研 究 简 报
Research Notes

龟纹瓢虫对草地贪夜蛾卵和低龄幼虫的捕食作用

蒋 骏， 张熠扬， 王文文， 秦慧敏， 田 密， 刘同先， 张世泽*

（旱区作物逆境生物学国家重点实验室，西北农林科技大学植物保护学院，杨凌 712100）

摘要 为明确龟纹瓢虫 *Propylaea japonica* 对草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda* 的控害潜力，在(25±1)℃、L//D=16 h//8 h、RH (60±5)%的条件下研究了龟纹瓢虫雌、雄成虫和4龄幼虫对草地贪夜蛾卵、1龄和2龄幼虫的捕食能力。结果表明，龟纹瓢虫4龄幼虫和雌、雄成虫对草地贪夜蛾卵、1龄和2龄幼虫的捕食反应均符合Holling Ⅱ模型。龟纹瓢虫雌、雄成虫和4龄幼虫对草地贪夜蛾卵的日最大捕食量分别为204.6、110.9粒和124.7粒，瞬时攻击率分别为1.125、1.658和1.429，处理时间分别为0.004 9、0.009 0 d和0.008 0 d；对草地贪夜蛾1龄幼虫的日最大捕食量分别为242.4、265.5头和109.4头，瞬时攻击率分别为1.233、1.038和1.411，处理时间分别为0.004 1、0.003 8 d和0.009 1 d；对草地贪夜蛾2龄幼虫的日最大捕食量分别为41.2、40.3头和27.6头，瞬时攻击率分别为1.386、1.226和1.685，处理时间分别为0.024 3、0.024 8 d和0.036 2 d。雌、雄成虫和4龄幼虫对草地贪夜蛾卵和低龄幼虫的搜寻效应均随着猎物密度的增加而降低。龟纹瓢虫对草地贪夜蛾卵和1龄幼虫的捕食量高于2龄幼虫。结果表明龟纹瓢虫对草地贪夜蛾卵和低龄幼虫具有较好的控制作用，为利用龟纹瓢虫控制草地贪夜蛾提供了理论依据。

关键词 龟纹瓢虫； 草地贪夜蛾； 捕食作用； 功能反应； 生物防治

中图分类号： S476.2，S433.4 **文献标识码**： A **DOI**： 10.16688/j.zwbh.2019697

Predation of *Propylaea japonica* to the eggs and young larvae of *Spodoptera frugiperda*

JIANG Jun， ZHANG Yiyang， WANG Wenwen， QIN Huimin，
TIAN Mi， LIU Tongxian， ZHANG Shize*

(*State Key Laboratory of Crop Stress Biology for Arid Areas*, *College of Plant Protection*, *Northwest A & F University*, *Yangling* 712100, *China*)

Abstract To clarify the predatory potential of *Propylaea japonica* against *Spodoptera frugiperda*, the predation and control ability of fourth instar, female and male adults of *P. japonica* against the eggs and young larvae of *S. frugiperda* were studied under conditions of (25±1)℃, L//D=16 h//8 h, RH (60±5)%. The results showed that the functional response of *P. japonica* female, male adults and fourth instar against the eggs, first and second instar of *S. frugiperda* all fitted well with Holling Ⅱ model. The maximum daily predation numbers of *P. japonica* female, male adults and fourth instar to the eggs of *S. frugiperda* were 204.6, 110.9 and 124.7, respectively; the instantaneous attack rates were 1.125, 1.658 and 1.429, respectively and the handling time were 0.004 9, 0.009 0 and 0.008 0 d, respectively. The maximum daily predation numbers of *P. japonica* female, male adults and fourth instar to the first instar of *S. frugiperda* were 242.4, 265.5 and 109.4, respectively; the instantaneous attack rates were 1.233, 1.038 and 1.411 respectively and the handling time were 0.004 1, 0.003 8 and 0.009 1 d. The maximum daily predation numbers of *P. japonica* female, male adults and fourth instar to second instar of *S. frugiperda* were 41.2, 40.3 and 27.6, respectively; the instantaneous attack rates were 1.386, 1.226 and 1.685, respectively and the

收稿日期： 2019-12-18 **修订日期**： 2019-12-23
基金项目： 国家重点研发计划(2017YFD0201006)；国家大宗蔬菜产业技术体系(CARS-23-D-06)
* 通信作者 E-mail：shzzhang@nwafu.edu.cn

handling time were 0.024 3, 0.024 8 and 0.036 2 d, respectively. The predation numbers of *P. japonica* to first instar and eggs of *S. frugiperda* were more than to second instar. The searching efficiency of *P. japonica* to the eggs, first and second instar of *S. frugiperda* decreased gradually with the increase of prey density. The results indicate that *P. japonica* has a good control potential on *S. frugiperda*, which provide theoretical evidence for prevention and control of *S. frugiperda* by using *P. japonica*.

Key words *Propylaea japonica*; *Spodoptera frugiperda*; predation; functional response; biological control

草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda*,又称秋黏虫,属鳞翅目 Lepidoptera 夜蛾科 Noctuidae,原产于美洲,为重大迁飞性农业害虫[1],具有繁殖能力强,寄主范围广,扩散速度快,为害严重等特点[2]。自 2019 年 1 月首次入侵我国云南省江城县以来,至 2019 年 10 月已在全国 26 省(区、市)1 538 个县(市、区)发生,发生面积达 95.4 万 hm^2,对我国玉米等作物的生产构成了严重威胁[3]。由于草地贪夜蛾发生突然,迁飞性强,因此目前多以化学防治为主,但草地贪夜蛾已对高效氯氟氰菊酯、多杀霉素、毒死蜱、溴氰菊酯以及唑虫酰胺等多种类型农药产生了较高的抗药性[4-6],并且有报道表明草地贪夜蛾在其原产地南美洲巴西对多种转基因玉米也产生了较高的抗性[7-9],因此,寻求包括生物防治技术在内的非化学防治方法对草地贪夜蛾进行持久控制尤为迫切和重要。

草地贪夜蛾的天敌种类繁多,病原微生物有白僵菌和绿僵菌[10-12],病原线虫有异小杆线虫属的 *Heterorhabditis amazonensis* RSC05、斯氏线虫属的 *Steinernema diaprepesi* 和 *S. riobrave* 等[13],昆虫病毒有核型多角体病毒[14],细菌有苏云金芽胞杆菌 *Bacillus thuringiensis* 等[12,15];寄生性天敌有 14 科 190 余种[16],主要包括螟黄赤眼蜂 *Trichogramma chilonis*、甲腹茧蜂 *Chelonus* spp.、斯氏侧沟茧蜂 *Microplitis similis*、短管赤眼蜂 *Trichogramma pretiosum*、夜蛾黑卵蜂 *Telenomus remus* 等[17-21];捕食性天敌有斑腹刺益蝽 *Podisus maculiventris*、黑刺益蝽 *Podisus nigrispinus*[22-23]、草蛉[24]、瓢虫[25]等。目前,国内学者已报道了大草蛉 *Chrysopa pallens*,东亚小花蝽 *Orius sauteri*,异色瓢虫 *Harmonia axyridis*、多异瓢虫 *Hippodamia variegate*、益蝽 *Picromerus lewisi*、叉角厉蝽 *Eocanthecona furcellate*、蠋蝽 *Arma chinensis*、黄足肥螋 *Eurellia pallipes* 等天敌昆虫对草地贪夜蛾的捕食反应[24-34]。

草地贪夜蛾于 2019 年 5 月底在陕西省洋县首次发现,笔者随后在对陕西省玉米地草地贪夜蛾发生为害情况的调查中发现龟纹瓢虫 *Propylaea japonica* 在玉米地数量多,发生时间长,而且龟纹瓢虫具有耐高温、夏季不滞育等特点[35],推测其对草地贪夜蛾可能具有一定的控制作用。因而,本试验研究了龟纹瓢虫雌、雄成虫和 4 龄幼虫对草地贪夜蛾卵、1 龄和 2 龄幼虫的捕食作用,以期为研发龟纹瓢虫控制草地贪夜蛾的生物防治技术提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　供试昆虫

龟纹瓢虫采自玉米田,在养虫室内以豌豆蚜 *Acyrthosiphon pisum* 饲养建立试验种群。草地贪夜蛾采自玉米田,在养虫室内以玉米叶饲养建立种群,成虫以 10%蔗糖水喂养。饲养条件为温度(25±1)℃,RH (60±5)%,L//D=16 h//8 h。

1.2　试验方法

龟纹瓢虫 3 日龄雌、雄成虫和 4 龄幼虫饥饿 24 h用于试验。草地贪夜蛾设置 1 日龄卵、初孵1 龄和 2 龄幼虫 3 个虫态。将新鲜玉米叶片剪成长 3 cm、宽 0.1 cm 的玉米叶段放入培养皿(直径9 cm,高 1.5 cm)中,每皿 10 段,培养皿底部放一张滤纸,然后分别放入草地贪夜蛾 1 龄和 2 龄幼虫。取食卵的试验只在培养皿底部放一张滤纸,然后放一个湿棉球。试验在智能人工培养箱(RG-400,宁波江南仪器厂)中进行,试验条件为(25±1)℃,RH (60±5)%,L//D=16 h//8 h,光照强度 11 000 lx。

1.2.1　龟纹瓢虫 4 龄幼虫和雌、雄成虫对草地贪夜蛾卵的捕食反应

草地贪夜蛾卵的密度设置为 20、40、60、80、100、120、140 粒/皿,每皿放入 1 头龟纹瓢虫 4 龄幼虫或雌、雄成虫,24 h 后统计培养皿内剩余的卵粒数,计算出取食卵粒数,每密度重复 5 次。

1.2.2 龟纹瓢虫 4 龄幼虫和雌、雄成虫对草地贪夜蛾 1、2 龄幼虫的捕食反应

草地贪夜蛾 1 龄幼虫密度设置为 20、30、50、70、90、110、130 头/皿，2 龄幼虫设置为 10、15、20、25、30、40、50 头/皿，每皿放入 1 头龟纹瓢虫 4 龄幼虫或雌、雄成虫，24 h 后统计培养皿内剩余的草地贪夜蛾幼虫数，计算出被取食的幼虫数，每密度重复 5 次。

1.3 数据分析

先用 Excel 2010 进行数据处理，再使用 Graphpad Prism 6.01 进行分析并作图。用捕食功能反应方程 $N_a=aNT/(1+aT_hN)$[36] 和搜寻效应方程 $S=a/(1+aT_hN)$[37] 对数据进行拟合，式中 N_a 为捕食者捕食猎物的数量，N 为猎物密度，a 为捕食者对猎物的瞬时攻击率，T 为试验的总时间(本试验中 T 值为 1 d)，T_h 为处理时间(即捕食者取食 1 头猎物的时间)，S 为搜寻效应。

2 结果与分析

2.1 龟纹瓢虫 4 龄幼虫和雌、雄成虫对草地贪夜蛾卵、1 龄和 2 龄幼虫的捕食功能反应

龟纹瓢虫对草地贪夜蛾卵、1 龄和 2 龄幼虫的捕食功能反应符合 Holling Ⅱ模型(图 1～图 3)，捕食功能反应方程式见表 1。

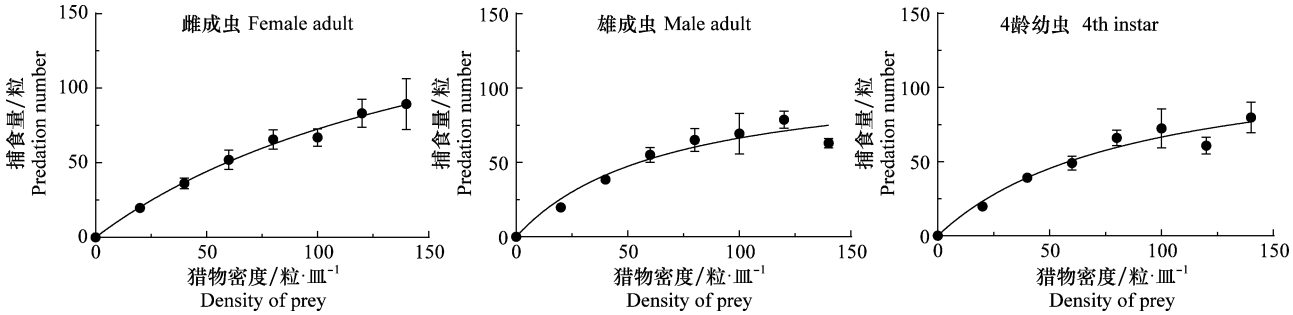


图 1 龟纹瓢虫雌成虫、雄成虫和 4 龄幼虫对草地贪夜蛾卵的捕食功能反应

Fig. 1 Functional responses of female, male adults and fourth instar of *Propylaea japonica* to *Spodoptera frugiperda* eggs

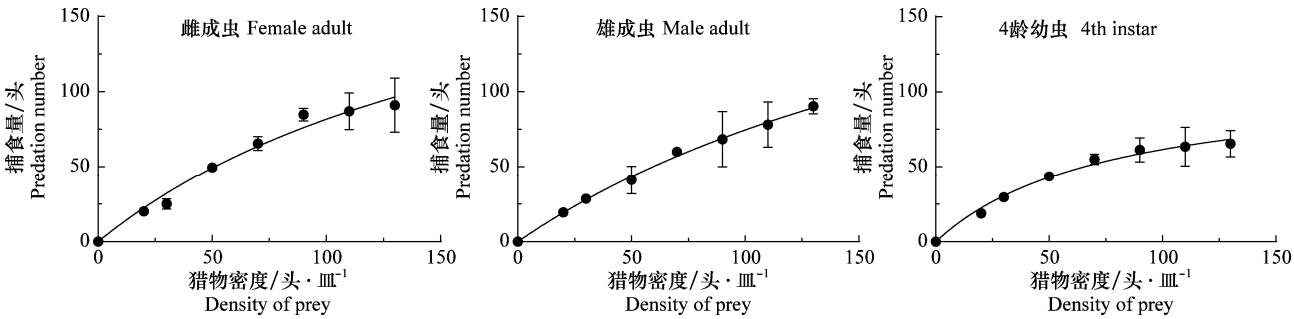


图 2 龟纹瓢虫雌成虫、雄成虫和 4 龄幼虫对草地贪夜蛾 1 龄幼虫的捕食功能反应

Fig. 2 Functional responses of female, male adults and fourth instar of *Propylaea japonica* to *Spodoptera frugiperda* first instar larvae

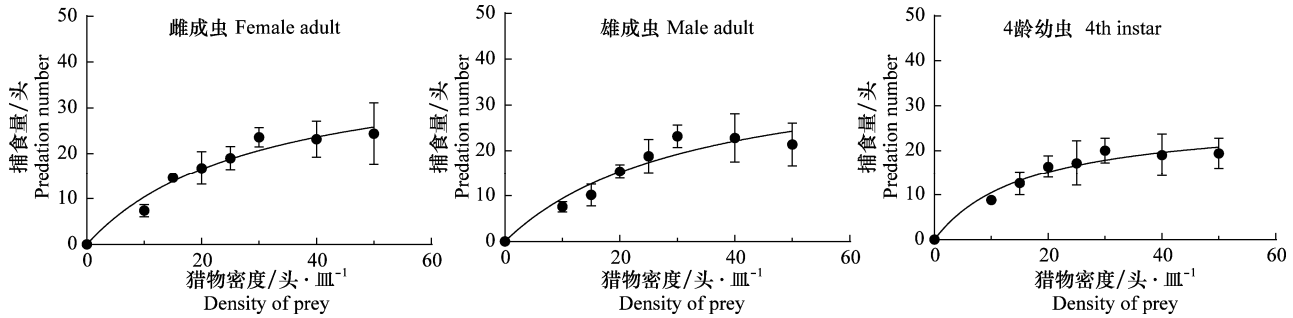


图 3 龟纹瓢虫雌成虫、雄成虫和 4 龄幼虫对草地贪夜蛾 2 龄幼虫的捕食功能反应

Fig. 3 Functional responses of female, male adults and fourth instar of *Propylaea japonica* to *Spodoptera frugiperda* second instar larvae

表 1　龟纹瓢虫 4 龄幼虫及雌、雄成虫对草地贪夜蛾卵、1 龄和 2 龄幼虫的捕食功能反应

Table 1　Functional response of fourth instar, female and male adults of *Propylaea japonica* to egg, first and second instar of *Spodoptera frugiperda*

龟纹瓢虫 *P. japonica*	草地贪夜蛾 *S. frugiperda*	捕食功能反应方程 Function response equation	R^2	瞬时攻击率(a) Instantaneous attack rate	处理时间(T_h)/d Handling time	日最大捕食量($1/T_h$) Daily maximum prey consumed	捕食效能(a/T_h) Predation capacity
雌成虫 Female adult	卵	$N_a=1.125N/(1+0.005N)$	0.936 9	1.125	0.004 9	204.6 粒	230.16
	1 龄幼虫	$N_a=1.233N/(1+0.005N)$	0.935 6	1.233	0.004 1	242.4 头	298.84
	2 龄幼虫	$N_a=1.386N/(1+0.034N)$	0.847 9	1.386	0.024 3	41.2 头	57.11
雄成虫 Male adult	卵	$N_a=1.658N/(1+0.015N)$	0.900 3	1.658	0.009 0	110.9 粒	183.90
	1 龄幼虫	$N_a=1.038N/(1+0.003N)$	0.922 1	1.038	0.003 8	265.5 头	275.55
	2 龄幼虫	$N_a=1.226N/(1+0.030N)$	0.820 8	1.226	0.024 8	40.3 头	49.36
4 龄幼虫 4th instar	卵	$N_a=1.429N/(1+0.011N)$	0.906 6	1.429	0.008 0	124.7 粒	178.25
	1 龄幼虫	$N_a=1.411N/(1+0.013N)$	0.928 0	1.411	0.009 1	109.4 头	154.39
	2 龄幼虫	$N_a=1.685N/(1+0.061N)$	0.807 6	1.685	0.036 2	27.6 头	46.52

龟纹瓢虫雌成虫对草地贪夜蛾 1 龄幼虫的日最大捕食量最高,为 242.4 头,对 2 龄幼虫的捕食量最小,为 41.2 头;捕食卵的瞬时攻击率最小,为 1.125,捕食 2 龄幼虫的最大,为 1.386;捕食 2 龄幼虫的处理时间最长,为 0.024 3 d。对卵和 1 龄幼虫的捕食能力明显高于捕食 2 龄幼虫。

龟纹瓢虫雄成虫对草地贪夜蛾 1 龄幼虫的日最大捕食量最高,为 265.5 头,对 2 龄幼虫的日最大捕食量最小,为 40.3 头;捕食卵的瞬时攻击率最大,为 1.658,捕食 1 龄幼虫的最小,为 1.038;捕食 1 龄幼虫的处理时间最短,为 0.003 8 d。对卵和 1 龄幼虫的捕食能力明显高于捕食 2 龄幼虫。

龟纹瓢虫 4 龄幼虫对草地贪夜蛾卵的日最大捕食量最高,为 124.7 粒,对 2 龄幼虫的捕食量最小,为 27.6 头;捕食 2 龄幼虫的瞬时攻击率最大,为 1.685,捕食 1 龄幼虫的最小,为 1.411;捕食 2 龄幼虫的处理时间最长,为 0.036 2 d。对卵和 1 龄幼虫的捕食能力明显高于捕食 2 龄幼虫。

2.2　龟纹瓢虫 4 龄幼虫和雌、雄成虫对草地贪夜蛾卵、1 龄和 2 龄幼虫的搜寻效应

龟纹瓢虫 4 龄幼虫和雌、雄成虫对草地贪夜蛾卵、1 龄和 2 龄幼虫的搜寻效应均随密度的增加而降低(图 4～图 6)。

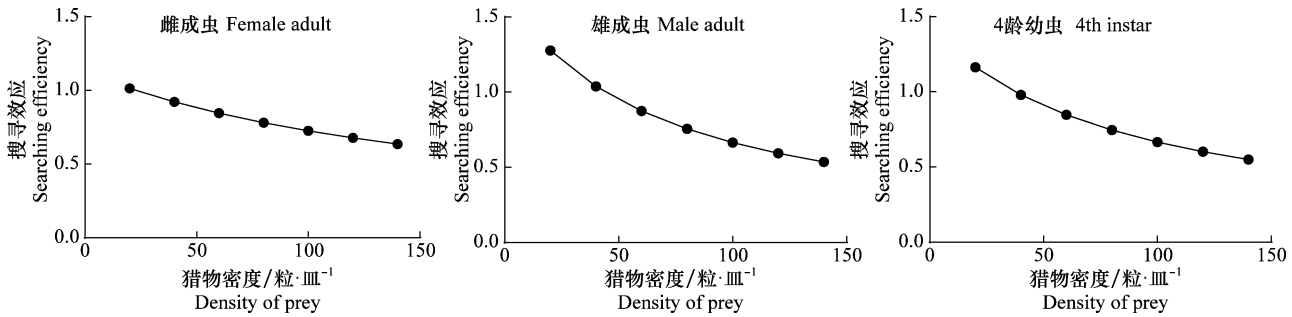


图 4　龟纹瓢虫雌成虫、雄成虫和 4 龄幼虫对草地贪夜蛾卵的搜寻效应

Fig. 4　Searching efficiency of female, male adults and fourth instar of *Propylaea japonica* to *Spodoptera frugiperda* eggs

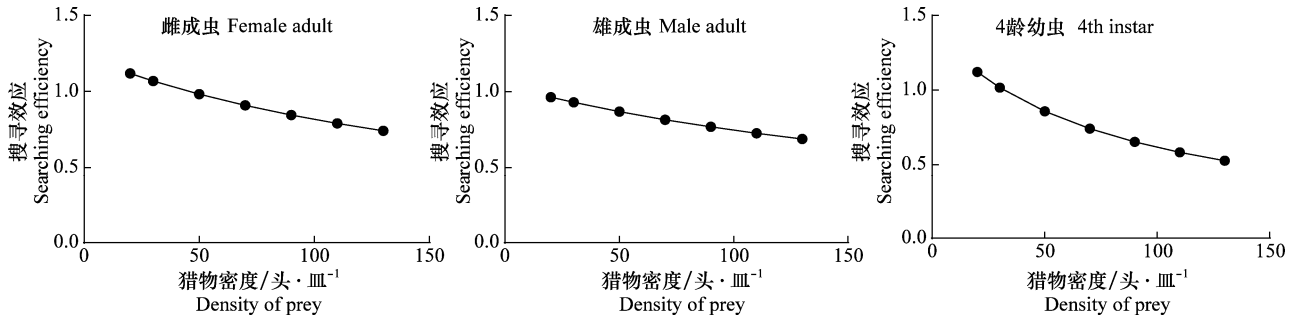


图 5　龟纹瓢虫雌成虫、雄成虫和 4 龄幼虫对草地贪夜蛾 1 龄幼虫的搜寻效应

Fig. 5　Searching efficiency of female, male adults and fourth instar of *Propylaea japonica* to *Spodoptera frugiperda* first instar larvae

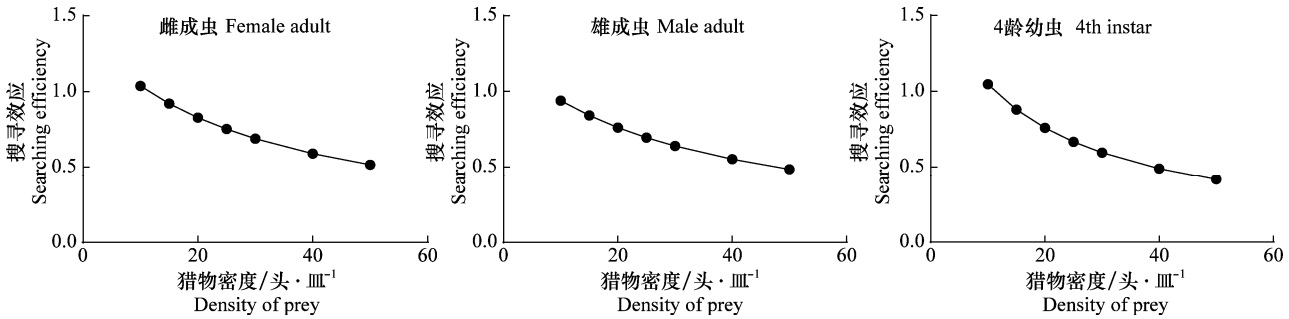


图 6 龟纹瓢虫雌成虫、雄成虫和 4 龄幼虫对草地贪夜蛾 2 龄幼虫的搜寻效应

Fig. 6 Searching efficiency of female, male adults and fourth instar of *Propylaea japonica* to *Spodoptera frugiperda* second instar larvae

3 讨论

草地贪夜蛾自 2019 年 5 月底在陕西省汉中洋县首次被发现以来，目前已在陕西 7 地市 60 余个县区的玉米地发生[2]。陕西省目前玉米种植面积约 118 万 hm^2，小麦 96.7 万 hm^2，这两种作物都是草地贪夜蛾的适宜寄主，因而加强草地贪夜蛾在陕西省的发生与防治技术的研究非常重要。在陕西省，6 月份小麦成熟后龟纹瓢虫开始由麦田向玉米田迁移，并且在玉米田的发生时间长、密度大，是玉米田的优势捕食性天敌[38]。本研究表明，龟纹瓢虫捕食草地贪夜蛾卵和低龄幼虫的捕食功能反应均符合 Holling Ⅱ模型，这与龟纹瓢虫捕食玉米蚜 *Rhopalosiphum maidis*[38]、豌豆蚜 *Acyrthosiphon pisum*[39]、麦长管蚜 *Sitobion avenae*[40]、棉蚜 *Aphis gossypii*[41]、麦红吸浆虫 *Sitodiplosis mosellana*[42] 和亚洲玉米螟 *Ostrinia furnacalis* 卵[43] 的功能反应一致。

龟纹瓢虫是我国干旱半干旱地区农业生产中重要的捕食性天敌种类，由于其不同发育阶段均具有耐高温的特点，因而在夏季高温、干旱的情况下对农林生产系统中多种害虫的卵和低龄幼/若虫具有明显的捕食作用[35,44]。本研究发现龟纹瓢虫雌、雄成虫对草地贪夜蛾 1 龄幼虫的捕食量明显高于对卵和 2 龄幼虫的捕食量，而 4 龄幼虫对草地贪夜蛾卵和 1 龄幼虫的捕食量明显高于对 2 龄幼虫的捕食量，表明龟纹瓢虫对草地贪夜蛾卵和 1 龄幼虫具有很好的控制作用，也表明利用龟纹瓢虫控制草地贪夜蛾具有很大潜力。由于草地贪夜蛾迁飞到新的入侵地后通过产卵才能建立种群进而造成危害，而我们的研究结果又表明龟纹瓢虫成、幼虫对草地贪夜蛾卵和 1 龄幼虫具有较大的控制作用，因而加强龟纹瓢虫控制草地贪夜蛾的生物防治技术的研究尤为重要。闫占峰等[45]报道可以利用 a/T_h 指数反映捕食者对猎物的控制能力，a/T_h 指数越大，表示天敌对猎物控制能力越强。本研究结果表明，龟纹瓢虫 4 龄幼虫和雌、雄成虫对草地贪夜蛾卵和 1 龄幼虫的 a/T_h 指数明显高于 2 龄幼虫，表明其对卵和 1 龄幼虫的控制能力较强。另外，本文研究结果表明，龟纹瓢虫雄成虫对草地贪夜蛾 1 龄幼虫的日最大捕食量为 265.5 头，高于异色瓢虫的 249.0 头[27]、七星瓢虫的 233.1 头[26] 和多异瓢虫的 210.4 头[27]。这些研究结果表明龟纹瓢虫作为玉米田的优势天敌种群确实对草地贪夜蛾卵和低龄幼虫有明显的控制作用。

综上，本试验结果表明龟纹瓢虫对草地贪夜蛾卵和低龄幼虫具有较强的捕食能力，是防治草地贪夜蛾的重要天敌种类。因此，在生产实践中，通过采取有效的农业措施，如结合草地贪夜蛾的监测，在其入侵的早期将自然界中的龟纹瓢虫人为助迁到玉米田或释放室内饲养的龟纹瓢虫，就有可能通过生物防治的方法控制草地贪夜蛾的为害。当然，龟纹瓢虫的饲养技术、释放方法和释放数量等也需要进一步研究。

参考文献

[1] TINGLE F C, MITCHELL E R. *Spodoptera frugiperda*: Factors affecting pheromone trap catches in corn and peanuts [J]. Environmental Entomology, 1979, 8(6): 989 - 992.

[2] 王磊，陈科伟，钟国华，等. 重大入侵害虫草地贪夜蛾发生危害、防控研究进展及防控策略探讨[J]. 环境昆虫学报，2019，41(3)：479 - 487.

[3] 姜玉英，刘杰，谢茂昌，等. 2019 年我国草地贪夜蛾扩散为害规律观测[J]. 植物保护，2019，45(6)：10 - 19.

[4] CARVALHO R A, OMOTO C, FIELD L M, et al. Investigating the molecular mechanisms of organo-phosphate and pyrethroid resistance in the fall armyworm *Spodoptera frugiperda*

[J/OL]. PLoS ONE, 2013, 8(4): e62268. DOI: 10.1371/journal.pone.0062268.

[5] OKUMA D M, BERNARDI D, HORIKOSHI R J, et al. Inheritance and fitness costs of *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) resistance to spinosad in Brazil [J]. Pest Management Science, 2017, 74(6): 1441 - 1448.

[6] 赵胜园, 孙小旭, 张浩文, 等. 常用化学杀虫剂对草地贪夜蛾防效的室内测定[J]. 植物保护, 2019, 45(3): 15 - 25.

[7] FARIAS J R, ANDOW D A, HORIKOSHI R J, et al. Field-evolved resistance to *Cry1F* maize by *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) in Brazil [J]. Crop Protection, 2014, 64: 150 - 158.

[8] OMOTO C, BERNARDI O, SALMERON E, et al. Field-evolved resistance to *Cry1Ab* maize by *Spodoptera frugiperda* in Brazil [J]. Pest Management Science, 2016, 72(9): 1727 - 1736.

[9] MURARO D S, GARLET C G, GODOY D N, et al. Laboratory and field survival of *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) on Bt and non-Bt maize and its susceptibility to insecticides [J]. Pest Management Science, 2019, 75(8): 2202 - 2210.

[10] CARNEIRO A A, GOMES E A, GUIMARAES C T, et al. Molecular characterization and pathogenicity of isolates of *Beauveria* spp. to fall armyworm [J]. Pesquisa Agropecuária Brasileira, 2008, 43(4): 513 - 520.

[11] CRUZ-AVALOS A M, BIVIÁN-HERNÁNDEZ M D, IBARRA J E, et al. High virulence of Mexican entomopathogenic fungi against fall armyworm, (Lepidoptera: Noctuidae) [J]. Journal of Economic Entomology, 2019, 112(1): 99 - 107.

[12] 彭国雄, 张淑玲, 张维, 等. 杀虫真菌与苏云金芽胞杆菌对草地贪夜蛾的联合室内杀虫活性研究[J]. 中国生物防治学报, 2019, 35(5): 735 - 740.

[13] 颜珣, 谷星慧, 韩日畴. 昆虫病原线虫防治草地贪夜蛾的研究进展[J]. 环境昆虫学报, 2019, 41(4): 695 - 700.

[14] 张海波, 王风良, 陈永明, 等. 核型多角体病毒对玉米草地贪夜蛾的控制作用研究[J]. 植物保护, 2020,46(2): 254 - 260.

[15] 刘华梅, 胡虓, 王应龙, 等. 对草地贪夜蛾高毒力的苏云金杆菌菌株筛选[J]. 中国生物防治学报, 2019, 35(5): 721 - 728.

[16] 唐璞, 王知知, 吴琼, 等. 草地贪夜蛾的天敌资源及其生物防治中的应用[J]. 应用昆虫学报, 2019, 56(3): 370 - 381.

[17] 陈壮美, 赵琳超, 刘航, 等. 斯氏侧沟茧蜂对草地贪夜蛾幼虫的寄生行为及寄生效应[J]. 植物保护, 2019, 45(5): 71 - 74.

[18] 霍梁霄, 周金成, 宁素芳, 等. 夜蛾黑卵蜂寄生草地贪夜蛾和斜纹夜蛾卵的生物学特性[J]. 植物保护, 2019, 45(5): 60 - 64.

[19] 李芬, 王力奎, 吕宝乾, 等. 中国海南省田间发现螟甲腹茧蜂寄生草地贪夜蛾[J]. 中国生物防治学报, 2019,35(6):992 - 999.

[20] 李志刚, 吕欣, 押玉柯, 等. 粤港两地田间发现夜蛾黑卵蜂与螟黄赤眼蜂寄生草地贪夜蛾[J]. 环境昆虫学报, 2019, 41(4): 760 - 765.

[21] 朱凯辉, 周金成, 张柱亭, 等. 短管赤眼蜂对草地贪夜蛾和斜纹夜蛾不同日龄卵的寄生能力及子代蜂适合度[J]. 植物保护, 2019, 45(5): 54 - 59.

[22] MALAQUIAS J B, RAMALHO F S, OMOTO C, et al. Imidacloprid affects the functional response of predator *Podisus nigrispinus* (Dallas) (Heteroptera: Pentatomidae) to strains of *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith) on Bt cotton [J]. Ecotoxicology, 2014, 23(2): 192 - 200.

[23] SHAPIRO J P. Assessing biochemical fitness of predator *Podisus maculiventris* (Heteroptera: Pentatomidae) in relation to food quality: effects of five species of prey [J]. Annals of the Entomological Society of America, 2009, 99: 321 - 326.

[24] 徐庆宣, 王松, 田仁斌, 等. 大草蛉对草地贪夜蛾捕食潜能研究[J]. 环境昆虫学报, 2019, 41(4): 754 - 759.

[25] 赵英杰, 郑亚强, 符成悦, 等. 异色瓢虫对草地贪夜蛾 2 龄幼虫的捕食功能反应[J]. 植物保护, 2019, 45(5): 75 - 78.

[26] 孔琳, 李玉艳, 王孟卿, 等. 七星瓢虫对草地贪夜蛾低龄幼虫的捕食能力评价[J]. 中国生物防治学报, 2019, 35(5): 715 - 720.

[27] 孔琳, 李玉艳, 王孟卿, 等. 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[J]. 中国生物防治学报, 2019, 35(5): 709 - 714.

[28] 唐艺婷, 李玉艳, 刘晨曦, 等. 蠋蝽对草地贪夜蛾的捕食能力评价和捕食行为观察[J]. 植物保护, 2019, 45(4): 65 - 68.

[29] 唐艺婷, 王孟卿, 陈红印, 等. 益蝽对草地贪夜蛾高龄幼虫的捕食能力评价和捕食行为观察[J]. 中国生物防治学报, 2019, 35(5): 698 - 703.

[30] 唐敏, 邝昭琅, 李子园, 等. 叉角厉蝽对草地贪夜蛾幼虫的捕食功能反应[J]. 环境昆虫学报, 2019, 41(5): 979 - 985.

[31] 王燕, 张红梅, 尹艳琼, 等. 蠋蝽成虫对草地贪夜蛾不同龄期幼虫的捕食能力[J]. 植物保护, 2019, 45(5): 42 - 46.

[32] 王燕, 王孟卿, 张红梅, 等. 益蝽成虫对草地贪夜蛾不同龄期幼虫的捕食能力[J]. 中国生物防治学报, 2019, 35(5): 691 - 697.

[33] 赵雪晴, 刘莹, 石旺鹏, 等. 东亚小花蝽对草地贪夜蛾幼虫的捕食效应[J]. 植物保护, 2019, 45(5): 79 - 83.

[34] 赵英杰, 符成悦, 徐天梅, 等. 黄足肥螋成虫对草地贪夜蛾 2 龄幼虫的捕食功能反应[J]. 植物保护, 2019,45(6):35 - 38.

[35] 张世泽, 仵均祥, 张强, 等. 龟纹瓢虫生物学特性及饲养利用研究进展[J]. 干旱地区农业研究, 2004, 22(4): 206 - 210.

[36] HOLLING C S. Some characteristics of simple types of predation and parasitism [J]. Canadian Entomologist, 1959, 91(7): 385 - 398.

[37] 丁岩钦. 昆虫数学生态学[M]. 北京: 科学出版社, 1994:257 - 258, 303 - 304.

[38] 张世泽, 花保祯, 许向利. 龟纹瓢虫捕食玉米蚜的功能反应与寻找效应研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2005, 33(5): 85 - 94.

[39] 武德功, 杜军利, 刘长仲, 等. 不同龄期龟纹瓢虫对豌豆蚜的捕食功能反应(英文)[J]. 草地学报, 2012, 20(4): 778 - 783.

[40] 任月萍, 刘生祥. 龟纹瓢虫对麦蚜的捕食功能反应及寻找效应研究[J]. 农业科学研究, 2006(1): 20 - 33.

(下转 219 页)

参考文献

[1] XU Xiangming, MADDEN L V, EDWARDS S G, et al. Developing logistic models to relate the accumulation of DON associated with *Fusarium* head blight to climatic conditions in Europe [J]. European Journal of Plant Pathology, 2013, 137: 689 - 706.

[2] HOOKER D C, SCHAAFSMA A W, TAMBURIC-ILINCIC L. Using weather variables pre and post-heading to predict deoxynivalenol content in winter wheat [J]. Plant Disease, 2002, 86: 611 - 619.

[3] NITA M, DE WOLF E, MADDEN L V, et al. Use of mechanistic simulation models to predict disease intensity of *Fusarium* head blight and deoxynivalenol concentration [J]. Phytopathology, 2008, 98: S113.

[4] MOSCHINI R C, PIOLI R, CARMONA M, et al. Empirical predictions of *Fusarium* head blight in the northern Argentinean Pampas region [J]. Crop Science, 2001, 41: 1541 - 1545.

[5] TURKINGTONT K, OLFERTO O, WEISSR M, et al. Forecasting the potential distribution and severity of *Fusarium* head blight in the prairie region of Canada, using CLIMEX™ modelling and historical and future weather conditions [J]. Canadian Journal of Plant Pathology, 2004, 26(3): 425.

[6] DE WOLF E D, MADDEN L V, LIPPS P E. Risk assessment models for wheat *Fusarium* head blight epidemics based on within-season weather data [J]. Phytopathology, 2003, 93: 428 - 435.

[7] SHAH D A, MOLINEROS J E, PAUL P A, et al. Predicting *Fusarium* head blight epidemics with weather-driven pre and post-anthesis logistic regression models [J]. Phytopathology, 2013, 103: 906 - 919.

[8] MADDEN L V, PAUL P A. Assessing heterogeneity in the relationship between wheat yield and *Fusarium* head blight intensity using random-coefficient mixed models [J]. Phytopathology, 2009, 99: 850 - 860.

[9] 上田进. 麦类赤霉病的预测[J]. 农业与园艺, 1973, 48(6): 843 - 844

[10] 肖晶晶, 霍治国, 李娜, 等. 小麦赤霉病气象环境成因研究进展[J]. 自然灾害学报, 2011, 20(2): 146 - 152.

[11] 徐崇浩, 何险峰, 刘富明, 等. 四川小麦赤霉病流行的气象条件及其时空分布规律和大气环流背景[J]. 西南农业学报, 1996, 9(3): 60 - 67.

[12] 汤志成, 居为民. 地球极移变形力及大气环流因子在小麦赤霉病预报中的应用[J]. 植物保护, 1989, 15(2): 5 - 8.

[13] 居为民, 高苹. 赤道太平洋海温异常对太湖地区小麦赤霉病的影响[J]. 气象科学, 2000, 20(4): 511 - 515.

[14] 高苹, 居为民, 陈宁, 等. 人工神经网络方法在赤霉病预报中的应用研究[J]. 中国农业气象, 2001, 22(2): 22 - 25.

[15] 姚彩文, 赵圣菊, 杨素钦. 厄尔尼诺现象与小麦赤霉病流行初探[J]. 病虫测报, 1988(1): 60 - 62.

[16] 陈将赞,戴以太,杨廉伟. 小麦赤霉病病穗率的预测模型[J]. 浙江农业科学, 2019, 60(1): 93 - 94.

[17] 张汉琳. 气象因素与麦类赤霉病群体流行波动的研究[J]. 气象学报, 1987,45(3): 338 - 345.

[18] 章强华. 麦类赤霉病流行电算模拟模型的设想[J]. 病虫测报参考资料, 1981(2): 7 - 15.

[19] 张文军. 小麦赤霉病流行动态的控制论模型[J]. 生物数学学报, 1996,11(3):111 - 116.

[20] 张平平, 宋金东, 冯小军, 等. 关中麦田产壳玉米秸秆密度与小麦赤霉病穗率的关系[J]. 麦类作物学报, 2015, 35(7): 1022 - 1028.

[21] 张平平. 关中地区小麦赤霉病预测系统. [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2015.

[22] 中华人民共和国农业部. 小麦赤霉病测报技术规范:GB/T 15796-2011 [S]. 北京:中国标准出版社,2001.

[23] 肖悦岩. 预测预报准确度评估方法的研究[J]. 植保技术与推广, 1997, 17(4): 3 - 6.

[24] 袁冬贞,崔章静,杨桦,等. 基于物联网的小麦赤霉病自动监测预警系统应用效果[J]. 中国植保导刊, 2017, 37(1): 46 - 51.

[25] 郭蕾. 渭南市华州区小麦赤霉病远程实时监测预警系统试验[J]. 农业科技通讯, 2017(10): 87 - 89.

[26] 孙友武, 蔡广成, 夏风,等. 小麦赤霉病自动监测预警系统的应用效果[J]. 安徽农业科学, 2018, 46(16): 143 - 144.

[27] 杨慧霞, 梁晓青, 陈恩霞, 等. 洛南县小麦赤霉病远程实时监测预警系统试验研究[J]. 基层农技推广, 2018, 6(12): 29 - 31.

[28] 杨洁,徐进,张小飞,等. 西安地区小麦赤霉病自动监测预警系统应用效果[J]. 中国植保导刊, 2019, 39(2): 50 - 52.

(责任编辑: 杨明丽)

(上接 193 页)

[41] 高孝华, 时爱菊, 曲耀训, 等. 龟纹瓢虫捕食棉蚜的功能反应与寻找效应研究[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2001, 32(4): 457 - 460.

[42] 李建军, 李修炼, 成卫宁. 龟纹瓢虫成虫对麦红吸浆虫捕食作用研究[J]. 陕西农业科学, 2000(11): 8 - 10.

[43] 辛肇军, 卓德干, 李照会. 龟纹瓢虫成虫对亚洲玉米螟卵的捕食作用[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2011, 42(2): 191 - 193.

[44] PUMHAN N, TIAN M, XU L L, et al. Effects of heat stress and exposure duration on survival characteristics of different developmental stages of *Propylaea japonica*, a dominant aphidophagous ladybeetle in China [J/OL]. Crop Protection, 2019, https://doi.org/10.1016/j.cropro.2019.105054.

[45] 闫占峰, 张聪, 王振营, 等. 龟纹瓢虫捕食玉米蚜功能反应研究[J]. 中国生物防治学报, 2012, 28(1): 139 - 142.

(责任编辑: 杨明丽)