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*

白微微** 高海峰 张 航 杨安沛 阿克旦·吾外士 丁瑞丰 李广阔***

（新疆农业科学院植物保护研究所，农业农村部西北荒漠绿洲作物有害生物综合治理重点实验室，乌鲁木齐 830091）

摘 要 **【目的】** 为评价普通草蛉 *Chrysoperla carnea* 幼虫对麦二叉蚜 *Schizaphis graminum* 和麦长管蚜 *Sitobion avenae* 的捕食反应和选择偏好，以明确普通草蛉幼虫对这 2 种蚜虫的控害能力。**【方法】** 室内设置不同密度的麦二叉蚜和麦长管蚜，统计普通草蛉 2 龄和 3 龄幼虫对 2 种猎物的捕食量，研究普通草蛉幼虫对麦二叉蚜和麦长管蚜的捕食功能反应和搜寻效应。**【结果】** 相同猎物密度下，普通草蛉 2 龄、3 龄幼虫对麦二叉蚜的捕食量均低于麦长管蚜且存在显著性差异，对 2 种小麦蚜虫的捕食功能反应均拟合 Holling Ⅱ功能反应模型和 Holling Ⅲ功能反应新模型。3 龄幼虫对麦二叉蚜和麦长管蚜的瞬时攻击率分别为 1.089 和 1.106，大于 2 龄幼虫对猎物的瞬时攻击率，同一龄期草蛉幼虫对麦长管蚜的瞬时攻击率及日最大捕食量大于麦二叉蚜，2 龄和 3 龄幼虫对麦长管蚜的处理时间为 0.005 d 和 0.004 d，均小于对麦二叉蚜的处理时间。普通草蛉幼虫对麦长管蚜的最佳寻找密度高于麦二叉蚜，其中 2 龄普通草蛉幼虫捕食麦长管蚜的最佳寻找密度最高，为 39.200。普通草蛉幼虫对小麦蚜虫的搜寻效应随猎物密度增加而降低，对麦长管蚜的搜寻效应高于麦二叉蚜，麦长管蚜搜寻效应的下降趋势大于麦二叉蚜。**【结论】** 普通草蛉幼虫对麦二叉蚜和麦长管蚜有较大的控害潜能，对于麦长管蚜的取食及控制能力高于麦二叉蚜。

关键词 普通草蛉；麦二叉蚜；麦长管蚜；功能反应；搜寻效应

Predatory functional response and search efficiency of *Chrysoperla carnea* (Stephens) larvae with respect to the aphids *Schizaphis graminum* (Rondani) and *Sitobion avenae* (Fabricius)

BAI Wei-Wei** GAO Hai-Feng ZHANG Hang YANG An-Pei
AHTAM·Uwais DING Rui-Feng LI Guang-Kuo***

(Institute of Plant Protection, Xinjiang Academy of Agricultural Sciences, Key Laboratory of Integrated Pest Management on Crop in Northwestern Oasis, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Urumqi 830091, China)

Abstract **[Objectives]** To evaluate the predatory response and prey preferences of *Chrysoperla carnea* (Stephens) larvae with respect to the aphids *Schizaphis graminum* (Rondani) and *Sitobion avenae* (Fabricius), and thereby clarify the effectiveness of using *C. carnea* as a biological control for these two kinds of wheat pest. **[Methods]** Different prey densities of *S. graminum* and *S. avenae* were created and the number of each prey species consumed by 2nd instar and 3rd instar *C. carnea* larvae was measured and compared and the functional response and search rate of *C. carnea* with respect to these prey species was estimated. **[Results]** *C. carnea* larvae consumed significantly fewer *S. graminum* than *S. avenae* at the same aphid densities. The functional response of *C. carnea* larvae corresponded to both the Holling Ⅱ and the Holling Ⅲ functional response models. The instantaneous attack rate of 3rd instar *C. carnea* larvae on *S. graminum* and *S. avenae* was 1.089 and

*资助项目 Supported projects：国家重点研发计划资助（2018YFD0200406）；自治区公益性科研院所基本科研业务经费资助（ky2019014）

**第一作者 First author，E-mail：hebaige@163.com

***通讯作者 Corresponding author，E-mail：lgk0808@163.com

收稿日期 Received：2020-02-17；接受日期 Accepted：2020-07-18

1.106, respectively, higher than that of 2nd instar larvae. Both *C. carnea* instars had a higher instantaneous attack rate and daily maximum predation rate on *S. avenae* than *S. graminum*, and the processing times of 2nd and 3rd instar larvae for *S. avenae* were 0.005 d and 0.004 d, respectively, shorter than those for *S. graminum*. The optimal search density of *C. carnea* larvae for *S. avenae* was higher than that for *S. graminum* 2nd instar larvae had the highest search density, 39.200. The search efficiency of *C. carnea* for both aphids species decreased with increasing prey density but *C. carnea* had a higher search rate for *S. avenae* and the downward trend was larger than that for *S. graminum*. **[Conclusion]** *C. carnea* has considerable potential as a biological control for both *S. graminum* and *S. avenae* but prefers *S. avenae* to *S. graminum*.

Key words *Chrysoperla carnea* (Stephens); *Schizaphis graminum* (Rondani); *Sitobion avenae* (Fabricius)**;** functional response; searching effects

小麦是我国主要的粮食作物，其产量直接影响人民生活和经济发展。蚜虫是小麦整个生长季度中的常发性害虫，几乎遍布我国各产麦区。近年来，随着耕作制度和布局的变化，小麦蚜虫在部分区域发生严重，对小麦产量和质量影响极大（Xiao *et al.*，2015；李广阔，2018）。麦二叉蚜 *Schizaphis graminum*（Rondani）、麦长管蚜 *Sitobion avenae*（Fabricius）是我国小麦上的优势蚜虫种群之一，除通过口针刺吸植物汁液为害麦类，分泌蜜露影响光合外，还是病毒的传播介体（李贤庆等，2006；孟琳钦等，2019）。长期以来，麦蚜的防治基本以化学防治为主，而化学农药的不合理使用，且因麦蚜的繁殖速度快，用药频繁，导致麦蚜对杀虫剂产生抗性（Zuo *et al.*，2016；李亚萍等，2017）。针对小麦蚜虫防治所出现的问题，急需研发能够可持续发展的绿色防治技术，而利用天敌昆虫是控制害虫安全有效的方法之一（陈学新等，2013）。

草蛉作为杂食性昆虫，是多种害虫的天敌。普通草蛉 *Chrysoperla carnea*（Stephens）是一种重要的农林害虫捕食性天敌，幼虫取食各类蚜虫、粉虱和马铃薯甲虫 *Leptinotarsa decemlineata*（Say）卵等（赵敬钊，1989；张生芳，1994；Senior and McEwen，1998；Zia *et al.*，2008）。普通草蛉作为麦田中较常见的捕食性天敌，具有捕食量大、适应性强、易饲养及产卵量大的特点，是一种开发前景较好的生物防治资源（Ding *et al.*，2019）。目前有关普通草蛉生物防治方面的研究较少，仅见于所食猎物对该虫发育繁殖的影响及棉蚜所在寄主植物对其捕食功能及搜寻效应的影响（麦麦提·亚生等，2015；丁瑞丰等，2016）。而普通草蛉作为小麦蚜虫重要天敌，其对于小麦蚜虫的捕食能力还未见报道。通过对草蛉进行捕食功能反应模型的拟合，可衡量草蛉对害虫的捕食能力，其中 Holling 模型的拟合结果可反映其在不同猎物密度时捕食能力的变化（Holling，1959）。为评价普通草蛉的生防潜力，本研究在室内条件下就普通草蛉幼虫对麦长管蚜及麦二叉蚜的捕食功能反应和搜寻效应进行测定与拟合，旨在为普通草蛉的控害能力评价及应用提供理论基础。

1　材料与方法

1.1　供试虫源

麦二叉蚜和麦长管蚜采自新疆昌吉军户农场，在室内用新鲜麦苗长期饲养，进行种群扩繁，饲养条件为：温度（23±1）℃，光周期 14 L∶10 D，相对湿度 RH=65%。普通草蛉为室内用麦蛾 *Sitotroga cerealella*（Olivier）卵和人工饲料长期饲养扩繁的稳定种群，饲养条件为温度（25±2）℃，昼夜弱光，RH=65%。

1.2　试验方法

试验器皿为直径 90 mm、高 15 mm 的一次性塑料培养皿。根据前期室内草蛉对蚜虫的捕食情况，2 龄和 3 龄普通草蛉的猎物密度分别设置为 30、45、60、75、90、105 头和 20、40、60、80、100、120 头各 6 个密度梯度水平。普通草蛉孵化后使用麦长管蚜进行单头饲养，待其 2 龄、3 龄时进行 24 h 饥饿处理，选取同龄期大小相似的 2 龄、3 龄普通草蛉幼虫，单头置于各相

应密度水平的培养皿中，用橡皮筋绑好培养皿，置于人工气候箱中，气候箱条件参数同草蛉饲养条件参数。各处理重复 5 次。24 h 后统计各皿内剩余蚜虫数量，比较普通草蛉幼虫对 2 种蚜虫的取食能力及偏好。

1.3 数据处理

1.3.1 捕食功能反应的数据处理 将试验所统计各密度下麦二叉蚜和麦长管蚜的被捕食量进行 Holling 圆盘方程拟合，通过卡方检验确定普通草蛉 2 龄、3 龄幼虫捕食麦二叉蚜和麦长管蚜的捕食功能反应类型。Holling Ⅱ型功能反应模型：$N_a=a'NT/(1+a'T_hN)$（Holling，1959），式中 N_a 为被捕食的猎物数量，a'为瞬时攻击率，N 为猎物密度，T 为捕食者可利用的发现猎物时间（本研究观察时限为 1 d，令 T=1），T_h 为平均处理时间（捕食者捕食 1 头猎物所消耗的时间）；Holling Ⅲ型功能反应新模型：$N_a=a\exp(-b/N)$（汪世泽和夏楚贵，1988），式中 N_a 为相应密度下的捕食量，a 为天敌最大捕食量，b 为 1 头捕食者的最佳寻找密度，N 为猎物密度。

1.3.2 普通草蛉对麦二叉蚜和麦长管蚜的搜寻效应 根据 Holling Ⅱ型功能反应方程所得参数，计算 2 龄和 3 龄普通草蛉幼虫对麦长管蚜和麦二叉蚜的搜寻效应：$S=a'/(1+a'T_hN)$（丁岩钦，1994），式中 S 为搜寻效应值，a'为瞬时攻击率，T_h 为平均处理时间，N 为猎物密度。

1.4 数据分析

试验数据使用 Excel 2016 及 SPSS 19.0 分析处理数据并作图，使用卡方检验分析普通草蛉 2 龄、3 龄幼虫对麦长管蚜、麦二叉蚜的取食是否拟合 Holling 模型。

2 结果与分析

2.1 不同龄期普通草蛉幼虫对麦二叉蚜、麦长管蚜的捕食能力

不同龄期普通草蛉幼虫对不同密度小麦蚜虫的捕食量如图 1 和图 2 所示。全部密度处理中，除猎物密度为 20 头和 30 头外，普通草蛉 2 龄与 3 龄幼虫对麦二叉蚜和麦长管蚜的捕食量不同。不同龄期普通草蛉幼虫对 2 种小麦蚜虫的捕食量均随猎物密度的增加而增多，当麦二叉蚜和麦长管蚜的密度达到 75 头和 80 头后，普通草蛉幼

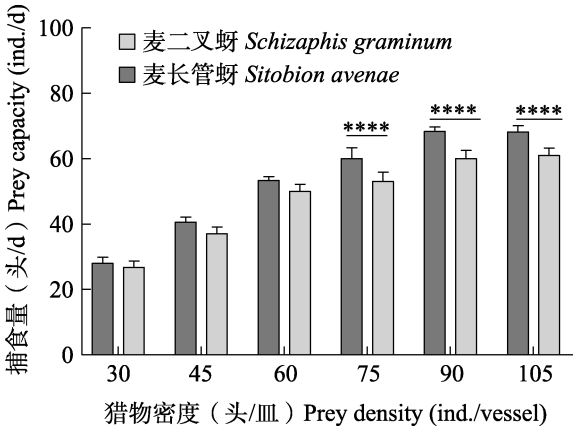


图 1 普通草蛉 2 龄幼虫对小麦蚜虫的捕食量

Fig. 1 The amount of wheat aphids consumed by *Chrysoperla carnea* 2nd instar larvae

****代表普通草蛉 2 龄幼虫对同一密度下 2 种小麦蚜虫间的捕食量在 P<0.000 1 水平差异显著（t-检验）。

**** indicates significant difference of the predatory capacity of *C. carnea* 2nd instar larvae on two wheat aphid thrips of the same densities at 0.000 1 level (t-test).

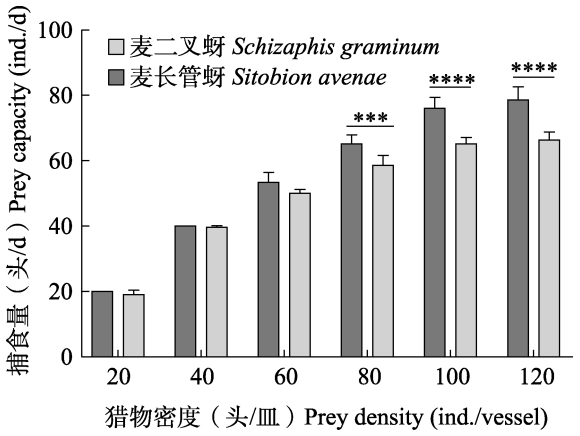


图 2 普通草蛉 3 龄幼虫对小麦蚜虫的捕食量

Fig. 2 The amount of wheat aphids consumed by *Chrysoperla carnea* 3rd instar larvae

，*分别代表普通草蛉 3 龄幼虫对同一密度下两种小麦蚜虫间的捕食量分别在 P<0.001，P<0.000 1 水平差异显著（t-检验）。

, * indicates significant difference of the predatory capacity of *C. carnea* 3rd instar larvae severally on two wheat aphid thrips of the same densities at 0.001, 0.000 1 level (t-test), respectively.

虫的捕食量增加趋势减缓。相同猎物密度下，普通草蛉幼虫对麦二叉蚜的捕食量均低于麦长管蚜，在 2 种猎物密度分别为 75（P<0.001）、90（P<0.001）、105 头（P<0.001）和 80（P<0.001）、100 （P<0.000 1）、120 头（P<0.000 1）时，普通草蛉 2 龄和 3 龄幼虫对麦二叉蚜和麦长管蚜的捕食量均存在显著性差异。

2.2　Holling Ⅱ功能反应模型拟合效果

利用 Holling Ⅱ圆盘方程将普通草蛉 2 龄和 3 龄幼虫对 2 种小麦蚜虫的捕食量数据进行拟合，并建立 Holling Ⅱ功能反应模型，R 值均大于 0.900，经卡方检验后比较理论值与观测值差异不显著（$\chi^2<\chi^2_{0.05}$），拟合效果较好（表 1）。通过比较 Holling Ⅱ功能反应各参数可知，普通草蛉 3 龄幼虫对 2 种蚜虫的瞬时攻击率 a'均大于 2 龄幼虫对猎物的瞬时攻击率，同一龄期草蛉幼虫的瞬时攻击率 a'则是麦长管蚜大于麦二叉蚜，对猎物的处理时间 T_h 也是相同龄期普通草蛉幼虫处理麦长管蚜的时间短于麦二叉蚜，而取食相同猎物时 3 龄幼虫处理时间短于 2 龄幼虫。猎物密度 $N\to\infty$ 时，单头普通草蛉幼虫最大捕食量为 $1/T_h$，2 龄幼虫对麦长管蚜和麦二叉蚜的日最大捕食量分别为 217.391 头、153.846 头，3 龄幼虫对麦长管蚜和麦二叉蚜的日最大捕食量分别为 250.000 头、181.818 头，总体而言，普通草蛉幼虫对麦长管蚜的日捕食量大于麦二叉蚜。

2.3　Holling Ⅲ功能反应模型拟合效果

普通草蛉 2 龄和 3 龄幼虫对 2 种小麦蚜虫的捕食功能均拟合 Holling Ⅲ功能反应新模型，R 值均大于 0.900，经卡方检验后比较理论值与观测值差异不显著（$\chi^2<\chi^2_{0.05}$），说明拟合效果较好（表 2）。根据 Holling Ⅲ功能反应新模型可知，猎物密度 $N\to\infty$ 时，单头普通草蛉幼虫对两种小麦蚜虫的日最大捕食量与 Holling Ⅱ模型的日最大捕食量有所差异。2 龄普通草蛉幼虫对麦长管蚜的日最大捕食量最高，为 101.400 头，其次为 3 龄普通草蛉幼虫对麦长管蚜的日最大捕食量，为 98.665 头。通过比较最佳寻找密度 b 可知，普通草蛉对麦长管蚜的最佳控制密度高于麦二叉蚜，其中 2 龄草蛉幼虫对麦长管蚜的最佳寻找密度 b 最高，为 39.200，与 Holling Ⅱ方程相似，普通草蛉幼虫对小麦蚜虫的捕食量随着蚜虫数量增加而增加，蚜虫密度增加至一定数量后，普通草蛉幼虫捕食量变化趋于平稳。

表 1　普通草蛉幼虫捕食小麦蚜虫的功能反应

Table 1　Predation function response of *Chrysoperla carnea* larvae prey on wheat aphids (Holling Ⅱ)

虫龄 Stage	猎物 Prey	圆盘方程 Holling equation	a'	T_h	$1/T_h$	相关系数（R） Related coefficient	χ^2
2 龄 2nd instar	麦长管蚜 *S. avenae*	$N_a = 1.087N/(1 + 0.005N)$	1.087	0.005	217.391	0.969	0.457
	麦二叉蚜 *S. graminum*	$N_a = 1.082N/(1 + 0.007N)$	1.082	0.007	153.846	0.944	0.294
3 龄 3rd instar	麦长管蚜 *S. avenae*	$N_a = 1.106N/(1 + 0.004N)$	1.106	0.004	250.000	0.993	0.399
	麦二叉蚜 *S. graminum*	$N_a = 1.089N/(1 + 0.006N)$	1.089	0.006	181.818	0.970	1.087

表 2　普通草蛉幼虫捕食小麦蚜虫的功能反应

Table 2　Predation function response of *Chrysoperla carnea* larvae prey on wheat aphids (Holling Ⅲ)

虫龄 Stage	猎物 Prey	圆盘方程 Holling equation	a	b	相关系数（R） Related coefficient	χ^2
2 龄 2nd instar	麦长管蚜 *S. avenae*	$N_a = 101.400\exp(-39.200/N)$	101.400	39.200	0.978	0.101
	麦二叉蚜 *S. graminum*	$N_a = 86.231\exp(-35.760/N)$	86.231	35.760	0.929	0.149
3 龄 3rd instar	麦长管蚜 *S. avenae*	$N_a = 98.665\exp(-32.810/N)$	98.665	32.810	0.979	0.540
	麦二叉蚜 *S. graminum*	$N_a = 85.433\exp(-30.300/N)$	85.433	30.300	0.990	0.077

2.4 不同龄期普通草蛉对麦二叉蚜和麦长管蚜的搜寻效应

通过拟合 Holling Ⅱ型功能反应参数，得出普通草蛉 2 龄、3 龄幼虫取食不同密度麦二叉蚜和麦长管蚜的搜寻效应（图 3，图 4）。将普通草蛉幼虫搜寻效应与小麦蚜虫密度之间进行回归分析，结果表明随着猎物密度增加，普通草蛉幼虫对 2 种小麦蚜虫的搜寻效应呈降低趋势，其 2 龄幼虫搜寻效应与麦二叉蚜和麦长管蚜密度的回归方程分别为 y = -0.003 6x + 0.988 1，R^2 = 0.989 0；y = - 0.003 1x + 1.029 0，R^2 = 0.993 2，3 龄幼虫搜寻效应与麦二叉蚜和麦长管蚜密度的回归方程分别为 y = - 0.003 4x + 1.018 5，R^2 = 0.984 4；y = - 0.002 9x + 1.060 3，R^2 = 0.990 2。比较方程系数可知在相同蚜虫密度下，普通草蛉幼虫对麦长管蚜的搜寻效应高于麦二叉蚜，普通草蛉幼虫对麦长管蚜的搜寻效应下降趋势大于同一龄期对麦二叉蚜的搜寻效应。

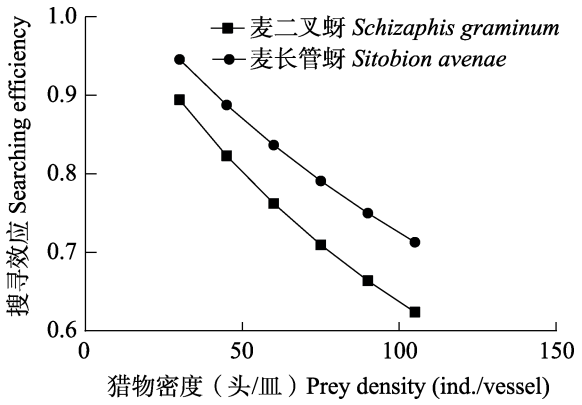


图 3 普通草蛉 2 龄幼虫在不同小麦蚜虫密度下的搜寻效应

Fig. 3 Searching effect of *Chrysoperla carnea* 2nd instar larvae under different densities of wheat aphids

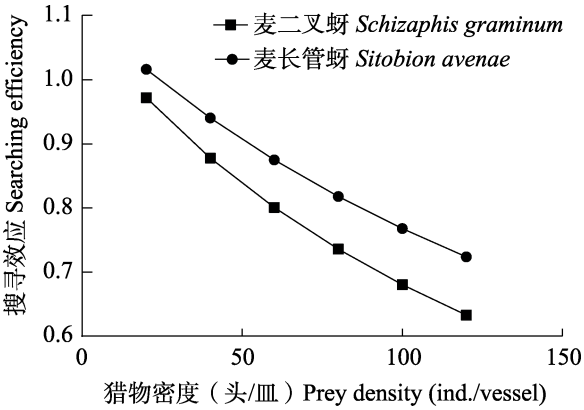


图 4 普通草蛉 3 龄幼虫在不同小麦蚜虫密度下的搜寻效应

Fig. 4 Searching effect of *Chrysoperla carnea* 3rd instar larvae under different densities of wheat aphids

3 讨论

捕食功能反应作为室内研究天敌控害能力的重要途径，可评价天敌对猎物的捕食能力（孙丽娟等，2013）。草蛉属昆虫成虫和幼虫在害虫生物防治中占有重要位置，研究其对害虫的控制作用具有重要意义。目前草蛉属昆虫捕食功能研究较多的为中华草蛉 *Chrysopa sinica* Tjeder 和大草蛉 *Chrysopa pallens*（Rambur），这 2 种草蛉对猎物的捕食量均表现出随猎物密度增加而升高，猎物密度到达一定值时趋于平稳的特点，且同一幼虫阶段对不同种猎物的捕食能力不同，搜寻效应则是随着猎物密度增加而降低（林克剑等，2006；张安盛等，2007；王然等，2016；唐良德等，2017；唐天成等，2018）。本研究以小麦主要害虫麦二叉蚜与麦长管蚜不同密度为基础，在室内研究了普通草蛉对这 2 种小麦蚜虫的捕食效应，结果表明普通草蛉对猎物的捕食量不会随猎物密度增加而无限增加，这一结果与上述对中华草蛉和大草蛉的研究相似。拟合 Holling Ⅱ方程后，普通草蛉 2 龄、3 龄幼虫对麦长管蚜的日最大捕食量分别为 217.391 头和 250.000 头，均高于所报道的七星瓢虫 3 龄、4 龄幼虫对麦长管蚜的日最大捕食量，对 2 种蚜虫具有较好的控制作用（史磊和颜金龙，2013）。从 Holling Ⅱ功能反应参数可知，普通草蛉幼虫对麦二叉蚜和麦长管蚜的瞬时攻击率高于普通草蛉对棉蚜的瞬时攻击率（丁瑞丰等，2016），说明普通草蛉对 2 种麦蚜攻击能力较强。

猎物及捕食者密度的变化对捕食者攻击猎物的积极性及活动能力会产生影响，捕食者的攻击搜索行为并非始终一致，而 Holling Ⅱ模型更适合应用于猎物及时补充至充足的条件（Rogers，1972；汪世泽和夏楚贵，1988）。刘爽等（2011）通过拟合大草蛉幼虫对烟粉虱的捕食功能反应

和 HollingⅡ及Ⅲ型方程，认为大草蛉幼虫对烟粉虱不同虫态的捕食作用虽均满足上述 2 种模型，但考虑到猎物密度低时捕食者对猎物的反应受到抑制的情况，HollingⅢ模型更符合大草蛉捕食功能反应。本研究中Ⅱ型和Ⅲ型 Holling 模型下同一龄期普通草蛉幼虫对同种猎物理论最大捕食量远大于 HollingⅢ模型下草蛉幼虫的捕食量，通过比较普通草蛉幼虫对麦二叉蚜和麦长管蚜的实际捕食量与 Holling 模型计算的理论捕食量，发现 HollingⅢ模型下草蛉幼虫理论捕食量更接近实际捕食量，据此推测 HollingⅢ模型较为符合本研究中普通草蛉幼虫对小麦蚜虫的捕食情况。通过比较 HollingⅢ型方程中参数最佳寻找密度 b 可反应出猎物密度对捕食者捕食行为的影响和捕食者对猎物的捕食能力，本研究中草蛉幼虫对麦长管蚜的最佳寻找密度均高于麦二叉蚜的最佳寻找密度，表明普通草蛉幼虫对麦长管蚜的偏好及控制能力高于麦二叉蚜。本研究是在室内条件下对普通草蛉捕食麦蚜能力的评价，后续实验将会考虑结合草蛉密度因素、环境因子及田间释放综合研究普通草蛉对小麦蚜虫的控害能力。

参考文献 (References)

Chen XX, Ren SX, Zhang F, Cai WZ, Zeng FR, Zhang WQ, 2013. Mechanism of pest management by natural enemies and their sustainable utilization. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 50(1): 9–18. [陈学新, 任顺祥, 张帆, 彩万志, 曾凡荣, 张文庆, 2013. 天敌昆虫控害机制与可持续利用. 应用昆虫学报, 50(1): 9–18.]

Ding RF, Li HB, Pan HS, Uwais·A, Li HQ, Wang DM, Liu J, 2016. Predation function response and searching rate of *Chrysoperla carnea* reared on *Aphis gossypii* on transgenic *Bt+CpTI* cotton. *Chinese Journal of Biological Control*, 32(5): 575–580. [丁瑞丰, 李号宾, 潘洪生, 阿克旦·吾外士, 李海强, 王冬梅, 刘建, 2016. 转 *Bt+CpTI* 基因棉花对普通草蛉幼虫捕食功能反应和搜寻效应的影响. 中国生物防治学报, 32(5): 575–580.]

Ding RF, Ma DY, Uwais·A, Wang DM, Liu J, Xu Y, Li HB, Li HQ, Pan HS, 2019. Transgenic Cry1Ac cotton does not affect the development and fecundity of *Chrysoperla carnea*. *PLoS ONE*, 14(4): e0214668.

Ding YQ, 1994. Insect Mathematical Ecology. Beijing: Science Press. 303–304. [丁岩钦, 1994. 昆虫数学生态学. 北京: 科学出版社. 303–304.]

Holling CS, 1959. Some characteristics of simple types of predation and parasitism. *The Canadian Entomologist*, 91(7): 385–389.

Li GK, 2018. Effect of walnut-wheat intercropping on the occurrence of main wheat pests. Doctoral dissertation. Beijing: China Agricultural University. [李广阔, 2018. 核桃-小麦间作对小麦主要病虫草害发生影响研究. 博士学位论文. 北京: 中国农业大学.]

Li XQ, Guo XR, Li KB, Yin J, Cao YZ, 2006. Resistance of wheat varieties (lines) to *Sitobion miscanthi* (Takahashi) (Aphidoidea: Aphididae). *Acta Entomologica Sinica*, 49(6): 963–968. [李贤庆, 郭线茹, 李克斌, 尹姣, 曹雅忠, 2006. 不同小麦品种（系）对麦长管蚜的抗性. 昆虫学报, 49(6): 963–968.]

Li YP, Zhang YH, Zhu X, Li XR, Chen DF, 2017. Research development in the resistance of wheat aphid to imidacloprid. Green ecological sustainable development and plant protection-12th National Congress and Annual Conference of Chinese Plant Protection Society. Changsha. 143–149. [李亚萍, 张云慧, 朱勋, 李祥瑞, 陈登发, 2017. 麦蚜对吡虫啉抗性的研究进展. 绿色生态可持续发展与植物保护——中国植物保护学会第十二次全国会员代表大会暨学术年会. 长沙. 143–149.]

Lin KJ, Wu KM, Liu SB, Zhang YJ, Guo YY, 2006. Functional responses of *Chrysopa sinica*, *Propylaen japonica* and *Leis axyridis* to *Bemisia tabaci*. *Chinese Bulletin of Entomology*, 43(3): 339–343. [林克剑, 吴孔明, 刘山蓓, 张永军, 郭予元, 2006. 中华草蛉、龟纹瓢虫和异色瓢虫对 B 型烟粉虱的捕食功能反应. 昆虫知识, 43(3): 339–343.]

Liu S, Wang S, Liu BM, Zhou CQ, Zhang F, 2011. The predation function response and predatory behavior observation of *Chrysopa pallens* larva to *Bemisia tabaci*. *Scientia Agricultura Sinica*, 44(6): 1136–1145. [刘爽, 王甦, 刘佰明, 周长青, 张帆, 2011. 大草蛉幼虫对烟粉虱的捕食功能反应及捕食行为观察. 中国农业科学, 44(6): 1136–1145.]

Mamat·Y, Uwais·A, Yasin·S, Liu J, Arziguli·R, Ding RF, 2015. Growth, development and adult fecundity of *Chrysoperla carnea* feeding on different larval diets. *Plant Protection*, 41(4): 35–38. [麦麦提·亚生, 阿克旦·吾外士, 牙生·沙力, 刘建, 阿孜古丽·热依木, 丁瑞丰, 2015. 猎物对普通草蛉发育和繁殖能力的影响. 植物保护, 41(4): 35–38.]

Meng LQ, Li DD, Su D, Zhao HY, Hu ZQ, 2019. Activities of protective and detoxifying enzymes in spring-grain aphid *Schizaphis graminum* (Hemiptera: Aphididae) fed on wheat infected with barley yellow dwarf virus. *Journal of Plant Protection*, 46(3): 707–708. [孟琳钦, 李丹丹, 苏丹, 赵惠燕, 胡祖庆, 2019. 取食感染大麦黄矮病毒小麦后麦二叉蚜体内

保护酶和解毒酶活性变化. 植物保护学报, 46(3): 707–708.]

Rogers D, 1972. Random search and insect population models. *Journal of Animal Ecology*, 41(22): 369–383.

Senior LJ, McEwen PK, 1998. Laboratory study of *Chrysaperla carnea* (Stephens) (Neuropt., Chrysopidae) predation on *Trialeurodes vaporariorum* (Westwood) (Hom., Aleyrodidae). *Journal of Applied Entomology*, 122(1/5): 99–101.

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.]

Sun LJ, Yi WX, Zhao CD, Dong XL, 2013. Predatory capacity of *Chrysopa pallens* (Rambur) to three species of aphids. *Plant Protection*, 39(5): 153–157. [孙丽娟, 衣维贤, 赵川德, 董向丽, 2013. 大草蛉对 3 种蚜虫的捕食能力研究. 植物保护, 39(5): 153–157.]

Tang LD, Wang XS, Zhao HY, Fu BL, Qiu HY, Liu K, 2017. The predation function response and development of *Chrysopa pallens* larva on *Megalurothrips usitatus* and *Aphis craccivora*. *Chinese Journal of Biological Control*, 33(1): 49–55. [唐良德, 王晓双, 赵海燕, 付步礼, 邱海燕, 刘奎, 2017. 大草蛉幼虫捕食豆大蓟马和豆蚜的功能反应及生长发育. 中国生物防治学报, 33(1): 49–55.]

Tang TC, Zhang Y, Li CJ, Cao XR, Chen ZZ, Xu YY, 2018. Predatory responses of *Chrysoperla sinica* (Tjeder) and *Chrysopa pallens* larvae to *Aleurocan spinfetus* (Quaintance) nymphs. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 55(2): 217–222. [唐天成, 张艳, 李程锦, 曹欣然, 陈珍珍, 许永玉, 2018. 中华通草蛉和大草蛉幼虫对黑刺粉虱若虫的捕食功能反应. 应用昆虫学报, 55(2): 217–222.]

Wang R, Wang S, Qu C, Li JH, Chen ZQ, Zhang F, 2016. The predatory functional response and searching effect of *Chrysopa pallens* larvae to *Bemisia tabaci* eggs on different host plants. *Journal of Plant Protection*, 43(1): 149–154. [王然, 王甦, 渠成, 李济航, 陈支芹, 张帆, 2016. 大草蛉幼虫对不同寄主植物上烟粉虱卵的捕食功能反应与搜寻效应. 植物保护学报, 43(1): 149–154.]

Wang SZ, Xia CG, 1988. New model of holling-Ⅲ functional response. *Journal of Ecology*, 7(1): 1–3. [汪世泽, 夏楚贵, 1988. Holling-Ⅲ型功能反应新模型. 生态学杂志, 7(1): 1–3.]

Xiao D, Yang T, Desneux N, Han P, Gao XW, 2015. Assessment of sublethal and transgenerational effects of pirimicarb on the wheat aphids *Rhopalosiphum padi* and *Sitobion avenae*. *PLoS ONE*, 10(6): e0128936.

Zhang AS, Li LL, Yu Y, Men XY, 2007. Functional response and searching rate of *Chrysopa sinica* larvae on *Frankliniella occidentalis* nymphs. *Journal of Plant Protection*, 34(3): 247–251. [张安盛, 李丽莉, 于毅, 门兴元, 2007. 中华草蛉幼虫对西花蓟马若虫的捕食功能反应与搜寻效应. 植物保护学报, 34(3): 247–251.]

Zhang SF, 1994. Natural enemy of the European potato beetle. *Plant Quarantine*, 8(5): 276–278. [张生芳, 1994. 欧洲的马铃薯甲虫食虫天敌. 植物检疫, 8(5): 276–278.]

Zhao JZ, 1989. The Protection and Use of Lacewing. Wuhan: Wuhan University Press. 35–50, 151–214. [赵敬钊, 1989. 草蛉的保护和利用. 武汉: 武汉大学出版社. 35–50, 151–214.]

Zia K, Hafeez F, Khan RR, Arshad M, Ullaah-Naeem U, 2008. Effectiveness of *Chrysoperla carnea* (Stephens) (Neuroptera: Chrysopidae) on the population of *Bemisia tabaci* (Homoptera: Aleyrodidae) in different cotton genotypes. *Journal of Agriculture & Social Sciences*, 3(4): 112–116.

Zuo YY, Wang K, Zhang M, Peng X, Pinero JC, Chen MH, 2016. Regional susceptibilities of *Rhopalosiphum padi* (Hemiptera: Aphididae) to ten insecticides. *Florida Entomologist*, 99(2): 269–275.