

蜜源植物波斯菊对捕食性天敌种群动态的影响

方 艳^{1,2}, 王 杰^{1,2}, 覃 杨¹, 王 甦², 金振宇^{1*}, 李 姝^{2*}

(1. 长江大学农学院, 荆州 434025; 2. 北京市农林科学院植物保护环境保护研究所, 北京 100097)

摘要: 蜜源植物有利于天敌昆虫田间定殖与增效控害, 是保护性生物防治的重要组成部分。为筛选及评价蜜源植物对天敌的涵养作用, 本研究比较了波斯菊 *Cosmos bipinnata*、千屈菜 *Lythrum salicaria*、荷兰菊 *Symphyotrichum novi-belgii* 与对照杂草区域的天敌、害虫种群动态, 同时评价了不同种植密度下波斯菊对瓢虫及蚜虫种群数量影响。结果表明: 与对照杂草区域相比, 千屈菜区域内天敌及害虫数量均显著较多, 波斯菊区域内天敌数量显著较高但害虫数量较少, 优势天敌为捕食性瓢虫。不同种植密度下波斯菊花带内的捕食性瓢虫和蚜虫数量存在显著差异; 种植密度为 50%波斯菊花带内瓢虫和蚜虫数量高于种植密度 100%, 且两种密度下波斯菊花带内益害比均显著高于对照杂草区域。本研究初步表征: 波斯菊花带对捕食性天敌具有较好的诱集涵养作用, 可作为天敌优良的蜜源植物增效害虫生物防治。

关 键 词: 蜜源植物带; 波斯菊; 生态调控; 天敌昆虫; 保护性生物防治

中图分类号: S476 **文献识别码:** A **文章编号:** 1005-9261(2021)05-0877-08

Effect of Nectar Plant *Cosmos bipinnata* on the Population Dynamics of Predatory Natural Enemies

FANG Yan^{1,2}, WANG Jie^{1,2}, TAN Yang¹, WANG Su², JIN Zhenyu^{1*}, LI Shu^{2*}

(1. College of Agriculture, Yangtze University, Jingzhou 434025, China; 2. Institute of Plant and Environment Protection, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China)

Abstract: Nectar plant, an important part of conservation biological control, can support the colonization of natural enemies in field and enhance pest biological control. In order to evaluate the effect of nectar plants on natural enemies, population dynamics of natural enemies and pests in *Cosmos bipinnata*, *Lythrum salicaria*, *Symphyotrichum novi-belgii* strips were compared with those in the natural weed area, and the impact of cosmos on ladybird and aphid populations were evaluated under different planting densities. Results showed that, in comparison with the natural weed area, the population size of natural enemies and pests in *L. salicaria* was higher, and the population size of natural enemies in cosmos strip was higher while that of the pests was less, where the predatory ladybirds were the dominant natural enemies. The population size of ladybirds and aphids in cosmos differed significantly between planting densities, higher in cosmos strip with 50% planting density than that with 100% planting density, and the ratio of natural enemies to pests was significantly higher in cosmos strips of the two planting densities than that of the natural weed area. This study indicates that cosmos strip attracts and conserves natural enemies in field and can be potentially used as nectar plants in habitat management for conservation biological control.

Key words: nectar plant strips; cosmos; ecological regulation; natural enemy; conservation biological control

收稿日期: 2021-08-12

基金项目: 北京市农林科学院农业科技示范推广项目 (Z2021108); 北京市农林科学院科技创新能力建设专项 (KJXC20200110)

作者简介: 方艳, 硕士研究生, E-mail: fangyan1998@126.com; *通信作者, 金振宇, 博士, 副教授, E-mail: ahk_731@163.com; 李姝, 博士, 助理研究员, E-mail: ls_baafs@163.com。

DOI: 10.16409/j.cnki.2095-039x.2021.07.025

现代农业生产中,化学农药的使用尽管保障了农产品产量,但过度使用对农业生态系统,尤其是无脊椎动物群落造成了严重的负面影响^[1-4]。以生物防治为核心的害虫综合治理技术,通过以虫治虫、以菌治虫等绿色防控手段有力保障了农产品产量与质量。其中,通过生境管理(Habitat management)为天敌昆虫在不利的自然环境中提供食物资源或庇护场所,可丰富天敌昆虫的种群和提高其害虫生物防治能力,已成为害虫可持续治理的重要途径^[5,6]。近年来,通过增加非作物地种植面积以改善农业生态系统中天敌的生境已得到了广泛关注^[7-9]。

保护性生物防治(Conservation biological control)充分利用功能植物维持和增加农业生态系统中天敌的种群数量,从而有效调控害虫种群,尤其蜜源植物的利用研究较为广泛^[10-15]。在水稻生态系统中,Gurr等^[16]发现在稻田的田埂和四周种植蜜源植物能够增加捕食性或寄生性天敌的丰富度,从而有效控制稻飞虱的种群数量,降低杀虫剂使用量70%,提高经济效益7.5%。在果园生态系统中,丁瑞丰等^[17]发现在杏园中分别套种油菜 *Brassica campestris*、芜菁 *Brassica rapa* 和紫花苜蓿 *Medicago sativa* 三种蜜源植物后,杏园中的节肢动物天敌群落的物种多样性指数和均匀度指数均增高,而害虫群落的物种多样性指数和均匀度指数均下降。这是因为蜜源植物的花粉、花蜜和花外蜜露等能作为补充性食物源、替代食物或猎物对天敌的种群数量、个体生存和发育、寿命和繁殖力、捕食和行为等方面均有积极影响^[18,19]。如琉璃苣 *Borago officinalis* 能够显著延长食蚜蝇和草蛉的寿命^[20];矢车菊 *Centaurea cyanus* 的花外蜜露能为瓢虫和小花蝽提供替代性食物资源^[20,21];紫苏 *Perilla frutescens* 的花能够增加异色瓢虫 *Harmonia axyridis* 的寿命和繁殖力^[12]等。

设施温室作为现代农业生产中重要的生产模式,其单一化种植环境,易引起多种害虫(特别是粉虱、蚜虫等)种群大规模暴发,严重影响果蔬的产量和品质。前期研究表明^[22],临近温室种植蜜源植物带能增效温室内害虫防治作用,并初步表征波斯菊 *Cosmos bipinnata* 可吸引较多捕食者和降低害虫种群。波斯菊属菊科 *Asteraceae* 秋英属 *Cosmos* 植物,一年生或多年生草本植株,花期6~8月,在全国范围内广泛栽培;千屈菜 *Lythrum salicaria* 为千屈菜科 *Lythraceae* 千屈菜属 *Lythrum* 多年生草本植物,花期7~9月。荷兰菊 *Symphyotrichum novi-belgii* 为菊科 *Asteraceae* 联毛紫菀属 *Symphyotrichum* 多年生草本植物,花期8~10月,所有备选蜜源植物对北方环境适应能力均较强且易于种植和管理。

为筛选出适宜对天敌有诱集涵养的蜜源植物,本研究于2017年探究了温室间种植波斯菊、千屈菜、荷兰菊花带的天敌昆虫、害虫种群动态,比较了不同蜜源植物作用;并在2018和2019年评价了波斯菊不同种植密度对其上瓢虫及蚜虫的动态影响,为蜜源植物促进天敌昆虫田间增殖保育工作提供基础。

1 材料与方法

1.1 供试植物与地点

试验所用波斯菊、千屈菜、荷兰菊种子均来自于中国农业科学院蔬菜花卉研究所。所有种子均在塑料托盘中育苗,待植株长至3~4片真叶时移栽到单花地带中,移植密度为每地块80株。定期人工清理花带中的杂草。试验期间不使用任何化学农药。

本研究于2017—2019年在北京市平谷区马昌营镇诺亚有机农场(116°59' E, 40°6' N)进行。该农场的生产管理符合欧洲、美国和日本有机农业标准认定要求。

1.2 不同蜜源植物带上节肢动物发生规律

2017年在农场西区的温室之间(3 m×100 m)的区域内依次种植了千屈菜、荷兰菊、波斯菊和杂草的区域花带,种植面积分别为3 m×20 m,不同处理区域之间间隔5 m。对照区杂草以刺儿菜 *Cirsium setosum* 为主,是温室周边一种多年生的局部优势杂草。每种处理重复3个温室间。

在农场东区温室之间(3 m×80 m)区域内仅种植单一波斯菊(100%)植物带,以杂草为对照,各重复3个温室间。2017年5月18日至7月24日在每个处理区随机选取10个调查点,每个点包含1 m²内蜜源植物区域。采用直接观察法记录植株上的节肢动物数量。每周调查一次,调查时间为上午9时至11时,并记录所有调查日期内当天温度及天气情况。

1.3 波斯菊不同种植密度上瓢虫及蚜虫种群数量关系

2018和2019年在温室之间(3 m×100 m)的区域分别设置3个不同密度(100%、50%、0)的波斯

菊植物带，100%为完全种植波斯菊区域；50%为波斯菊与杂草混合种植；0 为杂草对照区域，其中杂草以刺儿菜为主。所有处理花带均种植在不同的温室之间，每个温室间隔大于 10 m。

在每个处理花带中，分别随机选取 3 个点，利用黄盆陷阱法^[23]调查瓢虫及蚜虫种群。将 35 cm×35 cm 的黄盆支架放置在距离地面约 0.5 m 的蜜源植物带中，黄盆内加入约三分之二的水及表面活性剂皂液 1 滴，一旦蜜源植物带中的节肢动物掉入黄盆内即实现诱杀。调查时间为 2018 年 6 月 14 日至 8 月 23 日和 2019 年 5 月 21 日至 7 月 22 日，每隔 7 d 收取黄盆内昆虫并换水，对收集到的昆虫进行统计。记录所有调查日期内当天温度及天气情况。

1.4 数据统计与分析

将调查到的节肢动物大致按以下归类：捕食性天敌包括瓢虫、草蛉、小花蝽、食蚜蝇和蜘蛛；害虫包括蚜虫、粉虱、蓟马、植食性蝽。

应用 Excel 2019 和 SPSS 23.0 统计并分析试验数据，比较不同蜜源植物间节肢动物参数用单因素方差分析（One-way ANOVA），并采用 Turkey-HSD 法在 $P<0.05$ 的显著性水平下比较各个处理间的差异。使用一般线性模型（General Linear Model, GLM）比较不同处理和年份对波斯菊花带上捕食性瓢虫和蚜虫丰度的影响作用。

2 结果与分析

本研究三年调查的节肢动物种类、数量显著不同（表 1）。2017 年调查到的节肢动物种类包括瓢虫、食蚜蝇、草蛉、小花蝽、蜘蛛、蚜虫、粉虱、蓟马、叶螨、植食性蝽等，其中捕食性天敌中瓢虫占据优势地位。害虫主要种类为花蓟马和苹果黄蚜。2018 和 2019 年采集到的昆虫以瓢虫和翅蚜为主。从总体数量看，蜜源植物带及杂草上优势捕食性天敌为瓢虫，优势害虫为蚜虫。

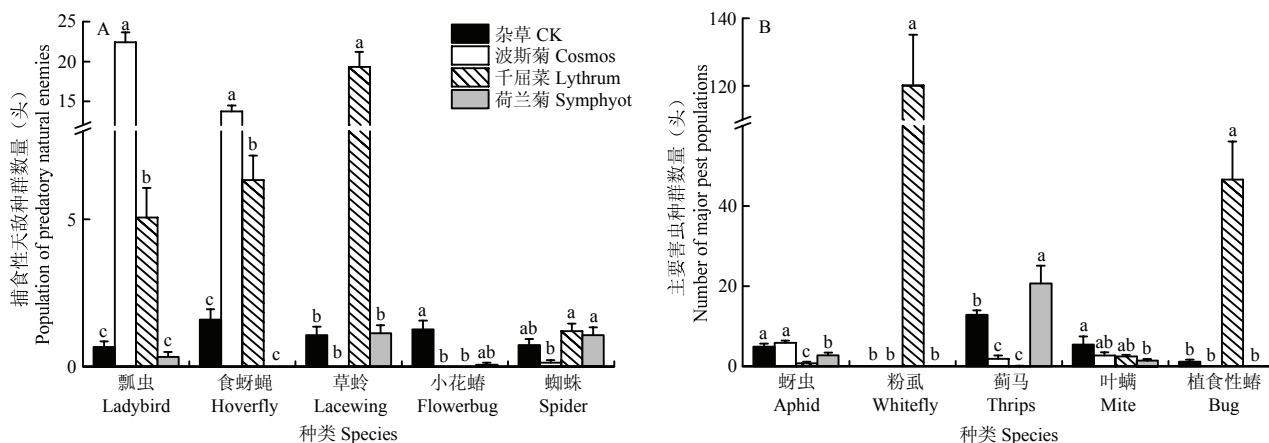
表 1 2017—2019 年收集到的节肢动物种类及数量
Table 1 Species and numbers of arthropods collected in 2017—2019

分组 Functional group	目 Order	科 Family	种 Species	调查数量 Number		
				2017	2018	2019
捕食性天敌 Predators						
瓢虫 Ladybeetles	鞘翅目 Coleoptera	瓢虫科 Coccinellidae	异色瓢虫 <i>Harmonia axyridis</i>	631	24	18
			七星瓢虫 <i>Coccinella septempunctata</i>			3
			多异瓢虫 <i>Hippodamia variegata</i>			36
小花蝽 Flowerbugs	半翅目 Hemiptera	花蝽科 Anthocoridae	小花蝽 <i>Orius</i> spp.	116	0	18
草蛉 Lacewings	脉翅目 Neuroptera	草蛉科 Chrysopidae	中华通草蛉 <i>Chrysoperla sinica</i>	237	0	0
食蚜蝇 Hoverflies	双翅目 Diptera	食蚜蝇科 Syrphidae	黑带食蚜蝇 <i>Episyrphus balteatus</i>	269	0	2
蜘蛛 Spiders	蜘蛛目 Araneae	蟹蛛科 Thomisidae	三突花蛛 <i>Misumenops tricuspidatus</i>	88	0	2
总数 Total number				1341	24	79
害虫 Pests						
蚜虫 Aphids	半翅目 Hemiptera	蚜科 Aphididae	苹果黄蚜 <i>Aphis citricola</i>	1770	435	2229
			蚜虫 <i>Aphis</i> spp.	50	405	692
蓟马 Thrips	缨翅目 Thysanoptera	蓟马科 Thripidae	花蓟马 <i>Frankliniella intonsa</i>	1516	0	308
粉虱 Whiteflies	半翅目 Hemiptera	粉虱科 Aleyrodidae	烟粉虱 <i>Bemisia tabaci</i>	308	0	0
总量 Total number				3644	840	3229

2.1 不同蜜源植物带上节肢动物发生规律

多种捕食性天敌及害虫在不同蜜源植物上的表现存在明显差异（图 1）。瓢虫、食蚜蝇、草蛉、小花蝽和蜘蛛在杂草、波斯菊、千屈菜和荷兰菊上的数量均存在显著性差异（瓢虫： $F_{3,56}=162.93$, $P<0.001$ ；食蚜蝇： $F_{3,56}=110.80$, $P<0.001$ ；草蛉： $F_{3,56}=95.39$, $P<0.001$ ；小花蝽： $F_{3,56}=16.41$, $P<0.001$ ；蜘蛛：

$F_{3,56}=4.75$, $P=0.005<0.001$)。其中,波斯菊上优势的捕食性天敌是瓢虫和食蚜蝇;千屈菜上主要存在瓢虫、食蚜蝇和草蛉三种天敌,它们的数量相对较高;荷兰菊上的天敌数量与杂草上的天敌数量相差不大。此外,蚜虫、粉虱、蓟马、叶螨和植食性螨在集中蜜源植物上的分布也存在显著性差异(蚜虫: $F_{3,56}=14.21$, $P<0.001$; 粉虱: $F_{3,56}=63.94$, $P<0.001$; 蓟马: $F_{3,56}=17.20$, $P<0.001$; 叶螨: $F_{3,56}=2.35$, $P=0.082>0.05$; 植食性螨: $F_{3,56}=23.87$, $P<0.001$)。其中,千屈菜上粉虱和植食性螨数量较高,荷兰菊上存在部分蓟马,而波斯菊上害虫数量与杂草相差不大。结果表明,千屈菜上即存在大量捕食性天敌也存在大量害虫,波斯菊上捕食性天敌较多而害虫数量较少,荷兰菊上捕食性天敌和害虫数量均较少。



注: 数值为均值±标准误, 不同字母表示差异显著, 显著性水平为 $P<0.05$ 。

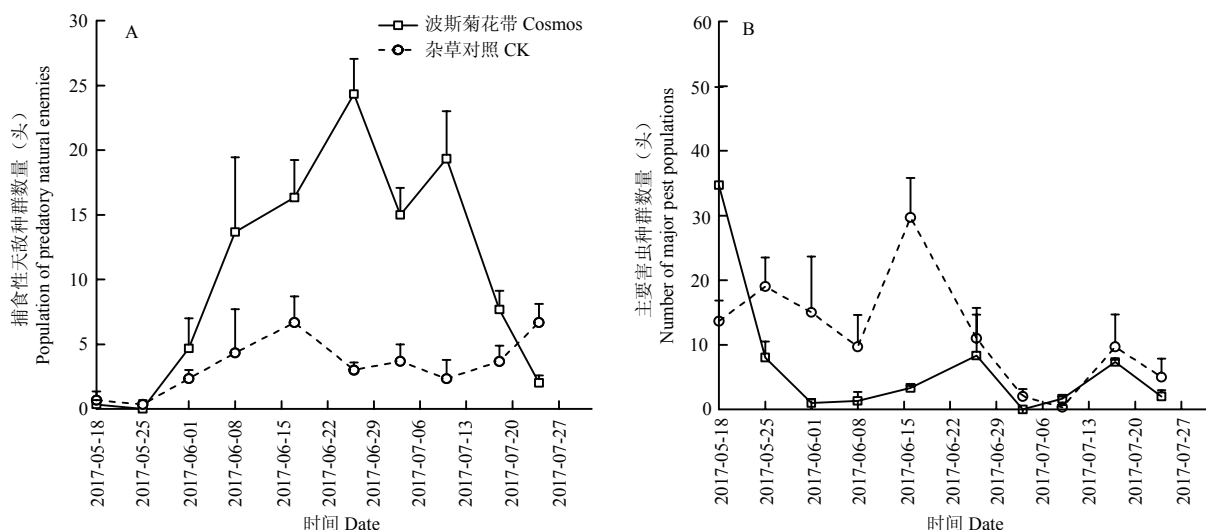
Note: The value is the mean ± standard error, different letters indicate significant difference, and there is a significant difference when $P<0.05$.

图1 不同蜜源植物带上捕食性天敌和害虫数量 (A: 2018年; B: 2019年)

Fig. 1 The total number of predatory natural enemies and pests on different nectar plants strips (A: 2018; B: 2019)

2.2 单一波斯菊花带上捕食性天敌和害虫种群动态分析

单一波斯菊花带上捕食性天敌及主要害虫种群动态与杂草对照存在显著不同。波斯菊花带上的捕食性天敌数量高于杂草对照, 而害虫数量低于杂草对照(图2)。捕食性天敌在波斯菊和杂草上的波动相同, 都主要发生在6—7月, 害虫在杂草上相对较高, 主要集中在5—6月, 波斯菊上害虫数量基本处于较低水平。



注: 数值为均值±标准误

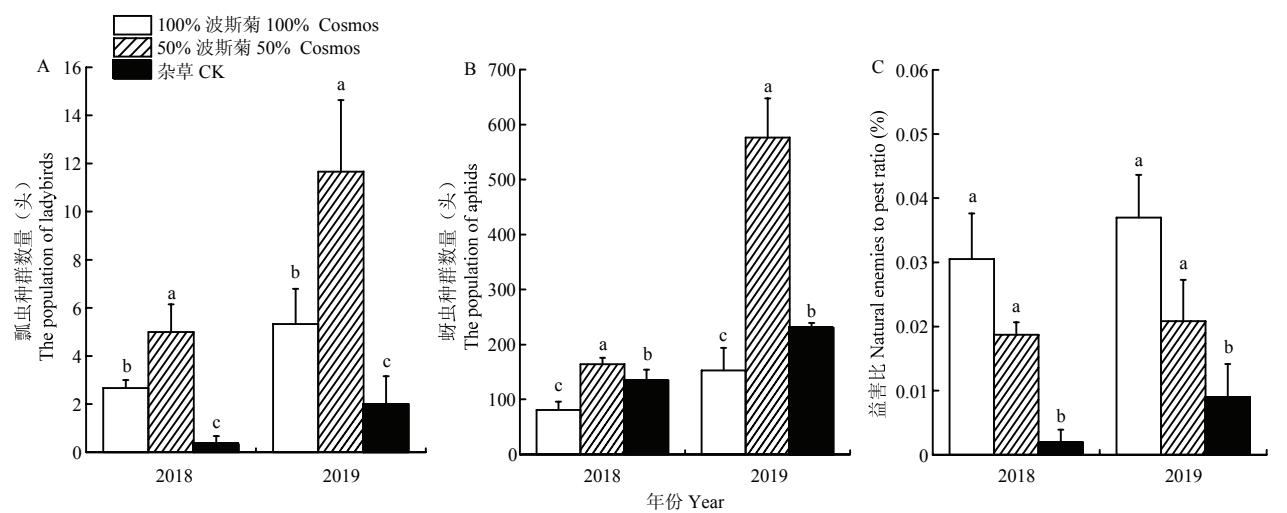
Note: The value is the mean ± standard error.

图2 单一波斯菊花带上捕食性天敌 (A) 及主要害虫 (B) 种群动态

Fig. 2 Population dynamics of predatory natural enemies (A) and main pests (B) on cosmos strips

2.3 不同种植密度波斯菊上瓢虫及蚜虫种群数量关系

与杂草对照相比，波斯菊种植密度为 100%和 50%时，瓢虫和蚜虫数量表现出显著性差异（瓢虫 2018： $F_{2,6}=10.50$, $P=0.011$ ；瓢虫 2019： $F_{2,6}=5.92$, $P=0.038$ ；蚜虫 2018： $F_{2,6}=6.66$, $P=0.03$ ；蚜虫 2019： $F_{2,6}=22.08$, $P=0.002$ ），其中瓢虫在 50%种植密度下数量更高，而害虫数量在 50%种植密度下最高，100%种植密度下数量最低；三种处理方式下瓢虫与蚜虫益害比也表现出显著性差异（2018： $F_{2,6}=8.72$, $P=0.017$ ；2019： $F_{2,6}=5.28$, $P=0.048$ ）（图 3）。通过广义线性模型分析发现（表 2），瓢虫和蚜虫在各处理和年份间均表现出显著性差异。



注：数值为均值±标准误，不同字母表示差异显著，显著性水平为 $P<0.05$ 。
Note: The value is the mean±standard error, different letters indicate significant difference, and there is a significant difference when $P<0.05$.

图 3 波斯菊不同种植密度下瓢虫累积量 (A)、蚜虫累积量 (B) 及其益害比 (C)

Fig. 3 The total number of ladybirds (A), aphids (B) and the natural enemies to pest ratio (C) of cosmos strips under different planting densities

表 2 处理和年份对波斯菊花带上捕食性瓢虫和蚜虫丰度的影响

Table 2 Results for GLE regarding the effect of treatment, year, and the interaction on the abundance of ladybirds and aphids on cosmos strips

变量 Variation	自由度 df	F	P
瓢虫 Ladybirds			
处理 Treatment	2	11.35	0.002**
年份 Year	1	8.78	0.012*
处理×年份 Treatment×year	2	1.52	0.257
蚜虫 Aphids			
处理 Treatment	2	27.61	<0.001***
年份 Year	1	44.66	<0.001***
处理×年份 Treatment×year	2	14.37	0.001**

注：显著性水平为* $P<0.05$ ；** $P<0.01$ ；*** $P<0.001$ 。
Note: The significance level is * $P<0.05$; ** $P<0.01$; *** $P<0.001$.

3 讨论

现代化农业生产中，作物单一及大面积种植导致植物多样性急剧下降，自然天敌的食物、越冬和繁育场所等资源严重不足，不利于天敌生存及定殖控害^[15]。种植蜜源植物可为天敌提供更适宜的微观环境、更

多的替代寄主或猎物等食物资源^[24]。

非作物地的利用能有效增加天敌生态位,使环境中容纳更多的天敌,从而提高天敌可持续防治害虫效果^[25]。越来越多的研究表明,天敌对害虫的控制作用随天敌多样性和丰富度的减少而减弱^[26-29]。某些情况下,在环境中增加生物多样性也可能造成天敌控害能力的减弱,如同一猎物的不同天敌占据相似的生态位时,群体内捕食现象可能发生^[30]。张硕等^[31]提出,可以通过增加农业生态系统中的花粉、花蜜、替代猎物和栖息地等资源拓宽天敌生态位,增加天敌种群数量。目前,在大田作物、果园生态系统中,利用蜜源植物带增效天敌田间控害作用已有许多成功的案例^[32,33],但在温室农业生态系统中尚未报道^[34]。温室间生境管理即增加蜜源植物多样性,诱集涵养天敌,提升天敌丰富度和多样性,从而有利于天敌经通风口进入温室内对害虫进行控制,减少温室内害虫的大规模暴发^[22]。

然而,花带的设置需要挑选合适的蜜源植物。许多蜜源植物在为天敌提供营养的同时也可能为害虫提供营养^[35],因此,筛选出适合天敌的蜜源植物应用于生物防治至关重要。本研究结果显示,与杂草区域相比,千屈菜能涵养较多天敌及害虫,可能成为天敌及害虫共同营养源;荷兰菊对天敌及害虫的涵养作用不显著;而波斯菊上天敌数量较多但害虫数量较少,其在涵养天敌的同时成为害虫库源的风险较小,且该现象在单一波斯菊花带上得到了进一步的验证,不同种植密度下波斯菊涵养的瓢虫和蚜虫数量也有所差异;与波斯菊种植密度为100%相比,50%种植密度的波斯菊生境复杂度增加,其上瓢虫和蚜虫数量也有所增加,且两种密度下的波斯菊花带上益害比均显著高于杂草对照。这表明,波斯菊在保护性生物防治中有望成为良好的应用材料。

三年的调查数据在昆虫种类及总量上存在较为明显的差异,这可能与不同调查方法及调查日期内的气候有关。邹言等^[36]对昆虫不同的采集方法比较表明,相比于其他几种常见的昆虫采集方法,陷阱法采集到的昆虫,不论种类还是数量均处于最低水平,这也是本研究中2017年节肢动物总量相对较高,而2018、2019年采集到的捕食性天敌数量相对较少,而有翅蚜等害虫数量较多的原因,但本方法具有简便易行等优点。另一方面,从三年天气情况看,2017年与2018、2019年相比平均温度普遍较低,降雨天数较少,没有出现大暴雨等,而2019年温度较高且降雨天数较多。不同年份间调查日期的温度及调查前后天气情况也会对昆虫调查造成一定影响。

保护性生物防治中蜜源植物带的设计原则,除考虑种植密度外,还需要认真筛选蜜源植物种类、设计种植时间、连通性或镶嵌格局等因素,才能充分发挥蜜源植物管理增效天敌的控害潜能。一般情况下,选择本地的蜜源植物能更好地适应土壤、气候等环境因素的变化,从而诱集涵养更多种类和数量的天敌;其次,应选择花期早于作物成熟期且花期较长的物种,弥补作物生长时期的空缺并能最大限度地提供营养补充;更重要的是,在蜜源植物的选择上,应筛选出对天敌有益而对害虫种群无影响或不利影响最小的功能植物种类。总之,针对不同生态环境中的不同害虫,选择出最合适的蜜源植物容纳更多的天敌是增效生物防治的重点及难点,因此这就需要我们更加精细管理功能植物,从而实现利用农业景观生态调控害虫防治、作物高产和环境保护等多重目标的共赢。

参 考 文 献

- [1] Desneux N, Decourtye A, Delpuech J M. The sublethal effects of pesticides on beneficial arthropods[J]. *Annual Review of Entomology*, 2007, 52(1): 81-106.
- [2] Geiger F, Bengtsson J, Berendse F, *et al.* Persistent negative effects of pesticides on biodiversity and biological control potential on European farmland[J]. *Basic Applied Ecology*, 2010, 11(2): 97-105.
- [3] Lu Y, Wu K, Jiang Y, *et al.* Widespread adoption of Bt cotton and insecticide decrease promotes biocontrol services[J]. *Nature*, 2012, 487(7407): 362-365.
- [4] Pretty J E. Intensification for redesigned and sustainable agricultural systems[J]. *Science*, 2018, 362(6417): 908.
- [5] Gurr G M, Wratten S D, Landis D A, *et al.* Habitat management to suppress pest populations: progress and prospects[J]. *Annual Review of Entomology*, 2017, 62(1): 91-109.
- [6] Michaud J P. Challenges to conservation biological control on the high plains: 150 years of evolutionary rescue[J]. *Biological Control*, 2018, 125:

- 65-73.
- [7] Tscharnkte T, Bommarco R, Clough Y, *et al.* Conservation biological control and enemy diversity on a landscape scale[J]. *Biological Control*, 2008, 45(3): 294-309.
- [8] Holland J M, Bianchi F, Entling M H, *et al.* Structure, function and management of semi-natural habitats for conservation biological control: a review of European studies[J]. *Pest Management Science*, 2016, 72(9): 1638-1651.
- [9] González-Chang M, Tiwari S, Sharma S, *et al.* Habitat management for pest management: limitations and prospects[J]. *Annals of the Entomological Society of America*, 2019, 112(4): 302-317.
- [10] Pfiffner L, Luka H, Schlatter C, *et al.* Impact of wildflower strips on biological control of cabbage lepidopterans[J]. *Agriculture Ecosystems Environmental Entomology*, 2009, 129(1): 310-314.
- [11] 戈峰, 吴孔明, 陈学新. 植物-害虫-天敌互作机制研究前沿[J]. *应用昆虫学报*, 2011, 48(1): 1-6.
- [12] 陈学新, 刘银泉, 任顺祥, 等. 害虫天敌的植物支持系统[J]. *应用昆虫学报*, 2014, 51(1): 1-12.
- [13] Balzan M V, Bocci G, Moonen A C. Utilisation of plant functional diversity in wildflower strips for the delivery of multiple agroecosystem services[J]. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 2016, 158(3): 304-319.
- [14] Hatt S, Osawa N. The role of *Perilla frutescens* flowers on fitness traits of the ladybird beetle *Harmonia axyridis*[J]. *BioControl*, 2019, 64(4): 381-390.
- [15] Snyder W E. Give predators a complement: conserving natural enemy biodiversity to improve biocontrol[J]. *Biological Control*, 2019, 135: 73-82.
- [16] Gurr G M, Liu J, Read D, *et al.* Parasitoids of Asian rice planthopper (Hemiptera: Delphacidae) pests and prospects for enhancing biological control by ecological engineering[J]. *Annals of Applied Biology*, 2015, 158(2): 149-176.
- [17] 丁瑞丰, 王小丽, 徐遥, 等. 套种蜜源植物对杏-麦间作果园节肢动物群落的影响[J]. *新疆农业科学*, 2008, 45(5): 960-963.
- [18] 朱平阳, 吕仲贤, Gurr G M, 等. 显花植物在提高节肢动物天敌控制害虫中的生态功能[J]. *中国生物防治学报*, 2012, 28(4): 583-588.
- [19] 徐彬, 修春丽, 张伟, 等. 龙爪槐花对异色瓢虫成虫寿命的影响[J]. *中国生物防治学报*, 2017, 33(4): 442-445.
- [20] Berkvens N, Bonte J, Berkvens D, *et al.* Influence of diet and photoperiod on development and reproduction of European populations of *Harmonia axyridis* (Pallas) (Coleoptera: Coccinellidae)[J]. *BioControl*, 2007, 53(1): 211-221.
- [21] Wäckers F L, van Rijn P C J. Pick and mix: selecting flowering plants to meet the requirements of target biological control insects[M]//Gurr G M, Wratten S D, Snyder W E, *et al.*, eds. *Biodiversity and Insect Pests: Key Issues for Sustainable Management* (1st edition). New York: Wiley, 2012, 139-165.
- [22] Li S, Jaworski C, Hatt S, *et al.* Flower strips adjacent to greenhouses help reduce pest populations and insecticide applications inside organic commercial greenhouses[J]. *Journal of Pest Science*, 2021, 94(3): 679-689.
- [23] Xu Q, Hatt S, Lopes T, *et al.* A push-pull strategy to control aphids combines intercropping with semiochemical releases[J]. *Journal of Pest Science*, 2017, 91(1): 93-103.
- [24] 傅一峰, 刘冰, 罗延亮, 等. 北疆棉田非作物生境食蚜蝇种群消长动态[J]. *中国生物防治学报*, 2019, 35(1): 1-8.
- [25] Northfield T D, Barton B T, Schmitz O J. A spatial theory for emergent multiple predator-prey interactions in food webs[J]. *Ecology Evolution*, 2017, 7: 6935-6948.
- [26] Straub C S, Finke D L, Snyder W E. Are the conservation of natural enemy biodiversity and biological control compatible goals?[J] *Biological Control*, 2008, 45(2): 225-237.
- [27] Deborah K L, Julie A J, Sara G B, *et al.* Effects of natural enemy biodiversity on the suppression of arthropod herbivores in terrestrial ecosystems[J]. *Annual Review of Ecology and Evolution*, 2009, 40(1): 573-592.
- [28] Jonsson M, Kaartinen R, Straub C S. Relationships between natural enemy diversity and biological control[J]. *Current Opinion in Insect Science*, 2017, 20: 1-6.
- [29] Greenop A, Woodcock B A, Wilby A, *et al.* Functional diversity positively affects prey suppression by invertebrate predators: a meta-analysis[J]. *Ecology*, 2018, 99(8): 1771-1782.

- [30] Liang Y, Chen X, Dai H, *et al.* Flower provision reduces intraguild predation between predators and increases aphid biocontrol in tomato[J]. *Journal of Pest Science*, 2021, doi: 10.1007/s10340-021-01396-x
- [31] 张硕, 陈鹏, 迟宝杰, 等. 多蜜源植物生草组合对苹果害虫和天敌的影响[J]. *中国果树*, 2020(3): 47-51.
- [32] Mendes H M, Paterno S, Andrew W, *et al.* Stability lies in flowers: Plant diversification mediating shifts in arthropod food webs[J]. *PLoS ONE*, 2018, 13(2): e0193045.
- [33] Jaworski C, Xiao D, Xu Q, *et al.* Varying the spatial arrangement of synthetic herbivore-induced plant volatiles and companion plants to improve conservation biological control[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2019, 56(5): 1365-2664.
- [34] Balzan M V, Wäckers F L. Flowers to selectively enhance the fitness of a host-feeding parasitoid: adult feeding by *Tuta absoluta* and its parasitoid *Necremnus artynes*[J]. *Biological Control*, 2013, 67(1): 21-31.
- [35] Rodríguez E, González M, Paredes D, *et al.* Selecting native perennial plants for ecological intensification in Mediterranean greenhouse horticulture[J]. *Bulletin of Entomological Research*, 2018, 108(5): 694-704.
- [36] 邹言, 刘佳文, 李立坤, 等. 北京市珍珠泉乡不同昆虫采集方法采集效果对比分析[J]. *环境昆虫学报*, 2021, 43(3): 758-767.

(责任编辑: 张莹)