

温度对象虫金小蜂发育和繁殖的影响*

郭 军^{1**} 戴仁怀^{1***} 杨 洪^{1,2} 杨茂发^{1,2} 胡大鸣³ 张晓敏³ 王 燕³

(1. 贵州大学昆虫研究所, 贵阳 550025; 2. 贵州大学烟草学院, 贵阳 550025; 3. 贵州中烟工业有限责任公司, 贵阳 550025)

摘 要 【目的】为明确温度对象虫金小蜂 *Anisopteromalus calandrae* (Howard)发育和繁殖的影响。

【方法】本文研究了5个温度梯度下以烟草甲 *Lasioderma serricorne* 为寄主的象虫金小蜂的存活率、发育历期、成虫寿命和产卵量等生物学特性的变化,采用最小二乘法计算出各虫态的发育起点温度和有效积温。用线性回归、Logistic 模型以及“王-兰-丁”模型对温度与象虫金小蜂发育速率的关系进行拟合。【结果】象虫金小蜂卵孵化率随温度升高呈先升高后降低的趋势,当温度为25℃时,象虫金小蜂的孵化率最高,达到88.67%;象虫金小蜂幼虫期存活率随温度升高而逐渐降低;温度与各虫态的发育历期之间呈明显的负相关,即随着环境温度升高,发育历期明显缩短。象虫金小蜂成虫寿命随温度升高呈现缩短趋势,22℃平均寿命长达17.88 d,31℃平均寿命仅为9.89 d,成虫产卵量则随着温度的升高而升高。全世代发育起点温度为17.81℃,有效积温为138.48℃·d;各参数表明直线模型和 Logistic 模型比“王-兰-丁”模型更能拟合象虫金小蜂发育速率与温度之间的关系。【结论】温度对象虫金小蜂种群发育和繁殖具有显著影响,25–31℃是象虫金小蜂生长发育和繁殖的最适温度范围。

关键词 象虫金小蜂;发育速率;发育起点温度;有效积温;数学模型

Influence of temperature on the development and reproduction of *Anisopteromalus calandrae* (Hymenoptera: Pteromalidae)

GUO Jun^{1**} DAI Ren-Huai^{1***} YANG Hong^{1,2} YANG Mao-Fa^{1,2}
HU Da-Ming³ ZHANG Xiao-Min³ WANG Yan³

(1. Institute of Entomology, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 2. College of Tobacco Science, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 3. China Tobacco Guizhou Industrial CO., LTD, Guiyang 550025, China)

Abstract [Objectives] To explore the influence of temperature on the development and reproduction of experimental populations of *Anisopteromalus calandrae*. [Methods] The duration of different developmental stages of *A. calandrae* were measured at 5 different temperatures. The developmental threshold temperature and effective accumulated temperature were calculated using the least square method and the relationship between temperature and developmental stage was modelled using linear regression, a Logistic model and a “Wang-Lan-Ding” model. [Results] The hatching rate of *A. calandrae* first increased, then decreased, with temperature. The highest hatching rate of larvae (88.67%) occurred at 25℃. Larval survival decreased with temperature and there was a significant negative correlation between temperature and the developmental duration of each instar; i.e. the developmental period was significantly shorter at higher temperatures. The lifespan of adult *A. calandrae* tended to decrease with temperature; average life expectancy at 22℃ was 17.88d, whereas that at 31℃ was only 9.89d. Female fecundity increased with temperature. The developmental threshold temperature and the effective accumulated temperature for a generation were 17.81℃ and 138.48 degree·days, respectively. A linear regression and Logistic model more closely approximated the relationship between development rate and temperature than the “Wang-Lan-Ding” model.

*资助项目 Supported projects: 贵州中烟工业有限责任公司计划项目; 寄生蜂防治烟草甲的应用技术研究 ([2017]25); 贵州省烟草公司毕节分公司科技项目: 毕节市烟蚜捕食性天敌生防体系的构建与应用 ([2016]82)

**第一作者 First author, E-mail: 1414668014@qq.com

***通讯作者 Corresponding author, E-mail: E-mail: rhdai-d@163.com

收稿日期 Received: 2018-11-05; 接受日期 Accepted: 2019-01-29

[Conclusion] Temperature has a significant effect on the development and reproduction of *A. calandreae* and the optimum temperature range for the growth and reproduction of this species is between 25-31 °C.

Key words *Anisopteromalus calandreae*; developmental rate; developmental threshold temperature; effective accumulated temperature; mathematical model

象虫金小蜂 *Anisopteromalus calandreae* 隶属于膜翅目 Hymenoptera, 金小蜂科 Pteromalidae, 异金小蜂属 *Anisopteromalus*。象虫金小蜂可寄生四纹豆象 *Callosobruchus maculatus*、谷象 *Sitophilus granarius*、米象 *Sitophilus oryzae*、玉米象 *Sitophilus zeamais*、烟草甲 *Lasioderma serricorne* 和药材甲 *Stegobium paniceum* 等仓储害虫 (Timokhov and Gokhman, 2003; Ghimire and Phillips, 2007; 孙永超等, 2007)。象虫金小蜂主要寄生烟草甲的高龄幼虫和蛹, 以老熟幼虫在寄主茧内越冬。在 25℃ 完成一代需 18.2 d, 单雌出蜂量 54.75 头 (郭军等, 2018)。象虫金小蜂属于体外单寄生蜂, 具有发育历期短, 繁殖力高等优点, 是一种优良寄生性天敌, 具有广阔的运用前景。

昆虫是变温动物, 温度是影响昆虫种群生长发育、存活、繁殖、种群增长及季节动态的重要因素 (Logan et al., 1976; 刘健等, 2003; Zamani et al., 2007; 高桂珍等, 2012; 王堇秀和李学军, 2016)。同时, 发育起点温度是研究昆虫行为特征的重要参数之一, 开展有效积温和发育起点温度的研究也是昆虫生物学和行为学研究的基础 (唐业忠等, 1993)。目前对于象虫金小蜂的发育起点温度和有效积温等基础生物学特性的研究尚未见报道。本试验采用烟草甲为寄主, 在室内通过设置一系列温度梯度来比较不同温度对象虫金小蜂寿命、生殖力及发育历期的影响, 为分析外界环境条件对象虫金小蜂种群数量变动, 为制定仓库鞘翅目害虫的综合防治措施提供理论基础, 从而提高象虫金小蜂在生物防治领域的应用价值。

1 材料与方法

1.1 供试虫源及材料

象虫金小蜂、烟草甲于 2016 年 10 月采自贵

州中烟公司烟仓 (贵阳), 用人工饲料饲养烟草甲 (人工饲料比例: 玉米渣: 酵母粉: 烟叶粉末 = 15:1:0.75), 象虫金小蜂用烟草甲幼虫饲养。饲养条件, 温度 (25±1)℃、相对湿度 70%±5%、光周期 16L:8D。

所用实验器具包括人工气候箱、显微镜、罐头瓶 (直径 7.5 cm, 高 10 cm 的玻璃罐头瓶)、养虫盒 (直径 5 cm, 高 2.5 cm 的小塑料盒)、镊子、软毛刷等。

1.2 温度处理

本试验中, 采用 LED 型人工气候箱进行昆虫饲养, 人工气候箱分别设置 19、22、25、28、31℃ 共 5 个梯度的恒温条件 (温度波动范围 ±1℃) 相对湿度为 70%±5%, 光周期 14L:10D, 光照强度为 15 000 lx。

1.3 温度对象虫金小蜂生长发育及繁殖的影响

取刚交配完的象虫金小蜂成虫 50 对放入养虫罐中, 放入烟草甲大龄幼虫 (5-6 龄) 的虫茧供其产卵。8 h 后, 解剖虫茧, 将 250 头带有象虫金小蜂卵粒的烟草甲幼虫平均分成 5 组放入养虫盒中, 分别置于 5 个温度梯度下, 待其孵化, 系统记录卵历期、孵化率、幼虫期 (因为象虫金小蜂幼虫不便于分龄期, 故将象虫金小蜂整个幼虫期合为一个观察项目)、蛹期。每组重复 3 次, 每日观察 3 次 (8:00、15:00、22:00), 记录卵孵化率、幼虫存活率、蛹存活率, 直至所有成虫羽化。将搜集到的成虫配对饲养于放入烟草甲的养虫盒中, 记录产卵前期、产卵量、产卵历期、孵化率和成虫寿命。

1.4 数据处理

实验数据以 Excel 2007 进行整理, 以加权平均法进行统计, 采用 SPSS17.0 软件进行方差分析, 多重比较采用 Duncan 氏新复极差法。按照

温度和发育速率的直线关系 ($T = C + KV$), 参照徐川峰等 (2017) 和姚洁等 (2016) 的方法计算昆虫完成发育所需要的有效积温。计算时根据有效积温法则, 采用最小二乘法 (李典谟和王莽莽, 1986) 进行计算。计算各虫态的发育起点温度 (C) 和有效积温 (K) 的计算公式如下:

$$C = \frac{\sum V^2 \sum T - \sum V \sum VT}{n \sum V^2 - (\sum V)^2},$$

$$K = \frac{n \sum VT - \sum V \sum T}{n \sum V^2 - (\sum V)^2}。$$

式中, T 为环境温度, C 为发育起点温度, K 为有效积温, V 为发育速率 (发育历期的倒数), n 为试验温度组数。按下列公式计算发育起点温度 (C) 和有效积温 (K) 的标准误, 分别为 S_c 和 S_k :

$$S_c = \sqrt{\frac{\sum (T - \bar{T})^2}{n - 2} \left\{ \frac{1}{n} + \frac{V^2}{\sum (V - \bar{V})^2} \right\}},$$

$$S_k = \sqrt{\frac{\sum (T - \bar{T})^2}{(n - 2) \sum (V - \bar{V})^2}}。$$

又以 SPSS22.0 分别采用直线回归、Logistic 模型和“王-兰-丁”模型拟合发育速率与温度的关系, 并比较 3 种方程拟合所得参数的异同, 获得象虫金小蜂对温度的生态适应性参数。

(1) 直线回归模拟 (冯康, 1978) 温度与象虫金小蜂发育速率之间的关系, 公式为:

$$K = at + b。$$

式中, K 为发育速率, t 为发育温度 (°C), a 和 b 均为常数。

(2) Logistic 模型 (Davidson, 1944) 拟合温度与象虫金小蜂发育速率之间的关系, 公式为:

$$V(t) = \frac{K}{1 + \text{EXP}(a - bt)}。$$

式中, K 为发育速率, t 为发育温度 (°C), a 和 b 均为常数。

(3) “王-兰-丁”模型 (王如松等, 1982) 拟合温度与象虫金小蜂发育速率之间的关系, 公式为:

$$V(t) = \frac{K}{1 + \text{EXP}[-r(t - T_0)]} \times \left[1 - \text{EXP}\left(-\frac{t - T_L}{\delta}\right) \right] \times \left[1 - \text{EXP}\left(-\frac{T_H - t}{\delta}\right) \right]。$$

式中, K 为高温下潜在的饱和发育速率, r 是发育速率随温度变化的指数增长率; T_L 和 T_H 分别为最高和最低发育温度, T_0 为最适发育温度, δ 为边界层宽度。

2 结果与分析

2.1 温度对象虫金小蜂卵孵化率和幼虫期、蛹期存活率的影响

象虫金小蜂在 19-31 °C 范围内孵化率、幼虫期和蛹期存活率实验结果见表 1。象虫金小蜂孵化率随温度升高呈先升高后降低的趋势, 当温度为 25 °C 时, 象虫金小蜂的孵化率达到最高值, 为 88.67%; 象虫金小蜂幼虫期存活率随温度升高而逐渐降低, 19 °C 时, 象虫金小蜂幼虫期存活率达到最高值, 为 65.06%; 而在 19 °C 条件下蛹不发育, 其他温度条件下蛹的存活率较高, 且都在 98% 以上。另外, 温度对象虫金小蜂孵化率和幼虫期存活率和蛹期存活率均符合抛物线方程, 拟合方程分别为 $y = -2.2138x^2 + 198.18x - 142.18$ ($R^2 = 0.6481$); $y = 371.97x^2 - 549.21x + 218.71$ ($R^2 = 0.9395$); $y = 65.039x^2 - 129.361x + 64.347$ ($R^2 = 0.6367$)。

2.2 温度对象虫金小蜂各虫态发育历期的影响

不同温度下象虫金小蜂各虫态的发育历期见表 2。在 22-31 °C 范围内设置的 4 个恒温梯度下, 象虫金小蜂均能全部完成生长发育, 而在 19 °C 恒温条件下象虫金小蜂进入蛹期后就不再发育。温度与各虫态的发育历期之间呈明显的负相关, 即随着环境温度升高, 发育历期明显缩短, 如卵的发育历期由 19 °C 的 2.95 d 缩短到 31 °C 的 0.86 d, 两者差距 2.09 d; 幼虫期由 19 °C 的 14.63 d 缩短到 31 °C 的 4.40 d, 两者差距 10.23 d; 蛹期由 22 °C 的 14.35 d 缩短到 31 °C 的 4.99 d, 两者差距 9.36 d; 产卵前期由 22 °C 的 2.45 d 缩短到 31 °C 的 0.41 d, 两者差距 2.04 d; 全世代

表 1 不同温度下象虫金小蜂卵孵化率及幼虫-蛹期存活率

Table 1 Hatchability of eggs and survival rate of *Anisopteromalus calandrae* at larval-pupal stage

温度 () Temperature	孵化率 (%) Hatchability of eggs	幼虫期存活率 (%) Survival rate at larval stage	蛹期存活率 (%) Survival rate at pupal stage
19	82.00 ± 2.37 a	65.06 ± 7.28 a	—
22	85.33 ± 3.83 a	59.33 ± 5.92 a	98.92 ± 3.45 a
25	88.67 ± 3.81 a	59.07 ± 1.00 a	1.00 ± 0.00 a
28	87.33 ± 2.51 a	56.69 ± 1.96 a	98.88 ± 3.51 a
31	86.00 ± 3.73 a	53.48 ± 1.72 a	98.33 ± 4.31 a

表中数据为平均数 ± 标准误, 同列数据后具不同字母者表示差异显著 ($P < 0.05$, Duncan 氏多重比较检验)。下表同。
Data in the table are mean ± SE, and followed by different letters in the same column are significantly different ($P < 0.05$, Duncan's multiple range test). The same below.

表 2 不同温度下象虫金小蜂的发育历期

Table 2 Developmental duration of *Anisopteromalus calandrae* at different temperatures

温度 () Temperature	卵期 (d) Egg duration	幼虫期 (d) Larval duration	蛹期 (d) Pupal duration	产卵前期 (d) Preoviposition duration	全世代 (d) Generation
19	2.95±0.13 a	14.63±0.18 a	—	—	—
22	2.75±0.24 a	15.03±0.34 a	14.35±0.41 a	2.45±0.03 a	34.58±0.40 a
25	1.54±0.06 b	6.01±0.13 b	9.96±0.33 b	1.03±0.05 b	18.54±0.17 b
28	1.03±0.04 c	5.34±0.18 c	6.23±0.08 c	0.70±0.01 c	13.30±0.28 c
31	0.86±0.02 c	4.40±0.16 d	4.99±0.15 d	0.41±0.01 d	10.67±0.07 d

由 22 的 34.58 d 缩短到 31 的 10.67 d, 两者差距 23.91 d; 方差分析表明, 不同温度下各虫态的发育历期同样存在极显著差异 ($P < 0.05$)。说明温度极显著影响全世代的发育历期 ($P < 0.05$)。

2.3 温度对成虫寿命及产卵量的影响

不同温度下象虫金小蜂成虫寿命和产卵量见表 3。象虫金小蜂成虫寿命随温度升高呈现缩短趋势, 22 平均寿命最高达 17.88 d, 31 平均寿命最低仅为 9.89 d, 两温度下平均寿命相

差 7.99 d, 说明温度对象虫金小蜂的成虫寿命具有显著影响 ($P < 0.05$)。象虫金小蜂产卵量在 22 为 20.88 粒, 随着温度的升高产卵量逐渐升高, 31 时象虫金小蜂产卵量最多, 达到 98.99 粒。

2.4 象虫金小蜂各虫态的发育起点温度和有效积温

象虫金小蜂各虫态的发育起点温度及有效积温见表 4。各虫态的发育起点温度均在 16-21, 且符合有效积温法则, 相关系数较高。产

表 3 不同温度下象虫金小蜂成虫寿命及产卵量

Table 3 Longevity and fecundity of female adults of *Anisopteromalus calandrae* at different temperatures

温度 () Temperature	产卵量 Number of eggs laid		寿命 Longevity (d)	
	平均值±SE	极差 Range	平均值±SE	极差 Range
22	20.88 ± 2.69 a	11-60	17.88±2.02 a	10.17-30.08
25	55.30 ± 2.31 b	38-81	14.60±0.17 ab	11.92-16.25
28	64.29 ± 1.21 b	48-88	11.48±0.19 bc	8.00-15.08
31	98.99 ± 5.75 c	69-123	9.89±0.84 c	5.83-11.83

表 4 象虫金小蜂各虫态的发育起点温度和有效积温
Table 4 Development threshold temperature and effective accumulated temperature of *Anisopteromalus calandrae*

虫态 Developmental stage	发育起点温度 () Development threshold Temperature	标准误 SE	有效积温 (日·度) Effective accumulated temperature (K)	标准误 SE	有效积温模型 Model of effective accumulated temperature $N = K/(T - C)$	相关系数 Correlation coefficient
卵 Egg	16.14	1.25	12.74	1.63	$N=12.74/(T - 16.14)$	0.95
幼虫 Larva	16.04	1.22	62.54	11.00	$N=62.54/(T - 16.04)$	0.92
蛹 Pupa	17.81	0.79	65.48	5.51	$N=65.48/(T - 17.81)$	0.99
产卵前期 Preovipositon	20.67	0.87	4.46	0.58	$N=4.46/(T - 20.67)$	0.97
全世代 Generation	17.78	0.45	138.48	6.66	$N=138.48/(T - 17.784)$	0.99

卵前期的发育起点温度最高为(20.67 ± 0.87) , 其次是蛹、全世代和卵分别为 (17.81 ± 0.79) 、 (17.78 ± 0.45) 和 (16.14 ± 1.22) , 幼虫的发育起点温度最低为 (16.04 ± 1.25) 。象虫金小蜂完成全世代发育所需有效积温为 (138.48 ± 6.66) 日·度, 各虫态中产卵前期所需要的有效积温最低为 (4.46 ± 0.58) 日·度, 占全世代所需有效积温的 3.22%; 蛹发育所需要的有效积温最高为 (65.48 ± 5.51) 日·度, 占全世代所需有效积温的 47.28%。

2.5 温度与象虫金小蜂发育速率之间的数学关系

用直线模型、Logistic 模型和“王-兰-丁”模型分别模拟发育速率和温度之间的关系见表 5。象虫金小蜂各虫态的发育速率与温度之间均呈显著的正相关性, 决定系数 (R^2) 均较高。线性关系中各虫期斜率: 卵为 0.075, 幼虫期为 0.015, 蛹期为 0.015, 产卵前期为 0.217, 全世代为 0.007。可见, 温度对象虫金小蜂发育速率具有极显著影响 ;其中各虫态中产卵前期的斜率

表 5 不同模型模拟象虫金小蜂发育速率和温度关系的参数值和拟合度
Table 5 Parameter values of three models describing the relationship between temperature and developmental rate of *Anisopteromalus calandrae*

模型 Model	参数 Parameter	卵期 Egg stage	幼虫 Larval stage	蛹期 pupal stage	产卵前期 Preovipositon stage	全世代 Generation
直线模型 Linear model	$t \pm SE$	0.075 ± 0.24	0.015±0.17	0.015±0.03	0.217±0.75	0.007±0.01
	$K \pm SE$	- 1.175±0.01	- 0.223±0.00	- 0.266±0.00	- 4.443±0.00	- 0.128±0.00
	R	0.98	0.97	0.99	0.98	1.00
	a	5.44	6.50	6.22	7.44	7.70
逻辑斯蒂模型 Logistic model	b	0.20	0.27	0.23	0.21	0.31
	R	0.99	0.96	0.99	0.99	1.00
	K	1.83	0.26	0.29	9.17	0.11
	T_L	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
“王-兰-丁”模型 Wang-Lan-Ding model	T_H	37.00	37.00	37.00	37.00	37.00
	T_0	27.92	24.19	25.83	25.64	26.45
	r	- 0.20	- 0.27	- 2.30	- 2.60	- 1.50
	S	0.17	0.25	0.09	1.15	8.96
	R	0.98	0.93	0.98	0.98	0.97

最大。即对温度变化反应最敏感。Logistic 模型的 R 值均在 0.96 以上,“王-兰-丁”模型的 T_0 (最适发育温度)在 24-27 之间, R 值也都在 0.93 以上。

各参数表明直线模型和 Logistic 模型比“王-兰-丁”模型更能拟合象虫金小蜂发育速率与温度之间的关系。

3 讨论

昆虫属变温动物,外界环境温度的改变将直接导致昆虫体温和新陈代谢速率的变化,许多研究表明,在诸多生物和非生物因子中,温度是影响昆虫生长发育的最主要因子(Hagstrum and Milliken, 1988; 丁岩钦, 1994)。温度还是决定寄生蜂的生物防治效果最重要因素之一(van Lenteren, 1986; Mahdian *et al.*, 2006)。本研究以烟仓中重要害虫烟草甲的优良天敌——象虫金小蜂为材料,探讨了温度变化对以烟草甲为寄主的象虫金小蜂生长发育和繁殖的影响。

结果表明,象虫金小蜂卵的孵化率随温度升高呈先升高后降低的趋势;幼虫存活率随着温度升高而逐渐降低,19 时最高为 65%,31 时最低仅有 53%;幼虫期存活率偏低的原因可能是,实验时将寄主茧剖开,导致初孵幼虫容易从寄主体壁上脱落,无法继续补充营养而死亡。19 时,象虫金小蜂的幼虫进入蛹期后不再发育;温度上升到 22 后,象虫金小蜂能完成整个世代生长发育,但是成蜂的生殖力受到明显的削弱,生殖行为不活跃,产卵节奏缓慢,世代产卵量为 20.88 粒。说明当温度低于 22 时,象虫金小蜂的生长发育与繁殖明显受到抑制。

在 22-31 范围内设置的 4 个恒温梯度下,象虫金小蜂均能全部完成生长发育,温度与各虫态的发育历期之间呈明显的负相关,即随着环境温度升高,发育历期明显缩短。从生物学意义上说,发育历期的缩短是发育条件适合性的反映,而历期的缩短则有利于种群对环境的适应及进化(Godfray, 1993)。象虫金小蜂成虫寿命随温度升高而呈现缩短趋势,产卵量随着温度的升高

逐渐升高,22 平均寿命最高达 17.88 d,产卵量为 20.88 粒,31 平均寿命最低仅为 9.89 d,产卵量最多为 98.99 粒。两温度下平均寿命相差 7.99 d,产卵量相差 78.11 粒,说明温度对象虫金小蜂的成虫寿命和产卵量具有显著影响($P < 0.05$),这与很多寄生蜂的研究结果相似(Stouthamer, 1993; 尹承山等, 2003; 康晓霞等, 2006; Niedermayer *et al.*, 2013)。象虫金小蜂各虫态的发育起点温度均在 16-21,全世代发育起点温度为 17.78,有效积温为 138.48 日·度。采用线性回归、Logistic 模型和“王-兰-丁”模型拟合象虫金小蜂发育速率与温度之间的关系,各参数表明直线模型和 Logistic 模型比“王-兰-丁”模型更能拟合象虫金小蜂发育速率与温度之间的关系。

在自然界中,象虫金小蜂的越冬虫态为茧内的老熟幼虫或蛹,结合本实验结果(蛹的发育历期最长)可以确定蛹期为该蜂商品化生产时的最佳储存、运输虫态。在人工扩繁和防治应用过程中可以给予蛹期以适宜温度控制其发育进度。本研究所求得的象虫金小蜂各虫态的发育起点温度和有效积温是在特定恒温条件下的实验结果,将其用作预测依据时应考虑其局限性,同时还应注意恒温 and 变温条件的不同。

致谢:感谢贵州大学农学院 2017 级农业昆虫与害虫防治专业博士生周操对本实验的指导,特此致谢!

参考文献 (References)

- Davidson J, 1944. On the relationship between temperature and rate of development of insects at constant temperatures. *Journal of Animal Ecology*, 1(1): 26-38.
- Ding YQ, 1994. *Mathematical Ecology of Insects*. Beijing: Science Press. 318-326. [丁岩钦, 1994. 昆虫数学生态学. 北京: 科学出版社. 318-326.]
- Feng K, 1978. *Methods of Numerical Calculation*. Beijing: National Defence Industry Press. 154-160. [冯康, 1978. 数值计算方法. 北京: 国防工业出版社. 154-160.]
- Gao GZ, Lv ZZ, Xia DP, Sun P, 2012. Effects of pattern and timing of high temperature exposure on the mortality and fecundity of *Aphis gossypii* Glover on cotton. *Acta Ecologica Sinica*, 32(23):

- 7568–7575. [高桂珍, 吕昭智, 夏德萍, 孙平, 2012. 高温胁迫及其持续时间对棉蚜死亡和生殖的影响. 生态学报, 32(23): 7568–7575.]
- Ghimire MN, Phillips TW, 2007. Suitability of five species of stored-product insects as hosts for development and reproduction of the parasitoid *Anisopteromalus calandrae* (Hymenoptera: Pteromalidae). *Journal of Economic Entomology*, 100(5): 1732–1739.
- Godfray HCJ, 1993. Parasitoids, Behavioral and Evolutionary Ecology. Princeton: Princeton University Press. 307–360 .
- Guo J, Dai RH, Yang H, Yang MF, Hu DM, Zhang XM, Wang Y, 2018. Biological characteristics of *Anisopteromalus calandrae* (Howard) (Hymenoptera: Pteromalidae: Anisopteromalus), parasitized on *Lasioderma serricornis* (Fabricius). *Chinese Journal of Biological Control*, 34(5): 649–655. [郭军, 戴仁怀, 杨洪, 杨茂发, 胡大明, 张晓敏, 王燕, 2018. 烟草甲的优良寄生蜂象虫金小蜂的生物学特性. 中国生物防治学报, 34(5): 649–655.]
- Hagstrum DW, Milliken GA, 1988. Quantitative analysis of temperature, moisture, and diet factors affecting insect development. *Annals of the Entomological Society of America*, 81(4): 539–546.
- Kang XX, Zhao GM, Gong YF, Li L, Yang YZ, 2006. Biological characteristics of adult *Apanteles opacus*, a parasitoid of *Sylepta derogata*. *Chinese Journal of Biological Control*, 22(4): 275–278. [康晓霞, 赵光明, 龚一飞, 李丽, 杨益众, 2006. 棉大卷叶螟绒茧蜂生物学特性观察. 中国生物防治, 22(4): 275–278.]
- Liu J, Wu KM, Zhao KJ, Guo YY, 2003. The ecological adaptability of *Aphis gossypii* collected from different climate zones to temperature and photoperiod. *Acta Ecologica Sinica*, 23(5): 860–869. [刘健, 吴孔明, 赵奎军, 郭予元, 2003. 不同地理种群棉蚜对温度和光周期的生态适应性. 生态学报, 23(5): 860–869.]
- Li DM, Wang MM, 1986. Methods of rapidly estimating the developmental threshold temperature and effective accumulative temperature. *Entomological Knowledge*, 23(4): 184–187. [李典谟, 王莽莽, 1986. 快速估计发育起点及有效积温法的研究. 昆虫知识, 23(4): 184–187.]
- Logan JA, Wollkind DJ, Hoyt SC, Tanigoshi LK, 1976. An analytic model for description of temperature dependent rate phenomena in arthropods. *Environmental Entomology*, 5(6): 1133–1140.
- Mahdian KI, Vantornhout LT, De Clercq P, 2006. Effects of temperature on predation by the stinkbugs *Picromerus bidens* and *Podisus maculiventris* (Heteroptera: Pentatomidae) on noctuid caterpillars. *Bulletin of Entomological Research*, 96(5): 489–496.
- Niedermayer S, Obermaier E, Steidle JLM, 2013. Some like it hot, some not: influence of extreme temperatures on *Lariophagus distinguendus* and *Anisopteromalus calandrae*. *Journal of Applied Entomology*, 137(1–2): 146–152.
- Stouthamer R, 1993. The use of sexual versus asexual wasps in biological control. *Entomophaga*, 38(1): 3–6.
- Sun YC, He LF, Chen XF, Xu ZF, 2007. First record of *Anisopteromalus calandrae* (Howard) (Hymenoptera: Pteromalidae) from China. *Journal of Environmental Entomology*, 29(1): 26–29. [孙永超, 何娜芬, 陈新芳, 许再福, 2007. 象虫金小蜂中国新记录. 昆虫天敌, 29(1): 26–29.]
- Timokhov AV, Gokhman VE, 2003. Host preferences of parasitic wasps of the *Anisopteromalus calandrae* species complex (Hymenoptera: Pteromalidae). *Acta Societatis Zoologicae Bohemoslovacae*, 67(1): 35–39.
- van Lenteren JC, 1986. Evaluation, mass production, quality control and release of entomophagous insects. *Fortschritte der Zoologie*, 32: 31–56.
- Wang JX, Li XJ, 2016. Study on life table of experimental population of *Semiaphis heraclei* (Takahashi) at different temperatures. *Liaoning Agricultural Sciences*, (2): 1–5. [王董秀, 李学军, 2016. 不同温度下胡萝卜微管蚜实验种群生命表研究. 辽宁农业科学, (2): 1–5.]
- Wang RS, Lan ZX, Ding YQ, 1982. Mathematical models of the relationship between insect development and temperature. *Acta Ecologica Sinica*, 2(1): 47–57. [王如松, 兰仲雄, 丁岩钦, 1982. 昆虫发育速率与温度关系的数学模型研究. 生态学报, 2(1): 47–57.]
- Xu CF, Luo D, Yin LX, Liu XP, 2017. Influence of temperature on the development and reproduction of the camphor sawfly, *Mesoneura rufonota* (Hymenoptera: Tenthredinidae). *Acta Entomologica Sinica*, 60(10): 1216–1225. [徐川峰, 骆丹, 殷立新, 刘兴平, 2017. 温度对樟叶蜂生长发育和繁殖的影响. 昆虫学报, 60(10): 1216–1225.]
- Yao J, Dai RH, Dai CY, Yang H, 2016. Effects of temperature on the development and reproduction of *Acanthoscelides obtectus* (Coleoptera: Bruchidae). *Acta Entomologica Sinica*, 59(7): 739–746. [姚洁, 戴仁怀, 代传勇, 杨洪, 2016. 温度对菜豆象发育和繁殖的影响. 昆虫学报, 59(7): 739–746.]
- Yin CS, Chen XX, Lang FY, He JH, 2003. Biological characteristics of adult *Opius caricivora* Fischer, a parasitoid of *Liriomyza sativae* Blandhard. *Acta Entomologica Sinica*, 46(4): 505–511. [尹承山, 陈学新, 朗法勇, 何俊华, 2003. 美洲斑潜蝇寄生蜂——黄腹潜蝇茧蜂成虫的生物学习性. 昆虫学报, 46(4): 505–511.]
- Zamani AA, Talebi A, Fathipour Y, Baniamiri C, 2007. Effect of temperature on life history of *Aphidius colemani* and *Aphidius matricariae* (Hymenoptera: Braconidae), two parasitoids of *Aphis gossypii* and *Myzus persicae* (Homoptera: Aphididae). *Environmental Entomology*, 36(2): 263–271.