8 Seasonal occurrence and abundance (mean±SE) of natural enemies recorded according to kinds of wheat-pea association

1.2.1.3 小麦与豌豆间/混作对蚜虫调控的化学生态学机制 采用 Y 型管、四臂嗅觉仪开展行为观测实验,检测小麦、豌豆及其二者混合气味等对有翅和无翅麦长管蚜,以及两种捕食性天敌瓢虫、食蚜蝇嗅觉选择行为的影响。结果(图 9)

表明,麦长管蚜(有翅和无翅蚜)对健康的小麦或豌豆单独气味有强的选择趋性。但麦长管蚜有翅蚜对小麦与豌豆的混合气味、小麦与受蚜害豌豆的混合气味、受蚜害小麦与豌豆的混合气味、受蚜害豌豆的气味都有明显的驱避反应。

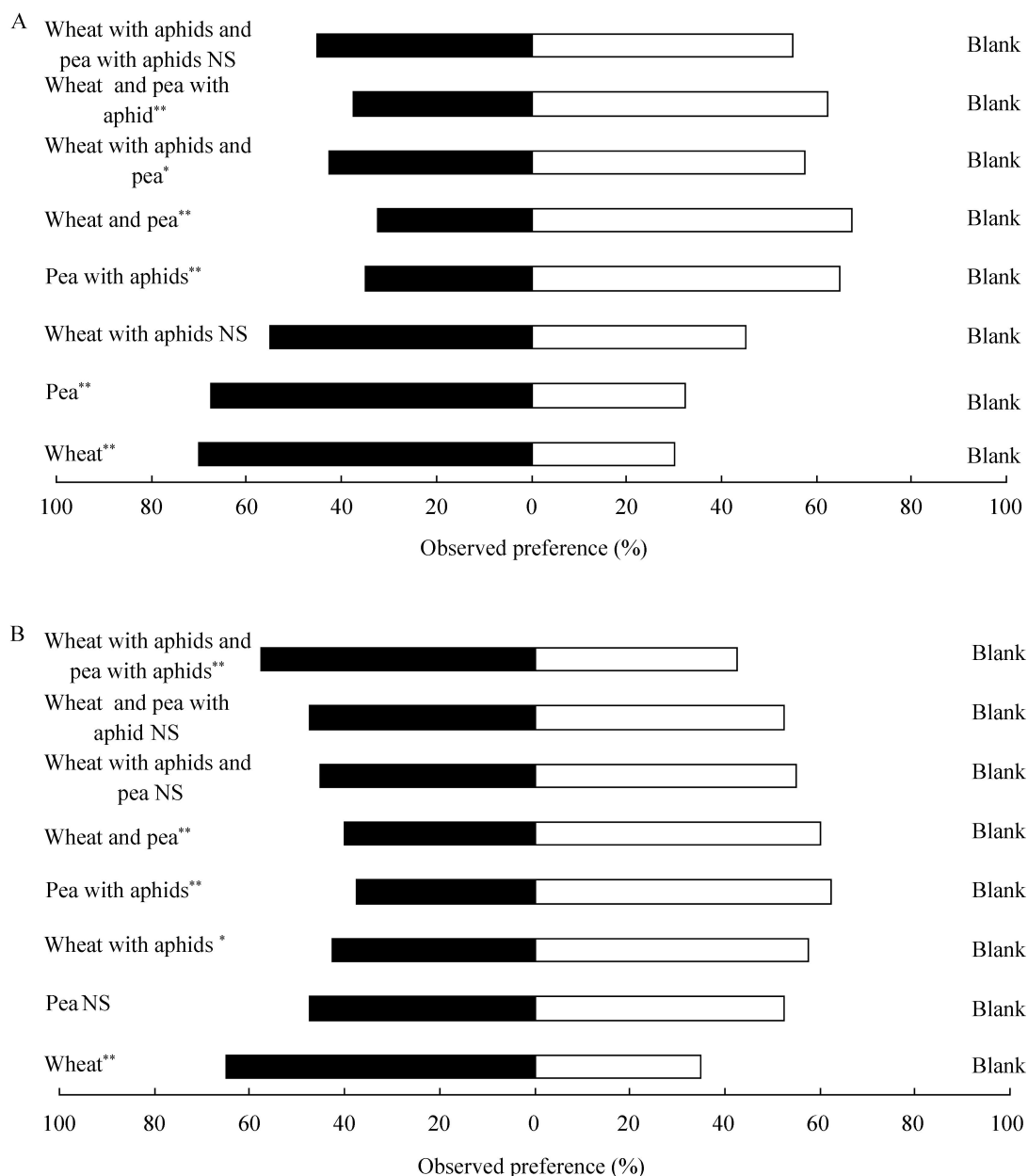


图 9 小麦和豌豆气味对麦长管蚜的行为选择影响

Fig. 9 Behavioural responses of the grain aphid, *Sitobion avenae*, to wheat and pea

A. 有翅蚜 Alatae; B. 无翅蚜 Apterae; 显著性分析采用卡方检验, ** $P < 0.01$, * $P < 0.05$, NS: 没有差异。

Chi-square analysis, ** $P < 0.01$, * $P < 0.05$, NS: Not significant.

检测小麦与豌豆对异色瓢虫雌虫和雄虫选择行为的影响。结果显示, 与对照相比雌虫在受

蚜害豌豆上停留时间最长, 而雄虫在健康小麦植株上停留时间最短。

* 资助项目: 国家国际科技合作专项 (2010DFA32810、2014DFG32270); 比利时政府国际合作项目 (CUD/PICShandong); 国家自然科学基金项目 (31371946); 国家转基因专项 (2014ZX0800201B-003) 与国家小麦产业体系项目 (CARS-3)

**通讯作者, E-mail: jlchen@ippcaas.cn

收稿日期: 2014-10-13, 接受日期: 2014-10-28

与小麦和豌豆的单作相比,小麦和豌豆的间作和混作可以显著诱导黑带食蚜蝇雌虫的搜寻行为。此外,受豌豆蚜为害的豌豆植株对食蚜蝇雌虫的产卵行为有显著诱导作用。

1.2.2 小麦与绿豆间作 小麦与绿豆 (*Vigna radiata*) 间作是生产上另一种复种方式。为探索小麦和绿豆间作对麦长管蚜及其主要天敌种群,以及农田小气候的影响,解析控害保益的机理;同时考虑到机械化生产需要,设计不同间作行比,经过田间系统调查与室内蚜虫及其天敌嗅觉行为反应测定相结合,综合评价了小麦与绿豆间作对麦长管蚜生态调控作用(解海翠, 2011)。

1.2.2.1 小麦间作绿豆对麦长管蚜、天敌种群及小气候的影响 田间设计小麦(W)与绿豆(MB)不同行比间作:10:10、12:6、12:4、16:4,以小麦单作为对照。除了系统调查了麦长管蚜及其天敌的种群数量外,还利用小气候观测仪器对田中温度、湿度和风速进行监测。结果(图10)

显示,小麦与绿豆不同行比间作对麦长管蚜种群数量动态变化影响很大。从整个调查期的总蚜量和高峰值蚜量来看,与对照相比,行比12:4和16:4处理田块显著降低了无翅蚜量;行比12:6和12:4处理田块显著降低了有翅蚜量。蚜虫的群丛指数和Cassie指标都表明间作田麦蚜种群的聚集程度降低。间作田中天敌数量及种类也有所提高。间作还在一定程度提高了麦田的风速和温度,降低了相对湿度。行比16:4处理田块小气候要素变化比其他处理大。调查期间麦田平均温度和最高温度均与相对湿度呈显著负相关。田间从麦蚜开始发生至高峰期,温度与蚜量呈负相关。由此看出小麦与绿豆间作相比以行比16:4配置比较适宜(Xie et al., 2012)。

在麦蚜发生高峰期前,百株蚜量与气象要素相关关系分析结果(表3)表明,平均温度受最高温度的影响更明显,其关系为极显著正相关;

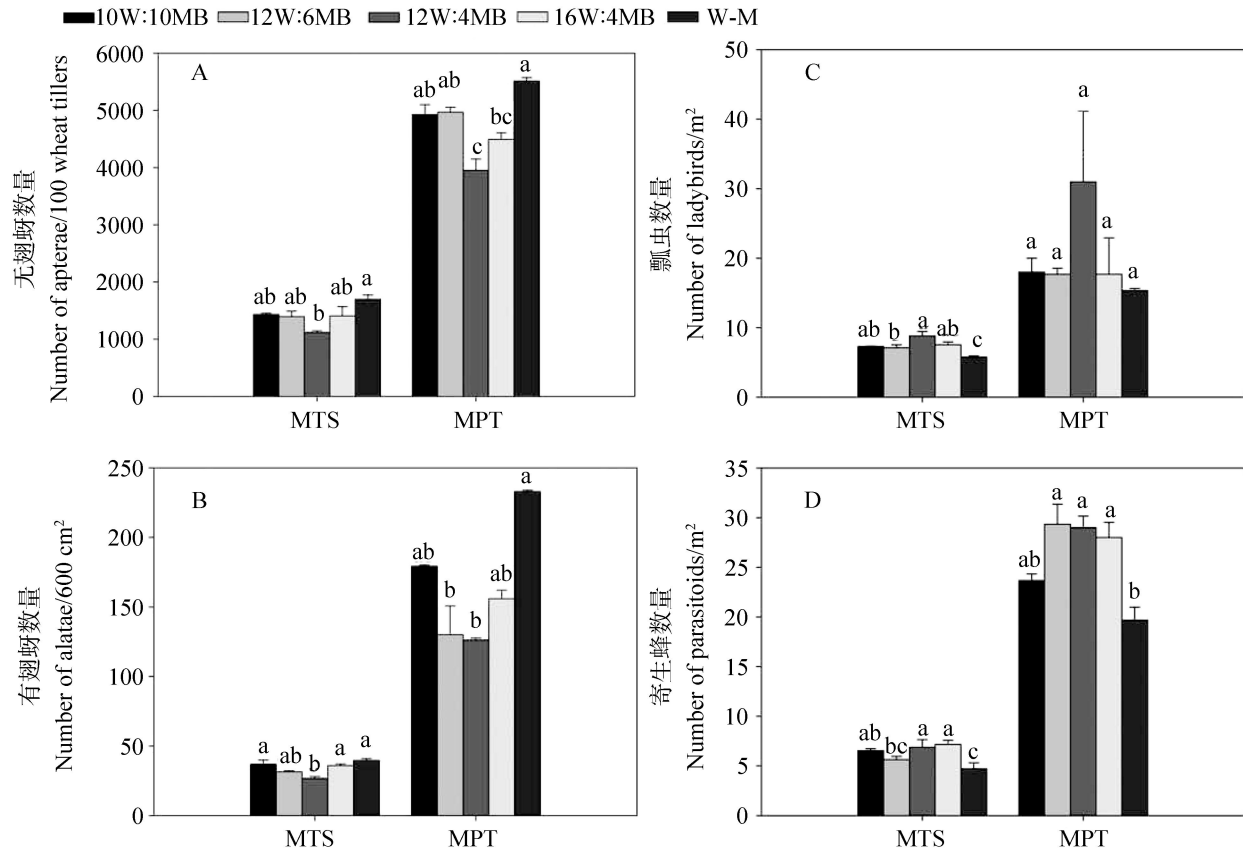


图 10 调查期间麦长管蚜总量及高峰期蚜虫及天敌数量
Fig. 10 Numbers (mean±SE) of *Sitobion avenae* and its natural enemies

A. 无翅蚜 Apterous aphids; B. 有翅蚜 Alate aphids; C. 瓢虫 Ladybirds; D. 寄生蜂 Parasitoids; MTS: 整个调查期间 Mean of 10 samples from 6 May to 11 June 2010; MPT: 蚜虫高峰期 Mean of aphid at peak time; W. 小麦 Wheat; MB. 绿豆 Mung bean.

同时百株蚜量也与平均温度呈显著负相关。说明高温不利于蚜虫的生长。最高温度与百株蚜量也存在一定的负相关, 相关系数为 - 0.875。高峰期后百株蚜量与气象要素相关关系分析表明, 最高温度与平均温度仍然呈极显著的正相关; 而风速与最高温度有一定的负相关性, 相关系数为 - 0.724, 表明风速增加能够适当降低田间温度。同时湿度和最低温度的相关系数也较高为 - 0.874。由此可见, 在考虑小气候要素的作用时, 不是某一要素孤立存在而单独起作用, 而是各要素之间相互联系、相互影响, 并与蚜量有一定的关系(解海翠, 2011)。

1.2.2.2 小麦间作绿豆对麦长管蚜调控化学生态学机制 为探讨麦田小麦与豆科作物间作降低麦长管蚜种群数量的作用机理, 田间设计小麦与绿豆间作(行比 16: 4), 以小麦单作、小麦与豌豆间作(行比 16: 4)为对照, 调查麦长管蚜种群数量及其时间动态变化; 室内利用“Y”型嗅觉仪测定麦长管蚜对小麦、绿豆、豌豆以及上述不同组合气味的选择性。结果表明: 与单作相比, 麦田间作显著降低麦长管蚜无翅蚜和有翅蚜的种群数量。嗅觉行为测定发现, 麦长管蚜显著选择单一寄主植物——小麦的气味; 当小麦与绿豆或小麦与豌豆组合时, 对麦长管蚜没有吸引作用。同时小麦与绿豆或小麦与豌豆组合对天敌具有显著引诱作用。此实验验证了间作控害的两个假说, 即非寄主植物的气味对寄主植物气味起掩盖作用, 干扰蚜虫的寄主定位; 以及引诱天敌, 增强了生物防治作用(解海翠等, 2012; Xie *et al.*, 2012)。

表 2 调查期间百株蚜量与气象要素相关关系
Table 2 The correlativity between aphid population of per 100 wheat tillers and meteorological elements

因子之间的相关系数矩阵 Correlation coefficient matrix between each pair of factors						
	平均温度 (℃) Average temperature	最低温度 (℃) Minimum temperature	最高温度 (℃) Maximum temperature	风速 (m/s) Wind speed (m/s)	相对湿度 (%) Relative humidity	百株蚜量 (头) Aphid population of per 100 wheat tillers
平均温度 (℃) Average temperature	1.000	0.464	0.951*	0.018	- 0.932*	- 0.230
最低温度 (℃) Minimum temperature		1.000	0.488	- 0.578	- 0.286	- 0.334
最高温度 (℃) Maximum temperature			1.000	0.197	- 0.876	- 0.499
风速 (m/s) Wind speed (m/s)				1.000	- 0.040	- 0.359
相对湿度 (%) Relative humidity					1.000	0.281

百株蚜量 (头) Aphid population of per 100 wheat tillers	1.000
--	-------

*表示在 0.05 水平上差异显著, **表示在 0.01 水平上显著差异, 下表同。
* means significantly different at 0.05 level, ** means significantly different at 0.01 level, the same below.

表 3 高峰期前百株蚜量与气象要素相关关系
Table 3 The correlativity between aphid population of per 100 wheat plants and meteorological elements before the peak time

因子之间的相关系数矩阵 Correlation coefficient matrix between each pair of factors						
	平均温度 (°C) Average temperature	最低温度 (°C) Minimum temperature	最高温度 (°C) Maximum temperature	风速 (m/s) Wind speed (m/s)	相对湿度 (%) Relative humidity	百株蚜量 (头) Aphid population of per 100 wheat tillers
平均温度 (°C) Average temperature	1.000	0.033	0.961**	0.253	- 0.620	- 0.907*
最低温度 (°C) Minimum temperature		1.000	- 0.16	- 0.209	- 0.170	- 0.273
最高温度 (°C) Maximum temperature			1.000	0.454	- 0.426	- 0.875
风速 (m/s) Wind speed (m/s)				1.000	0.358	- 0.298
相对湿度 (%) Relative humidity					1.000	0.349
百株蚜量 (头) Aphid population of per 100 wheat tillers						1.000

1.3 植物源农药生物测定和田间应用效果研究

1.3.1 植物凝集素对小麦蚜虫及其传毒效率的影响 植物凝集素是在植物界广泛分布的、能与糖类专一结合的简单蛋白质, 是植物防御系统的重要组成部分。在植物生长发育阶段, 以不同的方式保护着植物免受病虫害的侵害。目前, 对刺吸式害虫有很好的控制作用的几种凝集素分别为雪花莲凝集素 (GNA)、大蒜凝集素 (ASL)、伴刀豆凝集素 (ConA)、红肾豆凝集素 (PHA)、豌豆凝集素 (PSA)、麦胚乳凝集素 (WGA)、半夏凝集素 (PTA) 等 (邓青等, 2013)。采用室内毒力测定、生命表及蚜虫刺吸取食电位技术

(Electrical penetration graph, EPG) 相结合, 测定 2 种凝集素伴刀豆凝集素和红肾豆凝集素对麦长管蚜的毒杀及取食抑制作用; 利用 PCR 及 ELISA 分子检测技术, 检测了雪花莲凝集素、豌豆凝集素对麦蚜传播大麦黄矮病毒 (Barley yellow dwarf virus, BYDV) 抑制作用。结果 (图 11) 表明, 伴刀豆凝集素和红肾豆凝集素对蚜虫 48 h 半致死浓度分别为 1.45 mg/mL 和 1.88 mg/mL。以 2 种凝集素对蚜虫致死浓度 2 mg/mL, 饲喂 5~6 d, 蚜虫全部死亡; 对蚜虫的发育、蜕皮、产仔均有抑制作用。EPG 监测 ConA 对蚜虫取食行为结果表明, ConA 处理使韧皮部取食持续时

间缩短, 即 ConA 各浓度下蚜虫跟随 E1 波的 E2 波持续时间显著缩短, ConA 浓度 0.5 mg/mL 以上跟随 E1 波的 E2 波出现次数显著减少, 1 mg/mL 以上 E1/E2 历期比显著高于对照(邓青, 2012)。

1.3.2 博落回提取物对麦蚜抑制作用 博落回

(*Macleaya cordata* (willdl.) R.Br.) 为多年生亚灌木状草本药用植物, 属罂粟科, 在我国长江以南、南岭以北等多个地区广泛分布, 并可人工种植。博落回提取物 (*M. cordata* extract, 简称 MCE) 富含生物碱产品, 其中主要生物碱为苯

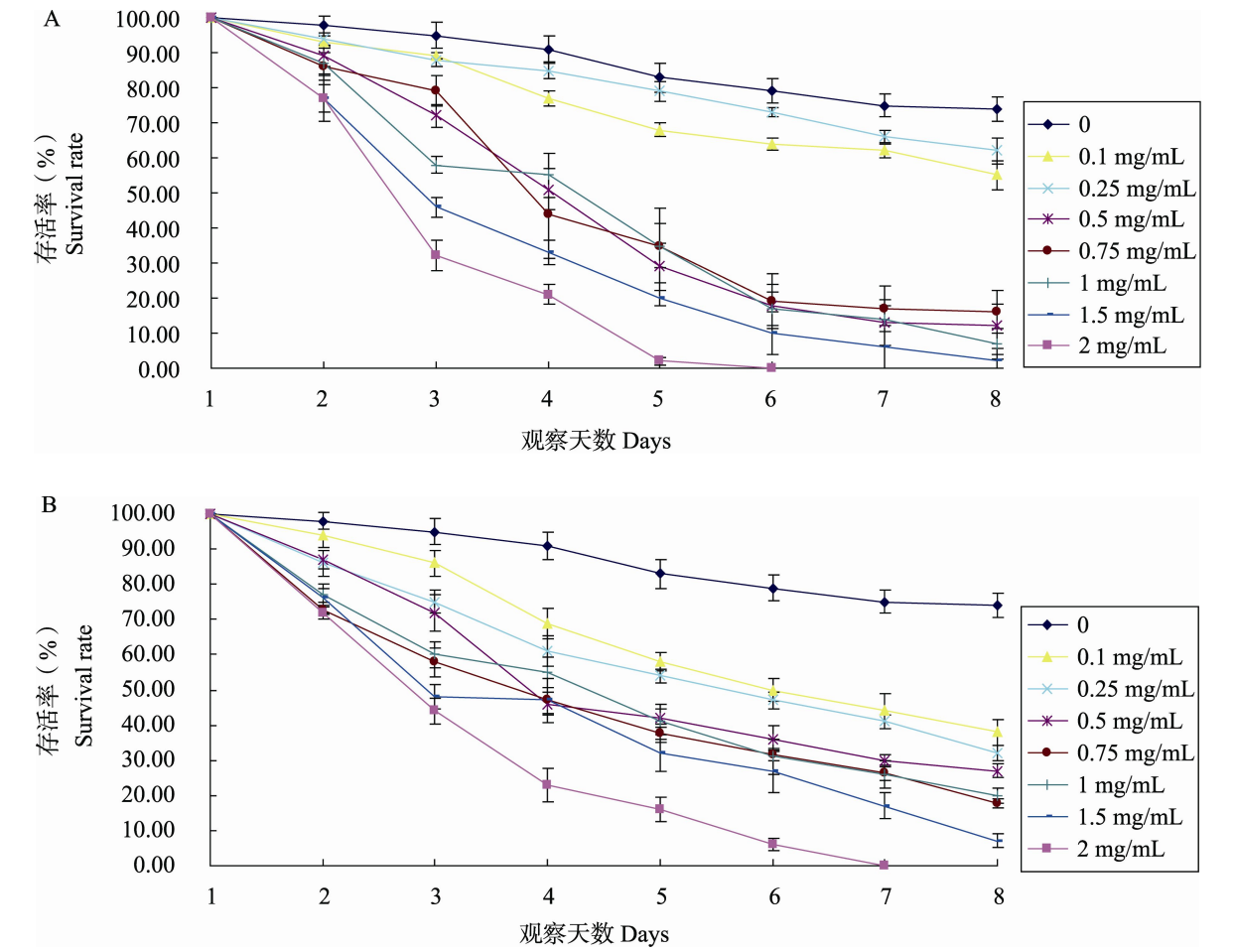


图 11 两种植物凝集素对麦长管蚜存活率的影响
Fig. 11 The effects of two lectins on the survival rate of *Sitobion avenae*

并非啉类, 如血根碱 (Sanguinarine)、白屈菜红碱 (Chelerythrine) 和别隐品碱 (Allocryptopine) 等, 在医药和兽药上有广泛地研究和应用 (Cheng and Zeng, 2012)。目前在作为植物源农药研发上成为研究热点, 在小麦及蔬菜病虫害防治上研究尚少。采用室内植物叶片浸渍法, 测定 11 种 MCE 对小麦及蔬菜病虫害等的抑制活性及防治效果; 完成了博落回 3 种生物碱—博落回总生物碱、血根碱盐酸盐和白屈菜红碱对 3 种麦蚜的毒杀与

拒食活性测定。10%血根碱可湿性粉剂不同浓度对麦蚜毒杀及拒食活性测定 (表 4) 结果显示: 4 g·L⁻¹ 10%血根碱有良好的杀蚜活性, 具有开发为植物源杀虫剂的潜力 (张晓宁, 2014)。湖南农业大学曾建国团队 (2010, 未发布数据) 将博落回提取物 MCE 与烟碱复配配方, 研制获得一个高效杀蚜虫配方。当该配方的稀释溶液中烟碱浓度为 80 ppm 时, 蚜虫防治效果在 98.9% 以上。

1.4 蚜虫唾液及共生菌在蚜虫与寄主植物互作

中作用的基础研究

利用 PCR 及 ELISA、蛋白组 2D 电泳技术等,开展了蚜虫及病毒防控新技术基础研究。

1.4.1 麦长管蚜不同地理种群的病毒传播效率及共生菌功能研究

收集中国及比利时 20 余个麦长管蚜地理种群,利用 PCR 等分子生物学方法

检测肠道共生菌种类,明确主要与次要共生菌的多样性。调查了麦长管蚜不同地理种群的主次要共生菌多样性对蚜虫传毒效率的影响;通过蛋白质学分析发现,一些共生菌对蚜虫报警外激素生物合成、麦蚜 BYDV 传毒效率及传毒特异性具

表 4 10%血根碱可溶性粉剂对 3 种麦蚜有翅成蚜的毒杀效果 (48 h)

Table 4 Insecticidal activity of 10% sanguinarine WP against alate adults of wheat aphids

浓度 Concentration (g·L ⁻¹)	麦长管蚜 <i>S.avenae</i>		禾谷缢管蚜 <i>R.padi</i>		麦二叉蚜 <i>S.graminum</i>	
	死亡率 (%) Mortality rate	校正死亡率 (%) Modified mortality rate	死亡率 (%) Mortality rate	校正死亡率 (%) Modified mortality rate	死亡率 (%) Mortality rate	校正死亡率 (%) Modified mortality rate
4	76.67a	75.29a	94.44a	93.59a	95.56a	94.81a
2	73.33b	71.76b	87.78a	85.90a	93.33a	92.21a
1	67.78c	65.88c	78.89b	75.64b	81.11a	77.92a
0.5	62.22d	60.00d	60.00c	53.85c	57.78b	50.65b
0.25	56.67e	54.12e	47.78d	39.74d	44.44b	35.06b
CK	1.11	—	3.33	—	7.78	—

有相关性 (Yu, 2013, Yu *et al.*, 2013)。

1.4.2 蔬菜上桃蚜对黄瓜花叶病毒 (Cucumber mosaic virus, CMV) 传毒检测技术研究

通过对山东及北京蔬菜上桃蚜-黄瓜花叶病毒 CMV-寄主植物三者互作关系研究,建立 CMV 分子检测方法 (Yin, 2013)。

1.4.3 麦蚜及桃蚜唾液腺相关基因克隆及其在蚜虫与植物互作关系研究

明确植物防御信号物质茉莉酸/水杨酸 (Jasmonic acid/Salicylic acid, JA/SA)对桃蚜唾液腺中基因 (*Mp10*、*Mp42*、*MpCOO2*)表达的影响 (赵兴延, 2012);克隆获得麦二叉蚜唾液蛋白 *SgC002* 基因,经 RNA 干扰研究发现:将 siRNA 片段添加人工饲料饲喂蚜虫,后经转移到感蚜小麦植株上,蚜虫在短时间内出现大量死亡现象;而在人工饲料继续 7 d 蚜虫存活率与对照无显著差异。结果表明 *SgC002* 基因经 RNAi 沉默后,抑制了蚜虫对寄主植物的识别能力 (张勇, 2014; Zhang *et al.*,

2015),说明唾液腺的 *C002* 基因对蚜虫寄主识别至关重要。

1.5 各项技术措施的集成研究、推广应用及综合评价

利用农田生态系统群落生态学方法,麦蚜田间种群格局的 GIS 方法以及引进的食物网分析软件与分析技术,以利用特效挥发物缓释器的“推-拉”技术、作物间作布局、植物源农药施用为主要技术手段,开展小麦蚜虫,主要蔬菜(十字花科、葫芦科和茄科)蚜虫控制技术研究,以及技术集成、推广应用及综合评价。

1.5.1 小麦与不同作物间作对麦蚜的生态调控及生物防治效果比较

于 2011—2012 年在河南省新乡基地进行田间小区试验,比较小麦与大蒜、油菜、绿豆、蚕豆等多种间作方式对麦蚜及其主要捕食性天敌种群动态的影响。经系统调查发现:1) 小麦单作田的麦蚜种群密度显著高于小麦-大蒜间作和小麦-油菜间作。4 个间作处理麦

区的麦蚜种群密度没有显著差异 (图 12)。小麦-大蒜、小麦-油菜间作效果最佳。2) 天敌种食蚜蝇类发生总量 (图 13:A) 在小麦-油菜间作、小麦-绿豆间作和小麦-蚕豆间作田高于小麦单作, 以小麦-豆科作物间作食蚜蝇种群数量最高; 瓢虫类七星瓢虫、异色瓢虫和龟纹瓢虫是瓢虫类的优势种。小麦-大蒜、小麦-油菜和小麦-

蚕豆间作区瓢虫类的发生总量高于小麦单作区; 小麦-绿豆间作和小麦单作区的瓢虫类发生总量大致相同。以小麦-蚕豆间作区瓢虫类发生总量最高 (图 13:B)。由此可见, 麦田不同生物多样性布局, 虽然吸引的优势天敌种类存在差异, 但生态系统中天敌总量均有增加。生物多样性对

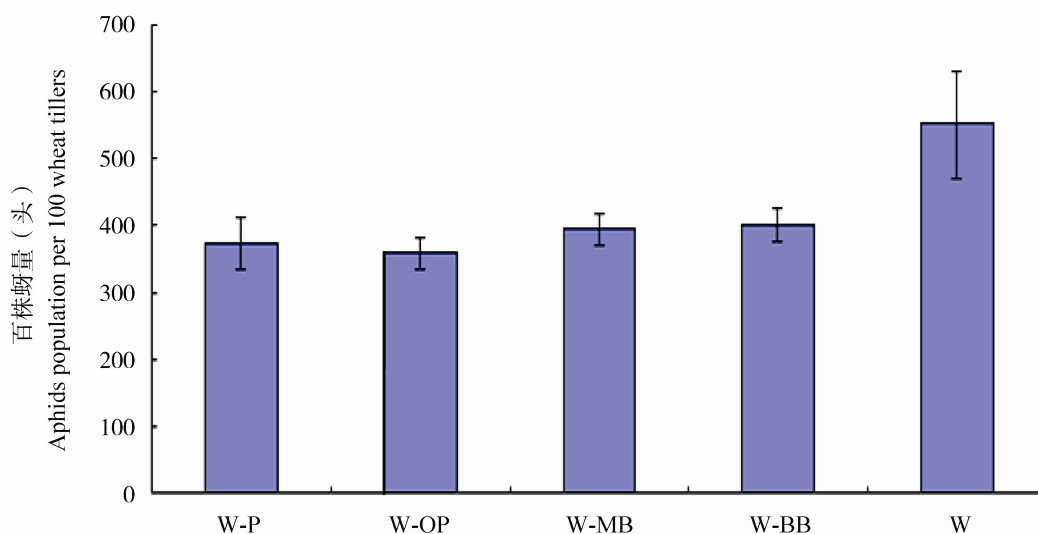


图 12 不同处理模式下麦蚜的平均百株蚜量 (mean±SE)

Fig. 12 The average aphids population of per 100 wheat tillers under the different intercropping system (mean±SE)

W-P: 小麦与大蒜间作 Wheat-garlic; W-OP: 小麦与油菜间作 Wheat-oil rape; W-MB: 小麦与绿豆间作 Wheat-mung bean; W-BB: 小麦与蚕豆间作 Wheat-broad bean; W: 小麦单作 Wheat monoculture.

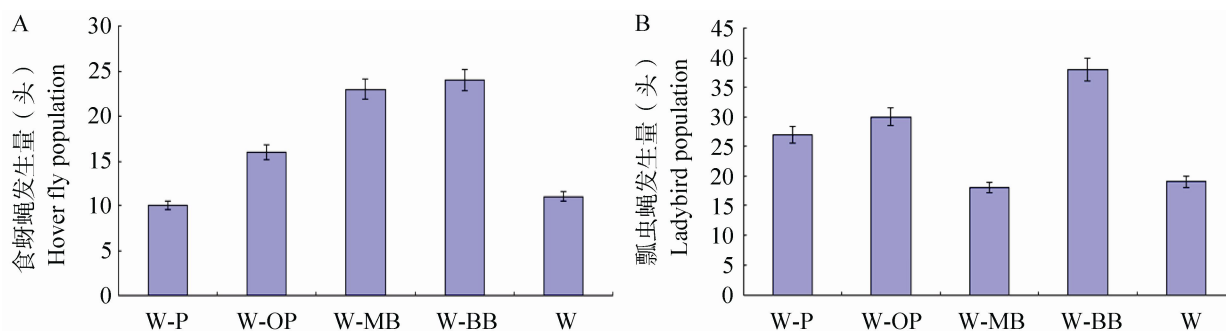


图 13 不同处理模式下两种天敌昆虫发生量

Fig. 13 Two natural enemies' population in the wheat field under different intercropping system (mean±SE)

A: 食蚜蝇 Hoverfly B: 瓢虫 Ladybird; W-P: 小麦与大蒜间作 Wheat-garlic; W-OP: 小麦与油菜间作 Wheat -oil rape; W-MB: 小麦与绿豆间作 Wheat-mung bean; W-BB: 小麦与蚕豆间作 Wheat-broad bean; W: 小麦单作 Wheat monoculture.

害虫天敌的益处主要体现在以下几个方面: (1) 为天敌提供花粉、花蜜、蜜露等替代食物资源;

(2) 为天敌提供避难所或合适的微栖境以利于其越冬或寻找避难所；(3) 为天敌提供替代寄主或猎物。

总之，田间及室内实验结果证明，作物多样性布局在一定程度上不仅能降低麦蚜种群数量、改变其空间聚集分布格局，还具有增加天敌多样性与丰富度、使天敌高峰期提前等生态调控和巩固生物防治的作用，并能改变农田小气候，以及作物增产效益等，解析了作物多样性布局控害保益增产的机理。同时考虑到农事操作及机械化生产需要，研究明确最佳作物间作方式及间作行比模式，即小麦-大蒜、小麦-油菜间作，8:2 行比效果最好。在蚜虫发生中等偏轻年份，能将麦蚜控制在经济损害阈值以下。

1.5.2 小麦-油菜间作与水杨酸甲酯混合处理对麦长管蚜的增效控制作用 以特定缓释装置释放水杨酸甲酯：将供试 MeSA 滴入海绵填充的聚乙烯小盒中（直径 6.5 cm，高 4 cm，盒上有 4 个 2 cm² 的条形小孔），用木棒固定在距地面 1 m 高处。每个小区中央放置 1 个装置，MeSA 使用量为 120 mg/m²/7d。在麦油间作区，每 8 行小麦间作 2 行油菜，间作行距为 40 cm。以生物控制指数（Biological control index, BCI）定量评价对麦蚜种群的抑制效果。BCI 即为实验期间末次与初次调查时蚜虫数量的差值与末次调查时蚜虫数量的比值，BCI 越高表明控害作用越强。

作物间作（小麦-油菜）及活性挥发物 MeSA 缓释 2 项技术集成应用的研究结果发现：小麦-油菜间作与 MeSA 协同处理区（集成处理区）麦长管蚜无翅蚜种群数量比小麦单作区约提前 12 d 达到高峰，但峰值显著低于小麦单作区（董洁等，2012b）。小麦百株无翅蚜量：小麦单作区>间作区>MeSA 处理区>集成处理区；而且间作和 MeSA 协同处理区瓢虫发生总量最高，蚜茧蜂发生高峰期比小麦单作区提前约 10 d，对小麦灌浆期的蚜虫起到明显的控制作用，有效地抑制麦长管蚜无翅蚜的种群增长，并显著降低麦长管蚜的聚集程度，并使之趋于均匀分布。以生物控制指数（BCI）定量评价了两种优势天敌瓢虫和蚜茧蜂对蚜虫生物防治作用。从小麦抽穗到灌浆

期，二因素集成处理能更有效地抑制麦长管蚜无翅蚜的种群增长。因此水杨酸甲酯缓释和小麦-油菜间作技术的集成应用，在改进蚜虫的综合治理措施和优化害虫的可持续管理策略中具有重大潜能。空间格局结果可为麦长管蚜及其天敌的田间调查抽样方法和预测预报等提供依据。

1.5.3 EBF 缓释器和低剂量杀蚜药剂混合使用对菜蚜控制的协同增效作用 为了明确 EBF 缓释器及低剂量（常规用量 50%）的吡虫啉喷雾混合使用对蚜虫及其天敌生态调控效应，以及是否具有协同增效作用，在山东大白菜田开展对蔬菜蚜虫防控研究。通过调查距离 EBF 缓释器 5、10、15 和 20 m 处大白菜植株上蚜虫数量，研究发现，单纯使用吡虫啉能显著降低蚜虫数量；田间释放 EBF 对菜蚜的防控有一定的作用，尤其是在 5 m 范围内效果明显。但是单一的挥发物释放，并不能大幅度地降低蚜虫的种群数量。EBF 和吡虫啉混合使用能够更进一步降低距离 EBF 缓释器 5 m 范围内有翅蚜和无翅蚜数量。EBF 与低浓度的化学农药补充使用，对控制蚜虫具有协同增效作用，能有效降低单纯使用常规化学农药所带来的负面影响。

1.5.4 农村社会经济学评估与技术措施的推广应用 通过合作，引进了社会经济学评估方法，采用发放调查问卷、访问农户的方法，统计当地学术论坛及农民培训的次数信息，整合农技推广部门资料以及农户对新技术应用前后效果的意见。在技术集成示范区的信息反馈调研与综合分析评估，对技术集成不断补充完善，使之符合当地生产需求。并在每村选择 3 户作为技术带头户，“以点带面，全面开花”。

自 2011—2013 年间，应用社会经济学评估方法调查访问了山东地区试验区内北宋村和里留村 19 个农户，其中包括 3 个示范带头户。结合农业统计数据和农技推广部门资料以及当地的许多评论意见，进行一系列的连续研究，旨在全面分析试验示范区的农村社会经济结构，以及社会经济结构对种植方式如间作、混作和对土地利用、投入、药剂选择的影响；全面分析农民对有害生物风险管理理念与技术应用水平，农产品

的流通渠道及市场化水平等。综合评价合作研发的小麦及蔬菜蚜虫防控的先进策略和技术(如“推-拉策略”和挥发物缓释技术,作物多样性布局等生态调控技术,以及其他驱避害虫、吸引天敌、降低化学农药使用量等的新防控技术)在应用前后对农民思想观念、农产品产量、价格、农民纯收入等方面的影响。同时通过召开“对接会”、“田间地头见面会”、“成果展示会”等,对相关技术进行技术指导和推广应用。经过对新技术应用前后农户的反馈调查,不断调整和优化病虫害控制策略和技术,组建小麦、十字花科和茄科蔬菜综合控制技术措施,为我国小麦、蔬菜安全生产,农村合作社绿色食品证书的申请与生产提供技术支持。

2 未来研究发展方向

小麦与蔬菜蚜虫属典型的吸食维管束汁液的半翅目昆虫,目前半翅目昆虫-植物相互作用成为多学科相互交叉、渗透的前沿领域。从2014年6月23—26日在美国加州大学河滨分校召开的第二届国际半翅目昆虫-植物相互作用研讨会(The Second International Hemipteran-Plant Interactions Symposium)便可略见一斑。此次专题研讨会汇聚了昆虫学、植物生物学、遗传学、分子生物学和植物病理学领域,来自欧美、澳大利亚、新西兰、南非、以色列、中国、韩国、日本等20余个国家与地区的约160名专家代表参加。围绕植食性刺吸昆虫及其共生物、昆虫与植物互作及昆虫传毒方面的最新技术、方法与产品进行交流与讨论,还有2个卫星会,即刺吸电位图谱(EPG)专题会和昆虫基因组学(OMICS)专题会。此次会议有2个突出热点:一是RNA干扰技术在验证互作功能基因上的作用,采用途径:1. 显微注射;2. 人工取食膜饲喂;3. 利用植物内源共生菌或病毒的遗传改造在植物表达,取得重要研究进展;二是刺吸式害虫刺探取食行为检测EPG技术、仪器(交流电(Alternating current, AC)、直流电(Direct current, DC)系统)最新功能及应用等。

由于刺吸式昆虫特点是取食时将口针刺入维管组织,伴随唾液分泌,并且传播植物病害,同时该类型昆虫体内伴随有共生菌,形成昆虫与植物、昆虫与传毒、昆虫与共生菌的两者、三者甚至四者互作关系,因此互作关系非常复杂。昆虫化学生态学,作为一门年轻的交叉学科,逐渐成为昆虫学研究的热点(闫凤鸣等,2013)。今后刺吸式害虫研究发展方向主要有5个方面:1. 蚜虫唾液与寄主互作;2. 蚜虫共生菌与蚜传并毒关系;3. 麦蚜嗅觉关联基因鉴定及其对蚜虫激素如EBF及类似物、植物活性挥发物特异识别机制;4. 蚜虫主要天敌嗅觉关联基因鉴定及其对寄主识别机制;5. 基于开花条带设置的麦田蚜虫生态调控功能研究。通过学科交叉与基础研究,必将成为推动小麦与蔬菜蚜虫新型防控技术研发的强大的动力。

参考文献 (References)

- Beale M, Birkett M, Bruce T, Chamberlain K, Field L, Huttly A, Martin J, Parker R, Phillips A, Pickett J, Prosser I, Shewry P, Smart L, Wadhams L, Woodcock C, Zhang Y, 2006. Aphid alarm pheromone produced by transgenic plants affects aphid and parasitoid behaviour. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 103(27): 10509–10513.
- Cheng P, Zeng JG, 2012. Progress in synthesis of Benzophenanthridine alkaloids and their derivatives. *Chinese Journal of Organic Chemistry*, 32(9): 1605–1619.
- Cui LL, Dong J, Francis F, Heuskin S, Lognay G, Chen JL, Bragard C, Tooker J, Liu Y, 2012a. E- β -farnesene synergizes the influence of an insecticide to improve control of cabbage aphids in China. *Crop Prot.*, 35: 91–96.
- Cui LL, Francis F, Heuskin S, Lognay G, Liu YJ, Dong J, Chen JL, Song XM, Liu Y, 2012b. The functional significance of E- β -farnesene: Does it influence the populations of aphid natural enemies in the fields? *Biol. Control*, 60(2): 108–112.
- Francis F, Vandermoten S, Verheggen F, Lognay G, Haubruge E, 2005. Is the (E)- β -farnesene only volatile terpenoid in aphids? *Journal of Applied Entomology*, 129(1): 6–11.
- Fan J, Francis F, Liu Y, Chen JL, Cheng DF, 2011. An overview of odorant-binding protein functions in insect peripheral olfactory reception. *Genetics Research and Molecular*, 10(4): 3056–3069.
- Heuskin S, Godin B, Leroy P, Capella Q, Wathelet JP, Verheggen F,

- Haubruge E, Lognay G, 2009. Fast gas chromatography characterisation of purified semiochemicals from essential oils of *Matricaria chamomilla* L. (Asteraceae) and *Nepeta cataria* L. (Lamiaceae). *Journal of Chromatography A*, 1216(14): 2768–2775.
- Heuskin S, Lorge S, Godin B, Leroy P, Frère I, Verheggen F, Haubruge E, Wathélet J, Mestdagh M, Hance T, Lognay G, 2012. Optimisation of a semiochemical slow-release alginate formulation attractive towards *Aphidius ervi* Haliday parasitoids. *Pest Management Science*, 68(1): 127–136.
- Heuskin S, Rozet E, Leorge S, Farmakidis J, Hubert PH, Verheggen F, Haubruge E, Wathélet JP, Lognay G, 2010. Validation of a fast gas chromatographic method for the study of semiochemical slow-release formulations. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, 53(4): 962–972.
- Wang G, Cui LL, Dong J, Francis F, Liu Y, Tooker J, 2011. Combining intercropping with semiochemical releases: optimization of alternative control of *Sitobion avenae* in wheat crops in China. *Entomol. Exp. Appl.*, 140(3): 189–195.
- Wang WL, Liu Y, Chen JL, Ji XL, Zhou HB, Wang G, 2009. Impact of intercropping aphid-resistant wheat cultivars with oilseed rape on wheat aphid (*Sitobion avenae*) and its natural enemies. *Acta Ecologica Sinica*, 29(3): 186–191.
- Wiley RW, 1979. Intercropping—its importance and research needs. Part I Competition and yield advantages. *Field Crop Abstract*, 32: 1–10.
- Xie HC, Chen JL, Cheng DF, Zhou HB, Sun JR, Liu Y, Francis F, 2012. Impact of wheat-mung bean intercropping on English grain aphid (Hemiptera: Aphididae) populations and its natural enemies. *Journal of Economic Entomology*, 105(3): 854–859.
- Yin RL, 2013. Study of CMV - plant - aphid interactions focusing on *Myzus persicae* in vegetable crops. PhD Dissertation. Gembloux: Liege University.
- Yu WJ, 2013. Virus transmission efficiency: investigation on Chinese clone diversity of wheat aphids and role of aphid endosymbionts. PhD Dissertation. Gembloux: Liege University.
- Yu WJ, Xu ZH, Chen JL, Bragard C, Liu Y, Cheng DF, Francis F, 2013. Variation in transmission of Barley yellow dwarf virus-PAV by different populations of *Sitobion avenae* in China. *Journal of Virological Methods*, 194(1/2): 1–6.
- Yu XD, Jones H, Ma YZ, Wang GP, Xu ZS, Zhang BM, Zhang YJ, Ren GW, Pickett J, Xia LQ, 2012a. (*E*)- β -Farnesene synthase genes affect aphid (*Myzus persicae*) infestation in tobacco (*Nicotiana tabacum*). *Funct. Integr. Genomics*, 12(1): 207–213.
- Yu XD, Pickett J, Ma YZ, Bruce T, Napier J, Jones H, Xia LQ, 2012b. Metabolic engineering of plant-derived (*E*)- β -farnesene synthase genes for a novel type of aphid-resistant genetically modified crop plants. *J. Integr Plant Biol.*, 54 (5): 282–299.
- Zhang Y, Fan J, Chen JL, Sun JR, Cheng DF, 2015. Cloning and RNA interference analysis of the salivary protein C002 gene in *Schizaphis graminum*. *J. Integrative Agriculture* (Accept).
- Zhou HB, Chen JL, Cheng DF, Francis F, Liu Y, Sun JR, Huang Y, Wang XS, Liu XW, Liu XM, Zeng JD, 2011. Evaluation on the resistance to aphids of wheat germplasm resources in China. *African Journal of Biotechnology*, 10(63): 13930–13935.
- Zhou HB, Chen JL, Liu Y, Francis F, Haubruge E, Bragard C, Sun JR, Cheng DF, 2013a. Influence of garlic intercropping or active emitted volatiles in releasers on aphid and related beneficial in wheat fields in China. *Journal of Integrative Agriculture*, 12(3): 101–108.
- Zhou HB, Chen JL, Cheng DF, Liu Y, Bragard C, Haubruge E, Francis F, 2013b. Adaptation of wheat-pea intercropping pattern in China to reduce *Sitobion avenae* (Hemiptera: Aphididae) occurrence by promoting natural enemies. *Agroecology and Sustainable Food Systems*, 37(9): 1001–1016.
- Zhou HB, 2012. Use of intercropping and infochemical releasers to control aphids in wheat. PhD Dissertation. Gembloux: Liege University.
- 邓青, 陈巨莲, 程登发, 孙京瑞, 2013. 植物凝集素及其抗蚜作用研究进展. 应用昆虫学报, 50(1): 268–275. [Deng Q, Chen JL, Cheng DF, Sun JR, 2013. Research progress on plant lectin and its application in anti-aphid. *Chinese Bulletin of Entomology*, 50(1): 268–275.]
- 邓青, 2012. 转基因抗蚜小麦抗麦长管蚜效果的评价技术研究. 硕士学位论文. 北京: 中国农业科学院. [Deng Q, 2012. Evaluation Techniques of Transgenic Wheat Resistance Effect to *Sitobion avenae* (Fabricius). Master Thesis. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences]
- 董洁, 刘英杰, 李佩玲, 林芳静, 陈巨莲, 刘勇, 2012a. 间作与 MeSA 释放对麦长管蚜及其优势天敌的生态效应. 应用生态学报, 23(10): 2843–2848. [Dong J, Liu YJ, Li PL, Lin FJ, Chen JL, Liu Y, 2012a. Ecological effects of wheat-oilseed rape intercropping combined with methyl salicylate release on *Sitobion avenae* and its main natural enemies. *Chinese Journal of Applied Ecology*. 23(10): 2843–2848.]
- 董洁, 刘英杰, 王光, 刘勇, 2012b. 间作与施用水杨酸甲酯对麦长管蚜及其主要天敌空间分布的影响. 应用生态学报, 23(7):

- 1940-1944. [Dong J, Liu YJ, Wang G, Liu Y, 2012b. Effects of wheat-oilseed rape intercropping and methyl salicylate application on the spatial distributions of *Sitobion avenae* and its main natural enemies. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 23(7): 1940-1944.]
- 范佳, 2011. 麦长管蚜等六种昆虫 OBP3 的基因克隆、蛋白表达及麦长管蚜嗅觉相关蛋白鉴定. 博士学位论文. 北京: 中国农业科学院. [Fan J, 2011. cDNA Isolation and Protein Expression of OBP3 in Six Insects and Identification of Proteins Associated with Olfaction in *Sitobion avenae*. Ph.D Dissertation. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences]
- 解海翠, 2011. 小麦与两种豆科作物间作对麦长管蚜及其天敌的生态调控及机理. 硕士学位论文. 北京: 中国农业科学院. [Xie HC, 2011. The Ecological Regulation and Mechanism of the Intercropping of Wheat and Two Fabaceous Crops on English Grain Aphid and Its Enemies. Master Thesis. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences]
- 解海翠, 陈巨莲, 程登发, 周海波, 孙京瑞, 刘勇, Francis F, 2012. 麦田间作对麦长管蚜的生态调控作用. *植物保护*, 38(1): 50-54. [Xie HC, Chen JL, Cheng DF, Zhou HB, Sun JR, Liu Y, Francis F, 2012. The function of ecological regulation to aphids in the wheat intercropping field. *Plant Protection*, 38(1): 50-54.]
- 林芳静, 2014. EBF 对桃蚜和马铃薯长管蚜的扩散及传毒效率的影响. 硕士学位论文. 泰安: 山东农业大学. [Lin JF, 2014. Effects of EBF on Dispersal and Transmission Efficiency of *Myzus persicae* (Sulzer) and *Macrosiphum euphorbiae* (Thomas) and Vectors. Master Thesis. Taian: Shandong Agricultural University]
- 刘英杰, 李佩玲, 林芳静, 张晓红, 刘勇, 2013. *E*- β -farnesenes 释放对菜蚜种群空间格局影响的地统计学分析. 第八届全国青年植保科技创新学术研讨会. 64-65. [Liu YJ, Li PL, Lin FJ, Zhang XH, Liu Y, 2013. Statistical Analysis of Effects of *E*- β -farnesenes on *Brevicoryne brassicae* Population Spatial Pattern. The 8th National Youth Conference on Plant Protection Science and Technology Innovation. 64-65]
- 刘英杰, 2013. 反- β -法尼烯对菜蚜、瓢虫和蚂蚁三者关系的影响. 硕士学位论文. 泰安: 山东农业大学. [Liu YJ, 2013. Effects of EBF Releasing on the Interactions among Cabbage Aphids, Ladybirds and Ants. Master Thesis. Taian: Shandong Agricultural University]
- 王万磊, 刘勇, 纪祥龙, 王光, 周海波, 2008. 小麦间作大蒜或油菜对麦长管蚜及其主要天敌种群动态的影响. *应用生态学报*, 19(6): 1331-1336. [Wang WL, Liu Y, Ji XL, Wang G, Zhou HB, 2008. Effects of wheat-oilseed rape or wheat-garlic intercropping on the population dynamics of *Sitobion avenae* and its main natural enemies. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 19(6): 1331-1336.]
- 闫凤鸣, 陈巨莲, 汤清波, 2013. 昆虫化学生态学研究进展及未来展望. *植物保护*, 39(5): 9-15. [Yan FM, Chen JL, Tang QB, 2013. Advances and perspectives in insect chemical ecology. *Plant Protection*, 39(5): 9-15.]
- 张晓宁, 陈巨莲, 程登发, 曾建国, 程辟, 孙京瑞, 2014. 博落回提取物对 3 种麦蚜毒杀活性测定. *植物保护*, 40(3): 187-190. [Zhang XN, Chen JL, Cheng DF, Zeng JG, Cheng P, Sun JR, 2014. Biological activity of *macleaya cordata* extract against three species of wheat aphids. *Plant Protection*, 40(3): 187-190.]
- 张勇, 2014. 麦二叉蚜唾液蛋白 C002 的基因克隆与 RNA 干扰研究. 硕士学位论文. 北京: 中国农业科学院. [Zhang Y, 2014. Cloning and RNA Interference Analysis of the Salivary Protein C002 Gene in *Schizaphis graminum*. Master Thesis. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences]
- 赵兴延, 2012. 植物防御信号物质对桃蚜唾液腺中基因表达的影响. 硕士学位论文. 泰安: 山东农业大学. [Zhao XY, 2012. The Effect of Two Defence Signaling Substances on the Salivary Gland Gene Expression of *Myzus persicae*. Master Thesis. Taian: Shandong Agricultural University]
- 周海波, 陈巨莲, 程登发, Francis F, 刘勇, 孙京瑞, 2012. 农田生物多样性对昆虫的生态调控作用. *植物保护*, 38(1): 6-10. [Zhou HB, Chen JL, Cheng DF, Francis F, Liu Y, Sun JR, 2012. Effects of ecological regulation of biodiversity on insects in agro ecosystems. *Plant Protection*, 38(1): 6-10.]
- 周海波, 陈巨莲, 刘勇, 程登发, 陈林, 孙京瑞, 2009a. 小麦品种多样性对麦长管蚜的生态调控作用. *植物保护学报*, 36(2): 151-156. [Zhou HB, Chen JL, Liu Y, Cheng DF, Chen L, Sun JR, 2009a. Using genetic diversity of wheat varieties for ecological regulation on *Sitobion avenae*. *Acta Phytophylacica Sinica*, 36(2): 151-156.]
- 周海波, 陈林, 陈巨莲, 程登发, 刘勇, 孙京瑞, 2009b. 基于 GIS 的小麦-豌豆间作对麦长管蚜种群空间格局的影响. *中国农业科学*, 42(11): 3904-3913. [Zhou HB, Chen L, Chen JL, Cheng DF, Liu Y, Chen L, Sun JR, 2009b. Effect of intercropping between wheat and pea on spatial distribution of *sitobion avenae* based on GIS. *Scientia Agricultura Sinica*, 42(11): 3904-3913.]
- 周海波, 陈巨莲, 程登发, 刘勇, 孙京瑞, 2009c. 小麦间作豌豆对麦长管蚜及其主要天敌种群动态的影响. *昆虫学报*, 52(7): 775-782. [Zhou HB, Chen JL, Cheng DF, Liu Y, Sun JR, 2009c. Effects of wheat-pea intercropping on the population dynamics of *Sitobion avenae* (Homoptera: Aphididae) and its main natural

enemies. *Acta Entomologica Sinica*, 52(7): 775-782.]