专论与综述

Reviews

蚜虫防治技术研究进展

唐平华, 陈国平, 朱明库, 任丽军, 胡宗利*

(重庆大学生物工程学院, 重庆 400044)

摘要 蚜虫是地球上最具破坏性的害虫之一, 分布十分广泛。蚜虫生活史比较复杂, 如世代交替, 越冬方式差异, 多型现象等特点, 其以尖利的口器刺吸植物汁液引起植物营养恶化, 甚至落叶、萎蔫, 而且它还能传播多种植物病毒, 造成严重的经济损失。本文根据近年来国内外对蚜虫的最新研究成果, 综述了蚜虫农业防治、物理防治、化学防治、生物防治、生态调控等方面的研究进展, 并对今后的研究方向进行了展望。

关键词 蚜虫; 农业防治; 化学防治; 生物防治; 生态调控

中图分类号: S 433.3 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.0529-1542.2013.02.002

Advances in aphid control technology

Tang Pinghua, Chen Guoping, Zhu Mingku, Ren Lijun, Hu Zongli

(College of Bioengineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract Aphids are a group of most destructive pests on the earth, and widely distributed. The life cycle of aphids is very complex, such as alternation of generations, difference of hibernation and polymorphism. Aphids suck plant juices with their sharp mouthparts, causing deterioration of plant nutrition, even defoliating and wilting. Aphids also transmit a variety of plant viruses, causing severe economic losses. Based on the latest researches on aphids at home and abroad, the present article summarizes the agricultural control of aphid, as well as the advances in physical, chemical, biological and ecological regulation methods for the control of aphids. In addition, several suggestions were also proposed for the future work.

Key words aphid; agricultural control; chemical control; biological control; ecological regulation

蚜虫类在动物界(Animalia)中, 属节肢动物门(Arthropoda), 昆虫纲(Insecta), 半翅目(Hemiptera), 胸喙亚目。此亚目的两个总科, 分别为球蚜总科(Adegoidea)和蚜总科(Aphidoidea), 再分为 13 个科, 500 余属, 世界已知种类 4 700 余种, 主要分布在温带地区, 我国蚜虫资源丰富, 已知种类 1 000 余种^[1-2]。蚜虫具有周期性的孤雌生殖(孤雌世代和有性世代交替)、多型现象、复杂多样的生活史、卵生或卵胎生等特征, 雌雄蚜虫通过遗传物质重组, 既保持了种的特征, 同时又由于遗传物质的重组而导致蚜虫的遗传异质性, 出现种群内的分化, 对环境条件的适应性更强。蚜虫寄主杂、分布广、种类多、世代重叠、数量大、繁殖快、危害大, 常聚集在植株的芽、花蕾、嫩叶或嫩枝上。蚜虫唾液中含有多酚氧化酶、果

胶酶、过氧化物酶、葡萄糖氧化酶、共轭碳水化合物等活性成分, 多酚氧化酶将酚类物质转变成毒性更小的衍生物, 葡萄糖氧化酶抑制脂肪氧化酶的活性, 改变植物信号通路以降低茉莉酸的诱导产生, 蚜虫用口针穿刺造成的机械损伤小以至于植物几乎不能察觉, 蚜虫唾液中的钙结合蛋白结合了植物参加防御反应所需的钙, 抑制了植物的防御反应^[3]。其通过尖利的口器刺吸植物汁液, 造成植物生长率降低、发育不良, 出现叶斑、泛黄、卷叶、枯萎等不同症状使产量降低甚至死亡。2010—2011 年, 中国 26 万 hm² 小麦中 62.5% 遭受了严重的蚜虫危害, 尤其是麦长管蚜危害严重, 造成华北平原、长江中游等地区小麦产量下降 15%~60%^[4]。蚜虫以群体形式吸取植物的养分并传播植物病毒, 造成很严重的间接危害,

收稿日期: 2012-09-28 修订日期: 2012-12-03

基金项目: 国家自然科学基金(31101546); 中央高校基本科研业务项目(CDJXS11232244)

* 通信作者 E-mail: huzongli@cqu.edu.cn

目前已知病毒的昆虫传播介体有 600 种,其中 275 种属于蚜虫,居世界传病毒昆虫之首,例如桃蚜 [*Myzus persicae* (Sulzer)] 是超过 110 种植物病毒的载体^[5]。由于蚜虫对农林业的严重危害,蚜虫防治的研究一直是一个基础理论和实际应用并重的重大课题。近年来,蚜虫的防治技术研究进入了一个新的时期,农业防治、物理防治、化学防治、生物防治、生态调控等技术都取得了重大进展,本文对近年来所取得的研究进展进行了综述。

1 农业防治

农业防治作为蚜虫防治的辅助措施,合理的耕作制度与作物布局、调整播种期和收获期、选育抗蚜虫品种、合理施肥与灌溉、合理密植,以及加强田间管理等措施常可增强作物抗蚜力,改进植物的生理状态和田间小气候,使之不利于蚜虫的发生和繁殖。整形修剪苹果树主干周围和主枝近端和底面长势不好的果枝,保持苹果树良好树形,降低了玫瑰苹果蚜对苹果树的损害,提高了苹果的产量和品质^[6]。调整作物播种期使作物易受害造成经济损失的敏感期错开蚜虫的发生期,Rahman 和 Tabasum 分别报道茄子和小麦在早期播种,受到蚜虫的危害最小,产量最高^[7-8]。选育抗蚜虫品种是防治蚜虫最经济、有效、安全的途径,目前已从小麦、大豆、高粱等多种作物中筛选出抗蚜虫品种,通过正交和回交育种技术选育抗蚜品种,但是为防止蚜虫经过一定时期适应后,作物抗性消失,应将抗虫品种纳入综合防治体系中,以有效减轻抗虫品种对蚜虫的适应选择^[9-11]。研究发现,降低土壤钾素水平能增加甘蓝上桃蚜、菜蚜的生殖力,氮肥增多,植物营养丰富,有利于蚜虫的大发生,但是 Gash 发现过多的氮肥(250 kg/hm²)明显降低了麦无网长管蚜的繁殖率,可能由于过多的施用氮肥导致植物氮元素浓度超过了蚜虫元素比阈值^[12]。因此,可以采用科学的施肥方法、人工设置田间天敌越冬场所、合理安排作物的时空格局等农业措施有目的地改变蚜虫生活条件和环境条件,增强作物的抗蚜能力,提高农田生物多样性,利用天敌持续控制蚜虫。

2 物理防治

加强树木管理,剪除被害枝梢,集中烧毁,使用矿物油剂喷雾,在蚜虫虫体或卵壳上形成油膜,使

蚜虫及卵窒息死亡,也可以防止蚜虫在叶面分泌唾液试食,预防蚜虫传播的非持久性病毒。结合在作物周围种植边界植物更能有效防治植物病毒发生,如在马铃薯品种‘Russet Burbank’的周围种植对马铃薯 Y 病毒(PVY)不敏感的品种‘Kennebec’并结合施用矿物油,对减少马铃薯 Y 病毒发生率的效果几乎是单独采用一种措施的两倍^[13]。利用蚜虫的趋光性、趋黄性等习性采用物理方法防治蚜虫,采用铺银灰色膜和田间及温室通风口外挂银灰色膜条驱避蚜虫,利用黑光灯与荧光灯在夜间进行蚜虫诱捕,用黄色粘蚜纸或者将黄油漆涂在塑料薄膜上诱杀蚜虫,李娟等人利用捕杀特黄板捕杀烟蚜,对烟蚜的平均防效 89.2%,蚜传病毒病发病率降低了将近 20%,且不杀伤天敌。利用蚜虫的趋光性、趋黄性进行物理防治具有良好的持效杀虫性,但速效性不如化学药剂,在蚜虫发生初期使用效果最好^[14]。

温度、湿度、光照、降雨和气流等气候物理因子直接影响蚜虫的生长发育、生存和繁殖,李晶晶等人 在大棚内利用短期高温脉冲显著降低瓜蚜生存期和生殖量,在生产实践中可考虑适当降低温度、延长高温持续的时间以达到抑制蚜虫种群增长的目的;王冰等人 在小麦田模拟风雨的试验显示,采用机动喷粉机 5 档吹风(风速范围 9.8~14.6 m/s)对麦长管蚜实际防治效果达到 78.89%,对靶喷施处理的防治效果明显高于非靶喷施处理,处理强度越大,防治效果越好,人工喷水及吹风措施对天敌无明显影响,在小麦灌浆初期进行人工喷水或吹风处理,可以获得最佳的防治效果和保产作用^[15-16]。静电技术在蚜虫防治中取得快速发展,静电喷雾能大幅提高雾滴在靶标表面的沉积率和分布均匀度,带电液滴放电杀伤蚜虫,静电喷雾技术对小麦蚜虫的田间防治效果、作业效率及其节水、节药性能明显优于常规药械,但在我国尚未真正应用于农业生产,主要还处于试验阶段^[17]。何娟等人研究发现麦长管蚜成虫在静磁场强度 0.065 T 中作用 60 min 的死亡率高达 84%,静磁场可能通过影响麦长管蚜新陈代谢和神经内分泌系统明显降低了麦长管蚜的生存率和繁殖力,利用微波电磁场杀蚜虫率高,还能促进农作物的生长和开花结果,使用费用低廉寿命长,在蚜虫防治中很有应用前景^[18]。物理防治蚜虫具有环境污染小、无残留、不产生抗性等特点,利用物理防治能较

快压低蚜虫数量,提高“益害比”,充分发挥天敌的自然控蚜能力。

3 化学防治

目前化学农药仍在蚜虫防治中占主要地位,优点是使用方便、见效快,但是广泛、大量和长期使用化学农药,99.9%的农药会进入农业生态系统,破坏了生态平衡,带来了“三R”(农药残留 Residue、抗药性 Resistance、再增猖獗 Resurgence)问题。常用的药剂有:有机磷类、拟除虫菊酯类、氨基甲酸酯类、新烟碱类等,分为触杀性或内吸性化学杀虫剂两大类。由于蚜虫躲在植物叶子背面和直接取食韧皮部汁液,触杀性杀虫剂很难防治蚜虫。内吸性杀虫剂被植物吸收可以大量杀虫,但也杀灭益虫,破坏生态系统和污染环境,蚜虫易产生抗性而失去防治效果。因此,蚜虫防治要科学选择高效低毒农药,对蚜虫进行不同杀虫剂敏感度水平测定,选择作用机理不同的药剂混用或轮用能够有效地防治蚜虫和减缓蚜虫产生抗药性,施药时加入有机硅、植物油等助剂增加效果,最好采用施颗粒剂于根部、灌根、涂茎、涂叶、叶面喷雾等隐蔽施药技术,使农药吸到植物组织中去,发挥其内吸杀蚜保护天敌的作用。选择高效低毒低残留农药防治蚜虫,测试蚜虫和天敌的抗药力,选择对天敌无害或无大害却可以有效杀死蚜虫的浓度使用,如在防治苹果绵蚜时选用抗蚜威,既能很好地防治苹果绵蚜,又对苹果绵蚜寄生蜂杀伤力最小^[19]。新烟碱类农药噻虫嗪和吡虫啉分别处理大豆种子大约46 d后药效消失,对迟发生的大豆蚜没有防治效果,反而田间小花蝽数量分别下降了19%和35%,药剂拌种法对蚜虫的长期综合防治不利^[20]。

目前靶向性强、无公害的新型化学农药研究也取得了重大进展,抑制蚜虫乙酰胆碱酯酶活性的制剂AMTS7和AMTS20以6 $\mu\text{mol/L}$ 的浓度不可逆地抑制了麦二叉蚜乙酰胆碱酯酶99%的活性,而对人类乙酰胆碱酯酶没有任何抑制活性^[21]。豌豆蚜饲喂含系统性杀虫剂氟啶虫酰胺的饲料3 d后全部死亡,氟啶虫酰胺阻止蚜虫口针插入植物组织以致很快停止吮吸,最后饥饿而死^[22]。内吸性的新啞啉类杀虫剂pyrifluquinazon阻碍蚜虫的吸汁行为,使蚜虫饥饿而死,Kang等人采用缓释技术配制CS3000 0.3%纳米型的pyrifluquinazon对桃蚜的防治效果长达30 d,减少了农药使用频率和成本,利用缓

释技术为延长半衰期短的农药活性提供了新途径^[23]。为此,我们应准确选择高效低毒的化学农药快速压低蚜虫密度,避免天敌活跃期施药,发挥天敌在施药后生物持效控蚜作用,加强高效、作用专一的新型农药的研发,达到既保证人畜安全,又获得增加产量增加收益的要求。

4 生物防治

4.1 微生物农药

开发及应用高效、安全、害虫不易产生抗药性的微生物农药防治蚜虫,已成为各国科研工作者的研究热点。真菌、细菌、病毒等蚜虫病原性微生物也可广泛用于防治蚜虫,如白僵菌、绿僵菌、蜡蚧轮枝菌、菊欧文氏杆菌,禾谷缢管蚜病毒(RhPV),链霉菌等病原微生物对蚜虫的防治都取得了显著效果。

白僵菌、绿僵菌、蜡蚧轮枝菌等病原真菌具有高效杀蚜特性,因其容易培养、杀虫谱广、致病力强等特点,已在国内外被开发成多种制剂用于蚜虫的防治。白僵菌防治刺吸式口器害虫的研究日趋增多,已逐渐成为国内外开展刺吸式口器害虫生物防治的首选菌种,高毒力的绿僵菌和蜡蚧轮枝菌分别也能造成蚜虫95.3%和95%的致死率,但是选用的杀蚜病原真菌不能对天敌、作物具有致病性^[24-26]。白僵菌孢子悬浮液和亚致死剂量的吡虫啉混合防治蚜虫比单独使用更具有效果,这与镰刀菌和亚致死剂量的乐果混用效果类似,由于亚致死剂量的杀虫剂使蚜虫变得脆弱以致病原真菌更容易侵染蚜虫,既解决了生物杀虫剂杀虫速度较慢的缺点,同时也可缓解蚜虫对化学农药产生抗药性的问题^[27-28]。从白僵菌、绿僵菌、虫瘟霉、蜡蚧轮枝菌等产业化研究相对成熟的真菌中选育高毒力抗逆性强的杀蚜菌株,利用生物工程技术引入毒力相关基因,培育出稳定的高毒力菌株,研制延长菌剂孢子寿命的保护剂,对开发针对蚜虫的真菌杀虫剂具有重要的意义。病原真菌的杀蚜毒力对环境温度湿度的依赖性使其利用受到一定限制,杀虫毒素的杀蚜活性研究已引起重视,阿维菌素防治小麦蚜虫的效果十分显著,蜡蚧轮枝菌Km9803乙酸乙酯提取物浓度0.8%时对甘蓝蚜和烟蚜12 h的校正死亡率分别达到80.9%和88.0%,桃蚜在施用假单胞菌EP-3代谢产物鼠李糖脂浓度100 $\mu\text{g/mL}$ 1 d后死亡率100%,杀虫毒素对蚜虫的毒杀作用不易受环境影响,但目前商业开发的

杀蚜毒素很少,应加强杀蚜毒性基因的分离鉴定及利用发酵工程技术来拓宽防治蚜虫农药的新领域^[29-30]。

蚜虫病原细菌也可用来防治蚜虫,如大肠杆菌 K-12、菊欧文氏杆菌等。菊欧文氏杆菌具有很强的杀蚜虫能力,其在肠道大量繁殖并穿过肠道上皮细胞,侵染脂肪体、胚胎、脑等器官造成败血症而使蚜虫死亡,豌豆蚜感染最低剂量 10 个菊欧文氏杆菌就可以致死^[31-32]。王磊等人分离出两株蚜虫高致病菌 KI 3[黏质沙雷氏菌(*Serratia marcescens*)]和 KI 63[阴沟肠细菌(*Enterobacter cloacae*)]均有明显的杀蚜虫作用^[33]。与真菌相比,细菌的生长周期短,易于培养,有利于降低生产成本,而且细菌具有强传染性、专一致病性等特点,大大提高了杀虫效率。

能用于农作物害虫防治的昆虫病毒主要是杆状病毒科的核型多角体病毒(NPV)、颗粒体病毒(GV)以及呼肠孤病毒科的质型多角体病毒(CPV),病毒主要是通过口器感染幼虫,病毒具有专一性强、致病力强、抗逆性强,作用长久等优点。禾谷缢管蚜病毒(RhPV)感染禾谷缢管蚜导致蚜虫生存期和繁殖力下降,甚至死亡,瓢虫和寄生蜂捕食攻击更多的感染 RhPV 的蚜虫^[34]。Pal 等将 RhPV 基因组 RNA 的 cDNA 全长连接到杆状病毒表达载体上,发现仍然对禾谷缢管蚜有感染效果,从而开启了使用重组表达 RhPV 的杆状病毒来大规模防治蚜虫的新途径^[35]。

4.2 植物源农药

植物源农药是指有效成分来源于植物体的农药,活性成分一般都是植物产生的次生代谢物质。目前报道对蚜虫有控制作用的活性物质主要有:生物碱、萜类、酚类、蛋白质类、有机酸类、番荔枝内酯、黄酮类、甾类、光活化毒素类等。植物源农药对蚜虫的作用方式主要有触杀、毒杀、胃毒、拒食、忌避和吸引天敌作用。以触杀为主的天然除虫菊乳液 250 mg/L 喷雾辣椒 1 d 后 2 龄桃蚜死亡率达到 100%,且持效期长,但蚜虫死亡率具有除虫菊剂量依赖性,Goławska 等人也发现黄酮类化合物木犀草素只有在浓度超过 100 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 时才完全阻止豌豆蚜的取食行为^[36-37]。植物源杀虫剂鱼藤酮和绿僵菌素以 9:1 的比例混合可发挥最佳协同作用防治棉蚜,在温室条件下 24 h 时达到 98.9% 的致死率,绿僵菌素和丹皮酚以 9:1、7:3 和 6:4 的比例混合施用发生拮抗

作用,生物农药以合适比例搭配混用才能发挥最佳的杀蚜效果,克服生物农药防效滞后的弱点^[38]。由于植物源农药具有高效、作用机理多样、不容易诱发病虫害的抗药性、与环境相容性好等特点,在综合防治中有较好的效果,但是现在大多数植物源农药还停留在粗提物和复配阶段,对抗蚜活性成分的结构鉴定研究很少,对其进行深入研究可能获得控制蚜虫的高效、环境相容性好的新型药剂,应深入研究植物源农药的活性成分,克隆编码杀蚜活性成分的基因并育成抗蚜作物新品种。

4.3 天敌

蚜虫的天敌种类很多,主要有捕食性和寄生性两类。捕食性的天敌包括:瓢虫、食蚜蝇、草蛉、小花蝽、蚜灰蝶等;寄生性天敌主要是寄生蜂,如菜蚜茧蜂、茶足柄瘤蚜茧蜂、白足蚜小蜂等。我国草蛉、瓢虫、蚜茧蜂等天敌昆虫的规模化生产技术已基本成熟,茶园已经利用七星瓢虫和中华草蛉的成、幼虫来捕食茶蚜的成、若虫和烟草田间人工释放蚜茧蜂寄生成、若烟蚜。采用多元化的天敌在蚜虫的整个生活史周期捕食能够有效地防治蚜虫,地面上的捕食性天敌不能有效捕食小麦旗叶上的麦长管蚜,但是飞行性的捕食天敌能有效减少麦长管蚜 90% 以上,不过在增加天敌多样性的同时应慎重考虑天敌间的兼容性,选择蚜虫天敌优势种对蚜虫种群进行持续控制^[39]。培育蚜虫天敌抗药性品系,可以促进天敌在蚜虫防治中的运用,杨洪等人采用点滴法对异色瓢虫进行抗药性选育,异色瓢虫经过多代杀虫剂选育后抗性倍数提高了 6~8 倍^[40]。总之,利用天敌防治蚜虫可以达到长期控制的目的,而且不易产生抗性,但是见效较慢,结合其他方法进行综合防治可收到良好的效果。

4.4 昆虫激素的使用

昆虫生长调节剂主要作用于昆虫的生长发育系统,使昆虫的繁殖能力下降。昆虫生长调节剂 ZR-777 是毒性较高的直接毒素,完全控制各龄期若蚜的发育,引起成蚜不育。豌豆蚜施用浓度 0.10% 和 0.15% 的 ZR-777 后死亡率分别为 66% 和 98%,并且繁殖率显著低于对照组^[41]。昆虫生长调节剂优点是生物活性很高,可选择性地防治蚜虫,不污染环境,但是多数昆虫生长调节剂一般要在蚜虫的一定发育阶段使用才有效,杀虫作用较慢,因此和速效的杀虫剂混合使用可以克服缺点,庄建国等人将

0.075% 的昆虫保幼激素类似物 738 和 0.005% 乐果混合使用, 前期由杀虫剂起降低虫口密度的作用, 残虫由于 JHA 的作用, 生殖能力受到影响, 从而后期对种群发展起到有效的控制作用。这一混用配方降低了两种药剂的使用浓度, 而效果却比 738 的原浓度(0.1%)为优, 对天敌的杀伤作用也低于乐果的原浓度(0.02%)^[42]。

20 世纪 70 年代初, Pettersson 曾报道麦二叉蚜属的雌蚜通过后胫节释放性信息素来引诱雄蚜。随后在蚜虫其他种类中也发现了性信息素, 多种蚜虫性信息素的成分相同, 仅比例不同。雌蚜分泌的性信息素为荆芥内酯和荆芥醇, 性信息素可以诱捕未成熟雌虫和雄虫, 减少越冬卵量, 降低次年的蚜虫基数。蚜虫性信息素能够吸引雄性草蛉, 对蚜虫种间性信息素的相互作用也有了更深一步的认识^[43]。

蚜虫从腹管分泌出的蚜虫报警信息素, 可对同种其他个体起到报警作用, 使周围其他蚜虫迅速逃离现场而免受伤害, 用于保护植物的驱避剂(反) β -法呢烯(E β F)就是许多蚜虫报警信息素的主要成分。田间试验表明, E β F 与农药、生物农药等配合使用可增加蚜虫移动性, 增加蚜虫与有毒化学物质和病原菌的接触几率, E β F 还能吸引瓢虫、食蚜蝇、寄生蜂等蚜虫天敌, 从而提高蚜虫的防治效果, 降低杀虫剂的用量, 有利于环境保护、食品安全和天敌保护。但是 E β F 是一种挥发性碳氢化合物且在空气中容易被氧化而失去防治蚜虫的效果, 人工合成 E β F 的类似物或衍生物非常复杂并且成本高, 在田间大范围使用不现实, 目前已从花旗松、柚子、青蒿、胡椒薄荷等植物中分离鉴定了 E β F 合成酶基因, 这些基因很可能是防治蚜虫的良好候选基因^[44]。在烟草中超表达青蒿 E β F 合成基因 *Aa β FS1* 或 *Aa β FS2* 使 E β F 排放量从 1.55 ng/(d·g) 到 4.65 ng/(d·g) 新鲜组织, 该转基因烟草可以击退桃蚜, 但不如预期强烈, 此外 E β F 转基因烟草还可以吸引天敌草蛉幼虫, 提供了吸引天敌防治蚜虫的策略^[45]。

4.5 多肽类防治

用含 0.5 nmol/ μ L 昆虫激肽类似物 K-Aib-1 的人工饲料喂豌豆蚜, 3 d 后豌豆蚜的死亡率达 90%~100%, 表明昆虫激肽类似物 K-Aib-1 是很有潜力的、选择性且环境友好型的新型杀虫剂^[46]。饲喂蚜虫肠结合肽 GBP3.1, 进行荧光信号检测显示肠结合肽 GBP3.1 结合到蚜虫中肠和后肠上皮细

胞, 阻止豌豆花叶病毒 PEMV 进入豌豆蚜虫的血腔, 提供了一个新的策略来减少由蚜虫介体传播的植物病毒^[47]。未来的研究工作可以将这两类蛋白质基因转入植物, 寻找新的途径来防治蚜虫产生的直接和间接的危害。

4.6 基因工程防治

培育抗虫转基因植物是一种安全、有效、经济的防治措施, 抗蚜植物基因工程的核心问题集中在抗蚜基因的筛选、转抗蚜植物植物的培育以及生物安全性。现已从微生物和植物中分离到了一些有效的抗蚜基因, 这些抗蚜基因大体可分为两类: 一类是特异性抗蚜基因, 如 *Nr*、*Vat*、*SdI*、*Ni*、*Mi*、*RAP1* 等基因, 抗性基因识别蚜虫效应蛋白后激发信号级联反应, 快速激活植物对蚜虫的防御反应; 另一类是广谱性抗蚜基因, 如细胞分裂素基因、蛋白酶抑制剂基因、植物外源凝集素基因等, 该类基因对蚜虫的作用没有专一性, 它们或者干扰蚜虫的生长发育, 或者影响蚜虫体内的营养吸收或生理代谢, 从而达到抗蚜效果。*Vat* 基因介导的甜瓜抗棉蚜在 3 d 内蚜虫繁殖力减少 80%~90%, *Mi-1* 介导的番茄抗马铃薯长管蚜在 10 d 内造成 100% 的致死率, *RAP1* 基因赋予苜蓿造成豌豆蚜重量迅速减轻并在 3 d 内死亡^[48-50]。在作物抗虫基因工程中广泛应用的植物凝集素基因(GNA)对蚜虫的抗性较强, 但是少数植物凝集素在天敌及哺乳动物肠胃中抑制酶降解, 产生毒害作用, 如二星瓢虫捕食取食转雪花莲凝集素 GNA 基因马铃薯的桃蚜导致生存期和繁殖力明显下降, 对生物链产生负面影响, 使其应用受到了限制^[51]。赵秀云等人首次报道利用重组表达半夏凝集素的植物内生真菌球毛壳菌 YY-11 有效控制桃蚜, 油菜幼苗在接种 45 d 后对蚜虫的抑制率 90%, 重组内生真菌在油菜茎和叶中长期定殖, 开启了植物内生真菌长效防治蚜虫的新途径^[52]。Goggin 发现番茄 ω -3-脂肪酸脱氢酶 *FAD7* 基因功能丢失后, 番茄增加了水杨酸含量和 PR4 表达水平, 减少了马铃薯长管蚜定居行为、生存率和繁殖力, *FAD7* 基因至少通过 SA 和 NPR1 两个途径增强了对蚜虫的抗性^[53]。多数抗性基因如 *Mi*、*Vat*、*AKR*、*Rag1*、*Rag2*、*Raso1* 基因属于 NBS-LRR 基因家族成员, 这些抗性基因包含一个典型的 R-gene 所具有的富含亮氨酸重复序列, 这些富含亮氨酸重复序列的抗虫基因和植物抗病基因有可能具有相似的作用

机制^[54-55]。

最近通过 RFLP、SSR、AFLP 和 RAPD 等辅助分子标记技术多个抗蚜基因或数量性状位点被定位在染色体上,如黄豆 *Rasol*、硬粒小麦 *RA-1*、节节麦 *Gb3*。目前大多数的研究工作都是将单一的抗蚜基因转入植物,例如 *GNA*、*ConA* 等基因,除非这种单一的抗蚜物质在植物内表达量非常高,使接触到的蚜虫全部死亡,否则容易使蚜虫产生耐受性,如棉蚜花几代时间完全适应了转 *Bt* 基因棉^[56]。为此,在实际应用中可以根据作用方式的不同,利用 CaMV35S 或 RSs1 启动子构建二价体或多价体并转入植物,结合田间测产试验,开发出适合商业化种植的新品种是防治蚜虫的根本措施,但是转基因植物对非靶标生物的生态安全也需深入研究。

RNAi(RNA interference)技术是目前用于鉴定昆虫功能基因的有效手段,同时在害虫生物防治中也有广阔的应用前景。有人采用注射 dsRNA 的方法来进行蚜虫防治,豌豆蚜被注射蚜虫唾液转录因子 *Coo2* 基因 dsRNA 后,在第 3 天死亡一半^[57]。豌豆蚜饲喂液泡 ATP 酶基因 dsRNA 后,vATPase 转录水平下降了 30%,死亡率明显增加^[58]。将桃蚜 *MpC002* 和 *Rack1* 基因的 RNAi 元件分别转到拟南芥和烟草上产生 siRNA,使得取食转基因拟南芥的桃蚜 *MpC002* 和 *Rack1* 的基因表达受到抑制下降高达 60%,减少了桃蚜后代的数量,但是对桃蚜的生存期没有影响^[59]。利用植物 RNAi 介导的抗性是在 RNA 杂交的基础之上,即使蚜虫发生了少量的核酸突变,也不会影响靶基因的沉默效果,不在宿主体内产生外源蛋白,可以避免环境和食品安全性问题。筛选合适的靶标基因是利用植物介导 RNAi 效应来防治蚜虫的关键,利用植物 RNAi 介导的抗性可以对蚜虫种间的防治效果做深入的研究,以达到安全、持久、高效防治蚜虫的目的。

5 生态调控

生态调控将植物-有害生物-天敌及周围环境作为一个整体,对生态系统及其植物-有害生物-天敌食物链的功能流进行合理的调节与控制,以达到有害生物治理的真正目的,即农业的可持续发展。通过间作、邻作、混作的方式实现植被种类的多样化,可以有效控制蚜虫种群密度,小麦与豌豆以 8:2 比例行间作对麦长管蚜控制及天敌引诱作用最佳,油

菜与小麦邻作模式可以控制小麦田 8 m 以内的麦蚜数量,有机桃园种植 70% 紫花苜蓿 + 30% 夏至草可以有效降低桃蚜、桃粉蚜、桃瘤蚜 3 种蚜虫的种群数量,合理安排作物的时空格局,增强整个农田系统的生物多样性,克服了天敌与蚜虫在发生时间上的脱节现象,增加了天敌控制蚜虫的稳定性和可持续性,合理的品种多样性能够协调作物间的竞争与互补关系、减轻蚜虫危害^[60-62]。缓释技术最大限度利用了蚜虫报警信息素及植物源挥发物的生态调控功能,有效提高了挥发物的持效期,Heuskin 利用 E- β -法尼烯制成海藻酸钠凝胶微球连续 3 个月有效引诱食蚜蝇,王光采用小麦间作油菜结合缓释甲基水杨酸显著降低麦长管蚜密度,增加瓢虫、寄生蜂等天敌丰富度,但是在研究挥发物对蚜虫生态调控功能的同时,也需要深入研究挥发物对作物主要害虫及次要害虫种群的影响^[63-64]。以群落生态学和景观生态学的理论为指导,在景观尺度上设计、规划农业生产体系中品种搭配、作物布局、植被结构等实现生态优化,并根据不同栽培制度对农田生物多样性的作用,农田生物多样性与蚜虫及其天敌种群数量的动态互作关系,通过改变大田周围非作物生境的植被组成及其他特征来改变农业生态系统中蚜虫与天敌的相互关系,如通过合理间作套种作物和蜜源植物,增加天敌食料和天敌庇护场所,优化生态环境,提高天敌对蚜虫的控制效能,最终达到持续控制蚜虫的目标。

6 展望

确保食品安全和气候变暖是目前全球农业面临的巨大挑战,蚜虫生活史复杂和极高繁殖率就要求构建科学实效的蚜虫监测和控制技术体系,用安全环保的绿色技术手段将蚜虫的蔓延危害尽早、尽快地控制在其发生的萌芽阶段。根据当地蚜虫发生发展气象生理指标和历年发生情况资料,基于吸虫塔等现代化设备构建蚜虫监测预警网络系统,为早期制定和布置防控措施提供依据。

随着科技的发展和资源的发掘,应加大力度从微生物代谢产物、植物源农药中筛选出高效、环境相容性好的新型药剂,利用生物工程技术培育抗蚜作物新品种和高毒力微生物农药,开展有利于农民实施的生物防治技术研究。在发展以保护利用天敌为主导作用的蚜虫综合治理中,因地制宜,尽量协调各种蚜虫防治技术措施进行最优化配合,以农业防治

为基础,生物防治为主,化学防治为辅的综合治理策略,实现农业的可持续发展。

参考文献

- [1] von Dohlen C D, Rowe C A, Heie O E. A test of morphological hypotheses for tribal and subtribal relationships of Aphidinae (Insecta: Hemiptera: Aphididae) using DNA sequences [J]. *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 2006,38(2):316 - 329.
- [2] Qiao G, Zhang G. Preliminary study of aphid diversity in China: taxonomic and geographic variation[C]// *Aphids in a New Millennium. Proceedings of the Sixth International Symposium on Aphids*, 2004:139 - 146.
- [3] Giordanengo P, Brunissen L, Rusterucci C, et al. Compatible plant-aphid interactions: how aphids manipulate plant responses[J]. *Comptes Rendus Biologies*, 2010,333(6):516 - 523.
- [4] Xia L, Ma Y, He Y, et al. GM wheat development in China: current status and challenges to commercialization[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2012,63(5):1785 - 1790.
- [5] Nault L. Arthropod transmission of plant viruses: a new synthesis[J]. *Annals of the Entomological Society of America*, 1997,90(5):521 - 541.
- [6] Simon S, Morel K, Durand E, et al. Aphids at crossroads: when branch architecture alters aphid infestation patterns in the apple tree[J]. *Trees-Structure and Function*, 2012,26:273 - 282.
- [7] Rahman M M, Sarker P K, Das B C. Effect of planting date on the incidence of eggplant aphid, *Aphis gossypii* Glover and yield of eggplant[J]. *Bangladesh Journal of Zoology*, 2012,39(2):187 - 194.
- [8] Tabasum S, Noorka I R, Afzal M, et al. Screening best adopted wheat lines against aphid (*Schizaphis graminum rondani*) population[J]. *Pakistan Entomologist*, 2012,34(1):51 - 53.
- [9] Mornhinweg D, Obert D, Carver B. Registration of eight six-rowed feed barley germplasm lines resistant to both russian wheat aphid and greenbug[J]. *Journal of Plant Registrations*, 2012,6(2):186 - 189.
- [10] Chang J, Cui J, Xue W, et al. Identification of molecular markers for a aphid resistance gene in sorghum and selective efficiency using these markers[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2012,11(7):1086 - 1092.
- [11] Ohnishi S, Miyake N, Takeuchi T, et al. Fine mapping of foxglove aphid (*Aulacorthum solani*) resistance gene Rasol in soybean and its effect on tolerance to *Soybean dwarf virus* transmitted by foxglove aphid[J]. *Breeding Science*, 2012,61(5):618 - 624.
- [12] Gash A F J. Wheat nitrogen fertilisation effects on the performance of the cereal aphid *Metopolophium dirhodum* [J]. *Agronomy*, 2012,2(1):1 - 13.
- [13] Boiteau G, Singh M, Lavoie J. Crop border and mineral oil sprays used in combination as physical control methods of the aphid-transmitted potato virus Y in potato[J]. *Pest Management Science*, 2009,65(3):255 - 259.
- [14] 李娟,安德荣. 捕杀特黄板对烟蚜及烟田蚜传病毒病防治效果的研究[J]. *中国烟草学报*, 2010,16(2):70 - 72.
- [15] 王冰,李克斌,尹姣,等. 模拟风雨对麦长管蚜自然种群发展的干扰作用[J]. *应用昆虫学报*, 2011,48(6):1646 - 1654.
- [16] 李晶晶,马罡,黄敏,等. 短期高温脉冲对瓜型棉蚜的抑制作用及其在防治中的应用[J]. *中国植保导刊*, 2011,31(7):10 - 13.
- [17] 楚桂芬,关祥斌,胡艳霞. 静电喷雾技术防治小麦蚜虫的效果调查[J]. *中国植保导刊*, 2012,31(12):45 - 46.
- [18] He Juan, Gao Huanhuan, Zhao Huiyan, et al. Effect of static magnetic fields (SMF) on the viability and fecundity of aphid *Sitobion avenae* (Homoptera: Aphididae) under laboratory conditions[J]. *Archives of Biological Sciences*, 2012,64(2):693 - 702.
- [19] Ateyyat M. Selectivity of four insecticides to woolly apple aphid, *Eriosoma lanigerum* (Hausmann) and its sole parasitoid, *Aphelinus mali* (Hald.) [J]. *World Applied Sciences Journal*, 2012,16(8):1060 - 1064.
- [20] Seagraves M P, Lundgren J G. Effects of neonicotinoid seed treatments on soybean aphid and its natural enemies[J]. *Journal of Pest Science*, 2012,85(1):125 - 132.
- [21] Pang Y P, Singh S K, Gao Y, et al. Selective and irreversible inhibitors of aphid acetylcholinesterases: steps toward human-safe insecticides[J]. *PLoS One*, 2009,4(2):e4349.
- [22] Sadeghi A, Van Damme E J M, Smaghe G. Evaluation of the susceptibility of the pea aphid, *Acyrtosiphon pisum*, to a selection of novel biorational insecticides using an artificial diet [J]. *Journal of Insect Science*, 2009,9:65.
- [23] Kang M A, Seo M J, Hwang I C, et al. Insecticidal activity and feeding behavior of the green peach aphid, *Myzus persicae*, after treatment with nano types of pyrifluquinazon[J]. *Journal of Asia-Pacific Entomology*, 2012,5(15):533 - 541.
- [24] Shan L T, Feng M G. Evaluation of the biocontrol potential of various *Metarhizium* isolates against green peach aphid *Myzus persicae* (Homoptera: Aphididae) [J]. *Pest Management Science*, 2010,66(6):669 - 675.
- [25] 曹卫平,冯书亮,王金耀,等. 白僵菌防治刺吸式口器害虫研究与应用进展[J]. *中国生物防治*, 2006,22(S1):129 - 134.
- [26] Diaz B M, Oggerin M, Lastra C C L, et al. Characterization and virulence of *Lecanicillium lecanii* against different aphid species[J]. *BioControl*, 2009,54(6):825 - 835.
- [27] Ye S D, Dun Y H, Feng M G. Time and concentration dependent interactions of *Beauveria bassiana* with sublethal rates of imidacloprid against the aphid pests *Macrosiphoniellasanborni* and *Myzus persicae* [J]. *Annals of Applied Biology*, 2005,146(4):459 - 468.

- [28] Asharani A, Manjunatha M, Naik M I, et al. Evaluation of fungal pathogen, *Fusarium semitectum* Berk and Ravenel against tobacco aphid under laboratory and greenhouse conditions[J]. Karnataka Journal of Agricultural Sciences, 2009,22(3):495-498.
- [29] 秦小萍,张亚平,杨美林,等. 蜡蚧轮枝菌 Km9803 代谢产物对蚜虫的毒杀作用[J]. 西北农业学报, 2009,18(1):159-161.
- [30] Kim S K, Kim Y C, Lee S, et al. Insecticidal activity of rhamnolipid isolated from *Pseudomonas* sp. EP-3 against green peach aphid (*Myzus persicae*) [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2010,59(3):934-938.
- [31] Grenier A M, Duport G, Pagès S, et al. The phytopathogen *Dickeya dadantii* (*Erwinia chrysanthemi* 3937) is a pathogen of the pea aphid[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2006,72(3):1956-1965.
- [32] Costechareyre D, Balmand S, Condemine G, et al. *Dickeya dadantii*, a plant pathogenic bacterium producing cyt-like entomotoxins, causes septicemia in the pea aphid *Acyrtosiphon pisum* [J]. PLoS One, 2012,7(1):e30702.
- [33] 王磊,张灼,欧晓昆,等. 细菌在蚜虫生物防治中的研究初报[J]. 广西农业科学, 2010,41(3):226-230.
- [34] Ban L, Ahmed E, Ninkovic V, et al. Infection with an insect virus affects olfactory behaviour and interactions with host plant and natural enemies in an aphid[J]. Entomologia Experimentalis et Applicata, 2008,127(2):108-117.
- [35] Pal N, Boyapalle S, Beckett R, et al. A baculovirus-expressed dicistrovirus that is infectious to aphids[J]. Journal of Virology, 2007,81(17):9339-9345.
- [36] Kim S R, Kim I, Kim I S. Evaluation of a pyrethrum emulsion prepared in food-acceptable components in controlling green peach aphid (*Myzus persicae*) [J]. Journal of the Korean Society for Applied Biological Chemistry, 2009,52(2):176-179.
- [37] Goławska S, Łukasik I. Antifeedant activity of luteolin and genistein against the pea aphid, *Acyrtosiphon pisum* [J]. Journal of Pest Science, 2012,12(1):1-8.
- [38] Yi F, Zou C, Hu Q, et al. The joint action of destruxins and botanical insecticides (rotenone, azadirachtin and paenolium) against the cotton aphid, *Aphis gossypii* Glover [J]. Molecules, 2012,17(6):7533-7542.
- [39] Holland J, Oaten H, Southway S, et al. The effectiveness of field margin enhancement for cereal aphid control by different natural enemy guilds[J]. Biological Control, 2008,47(1):71-76.
- [40] 杨洪,袁瑞,张帆. 异色瓢虫对三种杀虫剂的抗性选育[J]. 植物保护学报, 2011,38(5):479-480.
- [41] Thanassouloupoulos A C. Some effects of the insect growth regulator ZR-777 on Bean aphid *Aphis fabae* (Scop.) [J]. Zeitschrift für Angewandte Entomologie, 1974,77(1-4):171-175.
- [42] 庄建国,孙庆玲. 昆虫保幼激素类似物 738 与乐果混合使用防治蔬菜蚜虫的效果[J]. 昆虫知识, 1981(1):29-31.
- [43] Koczor S, Szentkirályi F, Birkett M A, et al. Attraction of *Chrysoperla carnea* complex and *Chrysopa* spp. lacewings (Neuroptera: Chrysopidae) to aphid sex pheromone components and a synthetic blend of floral compounds in Hungary [J]. Pest Management Science, 2010,66(12):1374-1379.
- [44] Yu X, Pickett J, Ma Y, et al. Metabolic engineering of plant-derived (e)- β -farnesene synthase genes for a novel type of aphid-resistant gm crop plants[J]. Journal of Integrative Plant Biology, 2012,54(5):282-299.
- [45] Yu X, Jones H D, Ma Y, et al. (E)- β -Farnesene synthase genes affect aphid (*Myzus persicae*) infestation in tobacco (*Nicotiana tabacum*) [J]. Functional & Integrative Genomics, 2012,12:207-213.
- [46] Smagghe G, Mahdian K, Zubrzak P, et al. Antifeedant activity and high mortality in the pea aphid *Acyrtosiphon pisum* (Hemiptera: Aphidae) induced by biostable insect kinin analogs[J]. Peptides, 2010,31(3):498-505.
- [47] Liu S, Sivakumar S, Sparks W O, et al. A peptide that binds the pea aphid gut impedes entry of *Pea enation mosaic virus* into the aphid hemocoel[J]. Virology, 2010,401(1):107-116.
- [48] Thomas S, Mistral P, Chareyron V, et al. Marker assisted selection of genes and QTLs for resistance combinations to *Aphis gossypii* in melon[J]. Centre de Recherche d'Avignon, 2008,5:471-476.
- [49] Stewart S A, Hodge S, Ismail N, et al. The *RAP1* gene confers effective, race-specific resistance to the pea aphid in *Medicago truncatula* independent of the hypersensitive reaction[J]. Molecular Plant-Microbe Interactions, 2009,22(12):1645-1655.
- [50] Godzina M, Staniaszek M, Kielkiewicz M. Relevance of the Mi23 marker and the potato aphid biology as indicators of tomato plant (*Solanum lycopersicum* L.) resistance to some pests[J]. Vegetable Crops Research Bulletin, 2010,72(1):25-33.
- [51] Birch A N E, Geoghegan I E, Majerus M E N, et al. Tri-trophic interactions involving pest aphids, predatory 2-spot ladybirds and transgenic potatoes expressing snowdrop lectin for aphid resistance[J]. Molecular Breeding, 1999,5(1):75-83.
- [52] Qi G, Lan N, Ma X, et al. Controlling *Myzus persicae* with recombinant endophytic fungi *Chaetomium globosum* expressing *Pinellia ternata* agglutinin[J]. Journal of Applied Microbiology, 2011,110(5):1314-1322.
- [53] Avila C A, Arévalo-Soliz L M, Jia L, et al. Loss of function of fatty acid desaturase7 in tomato enhances basal aphid resistance in a salicylate-dependent manner[J]. Plant Physiology, 2012,158(4):2028-2041.
- [54] Azhaguvel P, Rudd J C, Ma Y, et al. Fine genetic mapping of greenbug aphid-resistance gene *Gb3* in *Aegilops tauschii* [J]. Theoretical and Applied Genetics, 2012,124(3):555-564.

参考文献

- [1] 明艳林,李梅,郑国华. 建兰花叶病毒研究进展[J]. 福建农业学报, 2005,20(1):30-33.
- [2] 王钰丽,李凡,李正跃,等. 侵染兰花引起坏死斑症状的病毒种类鉴定[J]. 云南农业大学学报, 2007,22(2):222-224.
- [3] 明艳林,郑国华,李梅. 建兰花叶病毒厦门分离物的鉴定及其抗血清的制备与应用[J]. 植物病理学报, 2005,35(4):366-369.
- [4] Wong S M, Mahtani P H, Lee K C, et al. *Cymbidium mosaic potexvirus* RNA: complete nucleotide sequence and phylogenetic analysis[J]. Archives Virology, 1997,142(2):383-391.
- [5] Chapman S, Hills G, Watts J, et al. Mutational analysis of the coat protein gene of *Potato virus X*: effects on virion morphology and viral pathogenicity[J]. Virology, 1992,191(1):223-230.
- [6] 明艳林,郑金龙,郑国华,等. 兰花抗病毒基因工程研究进展[J]. 亚热带植物科学, 2010,39(1):92-96.
- [7] Chang C, Chen Y C, Hsu Y H, et al. Transgenic resistance to *Cymbidium mosaic virus* in *Dendrobium* expressing the viral capsid protein gene[J]. Transgenic Research, 2005,14(1):41-46.
- [8] Chia T F, Chan Y S, Chua N H. Characterization of *Cymbidium mosaic virus* coat protein gene and its expression in transgenic tobacco plants[J]. Plant Molecular Biology, 1992,18(6):1091-1099.
- [9] Lim S H, Ko M K, Lee S J, et al. *Cymbidium mosaic virus* coat protein gene in antisense confers resistance to transgenic *Nicotiana occidentalis*[J]. Molecules and Cells, 1999,9(6):603-608.
- [10] Tennant P F, Gonsalves C, Ling K S, et al. Differential protection against *Papaya ringspot virus* isolates in coat protein gene transgenic papaya and classically cross-protected papaya [J]. Phytopathology, 1994,84:1359-1366.
- [11] Vlugt V D, René A A, Goldbach R W. Tobacco plants transformed with the *potato virus Y^N* coat protein gene are protected against different PVY isolates and against aphid-mediated infection[J]. Transgenic Research, 1993,2(2):109-114.
- [12] Sherpa A R, Hallan V, Pathak P, et al. Characterization of the coat protein gene of *Cymbidium mosaic virus* isolates from India[J]. Journal of Phytopathology, 2006, 154(5):275-280.
- [13] 刘长龙,袁世山. 单股正链 RNA 病毒基因组 3'非编码区功能[J]. 中国动物传染病学报, 2010,18(3):76-81.
- [14] Cheng J H, Ding M P, Hsu Y H, et al. The partial purified RNA-dependent RNA polymerases from bamboo mosaic potexvirus and potato virus X infected plants containing the template-dependent activities[J]. Virus Research, 2001,80(1-2):41-52.
- [15] Huang C Y, Huang Y L, Meng M, et al. Sequences at the 3' untranslated region of bamboo mosaic potexvirus RNA interact with the viral RNA-dependent RNA polymerase[J]. Journal of Virology, 2001,75(6):2818-2824.
- [16] 周国辉,陈晓琴,李梅辉,等. 广东地区两种兰花病毒病害的分子鉴定及检测[J]. 中国病毒学, 2004,19(2):149-152.
- [17] Moles M, Delatte H, Farreyrol K, et al. Evidence that *Cymbidium mosaic virus* (CymMV) isolates divide into two subgroups based on nucleotide diversity of coat protein and replicase genes[J]. Archives of Virology, 2007,152(4):705-715.
- ~~~~~
- (上接 12 页)
- [55] Liu X L, Yang X F, Wang C Y, et al. Molecular mapping of resistance gene to English grain aphid (*Sitobion avenae* F.) in *Triticum durum* wheat line C273[J]. Theoretical and Applied Genetics, 2011,124(2):287-293.
- [56] Xue K, Wang X Y, Huang C H, et al. Stylet penetration behaviors of the cotton aphid *Aphis gossypii* on transgenic Bt cotton[J]. Insect Science, 2009,16(2):137-146.
- [57] Mutti N S, Park Y, Reese J C, et al. RNAi knockdown of a salivary transcript leading to lethality in the pea aphid, *Acyrtosiphon pisum*[J]. Journal of Insect Science, 2006,6:38-45.
- [58] Whyard S, Singh A D, Wong S. Ingested double-stranded RNAs can act as species-specific insecticides [J]. Insect Biochemistry and Molecular Biology, 2009,39(11):824-832.
- [59] Pitino M, Coleman A D, Maffei M E, et al. Silencing of aphid genes by dsRNA feeding from plants[J]. PLoS One, 2011,6(10):e25709.
- [60] 董民,张顶武,杜相革. 有机桃园天敌与蚜虫的互作关系及生态调控措施[J]. 植物保护学报, 2011,38(4):327-332.
- [61] 解海翠,陈巨莲,程登发,等. 麦田间作对麦长管蚜的生态调控作用[J]. 植物保护, 2012,38(1):50-54.
- [62] 费晓东,李川,张青文,等. 油菜-小麦轮作模式对麦蚜种群动态的影响[J]. 植物保护学报, 2011,38(4):339-343.
- [63] Wang G, Cui L L, Dong J, et al. Combining intercropping with semiochemical releases: optimization of alternative control of *Sitobion avenae* in wheat crops in China[J]. Entomologia Experimentalis et Applicata, 2011,140(3):189-195.
- [64] Heuskin S, Lorge S, Lognay G, et al. A semiochemical slow-release formulation in a biological control approach to attract hoverflies[J]. Journal of Environment and Ecology, 2012,3(1):72-85.