

四川省稻区越冬代二化螟寄生蜂资源研究*

蒲建^{1**} 李明阳^{1**} 王浩¹ 张林¹ 贡常委¹
张韞政¹ 马帅¹ 徐翔² 王学贵^{1***}

(1. 四川农业大学农学院, 成都 611130; 2. 四川省农业农村厅植物保护站, 成都 610041)

摘要 【目的】二化螟 *Chilo suppressalis* 是水稻生产中重要的钻蛀性害虫, 利用寄生蜂进行生物防治是控制二化螟的重要方法。本研究旨在明确四川稻区越冬代二化螟寄生蜂的种类和寄生情况, 为寄生蜂资源在该地区的有效利用提供科学依据。【方法】2019-2023 年每年 2-4 月, 在四川省 6 个主要稻区 (通江、达川、兴文、合江、崇州和仁寿) 采集越冬代二化螟, 记录寄生蜂的种类和寄生率, 克隆寄生蜂 28S rDNA 序列进行分子鉴定, 以 10% 蜂蜜水作为食物测定成虫寿命。【结果】四川省 6 个主要稻区越冬代二化螟寄生蜂共 7 种, 分别为螟甲腹茧蜂 *Chelonus munakatae*、稻螟小腹茧蜂 *Microgaster russata*、中华茧蜂 *Amyosoma chinensis*、螟黄足盘绒茧蜂 *Cotesia flavipes*、大螟钝唇姬蜂 *Eriborus terebrans*、夹色奥姬蜂 *Auberteterus alternecoloratus* 和绒茧灿金小蜂 *Trichomalopsis apanteloctena*。分子鉴定获得 7 种寄生蜂的 28S rDNA D2 区序列, 系统发育分析显示各寄生蜂均与同科种类聚类在相同分支。2019-2023 年越冬代二化螟的被寄生率分别为 6.28%-11.78%、0.81%-5.50%、0.88%-14.34%、2.34%-16.60% 和 3.47%-18.07%。螟甲腹茧蜂对越冬代二化螟的寄生率最大, 其次为螟黄足盘绒茧蜂、大螟钝唇姬蜂和稻螟小腹茧蜂, 这 4 种寄生蜂在 6 个主要稻区分布普遍。夹色奥姬蜂、螟甲腹茧蜂、大螟钝唇姬蜂、稻螟小腹茧蜂和螟黄足盘绒茧蜂的成虫寿命分别为 18.20、7.89、6.10、5.69 和 2.74 d。【结论】四川稻区越冬代二化螟寄生蜂种类丰富, 利用寄生蜂防控水稻二化螟具有较大的应用潜力。

关键词 二化螟; 寄生蜂; 28S rDNA; 寄生率; 成虫寿命

Parasitoids of the overwintering population of *Chilo suppressalis* in Sichuan Province

PU Jian^{1**} LI Ming-Yang^{1**} WANG Hao¹ ZHANG Lin¹ GONG Chang-Wei¹
ZHANG Yun-Zheng¹ MA Shuai¹ XU Xiang² WANG Xue-Gui^{1***}

(1. College of Agriculture, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China; 2. Plant Protection Station, Sichuan Provincial Department of Agriculture and Rural Affairs, Chengdu 610041, China)

Abstract 【Aim】To clarify the parasitoid species and parasitic status of the overwintering population of the rice stem borer (*Chilo suppressalis*) in Sichuan, thereby providing a foundation for the utilization of parasitoids as agents of biological control for this pest. 【Methods】Specimens of the overwintering population of *C. suppressalis* were collected from 6 sites in Sichuan from February to April each year between 2019 and 2023. Parasitoid species were identified by morphology and 28S rDNA sequences. The parasitism rate was also recorded. Adult longevity of parasitoids was determined using honey water as a food source. 【Results】Seven species of parasitoids of the overwintering population of *C. suppressalis* were identified, including *Chelonus munakatae*, *Microgaster russata*, *Amyosoma chinensis*, *Cotesia flavipes*, *Eriborus terebrans*, *Auberteterus alternecoloratus* and *Trichomalopsis apanteloctena*. Sequences of the 28S rDNA D2 region of 7 species were obtained. A

*资助项目 Supported projects: 四川省科技计划项目 (2022YFN0044); 四川省自然科学基金项目 (2023NSFSC0153)

**共同第一作者 Co-first authors, E-mail: 15150533923@163.com; 263668301@qq.com

***通讯作者 Corresponding author, E-mail: wangxuegui@sicau.edu.cn

收稿日期 Received: 2023-09-28; 接受日期 Accepted: 2024-03-06

phylogenetic tree based on 28S D2 variation indicates that every parasitoid clustered with species in the same family. Parasitism rates of the overwintering population for each year between 2019 and 2023 were 6.28%-11.78%, 0.81%-5.50%, 0.88%-14.34%, 2.34%-16.60% and 3.47%-18.07%. *C. munakatae* was the most common parasite followed by *E. terebrans*, *C. flavipes* and *M. russata*. These four species are widely distributed in Sichuan Province. Average lifespans of *A. alternicoloratus*, *C. munakatae*, *E. terebrans*, *M. russata* and *C. flavipes* were 18.20, 7.89, 6.10, 5.69 and 2.74 days, respectively. **[Conclusion]** An abundance of parasitoids parasitize the overwintering population of *C. suppressalis* in rice fields of Sichuan. There is consequently considerable potential for using parasitoids to improve the management of *C. suppressalis* in Sichuan Province.

Key words *Chilo suppressalis*; parasitoids; 28S rDNA; parasitism rate; adult longevity

寄生蜂是农田生态系统中重要的天敌昆虫，在害虫生物防治中发挥着关键作用 (Boivin *et al.*, 2012; Naranjo *et al.*, 2015; Woolley *et al.*, 2022)。利用寄生蜂等天敌进行害虫生物防治具有减少化学农药使用、有效控制虫害和保护生态环境等优点，对国家生态文明建设具有重要意义 (Rocca and Messelink, 2017; 杨忠岐等, 2018; 时敏等, 2020; Li *et al.*, 2022)。我国寄生蜂种类丰富，目前已发现超过 5 500 个物种，分别属于膜翅目 12 个总科中的 48 个科 (Wang *et al.*, 2019)。农业上一些重要害虫寄生蜂的多样性已有较多研究，如发现小菜蛾 *Plutella xylostella* 寄生蜂有 109 种、斜纹夜蛾 *Spodoptera litura* 寄生蜂有 40 种、烟粉虱 *Bemisia tabaci* 寄生蜂有 74 种，以及美国白蛾 *Hyphantria cunea* 寄生蜂有 18 种 (陈宗麒等, 2001; 何俊华等, 2002; Yang *et al.*, 2015)。目前，多种寄生蜂在害虫防控中得到了广泛应用，如短管赤眼蜂 *Trichogramma pretiosum* 用于防治草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda*、玉米螟赤眼蜂 *T. ostriniae* 防治亚洲玉米螟 *Ostrinia furnacalis* 及白蛾周氏啮小蜂 *Chouioia cunea* 防治美国白蛾 (杨忠岐等, 2005; Figueiredo *et al.*, 2015; 太红坤等, 2017; 时敏等, 2020)。对不同农业生态体系中的寄生蜂进行资源调查，挖掘潜在的寄生蜂资源是开展害虫生物防治的重要前提。

二化螟 *Chilo suppressalis* 属鳞翅目 Lepidoptera 草螟科 Crambidae，是我国水稻生产中重要的钻蛀性害虫，对水稻产量和品质造成严重影响。在二化螟发生严重地区，水稻可减产 10%-30% (刘牛等, 2001; Li *et al.*, 2022)。目

前，二化螟的防治仍以化学药剂为主，但抗药性问题日益突出 (黄孝龙等, 2018)。随着农业技术的发展，利用天敌进行生物防治越来越受到重视。二化螟的寄生性天敌有 2 目 10 科 55 种，其中寄生蜂有 1 目 8 科 49 种，分别隶属赤眼蜂科 Trichogrammatidae、姬蜂科 Ichneumonidae、茧蜂科 Braconidae 和小蜂科 Chalcididae 等 (何俊华, 1984; 蒋明星等, 2000; 陈华才等, 2002; 黄孝龙等, 2018)。据报道，江苏扬州二化螟寄生蜂主要有 10 种，其中二化螟盘绒茧蜂 *Cotesia chilonis* 和中华钝唇姬蜂 *Eriborus sinicus* 为越冬代二化螟幼虫的优势寄生蜂 (潘丹丹等, 2016)。吉林省二化螟寄生蜂多为赤眼蜂，包括螟黄赤眼蜂 *T. chilonis*、稻螟赤眼蜂 *T. japonicum*、松毛虫赤眼蜂 *T. dendrolimi* 和玉米螟赤眼蜂 (郭震, 2011)。在贵州省黔中地区，越冬代二化螟寄生蜂有 5 种，包括稻螟小腹茧蜂 *Microgaster russata*、螟甲腹茧蜂 *Chelonus munakatae*、大螟钝唇姬蜂 *E. terebrans*、菲岛抱缘姬蜂 *Temelucha philippinensis* 和黄眶离缘姬蜂 *Trathala flavoorbitalis* (戴长庚等, 2016)。目前关于四川稻区二化螟寄生蜂种类的调查报道较少，余刚和何荣蓉 (1988) 首次调查了成都平原二化螟寄生性天敌，于文娟等 (2021) 再次对越冬代二化螟寄生性天敌展开调查，发现四川稻区越冬代二化螟寄生蜂共有 10 种，寄生率为 1.1%-11.7%。

本研究对四川省 6 个主要稻区越冬代二化螟寄生蜂进行了 5 年的跟踪调查，分析了寄生蜂的组成、动态变化和成虫寿命，以期在农药减量施用背景下为当地二化螟寄生蜂资源的挖掘和生物防治技术的发展提供科学基础。

1 材料与方法

1.1 四川省 6 个主要稻区越冬代二化螟的采集

于 2019-2023 年的 2-4 月, 在四川省 6 个主要稻区的水稻田内采集越冬代二化螟幼虫, 采集地点分别位于四川东部的通江和达川、川西南部的兴文和合江, 以及成都平原的崇州和仁寿(表 1)。

1.2 越冬代二化螟寄生蜂调查统计

将田间采集的越冬代二化螟幼虫带回实验室后, 把 5-7 龄幼虫单头放置于无菌塑料管(长 10 cm, 直径 1 cm)中, 塑料管两端用脱脂棉封口, 每 30 个塑料管扎成一捆, 并竖直放在装有少量蒸馏水的干净塑料盆内, 待二化螟化蛹或寄生蜂茧出现; 5 龄以下幼虫置于塑料杯(高 12.5 cm, 直径 9.8 cm)内, 用稻苗继续饲养(尚稚珍等, 1979), 出现寄生蜂茧时立即用镊子和小毛刷轻轻挑出, 接入无菌塑料管中。试验条件为温度 28 ℃, 相对湿度 75%, 光周期 16 L : 8 D。寄生蜂羽化后依据《浙江蜂类志》(何俊华, 2004)和《四川农业害虫天敌图册》(朱文炳, 1990)进行形态学鉴定。详细记录采集的二化螟幼虫总数、被寄生数及寄生蜂的种类和数量。

1.3 寄生蜂分子鉴定

每种寄生蜂随机挑取 3 头雌成虫用于分子鉴定, 使用 HiPure Insect DNA Kits (迈跟生物科技有限公司, 上海)试剂盒提取单头寄生蜂的 DNA, 对 28S rDNA D2 区进行 PCR 扩增(上游引物 5'-AGAGAGAGTTCAAGAGTACGTG-3', 下游引物 5'-TTGTGCCGTGTTTCAAGACGGG-3')。反应体系为 50 μL: 2 Phanta Max Buffer 25 μL, dNTP Mix (10 mmol·L⁻¹) 1 μL, 上下游引物各 2 μL (10 μmol·L⁻¹), 模板 DNA 2 μL, Phanta Max Super-Fidelity DNA Polymerase (南京诺唯赞生物科技股份有限公司, 江苏) 1 μL, 加去离子水至 50 μL。扩增条件为 95 ℃ 预变性 3 min; 95 ℃ 15 s, 55 ℃ 15 s, 72 ℃ 30 s, 35 个循环; 最后 72 ℃ 5 min。将 PCR 产物进行 1.2% 琼脂糖

凝胶电泳检测后送北京擎科生物科技股份有限公司测序。

1.4 寄生蜂成虫室内饲养

研究表明槐花蜂蜜水可以显著延长寄生蜂成虫寿命(郑许松等, 2003; 李秋雨, 2020)。因此, 本研究以槐花蜂蜜水作为寄生蜂成虫食物来源。将初羽化的寄生蜂单头放入无菌塑料管(10 cm × 1 cm)中, 两端用脱脂棉封口, 其中一端脱脂棉滴加 10% 槐花蜂蜜(冠生园食品, 上海)水供成虫取食, 每 2 d 更换含有蜂蜜水的脱脂棉, 每隔 12 h 观察记录寄生蜂的死亡情况, 直至全部死亡。试验条件为温度 28 ℃, 相对湿度 75%, 光周期 16 L : 8 D。

1.5 数据分析

利用 DNAMAN 9.0 软件对获得的序列进行拼接, 在 NCBI 中使用 BLAST 比对序列, 确定获得序列的准确性。通过软件 MEGA 7.0 构建 28S rDNA 序列的系统发育树, 采用最大似然法, 进行 1 000 次重复检验, 使用膜翅目昆虫红火蚁 *Solenopsis invicta* 作为外群。使用 TBtools 软件的 HeatMap 对不同地区不同寄生蜂物种的寄生率进行聚类热图分析。使用 SPSS 18.0 和 R 4.1 对不同时间、不同稻区和不同种类寄生蜂的寄生率进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 四川省 6 个主要稻区越冬代二化螟的寄生蜂种类和分子鉴定

通过对四川省 6 个水稻主产区越冬代二化螟寄生蜂连续 5 年的调查, 共发现 7 种寄生蜂, 形态鉴定分别为螟甲腹茧蜂、稻螟小腹茧蜂、中华茧蜂 *Amyosoma chinensis*、螟黄足盘绒茧蜂 *Cotesia flavipes*、大螟钝唇姬蜂、夹色奥姬蜂 *Auberteterus alternecoloratus* 和绒茧灿金小蜂 *Trichomalopsis apanteloctena* (图 1: A-G)。其中, 螟甲腹茧蜂、稻螟小腹茧蜂、中华茧蜂和螟黄足盘绒茧蜂属于茧蜂科, 大螟钝唇姬蜂和夹色奥姬

表 1 四川省 6 个主要稻区越冬代二化螟寄生蜂的寄生率
Table 1 Parasitism rate of parasitoids to the overwintering *Chilo suppressalis* in 6 rice planting sites of Sichuan Province

年份 Year	采集地点 Location site	二化螟幼虫 数量 (头) Number of <i>C. suppressali</i> larvae (ind.)	寄生蜂数量 (头) Number of parasitoids (ind.)							寄生蜂总 数 (头) Number of parasitoids (ind.)	寄生率 (%) Parasitism rate (%)
			螟甲腹茧蜂 <i>C. munakatae</i>	稻螟小腹茧蜂 <i>M. russata</i>	大螟钝唇姬蜂 <i>E. terebrans</i>	夹色奥姬蜂 <i>A. altern- ecoloratus</i>	中华茧蜂 <i>A. chinensis</i>	蜚黄足盘 绒茧蜂 <i>C. flavipes</i>	绒茧灿金小峰 <i>T. apante- loctena</i>		
2019	崇州 Chongzhou (30°57' N, 103°66' E)	406	18	13	—	—	—	—	—	31	7.64
	仁寿 Renshou (30°04' N, 104°19' E)	297	34	1	—	—	—	—	—	35	11.78
	兴文 Xingwen (28°17' N, 105°31' E)	302	18	—	5	—	—	—	—	23	7.62
	合江 Hejiang (28°83' N, 105°87' E)	430	27	—	—	—	—	—	—	27	6.28
2020	通江 Tongjiang (31°87' N, 107°28' E)	338	24	1	11	—	—	—	—	36	10.65
	达川 Dachuan (31°10' N, 107°25' E)	416	4	3	20	—	—	—	—	27	6.49
	崇州 Chongzhou (30°57' N, 103°66' E)	685	15	5	7	—	2	1	—	30	4.38
	兴文 Xingwen (28°17' N, 105°31' E)	109	—	—	—	—	—	—	6	6	5.50
	合江 Hejiang (28°83' N, 105°87' E)	417	8	—	2	—	—	—	—	10	2.40
	通江 Tongjiang (31°87' N, 107°28' E)	246	2	—	—	—	—	—	—	2	0.81
	达川 Dachuan (31°10' N, 107°25' E)	452	7	—	—	2	—	—	—	9	1.99

续表 1 (Table 1 continued)

年份 Year	采集地点 Location site	二化螟幼虫 数量 (头) Number of <i>C. suppressali</i> larvae (ind.)	寄生蜂数量 (头) Number of parasitoids (ind.)							寄生蜂总 数 (头) Number of parasitoids (ind.)	寄生率 (%) Parasitism rate (%)
			螟甲腹茧蜂 <i>C. munakatae</i>	稻螟小腹茧蜂 <i>M. russata</i>	大螟钝唇姬蜂 <i>E. terebrans</i>	夹色奥姬蜂 <i>A. altern- ecoloratus</i>	中华茧蜂 <i>A. chinensis</i>	绒茧蜂 <i>C. flavipes</i>	绒茧如金小蜂 <i>T. apante- loctena</i>		
2021	崇州 Chongzhou (30°57' N, 103°66' E)	1 088	1	68	21	—	—	3	—	93	8.55
	仁寿 Renshou (30°04' N, 104°19' E)	250	8	5	4	—	—	1	—	18	7.20
	兴文 Xingwen (28°17' N, 105°31' E)	113	6	—	1	—	—	—	—	7	6.19
	合江 Hejiang (N28°83' N, 105°87' E)	286	30	—	9	—	—	2	—	41	14.34
	通江 Tongjiang (31°87' N, 107°28' E)	240	2	—	10	—	—	2	—	14	5.83
	达川 Dachuan (31°10' N, 107°25' E)	340	—	—	—	3	—	—	—	3	0.88
	崇州 Chongzhou (30°57' N, 103°66' E)	2 300	16	163	79	—	—	46	—	304	13.22
	仁寿 Renshou (30°04' N, 104°19' E)	153	8	5	4	—	—	1	—	18	11.76
2022	兴文 Xingwen (28°17' N, 105°31' E)	326	6	2	1	—	—	2	—	11	3.37
	合江 Hejiang (28°83' N, 105°87' E)	476	53	3	10	—	—	13	—	79	16.60
	通江 Tongjiang (31°87' N, 107°28' E)	424	2	6	—	—	—	2	—	10	2.36
	达川 Dachuan (31°10' N, 107°25' E)	427	5	—	2	3	—	—	—	10	2.34

续表 1 (Table 1 continued)

年份 Year	采集地点 Location site	二化螟幼虫 数量 (头) Number of <i>C. suppressali</i> larvae (ind.)	寄生蜂数量 (头) Number of parasitoids (ind.)							寄生蜂总 数 (头) Number of parasitoids (ind.)	寄生率 (%) Parasitism rate (%)
			螟甲腹茧蜂 <i>C. munakatae</i>	稻螟小腹茧蜂 <i>M. russata</i>	大螟钝唇姬蜂 <i>E. terebrans</i>	夹色奥姬蜂 <i>A. altern-</i> <i>ecoloratus</i>	中华茧蜂 <i>A. chinensis</i>	螟黄足盘 绒茧蜂 <i>C. flavipes</i>	绒茧灿金小蜂 <i>T. apante-</i> <i>loctena</i>		
2023	崇州 Chongzhou (30°57' N, 103°66' E)	321	1	5	2	—	—	7	—	15	4.67
	仁寿 Renshou (30°04' N, 104°19' E)	675	65	3	4	—	—	50	—	122	18.07
	兴文 Xingwen (28°17' N, 105°31' E)	451	24	0	1	—	—	49	—	74	16.41
	合江 Hejiang (28°83' N, 105°87' E)	600	55	3	3	—	—	42	—	103	17.17
	通江 Tongjiang (31°87' N, 107°28' E)	551	10	1	8	—	—	35	—	54	9.80
	达川 Dachuan (31°10' N, 107°25' E)	720	20	2	—	3	—	—	—	25	3.47

—表示寄生蜂个体数为零。

— indicates that the number of parasitoid individuals is zero.

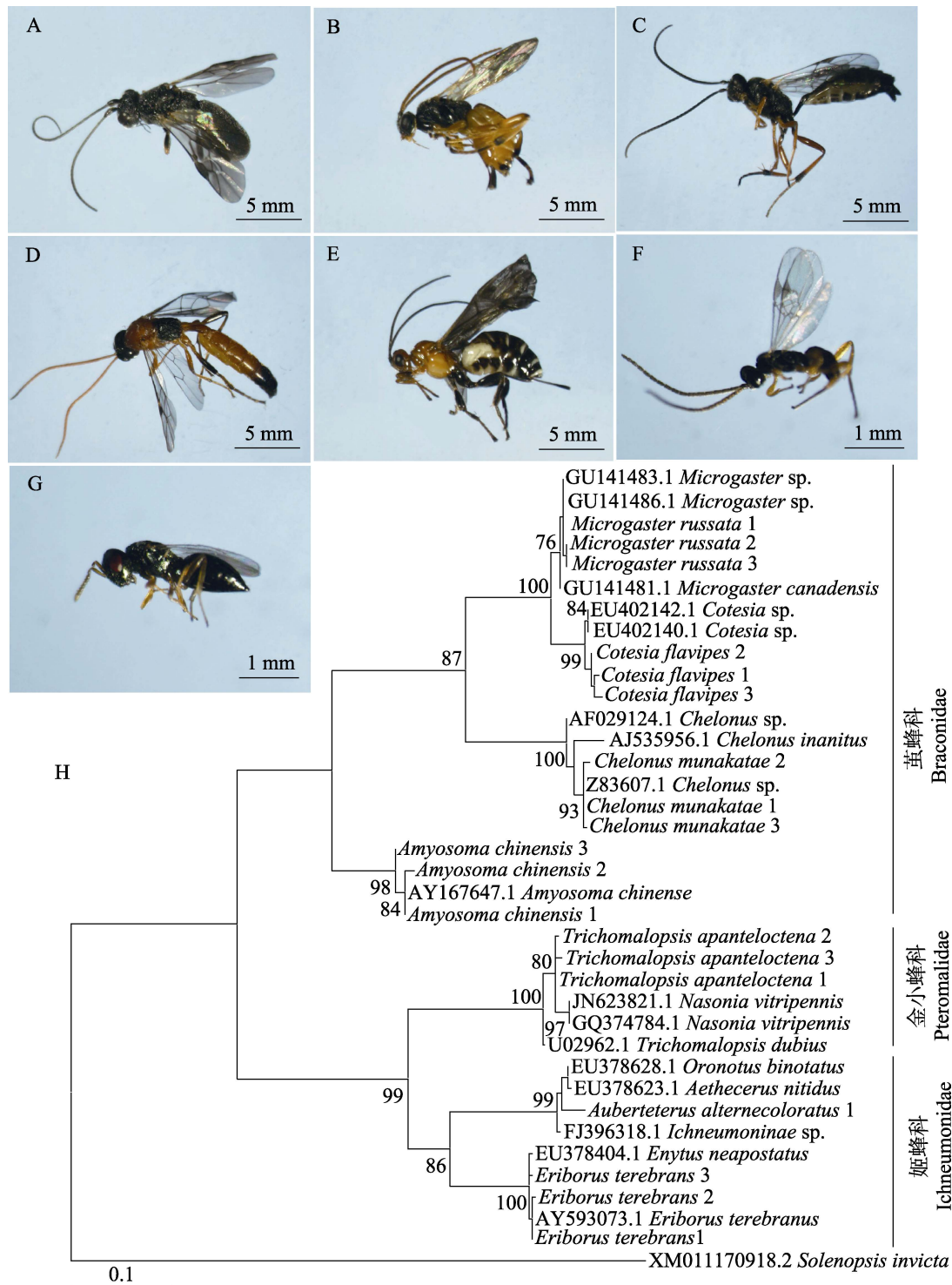


图1 四川省6个主要稻区越冬代二化螟寄生蜂的形态和基于28S D2序列的系统发育树

Fig. 1 Morphology of parasitoids to the overwintering *Chilo suppressalis* from six rice planting sites in Sichuan and phylogenetic tree based on parasitoid 28S D2 region

- A. 螟甲腹茧蜂 *C. munakatae*; B. 稻螟小腹茧蜂 *M. russata*; C. 大螟钝唇姬蜂 *E. terebrans*; D. 夹色奥姬蜂 *A. alternecoloratus*; E. 中华茧蜂 *A. chinensis*; F. 螟黄足盘绒茧蜂 *C. flavipes*; G. 茧灿金小蜂 *T. apantelectena*;
 H. 基于28S D2序列的系统发育树, 采用最大似然法(1 000次重复), 阈值(> 75%)被显示在节点处。
 H. The phylogenetic tree is constructed based on the 28S D2 region of parasitoids, inferred using the maximum likelihood method (with 1 000 replicates). Bootstrap values (> 75%) are shown at the branch points.

蜂属于姬蜂科, 绒茧灿金小蜂属于金小蜂科。除绒茧灿金小蜂是重寄生蜂外, 其他寄生蜂都是原寄生蜂。螟黄足盘绒茧蜂采取聚寄生 (Gregarious parasitism) 方式, 其他寄生蜂为单寄生 (Solitary parasitism)。

根据形态鉴定结果进一步进行分子鉴定, 成功克隆并获得每种寄生蜂 3 头个体的 28S rDNA 序列 (除 1 头夹色奥姬蜂), 经 BLAST 比对, 所有获得的序列为 28S rDNA D2 区序列, 并且同种寄生蜂 3 头个体的基因核苷酸序列一致性 > 99%。中华茧蜂和大螟钝唇姬蜂的序列与 GenBank 数据库中 2 个物种的序列高度同源 (核苷酸一致性 > 99%), 螟甲腹茧蜂、稻螟小腹茧蜂、螟黄足盘绒茧蜂、夹色奥姬蜂和绒茧灿金小蜂的 28S rDNA 序列为首次测序所得, 与近缘物种的核苷酸一致性 > 96%。在数据库 GenBank 中搜索获得序列同源性高的其他种类寄生蜂 28S rDNA 序列, 用于构建系统发育树。结果显示, 不同寄生蜂的序列均与同属或同科的种类聚类到同一分支, 与形态鉴定结果一致 (图 1: H)。

2.2 越冬代二化螟寄生蜂寄生率

在四川省 6 个水稻主产区的越冬代二化螟幼虫上均发现寄生蜂, 对 7 种寄生蜂在 6 个稻区 5 年的平均寄生率进行聚类分析发现, 螟甲腹茧蜂和螟黄足盘绒茧蜂聚为同一类, 寄生率较高且相近, 螟甲腹茧蜂在 6 个稻区都有分布, 螟黄足盘绒茧蜂在除达川外的 5 个稻区分布; 稻螟小腹茧蜂和大螟钝唇姬蜂聚为一类, 在 6 个稻区均有分布; 其他 3 种寄生蜂聚为一类, 分别只在 1 个稻区被发现, 寄生率均较低。四川东部地区通江和达川 2 地的寄生蜂种类和寄生率相近, 聚为一类; 四川南部合江与成都平原仁寿聚为一类, 与四川南部兴文同属一大类 (表 1, 图 2: A)。

寄生蜂的寄生率在不同年份间有一定波动, 6 个稻区寄生蜂的寄生率在 2019-2023 年分别为 8.4%、3.05%、7.17%、8.28% 和 11.60%。2023 年寄生率最高, 与寄生率最低的 2020 年存在显著差异 ($P < 0.05$), 其它年份之间均没有显著差异 ($P < 0.05$) (图 2: B)。2019-2023 年寄生蜂

总寄生率在 6 个稻区之间没有显著差异 ($P < 0.05$), 通江、达川、兴文、合江、崇州和仁寿分别为 5.89%、3.03%、7.81%、11.36%、7.69% 和 12.20%。2019-2023 年, 寄生蜂在合江、通江和达川 3 个稻区的寄生率波动较大, 寄生率最高值与最低值相差 7 倍以上; 在通江寄生率最高值与最低值相差 13 倍; 其他稻区寄生率的波动较小, 最高值与最低值不超过 5 倍 (表 1)。

对各稻区的寄生蜂种类进行分析, 发现各稻区在不同时间内的寄生蜂种类和寄生率均存在差异。2019 年, 在 6 个水稻主产区共收集到 3 种寄生蜂, 分别为螟甲腹茧蜂、稻螟小腹茧蜂和大螟钝唇姬蜂。达川稻区大螟钝唇姬蜂寄生率最大, 为 4.81%; 其他 5 个稻区均以螟甲腹茧蜂的寄生率最大, 为 4.43%-11.45%。2020 年, 在 5 个水稻主产区共收集到 7 种寄生蜂; 其中崇州、合江、通江和达川 4 个稻区以螟甲腹茧蜂寄生率最大, 为 0.81%-1.94%。2021 年, 在 6 个稻区收集到 5 种寄生蜂, 在仁寿、兴文和合江 3 个稻区, 螟甲腹茧蜂的寄生率最大, 为 3.20%-10.49%。2022 年共收集到 5 种寄生蜂, 螟甲腹茧蜂的寄生率在仁寿、兴文、合江和达川 4 个稻区最大, 为 1.17%-11.13%; 稻螟小腹茧蜂在崇州和通江稻区的寄生率最大, 分别为 7.09% 和 1.42%。2023 年, 收集到 5 种寄生蜂, 螟甲腹茧蜂的寄生率在仁寿、合江和达川 3 个稻区最大, 为 2.78%-9.86%; 螟黄足盘绒茧蜂在崇州、兴文和通江稻区的寄生率最大, 为 2.18%-10.86%, 在合江稻区为 7.00% (表 1)。对四川省 6 个稻区 7 种寄生蜂的寄生率进行线性混合效应模型分析, 螟甲腹茧蜂的寄生率最大, 与其他种类寄生蜂差异显著 ($P < 0.05$); 其次为螟黄足盘绒茧蜂、大螟钝唇姬蜂和稻螟小腹茧蜂 (图 2: C)。

2.3 寄生蜂成虫室内饲养寿命

夹色奥姬蜂的成虫寿命最长, 为 18.20 d; 其次为螟甲腹茧蜂, 为 7.89 d。大螟钝唇姬蜂和稻螟小腹茧蜂的成虫寿命没有显著差异 ($P < 0.05$), 分别为 6.10 和 5.69 d。螟黄足盘绒茧蜂的成虫寿命最短, 为 2.74 d (图 3)。

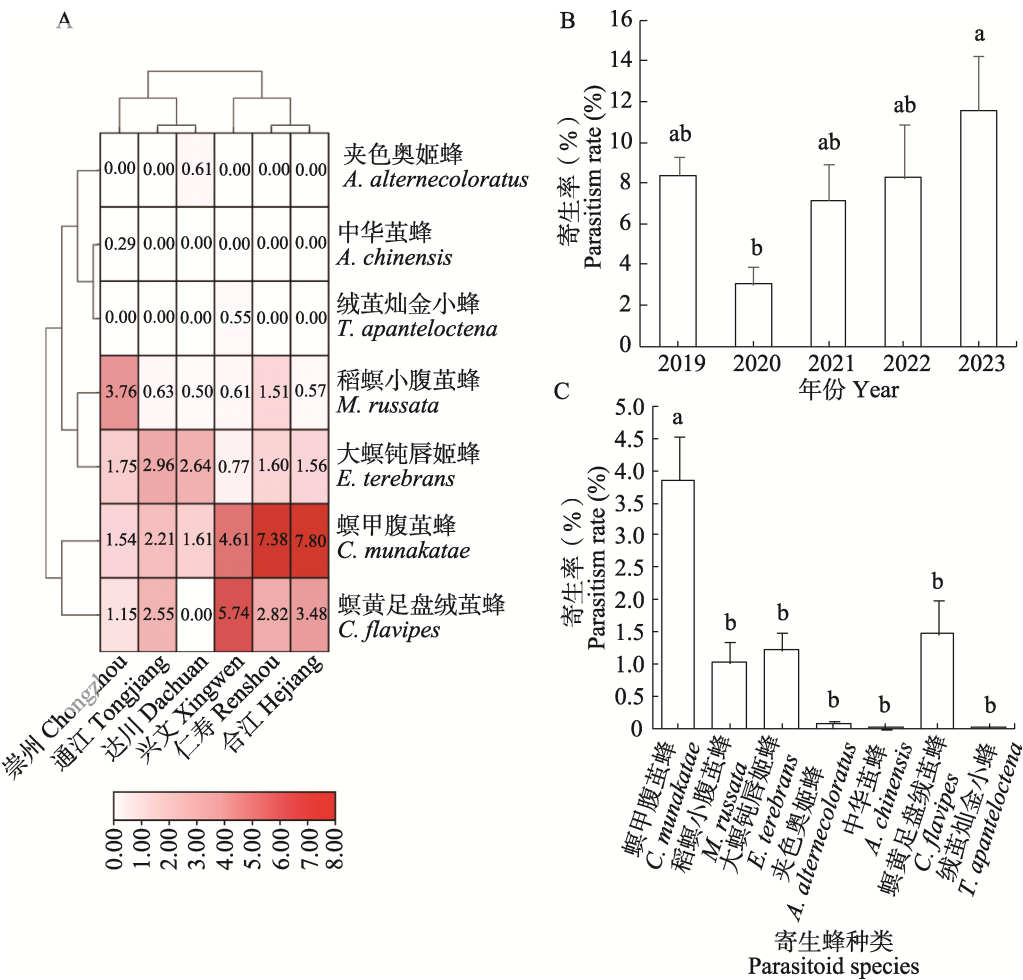


图 2 四川省 6 个主要稻区越冬代二化螟寄生蜂的寄生率分析

Fig. 2 Analysis of parasitism rate of parasitoids to overwintering *Chilo suppressalis* in 6 rice planting sites of Sichuan Province

A. 不同种类寄生蜂在不同稻区寄生率的聚类分析。红色代表寄生率增加；B. 不同年份寄生蜂的寄生率；C. 不同种类寄生蜂的寄生率。对各寄生蜂在 6 个稻区 5 年间的寄生率进行线性混合效应模型分析，不同种类作为固定效应，年份和稻区作为随机效应。图中柱形上方不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$, Tukey's HSD 检验)。

A. Cluster analysis of different parasitoids in different locations. Red indicates an increased parasitism rate; B. Parasitism rate of parasitoids in different years; C: Parasitism rate of different parasitoids. Linear mixed effects model was used for analyzing parasitism rate of different parasitoids from six rice planting sites in five years, species of parasitoids was fixed effect, year and location were random effects. Histograms with different letters are significantly different at 0.05 level by Tukey's HSD test.

3 讨论

在农业生态系统中, 寄生蜂种类的丰富性直接影响到生物防治的策略选择。本研究于 2019-2023 年对四川省 6 个主要稻区的越冬代二化螟寄生蜂进行了调查, 共发现 7 种寄生蜂, 并首次获得了螟甲腹茧蜂、稻螟小腹茧蜂、螟黄足盘绒茧蜂、夹色奥姬蜂和绒茧灿金小蜂的 28S

rDNA 部分序列, 为寄生蜂种类的准确鉴定提供了依据, 与其他寄生蜂的聚类分析也验证了形态鉴定结果。2020 年, 在成都温江稻区的调查中发现趋稻厚唇姬蜂 *Phaeogenes* sp. (数据未发表)。结合余刚和何荣蓉 (1988) 和于文娟等 (2021) 的调查报道, 四川稻区越冬代二化螟的寄生蜂种类共 13 种, 分别为螟甲腹茧蜂、稻螟小腹茧蜂、大螟钝唇姬蜂、中华茧蜂、夹色奥姬蜂、螟黄足盘绒茧蜂、绒茧灿金小蜂、趋稻厚唇

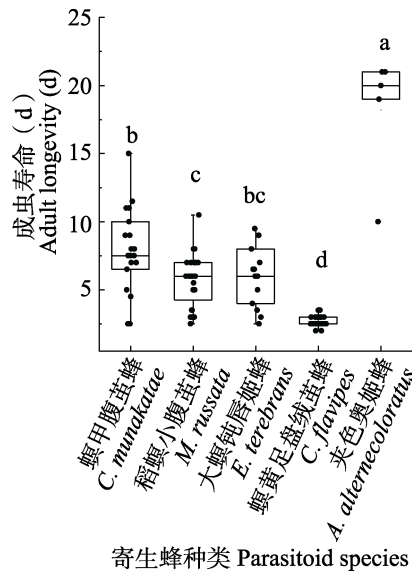


图3 四川省6个主要稻区越冬代二化螟5种寄生蜂的成虫寿命

Fig. 3 Adult longevity of 5 parasitoid species to the overwintering *Chilo suppressalis* in 6 rice planting sites of Sichuan Province

在箱线图中, 箱子上下边缘分别是上四分位数和下四分位数, 上下边界分别是最大值和最小值, 箱子中的实线为中位数线。箱体上方不同小写字母表示不同种类寄生蜂成虫寿命差异显著 ($P < 0.05$, Tukey's HSD 检验)。In the box-and-whisker plots, the upper and lower edges of the boxes indicate upper quartile and lower quartile percentiles, respectively. The whiskers show the range to the upper and lower extremes, the solid lines in the boxes represent the median lines. Values sharing the different letter are significantly different for adult longevity at 0.05 level by Tukey's HSD test.

姬蜂、绒茧克氏金小蜂 *T. apanteloctena*、螟蛉瘤姬蜂 *Itopectis naranyae*、环腹瘦蜂 *Figites* sp.、黏虫白星姬蜂 *Vulgichneumon leucaniae* 和二化螟黑卵蜂 *Telenomus chilocolus*。我国其他地区越冬代二化螟寄生蜂种类与四川省存在一定的地域差异。例如, 二化螟盘绒茧蜂在江苏、浙江和湖南等地是优势种, 且在江西也有分布(潘丹丹等, 2016; 何佳春等, 2018); 中华钝唇姬蜂和二化螟绒茧蜂 *Apanteles chilonis* 为北京市海淀区越冬代二化螟优势寄生蜂(韩永强等, 2009), 但这3种寄生蜂在四川稻区均没有被发现。四川省水稻种植主要集中在四川盆区, 以浅丘、平原和低山为主, 地形多样, 植被丰富, 稻麦和稻油轮作等种植模式增加了植被多样性(郭翔等, 2021;

张成等, 2022), 复杂生态环境下寄生蜂的种类多于单一环境。为了更全面地了解四川稻区寄生蜂种类, 需要进行长期和更广泛的地域调查, 为寄生蜂资源利用奠定基础。

越冬代二化螟寄生蜂的寄生率在我国不同地区差异较大。北京市海淀区稻田越冬代二化螟幼虫寄生蜂的寄生率为 50%(韩永强等, 2009)。江苏扬州地区稻田通常在 15%以上, 有时甚至高达 89.88%, 二化螟盘绒茧蜂和中华钝唇姬蜂为优势种(潘丹丹等, 2016)。湖北武汉越冬代二化螟寄生蜂寄生率可达 47.6%, 螟甲腹茧蜂为优势种(Quan *et al.*, 2013)。处于西南地区的黔中稻区寄生蜂的寄生率为 15.6%(戴长庚等, 2016)。本研究发现, 在四川省不同稻区和不同时间的调查中, 越冬代二化螟寄生蜂寄生率相对偏低, 2023 年仁寿的寄生率最高, 为 18.07%。研究表明, 2017-2020 年四川越冬代二化螟寄生蜂寄生率最高为 11.7%(于文娟等, 2021); 1982-1987 年, 四川成都的寄生率仅为 8.82%(余刚和何荣蓉, 1988)。由此可见, 四川稻区越冬代二化螟寄生蜂的寄生率长期处于较低水平。田间用药水平可能与四川省稻区较低的寄生率有关, 2018-2021 年, 四川稻区抗药性监测显示多个二化螟田间种群对杀虫单、三唑磷和毒死蜱产生了中等水平抗性, 可能在田间存在持续用药情况, 而这些杀虫剂对寄生蜂毒性较大, 对寄生蜂的多样性和寄生率带来不利影响(徐华强等, 2014; Zhao *et al.*, 2021; 李明阳, 2022); 同时, 抗药性监测数据显示, 2018-2020 年四川省内的二化螟对这 3 种农药的抗性水平普遍比 2021 年高(Zhao *et al.*, 2021; 李明阳, 2022), 而本研究的调查数据显示寄生蜂寄生率在 2020 年最低, 2021-2023 年缓慢上升, 二化螟抗药性和寄生蜂寄生率的波动可能与四川水稻种植区中阶段性高毒性杀虫剂的使用频率相关, 低毒农药的使用可能会提高寄生蜂的寄生率。此外, 寄生蜂特性和各种环境因素的相互作用也会影响寄生率。四川东部的通江和达川寄生蜂寄生率波动最大, 其次为四川南部的合江和兴文以及成都平原的崇州和仁寿, 四川东部和南部地形以山地和丘

陵为主, 生态环境比成都平原更为多样, 但四川东部年平均气温较南部和成都平原低(郭翔等, 2021), 气候因素可能是导致寄生率波动的重要原因。崇州作为四川重要的粮食生产区, 长期以水稻种植为主(赵利等, 2017), 用药水平较高, 导致成都平原的崇州和仁寿的寄生蜂种类相似, 但崇州寄生蜂的寄生率相对较低; 同时, 近年来崇州致力于打造现代高标准农田, 生境多样性的变化可能会对寄生蜂的寄生率下降造成一定影响。在北京和扬州等地寄生蜂对越冬代二化螟具有较好的控制作用, 能够有效减少来年水稻田中二化螟的越冬基数(韩永强等, 2009; 潘丹丹等, 2016)。与扬州和武汉等地相比, 四川稻区越冬代二化螟的寄生率总体较低, 但是寄生蜂种类较为丰富, 未来可通过对当地多种寄生蜂进行室内扩繁, 优化田间释放比列和释放方式等各种技术手段提高寄生率, 有效防控越冬代二化螟。

寄生蜂成虫对寄主的搜索、寄生以及自身交配等活动是一系列复杂的过程, 成虫寿命长短与寄生策略和繁殖方式等息息相关, 是长期演化的结果(时敏等, 2020)。本研究中, 通过饲喂 10% 槐花蜂蜜水测定 5 种不同寄生蜂的成虫寿命, 其中聚寄生的螟黄足盘绒茧蜂寿命最短, 预示着其在成虫羽化后需要在较短的时间内成功搜索到寄主并完成寄生; 其他寄生蜂均是单寄生蜂, 成虫寿命相对较长。寄生蜂的寿命与其生活习性有着复杂的关系, 是生物防治中必须考虑的关键因素。玉米螟赤眼蜂目前在我国已被成功用于害虫防治, 但其成虫寿命较短, 适宜条件下仅能存活 2-3 d, 放蜂量较大, 且放蜂频率需求较高(赵秀梅等, 2010; 张俊杰等, 2015)。此外, 寄生蜂的飞行能力和田间扩散行为与其寄生效率密切相关, 对害虫控制效力有显著影响(时敏等, 2020)。研究表明, 不同的营养补充对寄生蜂成虫的存活、繁殖力和后代性比有直接影响(宋南等, 2006)。蜂蜜、花粉和蔗糖等常被用做寄生蜂成虫的食物来源, 最优的食物配方可以显著延长寿命和提高产卵量(郑许松等, 2003; Zhang et al., 2011)。在本研究中, 只采用了 10% 槐花蜂蜜水作为食物来源, 尽管这可能不是每种寄生

蜂的最优食物, 但对未来扩繁本地寄生蜂提供了一定指导。气候变化、农业景观格局、水稻品种、栽培制度和稻田用药水平等都会影响寄生蜂的物种多样性、发生动态和生态控害功能。因此, 在考虑寄生蜂生物防治应用时, 上述因素都需综合评估, 以提高整体效能。

参考文献 (References)

- Boivin G, Hance T, Brodeur J, 2012. Aphid parasitoids in biological control. *Canadian Journal of Plant Science*, 92(1): 1–12.
- Chen HC, Lou YG, Cheng JA, 2002. Research and application of *Apanteles chilonis*, a parasitoid of rice striped stem borer *Chilo suppressalis*. *Chinese Journal of Biological Control*, 18(2): 90–93. [陈华才, 娄永根, 程家安, 2002. 二化螟绒茧蜂研究与应用概况. 中国生物防治, 18(2): 90–93.]
- Chen ZQ, Chen AD, Miao S, Luo KJ, Liang Y, 2001. Progress in research and introduction and utilization of parasitic natural enemies of *Plutella xylostella*. *Journal of Yunnan Agricultural University*, 16(4): 308–312. [陈宗麒, 湛爱东, 缪森, 罗开珩, 梁谊, 2001. 小菜蛾寄生性天敌研究及引进利用进展. 云南农业大学学报, 16(4): 308–312.]
- Dai CG, He JC, Li HB, Hu Y, 2016. Overwintering population density and parasitism of *Chilo suppressalis* in central Guizhou. *Guizhou Agricultural Sciences*, 44(1): 62–65. [戴长庚, 何佳春, 李鸿波, 和胡阳, 2016. 黔中稻区二化螟的越冬幼虫虫口密度及其自然寄生率. 贵州农业科学, 44(1): 62–65.]
- Figueiredo ML, Silva IC, Foster JE, 2015. Biological control with *Trichogramma pretiosum* increases organic maize productivity by 19.4%. *Agronomy for Sustainable Development*, 35(3): 1175–1183.
- Guo X, Zhao JP, Wang RL, Li XY, Wang MT, 2021. Continuous-rain hazard of transplanting and direct-sowing rice in Sichuan Basin, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 32(9): 3213–3222. [郭翔, 赵金鹏, 王茹琳, 李旭毅, 王明田, 2021. 四川盆区直播和移栽水稻的连阴雨灾害危险性. 应用生态学报, 32(9): 3213–3222.]
- Guo Z, 2011. Collection identification and monitoring on population dynamics of egg parasitoids of *Chilo suppressalis* Walker in Jilin. Master dissertation. Changchun: Jilin Agricultural University. [郭震, 2011. 水稻二化螟卵寄生蜂的采集、鉴定及田间种群动态监测. 硕士学位论文. 长春: 吉林农业大学.]
- Han YQ, Hao LX, Hou ML, 2009. Comparison of overwintered bionomics of *Chilo suppressalis* larvae from paddy-rice field with those from water-oat field in North China. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 17(3): 541–544. [韩永强, 郝丽霞, 侯茂林,

2009. 北方稻田和茭白田二化螟越冬幼虫生物学特性的比较. 中国生态农业学报, 17(3): 541–544.]
- He JC, He YT, Li B, Cao GL, Lin JJ, Fu Q, 2018. Natural parasitism of rice stem borer during overwintering. 2018 Academic Annual Conference and Plant Protection Technology Award Ceremony of the Chinese Plant Protection Society. Xi'an: 167. [何佳春, 何雨婷, 李波, 曹国莲, 林晶晶, 傅强, 2018. 水稻二化螟越冬代自然寄生情况. 中国植物保护学会 2018 年学术年会暨植保科技奖颁奖大会. 西安: 167.]
- He JH, 1984. List of parasitic wasps (Hymenoptera) in the Apocynaceae family of rice pests in China. *Journal of Zhejiang A & F University*, 10(1): 79–112. [何俊华, 1984. 中国水稻害虫的姬蜂科寄生蜂(膜翅目)名录. 浙江农业大学学报, 10(1): 79–112.]
- He JH, Liu YQ, Shi ZH, 2002. List of parasitic wasps of *Spodoptera litura* in China. *Natural Enemies of Insects*, 24(3): 128–137. [何俊华, 刘银泉, 施祖华, 2002. 中国斜纹夜蛾寄生蜂名录. 昆虫天敌, 24(3): 128–137.]
- He JH, 2004. Hymenopteran Insect Fauna of Zhejiang. Beijing: Science Press. 430–660. [何俊华, 2004. 浙江蜂类志. 北京: 科学出版社. 430–660.]
- Huang XL, Wu ZP, Jiang T, Zhang WN, Xiao HJ, 2018. Research and application progress of biological control of rice stem borer *Chilo suppressalis* using parasitoids. *Chinese Journal of Biological Control*, 34(1): 148–155. [黄孝龙, 吴珍平, 江婷, 张万娜, 肖海军, 2018. 寄生蜂对水稻二化螟生态控害功能的研究与应用. 中国生物防治学报, 34(1): 148–155.]
- Jiang MX, Zhu ZR, Wang ZJ, Zhu ML, Cheng JA, 2000. Dynamics of three parasitic wasps in overwintering larvae of *Chilo suppressalis*. *Natural Enemies of Insects*, 22(1): 33–37. [蒋明星, 祝增荣, 王正军, 诸茂龙, 程家安, 2000. 二化螟越冬幼虫三种寄生蜂发生动态. 昆虫天敌, 22(1): 33–37.]
- Li MY, Gong CW, Zhang YZ, Zhao X, Jia Y, Pu J, Liu XM, Xu X, Wang XG, 2022. Differences in susceptibility to chlorantraniliprole between *Chilo suppressalis* (Lepidoptera: Crambidae) and two dominant parasitic wasps collected from Sichuan Province, China. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 185: 105150.
- Li MY, 2022. Selective mechanism of chlorantraniliprole to *Chilo suppressalis* (Lepidoptera: Crambidae) and two dominant parasitic wasps in Sichuan Province. Master dissertation. Chengdu: Sichuan Agricultural University. [李明阳, 2022. 氯虫苯甲酰胺对四川稻区二化螟和两种优势寄生蜂的选择性原理研究. 硕士学位论文. 成都: 四川农业大学.]
- Li QY, 2020. Dynamics of *Sesamia inferens* in Yangzhou Area and biology of *Cotesia flavipes*. Master dissertation. Yangzhou: Yangzhou University. [李秋雨, 2020. 扬州地区大螟发生动态及天敌螟黄足盘绒茧蜂的生物学研究. 硕士学位论文. 扬州: 扬州大学.]
- Liu N, Liao HM, Feng CH, Liu RD, Ye JS, Xu XQ, 2001. Factors affecting the population growth and decline of *Chilo suppressalis* in Sichuan. Seminar on the Law of Rice Borer Catastrophe and Its Management Measures. Hangzhou: 40–44. [刘牛, 廖华明, 封传红, 刘如东, 叶健生, 徐兴全, 2001. 四川水稻螟虫种群消长的影响因素. 水稻螟虫灾变规律及治理对策研讨会. 杭州: 40–44.]
- Naranjo SE, Ellsworth PC, Frisvold GB, 2015. Economic value of biological control in integrated pest management of managed plant systems. *Annual Review of Entomology*, 60: 621–645.
- Pan DD, Liu ZX, Lu MX, Cao SS, Yan WF, Du YZ, 2016. Species and occurrence dynamics of parasitic wasps of the rice stem borer, *Chilo suppressalis* (Walker) (Lepidoptera: Pyralidae) in Yangzhou. *Journal of Environmental Entomology*, 38(6): 1106–1113. [潘丹丹, 刘中现, 陆明星, 曹爽爽, 严卫飞, 杜予州, 2016. 扬州地区水稻二化螟寄生蜂种类及主要寄生蜂发生动态. 环境昆虫学报, 38(6): 1106–1113.]
- Quan WL, Zheng XL, Li XX, Zhou XM, Ma WH, Wang XP, 2013. Overwintering strategy of endoparasitoids in *Chilo suppressalis*: A perspective from the cold hardiness of a host. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 146(3): 398–403.
- Rocca M, Messelink GJ, 2017. Combining lacewings and parasitoids for biological control of foxglove aphids in sweet pepper. *Journal of Applied Entomology*, 141(5): 402–410.
- Shang ZZ, Wang YS, Zhou YH, 1979. Study on the feeding methods of *Chilo suppressalis*. *Journal of Environmental Entomology*, 22(2): 164–168, 239. [尚稚珍, 王银淑, 邹永华, 1979. 二化螟饲养方法的研究. 昆虫学报, 22(2): 164–168, 239.]
- She G, He RR, 1988. Investigation on the parasitic natural enemy of rice stem borer in Chengdu. *Chinese Journal of Biological Control*, 4(1): 6–9. [余刚, 何荣蓉, 1988. 成都水稻二化螟寄生性天敌的调查研究. 生物防治通报, 4(1): 6–9.]
- Shi M, Tang P, Wang ZZ, Huang JH, Chen XX, 2020. Review of research on parasitoids and their use in biological control in China. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 57(3): 491–548. [时敏, 唐璞, 王知知, 黄健华, 陈学新, 2020. 中国寄生蜂研究及其在害虫生物防治中的应用. 应用昆虫学报, 57(3): 491–548.]
- Song N, Luo MH, Yuan GH, 2006. The effects of feeding on parasitic wasps. *Natural Enemies of Insects*, 28(3): 132–138. [宋南, 罗梅浩, 原国辉, 2006. 取食对寄生蜂的影响. 昆虫天敌, 28(3): 132–138.]
- Tai HK, Bai SX, Han YL, Xu SW, Liu Z, Zhang F, Wang ZY, 2017. Effect of releasing *Trichogramma ostrinae* on Asian corn borer

- in Yunnan Province. *Chinese Journal of Biological Control*, 33(3): 313–318. [太红坤, 白树雄, 韩永连, 许三卫, 刘峙, 张峰, 王振营, 2017. 玉米螟赤眼蜂防治云南亚洲玉米螟的田间效果. 中国生物防治学报, 33(3): 313–318.]
- Wang ZZ, Liu YQ, Shi M, Huang JH, Chen XX, 2019. Parasitoid wasps as effective biological control agents. *Journal of Integrative Agriculture*, 18(4): 705–715.
- Woolley VC, Tembo YL, Ndakidemi B, Obanyi JN, Arnold SE, Belmain SR, Ndakidemi PA, Ogendo JO, Stevenson PC, 2022. The diversity of aphid parasitoids in East Africa and implications for biological control. *Pest Management Science*, 78(3): 1109–1116.
- Xu HQ, Liu YY, Zhu GD, Xue M, 2014. Comparison of toxicity and safety evaluation of 16 kinds of pesticides on *Trichogramma ostrinae* and *Encarsia formosa*. *Journal of Environmental Entomology*, 36(6): 959–964. [徐华强, 刘艳艳, 祝国栋, 薛明, 2014. 16 种不同类型农药对两种寄生蜂的毒性比较和安全性评价. 环境昆虫学报, 36(6): 959–964.]
- Yang ZQ, Wang XY, Zhang YN, Zhang YL, 2018. Research advances of Chinese major forest pests by integrated management based on biological control. *Chinese Journal of Biological Control*, 34(2): 163–183. [杨忠岐, 王小艺, 张翌楠, 张彦龙, 2018. 以生物防治为主的综合控制我国重大林木病虫害研究进展. 中国生物防治学报, 34(2): 163–183.]
- Yang ZQ, Cao LM, Wang CZ, Wang XY, Song LW, 2015. *Trichospilus albiflagellatus* (Hymenoptera: Eulophidae), a new species parasitizing pupa of *Hyphantria cunea* (Lepidoptera: Arctiidae) in China. *Annals of the Entomological Society of America*, 108(4): 641–647.
- Yang ZZ, Wang XY, Wang CZ, Qiao XR, Pang JJ, 2005. Studies on utilizing parasitoid *Chouioia cunea* Yang (Hymenoptera: Eulophidae) for sustainable control of fall webworm. *Silvae Sinicae*, 41(5): 72–80. [杨忠岐, 王小艺, 王传珍, 乔秀荣, 庞建军, 2005. 白蛾周氏啮小蜂可持续控制美国白蛾的研究. 林业科学, 41(5): 72–80.]
- Yu WJ, He JC, Wan PJ, Ji HL, Fu Q, Peng YL, 2021. Species and parasitism of parasitic wasps of the overwintering rice stem borer, *Chilo suppressalis* (Walker) (Lepidoptera: Pyralidae) in Sichuan Province. *Plant Protection*, 47(6): 240–247, 253. [于文娟, 何佳春, 万品俊, 姬红丽, 傅强, 彭云良, 2021. 四川省稻田越冬代二化螟寄生性天敌的研究. 植物保护, 47(6): 240–247, 253.]
- Zhao L, Liu F, Ma CH, Pen ML, Wu GQ, Cheng DJ, 2017. Suitability evaluation of agro-geological background in Chongzhou City based on GIS. *Journal of Anhui Agricultural Science*, 45(2): 58–62. [赵利, 柳芳, 马婵华, 彭玛丽, 吴光清, 程东进, 2017. 基于 GIS 的崇州市农业地质背景适宜性评价. 安徽农业科学, 45(2): 58–62.]
- Zhang JJ, Ruan CC, Zang LS, Shao XW, Shi SS, 2015. Technological improvements for mass production of *Trichogramma* and current status of their applications for biological control on agricultural pests in China. *Chinese Journal of Biological Control*, 31(5): 638–46. [张俊杰, 阮长春, 臧连生, 邵玺文, 史树森, 2015. 我国赤眼蜂工厂化繁育技术改进及防治农业害虫应用现状. 中国生物防治学报, 31(5): 638–46.]
- Zhang C, Wang K, Zhong WT, Li G, Xiao XJ, Chen YY, Zhu WJ, 2022. Analysis of soil nutrient characteristics under long-term rice-wheat and rice-rape rotation planting patterns in Chengdu. *Sichuan Agricultural Science and Technology*, 10(1): 44–47. [张成, 王科, 钟文挺, 李根, 肖欣娟, 陈媛媛, 朱文杰, 2022. 成都市稻-麦和稻-油长期轮作种植模式下土壤养分特征分析. 四川农业科技, 10(1): 44–47.]
- Zhang YB, Liu WX, Wang W, Wan FH, Li Q, 2011. Lifetime gains and patterns of accumulation and mobilization of nutrients in females of the synovigenic parasitoid, *Diglyphus isaea* Walker (Hymenoptera: Eulophidae), as a function of diet. *Journal of Insect Physiology*, 57(7): 1045–1052.
- Zhao XM, Zhang SQ, Li WY, Shen FY, 2010. Measurement and evaluation of the field control effect of *Trichogramma* against corn borer. *Crops*, 2010(2): 93–94. [赵秀梅, 张树权, 李维艳, 沈凤云, 2010. 赤眼蜂防治玉米螟田间防效测定与评估. 作物杂志, 2010(2): 93–94.]
- Zhao X, Xu X, Wang XG, Yin Y, Li MY, Wu YQ, Liu YH, Cheng QH, Gong CW, Shen LT, 2021. Mechanisms for multiple resistances in field populations of rice stem borer, *Chilo suppressalis* (Lepidoptera: Crambidae) from Sichuan Province, China. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 171: 104720.
- Zheng XS, Yu XP, Lu ZX, Chen JM, Xu HX, 2003. Effects of different nutritional resources on the longevity and parasitic ability of egg parasitoid *Anagrus nilaparvatae*. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 14(10): 1751–1755. [郑许松, 俞晓平, 吕仲贤, 陈建明, 徐红星, 2003. 不同营养源对稻虱缨小蜂寿命及寄生能力的影响. 应用生态学报, 14(10): 1751–1755.]
- Zhu WB, 1990. Atlas of Natural Enemies of Agricultural Pests in Sichuan Province. Chengdu: Sichuan Publishing House of Science and Technology Press. 95–101. [朱文炳, 1990. 四川农业害虫天敌图册. 成都: 四川科技出版社. 95–101.]