普通肉食螨对土耳其扁谷盗的捕食研究*

贺培欢[1, 2, 3**] 任 陶[1] 盛林霞[4] 张 涛[2] 姚思敏[1]
鲁玉杰[1, 3] 伍 祎[2***] 曹 阳[2, 3***]

（1. 江苏科技大学粮食学院，镇江 212003；2. 国家粮食和物资储备局科学研究院，北京 100037；
3. 河南工业大学粮食和物资储备学院，郑州 450001；4. 浙江省粮食局直属粮油储备库，杭州 310003）

摘 要 **【目的】** 评估普通肉食螨 *Cheyletus eruditus* 对我国储粮害虫的生物防治潜力，为发展储粮害虫生物防治技术提供理论依据。**【方法】** 本研究通过温湿度控制体系，采用标准化昆虫/螨类饲养方法获得土耳其扁谷盗卵、1-2 龄幼虫及普通肉食螨不同发育阶段个体，在梯度温湿度条件下通过 12 次重复的饲育器对照实验，系统测定了普通肉食螨各螨态对土耳其扁谷盗 *Cryptolestes turcicus* 不同发育阶段的捕食功能反应，并对捕食量-死亡率数据进行分析。**【结果】** 3 种螨态普通肉食螨对土耳其扁谷盗卵和 1 龄幼虫的捕食功能大小依次是：雌成螨>后若螨>原若螨，普通肉食螨雌成螨对土耳其扁谷盗 1 龄幼虫的捕食功能最高，依次大于雌成螨对土耳其扁谷盗 2 龄幼虫和卵的捕食功能。除螨态外，普通肉食螨的捕食能力也受温湿度环境的影响，在 16-28 ℃、75%RH 和在 28 ℃、57%-93%RH 范围内，普通肉食螨雌成螨对土耳其扁谷盗 1 龄幼虫的捕食功能反应均是 HollingⅡ型。雌成螨对土耳其扁谷盗 1 龄幼虫的捕食功能大小与温度呈正相关；在 28 ℃、57%-93%RH 条件下雌成螨对着土耳其扁谷盗 1 龄幼虫的捕食功能与相对湿度不相关，在 75%RH 下的捕食功能最大。**【结论】** 基于 HollingⅡ型功能反应模型研究显示，普通肉食螨各螨态对土耳其扁谷盗不同发育阶段的捕食效能呈密度依赖性正相关，其中雌成螨对卵的捕食优势显著，表明其具备针对储粮扁谷盗害虫的生物防治潜力，适用于抗熏蒸种群的生态调控。

关键词 普通肉食螨；土耳其扁谷盗；储粮害虫；捕食功能；温湿度

Predation of *Cheyletus eruditus* on *Cryptolestes turcicus*

HE Pei-Huan[1, 2, 3**] REN Tao[1] SHENG Lin-Xia[4] ZHANG Tao[2]
YAO Si-Min[1] LU Yu-Jie[1, 3] WU Yi[2***] CAO Yang[2, 3***]

(1. School of Grain Science, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, China; 2. National Grain and Strategic Reserves Administration Science Research Institute, Beijing 100037, China; 3. School of Grain and Material Reserves, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China; 4. Zhejiang Provincial Grain Bureau Directly Affiliated Grain and Oil Reserve Depot, Hangzhou 310003, China)

Abstract **[Aim]** To determine if the predatory mite, *Cheyletus eruditus*, has the potential to act as a biological control for grain storage pests in China. **[Methods]** In this study, the predation function of each mite state of common carnivorous mites to different developmental stages of *Cryptolestes turcicus* was systematically measured through 12 replicates of feeder control experiments under gradient temperature and humidity conditions, and the predation volume-mortality data were analyzed. **[Results]** The predatory functional response of the 3 developmental stages of *C. eruditus* to *C. turcicus*, can be ranked as follows: Adult females > deutonymphs > protonymphs. The functional response of adult females to 1st instar larvae was higher than that to second-instar larvae, or eggs. The functional response of adult females to 1st instar larvae was of the Holling type Ⅱ within a temperature range of 16-28 ℃ and 75% RH, and at 28 ℃ at a RH of 57%-93%. The functional response of adult

*资助项目 Supported projects：国家国际科技合作专项（2013DFG32350）；2022 年引进博士科研启动费（1182932209）；储粮捕食螨快速识别试验（2185082303）

**第一作者 First author，E-mail：hph@just.edu.cn

***共同通讯作者 Co-corresponding authors，E-mail：wuyi@ags.ac.cn；cy@ags.ac.cn

收稿日期 Received：2024-06-27；接受日期 Accepted：2025-01-10

females to 1st instar larvae was positively correlated with temperature. Although the functional response of adult females to 1st instar larvae was highest at 75% RH, it was not correlated with humidity at a temperature of 28 ℃ and RH values of 57%-93%. **[Conclusion]** Based on research using the Holling Ⅱ functional response model, the predation efficiency of different stages of the predatory mite *C. eruditus* on different developmental stages of *C. turcicus* exhibits a density - dependent positive correlation. Female adult mite show a significant predation advantage on the eggs of *C. turcicus*, indicating its potential for biological control against stored-grain pests and applicability in ecological regulation of resistant fumigation populations.

Key words *Cheyletus eruditus*; *Cryptolestes turcicus*; stored grain pests; predatory function; temperature and humidity

在粮食储藏过程中，磷化氢等化学农药的长期单一大量使用导致害虫抗性问题逐渐产生。近 30 年来，害虫抗性尤其是扁谷盗类害虫对磷化氢的抗性系数不断增加，部分害虫已对磷化氢熏蒸产生严重抗性，出现熏蒸后仍存活的情况（Lukáš *et al.*，2007）。在化学药品使用泛滥、害虫抗性系数持续增长、农产品等食品安全隐患日益突出的大环境下，绿色、安全、无污染、经济的生物防治技术研究日益受到重视。生物防治作为一种储粮害虫综合治理的手段，具有无毒性、对生态环境无污染、不会使害虫产生抗性等优点，可作为化学和物理防治的补充策略甚至替代方法。近年来，有关利用天敌进行害螨和害虫防治的研究逐渐增多，有的已经在农业生产中广泛应用起来。

仓库中储粮害螨和害虫的天敌资源十分丰富，据 Haines（2000）的调查总结发现，储粮虫（螨）的天敌多达 300 种，分别包括昆虫纲的 189 种和蛛形纲的 111 种。虽然昆虫纲和蛛形纲中都有重要的天敌资源，但利用天敌进行储粮害螨和害虫的防治研究中，国内关于利用蛛形纲进行生物防治的研究资料甚少。在粮库或者面粉厂等地方，大量存在多种捕食螨等蛛形纲动物。捕食螨类通常作为微小害虫的天敌，具有种群增长速度快、生产成本低以及长效经济等优点（伍祎，2023），这些捕食螨对储藏环境的适应和它们的捕食喜好，为储粮害螨和害虫防治开辟了一条崭新的途径，运用“以螨治螨”、“以螨治虫”的生物防控技术对安全、绿色储粮具有十分重要的意义。

螨类属于蛛形纲、蜱螨亚纲 Acari 的一大类群微小节肢动物。储粮螨类分布广泛，种类繁多，粉螨亚目 Acaridae、辐螨亚目 Trombidiidae、革螨亚目 Gamasida 和甲螨亚目 Oribatida 螨类是储粮螨类的重要组成部分（沈兆鹏，1988，2005），其繁殖速度较快，甚至超过储粮中的昆虫（张宇，2012）。储粮螨类中既有危害储粮品质的粉螨，也有捕食害螨和昆虫的捕食螨（梁伟超等，2005；林坚贞和张艳璇，2006；张宇，2012）。近年来，捕食螨在仓储害虫及螨类防治中的应用研究取得了显著进展。马六甲肉食螨 *Cheyletus malaccensis* 通过取食害虫和害螨的卵及低龄幼虫，能够显著降低储粮害虫的种群密度（伍祎，2023）。普通肉食螨 *Cheyletus eruditus* 作为一种常见的捕食螨，其捕食功能得到了广泛研究。普通肉食螨对粉螨科 *Acaridae* 和食甜螨科 *Glycyphagidae* 的螨类，以及仓储害虫如杂拟谷盗 *Tribolium confusum* 和赤拟谷盗 *Tribolium castaneum* 的卵和幼虫具有显著的捕食作用（李娜等，2017）。安若飞等（2024）和杨建东等（2024）的研究表明，捕食螨与化学药剂结合的“生-化协同防治”方法可以有效延长防治时间、减少农药使用量，并保障农产品质量。在实际应用方面，王雅婷等（2022）在戈壁日光温室中投放智利小植绥螨 *Phytoseiulus persimilis*，发现其对人参果红蜘蛛具有较好的抑制作用。国际上，捷克在利用捕食螨进行储粮害螨和害虫的生物防治方面也开展了深入研究（Collins，2012），Lukáš 等（2007）研究认为普通肉食螨在防治储粮中有害节肢动物方面具有良好的效果。

土耳其扁谷盗 *Cryptolestes turcicus* 为我国储粮常见的扁谷盗类害虫，在山东、湖北、海南、广西、重庆、甘肃、青海、宁夏、新疆等地广泛分布。本研究通过研究普通肉食螨原若螨、后若螨和雌成螨对土耳其扁谷盗卵、1 龄幼

虫和 2 龄幼虫的捕食功能和温度和湿度对其影响以期探索出普通肉食螨防治土耳其扁谷盗的新生物防治方法。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 试虫（螨） 本试验所用试虫均由国家粮食局科学研究院培养。

粗脚粉螨 *Acarus siro*：以全麦粉：燕麦粉：酵母=5：5：1 均匀混合配成饲料，在 28 ℃、相对湿度（Relative humidity，RH）75% 的黑暗环境下进行饲养。初始样品从捷克农作物研究所引进。

普通肉食螨：以粗脚粉螨作为饲料，在 28 ℃、75% RH 的黑暗环境下进行饲养。初始样品从捷克农作物研究所引进。

土耳其扁谷盗：采集于广东肇庆一储备库（仓内储存的稻谷），以全麦粉：燕麦片：酵母 = 10：10：1 均匀混合配成饲料，在 27 ℃、75% RH 的黑暗环境下饲养。

1.1.2 试验工具与设备 饲育器（图 1），恒温恒湿培养箱（德国 BINDER 公司生产），ST70 双目体视显微镜（舜宇仪器有限公司生产），DGG-9140BD 电热恒温鼓风干燥箱（上海森信实验仪器有限公司生产），SB16001 电子

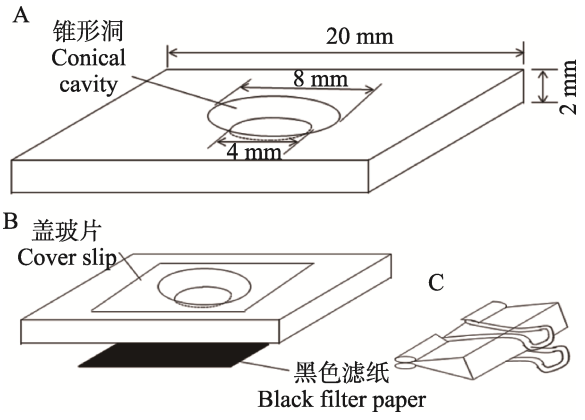

图 1 示意图

Fig. 1 Schematic diagram

A. 饲育器；B. 饲育器使用；C. 长尾夹。

A. Breeding apparatus；B. Application；C. Binder clips.

秤（梅特勒-托利多仪器有限公司生产），玻璃干燥器，培养瓶，培养皿（D=70 mm），0 号毛笔，害虫分选筛，温度计等。

将黑色滤纸粘贴在饲育器（A）的底部，黑色滤纸使饲育器具有透气性（B），并使观察更加方便清晰；试验过程中将试验试虫（螨）放置在饲育器内，然后盖上盖玻片（B），并用长尾夹（C）将盖玻片和饲育器夹紧，防治螨的逃逸；最后将压盖好的饲育器放置在试验条件下培养。

1.2 试验方法

1.2.1 温湿度控制 使用 Binder 恒温培养箱控制温度；在干燥器内配制氯化钠饱和溶液以控制 75%的相对湿度环境。

1.2.2 土耳其扁谷盗的饲养与筛选

3 种土耳其扁谷盗卵：在洁净的培养瓶内加入 20 g 全麦粉细粉（过 120 目筛），随机挑取 600 头羽化 20 d 的扁谷盗成虫接入培养瓶内；将新装有扁谷盗的培养瓶放在 27 ℃、75% RH 的黑暗环境下进行饲养；1 d 后将培养瓶内的试虫和全麦粉细粉分别经 40 和 80 目筛筛检即可得到扁谷盗卵。

土耳其扁谷盗 1 龄和 2 龄幼虫：获得扁谷盗卵后，将得到的卵放入装有全麦粉细粉（过 120 目筛）的新培养瓶内；将接有扁谷盗卵的培养瓶放在 27 ℃、75% RH 的黑暗环境下进行饲养；4 和 9 d 后分别将培养瓶内的试虫和全麦粉细粉经 40 目筛筛检即可得到扁谷盗 1 龄幼虫和 2 龄幼虫。

1.2.3 普通肉食螨的饲养与筛选

饲养扩繁：在牛皮纸袋里装 100 g 莴苣种子，然后将袋子放入干燥器 2 d（干燥器内的相对湿度是 75%）；挑 20 头普通肉食螨成螨放到牛皮纸袋内（主营孤雌生殖）；加入 0.02 g 粗脚粉螨；22 ℃、75% RH 环境下饲养；过筛检查普通肉食螨的数量，数量少时重新倒回纸袋内；普通肉食螨数量增加时，也增大粗脚粉螨数量，当普通肉食螨的数量增大至 100 头后，将多出的普通肉食螨按上述方法扩繁。

普通肉食螨不同螨态的挑取：不同螨态普通肉食螨的形态特征分别为成螨较其他螨态个

体大、身体发黄饱满，且须肢粗壮，约是前足的 3 倍；后若螨个体比成螨稍小，须肢约是前足的 2 倍；原若螨与幼螨个体相差不大，相对于幼螨的 3 对足，原若螨有 4 对足，可明显区分。

1.2.4　普通肉食螨对土耳其扁谷盗的捕食功能测定　试验组：每个饲育器加入 1 头普通肉食螨雌成螨，分别挑入 1、2、3、5、7 和 10 粒土耳其扁谷盗卵（均为同一天内产的卵）放入饲育器中；对照组：每个饲育器分别挑入 1、2、3、5、7 和 10 粒土耳其扁谷盗卵（均为同一天内产的卵）放入饲育器中。将饲育器放置在 28 ℃、75% RH 条件下培养，每个试验重复 12 次，24 h 后检查记录并计算普通肉食螨雌成螨对土耳其扁谷盗卵的捕食量。

按照上述方法，记录普通肉食螨原若螨、后若螨和雌成螨对土耳其扁谷盗卵、1 龄幼虫、2 龄幼虫的捕食情况。

1.2.5　不同温湿度对普通肉食螨对土耳其扁谷盗捕食功能的影响　设置不同水平的温度、湿度，温度梯度设置为：16、20、24 和 28 ℃，湿度梯度设置为：57%、75%和 93% RH，以模拟并覆盖我国不同储粮生态区的仓内湿度条件。每组温湿度组合条件下，分别设有试验组和对照组，每个试验重复 12 次。

试验组：每个饲育器加入 1 头普通肉食螨雌成螨，分别挑入 1、2、3、5、7 和 10 头土耳其扁谷盗 1 龄幼虫（均为同一天孵化）放入饲育器中；对照组：每个饲育器分别挑入 1、2、3、5、7 和 10 头土耳其扁谷盗 1 龄幼虫（均为同一天孵化）放入饲育器中。24 h 后检查并记录土耳其扁谷盗 1 龄幼虫的死亡量。对土耳其扁谷盗卵和 2 龄幼虫的捕食功能研究方法相同，仅把被捕食对象换成土耳其扁谷盗卵和 2 龄幼虫。

1.3　数据处理

数据的统计和分析采用 Excel 2021 进行整理和画图，结果用平均值±标准差的形式表示。

2　结果与分析

2.1　普通肉食螨对土耳其扁谷盗卵的捕食功能

各螨态普通肉食螨对土耳其扁谷盗卵的捕食功能反应见图 2。研究表明普通肉食螨的原若螨、后若螨和成螨对土耳其扁谷盗卵的捕食功能反应均是 Holling Ⅱ 型，用 Holling Ⅱ 型圆盘方程拟合的功能反应参数如表 1 所示。随着土耳其扁谷盗卵密度的增加，普通肉食螨原若螨、后若螨和雌成螨对土耳其扁谷盗卵的捕食量也逐渐增大。在不同密度土耳其扁谷盗卵的环境下，普通肉食螨 3 种螨态的日捕食量大小是：雌成螨>后若螨>原若螨。

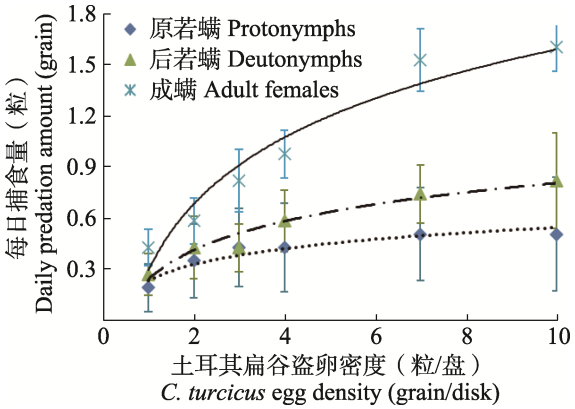

图 2　普通肉食螨对土耳其扁谷的捕食功能反应

Fig. 2　Functional response of *Cheyletus eruditus* on the egg of *Cryptolestes turcicus*

普通肉食螨原若螨、后若螨和雌成螨对土耳其扁谷盗卵的捕食功能不同。由表 1 可知，普通肉食螨的不同螨态对土耳其扁谷盗卵的攻击系数也不同，以雌成螨的攻击系数最大，为 0.417，其次是后若螨，原若螨对土耳其扁谷盗卵的攻击系数最小，为 0.245；研究表明，不同螨态的普通肉食螨对土耳其扁谷盗卵的捕食能力存在差异，其最大捕食量的大小顺序为：雌成螨>后若螨>原若螨。且普通肉食螨雌成螨的最大捕食量明显大于后若螨和原若螨；比较不同螨态普通肉食螨对土耳其扁谷盗卵的捕食效能，发现雌成螨的捕食效能最大，是原若螨捕食效能的 6.7 倍，约是后若螨对土耳其扁谷盗卵的捕食效能的 4 倍。由此可见，雌成螨捕食土耳其扁谷盗卵的功能明显大于普通肉食螨原若螨和后若螨。

2.2　普通肉食螨对土耳其扁谷盗 1 龄幼虫的捕食功能

各螨态普通肉食螨对土耳其扁谷盗 1 龄幼

表 1 不同螨态普通肉食螨对不同虫态土耳其扁谷盗的捕食功能反应

Table 1 Functional response of *Cheyletus eruditus* on the different stages of *Cryptolestes turcicu*

发育阶段 Developmental stage		不同猎物密度下捕食螨的日捕食量（粒） Daily predation at different prey densities (grain)						功能反应（Holling-Ⅱ） Functional response (Holling-Ⅱ)			
普通肉食螨 *C.eruditus*	土耳其扁谷盗 *C.turcicus*	猎物密度（粒/盘） Predation density (grain/disk)						攻击系数 Attack factor	每日最大捕食量（粒） Daily maximum predation (grain)	每日捕食效能（粒） Daily redation efficacy grain	功能方程 Functional equations
		1	2	3	4	7	10				
原若螨 Raw mites	卵 Eggs	0.2	0.3	0.4	0.4	0.5	0.5	0.245	0.740	0.181	N_a=0.245N_0/(1+0.331N_0)
	1 龄幼虫 1st instar larvae	0.4	0.9	1.2	1.6	2.2	2.3	0.506	5.106	2.584	N_a=0.506N_0/(1+0.099N_0)
	2 龄幼虫 2nd instar larvae	0	0	0.2	0.3	0.5	0.5	×	×	×	×
后若螨 Posterior mites	卵 Eggs	0.3	0.4	0.4	0.6	0.8	0.8	0.295	1.145	0.338	N_a=0.295N_0/(1+0.258N_0)
	1 龄幼虫 1st instar larvae	0.6	1.2	1.6	1.9	3.4	3.5	0.627	10.175	6.379	N_a=0.627N_0/(1+0.062N_0)
	2 龄幼虫 2nd instar larvae	0.2	0.3	0.4	0.6	0.8	0.9	×	×	×	×
雌成螨 Female adult mites	卵 Eggs	0.4	0.6	0.8	1.0	1.6	1.7	0.417	2.903	1.211	N_a=0.417N_0/(1+0.144N_0)
	1 龄幼虫 1st instar larvae	0.8	1.5	2.2	2.8	4.8	5.8	0.784	26.332	20.643	N_a=0.784N_0/(1+0.030N_0)
	2 龄幼虫 2nd instar larvae	0.4	0.8	1.1	1.6	2.3	2.8	0.450	8.101	3.643	N_a=0.450No/(1+0.056 N_0)

N_0 表示初始猎物密度；N_a 表示日捕食量；×表示无拟合和计算结果。

N_0 indicates the initial prey density; N_a indicates the daily predation amount; ×indicates no fitting and calculation results.

虫的捕食功能反应见图 3，普通肉食螨的原若螨、后若螨和成螨对土耳其扁谷盗 1 龄幼虫的捕食功能反应均是 Holling Ⅱ 型，用 Holling Ⅱ 型圆盘方程拟合的功能反应参数如表 1 所示。在不同密度土耳其扁谷盗 1 龄幼虫的环境下，普通肉食螨 3 种螨态的日捕食量大小是：雌成螨>后若螨>原若螨。当猎物密度由 3 头增加至 10 头时，普通肉食螨原若螨和后若螨的日捕食量分别约增加 1 倍，而雌成螨每日的捕食量增加 1.6 倍，达 5.8 头。

普通肉食螨的不同发育阶段对土耳其扁谷盗 1 龄幼虫的捕食功能存在差异，且对土耳其扁谷盗 1 龄幼虫的攻击系数也各不相同。原若螨对土耳其扁谷盗 1 龄幼虫的攻击系数最小，

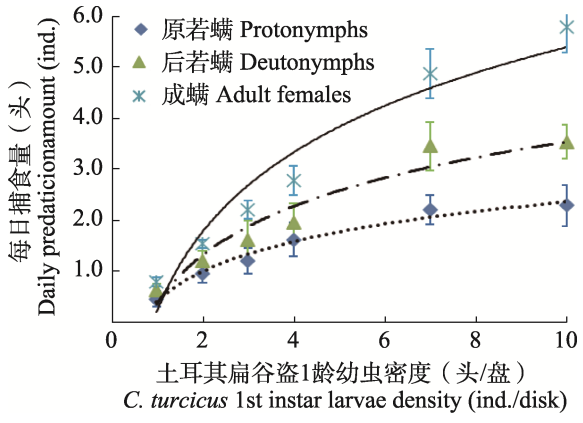

图 3 普通肉食螨对土耳其扁谷盗 1 龄幼虫的捕食功能反应

Fig. 3 Functional response of *Cheyletus eruditus* on the 1st instar larvae of *Cryptolestes turcicus*

仅为 0.506，雌成螨的攻击系数最高，达 0.784；比较不同螨态普通肉食螨对土耳其扁谷盗 1 龄幼虫的捕食效能，发现雌成螨的捕食效能最大，其次是后若螨，原若螨对土耳其扁谷盗 1 龄幼虫的捕食效能最小。不同螨态普通肉食螨对土耳其扁谷盗 1 龄幼虫的捕食能力大小依次是雌成螨>后若螨>原若螨，且雌成螨捕食土耳其扁谷盗 1 龄幼虫的能力明显大于普通肉食螨原若螨和后若螨。

2.3　普通肉食螨对土耳其扁谷盗 2 龄幼虫的捕食功能

各螨态普通肉食螨对土耳其扁谷盗 2 龄幼虫的捕食功能反应见图 4。普通肉食螨雌成螨对土耳其扁谷盗 2 龄幼虫的捕食功能反应是 Holling Ⅱ型，用 Holling Ⅱ型圆盘方程拟合的功能反应参数如表 1 所示；普通肉食螨原若螨和后若螨对土耳其扁谷盗 2 龄幼虫的捕食功能反应不属 Holling Ⅱ型。不同螨态普通肉食螨对土耳其扁谷盗 2 龄幼虫的捕食能力差异较大，雌成螨对土耳其扁谷盗2龄幼虫的捕食能力最强，后若螨次之，原若螨对土耳其扁谷盗 2 龄幼虫的捕食能力最差。

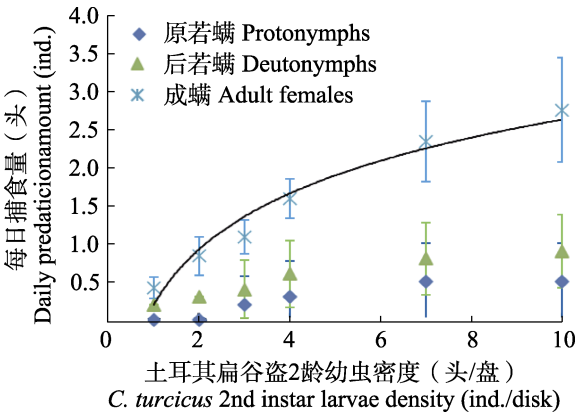

图 4　普通肉食螨对土耳其扁谷盗 2 龄幼虫的捕食功能反应

Fig. 4　Functional response of *Cheyletus eruditus* on the 2nd instar larvae of *Cryptolestes turcicus*

普通肉食螨雌成螨对土耳其扁谷盗 2 龄幼虫的捕食功能属 Holling Ⅱ型，普通肉食螨原若螨和后若螨对土耳其扁谷盗 2 龄幼虫的捕食功能反应均不属 Holling Ⅱ型。普通肉食螨雌成螨对土耳其扁谷盗 2 龄幼虫的攻击系数为 0.450，对土耳其扁谷盗 2 龄幼虫的最大捕食量为 8.101 头/d，对土耳其扁谷盗 2 龄幼虫的捕食效能为 3.643 头/d。

不同螨态普通肉食螨对土耳其扁谷盗各虫态的捕食功能不同。普通肉食螨雌成螨对土耳其扁谷盗 1 龄幼虫的攻击系数依次大于对土耳其扁谷盗 2 龄幼虫和卵的攻击系数；普通肉食螨原若螨和后若螨对土耳其扁谷盗 1 龄幼虫的攻击系数均大于对土耳其扁谷盗卵的攻击系数。

2.4　温度对普通肉食螨捕食功能的影响

不同温度下普通肉食螨雌成螨对土耳其扁谷盗 1 龄幼虫的捕食功能反应见图 5。普通肉食螨雌成螨在不同温度下对土耳其扁谷盗 1 龄幼虫的捕食功能反应均是 Holling Ⅱ型，用 Holling Ⅱ型圆盘方程拟合的功能反应参数如表 2 所示。如表 2 和图 5 所示，在实验温度梯度（16-28 ℃）范围内，普通肉食螨雌成螨对土耳其扁谷盗 1 龄幼虫的日捕食量呈现显著温度依赖性增长趋势。当猎物密度从 1 头/组增至 10 头/组时，不同温度下的捕食量都随之上升，符合 Holling Ⅱ型功能反应模型特征。此外，温度与密度的协同效应显著，在 28 ℃和高密度（10 头）条件下捕食效率达到峰值，其攻击系数较 16 ℃时提升 3.9 倍，可能是温度升高通过加速捕食者代谢活动显著强化了密度依赖的捕食效能。当猎物

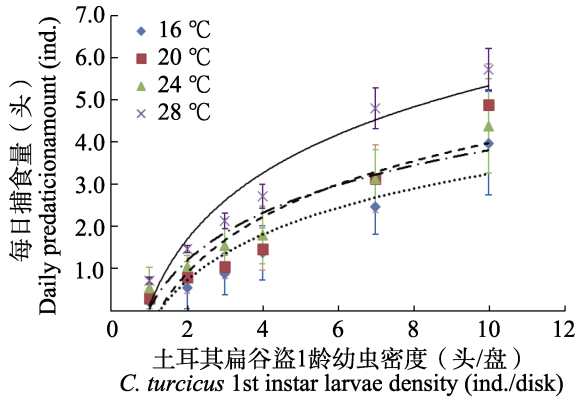

图 5　不同温度下普通肉食螨对土耳其扁谷盗 1 龄幼虫的捕食功能反应

Fig. 5　Functional response of *Cheyletus eruditus* on the 1st instar larvae of *Cryptolestes turcicus* under different levels of temperature

表 2 普通肉食螨不同温度下对土耳其扁谷盗 1 龄幼虫的捕食功能反应模型（Holling-Ⅱ）

Table 2 Functional response model of *Cheyletus eruditus* on the 1st instar of *Cryptolestes turcicus* under different temperatures

温度（℃） Temperature (℃)	不同猎物密度下的日捕食量（头） Daily predation at different prey densities (ind.) 猎物密度（头/盘） Predation density (ind./disk)						功能反应（Holling-Ⅱ） Functional response (Holling-Ⅱ)			
	1	2	3	4	7	10	攻击系数 Attack factor	最大捕食量（头/d） Maximum predation (ind./d)	捕食效能（头/d） Predation efficacy (ind./d)	功能方程 Functional equations
16	0.3	0.6	0.9	1.4	2.5	4.0	0.201	4.177	0.840	$N_a=0.201N_0/(1+0.048N_0)$
20	0.3	0.8	1.1	1.5	3.2	4.9	0.344	11.058	3.804	$N_a=0.344N_0/(1+0.031N_0)$
24	0.6	1.1	1.6	1.8	3.2	4.4	0.575	16.349	9.401	$N_a=0.575N_0/(1+0.035N_0)$
28	0.8	1.5	2.2	2.8	4.8	5.8	0.784	26.332	20.642	$N_a=0.784N_0/(1+0.030N_0)$

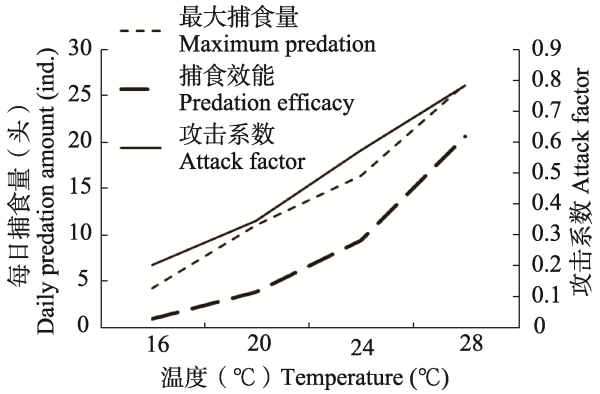

图 6 不同温度下普通肉食螨对土耳其扁谷盗 1 龄幼虫的攻击系数、捕食效能和最大捕食量

Fig. 6 Response parameters of *Cheyletus eruditus* on the 1st instar larvae of *Cryptolestes turcicus* under different temperatures

密度为 10 头时，普通肉食螨雌成螨在 16、20、24 和 28 ℃下对土耳其扁谷盗 1 龄幼虫的日捕食分别为 4.0、4.9、4.4 和 5.8 头/d。

不同温度条件下普通肉食螨雌成螨对土耳其扁谷盗 1 龄幼虫的捕食功能具有差异。由表 2 可知，普通肉食螨雌成螨在不同温度条件下对土耳其扁谷盗 1 龄幼虫的攻击系数不同，在 28 ℃下对土耳其扁谷盗 1 龄幼虫的攻击系数最大，约是 16 ℃下攻击系数的 4 倍；比较不同温度下普通肉食螨对土耳其扁谷盗 1 龄幼虫的捕食效能，发现 28 ℃下的捕食效能最大，为 20.642 头/d，明显大于 16、20 和 24 ℃下的捕食效能；16 ℃下对土耳其扁谷盗 1 龄幼虫的捕食效能最小。

对普通肉食螨雌成螨在不同温度下的攻击系数、捕食效能和最大捕食量进行线性拟合，拟合方程及拟合优度分别为：攻击系数，$y=0.198x-0.019$（$R^2=0.991$）；捕食效能，$y=6.500x-7.579$（$R^2=0.923$）；最大捕食量，$y=7.175x-3.46$（$R^2=0.983$），拟合度均在 0.900 以上。由表 2 和图 6 可知，在 16-28 ℃范围内，普通肉食螨雌成螨对土耳其扁谷盗 1 龄幼虫的捕食功能与温度呈正相关，随着温度的的升高而逐渐增大，且 28 ℃下的捕食功能远大于 16、20 和 24 ℃下对土耳其扁谷盗 1 龄幼虫的捕食功能。

2.5 相对湿度对普通肉食螨捕食功能的影响

不同湿度下普通肉食螨雌成螨对土耳其扁谷盗 1 龄幼虫的捕食功能反应见图 7。普通肉食螨雌成螨在不同湿度下对土耳其扁谷盗 1 龄幼虫的捕食功能反应均是 HollingⅡ型，用 HollingⅡ型圆盘方程拟合的功能反应参数如表 3 所示。在 57%-93% RH 范围内 3 个试验湿度梯度中，普通肉食螨雌成螨对土耳其扁谷盗 1 龄幼虫的日捕食量随着幼虫密度的增加而逐渐增大；各土耳其扁谷盗 1 龄幼虫密度下，普通肉食螨雌成螨对其的日捕食量与湿度大小不呈线性相关性。

不同相对湿度条件下普通肉食螨雌成螨对

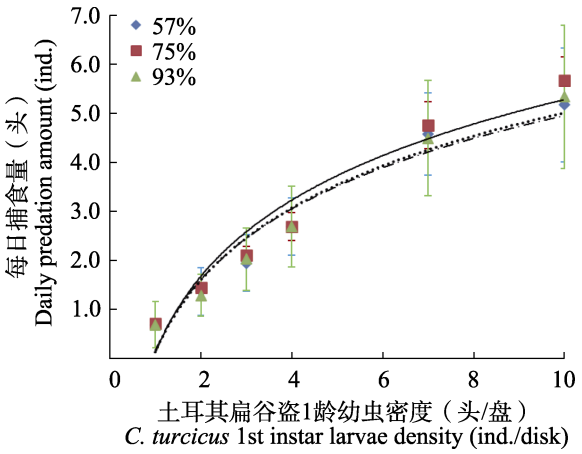

图 7　不同湿度下普通肉食螨对土耳其扁谷盗 1 龄幼虫的捕食功能反应

Fig. 7　Functional response of *Cheyletus eruditus* on the 1st instar larvae of *Cryptolestes turcicus* under different levels of humidity

土耳其扁谷盗 1 龄幼虫的捕食功能不同。普通肉食螨雌成螨在不同相对湿度条件下对土耳其扁谷盗 1 龄幼虫的攻击系数不同。在 57%-93% RH 范围内，普通肉食螨雌成螨对土耳其扁谷盗 1 龄幼虫的捕食功能不与相对湿度的大小呈正相关，在 75% RH 下的捕食功能最大。

3　讨论

普通肉食螨雌成螨对土耳其扁谷盗 1 龄幼虫的攻击系数依次大于对 2 龄幼虫和卵的攻击系数，原若螨和后若螨对土耳其扁谷盗 1 龄幼虫的攻击系数均大于对卵的攻击系数。这可能是由于土耳其扁谷盗幼虫个体柔软，体壁较薄，容易被普通肉食螨须肢上的牙齿刺破，相比之下，土耳其扁谷盗卵壳外层有角质成分的保护层，增加了捕食的难度。因此，普通肉食螨对土耳其扁谷盗幼虫的捕食效率更高。由于土耳其扁谷盗 2 龄幼虫的个体明显大于普通肉食螨原若螨和后若螨，故普通肉食螨原若螨和后若螨对土耳其扁谷盗 2 龄幼虫的捕食能力较弱，不符合 Holling-Ⅱ模型。

比较不同螨态普通肉食螨对土耳其扁谷盗卵、1 龄幼虫的攻击系数、最大捕食量和捕食效能，均得到雌成螨>后若螨>原若螨。由此可见，雌成螨捕食土耳其扁谷盗卵、1 龄幼虫的能力最强，其次是后若螨，捕食能力最小的是原若螨，符合捕食螨的生物学特性（吴圣勇，2011；贺成龙，2012；宋树贤等，2012；Pereira de Sousa Neto *et al.*，2019）。

Barke（1991）曾在 25 ℃，76%相对湿度条件下研究普通肉食螨对土耳其扁谷盗的捕食情况，发现普通肉食螨平均每天捕食（1.2±1.3）粒土耳其扁谷盗卵，平均每天捕食（4.0±2.8）头土耳其扁谷盗 1 龄幼虫。本研究发现，普通肉食螨雌成螨对土耳其扁谷盗卵、1 龄幼虫和 2 龄幼虫的捕食功能均符合 HollingⅡ型，原若螨和对土耳其扁谷盗卵、1 龄幼虫的捕食功能均符合 HollingⅡ型，可利用普通肉食螨尤其是雌成螨对土耳其扁谷盗进行生物防治。

表 3　普通肉食螨不同湿度下对土耳其扁谷盗 1 龄幼虫的捕食功能反应模型（Holling-Ⅱ）

Tabel 3　Functional response model of *Cheyletus eruditus* on the 1st instar of *Cryptolestes turcicus* under different levels of humidity

相对湿度（%）Relative humidity (%)	不同猎物密度下的日捕食量（头）Daily predation at different prey densities (ind.)						功能反应（Holling-Ⅱ）Functional response (Holling-Ⅱ)			
	猎物密度（头/盘）Predation density (ind./disk)						攻击系数 Attack factor	最大捕食量（头/d）Maximum predation (ind./d)	捕食效能（头/d）Predation efficacy (ind./d)	功能方程 Functional equations
	1	2	3	4	7	10				
57	0.7	1.4	2.0	2.8	4.7	5.3	0.759	22.751	17.268	$N_a=0.759N_0/(1+0.034N_0)$
75	0.8	1.5	2.2	2.8	4.8	5.8	0.784	26.332	20.642	$N_a=0.784N_0/(1+0.030N_0)$
93	0.7	1.3	2.1	2.8	4.6	5.4	0.748	24.749	18.512	$N_a=0.748N_0/(1+0.030N_0)$

通常研究者希望将普通肉食螨用于对书虱类害虫的生物防治，比较其对土耳其扁谷盗和嗜卷书虱 *Liposcelis bostrychophila* 的捕食功能，发现普通肉食螨对土耳其扁谷盗 1 龄幼虫的攻击系数为 0.506-0.784，对嗜卷书虱第 1 若虫的攻击系数为 0.092-0.515；普通肉食螨对土耳其扁谷盗 1 龄幼虫的捕食效能为 2.584-20.643，对嗜卷书虱第 1 若虫的捕食效能为 0.181-2.426；普通肉食螨对土耳其扁谷盗 1 龄幼虫的捕食功能明显大于对嗜卷书虱第 1 若虫（贺培欢等，2016）。

在 16-28 ℃、75% RH 条件下，普通肉食螨雌成螨对土耳其扁谷盗 1 龄幼虫的捕食功能随着温度的升高逐渐增大，且 28 ℃下的捕食功能明显大于 16、20 和 24 ℃下对土耳其扁谷盗 1 龄幼虫的捕食功能。马六甲肉食螨 *Cheyletus malaccensis* 对粗脚粉螨的捕食能力也受温度显著影响，32 ℃时马六甲肉食螨对粗脚粉螨的日捕食率最高，不同温度下马六甲肉食螨对粗脚粉螨的特定年龄捕食率从高到低依次为：32 ℃> 30 ℃>22 ℃（孙为伟，2019）；鳞翅触足螨 *Cheletomorpha lepidopierorum* 对腐食酪螨 *Tyrophagus putrescentiae* 的捕食研究同样证明在一定的范围内捕食效能与温度变化呈正相关（夏斌等，2007b）；不同温度对安德森钝绥螨 *Amblyseius andersoni* 的发育、繁殖、寿命和生命表参数均有显著影响（李玉晶，2023）。夏斌等（2007a）研究了不同温度下普通肉食螨对椭圆食粉螨 *Aleuroglyphus ovatus* 的功能反应，也发现普通肉食螨在 20-28 ℃下对椭圆食粉螨的捕食功能均是 Holling Ⅱ型，且普通肉食螨在 28 ℃具有较高的捕食效能。

以往研究发现普通肉食螨等捕食螨的捕食功能受温度影响，但未对相对湿度对其捕食功能的影响进行细致深入研究（Barke，1991；Sun，2023）。本试验研究了在 28 ℃、57%-93% RH 条件下普通肉食螨雌成螨对土耳其扁谷盗 1 龄幼虫的捕食功能，发现普通肉食螨雌成螨的捕食功能不与相对湿度的大小呈正相关或负相关，在 75% RH 下的捕食功能最大，在 57%和 93% RH 条件下仍具有捕食能力，且其捕食功能属于 Holling Ⅱ型。

普通肉食螨雌成螨在 16-28 ℃、75% RH 和 28 ℃、57%-93% RH 范围内对土耳其扁谷盗 1 龄幼虫的捕食功能反应均是 Holling Ⅱ型。16-28 ℃、75% RH 和 28 ℃、57%-93% RH 属于我国粮库（尤其是我国高温区）粮堆的温湿度范围，因此未来可用于我国粮库粮堆内储粮害虫的生物防治，实际应用需通过实仓试验来进一步验证其有效性，并据此推广。储粮害虫在粮堆内部活动，因此普通肉食螨在捕食土耳其扁谷盗时需要首先进行搜索，本论文试验设计暂没考虑此过程，所得结果与肉食螨捕食的实际状况会有差异，将在后续研究中进一步探究。

4 结论

普通肉食螨原若螨、后若螨和雌成螨对土耳其扁谷盗卵、1 龄幼虫和 2 龄幼虫的捕食功能符合 Holling Ⅱ型，捕食量与土耳其扁谷盗卵、1 龄幼虫和 2 龄幼虫密度呈正相关。不同螨态普通肉食螨对不同虫态土耳其扁谷盗的捕食能力不同，雌成螨捕食土耳其扁谷盗卵的功能明显大于原若螨和后若螨，包括攻击系数、最大捕食量和捕食效能。在 16-28 ℃、75% RH 和 28 ℃、57%-93% RH 范围内，普通肉食螨雌成螨对土耳其扁谷盗 1 龄幼虫的日捕食量随着幼虫密度的增加而逐渐增大，捕食功能随着温度的升高而逐渐增大，但不与相对湿度的大小呈正相关或负相关，在 75% RH 下的捕食功能最大。普通肉食螨具有防治储粮害虫的潜力，特别是用于防治难以熏蒸杀死的扁谷盗害虫。

参考文献 (References)

An RF, Yu JK, Wang JJ, Dou W, Wang ZJ, Liu GM, 2024. Greenhouse experiment on synergistic treatment of biological control and chemical control to control *Panonychus citri* McGregor. *Plant Medicine*, 3(2): 20–29. [安若飞, 余金珂, 王进军, 豆威, 汪昭军, 刘光铭, 2024. 生物防治与化学防治协同处理防治柑橘全爪螨的温室试验. 植物医学, 3(2): 20–29.]

Barker PS, 1991. Bionomics of *Cheyletus eruditus* (Schrank) (Acarina: Cheyletidae), a predator of *Lepidoglyphus destructor* (Schrank) (Acarina: Glycyphagidae), at three constant temperatures. *Canadian Journal of Zoology-Revue Canadienne de Zoologie*, 69(9): 2321–2325.

Collins DA, 2012. A review on the factors affecting mite growth in stored grain commodities. *Experimental and Applied Acarology*, 56(3): 191–208.

Haines CP, 2000. Arthropod natural enemies in stored products overlooked and underexploit// Proceeding of the 7th IWCSPP at Beijing. Beijing: 1205–1226.

He CL, 2012. Investigation on predatory mites in orange orchards in Chongqing and comparative study on predatory ability of two predatory mites. Master dissertation. Chongqing: Southwest University. [贺成龙, 2012. 重庆市橘园捕食螨调查及两种捕食螨捕食能力的比较研究. 硕士学位论文. 重庆: 西南大学.]

He PH, Zhang T, Wu Y, Li YY, Li ZH, Li FJ, Stejskal V, Kucerova Z, Aulicky R, Jiang YJ, Tang PA, Cao Y, 2019. Study on the predatory ability of common carnivorous mites against nine kinds of stored grain pests. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Society*, 34(Z1): 171–176. [贺培欢, 张涛, 伍祎, 李燕羽, 李志红, 李福君, Stejskal V, Kucerova Z, Aulicky R, 江亚杰, 唐培安, 曹阳, 2019. 普通肉食螨对 9 种储粮害虫的捕食能力研究. 中国粮油学报, 34(z1):171–176.]

Li N, He PH, Pan DR, Wu Y, Wang ZM, Lu DJ, Cao Y, Zhang T, 2017. Preliminary study on species of predacious mites among the surface layer of grain bulk in the grain storage region with medium and high temperature. *Science and Technology of Grain and Oil*, 25(3): 92–95. [李娜, 贺培欢, 潘德蓉, 伍祎, 汪中明, 卢德杰, 曹阳, 张涛, 2017. 中高温储粮区粮堆表层捕食性螨种类初探. 粮油食品科技, 25(3): 92–95.]

Li YJ, 2023. Study on the responses of indigenous predatory mites to different temperatures and rapid cold hardening. Doctor dissertation. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University. [李玉晶, 2023. 本土捕食螨对不同温度的响应及快速冷驯化反应的研究. 博士学位论文. 呼和浩特: 内蒙古农业大学.]

Liang WC, Sun YQ, Liu XW, Lin DY, Yao WM, 2005. Study of acaroid mites breeding in stored products in Shenzhen. *Chinese Journal of Primary Medicine and Pharmacy*, 12(12): 1674–1676. [梁伟超, 孙杨青, 刘学文, 林达云, 姚为民, 2005. 深圳市储藏物孳生粉螨的研究. 中国基层医药, 12(12): 1674–1676.]

Lin JZ, Zhang YX, Ji J, Chen X, 2006. Five new records of snout mite from China (Acari: Bdellidae). *Wuyi Science*, 22(12): 1–31. [林坚贞, 张艳璇, 2006. 中国吸螨五新纪录(蜱螨亚纲: 吸螨科). 武夷科学, 22(12): 1–31.]

Lukáš J, Stejskal V, Jarošík V, Hubert J, Žd'árková E, 2007. Different natural performance of four *Cheyletus* predatory mite species in Czech grain stores. *Journal of Stored Products Research*, 43(1): 97–102.

Pereira de Sousa Neto E, Filgueiras RMC, Mendes JA, da S Melo JW, 2019. Functional and numerical responses of *Neoseiulus idaeus* and *Neoseiulus californicus* to eggs of *Tetranychus urticae*. *International Journal of Acarology*, 45(6/7): 395–398.

Shen ZP, 1988. The summary meeting of the national key provinces, municipalities and districts was held in Shanghai. *Liangyou Cangchu Keji Tongxun*, 1988(5): 52. [沈兆鹏, 1988. 全国重点省、市、区储藏物螨类调查总结会在上海举行. 粮油仓储科技通讯, 1988(5): 52.]

Shen ZP, 2005. Insect and mite in grain distribution. *Grain Storage*, 2005(3): 19–23. [沈兆鹏, 2005. 粮食流通中的昆虫和螨类. 粮食储藏, 2005(3): 19–23.]

Song SX, Liu GH, Xin TR, Zou ZW, Xia B, 2012. Predatory efficiency of *Neosiphonus pasteurella* on *Tetranychus cinnabarinus*. *Journal of Nanchang University* (*Natural Science*), 36(5): 486–489. [宋树贤, 刘光华, 辛天蓉, 邹志文, 夏斌, 2012. 巴氏新小绥螨对朱砂叶螨的捕食效能. 南昌大学学报(理科版), 36(5): 486–489.]

Sun WW, 2019. Study on the growth and predation of *Cheyletus malaccensis* at different temperatures. Master dissertation. Nanjing: Nanjing University of Finance and Economics. [孙为伟, 2019. 不同温度下马六甲肉食螨的生长发育与捕食研究. 硕士学位论文. 南京: 南京财经大学.]

Sun W, Xia L, Wu Y, 2023. Life histories and functional responses of two predatory mites feeding on the stored-grain pest *Liposcelis bostrychophila* Badonnel (Psocoptera: Liposcelididae). *Insects*, 14(5): 478.

Wang YT, Zhang FP, Li HB, Wang ML, 2022. Preliminary report on controlling red spider of ginseng fruit in Gobi solar greenhouse by predatory mites. *Journal of Cold-Arid Agricultural Sciences*, 2022(12): 256–259. [王雅婷, 张付平, 李海波, 王美丽, 2022. 利用捕食螨防治戈壁日光温室人参果红蜘蛛试验初报. 寒旱农业科学, 2022(12): 256–259.]

Wu SY, 2011. Study on the biology and experimental population ecology of *Euseius castaneau*. Master dissertation. Beijing: China Academy of Agricultural Sciences. [吴圣勇, 2011. 栗真绥螨生物学及实验种群生态学研究. 硕士学位论文. 北

京: 中国农业科学院.]

Wu Y, 2023. Research progress on prevention and control of stored grain pests by *Cheyletus malaccensis* (Oudemans) in Malacca. *Science and Technology of Cereals Oils and Food*, 31(5): 35–41. [伍祎, 2023. 马六甲肉食螨防控储粮害虫研究进展. 粮油食品科技, 31(5): 35–41.]

Xia B, Luo DM, Zou ZW, Xu R, Zhu ZM, 2007a. Predation of *Cheyletus eruditus* on *Aleuroglyphus ovatus*. *Chinese Bulletin of Entomology*, 44(4): 549–552. [夏斌, 罗冬梅, 邹志文, 许睿, 朱志民, 2007a. 普通肉食螨对椭圆食粉螨的捕食功能. 昆虫知识, 44(4): 549–552.]

Xia B, Zhang T, Zou ZW, Shu C, Zhong L, 2007b. The predation of *Cheletomorpha lepidopterorum* (Acari: Cheyletidae) on *Tyrophagus putrescentiae* (Acari: Acaridae). *Journal of Nanchang University* (*Natural Science*), 31(6): 579–582. [夏斌, 张涛, 邹志文, 舒畅 钟玲, 2007b. 鳞翅触足螨对腐食酪螨捕食效能. 南昌大学学报(理科版), 31(6): 579–582.]

Yang JD, Mao JM, Guo J, Yue JQ, Yan SY, Yang HX, Zhao J, Wang ZR, 2024. Study on the control of *Panonychus citri* with insecticides (mites) and insecticidal predators. *China Fruits*, 2024(4): 96–102, 110. [杨建东, 毛加梅, 郭俊, 岳建强, 闫素云, 杨虹霞, 赵俊, 王自然, 2024. 杀虫(螨)剂协同抗药性捕食螨对柑橘全爪螨的防治研究. 中国果树, 2024(4): 96–102, 110.]

Zhang Y, 2012. Study on the dynamic change of the stored grain mite community diversity. Marster dissertation. Nanchang: Nanchang University. [张宇, 2012. 储粮螨类群落多样性及动态变化研究. 硕士学位论文. 南昌: 南昌大学.]

****

封面介绍

暗素猎蝽 *Epidaus nebulo* (Stål, 1863)

体黄褐色，体表多刺。头向前伸出，前端两侧各有锐刺 1 枚，复眼着生于头中部两侧。触角 4 节均黄褐色，第 1 节最长，等于 2-4 节之和。喙第 1 节长于第 2 节。前胸背板前叶与后叶约等长，前叶着生锐刺数枚，后域后角具 1 长刺，小盾片具长刺 3 根。前足腿节膨大，生有锐刺，各足腿节及前足胫节均具小刺。腹部各节两侧具刺。

本期封面照片是在大别山区生物多样性综合科学考察中，于 2023 年 7 月 4 日拍摄于安徽省安庆市岳西县包家乡鹞落坪村。成虫正“凝视”猎物。准备伺机攻击。

感谢陈卓博士帮忙鉴定物种，感谢大别山区生物多样性综合科学考察（2019FY101800）项目资助。

（姜春燕，中国科学院动物研究所）