

水杨酸甲酯和寡糖·链蛋白对麦蚜和瓢虫的生态作用

刘佳惠¹, 王康¹, 战一迪¹, 曹跃文², 刘勇^{1*}

(1. 山东农业大学植物保护学院, 泰安 271018; 2. 日照市农产品质量检测中心, 日照 276800)

摘要 为研发小麦蚜虫绿色防控新技术, 比较了虫害诱导植物挥发物水杨酸甲酯海藻酸钠缓释球(MeSA)和植物免疫激发子寡糖·链蛋白(OAP)以及二者共同处理对麦蚜及其天敌瓢虫种群动态和数量的影响。结果表明: 水杨酸甲酯、寡糖·链蛋白和二者共同处理对麦蚜以及瓢虫的种群发生趋势无影响, 但可以显著降低麦蚜无翅蚜的种群数量; 3种处理中水杨酸甲酯对瓢虫有极显著吸引效果; 不同处理对有翅蚜数量的影响存在一定的差异, 在2018年3种处理均可以显著降低麦蚜有翅蚜的数量, 而2019年OAP及其与MeSA混合处理可显著降低有翅蚜数量, 提高小麦的产量。本研究结果可为我国冬小麦生产中增产、减药提供一定的依据。

关键词 虫害诱导植物挥发物; 植物免疫激发子; 麦蚜; 瓢虫; 生态作用; 产量

中图分类号: S 435.122 **文献标识码:** A **DOI:** 10.16688/j.zwbh.2019301

Ecological functions of the slow release MeSA alginate bead combining with oligosaccharins · plant activator protein on wheat aphids and their coccinellids natural enemies

LIU Jiahui¹, WANG Kang¹, ZHAN Yidi¹, CAO Yuewen², LIU Yong^{1*}

(1. College of Plant Protection, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China;

2. Rizhao Agricultural Product Quality Inspection Center, Rizhao 276800, China)

Abstract To explore the green prevention and control technology of wheat aphids, the ecological functions of the slow release of herbivore-induced plant volatile methyl salicylate alginate bead (MeSA) combining with plant defence activator oligosaccharins · plant activator protein (OAP) on the population dynamics and the abundance of wheat aphids and their coccinellid natural enemies were investigated. The results showed that the MeSA, OAP and MeSA combining with OAP had no effect on population dynamics of aphid and coccinellids. It could significantly reduce the number of wingless aphid and attract the coccinellids which plays an important role in controlling wheat aphids. In 2018, MeSA, OAP and their interaction could significantly reduce the number of winged aphid, while in 2019, only OAP and mixture of OAP and MeSA could significantly reduce the number of winged aphid, increase the wheat yield. We suggested that the application of MeSA alginate bead and OAP in the fields could provide a basis for increasing production and reducing application of chemical pesticides in winter wheat production in China.

Key words herbivore-induced plant volatile; oligosaccharins · plant activator protein; wheat aphids; coccinellids; ecological function; yield

小麦是最主要的粮食作物之一, 麦长管蚜 *Sitobion miscanthi* 和禾谷缢管蚜 *Rhopalosiphum padi* 是小麦生产的主要害虫。它们既能刺吸小麦植株汁液, 又可分泌蜜露降低小麦的光合能力; 同时, 还能

传播小麦病毒, 造成小麦严重减产^[1-4]。

异色瓢虫 *Harmonia axyridis* 和龟纹瓢虫 *Propylea japonica* 是麦田控制小麦蚜虫为害的捕食性天敌昆虫优势种。直至目前, 麦蚜的防治主要

收稿日期: 2019-06-17 修订日期: 2019-08-05

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFD0200900)

* 通信作者 E-mail: liuyong@sdau.edu.cn

依赖于化学合成农药。由于小麦种植面积大,蚜虫发生面积每年 1 460 万 hm^2 以上。化学农药的大量使用必然会带来杀伤天敌、破坏生物多样性及影响人类健康等诸多问题^[5]。瓢虫因其高捕食力和广适应性已被作为一种重要的生物防治天敌昆虫,广泛应用于农业生产^[6-7]。因此,研发基于生态调控和生物防治的麦蚜控制新技术,保护自然天敌,减少化学农药使用,是保障生态环境和人类健康的迫切需要。

植物在遭受植食性昆虫攻击后,能释放虫害诱导植物挥发物 (herbivore-induced plant volatiles, HIPVs), HIPVs 在调控害虫与天敌的行为,激发植物的防御能力中具有重要作用^[8-9]。水杨酸甲酯 (methyl salicylate, MeSA) 既是麦蚜取食诱导产生的小麦挥发物组分,同时也是植物免疫响应过程中的一个关键信号^[1,10]。目前,MeSA 被广泛应用于多种农业生态系统中,如啤酒花^[11]、大豆^[12]、小麦^[13]、蔓越莓^[14]、葡萄^[15]和草莓^[16]等,通过激发植物防御反应及操纵昆虫的行为,来提高植物对害虫的抵御能力。研究表明,MeSA 可以降低麦长管蚜田间平均和最大密度^[13]以及聚集程度^[17-18],同时还可以吸引其天敌异色瓢虫 *H. axyridis*、燕麦蚜茧蜂 *Aphidius avenae*^[19]和大灰食蚜蝇 *Syrphus corollae*^[20]。

除了虫害诱导植物挥发物外,植物还可以通过自身免疫来抵御植食性昆虫以及病原菌的侵害。植物免疫通常是由激发子 (activator) 诱导的。激发子主要包括蛋白、寡糖、生物代谢产物或有机活性小分子,它们能激活植物体内与防御有关的信号途径或反应类型,如信号通路、超敏反应 (HR)、活性氧 (ROS) 和活性氮 (RON) 的反应,诱导植物对病原体和植食性昆虫产生抗性^[21]。激发子诱导的植物抗性可减少害虫种群数量,降低其繁殖率^[22-24]。

寡糖·链蛋白 (oligosaccharins·plant activator protein, OAP) 是一类植物免疫蛋白制剂,由来源于极细链格孢 *Alternaria tenuissima* 的主效蛋白激发子 PeaT1 和 Hrip1 组成。蛋白激发子 PeaT1 和 Hrip1 能提高植物体内相关防卫基因的表达,诱导植物抗逆性,提高多种作物的产量与品质,如烟草^[25]、番茄^[26]、棉花^[27]、水稻^[28]以及拟南芥^[29]等。在麦田喷施 OAP,发现其对小麦黄花叶病毒病^[24]、小麦纹枯病、白粉病和叶锈病有诱导抗性作用^[30]。而其是否会影响小麦蚜虫及天敌尚缺乏系统研究。

因 MeSA 及 OAP 可激发小麦植株抵御病虫害,本文尝试将 MeSA 缓释剂和 OAP 混合施用,一方面旨在明确 MeSA、OAP 及二者共同处理对麦蚜及其捕食性天敌瓢虫种群建立和发展的影响;另一方面运用数量食物网的方法,分析不同处理条件下麦蚜及其天敌瓢虫数量及比例的变化,以期拓展害虫防治新理论,建立小麦害虫绿色防控新技术。

1 材料与方法

1.1 试验材料

MeSA 为天津市凯通化学试剂有限公司生产,纯度为 99.5%。6% OAP 是由中国农业科学院植物保护研究所杨秀芬研究员馈赠。试验所用黄板购于沧州佳和生物科技有限公司。

1.2 试验设计

试验地点在山东省德州市夏津县郑保屯镇万亩小麦田 (36°59'N, 115°50'E), 试验地面积为 18 m × 330 m。小麦分别于 2017 年 10 月 16 日以及 2018 年 10 月 18 日播种,品种为‘济麦 22’,行间距为 20 cm。整个试验期间未使用化学农药。

试验共设置 3 个处理,分别为 OAP 处理、MeSA 缓释球处理、OAP 与 MeSA 缓释球共同处理。另设空白对照。重复 3 次。小区面积为 10 m × 10 m,小区间隔 10 m。每个处理小区随机排列。位于麦田边缘的小区设置 4 m 保护行。

1.3 OAP 和 MeSA 施用方法及麦蚜、瓢虫田间调查方法

OAP 和 MeSA 缓释球分别于 2018 年 4 月 8 日和 2019 年 4 月 21 日开始喷施和释放。MeSA 以自制的直径为 6 mm 的海藻酸钠缓释球释放,该缓释球可至少均匀挥发 15 d,挥发速率约为 2.37 $\mu\text{L}/\text{d}$ ^[20]。每个小区放置缓释球 10 g (约含纯 MeSA 3.3 mL)。缓释球每 14 d 更换 1 次。6% OAP 稀释 1 000 倍后,每 14 d 喷施 1 次。

麦蚜主要有麦长管蚜及禾谷缢管蚜,有翅蚜采用黄板 (20 cm × 25 cm) 诱集。将 1 张黄板悬挂于小区中央,高于小麦植株 20 cm。无翅蚜采用对角线 5 点取样法调查,每点 50 株,当蚜量超过百株 500 头时,减少为 20 株,统计百株蚜量。瓢虫主要有异色瓢虫及龟纹瓢虫,用黄盆诱集。黄盆 (直径 26 cm, 高 10 cm) 为聚乙烯材质,固定在小麦植株上方

20 cm处,每小区固定 1 个,黄盆内注入总容量 2/3 左右的清水,并加入适量的洗洁精。MeSA 缓释球,以纱网置于黄盆下方。将黄盆中诱集的瓢虫置于 75%乙醇中,带回实验室鉴定计数。2018 年 4 月 21 日开始调查至 6 月 3 日结束,即从小麦挑旗期开始到小麦灌浆末期结束,每周调查 1 次,2019 年较 2018 年调查推迟一周。

1.4 小麦产量测定

在小麦成熟期选取长势均匀一致的区域,每小区划定 3 m²,人工收割、脱粒、自然风干后称量,计算产量。

1.5 数据分析

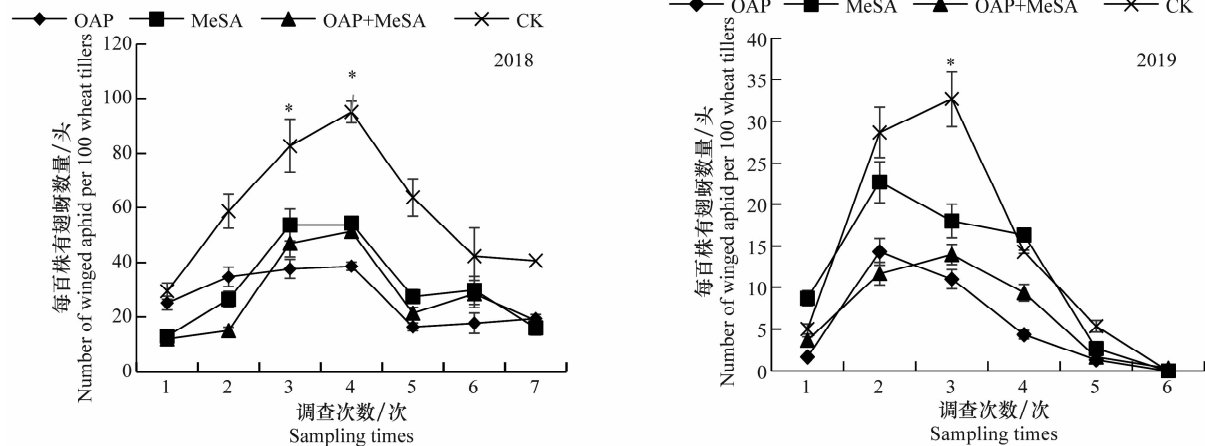
数据采用 SPSS 19.0 软件分析。小区间的差异性比较采用方差分析(ANOVA)和 Duncan 氏多重比较。食物网分析参照 Alhmedi 等^[31]的方法,以 Wolfram Mathematica 11.0 进行。

2 结果与分析

2.1 MeSA 和 OAP 对麦蚜发生动态的影响

2.1.1 MeSA 和 OAP 对有翅蚜发生动态的影响

从图 1 可以看出,麦蚜从调查初期即挑旗期时开始数量不断上升,一直到小麦扬花期时达到高峰,然后在小麦灌浆乳熟期麦蚜数量持续下降。在整个调查期间,处理区与对照区麦蚜的种群发生动态基本一致,MeSA 和 OAP 以及二者共同处理区蚜量类似且数量一直低于对照区,MeSA 和 OAP 虽然降低了麦蚜有翅蚜的种群数量,但对有翅蚜的种群发生动态无影响。通过对调查数据进行统计分析,2018 年第 3 次、第 4 次调查时处理区和对照区蚜量差异达到显著水平($F=5.962, df=3, P=0.0195$),2019 年第 3 次调查时,对照区有翅蚜种群数量显著大于各处理区($F=5.847, df=3, P=0.0205$)。



OAP: 寡糖·链蛋白; MeSA: 水杨酸甲酯; CK: 对照; *表示该次调查处理区与对照区差异显著($P<0.05$)。下同
OAP: Oligosaccharins·plant activator protein; MeSA: Methyl salicylate; CK: Control; * indicates significant difference ($P<0.05$) between treatment and control. The same applies below

图 1 寡糖·链蛋白和水杨酸甲酯不同处理方式下有翅麦蚜的种群动态

Fig. 1 Population dynamics of winged aphid in different treatments of oligosaccharins · plant activator protein and methyl salicylate

2.1.2 MeSA 和 OAP 对无翅蚜种群动态的影响

从图 2 可以看出无翅蚜的发生动态与有翅蚜相似,不同处理方式下麦蚜无翅蚜种群数量的时序变化趋势基本一致,对照小区百株蚜量一直处于最高水平,寡糖·链蛋白处理的小区刚开始无翅蚜很多,后来数量减少,而水杨酸甲酯处理的小区在前期麦蚜数量一直很少,而到小麦生长后期开始增多。二者共同处理的小区麦蚜数量介于二者之间。无翅蚜在 2018 年第 4 次调查($F=7.518, df=3, P=0.0103$)以及 2019 年第 2 次($F=7.42, df=3, P=0.0107$)和第 3 次调查($F=4.911, df=3, P=$

0.032)时,处理区和对照区蚜量差异达到显著水平,表明 3 个处理均可以在无翅蚜大发生时降低无翅蚜种群数量。

2.2 MeSA 和 OAP 对麦蚜及瓢虫种群数量的影响

2.2.1 MeSA 和 OAP 对麦蚜有翅蚜种群数量的影响

从图 3 可以看出,2018 年有翅蚜全年发生总量:对照区 412 头>水杨酸甲酯处理区 220 头>二者共同处理区 194 头>寡糖·链蛋白处理区 189 头。通过对调查数据进行统计分析,发现 MeSA、OAP 处理以及二者共同处理相较于对照区麦蚜有

翅蚜的数量均显著降低($\text{MeSA}: F=4.284, df=3, P=0.049$; $\text{OAP}: F=4.687, df=3, P=0.041$; $\text{OAP}+\text{MeSA}: F=7.580, df=3, P=0.011$)。

2019 年有翅蚜发生量较少,3 种处理有翅蚜量均低于对照区,含有 OAP 的处理其有翅蚜数量显著低于 MeSA 单独处理和对照($F=4.532, df=3, P=0.049$)。

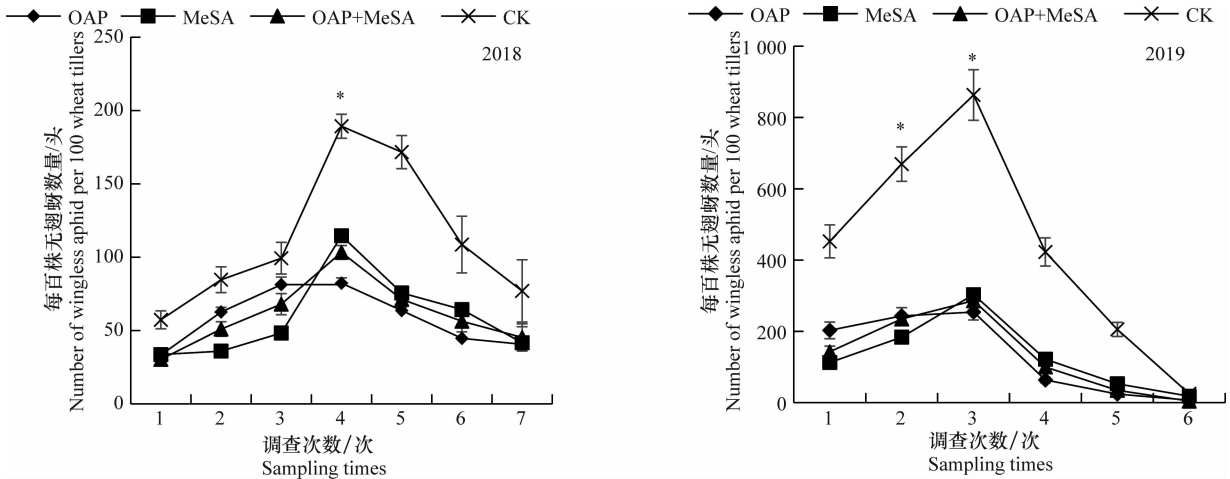


图 2 寡糖·链蛋白和水杨酸甲酯不同处理方式下无翅麦蚜的种群动态

Fig. 2 Population dynamics of wingless aphid in different treatments of oligosaccharins · plant activator protein and methyl salicylate

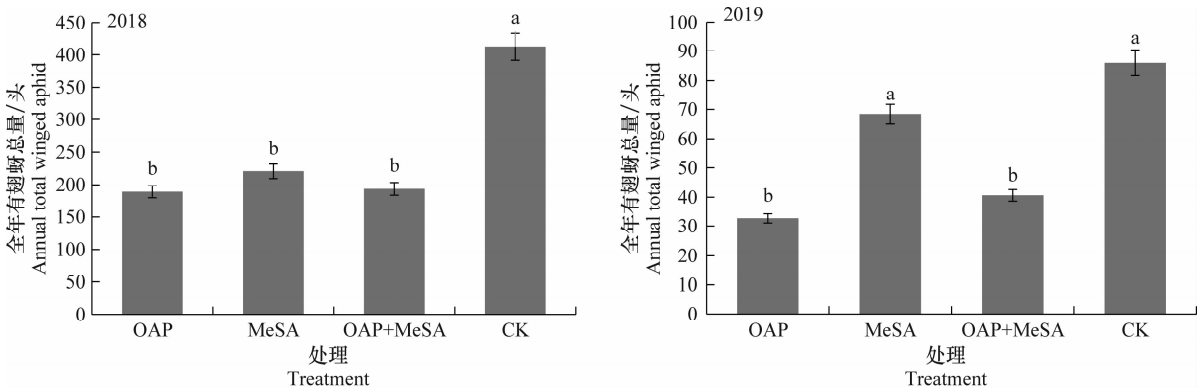


图 3 寡糖·链蛋白和水杨酸甲酯不同处理方式下麦蚜有翅蚜的数量

Fig. 3 Number of winged aphids in different treatments of oligosaccharins · plant activator protein and methyl salicylate

2.2.2 MeSA 和 OAP 对麦蚜无翅蚜种群数量的影响

MeSA、OAP 处理以及二者共同处理,在 2018 年($\text{MeSA}: F=4.329, df=3, P=0.042$; $\text{OAP}: F=4.608, df=3, P=0.032$; $\text{OAP}+\text{MeSA}: F=4.192, df=3, P=0.048$)和 2019 年($\text{MeSA}: F=4.422, df=3, P=0.048$; $\text{OAP}: F=4.400, df=3, P=0.049$; $\text{OAP}+\text{MeSA}: F=4.493, df=3, P=0.047$)皆可显著降低无翅蚜的种群数量(图 4)。

2.2.3 MeSA 和 OAP 对瓢虫种群数量的影响

从图 5 中可以看出,MeSA 处理以及 MeSA 与 OAP 共同处理区的瓢虫量在 2018 年($\text{MeSA}: F=$

$17.599, df=3, P<0.01$; $\text{OAP}+\text{MeSA}: F=19.290, df=3, P<0.01$)和 2019 年($\text{MeSA}: F=16.890, df=3, P<0.01$; $\text{OAP}+\text{MeSA}: F=18.125, df=3, P<0.01$)显著高于其他处理。虽然 SPSS 分析得出 OAP 单独使用 2 年间对瓢虫种群数量无显著影响(2018: $F=0.849, df=3, P=0.366$; 2019: $F=0.164, df=3, P=0.690$),但是 2019 年 OAP 处理区的瓢虫量也较对照区高。

2.3 MeSA 和 OAP 对瓢虫及麦蚜营养层关系的数量食物网分析

图 6 上方框分别代表异色瓢虫、龟纹瓢虫的丰富度,下方框代表不同处理下麦蚜的丰富度;楔形三

角的宽度代表不同处理下的瓢虫比例。由图 6 可知,对照区麦蚜的累计种群密度远大于其他 3 种处理,瓢虫在麦田的优势种群是异色瓢虫和龟纹瓢虫,水杨酸甲酯处理的小区瓢虫量显著高于没有水杨酸

甲酯处理的小区,说明 MeSA 处理以及 MeSA 与 OAP 二者共同处理不仅可以降低蚜虫的数量,而且可以吸引蚜虫的捕食性天敌瓢虫。

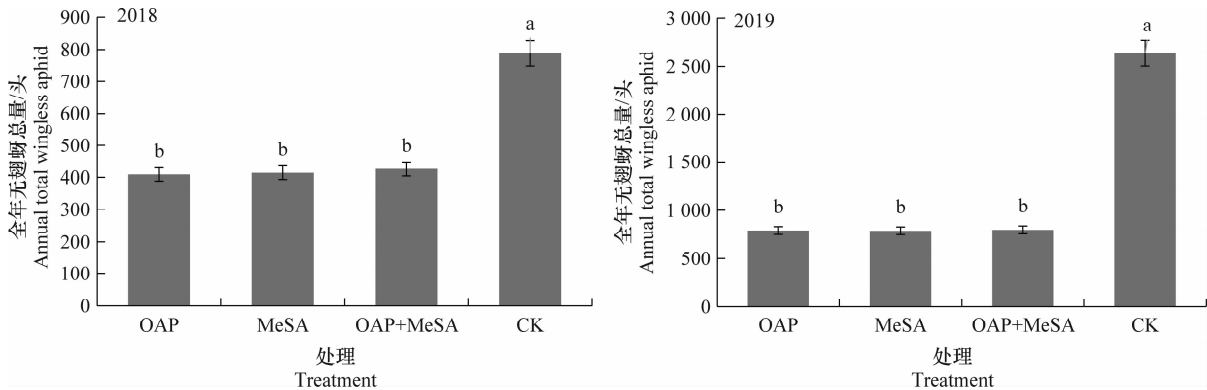


图 4 寡糖·链蛋白和水杨酸甲酯不同处理方式下麦蚜无翅蚜的数量

Fig. 4 Number of wingless aphids in different treatments of oligosaccharins · plant activator protein and methyl salicylate

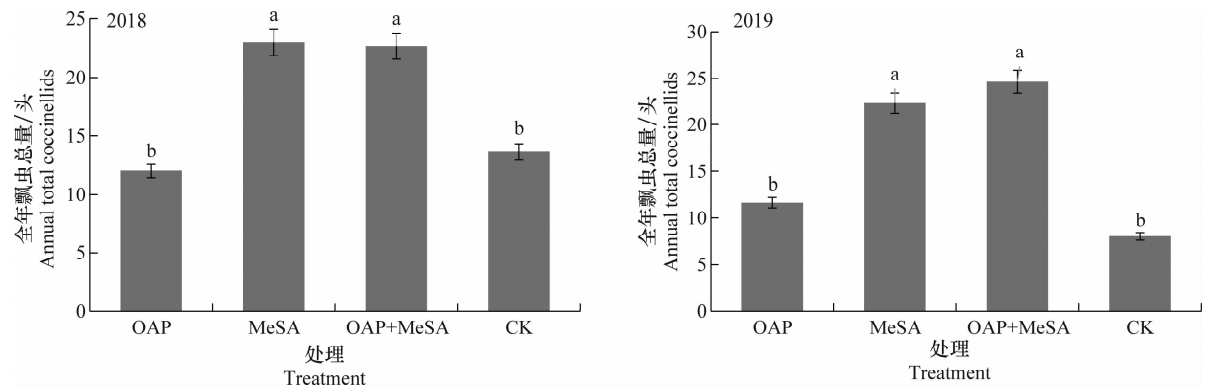


图 5 寡糖·链蛋白和水杨酸甲酯不同处理方式下瓢虫的数量

Fig. 5 Number of coccinellids in different treatments of oligosaccharins · plant activator protein and methyl salicylate

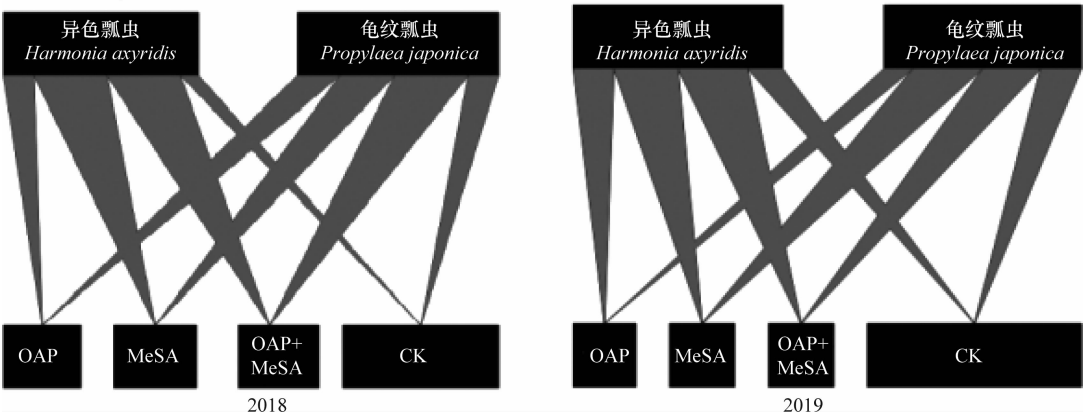


图 6 寡糖·链蛋白和水杨酸甲酯不同处理下瓢虫与麦蚜种群营养层关系的数量食物网分析

Fig. 6 Quantitative food web graphical presentation of trophic interactions between coccinellids and wheat aphids under different treatments of oligosaccharins · plant activator protein and methyl salicylate

2.4 MeSA 和 OAP 对小麦产量的影响

虽然从统计分析角度得出 3 种处理对产量没有

显著性影响 ($P < 0.05$),但是从产量的数值来看,与对照相比 3 种处理产量均有提高(图 7)。2018 年

OAP 处理、MeSA 处理以及 MeSA 与 OAP 二者共同处理相较于对照组来说分别增产了 8.38%、1.34%、18.45%，2019 年产量与 2018 年相似，OAP 处理、MeSA 处理以及 MeSA 与 OAP 二者共同处理相较于对照组来说分别增产了 10.84%、2.00%、

18.89%。二者混合施用较 MeSA 单独施用在 2018 年和 2019 年分别增产了 16.9%和 16.6%，较 OAP 单独施用分别增产了 9.3%和 7.3%，从增产幅度来看 MeSA 与 OAP 二者共同处理>OAP 处理>MeSA 处理。

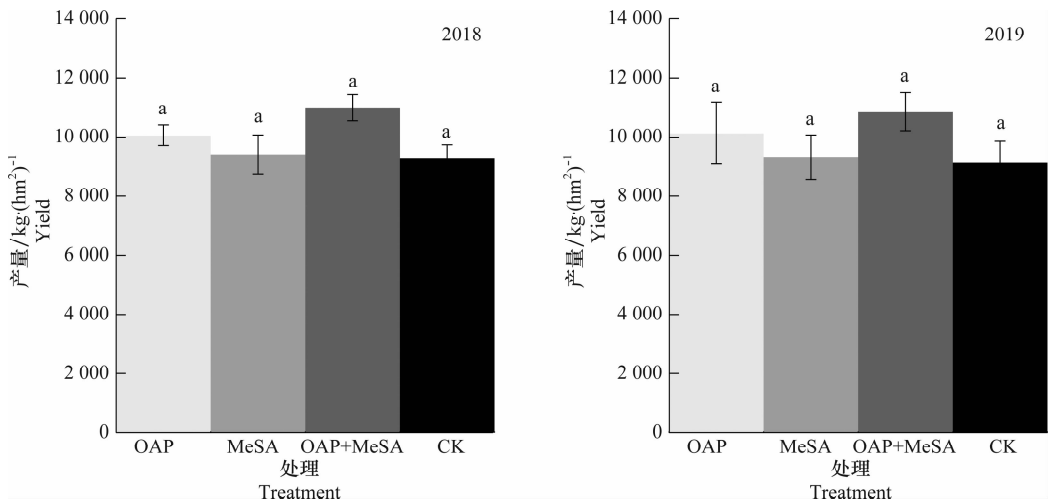


图 7 寡糖·链蛋白和水杨酸甲酯不同处理方式下小麦的产量

Fig. 7 Wheat yield in different treatments of oligosaccharins · plant activator protein and methyl salicylate

3 讨论

研究表明,施用含量为 2.5 mL 以及 10 mL 的 MeSA 海藻酸钠缓释球均可以显著降低麦田中麦长管蚜的数量,但是含量为 10 mL 时其控害效果更好^[20],所以我们选用 10 mL 的 MeSA 进行试验。MeSA 在自然条件易挥发,我们研制的 MeSA 海藻酸钠缓释球在室内的挥发速率为 2.37 $\mu\text{L}/\text{d}$,且有至少 15 d 的均匀挥发时间^[20]。虽然本技术已经成功地应用于田间试验,但其挥发速率可能受到温度、相对湿度和风速及风向的影响。据报道,当相对湿度达到 85%以上时,海藻酸盐缓释球的挥发速率会受到限制^[32]。

黄淮海冬麦区小麦蚜虫主要有麦长管蚜和禾谷缢管蚜,其发生期及为害部位略有不同。与过去研究不同的是,本试验将 2 种蚜虫作为一个整体调查,能更客观地比较 3 种不同处理方式对麦蚜及捕食性天敌瓢虫的作用。

通过大田试验可以看出,MeSA 海藻酸钠缓释球能显著降低麦田中无翅蚜的数量,同时还能吸引蚜虫的自然天敌瓢虫,这与前人对释放纯 MeSA 的研究结果类似^[33-34]。MeSA 对于有翅蚜的影响,两年的试验结果略有差异,我们推测这可能是由于

2019 年麦蚜有翅蚜量发生量较少,MeSA 以及 MeSA 和 OAP 二者混合施用尚未完全发挥作用。2019 年 5 月底麦蚜数量急剧降低可能是由于此时麦田出现了大量寄生蜂,且田间僵蚜数量急剧升高,导致蚜虫被有效控制。

研究表明由激发子激发的植物系统获得抗性 (system acquired resistance, SAR) 会降低桃蚜 *Myzus persicae* 的繁殖率^[35],抑制甜菜夜蛾 *Spodoptera exigua* 的生长发育^[36]。OAP 作为植物免疫激发子,可以有效降低萝卜蚜 *Lipaphis erysimi* 后代中有翅蚜的分化数量^[37],而且能够显著提高小麦植株的生长速率和抗旱性^[28]。OAP 处理导致的蚜虫种群数量降低也许与小麦抗逆性增加有关,可能是其诱导了与植物防御反应相关的酶类包括过氧化物酶 (POD)、几丁质酶、 β -1,3-葡聚糖酶、脂氧合酶 (LOX)、超氧化物歧化酶 (SOD)、多酚氧化酶 (PPO) 和苯丙氨酸解氨酶 (PAL) 等的活性增加,具体机制有待进一步深入研究。

作为植物免疫响应过程中的关键信号,MeSA 在驱避蚜虫的同时还能吸引麦蚜的天敌,OAP 可以提高植物的抗逆性。通过调查数据发现,MeSA 和 OAP 以及二者混合施用可以降低麦田中蚜虫的数量,虽然 MeSA 和 OAP 混合施用会增加一定的成

本,且对麦蚜的防效与二者单独使用无显著差异,但是可以大幅度提高小麦的产量,降低麦蚜的数量,减少杀虫剂的使用。其具体增产机制,尚需系统研究。

参考文献

- [1] 刘勇. 小麦-麦蚜-天敌互作关系研究[D]. 杭州:浙江大学, 2001.
- [2] ZHOU Haibo, CHEN Lin, CHEN Julian, et al. Adaptation of wheat-pea intercropping pattern in China to reduce *Sitobion avenae* (Hemiptera: Aphididae) occurrence by promoting natural enemies [J]. *Agroecology and Sustainable Food Systems*, 2013, 37(9): 1001–1016.
- [3] ZHOU Haibo, CHEN Julian, LIU Yong, et al. Influence of garlic intercropping or active emitted volatiles in releasers on aphid and related beneficial in wheat fields in China [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2013, 12(3): 467–473.
- [4] 范佳, 刘勇, 曾建国, 等. 小麦与蔬菜蚜虫新型防控技术进展 [J]. *应用昆虫学报*, 2014, 51(6): 1413–1434.
- [5] 迟宝杰, 朱英菲, AXEL V, 等. 麦长管蚜及其天敌的种群发生和食物网分析 [J]. *应用昆虫学报*, 2014, 51(6): 1496–1503.
- [6] BOMPARD E, PONS E, WU Di. Analysis of the structural vulnerability of the interconnected power grid of continental Europe with the integrated power system and unified power system based on extended topological approach [J]. *European Transactions on Electrical Power*, 2013, 23(5): 620–637.
- [7] 梁晓辰, 纪祥龙, 郑鹭飞, 等. 异色瓢虫对蚜虫性外激素的行为反应研究 [J]. *环境昆虫学报*, 2016, 38(2): 324–328.
- [8] TURLINGS T C J, ERB M. Tritrophic interactions mediated by herbivore-induced plant volatiles: mechanisms, ecological relevance, and application potential [J]. *Annual Review of Entomology*, 2018, 63(1): 433–452.
- [9] GREGG P C, DEL SOCORRO A P, LANDOLT P J. Advances in attract-and-kill for agricultural pests: beyond pheromones [J]. *Plant Biotechnology Journal*, 2018, 63(1): 453–470.
- [10] PARK S W, KAIMOYO E, KUMAR D, et al. Methyl salicylate is a critical mobile signal for plant systemic acquired resistance [J]. *Science*, 2007, 318(5847): 113–116.
- [11] JAMES D G. Field evaluation of herbivore-induced plant volatiles as attractants for beneficial insects: methyl salicylate and the green lacewing, *Chrysopa nigricornis* [J]. *Journal of Chemical Ecology*, 2003, 29(7): 1601–1609.
- [12] MALLINGER R E, HOGG D B, GRATTON C. Methyl salicylate attracts natural enemies and reduces populations of soybean aphids (Hemiptera: Aphididae) in soybean agroecosystems [J]. *Journal of Economic Entomology*, 2011, 104(1): 115–124.
- [13] WANG Gang, CUI Liangliang, DONG Jie, 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.
- [14] RODRIGUEZ-SAONA C, KAPLAN I, BRAASCH J, et al. Field responses of predaceous arthropods to methyl salicylate: A meta-analysis and case study in cranberries [J]. *Biological Control*, 2011, 59(2): 294–303.
- [15] GADINO A N, WALTON V M, LEE J C. Olfactory response of *Typhlodro muspyri* (Acari: Phytoseiidae) to synthetic methyl salicylate in laboratory bioassays [J]. *Journal of Applied Entomology*, 2012, 136(6): 476–480.
- [16] LEE J C. Effect of methyl salicylate-based lures on beneficial and pest arthropods in strawberry [J]. *Environmental Entomology*, 2010, 39(2): 653–660.
- [17] 董洁, 刘英杰, 李佩玲, 等. 间作与 MeSA 释放对麦长管蚜及其优势天敌的生态效应 [J]. *应用生态学报*, 2012, 23(10): 2843–2848.
- [18] 董洁, 刘英杰, 王光, 等. 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 [J]. *应用生态学报*, 2012, 23(7): 1940–1944.
- [19] 马向真, 王万磊, 鹿金秋, 等. 小麦互益素对麦长管蚜及其天敌的影响 [J]. *应用生态学报*, 2008, 19(1): 173–177.
- [20] WANG Kang, LIU Jiahui, ZHAN Yidi, et al. A new slow-release formulation of methyl salicylate optimizes the alternative control of *Sitobion avenae* (Fabricius) (Hemiptera: Aphididae) in wheat fields [J]. *Pest Management Science*, 2019, 75(3): 676–682.
- [21] QIU Dewen, DONG Yijie, ZHANG Yi, et al. Plant immunity inducer development and application [J]. *Molecular Plant-Microbe Interactions*, 2017, 30(5): 355–360.
- [22] HUFFAKER A. Plant elicitor peptides in induced defense against insects [J]. *Current Opinion in Insect Science*, 2015, 9: 44–50.
- [23] CAO Hehe, ZHANG Meng, ZHAO Hui, et al. Deciphering the mechanism of β -aminobutyric acid-induced resistance in wheat to the grain aphid, *Sitobion avenae* [J/OL]. *PLoS ONE*, 2014, 9(3): e91768. DOI:10.1371/journal.pone.0091768.
- [24] 徐润东, 盛世英, 杨秀芬, 等. 寡糖·链蛋白对小麦抗黄花叶病毒的免疫诱抗作用 [J]. *中国农业科学*, 2016, 49(18): 3561–3568.
- [25] 李杰, 邱德文, 杨秀芬, 等. 极细链格孢菌 66kDa 激活蛋白的纯化及诱导烟草抗 TMV 的功能 [J]. *河北农业大学学报*, 2008(6): 51–54.
- [26] 李丽, 邱德文, 刘峥, 等. 植物激活蛋白对番茄抗病性的诱导作用 [J]. *中国生物防治*, 2005(4): 59–62.
- [27] 唐宏琨. 激发子基因 *peaT1* 转化棉花和烟草体系的建立及功能分析[D]. 北京: 中国农业科学院, 2010.
- [28] 史发超. 转 *PeaT1* 水稻抗旱功能分子机制[D]. 北京: 中国农业大学, 2018.
- [29] 彭学聪, 杨秀芬, 邱德文, 等. 蛋白激发子 *Hrip1* 基因在拟南芥中表达可提高植株的耐盐耐旱能力 [J]. *作物学报*, 2013, 39(8): 1345–1351.

- [7] 杨国璋. 农药与有害生物抗性简述[J]. 农药, 2017, 56(3): 213-215.
- [8] 郭利京, 王颖. 中美法韩农药监管体系及施用现状分析[J]. 农药, 2018, 57(5): 359-366.
- [9] 谭丽超, 程燕, 朱昱璇, 等. 油菜蚜虫防治用药对蜜蜂的急性毒性与风险评价[J]. 生态与农村环境报, 2019, 35(4): 500-505.
- [10] 孙东磊, 赵欢欢, 安玉兴, 等. 3种新烟碱类杀虫剂对甘蔗螟虫的活性及防治效果[J]. 广东农业科学, 2017, 44(6): 109-113.
- [11] 史彩华, 胡静荣, 杨玉婷, 等. 不同药剂和施药方法对韭蛆的田间防治效果[J]. 植物保护学报, 2018, 45(2): 282-289.
- [12] 陈亮, 吴兴富, 皇甫伟国, 等. 同翅目害虫对吡虫啉抗性研究进展[J]. 中国农学通报, 2006, 22(1): 266-270.
- [13] 闫文茜, 王相晶, 张友军, 等. 北京地区蔬菜烟粉虱种群动态及其对烟碱类杀虫剂的抗药性监测[J]. 植物保护, 2012, 38(5): 154-157.
- [14] European and Mediterranean Plant Protection Organization. PP 1/225 (2) minimum effective dose [J]. EPPO Bulletin, 2012, 42(3): 403-404.
- [15] 中华人民共和国农业行业标准:《农药田间最低有效剂量测定》[S]. (报批稿).
- [16] 郑永权, 孙海滨, 董丰收, 等. 高效低风险是农药发展的必由之路[J]. 植物保护, 2012, 38(2): 1-3.
- [17] 白小宁, 袁善奎, 王宁, 等. 2018年及近年我国农药登记情况及特点分析[J]. 农药, 2019, 58(4): 235-238.

(责任编辑: 杨明丽)

(上接 192 页)

- [30] 盛世英, 周强, 邱德文, 等. 植物免疫蛋白制剂阿泰灵诱导小麦抗病增产效果及作用机制[J]. 中国生物防治学报, 2017, 33(2): 213-218.
- [31] ALHMEDI A, HAUBRUGE E, D'HOEDT S, et al. Quantitative food webs of herbivore and related beneficial community in non-crop and crop habitats [J]. Biological Control, 2011, 58(2): 103-112.
- [32] 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.
- [33] ZHU Junwei, PARK K C. Methyl salicylate, a soybean aphid-induced plant volatile attractive to the predator *Coccinella septempunctata* [J]. Journal of Chemical Ecology, 2005, 31(8): 1733-1746.
- [34] 朱英菲. 水杨酸甲酯缓释球的制备及其生态功能评价[D]. 泰安: 山东农业大学, 2015.
- [35] DE VOS M, VAN OOSTEN V R, JANDER G, et al. Plants under attack: multiple interactions with insects and microbes [J]. Plant Signaling & Behavior, 2007, 2(6): 527-529.
- [36] VAN OOSTEN V R, BODENHAUSEN N, REYMOND P, et al. Differential effectiveness of microbially induced resistance against herbivorous insects in *Arabidopsis* [J]. Molecular Plant-Microbe Interactions, 2008, 21(7): 919-930.
- [37] 郭圆. 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[D]. 武汉: 华中农业大学, 2016.

(责任编辑: 杨明丽)

(上接 199 页)

- [24] GOLICZ A A, BAYER P E, BARKER G C, et al. The pangenome of an agronomically important crop plant *Brassica oleracea* [J/OL]. Nature Communications, 2016, 7: 13390. DOI: 10.1038/ncomms13390.
- [25] PIAO Z, RAMCHIARY N, LIM Y P. Genetics of clubroot resistance in *Brassica* species [J]. Journal of Plant Growth Regulation, 2009, 28(3): 252-264.
- [26] LIU Shengyi, LIU Yumei, YANG Xinhua, et al. The *Brassica oleracea* genome reveals the asymmetrical evolution of polyploid genomes [J/OL]. Nature Communications, 2014, 5(5): 3930. DOI: 10.1038/ncomms4930.
- [27] PARKIN I A P, KOH C, TANG Haibao, et al. Transcriptome and methylome profiling reveals relics of genome dominance in the mesopolyploid *Brassica oleracea* [J/OL]. Genome Biology, 2014, 15(6): R77. DOI: 10.1186/gb-2014-15-6-r77.
- [28] BELSER C, ISTACE B, DENIS E, et al. Chromosome-scale assemblies of plant genomes using nanopore long reads and optical maps [J]. Nature Plants, 2018, 4(11): 879-887.
- [29] SUN Deling, WANG Chunguo, ZHANG Xiaoli, et al. Draft genome sequence of cauliflower (*Brassica oleracea* L. var. *botrytis*) provides new insights into the C genome in *Brassica* species [J/OL]. Horticulture Research, 2019, 6(1): 82. DOI: 10.1038/s41438-019-0164-0.

(责任编辑: 杨明丽)