



曹源智, 贾永红, 付晓彤, 李玉晶, 孟瑞霞. 巴氏新小绥螨对同一栖息地枸杞瘿螨的捕食功能反应 [J]. 环境昆虫学报, 2023, 45 (3): 761–769.

巴氏新小绥螨对同一栖息地枸杞瘿螨的捕食功能反应

曹源智, 贾永红, 付晓彤, 李玉晶, 孟瑞霞*

(内蒙古农业大学园艺与植物保护学院, 呼和浩特市 010019)

摘要: 枸杞瘿螨 *Aceria pallida* Keifer (Acari: Eriophyidae) 是枸杞上为害最严重的有害生物之一。近期在内蒙古地区发现植绥螨巴氏新小绥螨 *Neoseiulus barkeri* Hughes (Acari: Phytoseiidae) 与枸杞瘿螨可同时发生在野生枸杞上。为评价巴氏新小绥螨对枸杞瘿螨的捕食潜力, 本研究在室内 $25 \pm 1^\circ\text{C}$ 、RH $65\% \pm 10\%$ 、16 L:8 D 的条件下, 研究了巴氏新小绥螨对不同密度枸杞瘿螨成螨 (30、50、70、90、110、130、150、170 头) 的捕食功能反应及搜寻效应。结果表明, 巴氏新小绥螨的雌、雄成螨对枸杞瘿螨成螨的捕食功能反应均为 Holling-II 型, 即巴氏新小绥螨雌、雄成螨的捕食量随着猎物密度的增加而增加, 一直到猎物密度较高时趋于稳定; 而巴氏新小绥螨雌、雄成螨的搜寻效应随着猎物密度的增加而降低。巴氏新小绥螨雌成螨对相同密度下的枸杞瘿螨成螨的捕食量均高于雄成螨, 而且雌成螨的搜寻效应也强于雄成螨。巴氏新小绥螨雌成螨的攻击率 ($\alpha = 4.4121$) 高于雄成螨 ($\alpha = 2.4403$), 而雌成螨的处理时间 ($T_h = 0.0094$ d) 短于雄成螨 ($T_h = 0.0196$ d); 雌、雄成螨的理论最大日捕食量 (T/T_h) 分别为 106.61 头和 51.02 头。研究结果显示巴氏新小绥螨对枸杞瘿螨有较好的捕食潜力, 性别对巴氏新小绥螨捕食枸杞瘿螨的功能反应有显著影响。

关键词: 栖息地; 本土植绥螨; 性别差异; 瘿螨; 功能反应; 生物防治

中图分类号: Q968.1; S476

文献标识码: A

文章编号: 1674-0858 (2023) 03-0761-09

Functional response of *Neoseiulus barkeri* to *Aceria pallida* from the same Goji habitat

CAO Yuan-Zhi, JIA Yong-Hong, FU Xiao-Tong, LI Yu-Jing, MENG Rui-Xia* (College of Horticulture and Plant Protection, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010019, China)

Abstract: *Aceria pallida* Keifer is one of the most serious important pests of *Lycium barbarum* L. The phytoseiid mite, *Neoseiulus barkeri* Hughes, was recently found to co-occur with *A. pallida* on wild goji berry plants in Inner Mongolia. To evaluate the predation potential of *N. barkeri* against *A. pallida*, the functional response and searching efficiency of *N. barkeri* to adults of *A. pallida* with different densities (30, 50, 70, 90, 110, 130, 150, 170 individuals) were studied under the conditions of $25 \pm 1^\circ\text{C}$, $60\% \pm 5\%$ RH and a photoperiod of 16L:8 D in laboratory. The results showed that both female and male *N. barkeri* displayed a type Holling-II functional response to *A. pallida*. The consumption of female and male adults of *N. barkeri* increased with an increase in prey density until it stabilized at higher prey densities. The searching efficiency of female and male adults of *N. barkeri* decreased with an increase in prey density. The number of *A. pallida* consumed by female *N. barkeri* was higher than that by male *N. barkeri*.

基金项目: 国家自然科学基金 (32060636); 内蒙古自治区科技计划项目 (2020GG0065); 内蒙古农业大学基本科研业务费专项 (BR22-13-11)

作者简介: 曹源智, 男, 1996 年生, 硕士研究生, 研究方向为捕食螨生物防治, E-mail: 18992232647@163.com

* 通讯作者 Author for correspondence: 孟瑞霞, 女, 博士, 教授, 主要研究方向为害虫生物防治与综合治理, E-mail: mengrx@hotmail.com

收稿日期 Received: 2022-06-09; 接受日期 Accepted: 2022-09-01

at each prey density, whereas the searching efficiency of female *N. barkeri* was stronger than that of male *N. barkeri*. The female *N. barkeri* had a higher attack rate and a shorter handling time ($\alpha = 4.4121$; $T_h = 0.0094$ d) than male *N. barkeri* ($\alpha = 2.4403$; $T_h = 0.0196$ d). The theoretical maximum daily predation (T/T_h) of female and male adults was 106.61 and 51.02, respectively. These results suggested that *N. barkeri* had a promising predation potential for the control *A. pallida*. The functional response of *N. barkeri* to *A. pallida* was significant difference between female and male *N. barkeri*.

Key words: Habitat; indigenous phytoseiid mites; gender differences; eriophyoid mite; functional response; biological control

枸杞 *Lycium barbarum* L. 是我国重要的传统药材与滋补食品 (Amagase and Farnsworth, 2011; 杨孟可, 2020; 王莹等, 2022)。然而, 由于枸杞的嫩叶、嫩枝和果实水分充足营养丰富, 且营养生长与生殖生长几近同时发生, 所以极易遭受虫害的威胁 (陈君等, 2003; 刘爱萍等, 2007; 徐常青等, 2014)。其中, 枸杞瘿螨 *Aceria pallida* Keifer 是枸杞上为害最严重的有害生物之一 (徐林波和段立清, 2005; 刘爱萍等, 2007; 徐常青等, 2014; 严海霞和郭洁, 2019; 杨宁权等, 2021), 并因形成虫瘿, 导致整株枸杞长势衰弱, 果实减产, 严重影响着我国枸杞的产量与质量 (容汉诤和王华荣, 1983; 徐林波和段立清, 2005; 孙学海, 2007; 刘赛等, 2019)。

枸杞瘿螨由于体型微小, 大部分又潜藏于虫瘿中为害, 在生产中有效控制枸杞瘿螨的手段并不多 (刘赛等, 2016; 杨宁权等, 2021), 现在仍主要使用化学杀螨剂等进行防治 (李建领等, 2017; 马莹和张文华, 2019)。大量不规范施用化学农药防治枸杞瘿螨现象非常普遍 (徐林波和段立清, 2005; 徐常青等, 2014), 引起枸杞农药残留超标及出口海外受阻 (徐常青等, 2014; 李建领等, 2017)。因此, 寻求枸杞瘿螨的有效天敌而加快生物防治等绿色防控技术的研发, 对保障枸杞质量安全以及枸杞产业健康发展都有深远影响。在本地生态系统中, 本土天敌是一个固定的生物因子, 调查筛选害虫发生地的本土天敌种类, 增加本土天敌的保护与利用, 可不必考虑引进天敌所必需经历的风险评估和对新环境的适应等问题 (郭同斌, 2020)。因此, 开发利用本土天敌种类是害虫生物防治中最安全有效的途径。

刘俊清等 (2019) 于 2017–2018 年对内蒙古自治区巴彦淖尔市乌拉特前旗野生枸杞地的植绥螨进行了调查, 表明有 3 种植绥螨与枸杞瘿螨可同时发生在野生枸杞上, 包括巴氏新小绥螨

Neoseiulus barkeri Hughes、安德森钝绥螨 *Amblyseius andersoni* Chant 和新小皱新小绥螨 *Neoseiulus neoreticuloides* Liang & Hu, 并且在已经破裂成熟的枸杞瘿螨瘿瘤里可发现各个发育阶段的植绥螨。Fu 等 (2021) 研究了其中两种植绥螨安德森钝绥螨和新小皱新小绥螨捕食枸杞瘿螨的功能反应, 表明安德森钝绥螨有潜力成为防治枸杞瘿螨的生防作用物。另外一种植绥螨巴氏新小绥螨对各种小型害虫螨均有较好的防治效果, 并已实现了规模化饲养与商业化生产 (徐学农等, 2013), 广泛应用于我国的农业生防实践中 (Wu *et al.*, 2017), 而且巴氏新小绥螨也是内蒙古地区的捕食螨优势种 (张鹏飞等, 2012)。国外发现巴氏新小绥螨可控制椰子瘿螨 *Aceria guerreronis* Keifer (Lima *et al.*, 2015), 但巴氏新小绥螨对枸杞瘿螨捕食潜力的研究国内外还未见报道。

功能反应是评估捕食者捕食率和捕食者控制有害生物种群能力的重要参数 (Skalski and Gilliam, 2001; Song *et al.*, 2016; De Sousa Neto *et al.*, 2019)。在捕食者与猎物的系统中, 功能反应提供了关于天敌对特定害虫的控制效率的数据 (Rahman *et al.*, 2012), 可用于预测捕食者与猎物之间互作行为的潜在机制, 以提高捕食者控制猎物的潜力 (Sepúlveda and Carrillo, 2008; Delong and Uiterwaal, 2022)。本研究利用功能反应, 评价了来自同一栖息地的巴氏新小绥螨雌、雄成螨对枸杞瘿螨的捕食潜力, 以期开发枸杞瘿螨的本地有效天敌进行生物防控提供依据。

1 材料与方法

1.1 供试虫源

巴氏新小绥螨于 2017 年 9 月采自巴彦淖尔市野生枸杞地, 以甜果螨 *Carpoglyphus lactis* 饲养在 $25 \pm 1^\circ\text{C}$ 、RH 65% $\pm$ 10%、16 L:8 D 的智能人工气候箱中, 并成功建立稳定种群。

枸杞瘿螨与巴氏新小绥螨为同一地点采集, 将带有枸杞瘿螨虫瘿的枸杞枝条带回室内后, 放置于 4℃ 的冰箱中待用。

1.2 试验装置

试验装置为由三层透明亚克力板 (35 mm × 20 mm × 3 mm)、一层枸杞叶片和一层滤纸组成的小室。三层亚克力板中, 其中有两层亚克力板的中心有直径为 10 mm 的圆孔, 枸杞叶片与滤纸大小与亚克力板的尺寸相当。小室从上到下依次由完整的亚克力板、中心开孔的亚克力板、叶背向上的枸杞叶片、滤纸及中心开孔的亚克力板组成, 并用燕尾夹夹紧完整小室的两端。随后将其放置在塑料托盘上, 托盘上铺有湿纱布用以保湿。

1.3 试验方法

枸杞瘿螨可分为 4 个发育阶段, 分别为卵、幼螨、若螨和成螨。其卵 (近球形, 直径为 39 ~ 42.5 μm)、幼螨 (体长 74 ~ 109.6 μm) 和若螨体型微小 (容汉谏和王华荣, 1983), 成螨也只有 200 ~ 240 μm (匡海源, 1983)。卵在挑取的过程中极易破损, 而幼螨、若螨极易钻入小室亚克力板与叶片之间的缝隙中而躲避巴氏新小绥螨的捕食, 因此本研究只针对枸杞瘿螨成螨进行了实验。

巴氏新小绥螨用枸杞瘿螨瘿瘤块饲养 3 代后用于试验。由于未成熟的枸杞瘿螨瘿瘤几乎没有缝隙的, 所以用小刀将直径为 2 ~ 5 mm 的枸杞瘿螨瘿瘤从枸杞叶片切下, 并沿瘿瘤中央剖开, 使瘿瘤中的枸杞瘿螨完全暴露于捕食螨, 以利于捕食螨进行捕食。为使巴氏新小绥螨的发育历期保持一致, 在种群中随机挑取 150 头巴氏新小绥螨雌、雄成螨随机各挑取 80 头单独放置于实验小室中饥饿 24 h, 再将枸杞瘿螨成螨挑入小室, 其密度分别设为 30、50、70、90、110、130、150、170 头, 24 h 后记录被捕食猎物的数量, 每个密度处理重复 10 次。所有小室都放置在 25 ± 1℃、RH 65% ± 10%、16 L: 8 D 的智能人工气候箱 (PRX-350C, 宁波海曙赛福实验仪器厂) 中。

1.4 数据分析

功能反应类型采用 Logistic 模型来确定功能反应的类型。

$$N_e/N_0 = \exp(P_0 + P_1 N_0 + P_2 N_{02} + P_3 N_{03}) / [1 + \exp(P_0 + P_1 N_0 + P_2 N_{02} + P_3 N_{03})] \quad (1)$$

在等式 (1) 中, N_e 代表被捕食猎物的数量, N_0 代表初始猎物数量, (N_e/N_0) 为猎物被捕食的概率。 P_0 为截距, P_1 、 P_2 、 P_3 分别为线性系数、二次系数和三次系数 (Xiao and Fadamiro, 2010)。功能反应的类型由线性系数和二次系数的符号确定, 当线性系数为负值时, 捕食者表现出 II 型功能反应; 当线性系数为正, 二次系数为负时, 捕食者表现出 III 型功能反应 (Juliano, 2001)。

采用非线性最小二乘回归估计攻击率 (α) 处理时间 (T_h) (Rogers, 1972; Hassell, 1978)。

$$N_e = N_0 \{ 1 - \exp [\alpha (T_h N_e - T)] \} \quad (2)$$

在等式 (2) 式中, N_e 为被捕食猎物的数量, N_0 为初始猎物数量, α 为攻击率, T_h 为每个猎物的处理时间, T 为实验时间。

根据等式 (2) 所得出的攻击率 α 与处理时间 T_h 计算搜寻效应 S 。

$$S = \alpha / (1 + \alpha T_h N_0) \quad (3)$$

在等式 (3) 式中, S 为搜寻效应, α 为攻击率, N_0 为初始猎物数量, T_h 为每个猎物的处理时间。

采用 SAS 9.4 软件, 通过 Logistic 模型 (等式 1) 确定巴氏新小绥螨雌、雄成螨对枸杞瘿螨成螨的捕食功能反应类型, 采用非线性最小二乘回归 (等式 2) 估计攻击率和处理时间, 并根据 (等式 3) 计算搜寻效应。采用单因素方差分析以及 Duncan 检验比较不同猎物密度对巴氏新小绥螨捕食量的影响, 并应用独立样本 t 检验比较巴氏新小绥螨不同性别对其捕食量的影响。使用 GraphPad Prism 8 绘制功能反应曲线及搜寻效应曲线。

2 结果与分析

2.1 巴氏新小绥螨对枸杞瘿螨成螨的捕食功能反应

枸杞瘿螨的密度对巴氏新小绥螨雌、雄成螨的捕食量均有显著影响 (雌成螨: $F_{7,64} = 212.304$, $df = 7$, $P < 0.05$; 雄成螨: $F = 21.267$, $df = 7$, $P < 0.05$), 巴氏新小绥螨雌、雄成螨对枸杞瘿螨的捕食量均随着猎物密度的增加而增加, 当瘿螨密度达到一定数量时, 巴氏新小绥螨雌、雄成螨的捕食量逐渐趋于稳定 (表 1)。巴氏新小绥螨雌、雄成螨对枸杞瘿螨的捕食量通过独立样本 t 检验后, 结果表明巴氏新小绥螨雌成螨的捕食量均显著大于雄成螨 ($P < 0.05$) (表 1)。

表 1 巴氏新小绥螨对枸杞瘿螨的捕食量 (平均值 $\pm$ 标准误)Table 1 Number of *Aceria pallida* consumed by *Neoseiulus barkeri* at different prey density (mean $\pm$ SE)

猎物密度 (头) Prey density	巴氏新小绥螨捕食量 (头) Consumption of <i>Neoseiulus barkeri</i>		<i>t</i>	df	<i>P</i>
	雌成螨 Female	雄成螨 Male			
30	28.8 $\pm$ 0.80 g A	21.2 $\pm$ 1.59 e B	4.262	8.000	0.0028
50	41.8 $\pm$ 1.83 f A	33.0 $\pm$ 1.30 d B	3.920	8.000	0.0044
70	58.8 $\pm$ 1.62 e A	35.8 $\pm$ 1.43 cd B	10.63	8.000	<0.0001
90	72.4 $\pm$ 1.36 d A	39.2 $\pm$ 1.88 bc B	14.29	8.000	<0.0001
110	77.8 $\pm$ 1.96 cd A	41.8 $\pm$ 1.56 ab B	14.37	8.000	<0.0001
130	81.8 $\pm$ 1.11 bc A	42.2 $\pm$ 2.33 ab B	15.32	8.000	<0.0001
150	85.6 $\pm$ 1.86 ab A	43.0 $\pm$ 1.10 ab B	19.73	8.000	<0.0001
170	89.8 $\pm$ 1.11 a A	44.8 $\pm$ 1.85 a B	20.80	8.000	<0.0001

注: 不同大写字母表示同一行内巴氏新小绥螨雌雄差异显著性 (独立样本 *t* 检验); 不同小写字母表示同一列内猎物密度差异显著性 (Duncan 检验, $P < 0.05$)。Note: Means with different uppercase letters in a row were significantly different between female and male *N. barkeri* at same density (Student *t* test); means with different lowercase letters in a column were significantly different among densities (Duncan test, $P < 0.05$).

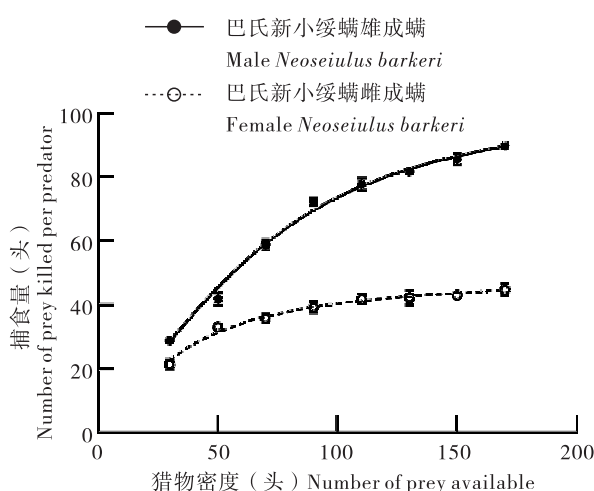


图 1 巴氏新小绥螨捕食枸杞瘿螨的功能反应曲线

Fig. 1 Functional response curves of *Neoseiulus barkeri* fed on *Aceria pallida*

巴氏新小绥螨雌、雄成螨 Logistic 回归的线性系数 P_1 分别为 -0.6805 与 -0.0299 , 皆小于 0 (表 2), 表明巴氏新小绥螨雌、雄成螨捕食枸杞瘿螨的功能反应均为 II 型。

巴氏新小绥螨雌成螨捕食枸杞瘿螨的攻击率 α 值 (4.4121) 高于雄成螨 (2.4403), 处理时间 T_h 雌成螨 (0.0094 d) 则短于雄成螨 (0.0196 d) (表 3)。 T/T_h 为巴氏新小绥螨 24 h 内捕食枸杞瘿螨成螨的理论最大日捕食量, 结果显示巴氏新小绥螨雌成螨对枸杞瘿螨成螨的理论最大日捕食量

(106.61 头) 高于雄成螨的理论最大日捕食量 (51.02 头), 且是雄成螨的 2.10 倍 (表 3)。

2.2 巴氏新小绥螨对枸杞瘿螨成螨的搜寻效应

巴氏新小绥螨雌、雄成螨对枸杞瘿螨成螨的搜寻效应随着猎物密度的增加而减小, 并且雌成螨在所有密度条件下的搜寻效应皆大于雄成螨 (图 2)。当在低猎物密度 30 头时, 巴氏新小绥螨雌、雄成螨的搜寻效应均达到最大 (雌成螨: 1.97; 雄成螨: 1.00); 当猎物密度达到 170 头时, 巴氏新小绥螨雌、雄成螨的搜寻效应均最低 (雌成螨: 0.55; 雄成螨: 0.27) (图 2)。

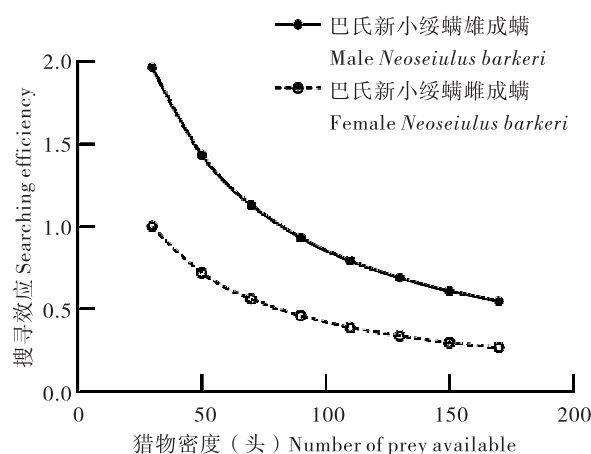


图 2 巴氏新小绥螨对枸杞瘿螨的搜寻效应

Fig. 2 Searching efficiency of *Neoseiulus barkeri* fed on *Aceria pallida*

表 2 巴氏新小绥螨对枸杞瘿螨功能反应的逻辑回归系数估计

Table 2 Maximum – likelihood estimates of the proportion of *Aceria pallida* consumed by *Neoseiulus barkeri* as a function of initial prey density from logistic regressions

巴氏新小绥螨 <i>Neoseiulus barkeri</i>	参数 Parameters	参数值 Estimate	标准误 SE	χ^2 χ^2	P 值 P
雌成螨 Female	Intercept (P_0)	3.4306	1.9327	3.15	0.0759
	Linear (P_1)	−0.6805	0.7274	0.88	0.3496
	Quadratic (P_2)	0.0451	0.0807	0.31	0.5763
	Cubic (P_3)	−0.0011	0.0027	0.17	0.6838
雄成螨 Male	Intercept (P_0)	1.7991	0.5119	12.35	0.0004
	Linear (P_1)	−0.0299	0.0172	3.02	0.0821
	Quadratic (P_2)	8.50E − 05	1.75E − 04	0.24	0.6272
	Cubic (P_3)	−4.08E − 08	5.459E − 07	0.01	0.9405

表 3 巴氏新小绥螨对枸杞瘿螨攻击率以及处理时间

Table 3 Attack rate and handling time for *Neoseiulus barkeri* feeding on *Aceria pallida*

巴氏新小绥螨 <i>Neoseiulus barkeri</i>	攻击率 (α) Attack rate	处理时间 (T_h) /d Handling time	理论最大日捕食量 Maximum attack rate (T/T_h)
雌成螨 Female	4.4121 ± 0.4210 (3.4165 ± 5.4076)	0.0094 ± 0.0002 (0.0089 ± 0.0099)	106.61
雄成螨 Male	2.4403 ± 0.2186 (1.9235 ± 2.9572)	0.0196 ± 0.0003 (0.0189 ± 0.0204)	51.02

3 结论与讨论

本研究测定了本地巴氏新小绥螨对同一栖息植物上枸杞瘿螨的捕食功能反应，表明巴氏新小绥螨雌、雄成螨捕食枸杞瘿螨均表现为 Holling-II 型功能反应。这与在同一栖息地采集到的安德森钝绥螨、新小皱新小绥螨捕食枸杞瘿螨成螨也表现为 Holling-II 型功能反应是一致的（刘庆岩，2019；Fu *et al.*，2021）。在众多植绥螨种类中，Holling-II 型功能反应较为常见，如拉哥钝绥螨 *Amblyseius largoensis* Muma 捕食荔枝瘤瘿螨 *Aceria litchii* Keifer（程立生等，2005）、加州新小绥螨 *Neoseiulus californicus* McGregor 捕食二斑叶螨 *Tetranychus urticae* Koch（Neto *et al.*，2019）、拉哥钝绥螨若螨和雌成螨捕食印度雷须螨 *Raoiella indica* Hirst（Lira *et al.*，2021）及条纹新小绥螨 *Neoseiulus striatus* Wu 捕食二斑叶螨各螨态（曾科科，2021）。巴氏新小绥螨对害螨猎物的捕食也大

多表现为 Holling-II 型功能反应，Li 等（2018）测定了巴氏新小绥螨捕食乱跗线螨 *Tarsonemus confusus* Ewing 不同发育阶段的功能反应，对乱跗线螨卵和静止期的幼螨表现为 Holling-II 型功能反应类型；巴氏新小绥螨捕食二斑叶螨各个发育阶段的功能反应也均为 Holling-II 型（王蔓等，2019）。Fathipour 等（2021）研究了补充食物玉米花粉 *Zea mays* L. 对巴氏新小绥螨捕食二斑叶螨的影响，表明无论花粉存在与否，巴氏小绥螨对二斑叶螨的卵和若螨都表现 Holling-II 型功能反应。此外，巴氏新小绥螨对其他猎物的捕食功能反应也表现为 Holling-II 型，如巴氏新小绥螨对水稻干尖线虫 *Aphelenchoides besseyi* Christie 的捕食（李曼，2019）；巴氏新小绥螨对芒果茶黄蓟马 *Scirtothrips dorsalis* Hood 1 龄若虫与 2 龄若虫的捕食（周炆等，2020）。攻击率和处理时间是确定功能反应大小的重要指标，通常认为高攻击率（ α ）和短处理时间（ T_h ）的天敌是更有效的害虫生防作用物（Pervez

and Omkar, 2006; Fathi and Nouri-Ganbalani, 2010; Salehi *et al.*, 2016)。Fu 等 (2021) 研究了与巴氏新小绥螨采自同一野生枸杞地的安德森钝绥螨对枸杞瘿螨成螨的捕食功能反应, 其设定温度、小室内空间大小和捕食螨饥饿程度皆与本实验相同。安德森钝绥螨雌成螨捕食枸杞瘿螨成螨时, 其处理时间 ($T_h = 0.0140$ d) 长于巴氏新小绥螨雌成螨 ($T_h = 0.0094$ d), 即使其攻击率 ($\alpha = 5.961$) 大于巴氏新小绥螨雌成螨 ($\alpha = 4.4121$), 但安德森钝绥螨雌成螨对枸杞瘿螨成螨的理论最大日捕食量 (71.43 头) 小于巴氏新小绥螨雌成螨 (106.61 头)。安德森钝绥螨雌成螨在枸杞瘿螨成螨密度为 100 头时的捕食量为 57.6 头; 而巴氏新小绥螨雌成螨在枸杞瘿螨成螨密度为 90 头时的捕食量就已经达到 72.4 头, 远大于安德森钝绥螨雌成螨的捕食量。因此, 虽然与枸杞瘿螨采自同一栖息植物的两种本地植绥螨—巴氏新小绥螨和安德森钝绥螨都适宜作为枸杞瘿螨的生防作用物, 但巴氏新小绥螨对枸杞瘿螨表现有更好的捕食潜力, 对枸杞瘿螨具有更快找到并消耗的能力。

Delong 和 Uiterwaal (2022) 整理了来自世界各地以植食性害螨和蚜虫为猎物的 400 多个功能反应, 重新分析使之标准化, 发现温度、捕食者的体型大小、试验装置内空间的大小和捕食者饥饿程度都对其捕食猎物的功能反应的曲线高度和形状起着作用, 进而会影响功能反应的各项参数。

本研究中的试验温度、试验小室空间和捕食者饥饿程度都是恒定的, 只有巴氏新小绥螨雌、雄成螨在体型大小上有差异, 雌成螨的体型大于雄成螨。一般来说, 捕食者体型越大, 捕食者对于相同空间里猎物的攻击率就越强 (Delong and Uiterwaal, 2022)。捕食者的体型大小还与搜索速度、探测距离或捕食猎物的能力相关, 进而影响捕食者对猎物的处理时间 (Delong and Uiterwaal, 2022)。较小的捕食者由于其从更远的距离感知猎物的能力相对较弱, 从而会花费更长的时间去寻找猎物 (McGill and Mittelbach, 2006)。巴氏新小绥螨雌成螨捕食枸杞瘿螨成螨时表现出较高的攻击率 α (雌成螨: 4.4121; 雄成螨: 2.4403) 和较短的处理时间 T_h (雌成螨: 0.0094 d; 雄成螨: 0.0196 d)。在 Fu 等 (2021) 的研究中也有类似结果, 安德森钝绥螨在捕食枸杞瘿螨成螨时, 雌成螨比雄成螨有更高的攻击率和更短的处理时间,

这均应为捕食螨雌、雄成螨的体型大小差异所导致的结果。

搜寻效应是捕食者在取食猎物过程中所表现的一种行为效应, 其大小与猎物密度、攻击率和处理时间相关, 搜寻效应会随着猎物密度的增加而降低 (丁岩钦, 1994)。在本研究中, 巴氏新小绥螨雌、雄成螨捕食枸杞瘿螨成螨时也呈现出这种规律; 巴氏新小绥螨在捕食水稻干尖线虫和芒果茶黄蓟马时也有相同规律 (李曼等, 2019; 周炆等, 2020)。然而, 巴氏新小绥螨在捕食枸杞瘿螨成螨时其搜寻效应的最大值, 皆大于巴氏新小绥螨捕食水稻干尖线虫和芒果茶黄蓟马的最大值 (李曼等, 2019; 周炆等, 2020), 这可能是因为枸杞瘿螨成螨的体型过于微小, 为防止枸杞瘿螨逃逸, 本研究只能选择小型实验装置, 而实验装置内空间的大小会影响捕食者对猎物的攻击率 α 和处理时间 T_h (Delong and Uiterwaal, 2022), 进而导致巴氏新小绥螨在捕食枸杞瘿螨成螨的搜寻效应大于巴氏新小绥螨捕食水稻干尖线虫和芒果茶黄蓟马的搜寻效应。

随着害虫生物防治技术的普及, 人们也担心生物防治产品是否会影响环境和生态等问题, 如天敌产品是否会降低施用地的生物多样性 (暴可心等, 2021), 这样, 本土天敌的开发与利用就显得尤为重要。本土天敌避免了引进天敌可能带来的风险, 相对引进天敌也更容易定殖于目标植物, 而且本土捕食者可能对其同一栖息地的有害生物具有更强的防控能力 (郭同斌, 2020)。Mendes 等 (2018) 的研究表明, 对目标猎物印度雷须螨已有捕食经验的拉哥钝绥螨对猎物捕食的处理时间更短, 而且本土拉哥钝绥螨种群可能对目标猎物有更强的捕食能力。Patel and Zhang (2017) 比较了两种植绥螨 *Amblydromalus limonicus* Muma 和胡瓜新小绥螨 *Neoseiulus cucumeris* Oudemans 捕食马铃薯/番茄木虱 *Bactericera cockerelli* Sulc 的功能反应, 结果显示与马铃薯/番茄木虱采自同一温室辣椒植株上的植绥螨 *A. limonicus* 比商品化的胡瓜新小绥螨对猎物具有更高的攻击率以及更短的处理时间, 表明与猎物来自同一栖息植物的 *A. limonicus* 是比商品化的胡瓜新小绥螨更有效的防控马铃薯/番茄木虱的生防作用物。本研究结果也显示了本土巴氏新小绥螨对同一栖息地植物上的枸杞瘿螨具有较好的捕食潜力, 有望成为防控枸杞瘿螨的有效生防作用物。

此外, 捕食者的捕食量和功能反应还可能与温度相关 (Uszko *et al.*, 2017; Islam *et al.*, 2020)。功能反应的各项数据会随着平均环境温度的变化而改变, 温度升高可能会降低捕食者的处理时间, 这可能会使生物防治更有效 (DeLong and Uiterwaal, 2022); 但如果超过一定温度, 捕食者因自身代谢速率过快, 能量消耗过多, 对猎物的寻找效率也会降低 (Uiterwaal and DeLong, 2020)。随着全球气候的变暖, 当应用天敌对有害生物进行防治时, 也应关注温度对捕食者的影响。因此, 还有待进一步开展田间实际条件下的释放试验研究, 以期利用本土巴氏新小绥螨防控枸杞瘿螨提供依据。

参考文献 (References)

- Amagase H, Farnsworth NR. A review of botanical characteristics, phytochemistry, clinical relevance in efficacy and safety of *Lycium barbarum* fruit (Goji) [J]. *Food Research International*, 2011, 44 (7): 1702 – 1717.
- Bao KX, Luo LP, Wang XY, *et al.* Method for evaluating the comprehensive benefits of biological control of insect pests [J]. *Chinese Journal of Biological Control*, 2021, 37 (1): 38 – 51. [暴可心, 罗立平, 王小艺, 等. 害虫生物防治综合效益评价方法 [J]. 中国生物防治学报, 2021, 37 (1): 38 – 51]
- Chen J, Cheng HJ, Zhang JW, *et al.* Investigation on occurrence of *Lycium barbarum* pests and its natural enemies at Ningxia [J]. *Journal of Chinese Medicinal Materials*, 2003, 26 (6): 391 – 394. [陈君, 程惠珍, 张建文, 等. 宁夏枸杞害虫及天敌种类的发生规律调查 [J]. 中药材, 2003, 26 (6): 391 – 394]
- Cheng LS, Zhang XM, Sha LH, *et al.* Functional and numerical response of *Amblyseius largoensis* to *Aceria litchi* [J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2005, 26 (1): 52 – 59. [程立生, 张先敏, 沙林华, 等. 拉哥钝绥螨对荔枝瘤瘿螨的功能和数值反应 [J]. 热带作物学报, 2005, 26 (1): 52 – 59]
- DeLong JP, Uiterwaal SF. Predator functional responses and the biocontrol of aphids and mites [J]. *BioControl*, 2022, 67 (2): 161 – 172.
- De Sousa Neto EP, Filgueiras RMC, Mendes JA, *et al.* Functional and numerical responses of *Neoseiulus idaeus* and *Neoseiulus californicus* to eggs of *Tetranychus urticae* [J]. *International Journal of Acarology*, 2019, 45 (6 – 7): 1 – 4.
- Ding YQ. Mathematical Ecology of Insects [M]. Beijing: Science Press, 1994: 303 – 304. [丁岩钦. 昆虫数学生态学 [M]. 北京: 科学出版社, 1994: 303 – 304]
- Fathi SAA, Nouri – Ganbalani G. Assessing the potential for biological control of potato field pests in Ardabil, Iran: Functional responses of *Orius niger* (Wolf.) and *O. minutus* (L.) (Hemiptera: Anthoridae) [J]. *Journal of Pest Science*, 2010, 83 (1): 47 – 52.
- Fathipour Y, Maleknia B, Bagheri A, *et al.* Functional and numerical responses of *Neoseiulus barkeri* (Acari: Phytoseiidae) on two – spotted spider mite: The effect of patch condition and additional food source [J]. *Systematic and Applied Acarology*, 2021, 26 (3): 543 – 556.
- Fu XT, Liu QY, Liu JQ, *et al.* Functional response of *Amblyseius andersoni* and *Neoseiulus neoreticuloides* (Acari: Phytoseiidae) to adults of the wolfberry gall mite *Aceria pallida* (Acari: Eriophyidae) [J]. *Systematic and Applied Acarology*, 2021, 26 (4): 809 – 817.
- Guo TB. Investigation on predators of forest insect pests in Xuzhou Prefecture [J]. *Journal of Jiangsu Forestry Science & Technology*, 2020, 47 (1): 32 – 41. [郭同斌. 徐州市林业害虫的捕食性天敌昆虫调查与分析 [J]. 江苏林业科技, 2020, 47 (1): 32 – 41]
- Hassell MP. The Dynamics of Arthropod Predator-Prey Systems [M]. New Jersey: Princeton University Press, 1978: 248.
- Islam Y, Shah FM, Shah MA, *et al.* Temperature-dependent functional response of *Harmonia axyridis* (Coleoptera: Coccinellidae) on the eggs of *Spodoptera litura* (Lepidoptera: Noctuidae) in laboratory [J]. *Insects*, 2020, 11 (9): 583.
- Juliano SA. Nonlinear Curve Fitting: Predation and Functional Response Curve [M]. New York: Oxford University Press, 2001: 178 – 196.
- Kuang HY. Notes on four species of eriophyid pests wolfberry in china (Acarina: Eriophyoidea) [J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 1983, 4: 40 – 48. [匡海源. 我国为害枸杞的四种瘿螨记述 (螨目: 瘿螨总科) [J]. 南京农业大学学报, 1983, 4: 40 – 48]
- Li JL, Liu S, Xu CQ, *et al.* Population dynamics and control strategies of major pests of wolfberry, *Lycium barbarum* [J]. *Modern Chinese Medicine*, 2017, 19 (11): 1599 – 1604. [李建领, 刘赛, 徐常青, 等. 宁夏枸杞主要害虫发生规律与防治策略 [J]. 中国现代中药, 2017, 19 (11): 1599 – 1604]
- Li LT, Jiao R, Yu LC, *et al.* Functional response and prey stage preference of *Neoseiulus barkeri* on *Trasonemus confuses* [J]. *Systematic and Applied Acarology*, 2018, 23 (11): 2244 – 2258.
- Li M. Predation and Control Function of a Predatory Mite, *Neoseiulus barkeri* to the Two Species of Parasitic Nematodes [D]. Guangzhou: South China Agricultural University Master Thesis, 2019. [李曼. 巴氏新小绥螨对二种植物寄生线虫的捕食和控制作用 [D]. 广州: 华南农业大学硕士论文, 2019]
- Lima DB, Melo JWS, Gondim Jr MGC, *et al.* Acaricide – impaired functional predation response of the phytoseiid mite *Neoseiulus baraki* to the coconut mite *Aceria guerreronis* [J]. *Ecotoxicology*, 2015, 24: 1124 – 1130.
- Lira V, Jumbo LOV, de Freitas GS, *et al.* Efficacy of *Amblyseius largoensis* (Muma) as a biocontrol agent of the red palm mite *Raoiella indica* (Acari: Tenuipalpidae) [J]. *Phytoparasitica*, 2021, 49 (5): 1 – 9.
- Liu AP, Xu LB, Wang H. Investigation on species and occurrence regularity of *Lycium barbarum* pests and their natural enemies [J].

- China Plant Protection*, 2007, 27 (8): 31–33. [刘爱萍, 徐林波, 王慧. 枸杞害虫及其天敌的种类和发生规律调查 [J]. 中国植保导刊, 2007, 27 (8): 31–33]
- Liu JQ, Fang XD, Liu QY, *et al.* Species of phytoseiid mites in wild Chinese wolfberry field in Bayan Nur city [J]. *Journal of ShanXi Agricultural Sciences*, 2019, 47 (2): 256–258. [刘俊清, 方小端, 刘庆岩, 等. 巴彦淖尔市野生枸杞地植绥螨种类记述 [J]. 山西农业科学, 2019, 47 (2): 256–258]
- Liu QY. Evaluation of Predation of New Record Species *Amblyseius andersoni* Chant on Different Prey [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University Master Thesis, 2019. [刘庆岩. 新纪录种安德森钝绥螨对不同猎物的捕食评价 [D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学硕士论文, 2019]
- Liu S, Li JL, Xu CQ, *et al.* The dispersal mode of *Aceria pallida* on *Lycium barbarum* [J]. *Modern Chinese Medicine*, 2016, 18 (3): 271–274. [刘赛, 李建领, 徐常青, 等. 枸杞瘿螨田间迁移扩散规律研究 [J]. 中国现代中药, 2016, 18 (3): 271–274]
- Liu S, Li JL, Guo K, *et al.* Preliminary study on infection of *Lycium barbarum* by *Aceria pallida* [J]. *Journal of Chinese Medicinal Materials*, 2019, 42 (6): 1237–1241. [刘赛, 李建领, 郭昆, 等. 枸杞瘿螨对枸杞侵染的初步研究 [J]. 中药材, 2019, 42 (6): 1237–1241]
- Ma Y, Zhang WH. Safe measures for controlling main pests of Chinese wolfberry in Ningxia [J]. *Shaanxi Journal of Agricultural Sciences*, 2019, 65 (7): 76–78. [马莹, 张文华. 宁夏枸杞主要虫害安全防治技术措施 [J]. 陕西农业科学, 2019, 65 (7): 76–78]
- Mendes JA, Lima DB, Sousa Neto EP, *et al.* Functional response of *Amblyseius largoensis* to *Raoiella indica* eggs is mediated by previous feeding experience [J]. *Systematic and Applied Acarology*, 2018, 23 (10): 1907–1914.
- Mcgill BJ, Mittelbach GC. An allometric vision and motion model to predict prey encounter rates [J]. *Evolutionary Ecology Research*, 2006, 8 (4): 691–701.
- Patel K, Zhang ZQ. Functional and numerical responses of *Amblydromalus limonicus* and *Neoseiulus cucumeris* to eggs and first instar nymph of tomato/potato psyllid (*Bactericera cockerelli*) [J]. *Systematic and Applied Acarology*, 2017, 22 (9): 1476–1488.
- Pervez A, Omkar O. Ecology and biological control application of multicoloured Asian ladybird, *Harmonia axyridis*: A review [J]. *Biocontrol Science and Technology*, 2006, 16 (2): 111–128.
- Rahman VJ, Babu A, Roobakkumar A, *et al.* Functional and numerical responses of the predatory mite, *Neoseiulus longispinosus*, to the red spider mite, *Oligonychus coffeae*, infesting tea [J]. *Journal of Insect Science*, 2012, 12 (1): 125–125.
- Rogers D. Random search and insect population models [J]. *Journal of Animal Ecology*, 1972, 41 (2): 369–383.
- Rong HQ, Wang HR. Observations on the bionomics of mite injurious to *Lycium barbarum* (*eriophyes* sp.) and its control of new pesticides in Ningxia [J]. *Journal of Plant Protection*, 1983, 10 (4): 279–281. [容汉詮, 王华荣. 宁夏枸杞瘿螨的发生规律及新农药的防治效果观察 [J]. 植物保护学报, 1983, 10 (4): 279–281]
- Salehi Z, Yarahmadi F, Rasekh A, *et al.* Functional responses of *Orius albidipennis* Reuter (Hemiptera, Anthracoridae) to *Tuta absoluta* Meyrick (Lepidoptera, Gelechiidae) on two tomato cultivars with different leaf morphological characteristics [J]. *Entomologia Generalis*, 2016, 36 (2): 127–136.
- Sepuúlveda F, Carrillo R. Functional response of the predatory mite *Chileseius camposi* (Acari: Phytoseiidae) on densities of its prey, *Panonychus ulmi* (Acarina: Tetranychidae) [J]. *Revista de Biología Tropical*, 2008, 56 (3): 1255–1260.
- Skalski GT, Gilliam JF. Functional response with predator interference: Viable alternatives to the holling type II model [J]. *Ecology*, 2001, 82 (11): 3083–3092.
- Song ZW, Zheng Y, Zhang BX, *et al.* Prey consumption and functional response of *Neoseiulus californicus* and *Neoseiulus longispinosus* (Acari: Phytoseiidae) on *Tetranychus urticae* and *Tetranychus kanzawai* (Acari: Tetranychidae) [J]. *Systematic and Applied Acarology*, 2016, 21 (7): 936–946.
- Sun XH. Influencing factors and prevention, control measures of gall mite occurrence in *Lycium barbarum* [J]. *Contemporary Horticulture*, 2007, 11: 22–23. [孙学海. 枸杞瘿螨发生危害的影响因素与防控措施 [J]. 现代园艺, 2007, 11: 22–23]
- Uiterwaal SF, Delong JP. Functional responses are maximized at intermediate temperatures [J]. *Ecology*, 2020, 101 (4): e02975.
- Uusko W, Diehl S, Englund G, *et al.* Effects of warming on predator – prey interactions – a resource – based approach and a theoretical synthesis [J]. *Ecology Letters*, 2017, 20 (4): 513–523.
- Wang M, Li B, Huang J, *et al.* Comparison of *Neoseiulus californicus* and *Neoseiulus barkeri* as biological controls for *Tetranychus urticae* [J]. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 2019, 56 (6): 1256–1263. [王蔓, 李波, 黄婕, 等. 加州新小绥螨和巴氏新小绥螨对二斑叶螨的捕食能力比较 [J]. 应用昆虫学报, 2019, 56 (6): 1256–1263]
- Wang Y, Shi R, Zhang NP, *et al.* Determination of Polysaccharides in *Lycium chinense* Mill. from different producing areas and species [J]. *Modern Chinese Medicine*, 2022, 24 (6): 996–1002. [王莹, 时锐, 张南平, 等. 不同产地和不同品种枸杞中多糖成分测定 [J]. 中国现代中药, 2022, 24 (6): 996–1002]
- Wu SY, He Z, Wang ED, *et al.* Application of *Beauveria bassiana* and *Neoseiulus barkeri* for improved control of *Frankliniella occidentalis* in greenhouse cucumber [J]. *Crop Protection*, 2017, 96: 83–87.
- Xu CQ, Liu S, Xu R, *et al.* Investigation of production status in major wolfberry producing areas of China and some suggestions [J]. *China Journal of Chinese Materia Medica*, 2014, 39 (11): 1979–1984. [徐常青, 刘赛, 徐荣, 等. 我国枸杞主产区生产现状调研及建议 [J]. 中国中药杂志, 2014, 39 (11): 1979–1984]
- Xiao Y, Fadamiro HY. Functional responses and prey – stage preferences of three species of predacious mites (Acari: Phytoseiidae) on citrus red mite, *Panonychus citri* (Acari: Tetranychidae) [J]. *Biological Control*, 2010, 53 (3): 345–352.
- Xu LB, Duan LQ. Study on bio – characteristics and threshold temperature and effective temperature of *Aceria pallida* Keifer [J]. *Journal of Inner Mongolia Agricultural University* (Natural Science

- Edition), 2005, 26 (2): 55–57. [徐林波, 段立清. 枸杞瘿螨的生物学特性及其有效积温的研究 [J]. 内蒙古农业大学学报 (自然科学版), 2005, 26 (2): 55–57]
- Xu XN, Lv JL, Wang ED. Review of research on predatory mites and its applications in China [J]. *China Plant Protection*, 2013, 33 (10): 26–34. [徐学农, 吕佳乐, 王恩东. 捕食螨在中国的研究与应用 [J]. 中国植保导刊, 2013, 33 (10): 26–34]
- Yan HX, Guo J. Study on disease and pest control technology of *Lycium barbarum* in Zhongning [J]. *Agriculture and Technology*, 2019, 39 (21): 117–118. [严海霞, 郭洁. 中宁枸杞病虫害防治技术研究 [J]. 农业与技术, 2019, 39 (21): 117–118]
- Yang MK. Effects of *Aceria pallida* and *Bactericera gobica* on Host's Transcripts, Metabolism and Co-Inhabitants [D]. Beijing: Peking Union Medical College Master Thesis, 2020. [杨孟可. 枸杞瘿螨和枸杞木虱对寄主植物转录代谢及共栖生物的影响 [D]. 北京: 北京协和医学院硕士论文, 2020]
- Yang NQ, Zhou XL, Yu L, et al. Field control effect of several acaricides on *Aceria pallida* [J]. *China Plant Protection*, 2021, 41 (8): 84–86. [杨宁权, 周兴隆, 于丽, 等. 多种杀螨剂对枸杞瘿螨的田间防效 [J]. 中国植保导刊, 2021, 41 (8): 84–86]
- Zeng KK. Evaluation of Predation Potential of *Neoseiulus striatus* on Two Species of *Tetranychus* Mites [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University Master Thesis, 2021. [曾科科. 条纹新小绥螨对两种叶螨的捕食潜力评价 [D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学硕士论文, 2021]
- Zhang PF, Meng RX, Zhang DX, et al. Newly recorded species of phytoseiid predators in Inner Mongolia [J]. *Journal of Inner Mongolia Agricultural University*, 2012, 33 (3): 16–19. [张鹏飞, 孟瑞霞, 张东旭, 等. 内蒙古地区植绥螨的新记录种 [J]. 内蒙古农业大学学报, 2012, 33 (3): 16–19]
- Zhou Y, Chen JY, Cai DC, et al. Functional Response of *Neoseiulus barkeri* to *Scirtothrips dorsalis* Hood of Mango [J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2020, 41 (5): 1001–1006. [周炀, 陈俊谕, 蔡笃程, 等. 巴氏新小绥螨对芒果茶黄蓟马的功能反应研究 [J]. 热带作物学报, 2020, 41 (5): 1001–1006]