松毛虫赤眼蜂对高粱害虫的防效及生态经济效益评估*

张继红[1**] 郭 力[2**] 苗 麟[1] 孟 茜[1] 张 寰[1] 佟 岩[1,3]
王红托[1] 李 瑄[1] 吕 芃[4] 王金萍[4] 殷三强[5] 秦启联[1***]

（1. 中国科学院动物研究所农业虫害鼠害综合治理研究国家重点实验室，北京 100101；2. 北京中科白云绿色生物技术有限公司，北京 100101；3. 中国科学院大学，北京 100049；4. 河北省农林科学院谷子研究所，石家庄 050035；5. 衡水阜星农业科技股份有限公司，衡水 053700）

摘 要 **【目的】** 高粱是我国重要的食用、饲用、制糖及酿酒用作物，其害虫的绿色防控技术手段的应用和推广非常有限。本研究连续 2 年在河北省衡水高粱种植区，开展了利用松毛虫赤眼蜂 *Trichogramma dendrolimi* Matsumura 防治多种鳞翅目害虫的试验示范，以期为减少化学农药的使用、促进高粱产业的绿色可持续发展，提供一种有效、经济和可靠的害虫防治手段。**【方法】** 赤眼蜂防治试验和化学防治试验分别在两个村子的高粱田内进行。通过统计植株被害率、田间捕食性天敌的丰度及高粱产量等参数，进行成本收益分析，比较两种方法对害虫的防治效果，进一步评价其生态和经济效益。**【结果】** 赤眼蜂防治在减轻植株被害率和提高田间捕食性天敌丰度等方面优于化学防治，同时也实现了高粱的增产增收。与化学防治相比，2019 年，赤眼蜂防治显著降低了高粱叶片被害率，田间捕食性天敌的丰度提高了 3.96 倍，产量略有提高，害虫防治成本相对更低，差额净收入增加了 305.47 元/ hm^2；2020 年，赤眼蜂防治显著降低了高粱穗部被害率，田间捕食性天敌的丰度提高了 2.66 倍，产量增加了 1 392.5 kg/hm^2，单位面积防治成本虽略有增高，但综合起来，差额净收入却增加了 3 644.05 元/hm^2（19.90%），增收效果显著。**【结论】** 与化学防治相比，松毛虫赤眼蜂不仅防治害虫效果更好，而且增加了田间生物多样性，提高了天敌的丰度，增产、增收效果显著。利用松毛虫赤眼蜂防治高粱害虫是一种可行、高效并极具竞争力的生物防治手段，具有大面积推广应用的前景。

关键词 卵寄生蜂；生物防治；捕食者丰度；成本效益分析

Evaluation of the effectiveness, environmental benefit and cost-effectiveness, of using *Trichogramma dendrolimi* as a biological control for sorghum pests

ZHANG Ji-Hong[1**] GUO Li[2**] MIAO Lin[1] MENG Qian[1] ZHANG Huan[1] TONG Yan[1,3]
WANG Hong-Tuo[1] LI Xuan[1] Lü Peng[4] WANG Jin-Ping[4] YIN San-Qiang[5] QIN Qi-Lian[1***]

(1. State Key Laboratory of Integrated Management of Pest Insects & Rodents, Institute of Zoology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. Beijing Zhongkebaiyun Green & Biological Technology Co., Ltd., Beijing 100101, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Institute of Millet Crops, Hebei Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Shijiazhuang 050035, China; 5. Fuxing Agricultural Science & Technology Co., Ltd., Hengshui 053700, China)

Abstract **[Objectives]** To evaluate the effectiveness, environmental benefit and cost-effectiveness, of using the parasitoid wasp, *Trichogramma dendrolimi* Matsumura, as a biological control to protect sorghum, an important crop used for food, animal feed, sugar production and wine-making in China. **[Methods]** An experimental trial of the release of *T. dendrolimi* to

*资助项目 Supported projects：河北省农业科技成果转化资金专项（20822903D）；国家重点研发计划（2017YFD0200400）
**共同第一作者 Co-first authors，E-mail：zhangjh@ioz.ac.cn；791432531@qq.com
***通讯作者 Corresponding author，E-mail：qinql@ioz.ac.cn
收稿日期 Received：2021-08-03；接受日期 Accepted：2022-03-24

control a variety of lepidopteran pests was carried out in the sorghum planting area of Hengshui county, Hebei province over two consecutive years. Biological control by releasing *Trichogramma*, and chemical control of pests were conducted in sorghum fields in two different villages. The effectiveness of the two different pest-control methods was assessed by comparing the amount of crop damage, the abundance of predatory natural enemies and sorghum grain yield, between these villages. We also conducted a cost-benefit analysis in order to evaluate the overall ecological and economic benefits of releasing *Trichogramma* compared to using chemical control. **[Results]** Fields in which *Trichogramma* were released had less plant damage, a greater abundance of predatory natural enemies, higher grain yield and greater profit, compared to those that used chemical control. In 2019, fields in which *Trichogramma* were released had significantly reduced leaf damage, a 3.96 fold greater abundance of predatory natural enemies and a slightly higher grain yield with lower pest control costs than those that used chemical control, resulting in an increase in net differential income of 305.47 yuan/hm^2. In 2020, fields in which *Trichogramma* were released had significantly reduced ear damage, a 2.66-fold increase in the abundance of predatory natural enemies and 1 392.5 kg/hm^2 higher grain yield than those that used chemical control, albeit with slightly higher cost, resulting in an increase in net differential income of 3 644.05 yuan/hm^2 (19.90%). **[Conclusion]** Compared to chemical control, the release of *T. dendrolimi* not only significantly reduced crop damage, but sustained the biodiversity and abundance of the natural enemies of crop pests, thereby significantly increasing production and income. As a result, releasing *Trichogramma* to control sorghum pests is a practical and efficient biological control solution for sustainable pest control in sorghum plantations.

Key words egg parasitoid; biological control; predator abundance; cost-benefit analysis

由于化学杀虫剂对生态环境、食品安全和人类健康的潜在危害，我国已开始践行减少化学杀虫剂使用量的方针政策，大力推进以环境友好型的植保产品来替代化学农药。赤眼蜂 *Trichogramma* spp.是一类非常有潜力的卵寄生蜂，在世界范围内，尤其在我国，得到了广泛的研究和应用（Smith，1996；Wang *et al.*，2014；Babendreier *et al.*，2020；Zang *et al.*，2021）。由于田间生态系统的复杂性以及寄主适应性差异等因素，有些赤眼蜂的田间应用效果并不理想（Smith，1996；Colliera and van Steenwyk，2004；Philip *et al.*，2005；Gardner *et al.*，2007；Tang *et al.*，2017）。随着对天敌和寄主生物学和生态学研究的深入，以及规模化饲养和释放技术的改进，多种赤眼蜂的田间应用研究得到长足发展，在控制害虫种群和减轻作物受害方面都有成功报道，在应用成本和保产增产上具有竞争力（Figueiredo *et al.*，2015；Razinger *et al.*，2016；Gagnon *et al.*，2017；Sharma *et al.*，2018；Babendreier *et al.*，2020；Zang *et al.*，2021）。

高粱 *Sorghum bicolor* (L.) Moench 是一种抗旱和耐涝兼具的粮食作物，是发展中国家重要的食物来源，也被广泛应用于动物饲料、制糖、酿酒产业（Oluwafemi，2020；邹剑秋等，2020）。利用赤眼蜂防治玉米（张荆等，1990；Liu *et al.*，1998；Gardner *et al.*，2007；田志来等，2008；余金咏等，2009；Figueiredo *et al.*，2015；Razinger *et al.*，2016；Gagnon *et al.*，2017）及水稻（Sherif *et al.*，2008；Tang *et al.*，2017；Sharma *et al.*，2018；Babendreier *et al.*，2020）等粮食作物上鳞翅目害虫的应用研究和试验示范，国内外有大量成功的先例，但其在高粱相关的研究和应用，报道还非常少见。

我国河北省衡水市阜城县有大面积的酿酒高粱种植，根据我们的实地调查，当地发生的主要害虫为鳞翅目昆虫，包括棉铃虫 *Helicoverpa armigera* Hübner、亚洲玉米螟 *Ostrinia furnacalis* Guenée 及桃蛀螟 *Conogethes phealis* Guenée 等。棉铃虫幼虫主要取食高粱叶片和穗部；亚洲玉米螟幼虫在抽穗期危害叶片，在孕穗期蛀入穗颈和茎秆，取食茎芯，蛀道，导致茎秆折断或作物倒伏；桃蛀螟幼虫在抽穗期取食穗部（陈德飞，2019）。一般情况下，这些鳞翅目害虫可造成30%-40%的高粱受害，在危害严重的年份，高粱被害率可达 100%（待发表）。松毛虫赤眼蜂 *T. dendrolimi* Matsumura 对棉铃虫、亚洲玉米螟和桃蛀螟的卵均可寄生（王辅成等，1985；张荆等，1990；余金咏等，2009；陈万斌等，2019）。利

用柞蚕 *Antheraea pernyi* Guerin-Meneville 卵集约化生产松毛虫赤眼蜂的技术非常成熟，生产成本低廉（Zang *et al.*，2021）。本研究比较了淹没式释放松毛虫赤眼蜂与化学杀虫剂防治高粱上的多种鳞翅目害虫的防控效果，评估了释放松毛虫赤眼蜂的生态和经济效益，以期为减少化学农药使用和促进高粱产业的绿色可持续发展，提供一种有效、经济、可靠的害虫生物防治手段。

1　材料与方法

1.1　试验地点与高粱种植

试验于 2019 年和 2020 年的 5-9 月在河北省衡水市阜城县进行。2019 年在西曲村释放赤眼蜂，面积为 21.50 hm^2，2020 年在东高村释放，面积为 17.15 hm^2。常规化学防治在李常村实施，总面积 19.40 hm^2。

高粱种子、病虫害防治药剂和种植指导由衡水阜星农业科技股份有限公司提供，所产高粱谷粒由该公司收购。所种植的高粱品种为冀酿 2 号，由河北省农林科学院谷子研究所选育的抗蚜矮秆 A 系 L4407A 和矮秆 R 系 XN1 杂交而成，是对蚜虫高抗品种。除害虫防治方法外，释放赤眼蜂和常规化学防治田的所有农事操作均一致。播种于 5 月 8 日至 18 日进行，行距 50-60 cm，株距 10-15 cm，播深 2-3 cm。2019 年播种前田间浇水 1 次，2020 年因播种前有下雨而未浇水。

1.2　鳞翅目成虫种群监测

于 6 月 6 日至 9 月 6 日（2019 年）或 8 月 27 日（2020 年）利用各自的性信息素诱捕器分别监测棉铃虫、亚洲玉米螟和桃蛀螟成虫的种群动态。棉铃虫和亚洲玉米螟的成虫种群监测始于 6 月 6 日，但 2019 年的化学防治田的监测因获得入田调查许可较晚而延后至 7 月 4 日。桃蛀螟发生相对较晚，分别于 2019 年 7 月 20 日和 2020 年 7 月 17 日开始进行成虫的诱捕监测。成虫种群监测的作用主要是通过诱捕的蛾量预测产卵高峰期，并以此确定松毛虫赤眼蜂释放时间。针对 3 种害虫成虫发生期，在上述各时间点，分别在每个村子的高粱地中开始设置性信息素诱捕器，每种害虫一个诱捕器。在整个监测期间，每天调查诱捕器，记录诱蛾种类和数量。表 1 是 3 种害虫的性信息素诱捕器的位置。

表 1　棉铃虫、亚洲玉米螟和桃蛀螟性信息素诱捕器的放置地点

Table 1　The locations of the sex pheromone trap specific to *Helicoverpa armigera*, *Ostrinia furnacalis* and *Conogethes punctiferalis*

处理 Treatments	年 Year	棉铃虫 *H. armigera*	亚洲玉米螟 *O. furnacalis*	桃蛀螟 *C. punctiferalis*
松毛虫赤眼蜂 *Trichogramma dendrolimi*	2019	37°56′5″N，116°19′39″E	37°53′56″N，116°19′20″E	37°56′36″N，116°19′21″E
	2020	37°56′5″N，116°20′18″E	37°53′47″N，116°20″28″E	37°53′41″N，116°20′9″E
化学杀虫剂 Chemical insecticide	2019-2020	37°54′30″N，116°21′51″E	37°54′46″N，116°22′21″E	37°54′28″N，116°21′47″E

1.3　高粱害虫防治

采用释放松毛虫赤眼蜂和常规化学防治 2 种方法防治高粱害虫，并调查防治效果。因本研究在商用高粱田中进行，未设置不实施任何害虫治理的空白对照组。松毛虫赤眼蜂由河南省济源白云实业有限公司用柞蚕卵作为替代寄主生产。在赤眼蜂防治田，参考蛾类种群监测结果确定放蜂日期，每个高粱生长季共释放 4 次赤眼蜂（2019 年：6 月 15 日、7 月 1 日、7 月 30 日和 8 月 22 日；2020 年：6 月 15 日、7 月 5 日、7 月 27 日和 8 月 20 日）。用牙签将卵卡固定在手工折叠起来的叶子内侧，以避免阳光直射和雨水冲刷。卵卡间距约 20 m，放蜂密度为 25-30 万蜂/hm^2。在化学防治田，仅使用化学杀虫剂（虱螨脲和茚虫威）进行害虫防治，喷药时间由农民根据经验确定。整个高粱生长季，当地一般共施用 4-5 次杀虫剂，其中最后 2 次需由无人机喷药。2019 年共施用 4 次杀虫剂（6 月 10 日、7 月 8 日、7 月 24 日和 8 月 25 日）。2020 年由于 8 月下旬连续多日下雨，取消了最后一次的化学农药防治，共施

用 3 次杀虫剂（6 月 8 日、6 月 21 日和 7 月 30 日）。

1.4 作物受害情况及田间捕食性天敌丰度调查

2019 年 7 月 3 日至 9 月 6 日每隔 5 d 调查一次，2020 年 6 月 14 日至 8 月 30 日每隔 7 d 调查一次，调查植株被害率和捕食性天敌丰度。调查时，随机抽取一行高粱中的连续 5 株，2019 年，每个处理每次共取样 200 株，2020 年，每个处理每次共取样 50 株（因 2019 年数据显示虫口分布较均匀而减少了取样量），进行无损伤调查。作物被害率分别统计叶片、茎秆和穗部的被害率，即受损植株占总调查植株的百分比。捕食性天敌丰度仅统计田间丰度较高的天敌种类，即蜘蛛、瓢虫和草蛉 3 类，其它天敌因数量较少，本研究没有统计在内。每 1 头天敌具备取食活性的幼虫或成虫赋值为 1，合计的数值定为丰度数值。

1.5 成本收益分析

2019 年和 2020 年，政府为休耕地和旱作雨养地分别提供补贴 7 500 元/hm^2 和 12 000 元/hm^2。种子、肥料和耕作的单位成本约为 4 185 元/hm^2。固定收入为每年的政府补贴减去单位成本，2019 年和 2020 年的固定收入分别为 3 315 元/hm^2 和 7 815 元/hm^2。同时，统计了与害虫防治效果相关的差额净收入，即以单位高粱谷粒收入减去害虫防治费用。每处理分别对 3 个农户进行随机抽样调查，得到各处理平均单产。从衡水阜星农业科技股份有限公司的高粱收购价格及相应谷物质量数据中加权平均计算出单位粮食价格，2019 年为 2.09 元/kg，2020 年为 2.66 元/kg。害虫防治产品由阜星农业科技股份有限公司向农户提供。赤眼蜂防治成本仅为蜂的成本，为 510 元/hm^2/年；化学防治成本由药剂成本和无人机施药成本构成，药剂成本 75 元/hm^2/次，无人机施药成本 300 元/hm^2/次。

1.6 统计分析

采用 Mann-Whitney 非参数检验分析每日鳞翅目成虫监测数据。考虑到 2019 年对化学防治田的调查开始较晚，仅将 7 月 4 日后的数据纳入分析，作为参考。对植株被害率（反正弦平方根转换）和捕食性天敌丰度进行配对 *t*-检验。谷粒产量采用独立 *t*-检验分析。所有分析均采用 IBM SPSS Statistics 20.0.0 软件（SPSS Inc.，Chicago，IL，USA）进行。

2 结果与分析

2.1 棉铃虫、亚洲玉米螟和桃蛀螟的种群动态监测

棉铃虫和亚洲玉米螟成虫捕获的高峰期始于 6 月初，持续了近 1 个月，随后一直维持在较低水平。桃蛀螟在高粱田发生较晚，8 月中下旬为发生高峰（图 1）。2019 年，尽管赤眼蜂防治田的桃蛀螟捕获量显著高于化学防治田（z = - 2.484，P=0.013），但 3 种成虫的总捕获量在赤眼蜂和化学防治田间无显著差异（z = - 1.113，P=0.266）。2020 年，化学防治田 3 种鳞翅目成虫的总捕获量显著高于赤眼蜂防治田（z = - 2.421，P=0.015），这主要是由于化学防治田中棉铃虫的捕获量较高所致（z = - 2.031，P=0.042）。对赤眼蜂防治田年度差异的比较分析显示，棉铃虫捕获量（z = - 0.688，P=0.492）和桃蛀螟捕获量（z = - 1.717，P=0.086）在 2019 和 2020 年间无显著差异，2020 年亚洲玉米螟的捕获量显著低于 2019 年（z = - 4.141，P<0.001）。

2.2 作物被害率

2019 年，赤眼蜂防治田高粱叶片受害率显著低于化学防治田（t=5.058，df=12，P<0.001），但 2 个处理间茎（t= - 1.733，df=6，P=0.134）和穗（t= - 0.160，df=3，P=0.883）的被害率差异不显著。2020 年，赤眼蜂防治田的高粱穗部被害率显著低于化学防治田（t= - 4.859，df=3，P=0.017），但 2 个处理间叶片（t= - 1.369，df=10，P=0.201）和茎秆（t= - 0.634，df=2，P=0.591）的被害率差异不显著（图 2）。

2.3 田间捕食性天敌丰度

高粱田中丰度最高的捕食性天敌类群为蜘蛛，且在高粱发育期内种群数量呈持续增加趋势；其次是瓢虫，在高粱发育早期密度最高；再

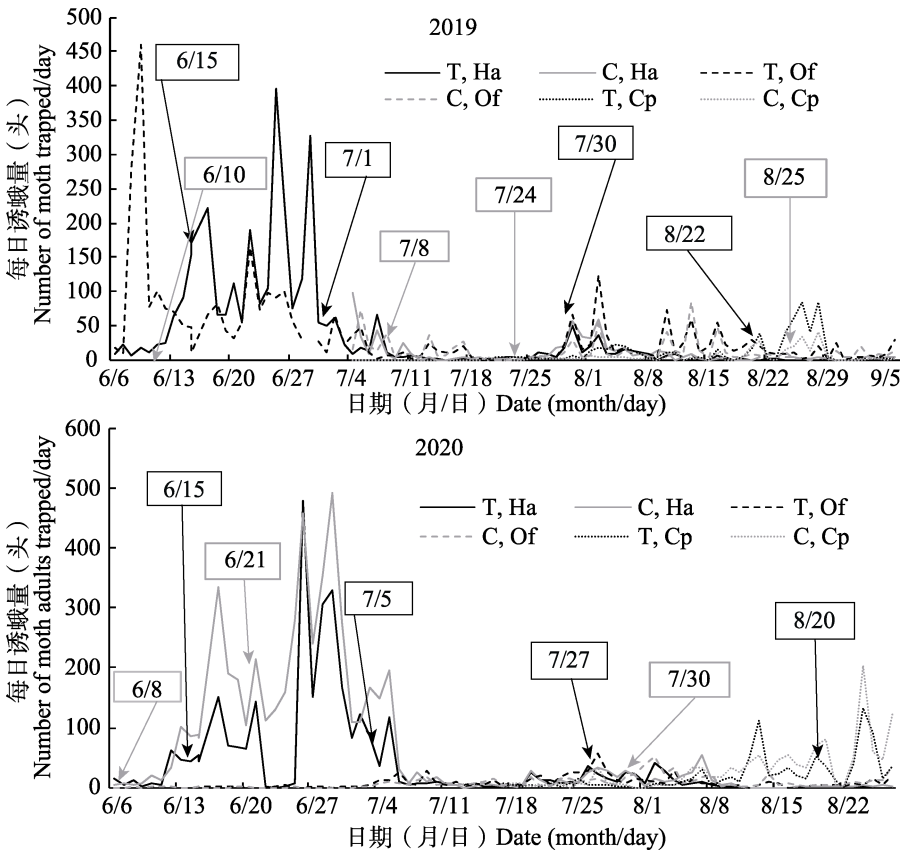

图 1　2019 和 2020 年鳞翅目成虫的种群动态变化

Fig. 1　Population dynamics of lepidopteran adults in 2019 and 2020

黑色文本框为赤眼蜂防治的施用日期；灰色文本框为化学杀虫剂的施用日期。

T：松毛虫赤眼蜂防治；　C：化学防治；Ha：棉铃虫；Of：亚洲玉米螟；Cp：桃蛀螟。

Black text box is the date of *Trichogramma dendrolimi* releasing; Gray text box is the date of chemical insecticide spraying.

T: *T. dendrolimi* control; C: Chemical control; Ha: *Helicoverpa armigera*; Of: *Ostrinia furnacalis*; Cp: *Conogethes punctiferalis*.

次之为草蛉。2019 年（t=6.838，df=12，P<0.001）和 2020 年（t=8.307，df=10，P<0.001）赤眼蜂防治田中的捕食性天敌总量均显著高于化学防治田（图 3）。

2.4　高粱产量及成本效益分析

2019 年，赤眼蜂防治田和化学防治田每公顷平均高粱产量差异不显著（t=0.075，df=4，P=0.944）；2020 年，赤眼蜂防治田的每公顷平均产量显著高于化学防治田（t=3.036，df=4，P=0.039）（表 2）。2019 年，与化学防治相比，赤眼蜂防治的成本降低 240 元/hm^2；2020 年，因取消了最后一次化学防治，致使化学防治成本比赤眼蜂防治成本低 60 元/hm^2。从差额净收入来看，赤眼蜂防治的收益在 2019 年比化学防治的提高了 305.47 元/hm^2，在 2020 年比化学防治的提高了 3 644.05 元/hm^2（19.90%）。从年度总净收入来看，赤眼蜂防治田 2020 年比 2019 年增加 5 693.09 元/hm^2，化学防治田 2020 年比 2019 年增加 2 354.51 元/hm^2（表 2）。

3　讨论

冀酿 2 号是河北省农林科学院谷子研究所育成的抗蚜高粱品种，整个生育期不需要防治高粱蚜虫。在高粱生长后期，特别是穗期易受高粱钻心虫（棉铃虫、玉米螟及桃蛀螟等鳞翅目害虫）的为害，不仅导致高粱减产、品质降低，而且由于此时植株较高，人工和常规器械难于喷施农药进行防治。利用性信息素监测和赤眼蜂淹没式释

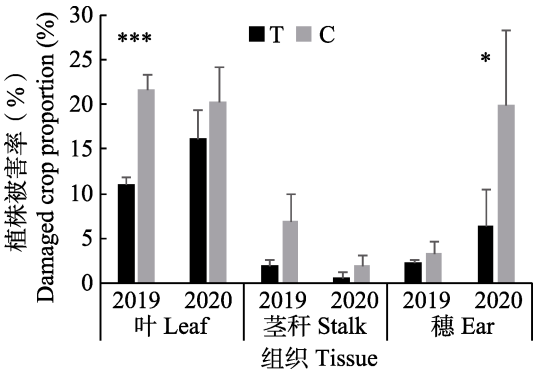

图 2 高粱叶片、茎秆及穗部被害率

Fig. 2 Proportion of sorghum plants with damage on leaves, stalks and ears

T：松毛虫赤眼蜂防治；C：化学防治。误差线为标准误。*表示松毛虫赤眼蜂防治与化学防治间差异显著（$P<0.05$，配对 *t*-检验）；***表示松毛虫赤眼蜂防治与化学防治间差异极显著（$P<0.001$，配对 *t*-检验）。下图同。

T: *Trichogramma dendrolimi* control; C: Chemical control. Bars represent standard errors. * indicates significant differences between *T. dendrolimi* and chemical control ($P<0.05$, paired *t*-test); *** indicates extremely significant differences between *T. dendrolimi* and chemical control ($P<0.001$, paired *t*-test). The same as below.

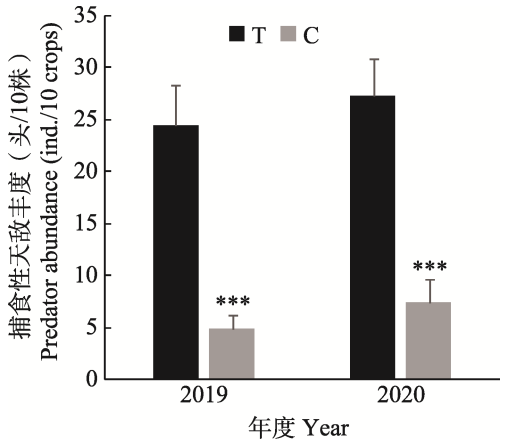

图 3 松毛虫赤眼蜂防治田和化学防治田中捕食性天敌的丰度

Fig. 3 Abundance of naturally occurring predatory enemies in *Trichogramma dendrolimi* controlled and chemical controlled fields

放的技术组合防治高粱钻心虫，填补了冀酿 2 号高粱品种抗蚜不抗钻心虫的短板，从而实现高粱整个生育期全程不施用化学农药，生产出无化学农残的高品质高粱。

表 2 松毛虫赤眼蜂防治与化学防治的成本收益的比较

Table 2 Cost-benefit comparison between *Trichogramma dendrolimi* and chemical control

参数 Parameters	年份 Year	松毛虫赤眼蜂 *T. dendrolimi*	化学杀虫剂 Chemical insecticides
谷粒产量（kg/hm^2）Grain yields (kg/hm^2)	2019	10 177.33 ± 203.61	10 146.00 ± 698.05
	2020*	8 445.00 ± 670.28	7 052.50 ± 426.53
谷粒收入（元/hm^2）Grain income (yuan/hm^2)	2019	21 270.61	21 205.14
	2020	22 463.70	18 759.65
害虫防治成本（元/hm^2）Pest control cost (yuan/hm^2)	2019	510.00	750.00
	2020	510.00	450.00
差额净收入（元/hm^2）[a] Differential net income (yuan/hm^2)[a]	2019	20 760.61	20 455.14
	2020	21 953.70	18 309.65
总净收入（元/hm^2）[b] Total net income (yuan/hm^2)[b]	2019	24 075.61	23 770.14
	2020	29 768.70	26 124.65

a：谷粒收入-害虫防治成本；b：差额净收入+固定净收入；*表示松毛虫赤眼蜂防治与化学防治间差异显著（$P<0.05$，独立 *t*-检验）。

a: Grain income subtracted from the pest control cost; b: Differential net income supplemented with settled net income; * indicates significant differences between *T. dendrolimi* and chemical control ($P<0.05$, independent *t*-test).

调查田间害虫卵寄生率对评估防治效果具有重要意义。本研究调查发现，在表面积相对较大的高粱植株上寻找数量很少的鳞翅目害虫卵粒或卵块非常困难，工作量很大，特别是桃蛀螟的卵产在高粱穗上，更不易被发现。在赤眼蜂防治的高粱田中，害虫卵的收集更加困难，可能是生物防治田中捕食性天敌丰度较高（平均 2.6 只/株），捕食效应导致的结果。因此，调查获得的

卵寄生率数据难以满足统计学分析的要求，转而以植株被害率评估防治效果。本研究结果表明，化学防治的高粱田中鳞翅目害虫对高粱叶片（2019 年）和高粱穗部（2020 年）的植株被害率都显著高于赤眼蜂防治的高粱田，这表明赤眼蜂的防效要好于化学防治。但需要注意的是化学杀虫剂的喷施更多地受到天气条件如雨水的限制。如 2020 年，因连续的下雨而推迟甚至取消农药的喷施从而延误或错失害虫防治的时机。这可能是造成 2020 年化学防治田高粱穗部植株被害率增加的一个原因。因此，化学防治的杀虫效果可能会比赤眼蜂防治受雨水的不利影响更大。另外，在作物的某些特定生育阶段，如花期，由于农药的喷施会对授粉产生不利影响，不适合化学杀虫剂的使用。因此，赤眼蜂防治是一种更为可靠且有效的高粱害虫防治的手段。

2019 年，采用化学防治和赤眼蜂防治的高粱田每公顷产量差异不显著，但 2020 年赤眼蜂防治的高粱田每公顷产量显著高于化学防治的。综合植株被害率的结果分析，叶部受损对高粱产量的影响不大，而穗部受损对高粱产量构成极大威胁。因此，在作物生长后期害虫防治要引起高度重视。2020 年，由于适逢拔节期干旱和授粉期大雨，衡水地区 2020 年单产均较 2019 年普遍大幅下降，但因收购价格和政府旱作补贴均较高，总净收入反而高于 2019 年。就害虫防治成本而言，一般情况下，松毛虫赤眼蜂释放与化学杀虫剂的使用相比具有优势，这受益于高效的松毛虫赤眼蜂产业化生产技术（Zang *et al.*，2021）和在虫情监测下的精准人工释放，使得松毛虫赤眼蜂的产品和施用价格都更低廉。如果将进行防治的人工成本计入总防治成本，那么投放赤眼蜂卵卡所耗费的工作强度和时间均远低于化学杀虫剂喷施，这将进一步凸显赤眼蜂防治的成本优势。两年的成本效益分析表明，赤眼蜂是控制高粱多种鳞翅目害虫的一种有效、经济的方法。

利用寄生蜂控制害虫可以很好地维持农田生态系统，保护农田生物多样性，有助于充分发挥健康生态系统的多功能性和稳定性，实现农业生产的可持续性发展（Balvanera *et al.*，2006；Moonen and Barberi，2008；Wyss and Pfiffner，2008；Cardinale *et al.*，2012）。增加生物多样性，特别是保护和提高天敌的丰度，有利于利用田间自然控制因素控制多种害虫的发生和为害，可在维持农田生态系统的平衡和促进生产力方面发挥重要作用（Birkhofer *et al.*，2008）。在本研究中，释放赤眼蜂对田间自然发生的天敌提供了良好的保育作用，使得田间天敌的数量远远高于化学防治田，对田间害虫可以起到补充防治的效果。因此，除直接经济效益外，赤眼蜂防治还创造了可观的生态效益。

综上所述，与施用化学杀虫剂相比，释放松毛虫赤眼蜂能够更有效地控制高粱作物上多种鳞翅目害虫的为害，降低害虫防治成本，提高产量和农民收入。除了对农田生态系统和人类健康有益外，松毛虫赤眼蜂释放也是一种更经济、有效、可靠并极具竞争力的害虫防治方案，为高粱产业提供了一种可替代化学农药的可持续的生物防治策略。经过连年的试验示范，赤眼蜂防治产生的较高差额净收入，加上较低的劳动力成本和劳动强度，激发了当地农民采用这种生物防治方法的积极性，赤眼蜂防治面积在衡水地区逐年大幅度提高。因市场和实际收购体系的复杂原因，当前生产的无化学农残高粱还没有实现优质优价，相信通过市场宣传和运作，基于抗性品种和生物防治生产的无农药高粱产品将能够获得更大的经济、生态和社会效益。

参考文献 (References)

Babendreier D, Hou M, Tang R, Zhang F, Vongsabouth T, Win KK, Kang M, Peng H, Song K, Annamalai S, Horgan FG, 2020. Biological control of lepidopteran pests in rice: A multi-nation case study from Asia. *J. Integr. Pest Manag.*, 11(1): 1–11.

Balvanera P, Pfisterer AB, Buchmann N, He JS, Nakashizuka T, Raffaelli D, Schmid B, 2006. Quantifying the evidence for biodiversity effects on ecosystem functioning and services. *Ecol. Lett.*, 9(10): 1146–1156.

Birkhofer K, Bezemer MT, Bloem J, Bonkowski M, Christensen S, Dubois D, Ekelund F, Fliessbach A, Gunst L, Hedlund K, Maeder P, Mikola J, Robin C, Setala H, Tatin-Froux F, Van Der Putten WH, Scheu S, 2008. Long-term organic farming fosters below and aboveground biota: implications for soil quality, biological control and productivity. *Soil Biol. Biochem.*, 40(9):

2297–2308.

Cardinale BJ, Duffy JE, Gonzalez A, Hooper DU, Perrings C, Venail P, Narwani A, Mace GM, Tilman D, Wardle DA, Kinzig AP, Daily GC, Loreau M, Grace JB, Larigauderie A, Srivastava DS, Naeem S, 2012. Biodiversity loss and its impact on humanity. *Nature*, 486(7401): 59–67.

Chen DF, 2019. Investigation of the types of pests and the green control technology of main pests of wine-making sorghum in Jinsha county. Master dissertation. Guiyang: Guizhou University. [陈德飞, 2019. 金沙县酒用高粱害虫种类调查及主要害虫绿色防控技术研究. 硕士学位论文. 贵阳: 贵州大学.]

Chen WB, He KL, Wang QY, Wang ZY, 2019. Oviposition preference of different *Trichogramma* strains for eggs of *Conogethes punctiferalis* (Guenée). *Chin. J. Biol. Control.*, 35(2): 167–172. [陈万斌, 何康来, 王勤英, 王振营, 2019. 不同品系赤眼蜂对桃蛀螟卵的寄生选择性. 中国生物防治学报, 35(2): 167–172.]

Colliera T, van Steenwyk R, 2004. A critical evaluation of augmentative biological control. *Biol. Control*, 31(2): 245–256.

Figueiredo MDC, Cruz I, da Silva RB, Foste JE, 2015. Biological control with *Trichogramma pretiosum* increases organic maize productivity by 19.4%. *Agron. Sustain. Dev.*, 35(3): 1175–1183.

Gagnon AÈ, Audette C, Duval B, Boisclair J, 2017. Can the use of *Trichogramma ostriniae* (Hymenoptera: Trichogrammatidae) to control *Ostrinia nubilalis* (Lepidoptera: Crambidae) be economically sustainable for processing sweet corn? *J. Econ. Entomol.*, 110(1): 59–66.

Gardner J, Hoffmann MP, Cheever SA, Seaman AJ, Westgate P, Hazzard RV, 2007. Large-scale releases of *Trichogramma ostriniae* to suppress *Ostrinia nubilalis* in commercially grown processing and fresh market sweet corn. *J. Appl. Entomol.*, 131(6): 432–440.

Liu SS, Zhang GM, Zhang F, 1998. Factors influencing parasitism of *Trichogramma dendrolimi* on eggs of the Asian corn borer. *Biocontrol*, 43(3): 273–287.

Moonen A, Barberi P, 2008. Functional biodiversity: An agroecosystem approach. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 127(1/2): 7–21.

Oluwafemi AA, 2020. African sorghum-based fermented foods: Past, current and future prospects. *Nutrients*, 12(4): 1111.

Philip MM, Orr DB, Hain FP, 2005. Evaluation of biological and biorational control tactics for suppression of Nantucket pine tip moth damage in Virginia pine Christmas trees. *J. Econ. Entomol.*, 98(2): 409–414.

Razinger J, Vasileiadis VP, Giraud M, van Dijk W, Modic Š, Sattin M, Urek G, 2016. On-farm evaluation of inundative biological control of *Ostrinia nubilalis* (Lepidoptera: Crambidae) by *Trichogramma brassicae* (Hymenoptera: Trichogrammatidae) in three European maize-producing regions. *Pest Manag. Sci.*, 72(2): 246–254.

Sharma S, Shera PS, Sangha KS, 2018. Impact of bio-intensive integrated pest management practices on insect pests and grain yield in basmati rice. *J. Biol. Control*, 32(2): 137–141.

Sherif MR, Hendawy AS, El-Habashy MM, 2008. Utilization of *Trichogramma evanescens* (Ashmead) for controlling rice stem borer, *Chilo agamemnon* Bles., in rice fields in Egypt. *Egypt J. Biol. Pest Control*, 18(1): 11–16.

Smith SM, 1996. Biological control with *Trichogramma*: Advances, successes, and potential of their use. *Annu. Rev. Entomol.*, 41: 375–406.

Tang R, Babendreier D, Zhang F, Kang M, Song K, Hou ML, 2017. Assessment of *Trichogramma japonicum* and *T. chilonis* as potential biological control agents of yellow stem borer in rice. *Insects*, 8(1): 19.

Tian ZL, Tan YF, Sun GZ, Ruan CC, Mao G, Zhao Y, Wang YS, Lu X, 2008. Key factors influencing the control effect of *Trichogramma dendrolimi* Matsumura against *Ostrinia Furnacalis* Guenée. *J. Jilin Agr. Sci.*, 33(6): 67–69, 78. [田志来, 谭云峰, 孙光芝, 阮长春, 毛刚, 赵宇, 王义山, 鲁新, 2008. 影响松毛虫赤眼蜂防螟效果的主要因素. 吉林农业科学, 33(6): 67–69, 78.]

Wang FC, Zhang SY, Hou SR, 1985. Inoculative release of *Trichogramma dendrolimi* in vegetable gardens to regulate populations of cotton pests. *Chin. J. Biol. Control*, 1(4): 2–7. [王辅成, 张梳仪, 侯守让, 1985. 菜园释放松毛虫赤眼蜂控制棉花害虫种群的研究. 生物防治通报, 1(4): 2–7.]

Wang ZY, He KL, Zhang F, Lu X, Babendreier D, 2014. Mass rearing and release of *Trichogramma* for biological control of insect pests of corn in China. *Biol. Control*, 68: 136–144.

Wyss E, Pfiffner L, 2008. Biodiversity in organic horticulture-an indicator for sustainability and a tool for pest management. *Acta Hortic.*, 767(6): 75–80.

Yu JY, Zhou YF, Yu QL, Qi HX, He ZD, 2009. Population dynamic of *Ostrinia furnacalis* and biological control on the pests by releasing *Trichogramma dendrolimi* in the corn fields. *Chin. Agr. Sci. Bull.*, 25(24): 344–351. [余金咏, 周印富, 于泉林, 齐慧霞, 贺子典, 2009. 亚洲玉米螟发生动态及释放松毛虫赤眼蜂防治效果. 中国农学通报, 25(24): 344–351.]

Zang LS, Wang S, Zhang F, Desneux N, 2021. Biological control with *Trichogramma* in China: History, present status and perspectives. *Annu. Rev. Entomol.*, 66: 463–484.

Zhang J, Wang JL, Yang CC, Zhang F, Xu GM, 1990. Field experiments on the release rate of *Trichogramma dendrolimi* (Hym.: Trichogrammatidae) for controlling Asian corn borer in Liaoning. *Chin. J. Biol. Control*, 6(3): 107–109. [张荆, 王金玲, 杨长成, 张凤, 许广民, 1990. 应用赤眼蜂防治玉米螟的放蜂量试验. 生物防治通报, 6(3): 107–109.]

Zou JQ, Wang YQ, Ke FL, 2020. Development status and prospect of sorghum industry in China. *J. Shanxi Agric. Univ.*, 40(3): 2–8. [邹剑秋, 王艳秋, 柯福来, 2020. 高粱产业发展现状及前景展望. 山西农业大学学报(自然科学版), 40(3): 2–8.]