

麦田天敌群落的麦蚜捕食当量估算及其控蚜能力分析*

吾木提·阿巴合^{1,2**} 梁潇以¹ 张兴瑞¹ 李卓¹ 齐乐¹ 戈峰^{1***}

(1. 山东省农业科学院植物保护研究所, 山东省农业有害生物绿色防控重点实验室, 济南 250100;

2. 新疆生产建设兵团第十师农业科学研究所, 北屯 836000)

摘要 【目的】针对田间多种天敌和多个虫态共存的情况, 定量分析天敌的捕食当量关系, 明确田间天敌群落对害虫的实际控制能力, 为制定害虫生态防控策略与技术奠定基础。【方法】通过检索天敌捕食功能反应相关文献, 获取常见捕食性天敌对蚜虫的日捕食量数据, 构建捕食当量关系式, 并确定捕食当量系数; 结合小麦和功能植物蛇床草 *Cnidium monnieri* 上天敌与麦蚜的实地调查数据, 基于当量关系式计算多种天敌共同捕食麦蚜的理论数值, 并将该理论值与实际麦蚜发生量进行比较, 以评估麦田天敌群落对麦蚜的控害效能。【结果】捕食当量关系式能有效地整合田间多种天敌、多个虫态的捕食量, 构建一个统一的当量关系式, 为评估田间天敌群落对麦蚜的捕食作用提供了有效工具; 由此分析鲁东麦田的天敌控害作用, 并模拟功能植物蛇床草 1:30 伴生种植小麦, 显示当蛇床草上涵养 15 头/m² 天敌时, 按每 667 m² 麦田 22 m² 蛇床草计算, 麦田天敌群落可取食麦蚜数量达 57 684 头/667 m², 当麦蚜实际发生量低于此值时, 天敌可有效控制麦田蚜虫的为害。【结论】捕食当量关系式 $= \sum_{i=1}^n P_i \alpha_i$ 为量化田间天敌群落对麦蚜的捕食能力提供了有效工具, 有助于掌握田间天敌群落对害虫的实际控制能力, 将为麦田天敌利用及其蚜虫生态防控提供决策支持。

关键词 捕食当量关系; 捕食性天敌; 麦蚜; 蛇床草; 生物防治

Equivalent predatory relationships in natural enemy communities and their potential to control aphids in wheat fields

Wumuti·Abahe^{1,2**} LIANG Xiao-Yi¹ ZHANG Xing-Rui¹ LI Zhou¹ QI Le¹ GE Feng^{1***}

(1. Shandong Key Laboratory for Green Prevention and Control of Agricultural Pests, Institute of Plant Protection, Shandong Academy of Agricultural Sciences, Jinan 250100, China; 2. The Tenth Division Agricultural Science Research Institute of the Xinjiang Production and Construction Corps, Beitun 836000, China)

Abstract [Aim] In response to the coexistence of multiple natural enemies and various insect stages in the field, a quantitative analysis of the predation equivalence among natural enemies is conducted to clarify their control efficacy against pests. This study aims to lay the foundation for developing ecological pest management strategies and technologies. [Methods] By reviewing literature on the functional responses of natural enemies in predation, data on the daily predation rates of common predatory natural enemies on aphids were collected to construct a predation equivalent relationship and determine the predation equivalent coefficient. Combined with field survey data of natural enemies and wheat aphids on wheat and the functional plant *Cnidium monnieri*, the theoretical values of multiple natural enemies co-predating on wheat aphids were calculated based on the equivalent relationship. These theoretical values were then compared with the actual occurrence of

*资助项目 Supported projects: 国家重点研发计划资助(2023YFD1400800); 山东省顶尖人才“一事一议”项目资助(2023YSYY-006); 国家自然科学基金联合基金项目(U24A20412)

**第一作者 First author, E-mail: 3077258579@qq.com

***通讯作者 Corresponding author, E-mail: gef@ioz.ac.cn

收稿日期 Received: 2025-02-09; 接受日期 Accepted: 2025-04-03

wheat aphids to assess the control efficacy of the natural enemy community in wheat fields against wheat aphids.

[Results] The predation equivalent equation effectively integrates the predatory capacity of multiple natural enemy species and their various developmental stages in the field, establishing a unified quantitative model. This provides a practical tool for evaluating the predation effect of natural enemy communities on wheat fields. Based on this, the pest control efficiency of natural enemies in wheat fields of eastern Shandong was analyzed. A simulation of functional plant *C. monnieri* intercropped with wheat at a 1 : 30 ratio demonstrated that when *C. monnieri* sustains a natural enemy density of 15 individuals/ m², the natural enemy communities in the wheat field can consume up to 57 684 wheat aphids per 667 m² (calculated as 22 m² of *C. monnieri* per 667 m² wheat field). When the actual aphid population falls below this threshold, natural enemies can effectively suppress wheat aphid damage. **[Conclusion]** The predation equivalent equation = $\sum_{i=1}^n P_i \alpha_i$

serves as a robust tool for quantifying the aphid-predation capacity of field natural enemy communities, aiding in the assessment of their practical pest control potential. This approach will provide decision-making support for utilizing natural enemies in wheat fields and advancing ecological aphid management strategies.

Key words predation equivalent relationship; predatory natural enemies; wheat aphids; *Cnidium monnieri*; biological control

小麦是我国第二大粮食作物,其总产量在全球范围内位居前列(高艳梅等,2024)。麦蚜是农业农村部2020年公布的十大“一类农业”害虫之一,每年导致近百万吨的粮食产量损失(刘万才等,2016)。随着化学防治带来的问题日益凸显,国家对害虫生态防治给予了高度重视(戈峰,2020;潘明真等,2022)。我国天敌资源丰富,有瓢虫类、寄生蜂类、蜘蛛类、食蚜蝇及草蛉等多种天敌。天敌对麦蚜有明显的“跟随效应”,且能抑制麦蚜种群的发展(胡想顺等,2022)。在田间,通常是多种天敌、多个虫态共存,因此对田间天敌群落的整体控害效果进行定性或定量分析,是生态防控研究中不可或缺的重要组成部分(段雪莹等,2021)。

目前,自然天敌对害虫控制作用的评估方法主要包括田间系统调查、直接观察法、标记法等。这些传统方法大都是定性研究,很难定量评价天敌与害虫的捕食关系(刘树生,2004),因此一系列定量评估方法应运而生,包括罩笼接虫法、稳定同位法、生态能量学法等(孟翔等,2013;欧阳芳等,2014;边文波等,2016)。此外还有基于昆虫分子生物学技术发展的评价方法,如Ju等(2019)通过PCR技术分析了瓢虫肠道内花生蚜 *Aphis craccivora* 内容物,发现花生与玉米带状间作能够显著增大瓢虫的种群密度,同时显著减少花生蚜的数量。这些定量分析方法需要借助室内仪器设备进行,且以上定量分析方法都是

基于单种天敌对害虫种群的控害效果进行的。但天敌在田间则常以群落形式存在,多物种相互作用共同形成控害过程。如何评价多种天敌的控害功能一直是害虫种群治理的难点(赵紫华,2016),目前还没有一个针对多种天敌群落在田间的捕食作用进行定量评估的方法。

“当量”是一种用于评估不同事物在特定领域(如能力、剂量、效果等)中具有等效性的概念,通过使用当量,可以有效地量化不同事物之间的相互关系(Zhang and Wang, 2015)。对田间多种天敌控害而言,当量关系是在综合不同种类、不同发育阶段天敌的捕食作用基础上,依据可量化的标准构建,用于描述多种天敌捕食蚜虫的能力。通常以某一种优势天敌捕食某一种优势猎物的日捕食量为一个标准单位,其它天敌的日捕食量除以该天敌的捕食量作为当量系数,从而统一量化并评估多种天敌共同作用下对害虫的捕食效果,且可以结合田间单位面积实际天敌数量与害虫的数量,对是否需要采取害虫相关防治措施进行评估。

在农田周围伴生种植功能植物蛇床草 *Cnidium monnieri* 作为一种新型的害虫生态防控手段,目前已经在小麦、棉花、花生、苹果、梨等作物或果园中得以研究与应用,其涵养的天敌种类丰富,控害效果显著(杨泉峰等,2018,2020;蔡志平等,2024;Liang *et al.*, 2024)。以往定量研究蛇床草对天敌捕食猎物效果,主要集中在

天敌的食物来源及其转移扩散模式上。Cai 等（2020, 2021）通过铷元素（Rb）标记技术对异色瓢虫 *Harmonia axyridis* 在微景观中的迁移扩散进行定量追踪，发现苹果树上 2/3 的异色瓢虫源自蛇床草。Han 等（2025）研究结果表明，在蛇床草花带上的异色瓢虫能够迁移到距离花带 2-18 m 的梨树上。然而，目前尚欠缺有效量化单位面积蛇床草所涵养的天敌对麦蚜控制效果的方法。

本文探讨了在田间多种天敌、多个虫态共存的复杂环境中，天敌群落捕食当量和关系式的基本原理与计算方法。通过对麦田及蛇床草带天敌及麦蚜的实际调查数据进行分析，进一步对田间多种天敌控制麦蚜的效果进行了定量评估和模拟分析。旨在解答以下两个关键问题：（1）如何定量分析田间多种天敌共存时，天敌群落对害

虫的实际捕食作用和控害能力；（2）在麦田伴生种植功能植物蛇床草后，其涵养的天敌是否能有效控制麦田蚜虫。

1 材料与方法

1.1 数据获取

通过搜集已报道的天敌捕食功能反应相关的文献（表 1），获取常见捕食性天敌（如异色瓢虫、龟纹瓢虫 *Propylaea japonica*、多异瓢虫 *Hippodamia variegata*、七星瓢虫 *Coccinella septempunctata*、食蚜蝇、草蛉、小花蝽等）成虫和幼虫对蚜虫的平均最大日捕食量数据，其中成虫最大日捕食量数据为雌雄成虫最大日捕食量的平均值，幼虫最大日捕食量为各个龄期幼虫最大日捕食量的平均值。

表 1 常见的捕食性天敌捕食蚜虫平均日捕食量
Table 1 Average daily predation quantity of common predatory natural enemies on aphids

天敌种类 Natural enemy species	蚜虫种类 Aphid species	天敌幼虫取食蚜虫 平均值（头/d） Average feeding of aphids by larval predators (ind./d)	天敌成虫取食蚜 虫平均值（头/d） Average feeding of aphids by adult predators (ind./d)	参考文献 Reference
龟纹瓢虫 <i>Propylaea japonica</i>	麦长管蚜 <i>Sitobion avenae</i>	52.20	/	高孝华等，2000
	禾谷缢管蚜 <i>Rhopalosiphum padi</i>	/	95.36	陈洁等，2015
异色瓢虫 <i>Harmonia axyridis</i>	禾谷缢管蚜 <i>Rhopalosiphum padi</i>	210.93	343.01	周丽君等，2022
七星瓢虫 <i>Coccinella septempunctata</i>	麦长管蚜 <i>Sitobion avenae</i>	96.70	40.90	史磊和颜金龙，2013； 高玥等，2024
多异瓢虫 <i>Hippodamia variegata</i>	麦二叉蚜 <i>Schizaphis graminum</i>	122.68	/	胡冠芳，1992
黑带食蚜蝇 <i>Episyrphus balteatus</i>	麦长管蚜 <i>Sitobion avenae</i>	50.13	/	曹玉，2003
普通草蛉 <i>Chrysoperla carnea</i>	麦长管蚜 <i>Sitobion avenae</i>	200.76	/	白微微等，2021
	麦二叉蚜 <i>Schizaphis graminum</i>			
南方小花蝽 <i>Orius similis</i>	豆蚜 <i>Aphis craccivora</i> ，豌豆修	39.84	44.41	曾广等，2018；张晓 媛等，2023
	尾蚜 <i>Megoura crassicauda</i> ，豌			
	豆蚜 <i>Acyrtosiphon pisum</i> ，烟			
	蚜 <i>Myzus persicae</i> ，马铃薯长			
	管蚜 <i>Macrosiphum euphorbiae</i>			

1.2 不同天敌捕食当量关系的换算

根据天敌捕食蚜虫的数量, 将田间调查过程中数量占比最多的优势种群龟纹瓢虫成虫每天取食优势蚜虫禾谷缢管蚜 *Rhopalosiphum padi* 的数量定为 1 个标准单位的当量, 通过其它天敌的

捕食量除以龟纹瓢虫雌雄成虫平均蚜虫捕食量 95 头/d (陈洁等, 2015), 计算出不同天敌的捕食当量系数(换算当量系数时对搜集到的天敌捕食量数据进行整数化), 各个天敌的当量系数见表 2。

表 2 基于龟纹瓢虫成虫蚜虫捕食量 (95 头/d) 的常见天敌捕食量当量系数
Table 2 Based on the common natural enemy predation equivalent coefficient derived from the adult *Propylaea japonica*'s aphid predation rate (95 ind./d)

捕食性天敌 Predators	天敌捕食蚜虫数量 (头/d) Number of aphids predated by natural enemies (ind./d)	当量系数 Equivalent coefficient
龟纹瓢虫成虫 <i>Propylaea japonica</i> adult	95	1.00
龟纹瓢虫幼虫 <i>Propylaea japonica</i> larva	52	0.55
异色瓢虫成虫 <i>Harmonia axyridis</i> adult	343	3.61
异色瓢虫幼虫 <i>Harmonia axyridis</i> larva	211	2.22
七星瓢虫成虫 <i>Coccinella septempunctata</i> adult	41	0.43
七星瓢虫幼虫 <i>Coccinella septempunctata</i> larva	97	1.02
多异瓢虫幼虫 <i>Hippodamia variegata</i> larva	123	1.29
黑带食蚜蝇幼虫 <i>Episyrphus balteatus</i> larva	50	0.53
普通草蛉幼虫 <i>Chrysoperla carnea</i> larva	201	2.12
南方小花蝽成虫 <i>Orius similis</i> adult	44	0.46

1.3 天敌捕食当量关系式及当量和的计算

假设田间有多种天敌 (P) 共存、每种天敌 (P_i) 的捕食当量系数为 α_i , 那么不同天敌种群数量与其捕食当量系数之积的求和, 即为天敌群落的捕食当量和:

天敌群落当量和=
$$\sum_{i=1}^n P_i \alpha_i$$

关系式中, P_i 为第 i 种天敌单位面积的数量, 变量 α_i 为第 i 种天敌的捕食当量系数。

1.4 田间布局与调查

1.4.1 调查时间及地点 在麦蚜发生高峰期 (2024 年 5 月 7 日、5 月 15 日和 5 月 24 日) 进行 3 次调查, 选择山东省聊城市高唐县 (36°47'00.84"N, 116°07'44.98"E) 和东昌府区 (36°27'24.44"N, 115°59'15.55"E) 的 2 块小麦田。两个基地的处理设置均按照每间隔 30 m 左右种植宽 1 m 蛇床草带的模式进行田间布局 (图 1)。

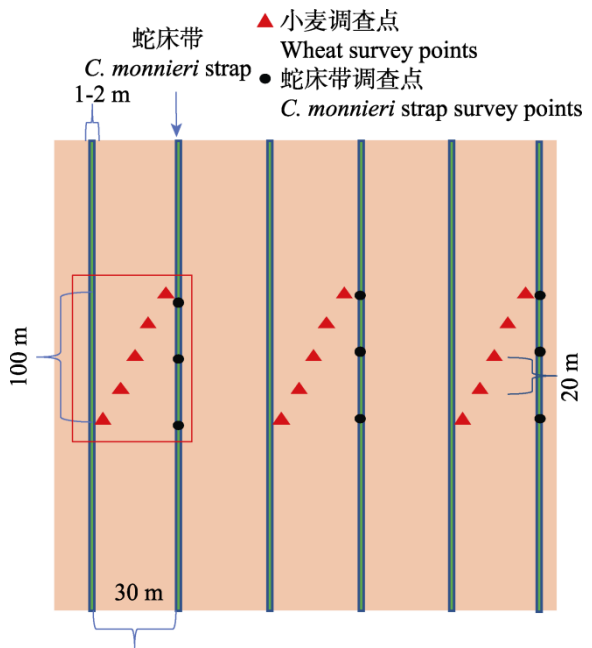


图 1 田间调查布局图
Fig. 1 Field survey layout diagram

1.4.2 小麦田天敌及麦蚜种群调查 每个调查区域分别设置 3 次重复, 每个重复单角线 5 点取

样法进行调查。每个样点间距离 20 m, 每个采样点随机选取长势均匀的小麦植株, 使用一个面积为 0.25 m^2 ($0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$) 的金属取样框, 统计取样框内不同捕食性天敌 (如异色瓢虫、龟纹瓢虫、多异瓢虫、七星瓢虫、食蚜蝇、草蛉、小花蝽等) 的虫态及对应的数量, 再统计麦穗数并记录。随机取 20 穗小麦, 统计每穗小麦上不同蚜虫的数量, 再根据以下公式计算评估田块蚜虫每平方米的实际发生量。对照区域选择未种植蛇床草的田块进行调查, 调查方法同上。

麦蚜实际发生量 (头/ m^2) =

$$\frac{(\text{小麦穗数} / \text{m}^2)}{100} \times \text{百株蚜虫数量}。$$

1.4.3 蛇床草带天敌调查 蛇床带设置 3 次重复, 每个重复取 3 点进行取样, 样点间距离 20 m, 使用一个面积为 0.25 m^2 ($0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$) 的金属取样框, 统计框内的所有不同捕食性天敌 (如异色瓢虫、龟纹瓢虫、多异瓢虫、七星瓢虫、食蚜蝇、草蛉、小花蝽等) 的虫态及对应的数量。

1.5 天敌群落对麦田控蚜潜能分析

1.5.1 天敌取食蚜虫的理论值 将天敌群落当量和值与龟纹瓢虫成虫取食蚜虫的数量 (95 头/d) 相乘, 即可算出田间多种天敌取食蚜虫的理论数量。若计算出的理论数量大于麦田实际发生的蚜虫数, 则无需对麦蚜采取防治措施, 反之, 则需要采取相关防治措施治理麦蚜。

1.5.2 麦田天敌捕食蚜虫的效能分析 基于田间调查的百株小麦天敌种群数量, 分析当麦蚜实际发生数量计为 500、1 000 和 1 500 头/百株时, 通过当量和公式计算这些天敌取食麦蚜的理论值。若理论值大于蚜虫实际发生量时, 在防治策略里打“×”, 表明无需对麦蚜采取防治措施; 反之在防治策略里打“√”, 表明需采取相关措施对麦蚜进行防治。

1.5.3 功能植物蛇床草涵养天敌控制麦蚜的效能模拟分析 在模拟分析蛇床草与小麦 1 : 30 的伴生种植模式后, 按照蛇床草带面积与麦田面积 (667 m^2) 的比例为 1 : 30 来计算, 得出蛇床草带的面积为 22 m^2 。当蛇床草单位面积上涵养了不同数量的天敌时 (假设 1 m^2 蛇床上涵养各

种天敌 15 头, 具体为异色瓢虫 5 头/ m^2 、龟纹瓢虫 3 头/ m^2 、多异瓢虫 2 头/ m^2 、七星瓢虫 2 头/ m^2 、食蚜蝇 1 头/ m^2 、草蛉 1 头/ m^2 、小花蝽 1 头/ m^2), 通过当量和公式计算这些天敌理论上可取食麦蚜的数量 (头/ m^2)。接着, 利用面积比例, 换算出在 667 m^2 麦田中, 天敌取食麦蚜的理论值。由此, 推算出在单位面积的蛇床草上, 天敌能够控制的麦蚜数量。

1.6 数据分析

试验数据经 Excel 2021 初步整理后, 采用 JMP Pro 16.0 进行独立样本 t 检验, 分析天敌取食麦蚜的理论值与田间麦蚜实际发生量之间的差异显著性 ($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 麦田天敌取食蚜虫的理论值与蚜虫实际发生值

通过对山东省聊城市高唐县和东昌府区基地 2 块麦田及蛇床带调查数据 (表 3) 代入当量和公式和麦蚜实际发生量公式得表 4 可知, 高唐县田间天敌群落当量和为 $2.13 \text{ 头}/\text{m}^2$, 这些天敌取食蚜虫理论值 ($202.50 \text{ 头}/\text{m}^2/\text{d}$) 大于麦蚜实际发生量 ($93.60 \text{ 头}/\text{m}^2$), 但差异不显著 ($t=1.722$, $df=88$, $P=0.0886$); 东昌府区田间天敌群落当量和为 $1.98 \text{ 头}/\text{m}^2$, 这些天敌取食蚜虫的理论值 ($188.90 \text{ 头}/\text{m}^2/\text{d}$) 大于蚜虫实际发生数量 ($153.43 \text{ 头}/\text{m}^2$), 但差异也不显著 ($t=0.6551$, $df=88$, $P=0.5141$), 因此 2 块麦田均无需对麦蚜采取防治措施。

高唐县蛇床草上天敌群落数据 (表 5) 代入当量关系式计算的其当量和为 $16.45 \text{ 头}/\text{m}^2$, 不同天敌理论上取食蚜虫的数量为 $1562.79 \text{ 头}/\text{m}^2/\text{d}$; 东唐府区蛇床草上天敌群落当量和为 $47.08 \text{ 头}/\text{m}^2$, 多种天敌理论上取食蚜虫的数量为 $4472.74 \text{ 头}/\text{m}^2/\text{d}$ (表 6), 蛇床草天敌群落可不断取食麦田麦蚜。

2.2 麦田天敌群落捕食蚜虫的效能分析

根据以上当量和公式的应用, 可评估麦田天

表 3 山东省高唐县和东昌府区小麦天敌及蚜虫的实际发生量
Table 3 Actual occurrence of natural enemies and aphids in wheat fields in Gaotang County and Dongchangfu District, Shandong Province

调查区域 Research area	小麦穗数 (m ²) Number of wheat ears (/m ²)	蚜虫 (头/百株) Aphids (ind./100 plants)	不同捕食性天敌成虫、幼虫数量 (头/m ²) Population counts of predatory species (adult and larva, ind./m ²)						
			异色瓢虫 成虫 <i>Harmonia axyridis</i> adult	龟纹瓢虫 成虫 <i>Propylaea japonica</i> adult	多异瓢虫 成虫 <i>Hippodamia variegata</i> adult	七星瓢虫 成虫 <i>Coccinella septempunctata</i> adult	食蚜蝇 幼虫 <i>Syrphid</i> larva	草蛉成虫 <i>Chrysopid</i> adult	小花蝽 成虫 <i>Anthocorid</i> adult
高唐县 Gaotang County	720.07±0.73	13.00±6.22	0.09±0.09	0.44±0.22	0.00±0.00	0.00±0.00	2.58±0.60	0.00±0.00	0.00±0.00
东昌府区 Dongchangfu District	520.58±1.74	29.78±5.72	0.09±0.09	0.80±0.30	0.00±0.00	0.09±0.09	1.33±0.31	0.00±0.00	0.27±0.27

表 4 高唐县和东昌府区麦田天敌群落捕食理论值与麦蚜实际发生值比较
Table 4 Comparison between the theoretical predation values of natural enemy communities and the actual occurrence values of wheat aphids in wheat fields of Gaotang County and Dongchangfu District

调查地点 Research area	天敌种类 Natural enemy species	当量和 Equivalent sum	天敌取食蚜虫理论 数量 (头/m ² /d) Theoretical number of aphids eaten by natural enemies (ind./m ² /d)	麦蚜实际发生量 (头/m ²) Actual occurrence number of wheat aphids (ind./m ²)
高唐县 Gaotang County	异色瓢虫 <i>Harmonia axyridis</i> , 龟纹瓢虫 <i>Propylaea japonica</i> , 多异瓢虫 <i>Hippodamia variegata</i> , 七星瓢虫 <i>Coccinella septempunctata</i> , 食蚜蝇 <i>Syrphid</i> , 草蛉 <i>Chrysopid</i> , 小花蝽 <i>Anthocorid</i>	2.13±0.47	202.50±44.43 a	93.60±45.01 a
东昌府区 Dongchangfu District	异色瓢虫 <i>Harmonia axyridis</i> , 龟纹瓢虫 <i>Propylaea japonica</i> , 多异瓢虫 <i>Hippodamia variegata</i> , 七星瓢虫 <i>Coccinella septempunctata</i> , 食蚜蝇 <i>Syrphid</i> , 草蛉 <i>Chrysopid</i> , 小花蝽 <i>Anthocoridae</i>	1.98±0.48	188.90±45.34 a	153.43±29.60 a

表中数值为平均值±标准误, 同一行数据后标有不同小写字母代表显著差异 (P<0.05, t 检验。)
Data in the table are mean±SE, and followed by the different letters within the same row indicate significant difference (P<0.05, t-test).

敌与蚜虫发生量, 提出防治对策。如麦田百株小麦调查到的天敌总数为 8 头时 (表 7), 具体包括异色瓢虫成虫 2 头、龟纹瓢虫成虫 1 头、多异瓢虫成虫 1 头、七星瓢虫成虫 1 头、食蚜蝇成虫 1 头、草蛉幼虫 1 头、小花蝽成虫 1 头, 代入当量和公式求出这些天敌理论上取食蚜虫的量为 1 239.75 头/m²/d。当麦蚜实际发生数量为 500 头/百株时, 无需防治, 防治对策里打“×”; 当麦蚜实际发生数量为 1 000 头/百株时, 天敌取食蚜虫的理论值仍大于蚜虫实际发生量, 无需防治, 防治对策里打“×”; 当实际蚜虫发生数量为 1 500 头/百株时, 天敌取食蚜虫的理论值小于蚜虫实际发生量, 需采取相关防治措施, 防治对策里打“√”。

表 5 山东省高唐县和东昌府区麦田蛇床草带上的天敌数量
Table 5 Number of natural enemies on *Cnidium monnieri* strips in wheat fields of Gaotang County and Dongchangfu District, Shandong Province

调查区域 Research area	不同捕食性天敌成虫、幼虫数量 (头/m ²) Population counts of predatory species (adult and larva, ind./ m ²)						
	异色瓢虫成虫 <i>Harmonia axyridis</i> adult	龟纹瓢虫成虫 <i>Propylaea japonica</i> adult	多异瓢虫成虫 <i>Hippodamia variegata</i> adult	七星瓢虫成虫 <i>Coccinella septempunctata</i> adult	食蚜蝇幼虫 Syrphid larva	草蛉成虫 Chrysopid adult	小花蝽成虫 Anthocorid adult
高唐县 Gaotang County	1.92±0.58	3.41±0.87	0.44±0.33	1.04±0.40	4.30±0.71	0.00±0.00	6.07±1.45
东昌府区 Dongchangfu District	8.74±3.80	7.55±2.12	1.78±0.81	3.85±1.99	1.93±0.49	0.74±0.52	3.11±1.37

表 6 山东省高唐县和东昌府区蛇床草带上的敌群落捕食当量和值及理论取食量
Table 6 Predation equivalent and theoretical consumption of natural enemy communities on *Cnidium monnieri* strips in Gaotang County and Dongchangfu District, Shandong Province

调查地点 Research area	天敌种类 Natural enemy species	当量和 Equivalent sum	天敌取食蚜虫理论数量 (头/m ² /d) Theoretical number of aphids eaten by natural enemies (ind./m ² /d)
高唐县 Gaotang County	异色瓢虫 <i>Harmonia axyridis</i> , 龟纹瓢虫 <i>Propylaea japonica</i> , 多异瓢虫 <i>Hippodamia variegata</i> , 七星瓢虫 <i>Coccinella septempunctata</i> , 食蚜蝇 <i>Syrphid</i> , 草蛉 <i>Chrysopid</i> , 小花蝽 <i>Anthocorid</i>	16.45±12.81	1 562.79±281.6
东唐府区 Dongchangfu District	异色瓢虫 <i>Harmonia axyridis</i> , 龟纹瓢虫 <i>Propylaea japonica</i> , 多异瓢虫 <i>Hippodamia variegata</i> , 七星瓢虫 <i>Coccinella septempunctata</i> , 食蚜蝇 <i>Syrphid</i> , 草蛉 <i>Chrysopid</i> , 小花蝽 <i>Anthocorid</i>	47.08±12.81	4 472.74±1 697.7

2.3 蛇床草涵养的天敌群落对麦田蚜虫控制效能模拟分析

基于目前的蛇床草以 1 : 30 伴生种植小麦的模式, 进一步利用当量关系模拟分析蛇床草带上涵养的天敌及其控害效能 (表 8)。若 1 m² 蛇床草上涵养各种天敌 15 头, 具体为异色瓢虫成虫 5 头/m²、龟纹瓢虫成虫 3 头/m²、多异瓢虫成虫 2 头/m²、七星瓢虫成虫 2 头/m²、食蚜蝇幼虫 1 头/m²、草蛉成虫 1 头/m²、小花蝽成虫 1 头/m², 这些天敌群落捕食当量和为 27.6 头/m², 天

敌取食蚜虫的理论数量为 2 622 头/m²/d。根据蛇床草占小麦面积的 1/30, 即 22 m², 折算出在 667 m² 麦田天敌有 330 头, 可取食蚜虫数量为 57 684 头/m²/d。

3 讨论

3.1 定量计算天敌群落捕食当量关系的新方法

定量评价天敌的控害作用是害虫治理的重要基础 (戈峰和欧阳芳, 2014)。捕食功能反应是目前定量评价天敌对害虫控制效果的主要方

表 7 麦田捕食性天敌群落捕食蚜虫效能分析

Table 7 Analysis of aphid predation efficacy by predatory natural enemy communities in wheat fields

天敌数量 (头/100 株) Number of natural enemies (ind./100 plants)	天敌种类 Natural enemy species	天敌数量 (头/100 株) Number of natural enemies (ind./100 plants)	当量系数 α_i Equivalent coefficient α_i	麦蚜实际 发生量 (头/100 株) Actual occurrence number of wheat aphids (ind. /100 plants)	防治对策 Control measures	当量和 Equivalent sum	天敌取食蚜虫 理论数量 (头/m ² /d) Theoretical number of aphids eaten by natural enemies (ind./m ² /d)
8	异色瓢虫 <i>Harmonia axyridis</i>	2	3.61	500	×	13.05	1 239.75
	龟纹瓢虫 <i>Propylaea japonica</i>	1	1.00				
	多异瓢虫 <i>Hippodamia variegata</i>	1	1.29	1 000	×	13.05	1 239.75
	七星瓢虫 <i>Coccinella septempunctata</i>	1	0.43				
	食蚜蝇 Syrphid	1	0.53	1 500	√		
	草蛉 Chrysopid	1	2.12				
	小花蝽 Anthocorid	1	0.46				

× 代表天敌取食麦蚜的理论值 > 麦蚜实际发生值, 无需对麦蚜进行防治; √代表天敌取食麦蚜的理论值 < 麦蚜实际发生值, 需对麦蚜进行防治。

× indicates that the theoretical predation value of natural enemies on wheat aphids exceeds the actual occurrence of aphids, meaning no control measures are required; √ indicates that the theoretical predation value is lower than the actual aphid population, meaning control measures are necessary.

表 8 单位面积蛇床草涵养的天敌对麦蚜控制作用的模拟定量分析

Table 8 Simulated quantitative analysis of the control effect of natural enemies harbored per unit area of *Cnidium monnieri* on wheat aphids

蛇床草面 积 (m ²) C. <i>monnieri</i> area (m ²)	天敌总数量 (头/100 株) Total number of natural enemies (ind./ 100 plants)	天敌种类 Natural enemy species	天敌数量 (头/100 株) Number of natural enemies (ind. /100 plants)	当量系数 α_i Equivalent coefficient α_i	当量和 Equivalent sum	天敌取食蚜虫理论 数量 (头/m ² /d) Theoretical number of aphids eaten by natural enemies (ind./m ² /d)	折算面积后麦蚜被 取食量 (头/667 m ²) Normalized wheat aphids consumption per unit area (ind./667 m ²)
22	15	异色瓢虫 <i>Harmonia axyridis</i>	5	3.61	27.6	2 622	57 684
		龟纹瓢虫 <i>Propylaea japonica</i>					
		多异瓢虫 <i>Hippodamia variegata</i>	2	1.29	27.6	2 622	57 684
		七星瓢虫 <i>Coccinella septempunctata</i>					
		食蚜蝇 Syrphid	1	0.53	27.6	2 622	57 684
		草蛉 Chrysopid	1	2.12			
		小花蝽 Anthocorid	1	0.46			

法之一,主要分析单种天敌对猎物单位时间内的捕食能力等(徐海云,2011;郑苑,2019),以模拟田间天敌对猎物的不同捕食情况,从而推测这些天敌对猎物的捕食效果及应用价值。本研究构建了一种新的捕食当量关系式,从而归一化了田间多种天敌与不同虫态共存时的捕食效能。该关系式在实际应用当中操作简单,涉及相关参数易获取,结果也较容易评估,可以对田间天敌群落取食猎物的理论数值快速计算。当量系数的确定是当量关系式的核心,一方面在选择某一种天敌发生量及其捕食的猎物当量系数为1个标准单位时,应选择田间的优势种群,其单位面积取食量较其他天敌而言可构成倍数关系;另一方面,田间天敌对猎物的捕食功能反应会受到捕食者自身、猎物的龄期以及环境等多种因素的影响(樊吉君等,2021)。蜜源植物(如蛇床草)可通过营养补充、行为调控、生境优化等多种途径影响天敌的捕食效率,进而增强其对害虫的生物控制能力(Li *et al.*, 2023)。Su等(2023)研究表明,取食“麦蚜+蛇床草花蜜”的异色瓢虫幼虫体重显著增加、存活率提高、发育历期缩短,且单雌产卵量达到仅取食麦蚜组的1.62倍,成虫期补充蛇床草花蜜可使产卵量提升1.44倍。因此,本研究评估了在麦田伴生种植蛇床草的条件下,天敌群落的捕食能力,并针对天敌的不同发育阶段(成虫与幼虫)设定了相应的当量系数。这种当量系数的设定有助于提高评估结果的精确度,为田间天敌群落的控害效能提供了一种简便且易于操作的新评估方法。需要指出的是,田间的害虫与天敌群落是动态变化的,其受到温度、湿度、降雨、农事操作等多种因素的影响。因此,有必要对该模型进行优化,建立一个多因子的动态模型,以便更准确地提供天敌控害的相关参数。

3.2 麦田天敌控蚜潜能分析

根据上述构建的天敌群落捕食当量关系,结合鲁东高唐县、东昌府区小麦基地麦蚜及其天敌的系统调查数据,进一步将龟纹瓢虫成虫发生量当量系数计为“1”,换算其他天敌当量系数,

代入当量和关系式,计算出两个伴生种植蛇床草带的麦田中捕食性天敌捕食麦蚜的理论值均大于麦蚜实际发生量,这可能与功能植物提供的替代食物资源(花粉、花蜜)和微生物庇护有关,这延长了天敌(如瓢虫、食蚜蝇)的驻留时间,积累一定密度的捕食性天敌,进而可有效控制麦蚜,也表明天敌群落捕食当量关系式简单、适用。

3.3 麦田伴生种植蛇床草涵养天敌控蚜作用分析

功能植物蛇床草伴生种植作为一种新型的害虫生态调控手段,目前正在麦田生态防控中成功应用。现阶段的主要推广模式是将蛇床草与小麦以1:30的模式进行套作。假设麦田及蛇床草带上涵养的天敌及害虫均匀发生分布,且麦田的天敌均由蛇床草带转移而来,能够均匀的取食麦田害虫。在常态化防治麦蚜时,防治指标为500头/百穗时进行防治(白莉等,2006),为此模拟麦田中天敌与麦蚜的危害关系时,麦蚜实际发生量模拟梯度等于或大于该防治指标,才需采取应急措施对麦蚜进行防治,如当麦田多种天敌达到8头/ m^2/d 时,取食麦蚜的理论值为1239.75头/ m^2/d 。再结合模拟蛇床草带上的天敌捕食能力,当蛇床草上涵养15头/ m^2 天敌时,按每667 m^2 麦田22 m^2 蛇床草计算,麦田共有天敌57684头/667 m^2 。当麦蚜的实际发生数量低于这个值时,蛇床草上所涵养的天敌便足以控制小麦上的蚜虫,无需采取额外的防治措施。这为利用功能植物蛇床草进行生态防控提供了有力的数据支持。需要说明的是,虽然本研究表明种植蛇床草的麦田天敌取食麦蚜的理论值大于麦蚜实际发生量,但在实际生产中,天敌的控蚜效果还受到许多其他因素的影响,如气候条件、农药使用、作物种植方式、天敌与蚜虫在时间和空间上的匹配程度等;蚜虫的数量也因天敌的捕食而逐渐下降,它的为害累积效应也会减少。因此,在推广种植蛇床草涵养天敌控蚜技术时,需要综合考虑这些因素,以更好地发挥蛇床草“以草养虫、以虫治虫”控蚜效果。

综上,本文通过当量和推算天敌群落取食害

虫的理论值, 结合防治指标, 为田间管理者提供了评估天敌控害效果的辅助工具, 进一步为麦田的害虫生态防控提供了科学依据。在实际应用中, 田间管理者可以根据天敌与害虫的数量动态关系, 灵活调整防治策略, 减少化学农药的使用, 保护生态环境。同时, 本研究也为其他作物的害虫生态化管理提供了参考和借鉴, 对于推动农业可持续发展具有重要意义。

参考文献 (References)

- Bai L, Zheng WY, Ren DZ, Qu YQ, Li XP, Wang SB, 2006. Study on the damage and control threshold of *Sitobion avenae*. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 34(1): 61–64. [白莉, 郑王义, 任东植, 曲运琴, 李喜平, 王随保, 2006. 麦长管蚜为害损失估计及防治阈值研究. 山西农业科学, 34(1): 61–64.]
- Bai WW, Gao HF, Zhang H, Yang AP, Akegan·Wuwaishi, Ding RF, Li GK, 2021. Predatory functional response and search efficiency of *Chrysoperla carnea* (Stephens) larvae with respect to the aphids *Schizaphis graminum* (Rondani) and *Sitobion avenae* (Fabricius). *Chinese Journal of Applied Entomology*, 58(2): 408–414. [白微微, 高海峰, 张航, 杨安沛, 阿克旦·吾外士, 丁瑞丰, 李广阔, 2021. 普通草蛉幼虫对麦二叉蚜和麦长管蚜的捕食功能反应与搜寻效应. 应用昆虫学报, 58(2): 408–414.]
- Bian WB, Liu X, Geng J, 2016. Research progress on pests controlling mechanism by natural enemies and its evaluation methods. *China Plant Protection*, 36(12): 17–23, 57. [边文波, 刘晓, 耿军, 2016. 天敌昆虫控害作用机制和评价方法研究进展. 中国植保导刊, 36(12): 17–23, 57.]
- Cai ZP, Ouyang F, Chen J, Yang QF, Desneux N, Xiao YL, Zhang JP, Ge F, 2021. Biological control of *Aphis spiraeicola* in apples using an insectary plant that attracts and sustains predators. *Biological Control*, 155: 104532.
- Cai ZP, Ouyang F, Su JW, Zhang XR, Liu CL, Xiao YL, Zhang JP, Ge F, 2020. Attraction of adult *Harmonia axyridis* to volatiles of the insectary plant *Cnidium monnieri*. *Biological Control*, 143: 104189.
- Cai ZP, Zhang XR, Xiao YL, Zhang JP, Ge F, 2024. Functional response and predation preference of multicolored Asian lady beetle *Harmonia axyridis* to two aphids in the micro-landscape of apple and Monnier's snowparsley *Cnidium monnieri*. *Journal of Plant Protection*, 51(1): 96–105. [蔡志平, 张兴瑞, 肖云丽, 张建萍, 戈峰, 2024. 异色瓢虫对苹果-蛇床草微景观中两种蚜虫的捕食功能反应及选择偏好性. 植物保护学报, 51(1): 96–105.]
- Cao Y, 2003. Studies on the foraging behavioural ecology of *Episyrphus balteatus* De Geer. Master dissertation. Yangling: Northwest Agriculture & Forestry University. [曹玉, 2003. 黑带食蚜蝇 *Episyrphus balteatus* De Geer 捕食行为生态学的研究. 硕士学位论文. 杨凌: 西北农林科技大学.]
- Chen J, Jiao HY, Zhang H, Song YT, Sun HK, 2015. Study on predatory function of *Propylea japonica* on *Rhopalosiphum padi*. *Journal of Hebei Agricultural Sciences*, 19(2): 41–43, 50. [陈洁, 焦宏业, 张恒, 宋玉田, 孙海昆, 2015. 龟纹瓢虫对禾谷缢管蚜捕食功能反应的研究. 河北农业科学, 19(2): 41–43, 50.]
- Duan XY, Wang YD, Zhang NZ, Gao F, Zhao ZH, 2021. Research advances in evaluation methods of predator's control of insect pests. *Journal of Plant Protection*, 48(2): 275–288. [段雪莹, 王祎丹, 张乃钊, 高峰, 赵紫华, 2021. 捕食性天敌控害能力评价方法进展. 植物保护学报, 48(2): 275–288.]
- Fan JJ, Hu QL, Jia SP, Shi ZH, Zhang C, Li QH, Li M, Tan L, 2021. Predation of *Toxoptera aurantii* by *Episyrphus balteatus*. *Journal of Tea Communication*, 48(3): 443–447, 506. [樊吉君, 胡秋龙, 贾世平, 史子涵, 张晨, 李清昊, 李密, 谭琳, 2021. 黑带食蚜蝇对茶蚜的捕食作用研究. 茶叶通讯, 48(3): 443–447, 506.]
- Gao XH, Qu YX, Mu SM, Liu JZ, Wang X, 2000. Studies on the predatory functional responses and searching efficiency of *Propylaea japonica* on *Macrosiphum granarium*. *Journal of Laiyang Agricultural College*, 17(2): 103–106. [高孝华, 曲耀训, 牟少敏, 刘进展, 王霞, 2000. 龟纹瓢虫对麦蚜的捕食功能反应与寻找效应研究. 莱阳农学院学报, 17(2): 103–106.]
- Gao Y, Zang YC, Hao G, Wang XY, Guo JQ, 2024. Research progress and prospects of biocontrol for aphids in China. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 52(17): 11–16, 50. [高玥, 张元臣, 郝钢, 王兴云, 郭建青, 2024. 我国蚜虫生物防治的研究现状与展望. 安徽农业科学, 52(17): 11–16, 50.]
- Gao YM, Jing MY, Chen WW, Zhang M, Zhang YQ, Wang ZM, 2024. Analysis of yield and quality traits of wheat cultivars over the past 20 years in China. *Journal of Triticeae Crops*, 44(9): 1152–1160. [高艳梅, 景茂雅, 陈薇薇, 张萌, 张永清, 王志敏, 2024. 近 20 年来中国小麦品种产量和品质性状变化分析. 麦类作物学报, 44(9): 1152–1160.]

- Ge F, 2020. The ecological regulation and management of pests. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 57(1): 10–19. [戈峰, 2020. 论害虫生态调控策略与技术. 应用昆虫学报, 57(1): 10–19.]
- Ge F, Ouyang F, 2014. Quantitative evaluation of the biological control value of predatory insects based on ecological energetic analyses. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 51(1): 307–313. [戈峰, 欧阳芳, 2014. 定量评价天敌控害功能的生态能学方法. 应用昆虫学报, 51(1): 307–313.]
- Han GD, Zhang XR, Cai ZP, Xiao YL, Ge F, 2025. Flower strips enhance the abundance and biocontrol services of predatory arthropods in a pear orchard. *Biological Control*, 200: 105680.
- Hu GF, 1992. Functional response of three species of ladybug larvae to predation on *Schizaphis graminum*. *Natural Enemies of Insects*, 14(4): 180–185. [胡冠芳, 1992. 三种瓢虫幼虫捕食麦二叉蚜的功能反应. 昆虫天敌, 14(4): 180–185.]
- Hu XS, Li JW, Peng JF, Zhao HY, Liu TX, 2022. Grain aphid *Sitobion miscanthi*: Damage on wheat yield components and its ecological control. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 38(12): 110–118. [胡想顺, 李靖文, 彭静凤, 赵惠燕, 刘同先, 2022. 麦长管蚜对小麦产量成分的影响与生态防控. 中国农学通报, 38(12): 110–118.]
- Ju Q, Ouyang F, Gu SM, Qiao F, Yang QF, Qu MJ, Ge F, 2019. Strip intercropping peanut with maize for peanut aphid biological control and yield enhancement. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 286: 106682.
- Li Z, Chang CY, Yuan YY, Zhang XR, Ge F, 2023. Functional plant, *Cnidium monnieri*, facilitates the conservation and the biocontrol performance of natural enemies. *The Innovation Geoscience*, 1(3): 100045.
- Liang XY, Ouyang F, Zhang XR, Sun YC, Li Z, Ge F, 2024. Increasing the proportion of flower strip area in farmland promotes natural enemies to enhance aphid biocontrol and wheat yield. *Entomologia Generalis*, 44(5): 1183–1192.
- Liu SS, 2004. Methods for evaluation of predators and parasitoids in the control of insect pests and strategy for their practical application. *Chinese Journal of Biological Control*, 20(1): 1–7. [刘树生, 2004. 天敌动物对害虫控制作用的评估方法及其应用策略. 中国生物防治, 20(1): 1–7.]
- Liu WC, Liu ZD, Huang C, Lu MH, Liu J, Yang QP, 2016. Statistics and analysis of crop yield losses caused by main diseases and insect pests in recent 10 years. *Plant Protection*, 42(5): 1–9, 46. [刘万才, 刘振东, 黄冲, 陆明红, 刘杰, 杨清坡, 2016. 近 10 年农作物主要病虫害发生危害情况的统计和分析. 植物保护, 42(5): 1–9, 46.]
- Meng X, Ouyang GC, Xia YL, Guo MF, 2013. Predation evaluation of *Diaphorina citri*'s (Homoptera: Chermidae) natural enemies using the CO I marker gene. *Acta Ecologica Sinica*, 33(23): 7430–7436. [孟翔, 欧阳革成, Xia Yu Lu, 郭明昉, 2013. 基于柑橘木虱 CO I 基因的捕食性天敌捕食作用评估. 生态学报, 33(23): 7430–7436.]
- Ouyang F, Cao J, Ge F, 2014. Quantitative evaluation of the biological analyses. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 51(1): 302–306. [欧阳芳, 曹婧, 戈峰, 2014. 定量评价天敌昆虫控害功能的稳定同位素方法. 应用昆虫学报, 51(1): 302–306.]
- Pan MZ, Zhang Y, Cao HH, Wang XX, Liu TX, 2022. Research progresses, application, and prospects in aphid biological control on main crops in China. *Journal of Plant Protection*, 49(1): 146–172. [潘明真, 张毅, 曹贺贺, 王杏杏, 刘同先, 2022. 我国主要农作物蚜虫生物防治的研究进展、应用与展望. 植物保护学报, 49(1): 146–172.]
- Shi L, Yan JL, 2013. Preliminary study on prey functional response of the 3rd- and 4th-instar larva of *Coccinella septempunctata* on four species of aphid. *Shandong Agricultural Sciences*, 45(4): 90–92. [史磊, 颜金龙, 2013. 七星瓢虫三四龄幼虫捕食四种蚜虫功能反应初步研究. 山东农业科学, 45(4): 90–92.]
- Su WW, Ouyang F, Li Z, Yuan YY, Yang QF, Ge F, 2023. *Cnidium monnieri* (L.) cusson flower as a supplementary food promoting the development and reproduction of ladybeetles *Harmonia axyridis* (Pallas) (Coleoptera: Coccinellidae). *Plants*, 12(9): 1786.
- Xu HY, Yang NW, Wan FH, 2011. Lethal interference competition between natural enemies in insect community. *Acta Entomologica Sinica*, 54(3): 361–367. [徐海云, 杨念婉, 万方浩, 2011. 昆虫群落中天敌间的致死干扰竞争作用. 昆虫学报, 54(3): 361–367.]
- Yang QF, Ouyang F, Men XY, Ge F, 2018. Discovery and utilization of a functional plant, rich in the natural enemies of insect pests, in northern China. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 55(5): 942–947. [杨泉峰, 欧阳芳, 门兴元, 戈峰, 2018. 北方富含天敌的功能植物的发现与应用. 应用昆虫学报, 55(5): 942–947.]
- Yang QF, Ouyang F, Men XY, Ge F, 2020. Functional plants: Current uses and future research. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 57(1): 41–48. [杨泉峰, 欧阳芳, 门兴元, 戈峰,

2020. 功能植物的作用原理、方式及研究展望. 应用昆虫学报, 57(1): 41–48.]
- Zeng G, Zhi JR, Zhang CR, Yang H, 2018. The predation of *Orius similis* Zheng on *Myzus persicae* (Sulzer). *Artificial Intelligence Science and Engineering*, 43(1): 82–88. [曾广, 郑军锐, 张昌容, 杨洪, 2018. 南方小花蝽对烟蚜的捕食作用. 人工智能科学与工程, 43(1): 82–88.]
- Zhang L, Wang H, 2015. The role of equivalence in ecological modeling. *Journal of Ecological Research*, 30(4): 567–578.
- Zhang XY, Wang T, Zha XR, Zan QA, Zhang HR, 2023. Predation of three aphid species on faba bean by *Orius strigicollis*. *Chinese Journal of Biological Control*, 39(1): 29–37. [张晓媛, 王葶, 查旭榕, 胥庆安, 张宏瑞, 2023. 南方小花蝽对为害蚕豆的三种蚜虫的捕食作用. 中国生物防治学报, 39(1): 29–37.]
- Zhao ZH, 2016. From “integrated pest management” to “ecologically based pest management”. *Chinese Science Bulletin*, 61(18): 2027–2034. [赵紫华, 2016. 从害虫“综合治理”到“生态调控”. 科学通报, 61(18): 2027–2034.]
- Zheng Y, Song ZW, Zhang BX, Xie YH, Wang ZJ, Ouyang J, Li DS, 2019. Life table of *Amblyseius swirskii* fed on three substitute prey species. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 56(4): 744–749. [郑苑, 宋子伟, 张宝鑫, 谢永辉, 王志江, 欧阳进, 李敦松, 2019. 斯氏钝绥螨取食三种替代猎物的实验种群生命表. 应用昆虫学报, 56(4): 744–749.]
- Zhou LJ, Yang DH, Hu QL, Shi LZ, Cao HQ, Li GT, Jiang XC, 2022. Prey selectivity and predatory functional response of *Harmonia axyridis* to *Spodoptera frugiperda* and *Rhopalosiphum padi*. *Journal of Plant Protection*, 48(2): 111–117. [周丽君, 杨灯海, 胡其磊, 石凌志, 操海群, 李桂亭, 蒋兴川, 2022. 异色瓢虫对草地贪夜蛾和禾谷缢管蚜的捕食功能反应及捕食选择性研究. 植物保护, 48(2): 111–117.]