

青海草原毛虫蛹期两种寄生天敌昆虫寄生率调查以及与寄主相互作用关系分析*

王海贞^{1**} 李宇宇¹ 张如意¹ 张剑霜^{2***}

(1. 吕梁学院生物与食品工程系, 吕梁 033000; 2. 贵州师范大学生命科学学院, 贵阳 550000)

摘要 【目的】在长期的进化过程中, 天敌昆虫与寄主之间形成相互依存, 相互制约的关系, 正是自然界这种对立统一的关系维持着天敌昆虫与寄主种群的相对稳定。因此, 生物防控不仅需要掌握害虫的发生规律和种群动态, 而且还需研究天敌的种群动态以及害虫与天敌之间的相关关系。【方法】在青海省玉树州共设 6 个调查样地, 对青海草原毛虫 *Gynaephora qinghaiensis* 种群密度以及草原毛虫蛹期两种寄生天敌昆虫 (三江源草原毛虫金小蜂 *Pteromalus sanjiangyuanicus* 和草毒蛾鬃堤寄蝇 *Chaetogena gynaephorae* 的自然寄生率进行为期 5 年的同步调查 (2015-2019 年), 并对它们的自然寄生率与草原毛虫的种群密度之间的相关关系进行分析。【结果】青海草原毛虫的种群密度在 1.0-78.4 头/m², 三江源草原毛虫金小蜂自然寄生率在 9.2%-25.0%, 草毒蛾鬃堤寄蝇自然寄生率在 0.7%-4.4%; 三江源草原毛虫金小蜂对草原毛虫蛹具有偏雌性寄生特征; 连续 3 年三江源草原毛虫金小蜂寄生率与下一年的青海草原毛虫种群密度之间具有显著的负相关关系 ($P<0.05$)。【结论】研究表明, 三江源草原毛虫金小蜂对青海草原毛虫种群增长具有明显的抑制效应, 适宜作为青海草原毛虫生物防控中的优势寄生天敌。研究青海草原毛虫寄生天敌昆虫与青海草原毛虫种群消长关系, 为草原毛虫生物防控中寄生天敌昆虫的选择及其扩繁提供科学依据。

关键词 草原毛虫; 寄生天敌; 寄生率; 相互作用关系

Investigation of parasitism rate of two parasitic natural enemies of *Gynaephora qinghaiensis* in pupal stage and analysis of their interaction with hosts

WANG Hai-Zhen^{1**} LI Yu-Yu¹ ZHANG Ru-Yi¹ ZHANG Jian-Shuang^{2***}

(1. Department of Biological and Food Engineering, Lüliang University, Lüliang 033000, China;

2. School of Life Science, Guizhou Normal University, Guiyang 550000, China)

Abstract [Aim] Through a long evolutionary process, a kind of interdependent and restrictive relationship has formed between insects and hosts. It is this unity of opposites in nature that maintains the relative stability of insect and host populations. Therefore, biological control requires information not only on the occurrence law and population dynamics of pests but also on the population dynamics of natural enemies and the correlation between pests and natural enemies. [Methods] In this study, 6 sites were used to investigate the population density of *Gynaephora qinghaiensis* and the natural parasitism rates of two natural enemies (*Pteromalus sanjiangyuanicus* and *Chaetogena gynaephorae*) of *G. qinghaiensis* pupae for 5 years (from 2015 to 2019) in Yushu Prefecture, Qinghai Province. Meanwhile, the correlations between the natural parasitism rates of the two natural enemies and the population density of *G. qinghaiensis* were analyzed. [Results] The population density of *G. qinghaiensis* ranged from 1.0 to 78.4 ind./m², the natural parasitism rate of *P. sanjiangyuanicus* was 9.2%-25.0%, and the

*资助项目 Supported projects: 吕梁市引进高层次科技人才重点研发项目 (2021RC-1-7); 山西省高等学校科技创新项目 (2021L571); 国家自然科学基金项目 (82060779); 贵州省基础研究 (自然科学) 项目 (黔科合基础-ZK[2022]一般 323)

**第一作者 First author, E-mail: 20201018@llu.edu.cn

***通讯作者 Corresponding author, E-mail: assassin1986@126.com

收稿日期 Received: 2022-11-03; 接受日期 Accepted: 2023-07-07

natural parasitism rate of *C. gynaeophorae* was 0.7%-4.4%. Moreover, the parasitism of *G. qinghaiensis* by *P. sanjiangyuanicus* was male biased. There was a significant negative correlation between the parasitism rate of *P. sanjiangyuanicus* and the population density of *G. qinghaiensis* in the next year ($P<0.05$). **[Conclusion]** The results revealed that *P. sanjiangyuanicus* had a significant inhibitory effect on the population growth of *G. qinghaiensis* and was suitable as the dominant natural enemy for the biological control of *G. qinghaiensis*. Studying the relationship between the parasitic natural enemies and population growth of *G. qinghaiensis* provides a scientific basis for the selection and propagation of parasitic natural enemies of this species in relation to biological control.

Key words *Gynaephora qinghaiensis*; parasitic natural enemies; parasitism rate; interaction relation

青海草原毛虫 *Gynaephora qinghaiensis* (周尧和印象初, 1979) 别名红头黑毛虫, 隶属昆虫纲 Insecta 鳞翅目 Lepidoptera 毒蛾科 Lymantriidae 草原毛虫属 *Gynaephora*, 主要分布在我国青海玉树、治多, 甘肃玛曲和四川石渠等海拔 3 000 m 以上的高寒牧区 (Levin *et al.*, 2003; 张棋麟和袁明龙, 2013; Yuan *et al.*, 2016; Zhang *et al.*, 2017)。青海草原毛虫是一种主要以莎草科植物为食的草地害虫, 具有分布密度高、发生面积大、危害程度严重的特点 (王海贞和刘昕, 2022)。虫害爆发时, 青海草原毛虫聚集在一起, 每平方米高达 1 000 多头, 牧草刚返青就被啃食一光, 对青藏高寒牧区草场植被造成巨大的危害, 严重影响当地畜牧业健康发展 (范小建, 2011)。在青海草原毛虫危害严重的年份, 采用化学农药大面积捕杀成为主要方法, 严重破坏了青藏高寒牧区的生态平衡, 加剧了农药残留污染, 对人类健康构成威胁。因此, 研究青海草原毛虫的生物防控, 是实现绿色、环保、无公害、可持续控制草原毛虫虫害的有效途径, 对保护青藏高寒牧区草甸生态环境, 促进高寒牧区农牧业健康有序发展具有重要意义。

害虫天敌是一种用之不竭的自然资源, 在利用过程中采取就地取材、因地制宜、综合利用等方法, 逐步降低了生产成本, 减少了环境污染。因此, 利用害虫进行生物防控在我国已经成为一种安全、高效、经济的防治措施 (古德祥和冯双, 2012; 时敏等, 2020; 萧玉涛等, 2022)。寄生性天敌昆虫的种类繁多, 共有 5 个目, 98 个科, 其中以膜翅目和双翅目最为重要 (蒲蛰龙, 1978)。目前, 已经报道的草原毛虫寄生性昆虫共有 7 种, 其中优势种是草原毛虫金小蜂

Pteromalus quinghaiensis 和多刺孔寄蝇 *Spoggosia echinura*, 前者主要寄生青海草原毛虫, 后者主要寄生门源草原毛虫 *Gynaephora menyuanensis* (严林等, 1994)。在利用寄生性天敌防控草原毛虫的实践中, 毛玉花等 (2016) 利用周氏啮小蜂 *Chouioia cunea* Yang 对草原毛虫进行生物防控试验, 结果表明此方法操作简单, 效果好, 对害虫的抑制具有延续性。杨忠岐等 (2020) 在草原毛虫蛹内发现了一种金小蜂新种——三江源草原毛虫金小蜂 *Pteromalus sanjiangyuanicus*, 其寄生率为 17.5%。与此同时, 王海贞 (2020) 在草原毛虫蛹内发现了另外一种草原毛虫蛹期寄生天敌——草毒蛾鬃堤寄蝇 *Chaetogena gynaeophorae*。

寄生天敌昆虫对害虫生物防控潜能的评估是害虫生物防治的前提, 也是从多种寄生天敌中选择优势种进行扩繁的重要手段。通常可通过分析寄生天敌昆虫种群与害虫种群之间的动态关系对生物防控潜能进行评估 (暴可心等, 2021)。对于具有飞行能力的寄生天敌昆虫, 种群调查较为困难, 通常可用寄生天敌昆虫平均寄生率替代种群密度间接反映其种群数量 (王问学等, 1989; 田晓霞, 2010)。目前, 作者通过前期实地调查, 在青海草原毛虫蛹内发现了两种寄生天敌昆虫——三江源草原毛虫金小蜂和草毒蛾鬃堤寄蝇, 但是这两种寄生天敌昆虫对青海草原毛虫生物防治潜能尚未研究。因此, 本研究共设了 6 个调查样地对草原毛虫种群密度以及草原毛虫蛹期两种寄生天敌昆虫 (三江源草原毛虫金小蜂和草毒蛾鬃堤寄蝇) 的自然寄生率进行为期 5 年的同步调查 (2015-2019 年), 并对寄生天敌昆虫的自然寄生率与草原毛虫的种群密度之间的相

关关系进行分析,旨在探究草原毛虫蛹期两种寄生天敌昆虫与寄主青海草原毛虫种群之间的相互作用关系,为青海草原毛虫生物防治中扩繁天敌的选择提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 调查区域与调查样地布设

在玉树州高寒牧区(治多县、杂多县、称多县)进行了为期5年(2015-2019年)的野外调查,并以国道G214和省道308为主线,在海拔4 188-4 580 m之间设置了6个调查样地(1#-6#),其中1#和2#样地位于杂多县,3#、4#和5#样地位于称多县,6#样地位于治多县,每个调查样地

之间的距离均在20 km以上。6个调查样地的地理信息和地理位置见表1。

1.2 调查时间及内容

本研究连续5年(2015-2019年)调查了6个调查样地青海草原毛虫的种群密度以及青海草原毛虫蛹期两种寄生天敌昆虫(三江源草原毛虫金小蜂和草毒蛾髯堤寄蝇)的自然寄生率。青海草原毛虫种群密度调查时间为每年的6月下旬,此时为青海草原毛虫种群爆发期;寄生天敌昆虫寄生率调查时间为每年的8月下旬,这个时期草原毛虫寄生天敌昆虫对青海草原毛虫蛹的寄生行为已基本结束,采集到的寄生天敌昆虫自然寄生率数据更接近真实值。

表1 玉树州高寒牧区6个调查样地地理信息

Table 1 Geographic information of six sample plots in the alpine pastoral area of Yushu prefecture

样地 Sample plots	地理坐标 Geographical coordinates		海拔高度(m) Altitude (m)
	纬度 Latitude	经度 Longitude	
1#	32°53'26.13"	96°44'50.46"	4 245
2#	32°53'31.96"	96°37'17.53"	4 370
3#	33°21'18.67"	97°20'53.69"	4 233
4#	33°18'1.64"	97°27'10.97"	4 471
5#	33°18'55.86"	97°31'15.25"	4 259
6#	33°54'46.92"	95°44'16.35"	4 270

1.3 调查方法

1.3.1 青海草原毛虫种群密度调查方法 青海草原毛虫种群密度调查以4-5龄幼虫为研究对象,采用随机抽样的调查方法,在每个调查样地内随机抽取5个样方(每个样方的规格为1 m×1 m),并记录每个样方内青海草原毛虫幼虫的数量,然后取5个样方内青海草原毛虫幼虫数量的平均值作为该样地草原毛虫的种群密度。

1.3.2 青海草原毛虫寄生天敌昆虫自然寄生率调查方法 在每个调查样地,随机抽取10个3 m×3 m样方,将样方内的青海草原毛虫蛹全部采集,并带回到位于治多县的中山大学科研基地实验室,去掉干瘪死蛹和成虫羽化后的空蛹壳,保留形态完整、饱满的草原毛虫蛹进行解剖,统计被寄生天敌昆虫寄生的草原毛虫蛹数量,计算寄生天敌昆虫的寄生率;同时,为了调查被三江源草

原毛虫金小蜂寄生的草原毛虫蛹性别比,本研究分别对被三江源草原毛虫金小蜂寄生的青海草原毛虫雌性蛹与雄性蛹的数量进行统计,并计算出性别比。

1.4 寄生率计算方法

草原毛虫寄生天敌昆虫寄生率参照梁国栋和薛瑞德(1990)对蝇蛹草原毛虫金小蜂寄生率的计算方法。

$$\text{自然寄生率(\%)} = \frac{\text{被寄生的蛹数量}}{\text{采集的蛹总数量}} \times 100。$$

1.5 数据处理

利用SPSS 22.0软件对青海草原毛虫寄生天敌昆虫自然寄生率与当年以及下一年的青海草原毛虫毛虫种群密度之间进行皮尔森(Pearson)相关分析(Sig.2-tailed);被三江源草原毛虫金

小蜂寄生的青海草原毛虫蛹的性别比检验采用渐进法卡方 (Chi-square) 检验, 假设被寄生的雌雄草原毛虫蛹数量服从均匀分布, 即性别比 (♂: ♀) 为 1: 1; 青海草原毛虫蛹及寄生天敌采用生物体视显微镜 Nikon SMZ15 (Nikon, Tokyo, Japan) 拍摄。

2 结果与分析

2.1 草原毛虫种群密调查结果

2015-2019 年的调查结果 (表 2) 显示, 调查区域内青海草原毛虫种群密度为 1.0-78.4 头/m², 其中, 2017 年调查的 5#样地种群密度最小, 为

1.0 头/m², 2017 年调查的 4#样地种群密度最大, 为 78.4 头/m²。

2.2 三江源草原毛虫金小蜂自然寄生率调查结果与分析

2.2.1 三江源草原毛虫金小蜂自然寄生率调查结果 2015-2019 年, 6 个调查样地的三江源草原毛虫金小蜂自然寄生率为 9.2%-25.0%, 其中, 2015 年 3#样地自然寄生率最小, 为 9.2%, 2016 年 3#样地自然寄生率最大, 为 25.0% (表 3)。2015-2019 年三江源草原毛虫金小蜂自然寄生率变化趋势图 (图 1) 显示, 6 个样地的三江源草原毛虫金小蜂自然寄生率总体呈逐年波动趋势。

表 2 2015-2019 年玉树州高寒牧区 6 个调查样地的青海草原毛虫种群密度调查结果
Table 2 Survey results of population density of *Gynaephora qinghaiensis* from six sample plots in the alpine pastoral area of Yushu prefecture from 2015 to 2019

样地 Sample plots	种群密度 (头/m ²) Population density (ind./m ²)				
	2015	2016	2017	2018	2019
1#	5.8±1.8	12.8±6.2	3.2±1.5	4.4±1.6	2.2±1.1
2#	6.6±1.9	13.6±3.6	5.0±2.6	6.2±2.4	4.2±1.2
3#	15.4±3.0	26.6±7.0	13.4±2.0	16.8±2.2	9.4±2.4
4#	27.8±7.9	52.2±17.3	78.4±14.9	45.2±18.8	50.2±12.0
5#	5.2±2.5	9.2±6.6	1.0±0.6	5.0±2.1	5.2±2.0
6#	11.2±3.6	5.6±2.2	7.6±2.9	2.4±1.0	6.4±1.7

表中数据为平均值±标准误。下表同。The data in the table are mean±SE. The same below.

表 3 2015-2019 年三江源草原毛虫金小蜂自然寄生率调查结果
Table 3 The surveyed results for natural parasitism rate of *Pteromalus sanjiangyuanicus* from 2015 to 2019

调查样地 Sample plots	寄生率 (%) Parasitism rate (%)				
	2015	2016	2017	2018	2019
1#	18.9±5.2	23.3±4.1	21.0±3.6	22.4±3.7	17.3±4.0
2#	14.5±5.9	21.3±3.0	19.8±3.7	20.5±2.4	16.3±4.6
3#	9.2±4.5	25.0±3.3	19.7±4.2	20.5±4.3	23.3±6.3
4#	20.6±2.3	10.4±3.9	17.3±1.0	15.7±2.6	18.6±1.3
5#	11.3±3.2	22.8±3.2	18.4±4.1	19.1±3.4	13.3±3.0
6#	21.4±3.0	17.8±3.8	21.9±2.8	19.8±5.5	16.3±3.9

2.2.2 三江源草原毛虫金小蜂自然寄生率与青海草原毛虫种群密度相关性分析 利用 SPSS22.0 软件对三江源草原毛虫金小蜂自然寄生率 (表 3) 与当年的青海草原毛虫种群密度 (表 2) 进行皮尔森相关分析, 结果如表 4 所示, 2015-2019 年, 三江源草原毛虫金小蜂自然寄生

率与当年的青海草原毛虫种群密度之间的相关关系均不显著 ($P>0.05$)。

对三江源草原毛虫金小蜂自然寄生率 (表 3) 与下一年的青海草原毛虫种群密度之间 (表 2) 进行皮尔森相关分析, 结果如表 5 所示, 2015 年的三江源草原毛虫金小蜂自然寄生率与 2016

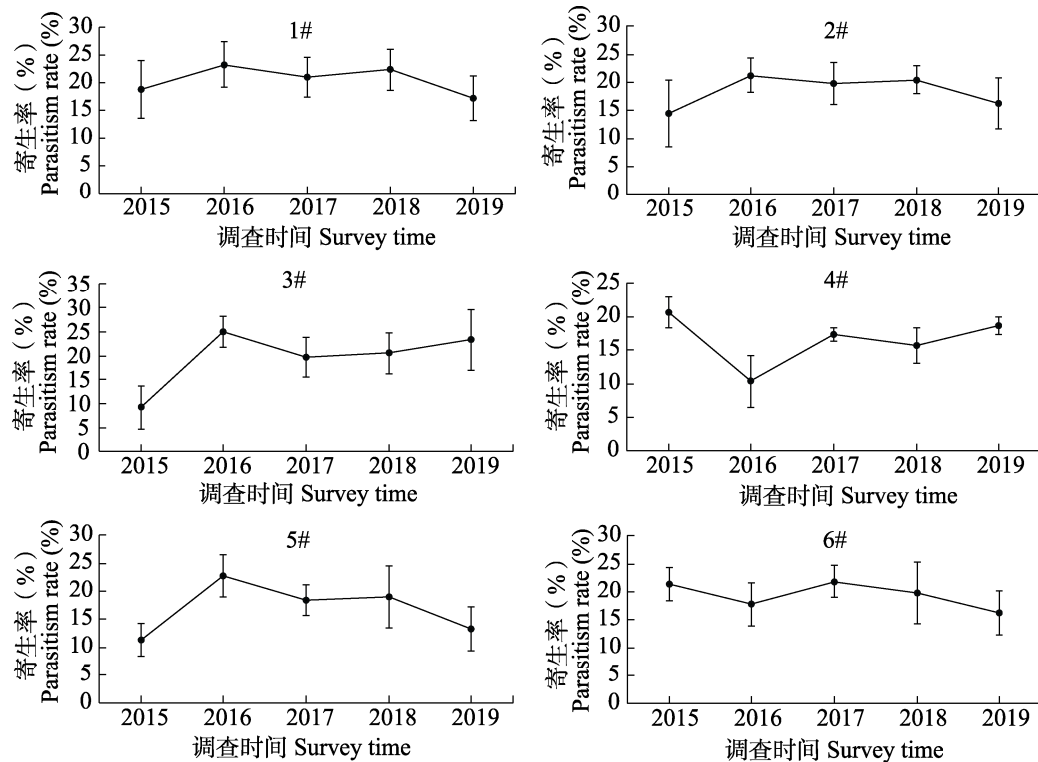


图 1 2015-2019 年三江源草原毛虫金小蜂自然寄生率变化趋势

Fig. 1 Change trend of natural parasitism rate of *Pteromalus sanjiangyuanicus* in *Gynaephora qinghaiensis* from 2015 to 2019

1#-6#: 样地编号。下图同。1#-6#: The sample plot number. The same below.

表 4 三江源草原毛虫金小蜂自然寄生率与当年青海草原毛虫种群密度相关分析

Table 4 Correlation analysis between the natural parasitism rate of *Pteromalus sanjiangyuanicus* and the population density of *Gynaephora qinghaiensis* in the same year

调查时间 Survey time		皮尔森相关系数 Pearson correlation coefficient	P
三江源草原毛虫金小蜂 <i>Pteromalus sanjiangyuanicus</i>	草原毛虫 <i>Gynaephora qinghaiensis</i>		
2015	2015	0.305	0.556
2016	2016	- 0.664	0.150
2017	2017	- 0.666	0.149
2018	2018	- 0.822	0.055
2019	2019	0.240	0.647

表 5 三江源草原毛虫金小蜂自然寄生率与下一年的青海草原毛虫种群密度相关分析

Table 5 Correlation analysis between the natural parasitism rate of *Pteromalus sanjiangyuanicus* and the population density of *Gynaephora qinghaiensis* in the next year

调查时间 Survey time		皮尔森相关系数 Pearson correlation coefficient	P
三江源草原毛虫金小蜂 <i>Pteromalus sanjiangyuanicus</i>	草原毛虫 <i>Gynaephora qinghaiensis</i>		
2015	2016	0.148	0.780
2016	2017	- 0.871*	0.024
2017	2018	- 0.743*	0.045
2018	2019	- 0.894*	0.016

代表显著相关。 represents for significant correlation.

年的草原毛虫种群密度之间的相关性不显著 ($P>0.05$); 2016、2017 和 2018 年的三江源草原毛虫金小蜂自然寄生率分别与下一年 (2017、2018 和 2019 年) 的青海草原毛虫种群密度之间均具有显著的负相关关系 ($P<0.05$)。

2.3 草毒蛾鬃堤寄蝇自然寄生率调查结果与分析

2.3.1 草毒蛾鬃堤寄蝇自然寄生率调查结果

2015-2019 年, 6 个调查样地的草毒蛾鬃堤寄蝇自然寄生率为 0.7%-4.4%, 其中, 2017 年 2#样地自然寄生率最小, 为 0.7%, 2016 年 4#样地自然寄生率最大, 为 4.4% (表 6)。2015-2019 年,

草毒蛾鬃堤寄蝇自然寄生率变化趋势图 (图 2) 显示, 6 个样地连续 5 年的草毒蛾鬃堤寄蝇自然寄生率均有不同程度的波动, 其中, 3#和 4#样地总体呈逐年波动趋势。

2.3.2 草毒蛾鬃堤寄蝇自然寄生率与青海草原毛虫种群密度相关性分析 利用 SPSS 22.0 软件对草毒蛾鬃堤寄蝇自然寄生率 (表 6) 与当年的青海草原毛虫种群密度 (表 2) 进行皮尔森相关性分析, 结果如表 7 所示, 2015-2019 年, 草毒蛾鬃堤寄蝇自然寄生率与当年的青海草原毛虫种群密度之间的相关性均不显著 ($P>0.05$)。

对草毒蛾鬃堤寄蝇自然寄生率 (表 6) 与下

表 6 2015-2019 年草毒蛾鬃堤寄蝇自然寄生率调查结果

Table 6 The surveyed results for natural parasitism rate of *Chaetogena gynaephorae* from 2015 to 2019

调查样地 Sample plots	寄生率 (%) Parasitism rate (%)				
	2015	2016	2017	2018	2019
1#	3.5±1.6	3.5±1.4	1.0±0.9	1.0±0.9	1.3±1.2
2#	1.4±1.4	3.6±1.4	0.7±0.7	1.9±1.2	2.3±1.5
3#	2.5±2.4	2.6±1.1	1.4±1.4	2.0±1.3	1.7±1.6
4#	3.5±1.1	4.4±2.8	1.2±0.3	2.6±0.7	1.7±0.7
5#	2.7±1.8	2.5±1.2	1.1±1.1	2.7±1.7	2.5±1.7
6#	3.1±1.5	0.8±0.8	0.9±0.9	1.8±1.7	2.3±1.4

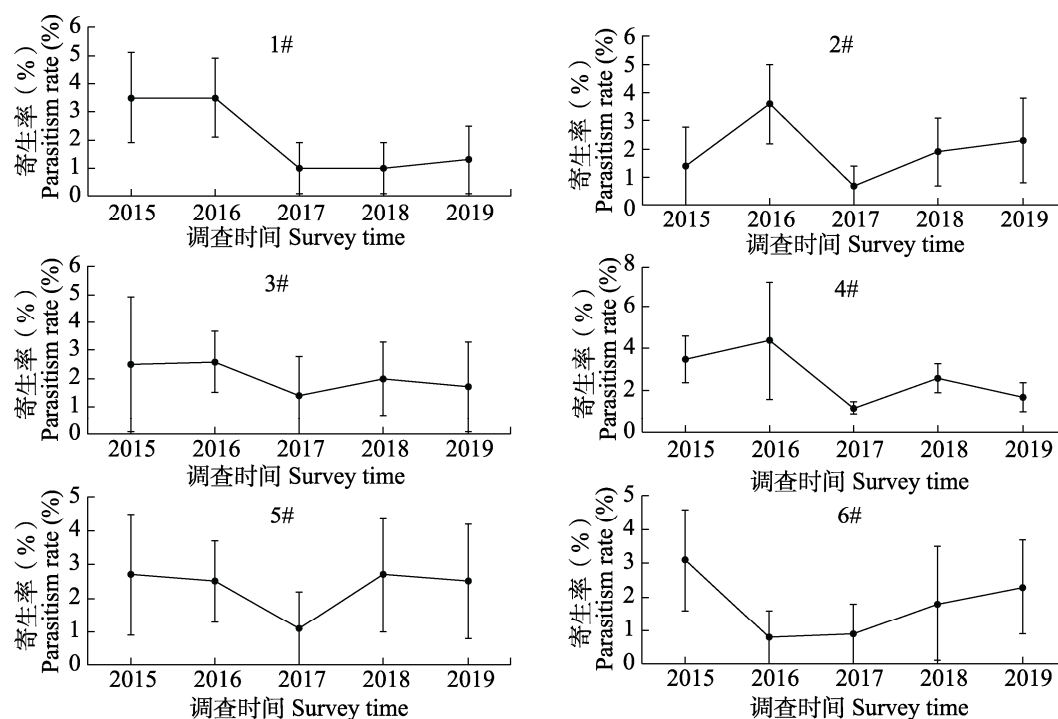


图 2 2015-2019 年草毒蛾鬃堤寄蝇自然寄生率变化趋势

Fig. 2 Change trend for natural parasitism rate of *Chaetogena gynaephorae* in *Gynaephora qinghaiensis* from 2015 to 2019

一年的青海草原毛虫种群密度（表 2）进行皮尔森相关分析，结果如表 8 所示，2015-2019 年，

草毒蛾鬃堤寄蝇自然寄生率与下一年的青海草原毛虫种群密度之间相关性均不显著（ $P>0.05$ ）。

表 7 草毒蛾鬃堤寄蝇自然寄生率与当年的青海草原毛虫种群密相关分析

Table 7 Correlation analysis between the natural parasitism rate of *Chaetogena gynaephorae* and the population density of *Gynaephora qinghaiensis* in the same year

调查时间 Survey time		皮尔森相关系数 Pearson correlation coefficient	P
草毒蛾鬃堤寄蝇 <i>Chaetogena gynaephorae</i>	草原毛虫 <i>Gynaephora qinghaiensis</i>		
2015	2015	0.400	0.432
2016	2016	0.669	0.146
2017	2017	0.371	0.469
2018	2018	0.497	0.316
2019	2019	- 0.257	0.623

表 8 草毒蛾鬃堤寄蝇自然寄生率与下一年的青海草原毛虫种群密皮尔森相关分析结果

Table 8 Correlation analysis between the natural parasitism rate of *Chaetogena gynaephorae* and the population density of *Gynaephora qinghaiensis* in the next year

调查时间 Survey time		皮尔森相关系数 Pearson correlation coefficient	P
草毒蛾鬃堤寄蝇 <i>Chaetogena gynaephorae</i>	草原毛虫 <i>Gynaephora qinghaiensis</i>		
2015	2016	0.310	0.549
2016	2017	0.552	0.256
2017	2018	0.510	0.302
2018	2019	0.526	0.284

2.4 被三江源草原毛虫金小蜂寄生的草原毛虫蛹性别比调查结果与分析

青海草原毛虫雌雄蛹的个体差异较大，雄性蛹个体较小，呈纺锤形，雌性蛹个体较大，呈椭圆形（图 3）。为了调查三江源草原毛虫金小蜂对青海草原毛虫寄生的性别差异，本研究对采集回的青海草原毛虫蛹进行了解剖分析，不仅在蛹内发现了内寄生的三江源草原毛虫幼虫，还在蛹外发现了外寄生的草原毛虫寄生蝇（图 4：C-D）。然后，分别对被三江源草原毛虫金小蜂寄生的青海草原毛虫雌性与雄性蛹的数量进行统计，并计算出性别比。如表 9 所示，3 个调查样地（1#、2#、3#）被三江源草原毛虫金小蜂寄生的青海草原毛虫蛹性别比（♂：♀）分别为 10.3：1、3.6：1、6.0：1。卡方检验结果表明，3 个调查样地被三江源草原毛虫金小蜂寄生的青海草原毛虫蛹性别比（♂：♀）与期望性别比（1：1）均存在极显著差异（ $P<0.01$ ），表明被三江源

草原毛虫金小蜂寄生的雄性草原毛虫蛹比例显著大于雌性蛹，即三江源草原毛虫金小蜂对寄主青海草原毛虫蛹具有偏雄性寄生特征。



图 3 青海草原毛虫雄性蛹（♂）和雌性蛹（♀）

Fig. 3 Male (♂) and female (♀) pupa of *Gynaephora qinghaiensis*

3 结论与讨论

利用寄生天敌对害虫进行生物防控的首要任务是对寄生天敌进行大规模的扩繁。目前天敌

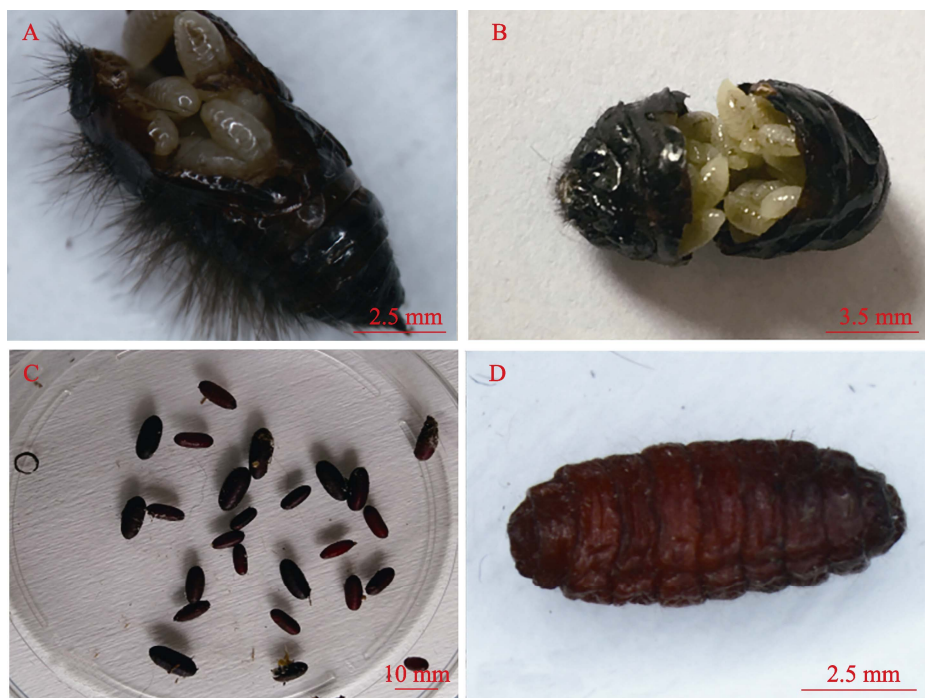


图 4 草原毛虫蛹内解剖出的三江源草原毛虫金小蜂幼虫和草毒蛾鬃堤寄蝇蛹
Fig. 4 *Pteromalus sanjiangyuanicus* larvae and *Chaetogena gynaephorae* pupae dissected from *Gynaephora qinghaiensis* pupae

A. 雄性草原毛虫蛹内解剖出的三江源草原毛虫金小蜂幼虫; B. 雌性草原毛虫蛹内解剖出的三江源草原毛虫金小蜂幼虫; C, D. 草原毛虫蛹内解剖出的草毒蛾鬃堤寄蝇蛹。
A. *P. sanjiangyuanicus* larvae dissected from *G. qinghaiensis* male pupae; B. *P. sanjiangyuanicus* larvae dissected from *G. qinghaiensis* female pupae; C, D. *C. gynaephorae* pupae dissected from *G. qinghaiensis* pupae.

表 9 被三江源草原毛虫金小蜂寄生的青海草原毛虫蛹性别比及卡方检验 (χ^2 检验)

Table 9 Sex ratio and Chi-Square (χ^2 test) of *Gynaephora* pupae parasitized by *Pteromalus sanjiangyuanicus*

调查样地 Sample plots	青海草原毛虫蛹 总数量 (头) The total number of <i>G. qinghaiensis</i> pupae (ind.)	被寄生的青海草原 毛虫雄性蛹数量 (头) The number of parasitized <i>G.</i> <i>qinghaiensis</i> male pupae (ind.)	被寄生的青海草原 毛虫雌性蛹数量 (头) The number of parasitized <i>G.</i> <i>qinghaiensis</i> female pupae (ind.)	被寄生的青海草原毛 虫蛹性别比 (♂ : ♀) The sex ratio of parasitized <i>G.</i> <i>qinghaiensis</i> pupae (ind.)	χ^2	<i>P</i>
1#	200	41	4	10.3 : 1	30.422	<0.01
2#	200	32	9	3.6 : 1	12.902	<0.01
3#	200	36	6	6.0 : 1	21.429	<0.01

扩繁主要采用室内替代寄主的方法,而利用这种方法扩繁出的天敌昆虫由于营养来源单一,随着世代的增加整个种群的生命力减弱,天敌效能随之下降(刘爱萍等,2018)。此外,用于扩繁的寄生蜂最好能和寄主保持在同一生态环境中,室内扩繁出的寄生蜂在控释时由于改变了生存环境,大大降低其对害虫的生防效果(陈万斌等,

2021)。因此,寻找或挖掘与寄主害虫处于同一生境的本地天敌资源是天敌扩繁的关键,这就需要对同一生态环境下寄生天敌的种类及种群数量进行调查,并评估每种寄生天敌与害虫之间的相互作用(张礼生等,2014)。本研究调查发现青海草原毛虫蛹期的寄生天敌昆虫为三江源草原毛虫金小蜂和草毒蛾鬃堤寄蝇,且三江源草原

毛虫金小蜂的自然寄生率显著高于草毒蛾鬃堤寄蝇。

寄生天敌与寄主之间相互作用关系的研究是害虫生物防控的理论基础(门兴元等, 2020)。曾经, 国内外生防工作者普遍认为害虫生物防控成功的关键在于寄生天敌的空间聚集所导致的寄生率与寄主密度的正相关关系(高艳和罗礼智, 2006; Greenberg *et al.*, 2009)。后来这种观点又被很多科研工作者否定, 认为寄生天敌与寄主密度的正相关关系不是害虫生物防控的必要条件, 在没有这种正相关关系的情况下, 也能取得生物防控的成功(Reeve and Murdoch, 1985; Smith and Maelzer, 1986; 王问学等, 1989)。本研究认为, 对于寄生天敌与寄主之间的相关关系分析, 研究目的和调查顺序至关重要, 如果是为了研究寄生天敌对寄主的抑制作用, 那么应该先调查寄主的种群数量, 后调查寄生天敌的种群数量; 如果是为了研究寄主对寄生天敌的影响, 那么就应该先调查寄主的种群数量, 后调查寄生天敌的种群数量。一般情况下, 种群密度是天敌与害虫种群动态关系研究中的调查指标(闫占峰, 2011), 但对于三江源草原毛虫金小蜂和草毒蛾鬃堤寄蝇这样具有飞翔能力的寄生性天敌来说, 不仅种群数量的调查工作较为困难, 而且它们的种群数量和种群密度波动较大, 因此不能真实地反映它们与寄主之间的种群动态关系。王问学等(1989)研究表明, 寄生天敌昆虫的寄生率与寄生数量(种群数量)往往成正比例关系, 因此可以利用天敌的自然寄生率替代种群数量进行相关性分析。本研究对青海草原毛虫寄生天敌昆虫寄生率与青海草原毛虫种群密度相关分析结果显示, 2015-2019年, 三江源草原毛虫金小蜂寄生率以及草毒蛾鬃堤寄蝇寄生率分别与当年的青海草原毛虫种群密度之间的相关关系均不显著, 表明草原毛虫种群的逐年波动对草原毛虫寄生天敌昆虫种群影响较小; 连续3年三江源草原毛虫金小蜂寄生率与下一年的青海草原毛虫种群密度之间具有显著的负相关关系, 草毒蛾鬃堤寄蝇与下一年的青海草原毛虫种群密度之间的相关关系均不显著, 表明三江源草原毛虫金小蜂

对草原毛虫种群增长具有明显的抑制效应, 而草毒蛾鬃堤寄蝇由于在寄主青海草原毛虫蛹中的自然寄生率较低, 因此对青海草原毛虫种群增长的抑制效应较弱。综上所述, 三江源草原毛虫金小蜂对寄主草原毛虫蛹具有较高的自然寄生率, 对寄主草原毛虫种群增长抑制效应显著, 是草原毛虫蛹期的优势寄生天敌, 适合大规模扩繁并运用于草原毛虫的生物防控。

寄生天敌昆虫在寄生时, 对寄主具有选择性特征(Goubault *et al.*, 2004; 张方平等, 2017), 而这种选择性又会受到诸多因素的影响, 如寄主的体型大小(张方平等, 2017)、角质层厚度(Tanaka *et al.*, 1999)、运动状态(Monteith, 1956)、化学信息素(Renou and Guerrero, 2000)以及寄生天敌昆虫自身的学习能力(和晓波等, 2010)。寄主体型大小代表着寄生蜂在寄生期间可获取的营养资源的多少, 因此寄主大小可能是寄生蜂在选择寄主时重要的参考依据(Charnov, 1982)。根据“寄主大小-质量”模型, 抑性寄生蜂倾向于在体型大、质量高的寄主上产卵, 且雌性后代比率较大(Charnov and Skinner, 1985)。但实际调查中发现, 有些抑性寄生蜂在选择寄生寄主时并不遵循这个模型理论, 而是具有“守中”的特征。例如, 蝇蛹俑小蜂 *Spalangia endius*(赵海燕等, 2015)和珠蜡蚧阔柄跳小蜂 *Metaphycus parasaissetiae*(和晓波等, 2010)均显著偏好寄生体型中等的寄主蛹。三江源草原毛虫金小蜂作为一种抑性寄生蜂理论上也应该偏向寄生于在个体较大或中型寄主个体。但是, 本研究的调查结果发现三江源草原毛虫金小蜂更偏向寄生于个体较小的雄性寄主蛹内, 这可能与寄主雌性个体特征有关。青海草原毛虫雌雄个体不仅在大小上有差异, 而且生理特征上也有差异, 活的雌蛹体表柔软会蠕动, 活的雄蛹体表僵硬, 不能蠕动, 对于寄生蜂这种感知外部信息较敏感的昆虫来说, 寄主活动状态也是它们选择寄主的重要依据之一(Monteith, 1956), 三江源草原毛虫金小蜂可能更倾向于寄生活动状态较为“安静”的雄性蛹, 这样有利于它们排除寄生产卵时外界的干扰。当然, 三江源草原毛虫金小蜂对青海草原毛

虫这种偏雄性寄生特征也可能与青海草原毛虫雌雄蛹之间的免疫反应差异有关。Wang 等 (2020) 对青海草原毛虫雌雄蛹之间的免疫转录组进行了比较分析, 表明在雌性蛹中大部分的免疫相关差异表达基因上调表达, 这在一定程度上能够反映雌雄蛹之间的免疫反应差异。此外, 本研究在野外调查中发现, 草原毛虫雌性蛹内的三江源草原毛虫金小蜂子代数量约是雄性蛹的 3 倍, 揭示三江源草原毛虫金小蜂在草原毛虫雌性蛹内的繁殖能力大于雄性蛹。因此, 通过一些科学手段诱导三江源草原毛虫金小蜂寄生草原毛虫雌性蛹, 不仅能从根本上抑制草原毛虫繁殖能力, 而且还能增加天敌的种群数量, 对于提高草原毛虫生物防控的效果具有重要的意义。

参考文献 (References)

- Bao KX, Luo LP, Wang XY, Zang YL, Wei K, Zhang YA, Yang ZQ, 2021. Method for evaluating the comprehensive benefits of biological control of insect pests. *Chinese Journal of Biological Control*, 37(1): 38–51. [暴可心, 罗立平, 王小艺, 张彦龙, 魏可, 张永安, 杨忠岐, 2021. 害虫生物防治综合效益评价方法. 中国生物防治学报, 37(1): 38–51.]
- Charnov EL, 1982. *The Theory of Sex Allocation*. Princeton: Princeton University Press. 15–16.
- Charnov EL, Skinner SW, 1985. Complementary approaches to the understanding of parasitoid oviposition decisions. *Environmental Entomology*, 14: 383–391.
- Chen WB, Li YY, Xiang M, Li P, Wang MQ, Zhang LS, 2021. Research progress in mass-rearing and utilization of *Telenomus remus* Nixon. *Plant Protection*, 47(6): 11–20. [陈万斌, 李玉艳, 向梅, 李萍, 王孟卿, 张礼生, 2021. 夜蛾黑卵蜂人工扩繁及应用研究进展. 植物保护, 47(6): 11–20.]
- Fan XJ, 2011. *Research on Poverty Alleviation and Development and Disaster Mitigation and Avoidance Industry Development on Qinghai-Tibet Plateau*. Beijing: China Agriculture Press. 4–25. [范小建, 2011. 扶贫开发与青藏高原减灾避灾产业发展研究. 北京: 中国农业出版社. 4–25.]
- Gao Y, Luo LZ, 2006. Research progress in tritrophic interactions among host plants, the beet armyworm *Spodoptera exigua* (Hübner) (Lepidoptera: Noctuidae) and its parasitoids. *Acta Entomologica Sinica*, 49(2): 333–341. [高艳, 罗礼智, 2006. 寄主植物-甜菜夜蛾-寄生蜂三级营养关系的研究进展. 昆虫学报, 49(2): 333–341.]
- Goubault M, Krespi L, Boivin G, Poinot D, Nenon JP, Cortesero AM, 2004. Intraspecific variations in host discrimination behavior in the pupal parasitoid *Pachycrepoideus vindemmiae* Rondani (Hymenoptera: Pteromalidae). *Environmental Entomology*, 33(2): 362–369.
- Gu DX, Feng S, 2012. *Father of Biological Control in South China-Academician Pu Zhelong*. Guangzhou: Sun Yat-Sen University Press. 201–203. [古德祥, 冯双, 2012. 南中国生物防治之父——蒲蛰龙院士. 广州: 中山大学出版社. 201–203.]
- Greenberg SM, Jones WA, Liu TX, 2009. Tritrophic interactions among host plants, whiteflies, and parasitoids. *Southwestern Entomologist*, 34(4): 431–445.
- He XB, Zhang L, Pan XL, Luo LZ, 2010. The factors influencing host preference by tachinids. *Plant Protection*, 36(3): 39–42. [和晓波, 张蕾, 潘贤丽, 罗礼智, 2010. 影响寄生蝇寄主选择性因素研究进展. 植物保护, 36(3): 39–42.]
- Levin DB, Danks HV, Barber SA, 2003. Variations in mitochondrial DNA and gene transcription in freezing-tolerant larvae of *Eurosta solidaginis* (Diptera: Tephritidae) and *Gynaephora groenlandica* (Lepidoptera: Lymantriidae). *Insect Molecular Biology*, 12(3): 281–289.
- Liang GD, Xue RD, 1990. Investigation and methods of fly parasitoids. *Medical Animal Control*, 6(2): 32–34. [梁国栋, 薛瑞德, 1990. 蝇蛹寄生蜂的调查与考查方法. 医学动物防治, 6(2): 32–34.]
- Liu AP, Gao SJ, Han HB, 2018. *Research on Development and Application of Green Control of Grassland Pests*. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press. 6–10. [刘爱萍, 高书晶, 韩海斌, 2018. 草地害虫绿色防控研发与应用研究. 北京: 中国农业科学技术出版社. 6–10.]
- Mao YH, Liu XP, Lei MX, Yang HF, Xi JP, 2016. Study on control of caterpillars in grassland by *Chouioia cunda*. *Gansu Animal and Veterinary Sciences*, 46(5): 81–82. [毛玉花, 刘晓鹏, 雷明霞, 杨慧芳, 席景平, 2016. 应用周氏啮小蜂防治草原毛虫的试验. 甘肃畜牧兽医, 46(5): 81–82.]
- Men XY, Li LL, Ou YF, Zhang QQ, Lu ZB, Li C, Ge F, 2020. Ecological and economic threshold (EET) and its estimation method. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 57(1): 214–217. [门兴元, 李丽莉, 欧阳芳, 张晴晴, 卢增斌, 李超, 戈峰, 2020. 害虫防治的生态经济阈值及其估算方法. 应用昆虫学报, 57(1): 214–217.]
- Monteith LG, 1956. Influence of host movement on selection of hosts by *Drino bohemica* Mesn. (Diptera: Tachinidae) as determined in an olfactometer. *Canadian Entomologist*, 88(10): 583–586.
- Pu ZL, 1978. *Principles and Methods of Biological Pest Control* (1st edition). Beijing: Science Press. 10–11. [蒲蛰龙, 1978. 害虫生物防治的原理与方法(第一版). 北京: 科学出版社. 10–11.]
- Reeve JD, Murdoch WW, 1985. Aggregation by parasitoids in the successful control of the California red scale: A test of theory. *Journal of Animal Ecology*, 54: 797–816.
- Renou M, Guerrero A, 2000. Insect parapheromones in olfaction

- research and semiochemical-based pest control strategies. *Annual Review of Entomology*, 45: 605–630.
- 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.]
- Smith ADM, Maelzer DA, 1986. Aggregation of parasitoids and density independence of parasitism in field populations of the wasp *Aphytis melinus* and its host, the red scale *Aonidiella aurantii*. *Ecological Entomology*, 11(4): 425–434.
- Tanaka C, Kainoh Y, Honda H, 1999. Physical factors in host selection of the parasitoid fly, *Exorista japonica* Townsend (Diptera: Tachinidae). *Applied Entomology and Zoology*, 34(1): 91–97.
- Tian XX, 2010. The wasp parasitoids and their regulating roles to the populations of beet webworm, *Loxostege sticticalis* (Lepidoptera: Pyralidae). Master dissertation. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences. [田晓霞, 2010. 草地螟寄生蜂及其对寄主种群的控制作用. 硕士学位论文. 北京: 中国农业科学院.]
- Wang HZ, 2020. Study on biocontrol of *Gynaephora* in Qinghai-Tibet alpine pastoral area. Doctor dissertation. Guangzhou: Sun Yat-sen University. [王海贞, 2020. 青藏高原寒牧区草场草原毛虫生物防控研究. 博士学位论文. 广州: 中山大学.]
- Wang HZ, Liu X, 2022. Distribution of *Gynaephora qinghaiensis* population and its effect on habitat grassland vegetation in Yushu Prefecture. *Journal of Environmental Entomology*, 44(4): 891–902. [王海贞, 刘昕, 2022. 玉树州境内草原毛虫种群分布及其对生境草场植被的影响. 环境昆虫学报, 44(4): 891–902.]
- Wang HZ, Zhong X, Gu L, Liu X, Gu L, 2020. Transcriptome characterization and gene expression analysis related to immune response in *Gynaephora qinghaiensis* pupae. *Journal of Asia-Pacific Entomology*, 23(2): 458–469.
- Wang WX, Song YT, Wu GT, Yang SG, Luo QG, 1989. Preliminary study on the numerical relationship between parasitoids of *Dendrolimus punctatus* Walker and their host. *Journal of Central-South Forestry College*, 9(2): 185–193. [王问学, 宋运堂, 伍根庭, 杨叔贵, 罗秋桂, 1989. 马尾松毛虫寄生天敌与寄主数量关系的研究. 中南林学院学报, 9(2): 185–193.]
- Xiao YT, Wu C, Wu KM, 2022. Agricultural pest control in China over the past 70 years: Achievements and future prospects. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 56(6): 1115–1124. [萧玉涛, 吴超, 吴孔明, 2022. 中国农业害虫防治科技 70 年的成就与展望. 应用昆虫学报, 56(6): 1115–1124.]
- Yan L, Liu ZK, Mei JR, Huo KK, Lan JH, 1994. Preliminary study on parasitic natural enemies of caterpillar pupa in grassland. *Chinese Qinghai Journal of Animal and Veterinary Sciences*, 24(6): 15–16. [严林, 刘振魁, 梅洁人, 霍科科, 兰景华, 1994. 草原毛虫蛹期寄生天敌种类初步观察. 青海畜牧兽医杂志, 24(6): 15–16.]
- Yan ZF, 2011. Studies on population dynamics of aphids and interactions with their natural enemies in cornfield. Master dissertation. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences. [闫占峰, 2011. 玉米田蚜虫发生规律与其天敌互作关系研究. 硕士学位论文. 北京: 中国农业科学院.]
- Yang ZQ, Wang XY, Zhong X, Liu X, Cao LM, Wang HZ, 2020. A new species of *Pteromalus* (Hymenoptera: Pteromalidae) parasitizing pupa of *Gynaephora qinghaiensis* (Lepidoptera: Lymantriidae) from Qinghai-Tibet Plateau. *Scientia Silvae Sinicae*, 56(2): 99–105. [杨忠岐, 王小艺, 钟欣, 刘昕, 曹亮明, 王海贞, 2020. 寄生青海草原毛虫的金小蜂—新种(膜翅目: 金小蜂科). 林业科学, 56(2): 99–105.]
- Yuan ML, Zhang QL, Guo ZL, Wang J, 2016. The complete mitochondrial genome of *Gynaephora alpherakii* (Lepidoptera: Lymantriidae). *Mitochondrial DNA*, 27(3): 2270–2271.
- Zhang FP, Zhu JH, Li L, Han DG, Chen JY, Niu LM, Fu YG, 2017. Effect of host size on the oviposition selection and reproduction of *Metaphycus parasaissetiae*. *Journal of Environmental Entomology*, 39(5): 1130–1134. [张方平, 朱俊洪, 李磊, 韩冬银, 陈俊谕, 牛黎明, 符悦冠, 2017. 寄主大小对副蛛蜡蚧阔柄跳小蜂产卵选择及繁殖的影响. 环境昆虫学报, 39(5): 1130–1134.]
- Zhang L, Zhang QL, Wang XT, Yang XZ, Li XP, Yuan ML, 2017. Selection of reference genes for qRT-PCR and expression analysis of high-altitude-related genes in grassland caterpillars (Lepidoptera: Erebididae: *Gynaephora*) along an altitude gradient. *Ecology and Evolution*, 7(21): 9054–9065.
- Zhang LS, Chen HY, Li BP, 2014. Propagation and Application of Natural Enemy Insects. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press. 1–28. [张礼生, 陈红印, 李保平, 2014. 天敌昆虫扩繁与应用. 北京: 中国农业科学技术出版社. 1–28.]
- Zhang QL, Yuan ML, 2013. Research status and prospect of grassland caterpillars (Lepidoptera: Lymantriidae). *Pratacultural Science*, 30(4): 638–646. [张麒麟, 袁明龙, 2013. 草原毛虫研究现状与展望. 草业科学, 30(4): 638–646.]
- Zhao HY, Lu YY, Zeng L, Liang GW, 2015. Influence of host size on host choice and fitness returns of the endoparasitoid *Spalangia endius* Walker. *Journal of Biosafety*, 24(1): 15–19. [赵海燕, 陆永跃, 曾玲, 梁广文, 2015. 寄主大小对蝇蛹桶小蜂 *Spalangia endius* (Walker) 产卵选择和发育的影响. 生物安全学报, 24(1): 15–19.]
- Zhou Y, Yin XC, 1979. Taxonomic study of the prairie caterpillar. *Entomotaxonomia*, 1(1): 23–28. [周尧, 印象初, 1979. 草原毛虫的分类研究. 昆虫分类学报, 1(1): 23–28.]