中华通草蛉幼虫对草地贪夜蛾卵和低龄幼虫的捕食作用*

黄海艺[1**] 刘亚男[1] 亓永凤[2] 许永玉[1] 陈珍珍[1***]

（1. 山东农业大学植物保护学院昆虫学系，泰安 271018；2. 泗水县农业农村局，济宁 273200）

摘 要 【**目的**】明确天敌昆虫中华通草蛉 *Chrysoperla sinica* 对草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda* 的捕食能力，为草地贪夜蛾的绿色防控提供技术支持。【**方法**】在室内（25±1）℃条件下对中华通草蛉各龄幼虫的捕食功能反应模型进行评估。【**结果**】中华通草蛉各龄幼虫对草地贪夜蛾的卵及低龄幼虫的捕食作用均能够很好的拟合 HollingⅡ功能反应模型，且均具较高的可信度。中华通草蛉对草地贪夜蛾卵及低龄幼虫捕食率随着草蛉幼虫龄期增大而增大，且以 3 龄幼虫捕食率最高。中华通草蛉 3 龄幼虫对草地贪夜蛾卵的理论日最大捕食量、瞬时攻击率和处理时间分别为 192 头、1.06 和 0.005 d，对草地贪夜蛾 1 龄幼虫的理论日最大捕食量、瞬时攻击率和处理时间分别为 166.7 头、0.889 和 0.006 d。中华通草蛉捕食草地贪夜蛾卵时其 1 龄、2 龄、3 龄幼虫的相互干扰系数 *m* 分别为 0.184、0.260 和 0.224，干扰效应明显小于捕食草地贪夜蛾 1 龄和 2 龄幼虫，说明中华通草蛉对草地贪夜蛾卵具有良好的控制作用。【**结论**】中华通草蛉是草地贪夜蛾卵、1 龄和 2 龄幼虫潜在的生防天敌之一。

关键词 中华通草蛉；草地贪夜蛾；捕食功能；自身密度

Predatory responses of *Chrysoperla sinica* (Tjeder) larvae to *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith) eggs and larvae

HUANG Hai-Yi[1**] LIU Ya-Nan[1] QI Yong-Feng[2] XU Yong-Yu[1] CHEN Zhen-Zhen[1***]

(1. College of Plant Protection, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China;
2. Sishui Agricultural and Rural Bureau, Jining 273200, China)

Abstract **[Objectives]** To investigate the potential of *Chrysoperla sinica* to act as a biological control for *Spodoptera frugiperda* eggs and larvae. **[Methods]** Predatory responses of *C. sinica* to *S. frugiperda* eggs and larvae were measured at (25 ± 1) ℃ under laboratory conditions. **[Results]** Predatory responses of all larval stages of *C. sinica* were of the Holling Ⅱ type, and all had high reliability. The theoretical daily maximum predation rate, instantaneous attack rate and processing time of third instar *C. sinica* larvae on *S. frugiperda* eggs were 192, 1.06 and 0.005 d, respectively, whereas those of 1st instar larvae were 166.7, 0.889 and 0.006 d, respectively. The interaction coefficients of 1st, 2nd and 3rd instar larvae to *S. frugiperda* eggs were 0.184, 0.260 and 0.224, respectively. The interference effect was significantly smaller in first and second instar larvae, which indicates that *C. sinica* can effectively control *S. frugiperda* eggs. **[Conclusion]** The results show that *C. sinica* is a potential biological control agent for the eggs and 1st and 2nd instars of *S. frugiperda*.

Key words *Chrysoperla sinica*; *Spodoptera frugiperda*; predation function; self-density

草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith) 属于鳞翅目 Lepidoptera，夜蛾科 Noctuidae，为

*资助项目 Supported projects：科技部国家重点研发计划试点专项（2017YFD0201000）；鲁东冬小麦化肥农药减施技术集成研究与示范（2017YFD0201705）

**第一作者 First author，E-mail：642213689@qq.com

***通讯作者 Corresponding author，E-mail：chenzz@sdau.edu.cn

收稿日期 Received：2020-06-01；接受日期 Accepted：2020-08-21

一种世界性多食性害虫，这种害虫对禾本科、锦葵科、豆科、芸苔科、茄科、苋菜科和苋菜科等重要作物造成了巨大的经济损失（Lu and Adang，1996）。因其具有远距离迁飞习性，自2018 年底在我国云南首次发现后（郭井菲等，2019），迅速蔓延至 21 个省（刘本菊等，2020），并预测包括香港在内的 18 省为草地贪夜蛾最适温区，占全国总面积的 12.09%（Wang *et al.*，2020）。随着长江流域 1 代和 2 代成虫的向北迁飞，使得中国东北部、朝鲜半岛和日本的玉米种植区处于高风险之中（Wu *et al.*，2019）。生物防治是害虫管理策略中对环境影响最小的防治手段，且不会产生抗药性或者农药残留等问题（Batra，1982）。国内外学者进行了大量的研究探索草地贪夜蛾生物防控技术，包括利用微生物、植物源农药、致病线虫和天敌昆虫。Ramos 等（2020）利用白僵菌 *Beauveria bassiana* 和绿僵菌 *Metarhizium anisopliae* 作为内生菌在玉米植株上观察发现其对草地贪夜蛾 2 龄幼虫有较好的防治效果。卵寄生蜂甲腹茧蜂 *Chelonus bifoveolatus*（Agboyi *et al.*，2020）、曲斑甲腹茧蜂 *Chelonus curvimaculatus*、夜蛾黑卵蜂 *Telenomus remus*（De Queiroz *et al.*，2019；Liao *et al.*，2019；Sisay *et al.*，2019）、幼虫寄生蜂土黄褐胫茧蜂 *Coccygidum luteum*（Agboyi *et al.*，2019，2020）、盘绒茧蜂 *Cotesia icipe*（Sisay *et al.*，2019）、褐胫茧蜂 *Coccygidium melleum*、棉铃虫齿唇姬蜂 *Campoletis chlorideae* 及家蚕追寄蝇 *Exorista sorbillans*（Sharanabasappa *et al.*，2019）等均被发现对草地贪夜蛾有良好的寄生效果。捕食性天敌八斑和瓢虫 *Harmonia octomaculata*、狭臀瓢虫 *Coccinella transversalis*（Sharanabasappa *et al.*，2019）和黑刺益蝽 *Podisus nigrispinus*（Malaquias *et al.*，2014）等在国外被发现是草地贪夜蛾的良好的天敌。 国内则针对捕食性天敌蝎蝽 *Arma chinensis*（唐艺婷等，2019）、异色瓢虫 *Harmonia axyridis*（赵英杰等，2019；2020；刘本菊等，2020）、七星瓢虫 *Coccinella septempunctata*（孔琳等，2019a）、龟纹瓢虫 *Propylaea japonica*（蒋骏等，2020）、多异瓢虫 *Adonia variegata*（孔琳等，2019b）及大草蛉 *Chrysopa pallens*（徐庆宣等，2019）等对草地贪夜蛾的捕食功能反应进行了系列研究，以评价天敌的控害潜能。

中华通草蛉 *Chrysoperla sinica* Tjeder 在我国分布范围广、捕食能力强、捕食量大、繁殖力强、发生期长，具有重要的生防价值。研究发现中华通草蛉可取食农田、蔬菜、果园及经济类作物上的多种蚜虫，如麦蚜、棉蚜、玉米蚜、豆蚜、烟蚜、桃蚜，甚至对于检疫性害虫苹果绵蚜有较好的控制效果（丁岩钦和陈玉平，1986；侯茂林等，2002）。另外中华通草蛉还对其它多种害虫有捕食作用，如粉虱类、鳞翅类、蓟马类等（林克剑等，2006）。为评价中华通草蛉对草地贪夜蛾的控害能力，本文利用 Holling Ⅱ功能反应模型（Holling，1959）对中华通草蛉各龄期幼虫对草地贪夜蛾卵及低龄幼虫的捕食功能反应进行拟合，以期为合理利用中华通草蛉防治草地贪夜蛾提供理论依据和数据支撑。

1 材料与方法

1.1 供试虫源

中华通草蛉为实验室人工气候室（温度：25 ℃，光周期：L∶D = 15∶9，RH = 60%）内长期饲养的稳定种群，幼虫于指形管内单头饲喂豌豆修尾蚜 *Megoura japonica* Matsumura。供试中华通草蛉 1、2 和 3 龄幼虫均为正常发育 2 d 的幼虫，饥饿处理 24 h 后用于实验。

草地贪夜蛾于 2019 年 8 月中旬采自山东荣成上庄镇玉米田中并带回实验室，饲养于人工气候室内。将成虫放入 80 目的养虫笼（60 cm×60 cm×60 cm），并放入新鲜玉米叶作为食物，收集 1 日龄卵和 1 龄、2 龄幼虫备用。草地贪夜蛾的识别及各龄期的鉴定方法参考赵胜园等（2019）。

1.2 中华通草蛉幼虫对草地贪夜蛾卵和幼虫的捕食功能反应

在培养皿（ϕ=98 mm，h=18 mm）中放入蘸

水的脱脂棉保持湿润，将不同密度的草地贪夜蛾的卵、1 龄和 2 龄幼虫分别与 1 头中华通草蛉不同龄期的幼虫组合放置于培养皿中，以新鲜的玉米嫩叶作为食物。中华通草蛉幼虫与草地贪夜蛾卵和幼虫的组合见表 1。将培养皿置于（25±1）℃、RH=75%、L：D=16：8 的空气流通处，以保证试验期间草蛉幼虫在最适宜环境下取食。每组处理重复 5 次，24 h 后检查猎物剩余的数量。

表 1　中华通草蛉幼虫与草地贪夜蛾卵和幼虫不同密度组合

Table 1　Different density combinations of eggs and larvae of *Chrysoperla sinica* and *Spodoptera litura*

中华通草蛉 *Chrysoperla sinica*	草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda*		
	卵（粒） Eggs	1 龄幼虫（头） 1st larvae (ind.)	2 龄幼虫（头） 2nd larvae (ind.)
1 龄幼虫 1st larvae	10，20，30，50	10，20，40、50	—
2 龄幼虫 2nd larvae	40，60，80，100	30，40，50，60	5，10，20，40
3 龄幼虫 3rd larvae	40，60，80，200	50，80，100，150	10，20，40，60

1.3　中华通草蛉各龄幼虫的自身密度反应

在培养皿中分别放入草地贪夜蛾卵 50 头和 1 龄幼虫密度分别为 1、2 和 3 头/皿的中华通草蛉；草地贪夜蛾卵 100 头、1 龄和 2 龄幼虫分别为 60 头和 40 头及密度为 1、2 和 3 头/皿的中华通草蛉 2 龄幼虫；草地贪夜蛾卵 200 头、1 龄和 2 龄幼虫分别为 80 头和 60 头及密度分别为 1、2 和 3 头/皿的中华通草蛉 3 龄幼虫，以新鲜的玉米嫩叶作为草地贪夜蛾的食物。将培养皿置于温度（25 ± 2）℃、RH = 75%、L：D = 16：8 的空气流通处，每处理重复 5 次，24 h 后检查猎物的剩余数量。

1.4　数据分析

试验数据采用软件 SPSS 22.0 进行 ANOVA 方差分析，采用 Turkey 方程进行差异显著性检验。对各龄幼虫的功能反应用 Holling Ⅱ型功能反应模型 $N_a = aT_h/(1 + aT_hN)$进行模拟。捕食者的捕食作用率为：$E = N_a/N{\cdot}P$（式中 E 为捕食作用率，N_a 为捕食量，N 为猎物密度，P 为捕食者密度）。用 Hassell 和 Varley（1969）提出的 E 和 P 之间的关系公式 $E = QP^{-m}$（式中 E 为捕食作用率，P 为天敌密度，Q 为寻找系数，m 为互相干扰系数）进行捕食者自身密度反应拟合。并用 SigmaPlot 13.0 对所有相关方程进行了拟合和线性回归分析。

2　结果与分析

2.1　中华通草蛉对草地贪夜蛾的捕食行为观察

饥饿 1 d 的中华通草蛉幼虫接入带有草地贪夜蛾卵或低龄幼虫的培养皿后，四处爬行搜寻猎物。中华通草蛉幼虫搜寻到草地贪夜蛾卵后，将双刺吸式口器的两口针插入卵，然后迅速举起卵粒，开始时两条口针同时吸食，后期两口针交替使用，把卵内液体吸尽仅剩卵壳。卵块外面附着的绒毛和卵的堆积不影响草蛉取食卵块中间的卵粒。中华通草蛉幼虫搜寻到草地贪夜蛾幼虫后，首先攻击部位是草地贪夜蛾幼虫的尾部，低龄幼虫被举起吸食体液，吸食完尾部后，草蛉幼虫会选择更靠近草地贪夜蛾头部的位置重新插入口针吸食，直至剩下头壳和表皮。2 龄或 3 龄以上的草地贪夜蛾幼虫尾部被攻击后，会迅速反攻击，但极少数的 2 龄幼虫防御成功，3 龄有更大机率防御成功。预实验过程中，在高密度草地贪夜蛾 3 龄幼虫条件下，常常出现草蛉幼虫被多头草地贪夜蛾 3 龄幼虫啃食的现象。

2.2　中华通草蛉对草地贪夜蛾的捕食功能反应参数

中华通草蛉对草地贪夜蛾的捕食功能反应结果见表 2。中华通草蛉幼虫对草地贪夜蛾卵的处理时间随着草蛉龄期增大而缩短，3 龄幼虫的

表 2 中华通草蛉 1-3 龄幼虫对草地贪夜蛾卵的捕食功能反应

Table 2 Functional response of *Chrysoperla sinica* larvae on *Spodoptera frugiperda* eggs and larvae

草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda*	中华通草蛉 *Chrysoperla sinica*	圆盘方程 Holling equation	瞬时攻击率 Instantaneous attack rate a	处理时间 Handling time T_h/d	日最大捕食量 Daily maximum predation $1/T_h$	控害效能 Predation capacity a/T_h	R^2
卵 Egg	1 龄幼虫 1st larvae	$N_a = 0.345N/(1 + 0.005N)$	0.345	0.014	69.3	24.160	0.871
	2 龄幼虫 2nd larvae	$N_a = 0.993N/(1 + 0.015N)$	0.993	0.016	62.9	62.456	0.863
	3 龄幼虫 3rd larvae	$N_a = 1.016N/(1 + 0.005N)$	1.016	0.005	192.3	195.494	0.989
1 龄幼虫 1st larvae	1 龄幼虫 1st larvae	$N_a = 0.660N/(1 + 0.011N)$	0.660	0.017	57.5	37.917	0.986
	2 龄幼虫 2nd larvae	$N_a = 0.699N(1 + 0.008N)$	0.699	0.012	84.7	59.234	0.813
	3 龄幼虫 3rd larvae	$N_a = 0.889N/(1 + 0.005N)$	0.889	0.006	166.7	148.227	0.837
2 龄幼虫 2nd larvae	2 龄幼虫 2nd larvae	$N_a = 0.472N/(1 + 0.022N)$	0.472	0.037	26.8	12.402	0.977
	3 龄幼虫 3rd larvae	$N_a = 0.825N/(1 + 0.011N)$	0.825	0.014	73.5	60.648	0.978

处理时间最短，为 0.005 d。1 龄幼虫处理时间最长，为 0.058 d。中华通草蛉幼虫对贪夜蛾卵的日最大捕食量随着幼虫龄期的增大而增加，3 龄幼虫捕食量最大，日最大捕食量为 192.3 粒卵。中华通草蛉幼虫对草地贪夜蛾 1 龄幼虫的处理时间随着草蛉龄期增大而缩短，3 龄幼虫的处理时间最短，为 0.006 d，瞬时攻击率则随着中华通草蛉幼虫龄期增大而增加，3 龄幼虫最大，为 0.889。中华通草蛉幼虫对草地贪夜蛾 1 龄幼虫的日最大捕食量随着幼虫龄期的增大而增加，3 龄幼虫捕食量最大，日最大捕食量为 166.7 头。中华通草蛉 2 龄幼虫对草地贪夜蛾 2 龄幼虫捕食功能反应方程为 $N_a = 0.472N/(1 + 0.022N)$。其中，处理时间（$T_h$）为 0.037 d，理论日最大捕食量为 26.8 头。中华通草蛉 3 龄幼虫对草地贪夜蛾 2 龄的捕食功能反应方程为 $N_a = 0.825N/(1 + 0.011N)$（$R^2 = 0.978$）。其中，中华通草蛉对草地贪夜蛾卵的处理时间（$T_h$）为 0.014 d；理论日最大捕食量为 73.5 头。

2.3 中华通草蛉幼虫的自身密度反应

不同草地贪夜蛾卵密度下的中华通草蛉自身密度反应见表 3。随着中华通草蛉密度的增加，草地贪夜蛾被捕食比率显著增加，中华通草蛉捕

表 3 中华通草蛉幼虫捕食草地贪夜蛾卵的自身密度反应

Table 3 Self-density effect of *Chrysoperla sinica* larvae on *Spodoptera frugiperda* eggs

中华通草蛉 *Chrysoperla sinica*	天敌密度（P） The density of natural enemies	猎物密度（N） Pest density	捕食量 Predation	捕食率作用率（E） Predation ratio	自身密度方程 Self-density equation
1 龄幼虫 1st larvae	1	50	18.2 ±2.059c	0.364±0.041a	$E = 0.647P^{-0.184}$ $R^2 = 0.837$
	2	50	33.8 ±1.428b	0.338±0.014a	
	3	50	43.6 ±1.691a	0.290±0.012b	
2 龄幼虫 2nd larvae	1	100	42.4 ±3.444c	0.424±0.034a	$E = 0.694P^{-0.260}$ $R^2 = 0.934$
	2	100	75.2 ±2.107b	0.376±0.011b	
	3	100	94.4 ±2.731a	0.315±0.009c	
3 龄幼虫 3rd larvae	1	200	81.8 ±8.339c	0.414±0.042a	$E = 0.683P^{-0.224}$ $R^2 = 0.996$
	2	200	143.4±14.195b	0.359±0.071a	
	3	200	195.6±3.919a	0.323±0.006b	

E：捕食作用率；P：天敌密度；R^2：相关系数。下表同。

E: Predation rate; P: Density of natural enemies; R^2: Correlation coefficient. The same below.

食作用率 E 显著降低，捕食者自身干扰作用增强。中华通草蛉对草地贪夜蛾卵的自身密度方程见表 3。1 龄、2 龄、3 龄幼虫的相互干扰系数 m 分别为 0.184、0.260 和 0.224，该拟合公式的相关系数 R^2 分别为 0.837、0.934 和 0.996，说明该数学模型能准确地描述中华通草蛉各龄幼虫的种内干扰对捕食功能的影响。

中华通草蛉对草地贪夜蛾 1 龄幼虫的自身密度方程见表 4。1 龄、2 龄和 3 龄幼虫的相互干扰系数 m 分别为 0.934、0.402 和 0.388，该拟合公式的相关系数 R^2 分别为 0.999、0.982 和 0.840，说明该数学模型能准确地描述中华通草蛉各龄幼虫的种内干扰对捕食功能的影响。

中华通草蛉对草地贪夜蛾 1 龄幼虫的自身密度方程见表 5。由于中华通草蛉 1 龄幼虫较小，在捕食过程中会被草地贪夜蛾 2 龄幼虫攻击，因此只有 2 龄和 3 龄幼虫可成功完成对猎物的捕食。相互干扰系数 m 分别为 0.846 和 0.869，该拟合公式的相关系数 R^2 分别为 0.999 和 0.994。

表 4　中华通草蛉幼虫捕食草地贪夜蛾 1 龄幼虫的自身密度反应

Table 4　Self-density effect of *Chrysoperla sinica* larvae on *Spodoptera frugiperda* 1st instar larvae

中华通草蛉 *Chrysoperla sinica*	天敌密度（P） The density of natural enemies	猎物密度（N） Pest density	捕食量 Predation	捕食率作用率（E） Predation ratio	自身密度方程 Self-density equation
1 龄幼虫 1st larvae	1	50	19.2 ± 1.797a	0.386 ± 0.036a	$E = 0.662P^{-0.934}$, $R^2 = 0.999$
	2	50	20.5 ± 5.268a	0.204 ± 0.053b	
	3	50	20.7 ± 4.989a	0.138 ± 0.033c	
2 龄幼虫 2nd larvae	1	60	22.6 ± 3.156a	0.376 ± 0.053a	$E = 0.648P^{-0.402}$, $R^2 = 0.982$
	2	60	31.8 ± 7.781a	0.265 ± 0.065a	
	3	60	44.0 ± 6.542a	0.245 ± 0.036a	
3 龄幼虫 3rd larvae	1	80	41.5 ± 4.573b	0.515 ± 0.044a	$E = 0.763P^{-0.388}$, $R^2 = 0.840$
	2	80	78.8 ± 0.800a	0.456 ± 0.035a	
	3	80	78.0 ± 1.265a	0.327 ± 0.006b	

表 5　中华通草蛉幼虫捕食草地贪夜蛾 2 龄幼虫的自身密度反应

Table 5　Self-density effect of *Chrysoperla sinica* larvae on *Spodoptera frugiperda* 2nd instar larvae

中华通草蛉 *Chrysoperla sinica*	天敌密度（P） The density of natural enemies	猎物密度（N） Pest density	捕食量 Predation	捕食率作用率（E） Predation ratio	自身密度方程 Self-density equation
2 龄幼虫 2nd larvae	1	40	15.2 ± 1.887a	0.383 ± 0.047a	$E = 0.657P^{-0.846}$, $R^2 = 0.999$
	2	40	16.7 ± 2.136a	0.208 ± 0.026b	
	3	40	18.2 ± 1.038a	0.152 ± 0.012b	
3 龄幼虫 3rd larvae	1	60	38.2 ± 3.966a	0.637 ± 0.066a	$E = 0.816P^{-0.869}$, $R^2 = 0.994$
	2	60	39.5 ± 3.969a	0.328 ± 0.033b	
	3	60	44.5 ± 4.193a	0.248 ± 0.023b	

3　讨论

中华通草蛉对草地贪夜蛾卵和幼虫的捕食作用符合 Holling II 型功能反应模型，中华通草蛉对草地贪夜蛾的捕食率随猎物密度上升而上升，逐渐趋向饱和状态。在功能反应模型的各项参数中，草蛉各龄期幼虫对草地贪夜蛾的瞬间攻击率随着草蛉龄期增大而增大，猎物处理时间随

着草蛉龄期的增大而减少（表 1）。这与中华通草蛉在捕食其它害虫比如麦蚜 *Phopalosiphum padi*（肖云丽等，2006）、绣线菊蚜 *Aphis citricola*（郑书文等，2008）、黑刺粉虱 *Aleurocan spinfetus*（唐天成等，2018）、茶蚜 *Toxoptera aurantii*（廖先骏等，2016）及玉米螟 *Ostrinia furnacalis*（李腾武和陈素馨，2000）卵的功能反应一致。捕食功能反应是在搜寻猎物的时间和处理猎物所需的时间之间的一种权衡结果。在低猎物密度下，捕食者大部分时间都在寻找猎物，在高猎物密度下，捕食者的大部分时间都是用来处理捕获的猎物，而寻找额外猎物的时间就相对较少（Holling，1966）。

关于天敌对害虫的作用效果评价，周集中和陈常铭（1986）提出用 a/T_h 来衡量天敌对害虫的控制潜能，比值越大说明天敌对害虫的控制能力越强。在本研究中，中华通草蛉 3 龄幼虫对草地贪夜蛾卵的捕食潜能（195.5 头）大于对草地贪夜蛾 1 龄（148.2 头）和 2 龄（60.6 头）幼虫的捕食潜能，说明其控害效能随害虫的龄期增大而减小。3 龄期的中华通草蛉幼虫对草地贪夜蛾 1 龄幼虫的最大捕潜能为 148.2 头，明显大于草蛉 1 龄和 2 龄幼虫对草地贪夜蛾 1 龄幼虫的捕食潜能（37.9 头和 59.2 头），表明了其控害效能随着天敌龄期增大而增强（表 2）。中华通草蛉对于高龄（3 龄以上）的草地贪夜蛾幼虫捕食作用较差。造成这种现象的原因可能有以下两点：首先，3 龄及以上草地贪夜蛾幼虫体型比草蛉 3 龄幼虫大；其次，3 龄以上的夜蛾幼虫个体是具有明显的防御现象，草蛉攻击夜蛾幼虫会遭到反攻击，曾出现多次 3 龄草蛉幼虫被多头夜蛾幼虫啃食的现象。唐艺婷等（2019）及王燕等（2019）的研究发现，蠋蝽 5 龄若虫及成虫对草地贪夜蛾高龄幼虫均有良好的捕食能力。因此在田间防治时可选择不同的天敌混合应用，以达到增效的目的。

天敌昆虫在自然界的捕食作用和行为，除了物种自身的特性外，还同时受到种群密度因素、空间分布、环境因子等外界环境的影响（周集中和陈常铭，1986；Lee and Kang，2004）。在草地贪夜蛾卵或幼虫密度相同条件下，随着中华草蛉幼虫密度的增大，其日平均捕食量逐渐减少，捕食作用率（E）显著降低（表 3-表 5），个体间存在分摊竞争。研究发现，中华通草蛉捕食草地贪夜蛾卵时其 1 龄、2 龄和 3 龄幼虫的相互干扰系数 m 分别为 0.184、0.260 和 0.224（表 3），干扰效应明显要小于捕食草地贪夜蛾 1 龄和 2 龄幼虫（表 4，表 5）。说明中华通草蛉对草地贪夜蛾卵具有很好的控制作用，是一种很有利用价值的天敌昆虫。

捕食者自身密度足够高时，捕食者之间的干扰变得不可避免，捕食者自身密度很低时，不可能出现捕食者之间的干扰（Abrams and Ginzburg，2000）。由于本研究的捕食功能反应是在限定的空间进行的，但在自然界中，纯粹的依赖猎物密度或纯粹的依赖捕食者密度的功能反应是不可能存在的。因此，在自然条件下的中华通草蛉对草地贪夜蛾的捕食能力需要进一步研究。

参考文献 (References)

Abrams PA, Ginzburg LR, 2000. The nature of predation: Prey dependent, ratio dependent or neither? *Trends in Ecology & Evolution*, 15(8): 337–341.

Agboyi LK, Goergen G, Beseh P, Mensah SA, Clottey VA, Glikpo R, Buddie A, Cafà G, Offord L, Day R, Rwomushana I, Kenis M, 2020. Parasitoid complex of fall armyworm, *Spodoptera frugiperda*, in Ghana and Benin. *Insects*, 11(2): 1–15.

Agboyi LK, Mensah SA, Clottey VA, Beseh P, Glikpo R, Rwomushana I, Day R, Kenis M, 2019. Evidence of leaf consumption rate decrease in fall armyworm, *Spodoptera frugiperda*, larvae parasitized by *Coccygidium luteum*. *Insects*, 10(11): 410.

Batra SWT, 1982. Biological control in agroecosystem. *Science*, 215(4529): 134–139.

De Queiroz AP, Favetti BM, Luski PGG, Gonçalves J, Neves PMOJ, De Freitas Bueno A, 2019. *Telenomus remus* (Hymenoptera: Platygastridae) parasitism on *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) eggs: Different parasitoid and host egg ages. *Semin-Ciencias Agrarias*, 40(6): 2933–2945.

Ding YQ, Chen YP, 1986. Predation pattern of the green lacewing *Chrysoperla sinica* on cotton aphid and cotton bollworm. *Chinese Journal of Biological Control*, 2(3): 97–102. [丁岩钦, 陈玉平, 1986. 中华草蛉对棉蚜与棉铃虫的捕食作用研究. 生

物防治通报, 2(3): 97–102.]

Guo JF, He K, Wang ZY, 2019. Biological characteristics, trend of fall armyworm *Spodoptera frugiperda*, and the strategy for management of the pest. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 56(3): 361–369. [郭井菲, 何康, 王振营, 2019. 草地贪夜蛾的生物学特性、发展趋势及防控对策. 应用昆虫学报, 56(3): 361–369.]

Hassell MP, Varley GC, 1969. New induction population model for insect parasities and its bearing on biological control. *Nature*, 223: 1113–1137.

Holling CS, 1959. Some characteristics of simple types of predation and parasitism. *The Canadian Entomologist*, 91(7): 385–398.

Holling CS, 1966. The functional response of invertebrate predators to prey density. *Memories of the Entomological Society of Canada*, 98(S48): 5–86.

Hou ML, Wan FH, Wang FL, 2002. Population dynamics of *Helicoverpa assulta* and *Myzus persicae* and their natural enemies in tobacco fields of Shandong province. *Chinese Journal of Biological Control*, 18(2): 54–57. [侯茂林, 万方浩, 王福莲, 2002. 山东烟区烟青虫和烟蚜及其天敌的发生动态. 中国生物防治, 18(2): 54–57.]

Jiang J, Zhang YC, Wang WW, Qin HM, Tian M, Liu TX, Zhang SZ, 2020. Predation of *Propylaea japonica* on eggs and young larvae of *Spodoptera frugiperda*. *Plant Protection*, 46(3): 188–193. [蒋骏, 张熠玚, 王文文, 秦慧敏, 田密, 刘同先, 张世泽, 2020. 龟纹瓢虫对草地贪夜蛾卵和低龄幼虫的捕食作用. 植物保护, 46(3): 188–193.]

Kong L, Li YY, Wang MQ, Liu CX, Mao JJ, Chen HY, Zhang LS, 2019a. Predation of *Coccinella septempunctata* on young larvae of *Spodoptera frugiperda*. *Chinese Journal of Biological Control*, 35(5): 715–720. [孔琳, 李玉艳, 王孟卿, 刘晨曦, 毛建军, 陈红印, 张礼生, 2019a. 七星瓢虫对草地贪夜蛾低龄幼虫的捕食能力评价. 中国生物防治学报, 35(5): 715–720.]

Kong L, Li YY, Wang MQ, Liu CX, Mao JJ, Chen HY, Zhang LS, 2019b. Predation of *Hippodamia variegata* and *Harmonia axyridis* to young larvae of *Spodoptera frugiperda*. *Chinese Journal of Biological Control*, 35(5): 709–714. [孔琳, 李玉艳, 王孟卿, 刘晨曦, 毛建军, 陈红印, 张礼生, 2019b. 多异瓢虫和异色瓢虫对草地贪夜蛾低龄幼虫的捕食能力评价. 中国生物防治学报, 35(5): 709–714.]

Lee JH, Kang TJ, 2004. Functional response of *Harmonia axyridis* (Pallas) (Coleoptera: Coccinellidae) to *Aphis gossipii* Glover (Homoptera: Aphididae) in the Laboratory. *Biological Control*, 31(3): 306–310.

Li TW, Chen SX, 2000. Predation pattern of *Chrysoperla sinica* larvae on the eggs of *Ostrinia furnacalis*. *Journal of Zhangjiakou Agricultural College*, 16(1): 3–6. [李腾武, 陈素馨, 2000. 中华草蛉幼虫对玉米螟卵的捕食作用研究. 张家口农专学报, 16(1): 3–6]

Liao XJ, Tang TC, Wang YX, Chen ZZ, Xu YY, 2016. Study on predacious function of *Chrysoperla sinica* larvae to *Toxoptera aurantii* Boyer. *Shandong Agricultural Sciences*, 48(4): 87–89. [廖先骏, 唐天成, 汪玉新, 陈珍珍, 许永玉, 2016. 中华通草蛉幼虫对茶蚜捕食作用的研究. 山东农业科学, 48(4): 87–89.]

Liao YL, Yang B, Xu MF, Lin W, Wang DS, Chen KW, Chen HY, 2019. First report of *Telenomus remus* parasitizing *Spodoptera frugiperda* and its field parasitism in southern China. *Journal of Hymenoptera Research*, 73(3): 95–102.

Lin KJ, Wu KM, Liu SB, Zhang YJ, Guo YY, 2006. Functional responses of *Chrysopa sinica*, *Propylaea 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 BJ, Qin DQ, Zhou Y, Chen XT, Ma QL, Xu HH, Zhang ZX, 2020. Observation and evaluation on predation behavior of *Harmonia axyridis* to *Spodoptera frugiperda*. *Journal of South China Agricultural University*, 41(1): 28–33. [刘本菊, 秦得强, 周游, 陈孝甜, 马千里, 徐汉虹, 张志祥, 2020. 异色瓢虫对草地贪夜蛾的捕食行为观察与评价. 华南农业大学学报, 41(1): 28–33.]

Lu Y, Adang MJ, 1996. Distinguishing fall armyworm (Lepidoptera: Noctuidae) strains using a diagnostic mitochondrial DNA marker. *Florida Entomologist*, 79(1): 48–55.

Malaquias JB, Ramalho FS, Omoto C, Godoy WAC, Silveira RF, 2014. Imidacloprid affects the functional response of predator *Podisus nigrispinus* (Dallas) (Heteroptera: Pentatomidae) to strains of *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith) on Bt cotton. *Ecotoxicology*, 23(2): 192–200.

Ramos Y, Taibo AD, Jiménez JA, Portal O, 2020. Endophytic establishment of *Beauveria bassiana* and *Metarhizium anisopliae* in maize plants and its effect against *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith) (Lepidoptera: Noctuidae) larvae. *Egyptian Journal of Biological Pest Control*, 30(1): 1–6.

Sharanabasappa D, Kalleshwaraswamy CM, Poorani J, Maruthi MS, Pavithra HB, 2019. Natural enemies of *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith) (Lepidoptera: Noctuidae), a recent invasive pest on maize in south India. *Florida Entomologist*, 102(3): 619–623.

Sisay B, Simiyu J, Mendesil E, Likhayo P, Ayalew G, Mohamed S, Subramanian S, Tefera T, 2019. Fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* infestations in East Africa: Assessment of damage

and parasitism. *Insects*, 10(7): 1–10.

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): 75–80. [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): 75–80.]

Tang YT, Li YY, Liu CX, Mao JJ, Chen HY, Zhang LS, Wang MQ, 2019. Predation and behavior of *Arma chinensis* to *Spodoptera frugiperda*. *Plant Protection*, 45(4): 65–68. [唐艺婷, 李玉艳, 刘晨曦, 毛建军, 陈红印, 张礼生, 王孟卿, 2019. 蝽蝽对草地贪夜蛾的捕食能力评价和捕食行为观察. 植物保护, 45(4): 65–68.]

Wang Y, Zhang HM, Yin YQ, Li XY, Zhao XQ, Tang YT, Wang MQ, Chen AD, Chen FS, Zhang LS, 2019. Predation of adult of *Arma chinensis* to larvae of *Spodoptera frugiperda*. *Plant Protection*, 45(5): 42–46. [王燕, 张红梅, 尹艳琼, 李向永, 赵雪晴, 唐艺婷, 王孟卿, 谌爱东, 陈福寿, 张礼生, 2019. 蝽蝽成虫对草地贪夜蛾不同龄期幼虫的捕食能力. 植物保护, 45(5): 42–46.]

Wang RL, Jiang CX, Guo X, Chen DD, You C, Zhang Y, Wang MT, Li Q, 2020. Potential distribution of *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith) in China and the major factors influencing distribution. *Global Ecology and Conservation*, 21: e00865.

Wu QL, He LM, Shen XJ, Jiang YY, Liu J, Hu G, Wu KM, 2019. Estimation of the potential infestation area of newly-invaded fall armyworm *Spodoptera frugiperda* in the Yangtze River Valley of China. *Insects*, 10(9): 298

Xiao YL, Guo HB, Li MG, Ju Z, Xu YY, 2006. Functional response of *Chrysoperla sinica* larvae (Tjeder) (Neuroptera: Chrysopidae) to the wheat aphid *Phopalosiphun Padi* (Linnaeus) in the laboratory. *Natura Enemies of Insects*, 28(3): 109–114. [肖云丽, 郭海波, 李明贵, 鞠珍, 许永玉, 2006. 中华通草蛉幼虫对麦蚜捕食作用的初步研究. 昆虫天敌, 28(3): 15–20.]

Xu QX, Wang S, Tian RB, Wang S, Zhang F, Ma J, Li S, Di N, 2019. Study on the predation potential of *Chrysopa pallens* on *Spodoptera frugiperda*. *Journal of Environmental Entomology*, 41(4): 754–759. [徐庆宣, 王松, 田仁斌, 王甦, 张帆, 马娇, 李姝, 邸宁, 2019. 大草蛉对草地贪夜蛾捕食潜能研究. 环境昆虫学报, 41(4): 754–759.]

Zhao SY, Luo QM, Sun XX, Yang XM, Jiang YY, Wu KM, 2019. Comparison of morphological and biological characteristics between *Spodoptera frugiperda* and *Spodoptera litura*. *China Plant Protection*, 39(5): 26–35. [赵胜园, 罗倩明, 孙小旭, 杨现明, 姜玉英, 吴孔明, 2019. 草地贪夜蛾与斜纹夜蛾的形态特征和生物学习性比较. 中国植保导刊, 39(5): 26–35.]

Zhao YJ, Fu CY, Li WW, Zhang LM, Du GZ, Chen B, Li ZY, 2020. Predation functional response of *Harmonia axyridis* larvae to the eggs and low instar larvae of *Spodoptera frugiperda*. *Plant Protection*, 46(1): 51–54. [赵英杰, 符成悦, 李维薇, 张立敏, 杜广祖, 陈斌, 李正跃, 2020. 异色瓢虫幼虫对草地贪夜蛾卵和低龄幼虫的捕食作用. 植物保护, 46(1): 51–54.]

Zhao YJ, Zheng YQ, Fu CY, Chen B, Li ZY, 2019. The predation functional response of *Harmonia axyridis* to the 2nd instar larvae of *Spodoptera frugiperda*. *Plant Protection*, 45(5): 75–78. [赵英杰, 郑亚强, 符成悦, 陈斌, 李正跃, 2019. 异色瓢虫对草地贪夜蛾 2 龄幼虫的捕食功能反应. 植物保护, 45(5): 75–78.]

Zheng SW, Liu XQ, Li MG, Xu YY, 2008. Predacious function of *Chrysoperla sinica* larvae to *Aphis citricola*. *Shandong Agricultural Sciences*, 205(6): 50–52. [郑书文, 刘学谦, 李明贵, 许永玉, 2008. 中华通草蛉幼虫对绣线菊蚜捕食作用的研究. 山东农业科学, 205(6): 50–52.]

Zhou JZ, Chen CM, 1986. Predation of wolf spider, *Lycosa pseodoannulata* on brown planthopper, *Nilaparvata lugens* and its simulation mode: Ⅰ. functional response. *Chinese Journal of Biological Control*, 2(1): 2–9. [周集中, 陈常铭, 1986. 拟环纹狼蛛对褐飞虱的捕食作用及其模拟模型的研究Ⅰ. 功能反应. 生物防治通报, 2(1): 2–9.]