

蠋蝽成虫对门源草原毛虫低龄幼虫的捕食效能与防控潜力评估

薛传振¹ 郭鹏辉¹ 孙星星^{1,2} 徐博文¹ 王惠颖¹ 毛佳颖¹ 王孟卿¹
张长华^{3*} 张礼生¹ 李玉艳^{1*}

(1. 中国农业科学院植物保护研究所, 植物病虫害综合治理全国重点实验室, 农业农村部天敌昆虫重点实验室, 北京 100193; 2. 江苏沿海地区农业科学研究所, 盐城 224000; 3. 贵州省烟草公司遵义市公司, 遵义 563000)

摘要: 为探索高海拔地区生物防治的新途径, 筛选可持续防控门源草原毛虫 *Gynaephora menyuanensis* (Chou et Yan) 的天敌资源, 在 3 473 m 海拔条件下系统评估捕食性天敌蠋蝽 *Arma custos* (Fabricius) 成虫对该虫低龄幼虫的捕食特征与持续控害能力。结果显示: 蠋蝽成虫对门源草原毛虫 2 龄和 3 龄幼虫的捕食行为均符合 Holling II 型功能反应模型。蠋蝽雄成虫对门源草原毛虫 2 龄幼虫的瞬时攻击率最高, 为 5.050, 对 3 龄幼虫的处理时间最短, 为 0.247, 对 2 龄幼虫的捕食效率最高, 为 17.782。连续 14 d 的捕食试验结果表明, 蠋蝽成虫在长期捕食过程中仍维持较高的捕食活性与存活水平, 总捕食量达到 25.8~37.2 头, 雌、雄成虫存活率分别在 60% 和 70% 以上。综上, 蠋蝽在高寒草原生态系统中对门源草原毛虫低龄幼虫表现出较强的捕食能力, 表明其在高海拔地区具备成为生物防治天敌的应用潜力。

关键词: 蠋蝽; 门源草原毛虫; 捕食功能反应; 高原生态系统; 持续控害效能; 生物防治

Predation efficiency and biocontrol potential of *Arma custos* adults against early-instar larvae of tussock moth *Gynaephora menyuanensis*

Xue Chuazhen¹ Guo Penghui¹ Sun Xingxing^{1,2} Xu Bowen¹ Wang Huiying¹ Mao Jiaying¹
Wang Mengqing¹ Zhang Changhua^{3*} Zhang Lisheng¹ Li Yuyan^{1*}

(1. Key Laboratory of Natural Enemy Insects, Ministry of Agriculture and Rural Affairs; State Key Laboratory for Biology of Plant Diseases and Insect Pests, Institute of Plant Protection, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China; 2. Jiangsu Coastal Area Institute of Agriculture Sciences, Yancheng 224000, Jiangsu Province, China; 3. Zunyi Branch Company, Guizhou Tobacco Company, Zunyi 563000, Guizhou Province, China)

Abstract: To explore effective biological control strategies for high-altitude regions and to identify sustainable natural enemy resources for managing tussock moth *Gynaephora menyuanensis*, the predation characteristics and sustained control capacity of the predatory bug *Arma custos* adults against early-instar larvae were systematically evaluated at an altitude of 3 473 m. The results showed that predation by *A. custos* adults on 2nd- and 3rd-instar larvae of *G. menyuanensis* conformed to the Holling type II functional response model. Male adults exhibited the highest instantaneous attack rate (5.050) against 2nd-instar larvae, the shortest handling time (0.247) when preying on 3rd-instar larvae, and the highest predation efficiency (17.782) against 2nd-instar larvae. Results from a 14-day continuous predation experiment indicated that *A. custos* adults maintained high predatory activity and survival during pro-

longed feeding, with a cumulative predation of 25.8–37.2 larvae and survival rates exceeding 60%–70% for females and males. Overall, *A. custos* exhibits strong predatory capacity against early-instar larvae of *G. menyuanensis* in alpine grassland ecosystem, highlighting its promise as a biological control agent in high-altitude regions.

Key words: *Arma custos*; *Gynaephora menyuanensis*; predation functional response; alpine grassland ecosystem; sustained biocontrol efficiency; biological control

门源草原毛虫 *Gynaephora menyuanensis* (Yan et Chou) 作为青藏高原高寒草甸生态系统中的专业化害虫, 严重制约着当地牧草生产与草原生态安全。该虫在青海省门源回族自治县(简称门源)、祁连县及甘肃省部分县域的高寒草甸中分布集中, 幼虫阶段大量取食禾本科、莎草科等优质牧草, 导致草层高度与覆盖度显著下降, 直接引起草场生产力衰退, 是栖息于青藏高原东北部牧区的主要害虫之一(张麒麟和袁明龙, 2013; 陈珂璐等, 2016)。随着虫龄增长, 其摄食范围扩展至豆科、蔷薇科、玄参科等多科植物, 加剧植被组成单一化并削弱生态系统功能(严林, 2006; 尼玛等, 2011)。更为严峻的是, 该毛虫体表具毒毛与刺激性体液, 家畜误食后易诱发严重的口腔炎症与舌体溃烂, 严重影响牲畜健康与牧民经济收入(邱昌庆等, 2004; 尼玛等, 2011)。

尽管自20世纪60年代起, 化学防治一直被用作该害虫应急控制的主要手段, 但长期施药已引发草地生物多样性衰减、农药残留及害虫抗性增强等生态与经济问题(张麒麟和袁明龙, 2013)。在当前国家生态文明建设与绿色植保理念的推动下, 构建以天敌资源为核心的草原害虫可持续调控体系, 成为实现草地生态平衡与畜牧业稳健发展的必然选择(李静玲等, 2024)。天敌昆虫在维持生态系统稳定与抑制害虫种群方面发挥着不可替代的作用。目前, 已知门源草原毛虫的自然天敌类群涉及寄生蜂、寄生蝇及捕食性鸟类等多种生物(张麒麟和袁明龙, 2013; 杨忠岐等, 2020; 刘诗叠, 2023)。然而, 受高原特殊生境及规模化扩繁技术的限制, 现有天敌资源尚难以形成稳定、高效的生物防治产品, 致使门源草原毛虫的绿色防控仍缺乏可推广的实用技术方案。

蠋蝽 *Arma custos* (Fabricius) 作为我国本土重要的广谱捕食性天敌, 对鳞翅目幼虫具备较强的捕食偏好与控害潜能(Zou et al., 2012)。该捕食性蝽的若虫与成虫能够捕食鳞翅目、半翅目、鞘翅目、膜翅目等40余种害虫, 在我国烟草、茶叶、设施果蔬、园林等害虫的生物防治中发挥着重要作用(陈彬等,

2025; 徐博文等, 2025)。近年的研究表明, 蠋蝽对柳毒蛾 *Leucoma salicis* (Linnaeus)、杨毒蛾 *Leucoma candida* (Staudinger)、侧柏毒蛾 *Parocneria furva* (Leech) 和榆毒蛾 *Ivela ochropoda* (Eversmann) 等多种毒蛾科害虫具有良好的抑制效果(徐崇华等, 1981; 阎金泉, 1988; 郑志英等, 1992; 上官斌, 2009)。本团队前期研究进一步发现, 蠋蝽成虫对门源草原毛虫体长约3 cm的6龄幼虫具有持续的捕食活性, 在长达21 d的饲喂过程中未出现捕食衰退现象, 展现出良好的生物防治应用前景(韩舜达等, 2025)。目前关于蠋蝽对门源草原毛虫低龄幼虫的捕食行为与持续控害能力, 尤其在高原环境下的系统评估研究尚未见报道。因此, 本研究聚焦于蠋蝽成虫对门源草原毛虫2龄、3龄幼虫的捕食功能反应与持续捕食稳定性, 以期揭示其在高寒地区的生防适用性, 为推进以蠋蝽为天敌的门源草原毛虫绿色治理策略提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

供试虫源: 本试验所用蠋蝽来自本实验室长期饲养的种群, 饲养环境条件为温度(26±3) °C, 光周期16 L:8 D, 相对湿度(70±5)%。选取羽化2~3 d的蠋蝽成虫, 置于上直径14.8 cm、下直径9.8 cm、高8.3 cm的塑料饲养盒中, 饥饿处理24 h, 用于后续功能反应和持续捕食能力测定。门源草原毛虫2龄和3龄幼虫于2024年5月至6月采自海拔3 473 m的青海省海晏牧场, 随后转移至上述相同规格的塑料饲养盒中, 盒底垫放有一次性保湿滤纸, 在温度(16±4) °C、光周期14.5 L:7.5 D、相对湿度(70±10)%的条件下用从草原采集的新鲜针茅 *Stipa capillata* L. 进行饲养, 针茅在采集后8 h内用于后续试验。

1.2 方法

1.2.1 蠋蝽对门源草原毛虫幼虫的捕食能力测定

为更真实地模拟蠋蝽在自然条件下的捕食行为, 本试验于青海省海晏牧场当地5—6月实际环境条件下进行, 此时当地环境条件为温度(16±4) °C、

光周期 14.5 L:7.5 D、相对湿度(70±10)%。将羽化 2~3 d 的蠋蝽雌、雄成虫单头置于上直径 14.8 cm、下直径 9.8 cm、高 8.3 cm 的塑料饲养盒中,饥饿处理 24 h 后,分别按 5、10、15、20 和 30 头/盒的猎物密度投喂门源草原试虫 2 龄或 3 龄幼虫。盒底铺设一次性滤纸以保持湿度,并投放足量新鲜针茅供试虫取食。每个猎物密度设置不少于 20 次重复。24 h 后,用镊子轻触幼虫,完全无活动个体判定为死亡,分别记录蠋蝽雌、雄成虫的捕食量。为排除天敌因素对结果的干扰,以不投放蠋蝽的处理作空白对照。

1.2.2 蠋蝽对门源草原毛虫幼虫的捕食功能反应拟合

由于空白对照组中未观察到门源草原毛虫 2 龄或 3 龄幼虫出现自然死亡,因此无需对猎物死亡率进行校正。功能反应是描述捕食者取食量随猎物密度变化而变化的数学模型(Solomon, 1949),1959 年 Holling 确定了 I 型、II 型、III 型 3 种功能反应模型的判定方法(Holling, 1959)。为确定本试验的功能反应类型,通过多项式逻辑回归分析明确蠋蝽捕食量与门源草原毛虫初始猎物密度间的关系,即 $\frac{N_c}{N_0} =$

$\frac{\exp(P_0 + P_1 N_0 + P_2 N_0^2 + P_3 N_0^3)}{1 + \exp(P_0 + P_1 N_0 + P_2 N_0^2 + P_3 N_0^3)}$, 其中 N_c 表示

蠋蝽捕食量, N_0 表示门源草原毛虫 2 龄和 3 龄幼虫的初始猎物密度,参数 P_0 、 P_1 、 P_2 、 P_3 分别表示截距系数、线性系数、二次项系数和三次项系数(Juliano, 2001)。当线性系数为负数($P_1 < 0, P < 0.05$)时,捕食者表现为 Holling II 型功能反应模型;相反,当线性系数为正数($P_1 > 0, P < 0.05$),且二次项系数为负数($P_2 < 0, P < 0.05$)时,表现为 Holling III 型功能反应模型;如对应 P 值不显著,表示模型未与数据充分拟合,应逐步删除三次项系数、二次项系数等参数直至对应 P 值显著(Juliano, 2001)。遵循 Holling II 型功能反应模型方程继续建模: $N_c = N_0 [1 - \exp(aT_h N_c - aT)]$,其中 a 表示蠋蝽的瞬时攻击率, T 表示蠋蝽搜寻时间(1 d), T_h 表示蠋蝽对猎物的处理时间。 T/T_h 表示蠋蝽对猎物的理论日最大捕食量,用功能反应效率 a/T_h 评估蠋蝽对猎物的捕食效率。为比较蠋蝽各发育阶段对门源草原毛虫 2 龄和 3 龄幼虫的瞬时攻击率和处理时间的差异,本研究采用附加平方和 F 检验,相关参数的估计值通过非线性最小二乘回归法获得。

1.2.3 蠋蝽对门源草原毛虫幼虫的持续捕食能力测定

将羽化后 2~3 d 的蠋蝽雌、雄成虫单头置于上直径 14.8 cm、下直径 9.8 cm、高 8.3 cm 的塑料饲养

盒中,饥饿处理 24 h,每日定时投喂 15 头门源草原毛虫 2 龄或 3 龄幼虫,并补充足量新鲜针茅。每 24 h 记录 1 次捕食量,并及时更换新的幼虫与饲料。逐日观察并记录蠋蝽成虫的存活数量与日捕食量,直至第 14 天结束。制作蠋蝽成虫连续 14 d 的存活曲线和逐日取食曲线,计算 14 d 内的总捕食量与日均捕食量,每组试验重复不少于 20 次。

1.3 数据分析

本试验使用 GraphPad Prism 10.1.2 和 OriginPro 2024 进行数据分析。分析前首先采用 Shapiro-Wilk 检验和 Levene 检验分别评估数据的正态性和方差齐性,不符合要求的数据采用非参数检验进行分析。在最高猎物密度下,蠋蝽成虫对门源草原毛虫低龄幼虫的日捕食量不服从正态分布,采用 Mann-Whitney U 非参数检验分析不同性别蠋蝽成虫对 2 龄、3 龄幼虫的捕食量差异。捕食功能反应参数通过 t 检验法评估蠋蝽成虫对 2 种龄期猎物瞬时攻击率和处理时间的差异显著性。14 d 持续捕食试验中的单日平均捕食量符合正态分布和方差齐性要求,采用双因素方差分析结合 Šidák 多重比较检验蠋蝽雌雄成虫的捕食量差异显著性。总捕食量和日均捕食量使用单因素方差分析,采用 Tukey's 多重比较检验法检验蠋蝽雌雄成虫间的差异显著性。

2 结果与分析

2.1 蠋蝽对门源草原毛虫幼虫的捕食能力

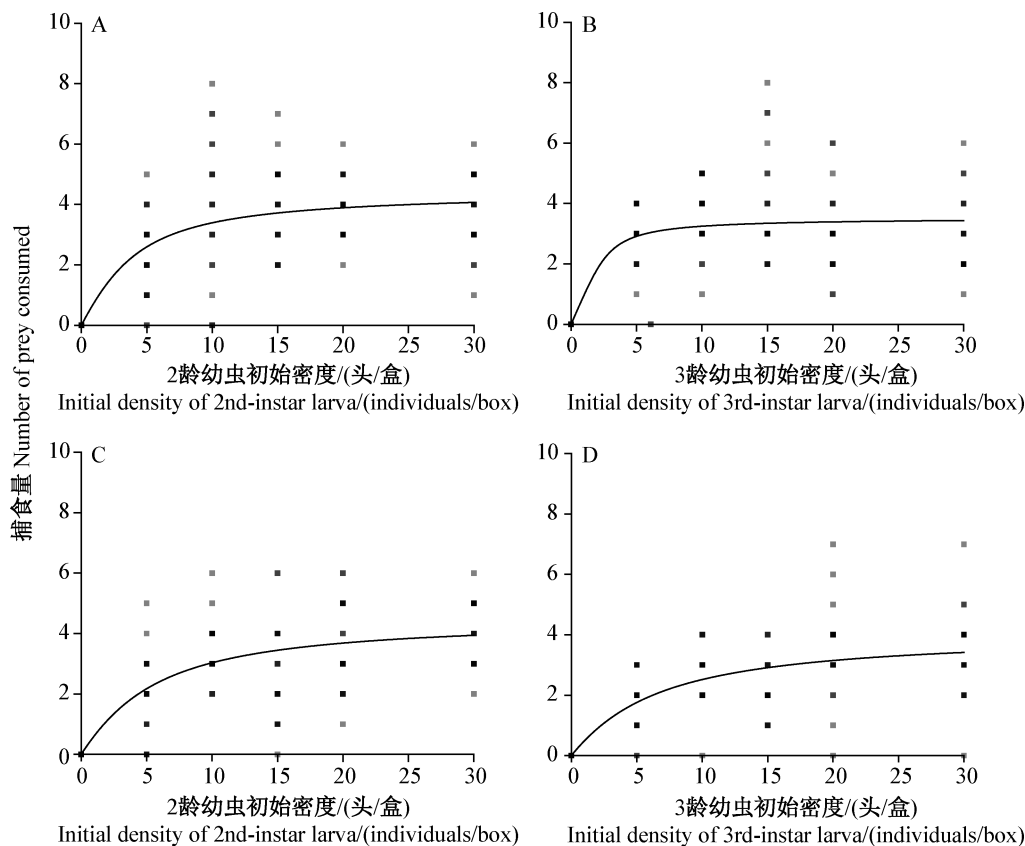
蠋蝽成虫对门源草原毛虫 2 龄和 3 龄幼虫均表现出较强的捕食效能。在 24 h 内,雌、雄成虫对 2 种龄期猎物的捕食量均随猎物密度增加而显著上升,之后逐渐趋于稳定(图 1)。在最高猎物密度下,蠋蝽雌成虫对 2 龄幼虫的日捕食量中位数显著高于雄成虫($U=127, P < 0.05$),而雌雄成虫对 3 龄幼虫的日捕食量中位数差异不显著。同性别成虫对不同龄期猎物的日捕食量中位数也无显著差异(表 1)。

2.2 蠋蝽对门源草原毛虫幼虫的捕食功能反应

在不同猎物密度下,蠋蝽成虫捕食门源草原毛虫 2 龄和 3 龄幼虫的线性参数 P_1 的最大似然估计值均为负数($P_1 < 0$)(表 2),表明其功能反应符合 Holling II 型模型。功能反应参数受猎物龄期影响,表现为随幼虫龄期增加,蠋蝽成虫的瞬时攻击率降低,而猎物处理时间缩短(表 3)。蠋蝽雄成虫对门源草原毛虫 2 龄幼虫的瞬时攻击率最高,为 5.050,显著高于对 3 龄幼虫的瞬时攻击率($t=4.572, df=4, P < 0.05$);雌成虫对门源草原毛虫 2 龄和 3 龄幼虫的瞬时攻击

率无显著差异(表3)。蠋蝽雄成虫对门源草原毛虫3龄幼虫的处理时间最短,为0.247,对2龄和3龄幼虫的处理时间无显著差异;蠋蝽雌成虫对门源草原毛虫3龄幼虫的理论日最大捕食量最高,达4.5头

(表3)。蠋蝽雄成虫对门源草原毛虫2龄幼虫的捕食效率最高,为17.782,雌成虫对门源草原毛虫2龄和3龄幼虫的捕食效率次之,分别为7.801和4.959(表3)。



A、B: 蠋蝽雌成虫; C、D: 蠋蝽雄成虫。A、B: Female adults of *Arma custos*; C、D: male adults of *A. custos*.

图1 不同猎物密度下蠋蝽雌雄成虫对门源草原毛虫2龄和3龄幼虫的捕食功能反应

Fig. 1 Functional responses of female and male *Arma custos* adults preying on 2nd- and 3rd-instar larvae of *Gynaephora menyuanensis* at different prey densities

数据点表示蠋蝽雌、雄成虫在24 h内的实际捕食量,曲线表示基于逻辑斯蒂随机捕食者方程的预测值。The data points represent the actual number of prey consumed by female and male *Arma custos* adults within 24 h, and the curves represent the predicted values based on Rogers' random predator equation.

表1 最高猎物密度下蠋蝽成虫对门源草原毛虫2龄和3龄幼虫的日捕食量

Table 1 Daily prey consumption by *Arma custos* adults on 2nd- and 3rd-instar larvae of *Gynaephora menyuanensis* at the highest prey density

蠋蝽 <i>Arma custos</i>	门源草原毛虫 <i>Gynaephora menyuanensis</i>	
	2龄幼虫 2nd-instar larvae	3龄幼虫 3rd-instar larvae
雌成虫 Female adult	4.0±2.0 Aa	4.0±2.0 Aa
雄成虫 Male adult	2.5±2.0 Ab	3.5±1.8 Aa

表中数据为中位数±四分位数。同行数据后不同大、小写字母表示在最高猎物密度下蠋蝽相同性别成虫对不同龄期猎物的日捕食量中位数和不同性别成虫对相同龄期猎物的日捕食量中位数经Mann-Whitney U非参数检验法检验差异显著($P<0.05$)。Data are median±interquartile range. Different uppercase or lowercase letters indicate significant differences in daily prey consumption at the highest prey density, as determined by the Mann-Whitney U test ($P<0.05$), either between different larval instars consumed by *Arma custos* adults of the same sex or between different sexes feeding on the same larval instar of *G. menyuanensis*.

表2 逻辑斯蒂模型拟合蠋蝽成虫在不同初始密度下对门源草原毛虫2龄和3龄幼虫的消耗比例
Table 2 Logistic models fitting of the proportion of 2nd- and 3rd-instar larvae of *Gynaephora menyuanensis* consumed by *Arma custos* adults at different initial prey densities

蠋蝽 <i>Arma custos</i>	门源草原毛虫 <i>Gynaephora menyuanensis</i>	类型 Type	参数 Parameters	预测值 Estimate	SE	<i>t</i>	<i>P</i>
雌成虫 Female adult	2龄幼虫 2nd-instar larvae	II	P_0	0.583	0.351	1.658	0.100
			P_1	-0.131	0.038	3.418	0.001
			P_2	0.002	0.001	1.645	0.103
	3龄幼虫 3rd-instar larvae	II	P_0	0.601	0.357	1.683	0.095
			P_1	-0.166	0.039	4.205	0.000
			P_2	0.003	0.001	2.904	0.004
雄成虫 Male adult	2龄幼虫 2nd-instar larvae	II	P_0	1.008	0.325	3.103	0.002
			P_1	-0.177	0.036	4.851	0.000
			P_2	0.002	0.001	2.497	0.014
	3龄幼虫 3rd-instar larvae	II	P_0	0.944	0.692	1.364	0.175
			P_1	-0.354	0.145	-2.438	0.016
			P_2	0.017	0.009	1.902	0.060
			P_3	0.000	0.000	-1.743	0.084

表3 蠋蝽成虫对门源草原毛虫2龄和3龄幼虫的Holling II型捕食功能反应参数
Table 3 Parameter estimates of the Holling II functional response of *Arma custos* adults preying on the 2nd- and 3rd-instar larvae of *Gynaephora menyuanensis*

蠋蝽 <i>Arma custos</i>	门源草原毛虫 <i>Gynaephora menyuanensis</i>	瞬时攻击率 Attack rate <i>a</i>	处理时间 Handling time T_h	日最大捕食量 Maximum daily consumption	a/T_h	R^2
雌成虫 Female adult	2龄幼虫 2nd-instar larvae	1.768±0.703 a	0.226±0.020 a	4.4	7.801	0.980
	3龄幼虫 3rd-instar larvae	1.096±0.370 a	0.221±0.023 a	4.5	4.959	0.981
雄成虫 Male adult	2龄幼虫 2nd-instar larvae	5.050±4.090 a	0.284±0.019 a	3.5	17.782	0.983
	3龄幼虫 3rd-instar larvae	0.764±0.221 b	0.247±0.027 a	4.0	3.093	0.987

表中数据为平均数±标准误。同列数据后不同小写字母表示蠋蝽相同性别成虫对不同龄期猎物的功能反应参数经*t*检验法检验差异显著($P<0.05$)。Data are mean±SE. Different lowercase letters in the same column indicate significant differences in functional response parameters between different larval instars of *Gynaephora menyuanensis* consumed by *Arma custos* adults of the same sex, as determined by *t* test ($P<0.05$).

2.3 蠋蝽对门源草原毛虫幼虫的持续捕食能力

蠋蝽成虫能够持续捕食门源草原毛虫2龄和3龄幼虫达14 d以上,在第14天时,雌、雄成虫的存活率仍分别保持在60%和70%以上(图2和图3)。除第2天蠋蝽雌成虫对门源草原毛虫2龄幼虫的单日捕食量显著高于雄成虫的单日捕食量外,其余时间段内两者对门源草原毛虫2龄和3龄幼虫的单日捕食量均无显著差异(图3)。在整个14 d试验周期内,蠋蝽雌、雄成虫对门源草原毛虫2龄幼虫的总捕食量分别为37.2头和34.2头,日均捕食量分别为3.2头和2.7头,均高于对3龄幼虫的总

捕食量(27.7头和25.8头)和日均捕食量(2.3头和2.0头)(图4~5)。蠋蝽雌成虫对2、3龄幼虫的总捕食量均略高于雄成虫,但差异不显著(图4)。蠋蝽雌成虫对门源草原幼虫2龄幼虫的日均捕食量为3.2头,显著高于雄成虫的2.7头,而蠋蝽雌、雄成虫对门源草原毛虫3龄幼虫的日均捕食量均无显著差异(图5)。

3 讨论

本研究系统评估了蠋蝽成虫对门源草原毛虫低龄幼虫的捕食能力与持续控害潜力。结果表明,在

高海拔条件下, 蠋蝽成虫对门源草原毛虫2龄和3龄幼虫均表现出稳定的捕食效应, 日捕食量分别可达4~5头和3~4头, 14 d内总捕食量介于25.8至37.2头之间, 且在整个试验期间未出现捕食能力显著衰退现象, 雌、雄成虫的存活率分别维持在60%和70%

以上。结合本团队前期研究结果即蠋蝽对门源草原毛虫6龄幼虫的日捕食量仅为1~2头(韩舜达等, 2025), 进一步表明蠋蝽对低龄幼虫具有更高的捕食效率, 因而在门源草原毛虫种群发生初期具备良好的控害潜力。

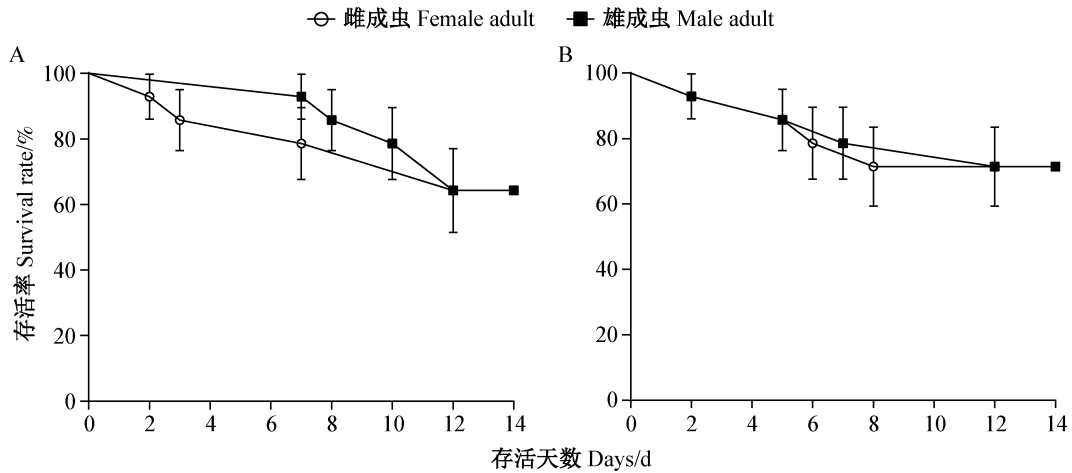


图2 蠋蝽雌、雄成虫持续14 d捕食门源草原毛虫2龄和3龄幼虫的存活曲线

Fig. 2 Survival curves of female and male of *Arma custos* adults continuously fed on 2nd-instar (A) and 3rd-instar (B) larvae of *Gynaephora menyuanensis* over 14 days

图中数据为平均数±标准误。Data are mean±SE.

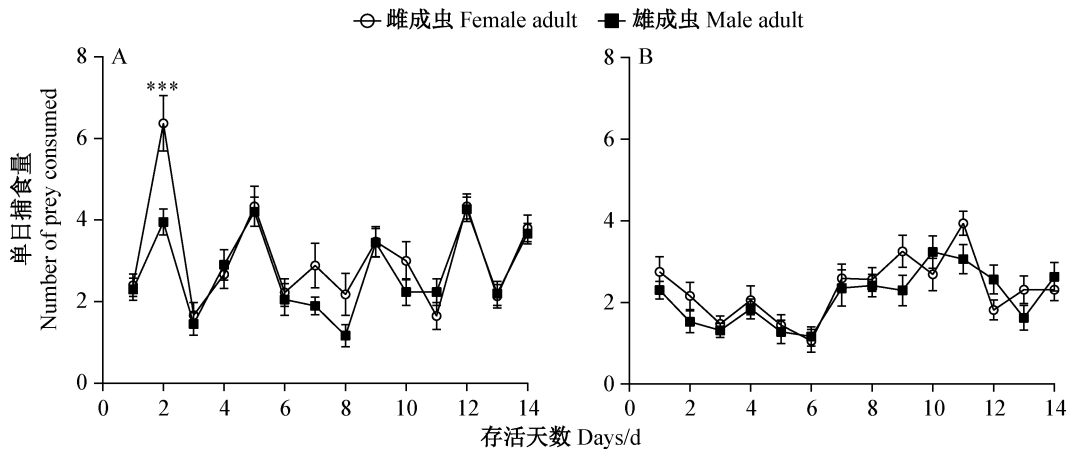


图3 蠋蝽雌、雄成虫连续14 d捕食门源草原毛虫2龄和3龄幼虫的单日捕食量

Fig. 3 Daily prey consumption of female and male *Arma custos* adults on the 2nd-instar (A) and 3rd-instar (B) larvae of *Gynaephora menyuanensis* over 14 consecutive days

图中数据为平均数±标准误。****表示雌、雄成虫的单日捕食量经Šidák多重比较检验法检验差异显著($P<0.001$)。Data are mean±SE. **** indicates a significant difference in daily prey consumption between female and male adults based on Šidák's multiple comparison test ($P<0.001$).

蠋蝽作为一种广谱性捕食天敌, 已被报道可捕食鳞翅目、半翅目等多类害虫。然而, 与常见猎物相比, 本研究中蠋蝽对门源草原毛虫的捕食量相对较低。例如, 其对草地贪夜蛾、棉铃虫 *Helicoverpa armigera* (Hübner) 和斜纹夜蛾 *Spodoptera litura* (Fabricius) 3龄幼虫的日最大捕食量分别为59.7、

50.0和13.7头(王燕等, 2019; 唐艺婷等, 2020; 孙婧婧等, 2021; 陈彬等, 2025), 均显著高于本试验中对门源草原毛虫3龄幼虫的捕食量(4.5头)。类似差异在其他捕食性蝽类中亦有报道, 如益蝽 *Picromerus lewisi* (Scott) 对斜纹夜蛾3龄幼虫的捕食量高于甜菜夜蛾 *Spodoptera exigua* (Hübner), 而对小

菜蛾 *Plutella xylostella* (Linnaeus) 高龄幼虫的捕食量可达每日百余头(唐艺婷, 2020)。这些差异可能源于猎物体型、形态结构、行为防御以及体内次生代谢物等多种因素的共同影响(Huang & Enkegaard, 2010; Messelink et al., 2016)。

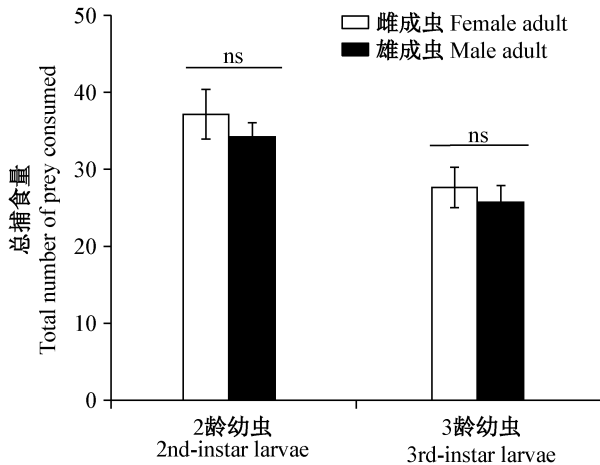


图4 蠋蝽雌、雄成虫持续 14 d 捕食门源草原毛虫 2 龄和 3 龄幼虫的总捕食量

Fig. 4 Total prey consumption of female and male *Arma custos* adults continuously feeding on 2nd-instar and 3rd-instar larvae of *Gynaephora menyuanensis* over 14 days

图中数据为平均数±标准误。ns 表示雌、雄成虫的总捕食量经 Tukey's 多重比较法检验差异不显著。Data are mean±SE. ns indicates no significant difference in total prey consumption between female and male adults by Tukey's multiple comparison test.

值得注意的是, 门源草原毛虫属于毒蛾科, 其幼虫体表常具毒性毛刺或含有磷脂酶 A 等活性物质, 可能对捕食者的取食意愿与消化效率产生抑制(Tyzzar, 1907; De Jong & Bleumink, 1977a, b; De Jong et al., 1982)。磷脂酶 A 广泛存在于长蝽科、姬蝽科、蝽科、猎蝽科、盾蝽科等蝽类唾液腺中, 参与体外消化过程(Bezdi et al., 2012), 在毒蛾幼虫体内的存在可能间接影响蠋蝽的捕食适应性。尽管如此, 蠋蝽对柳毒蛾等毒蛾科害虫仍表现出一定的控害能力(潘淑琴等, 1993), 说明其对该类害虫具备基本的生防适应性。更重要的是, 在本研究设定的 3 000 m 以上高海拔条件下, 蠋蝽仍能维持较高的捕食活性与生存率, 凸显了其在青藏高原等特殊生境中应用的生态价值。

在捕食行为模型方面, 蠋蝽成虫对门源草原毛虫 2 龄和 3 龄幼虫的功能反应均符合 Holling II 型模型, 与已有研究中其对草地贪夜蛾、斜纹夜蛾等的功能反应类型一致(王燕等, 2019; 唐艺婷等, 2020; 孙

婧婧等, 2021)。该模型表明, 在猎物密度较低时, 蠋蝽仍能保持较高的搜寻与攻击效率, 有利于在害虫发生初期实现种群抑制(Varshney et al., 2018; Sajjad et al., 2021)。参数比较显示, 蠋蝽雄成虫对门源草原毛虫 2 龄幼虫的瞬时攻击率最高, 但对 3 龄幼虫的处理时间更短, 反映其对不同龄期猎物的捕食策略存在差异。整体上看, 蠋蝽对门源草原毛虫的捕食效率仍低于对其他鳞翅目害虫的捕食效率, 说明该猎物并非其最适目标, 也提示在实际应用中需结合其他天敌或措施以提升综合防效。

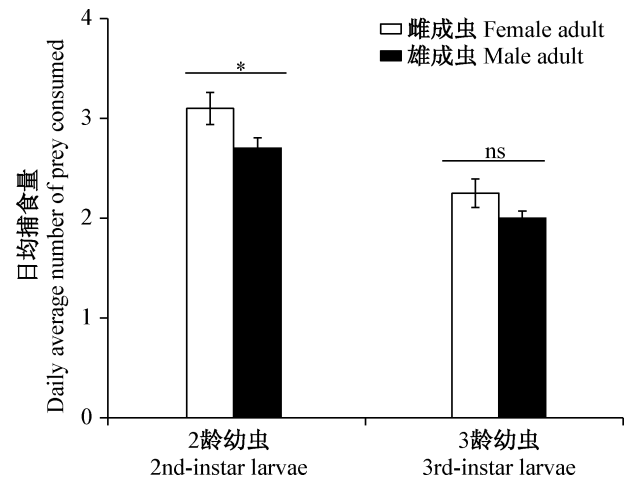


图5 蠋蝽雌雄成虫持续 14 d 捕食门源草原毛虫 2 龄和 3 龄幼虫过程中的日均捕食量

Fig. 5 Daily mean prey consumption of female and male *Arma custos* adults feeding on 2nd-instar (A) and 3rd-instar (B) larvae of *Gynaephora menyuanensis* over 14 days

图中数据为平均数±标准误。* 表示雌、雄成虫的日均捕食量经 Tukey's 多重比较法检验差异显著 ($P < 0.05$), ns 表示两者间差异不显著。Data are mean±SE. * indicates a significant difference ($P < 0.05$), and ns indicates no significant difference, in daily mean prey consumption between female and male adults by Tukey's multiple comparison test.

持续控害试验进一步证实, 蠋蝽在连续 14 d 的捕食过程中未出现捕食量显著下降情况, 尽管后期存活率有所降低, 但仍维持在 60%~70% 以上, 显示其具备在中短期内持续发挥控害作用的潜力。值得关注的是, 试验后期对门源草原毛虫 3 龄幼虫的日均捕食量略有上升, 提示可能存在摄食适应性或行为驯化现象。此外, 蠋蝽雌成虫的捕食量整体略高于雄成虫, 但性别间差异不显著, 交配行为对捕食动态的潜在影响仍有待进一步探讨。本课题组在野外罩笼试验中发现, 蠋蝽在高原温差剧烈 (3~24 °C) 的

环境中可存活超过 50 d,进一步佐证了其对高寒地区环境具有良好的生态适应性。

房文娇等(2024)研究认为,门源草原毛虫在 4 龄阶段进入暴食期,取食量达峰值,因此建议在其进入 4 龄前实施防控,以避免造成不可逆的草场损失。本研究结果为在高海拔地区推广应用蠋蜻防控门源草原毛虫提供了重要的室内生物学依据,但鉴于田间环境的复杂性,后续仍需开展更接近自然条件下的罩笼试验与大田试验,以验证其实际释控效果与生态适应性。

参 考 文 献 (References)

- Bezdi MS, Toorchi M, Pourabad RF, Zarghami N, Nouri MZ, Komatsu S. 2012. Proteome analysis of gut and salivary gland proteins of fifth-instar nymph and adults of the sunn pest, *Eurygaster integriceps*. Archives of Insect Biochemistry and Physiology, 81(2): 105-119
- Chen B, Chen WB, Xue CZ, Li YY, Shen ZJ, Wang MQ, Mao JJ, Dong H, Zhang LS. 2025. Predation capacity of developmental stage *Arma chinensis* to *Spodoptera frugiperda* eggs. Chinese Journal of Biological Control, 41(1): 24-31 (in Chinese) [陈彬, 陈万斌, 薛传振, 李玉艳, 申忠健, 王孟卿, 毛建军, 董辉, 张礼生. 2025. 蠋蜻对草地贪夜蛾卵的捕食能力评价. 中国生物防治学报, 41(1): 24-31]
- Chen KL, Yu XC, Yao BQ, Ma Z, Wang WY, Wang HC, Zhou HK, Zhao XQ. 2016. Spatial distribution of *Gynaephora menyuanensis* under different grazing intensities in alpine meadow. Acta Agricultura Sinica, 24(1): 191-197 (in Chinese) [陈珂璐, 余欣超, 姚步青, 马真, 王文颖, 王慧春, 周华坤, 赵新全. 2016. 不同放牧强度下门源草原毛虫在高寒草甸上的空间分布. 草地学报, 24(1): 191-197]
- De Jong MC, Bleumink E. 1977a. Investigative studies of the dermatitis caused by the larva of the brown-tail moth, *Euproctis chrysorrhoea* L. (Lepidoptera, Lymantriidae), III: chemical analysis of skin reactive substances. Archives for Dermatological Research, 259(3): 247-262
- De Jong MC, Bleumink E. 1977b. Investigative studies of the dermatitis caused by the larva of the brown-tail moth, *Euproctis chrysorrhoea* L. (Lepidoptera, Lymantriidae), IV: further characterization of skin reactive substances. Archives for Dermatological Research, 259(3): 263-281
- De Jong MC, Kawamoto F, Bleumink E, Kloosterhuis AJK, Meijer GT. 1982. A comparative study of the spicule venom of *Euproctis caterpillars*. Toxicon, 20(2): 477-485
- Fang WJ, Li S, Wang SY, Cheng L, Wang C, Chen XJ, Shi HY, Feng XA, Tu XB, Feng SQ, et al. 2024. Studies on feeding characteristics of grassland caterpillar *Gynaephora menyuanensis* and its economic threshold for control in Qinghai. Journal of Plant Protection, 51(5): 1218-1225 (in Chinese) [房文娇, 李霜, 王思宇, 成利, 王成, 陈秀娟, 石浩玉, 冯欣澳, 涂雄兵, 冯士骞, 等. 2024. 青海省门源草原毛虫取食特性及其防控经济阈值. 植物保护学报, 51(5): 1218-1225]
- Han SD, Ye WT, Li QR, Xu BW, Zhang MS, Shen ZJ, Li YY, Zhang LS. 2025. Evaluation of the predatory ability of *Arma chinensis* adults on larvae of *Gynaephora menyuanensis*. Plant Protection, 51(2): 111-117 (in Chinese) [韩舜达, 治文婷, 李秋荣, 徐博文, 张茂森, 申忠健, 李玉艳, 张礼生. 2025. 蠋蜻成虫对门源草原毛虫幼虫的捕食能力评价. 植物保护, 51(2): 111-117]
- Holling CS. 1959. Some characteristics of simple types of predation and parasitism. Canadian Entomologist, 91(7): 385-398
- Huang NX, Enkegaard A. 2010. Predation capacity and prey preference of *Chrysoperla carnea* on *Pieris brassicae*. BioControl, 55(3): 379-385
- Juliano SA. 2001. Nonlinear curve fitting: predation and functional response curves//Scheiner SM, Gurevitch J. Design and analysis of ecological experiments. Oxford: Oxford University Press, pp. 178-196
- Li JL, Li MQ, Lai YP. 2024. Research progress on ecological characteristics and control measures of *Gynaephora qinghaiensis*. Qinghai Prataculture, 33(3): 44-49 (in Chinese) [李静玲, 李美琪, 来有鹏. 2024. 草原毛虫生态学特性及防治措施研究进展. 青海草业, 33(3): 44-49]
- Liu SD. 2023. Investigation of Tachinidae resources in the Alpine grasslands of the eastern edge of Qinghai-Tibet Plateau, China and study on biology (behavior) of tachinid flies parasitic on *Gynaephora caterpillars*. Master thesis. Shenyang: Shenyang Normal University (in Chinese) [刘诗叠. 2023. 青藏高原东缘寄蝇物种多样性和寄蝇对草原毛虫寄生行为的研究. 硕士学位论文. 沈阳: 沈阳师范大学]
- Messelink GJ, Vijverberg R, Leman A, Janssen A. 2016. Biological control of mealybugs with lacewing larvae is affected by the presence and type of supplemental prey. BioControl, 61(5): 555-565
- Ni M, He SD, Li CY. 2011. Observation on the control effect of yak stomatitis caused by grassland caterpillar. Prataculture & Animal Husbandry, (4): 47-48 (in Chinese) [尼玛, 河生德, 李长云. 2011. 草原毛虫引起牦牛口膜炎的防治效果观察. 草业与畜牧, (4): 47-48]
- Pan SQ, Yang XS, Yuan RF, Yang YF. 1993. Determination of the number of prey on the willow moth by the enemy. Forestry Science and Technology, 22(1): 24-26 (in Chinese) [潘淑琴, 杨显山, 苑荣发, 杨玉发. 1993. 蠋敌扑食柳毒蛾数量测定. 吉林林业科技, 22(1): 24-26]
- Qiu CQ, Sun YX, Li LS, Zhou JZ, Chen ST, Zhang LC, Jiao FY, Gao SD, Cao XA. 2004. Investigation of mouth mucous membrane canker in domestic animals in Qilian County of Qinghai Province. Chinese Journal of Veterinary Science and Technology, 34(10): 36-38 (in Chinese) [邱昌庆, 孙应祥, 李连森, 周继章, 陈世堂, 张立成, 焦付佑, 高双娣, 曹小安. 2004. 青海省祁连县家畜口腔黏膜溃烂病的调查. 中国兽医科技, 34(10): 36-38]
- Sajjad S, Sultan A, Khan MF, Keerio ID, Channa MS, Akbar MF. 2021. Biology, life table parameters, and functional response of *Chrysop-*

- erla carnea* (Neuroptera: Chrysopidae) on different stages of invasive *Paracoccus marginatus* (Hemiptera: Pseudococcidae). Journal of Asia-Pacific Biodiversity, 14(2): 174–182
- Shangguan B. 2009. Preliminary report on the study of *Arma custos*. Journal of Gansu Forestry Science and Technology, 34(4): 27–30 (in Chinese) [上官斌. 2009. 蠨螋研究初报. 甘肃林业科技, 34(4): 27–30]
- Solomon ME. 1949. The natural control of animal populations. Journal of Animal Ecology, 18(1): 1–35
- Sun JJ, Wang MQ, Tang YT, Li XY, Zhang LS, Li H. 2021. Predatory functional response of *Arma custos* (Hemiptera: Pentatomidae) to the larvae of *Helicoverpa armigera* (Lepidoptera: Noctuidae). Journal of Plant Protection, 48(5): 1081–1087 (in Chinese) [孙婧婧, 王孟卿, 唐艺婷, 李心钰, 张礼生, 李虎. 2021. 蠨螋对棉铃虫幼虫的捕食功能反应. 植物保护学报, 48(5): 1081–1087]
- Tang YT. 2020. Study on potential of a novel natural enemy insect *Picromerus lewisi* Scott in biological control. Master thesis. Chinese Academy of Agricultural Sciences (in Chinese) [唐艺婷. 2020. 一种新天敌: 益蝽的生物防治潜能研究. 硕士学位论文. 中国农业科学院]
- Tang YT, Wang MQ, Li YY, Liu CX, Mao JJ, Chen HY, Zhang LS. 2020. Predation of *Arma chinensis* on *Spodoptera litura* larvae. Chinese Tobacco Science, 41(1): 62–66 (in Chinese) [唐艺婷, 王孟卿, 李玉艳, 刘晨曦, 毛建军, 陈红印, 张礼生. 2020. 蠨螋对斜纹夜蛾幼虫的捕食作用. 中国烟草科学, 41(1): 62–66]
- Tyzzar EE. 1907. The pathology of the brown-tail moth dermatitis. The Journal of Medical Research, 16(1): 43–64.1
- Varshney R, Budhlakoti N, Ballal CR. 2018. Functional response of *Geocoris ochropterus* Fieber (Hemiptera: Geocoridae) to different egg densities of *Helicoverpa armigera* (Hübner) (Lepidoptera: Noctuidae). Phytoparasitica, 46(4): 451–458
- Wang Y, Zhang HM, Yin YQ, Li XY, Zhao XQ, Tang YT, Wang MQ, Chen AD, Chen FS, Zhang LS. 2019. Predation of adult of *Arma chinensis* to larvae of *Spodoptera frugiperda*. Plant Protection, 45(5): 42–46 (in Chinese) [王燕, 张红梅, 尹艳琼, 李向永, 赵雪晴, 唐艺婷, 王孟卿, 谌爱东, 陈福寿, 张礼生. 2019. 蠨螋成虫对草地贪夜蛾不同龄期幼虫的捕食能力. 植物保护, 45(5): 42–46]
- Xu BW, Li YY, He WW, Xue CZ, Shen ZJ, Mao JJ, Zhang LS, Wu HH. 2025. Research advances in diapause of predatory stink bugs (Hemiptera). Chinese Journal of Biological Control, 41(1): 193–206 (in Chinese) [徐博文, 李玉艳, 贺玮玮, 薛传振, 申忠健, 毛建军, 张礼生, 吴惠惠. 2025. 捕食蝽滞育的研究进展. 中国生物防治学报, 41(1): 193–206]
- Xu CH, Yao DF, Li YM, Yan JJ. 1981. A preliminary study on the predatory natural enemy: the enemy. Forest Science and Technology, (4): 24–27 (in Chinese) [徐崇华, 姚德富, 李英梅, 严静君. 1981. 捕食性天敌: 蠨螋的初步研究. 林业科技通讯, (4): 24–27]
- Yan JQ. 1988. A preliminary observation on the living habits of the enemy. Journal of Shandong Forestry Science and Technology, 18(Suppl. 2): 33–35 (in Chinese) [阎金泉. 1988. 蠨螋生活习性的初步观察. 山东林业科技, 18(增刊2): 33–35]
- Yan L. 2006. Studies of taxonomy, geographic distribution in *Gynaephora* genus and life-history strategies on *Gynaephora menyuanensis*. PhD thesis. Lanzhou: Lanzhou University (in Chinese) [严琳. 2006. 草原毛虫属的分类、地理分布及门源草原毛虫生活史对策的研究. 博士学位论文. 兰州: 兰州大学]
- 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 (in Chinese) [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一新种(膜翅目: 金小蜂科). 林业科学, 56(2): 99–105]
- Zhang QL, Yuan ML. 2013. Research status and prospect of grassland caterpillars (Lepidoptera: Lymantriidae). Pratacultural Science, 30(4): 638–646 (in Chinese) [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]
- Zheng ZY, Chen YW, Wen YG. 1992. Experiments on the use of *Arma custos* (Fabricius) [Hem.: Pentatomidae] to control forest pests. Chinese journal of Biological Control, (4): 155–156 (in Chinese) [郑志英, 陈瑜伟, 温宇光. 1992. 利用蠨螋防治几种林业害虫的试验. 生物防治通报, (4): 155–156]
- Zou DY, Wang MQ, Zhang LS, Zhang Y, Zhang XJ, Chen HY. 2012. Taxonomic and bionomic notes on *Arma chinensis* (Fallou). Zootaxa, 3382(1): 41–52

(责任编辑:王璇)