

温度对三突花蛛发育存活与 生殖影响的模型化研究*

李代芹 赵敬钊

(湖北大学生物系, 武汉)

摘 要

本文根据实验数据所呈现的规律, 建立了模拟温度对三突花蛛(*Misumenops tricuspidatus*)发育、存活与生殖的数学模型系列, 经数学模拟, 表明王如松等(1982)导出的具有上下限的温度与发育速率关系的数学模型,

$$V(T) = \frac{K}{1 + \exp(-r(T - T_0))} \left(1 - \exp\left(-\frac{T - T_L}{b}\right)\right) \left(1 - \exp\left(-\frac{T_H - T}{b}\right)\right)$$

及抛物线模型、Logistic模型能很好地拟合三突花蛛的发育、存活和生殖与温度的相互关系。讨论了影响三突花蛛发育、存活和生殖的有关参数及其生物学意义。

关键词: 温度, 三突花蛛, 发育, 生殖, 数学模型。

根据实验数据建立数学模型来揭示实验数据呈现的内在规律是一种重要的科学研究方法。动物生长发育和生殖过程中, 温度是影响最显著的一个生态因子。动物发育速率、存活与温度的关系, 由于在害虫预测预报和天敌利用上的巨大应用价值, 历来受到人们的重视, 曾提出各种模型来描述这一规律。在这众多的模型中, 大多数模型^[1-6]不能反映发育速率与温度关系的实质。笔者于1987—1988年间对三突花蛛(*Misumenops tricuspidatus*)的实验种群作了比较详细的研究。根据实验数据, 将温度对三突花蛛发育存活和生殖的影响建立了一个数学模型系列, 共8个主要的模型。现将结果报道如下:

一、材料和方法

实验动物 三突花蛛在1987、1988年早春从武汉市郊的农田里捕捉。

实验条件 试验在恒温箱内进行, 箱内的相对湿度为60—80%, 共设置15℃、20℃、25℃、28℃、30℃和32℃等6个处理。每天检查一次、加水和喂食。试验中记载发育历期、产卵量、孵化率及存活等项目。食物为果蝇(*Drosophila* sp.)和摇蚊(*Tendipes* sp.)。

模型 用王如松等(1982)^[9]提出的有上、下限的Logistic曲线模型、抛物线模型及Logistic曲线等模型进行拟合。参数估计用最小阻尼二乘法、最小二乘法, 在IBM-PC/XT型微机上进行。

二、结果分析与数学模型

温度对三突花蛛发育历期影响的结果见表1。根据表1数据组建三突花蛛发育速率与温

* 国家自然科学基金资助项目。
本文于1990年4月19日收到。

度关系的数学模型的各参数列于表 3。

1. 温度对卵发育速率影响的数学模型

表 1 三突花蛛在不同恒温条件下的发育历期*(天)(武昌, 1988)

Table 1 Duration of *M. tricuspidatus* under the different temperature (day)

温度 (°C)	试验 数量 (头)	卵期 (天)	幼蛛各龄期(天)							全幼蛛期(天)		产卵 前期 (天)	全代历期(天)	
			一龄	二龄	三龄	四龄	五龄	六龄	七龄	雌	雄		雌	雄
15	30	28	11	31.94 ± 9.47	21.20 ± 3.51	17.68 ± 3.39	15.27 ± 3.04	23.80 ± 2.13	24.33 ± 4.68	149.00 ± 29.11	124.60 ± 21.59	33	208.00	183.60
20	29	14	8	24.47 ± 6.69	16.83 ± 5.13	14.60 ± 9.59	14.70 ± 4.97	19.88 ± 5.08	22.67 ± 3.77	119.67 ± 20.42	101.50 ± 22.05	25	158.67	140.50
25	29	8	6	19.88 ± 6.16	12.27 ± 4.65	8.28 ± 3.22	9.23 ± 2.17	11.27 ± 5.24	14.50 ± 1.71	79.71 ± 11.29	61.50 ± 12.12	15	102.71	84.50
30	54	5	5	13.44 ± 2.08	7.48 ± 3.61	7.33 ± 2.40	7.00 ± 2.18	8.50 ± 3.17	10.00 ± 5.29	51.31 ± 6.87	43.52 ± 11.62	11	67.31	59.62
32	50	5	5	13.40 ± 3.23	4.85 ± 1.43	4.88 ± 0.94	5.16 ± 1.12	6.33 ± 1.18	8.50 ± 0.71	40.00 ± 4.84	36.73 ± 5.14	9	54.00	52.73

* 食物为摇蚊(*Tendipes* sp.). 试验数量项不包括一龄, 从二龄算起。

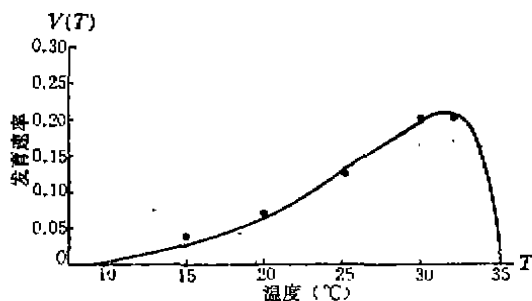


图 1 卵期发育速率与温度的关系
点为实测值; 线为模型推算值(下同)
图中曲线为:

$$V(T) = \frac{0.4255 \times \left(1 - \exp\left(-\frac{T - 9.9566}{1.8605}\right)\right)}{1 + \exp(-0.1645 \times (T - 30.0001))} \times \left(1 - \exp\left(-\frac{35.0151 - T}{1.8605}\right)\right)$$

Fig.1 Relationship between the temperature and the rate of egg development of *M. tricuspidatus*, dots are observed values, while the lines are estimates of the model

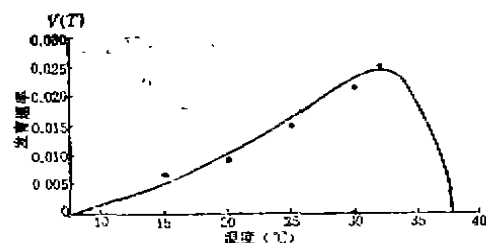


图 2 三突花蛛幼期发育速率与温度关系
图中曲线为:

$$V(T) = \frac{0.04882 \times \left(1 - \exp\left(-\frac{T - 7.9989}{1.9897}\right)\right)}{1 + \exp(-0.12901 \times (T - 30.0001))} \times \left(1 - \exp\left(-\frac{37.9989 - T}{1.9897}\right)\right)$$

Fig.2 Relationship between the temperature and the rate of development of whole spiderling stage of *M. tricuspidatus*

由图 1 可知, 卵发育的温区为 9.9566—35.0151°C。当温度低于 9.9566°C 或高于 35.0151°C 时, 卵迅速停止发育或死亡; 卵发育的最适温度为 30.00001°C, 其相应的发育速率最快, 为 0.2128。三突花蛛卵发育速率随温度的指数增长率为 0.1645, 对高低温的耐受宽度为 1.8605°C。实际试验中, 发育在以 35°C 上时停止, 即卵在 35°C 以上时不能孵化。这与卵发育的最高温度临界点的理论模拟值极为一致。

2. 温度对幼蛛期发育速率影响的数学模型

由图 2 可知,全幼蛛期发育的最适温度为 30.0001℃,此时的发育速率最快,为 0.02341。全幼蛛期发育的高、低温临界温度分别为 37.9999℃和 7.9999℃,低于 7.9999℃或高于 37.9999℃的温度,幼蛛停止发育或死亡。

3. 温度对全世代发育速率影响的数学模型

由图 3 知,全世代发育的温度范围在 7.9999℃—38.0001℃之间,其发育的低、高温临界点分别是 7.9999℃和 38.0001℃。在可发育的温区内,全世代的发育速率随温度的升高而增加,发育速率变化的拐点为 28.0001℃,在此拐点附近,发育速率最快,可达 0.01474。

在不同恒温条件下,三突花蛛幼蛛各龄期的存活率试验结果如表 2。根据表 2 中数据建立三突花蛛幼蛛存活率与温度关系的数学模型的各项参数值列于表 3。

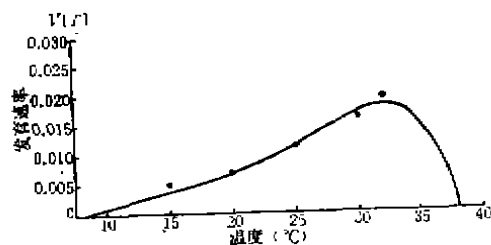


图 3 三突花蛛全世代发育速率与温度关系图中曲线为:

$$V(T) = \frac{0.02948 \times \left(1 - \exp\left(-\frac{T - 7.9999}{1.9998}\right)\right)}{1 + \exp(-0.16206 \times (T - 28.0001))} \times \left(1 - \exp\left(-\frac{38.0001 - T}{1.9998}\right)\right)$$

Fig.3 Relationship between the temperature and the developmental rate of whole generation of *M. tricuspidatus*

表 2 不同温度下三突花蛛各龄期存活率(%) (武昌, 1988)

Table 2 The survival rate of *M. tricuspidatus* under the different constant temperature

幼蛛龄期	15℃			20℃			25℃			30℃			32℃		
	进入该龄的幼蛛数	存活进入下龄的幼蛛数	存活率(%)	进入该龄的幼蛛数	存活进入下龄的幼蛛数	存活率(%)	进入该龄的幼蛛数	存活进入下龄的幼蛛数	存活率(%)	进入该龄的幼蛛数	存活进入下龄的幼蛛数	存活率(%)	进入该龄的幼蛛数	存活进入下龄的幼蛛数	存活率(%)
一龄	34	30	88.23	30	29	96.67	30	29	96.67	55	54	98.18	52	50	96.25
二龄	30	18	60.00	29	16	51.72	29	16	55.17	54	34	62.96	50	19	38.00
三龄	18	15	83.33	15	12	80.00	16	16	100.0	34	29	85.29	19	19	100.0
四龄	15	13	86.67	12	11	91.67	16	15	93.75	29	27	93.10	19	19	100.0
五龄	13	11	84.62	11	10	90.91	14	14	100.0	25	24	96.00	19	19	100.0
六龄	10	10	100.0	8	8	100.0	12	12	100.0	19	19	100.0	16	16	100.0
七龄	6	6	100.0	6	6	100.0	6	6	100.0	5	5	100.0	2	2	100.0
全幼蛛期	34	11	32.35	30	10	33.33	30	15	50.00	55	24	43.64	52	19	36.54

4. 温度对幼蛛存活率影响的数学模型

$$S = -42.5902 + 6.8230T - 0.1335T^2$$

S: 幼蛛存活率(%), T: 温度(℃), 拟合均方差为 96.7513。

表 3 三突花蛛发育速率、存活率与生殖与温度关系的参数估计

Table 3 Parameter estimation of the relationship between the development rate, survival rate, reproduction and the temperature

项目	k	γ	T_0	T_L	T_H	δ	$\sqrt{\frac{\sum(Y_i - \bar{Y})^2}{n-1}}$
孵化率			25.83	11.61	40.05		
卵发育速率	0.4265	0.1645	30.00	9.86	35.02	1.86	0.00465
一龄幼蛛发育	0.3699	0.0925	27.10	5.00	36.93	2.20	0.00134
二龄幼蛛发育	0.1877	0.13446	28.01	8.00	33.97	2.04	0.01051
三龄幼蛛发育	0.2633	0.3212	28.01	9.00	36.00	1.49	0.03552
四龄幼蛛发育	0.2784	0.2891	28.00	9.00	37.00	1.49	0.04332
五龄幼蛛发育	0.2858	0.1231	28.03	7.88	37.08	1.32	0.01708
六龄幼蛛发育	0.2654	0.1240	28.01	9.00	38.30	2.00	0.02039
七龄幼蛛发育	0.2099	0.0993	29.00	9.00	38.20	2.00	0.01209
全幼蛛期发育	0.0468	0.1290	30.00	9.00	38.00	2.00	0.00164
全世代发育	0.0295	0.1521	28.00	8.00	38.00	2.00	0.00103
幼蛛期存活率			25.55	7.28	43.83		
世代存活率	0.9571	0.1512	25.70	-6.69	35.36	6.05	0.03970

由模型模拟, 三突花蛛幼蛛存活温度范围为7.28—43.83℃; 幼蛛在25.55℃时, 存活率最高, 达44.59%; 在7.28℃以下, 存活率下降; 43.83℃时, 存活率为0。可见, 三突花蛛是一种适宜在较低温度下生活的蛛种, 与田间调查基本相符。这对棉花后期害虫具有较大的控制作用。

5. 温度对产卵前期历期的影响的数学模型

$$N = \frac{1 + \exp(3.15728 - 0.1127T)}{0.16387}$$

其中, N 为产卵前期历期(天), T 为温度(℃), 拟合均方差为2.0516。

产卵前期历期也是蜘蛛生殖能力的一个重要特征。由上述模型模拟知, 产卵前期随温度的升高而缩短, 其极值为6.10天; 发育历期随温度升高而增长的拐点约为28℃。即在28℃以下随温度的上升, 产卵前期逐渐缩短, 在28℃以上随温度上升, 产卵前期趋于延长。

6. 温度对单雌平均产卵量影响的数学模型

$$E = -544.2925 + 59.2234T - 1.1962T^2$$

式中, E 为单雌平均产卵量, T 为温度(℃)。均方拟合误差为49.4289, 相关系数为0.8784。

由此模型模拟, 三突花蛛在温度为24.75℃时, 单雌平均产卵量最高达189粒卵; 三突花蛛可产卵的温度范围为12.19℃—34.44℃。

7. 温度对孵化率影响的数学模型

$$H = -200.0785 + 22.2346T - 0.4304T^2$$

其中, H 为孵化率(%), T 为温度(℃)。拟合均方差为44.2657。

由上述模型模拟可知, 三突花蛛孵化的最佳温度为25.83℃, 其相应的最高孵化率为87.09%, 此理论模拟值与试验观察到的结果基本吻合; 卵孵化的温度范围为11.61—40.05℃。

8. 温度对世代存活率影响的数学模型

$$S = \frac{0.9571 \times \left(1 - \exp\left(-\frac{T + 6.6930}{6.0534}\right) \right) \left(1 - \exp\left(-\frac{35.3588 - T}{6.0534}\right) \right)}{1 + \exp(-0.1512 \times (T - 25.7045))}$$

由此模型模拟, 三突花蛛世代存活温度范围为 -6.6930°C — 35.3588°C 。最适存活温度为 25.7045°C 。整个世代在高、低温临界点的边界层宽度为 6.0534°C 。

根据试验结果及表3的参数, 得到三突花蛛在各级温度下的活动状况(见表4)。

三、讨 论

三突花蛛发育、生殖和存活与温度的关系见图4。

在适宜温区, 蜘蛛随温度升高发育速率加快, 寿命缩短; 在最适温区, 生殖力最高、繁殖力最强、存活率最高、发育最快;

表4 三突花蛛在各级温度下的活动状况

Table 4 The active condition of *M. tricuspidatus* under the different temperatures

活动状况	温度($^{\circ}\text{C}$)	温度范围
迅速死亡	41	致死高温
发育停止	38	不适高温
产卵停止	36	不适高温
孵化停止	35	不适高温
发育最速	28	适温区
孵化最多	26	适温区
产卵最多	25	适温区
存活最多	25	适温区
孵化起点	12	有效温度范围
产卵起点	12	
发育起点	8	
迅速死亡	-13	致死低温

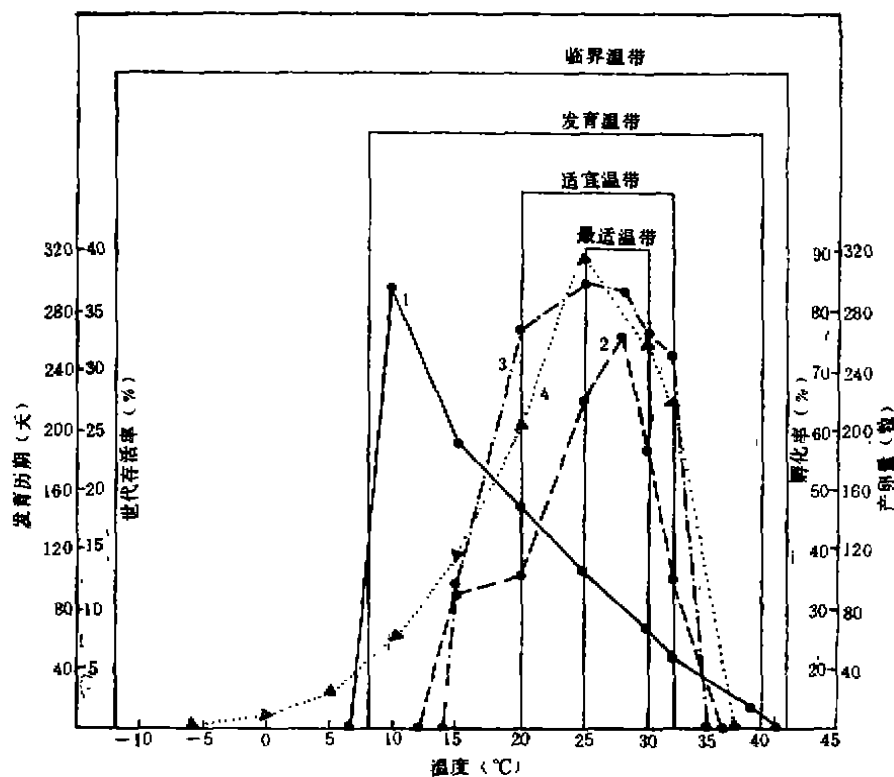


图4 三突花蛛生存温度范围图解

Fig.4 A graph of the survival temperature range of *M. tricuspidatus*

1. 全代历期(天) 2. 单雌产卵量 3. 孵化率(%) 4. 世代存活率(%)

在高、低温临界带, 发育停止或死亡, 寿命迅速缩短; 在近低温临界带时发育最慢、寿命最长、存活率迅速下降; 由适温带趋向高温, 蜘蛛发育速率又趋延缓, 寿命亦长; 超越高温临界点时, 发育停止或死亡, 曲线迅速下降。由此可见, 在棉花生育早期及中期, 三突花蛛数量较少, 一方面除了迁移和基数较少外, 另一方面在气温较高的 7、8 月份, 温度高抑制了其种群的生殖和发育, 种群死亡率大于出生率可能是一个很重要的原因。而在棉花生育后期的 9—11 月份, 气温适中略偏低适宜于其发育和生殖, 种群出生率上升, 故后期三突花蛛种群数量发生量大, 是棉花后期害虫的主要捕食性天敌。可以认为以上各发育、存活及生殖的参数为三突花蛛的人工繁殖及保护利用提供了理论依据。

人们对温度与变温动物发育速率关系及参数的研究历来表现出极大的关注。这方面的工作主要有 Reibison 直线模型^[1]、垂线模型^[2]、Logistic 模型^[2]、Logistic 修正型模型^[7]及含 6 个参数的王氏模型^[8]。一种描述生命现象的数学模型应尽量多地反映出此种生命现象的参数, 并且这些参数都应有特定的生物学意义, 具有生化、物化的可测性。王如松模型与其它模型相比, 具有多个赋有特定生物学意义的参数, 并且可以通过此模型获得在实验条件下很难获得的临界发育温度等。

王氏模型多用于描述发育速率与温度的关系^[8-11], 但用于研究其它一些生态现象与温度的关系很少。王如松等简单讨论了内禀增长率与温度的关系^[9]。本文将王氏模型的应用推广到温度与动物存活的关系研究。结果表明具有多个参数的王氏模型配合 Logistic 曲线模型、抛物线模型等能够较全面说明温度对蜘蛛生长发育、存活以及繁殖增长的影响。

用抛物线模型对温度与三突花蛛幼蛛存活率、单雌平均产卵量及卵孵化率的关系进行拟合。 $\alpha = 0.05$, 并经计算得到 F 值均大于 F_{α} 。表明三突花蛛的幼蛛存活率、单雌产卵量及卵孵化率与温度的关系均可用抛物线方程拟合。

参 考 文 献

- [1] Andrewartha, H.G., 1971, *Introduction to the study of animal population*, Uni. of Chicago Press, Chicago, 111—293.
- [2] Davidson, J., 1944, On the relationship between temperature and rate of development of insects at constant temperature. *J. Anim. Ecol.*, 13:26—38.
- [3] Janisch, E., 1932, The influence of temperature on the life history of insects. *Trans. Roy. ent. Soc. London*, 80:137—168.
- [4] Sharpe, P.J.H., et al., 1977, Reaction kinetics of poikilotherm development. *J. Theore. Biol.*, 64:649—670.
- [5] Logan, J.A., et al., 1976, An analytic model for description of temperature dependent rate phenomena in arthropods. *Env. Env.*, 5:1133—1140.
- [6] Siddique, W.H., 1973, Effects of some constant and alternating temperatures on population growth of the pea aphid. *Can. Ent.*, 105:145—156.
- [7] Stinner, R.E., et al., 1974, An algorithm for temperature-dependent growth rate simulation. *Can. Ent.*, 106:519—524.
- [8] Hilbert, D.W. & Logan, J.A., 1983, Empirical model of nymphal development for the migratory grasshopper, *Melanoplus sanguinipes* (Orthoptera: Acrididae). *Environ. ent.*, 12:1—6.
- [9] 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.
- [10] 刘树生、孟学多, 1989, 桃蚜、萝卜蚜发育速率在恒温 and 变温下的变化规律研究, *生态学报* 9(2): 182—190.
- [11] 郝树广、汪世泽, 1989, 麦长管蚜实验种群的研究, *西北农业大学学报* 17(Suppl.): 25—31.
- [12] 赵惠燕、汪世泽、张改生, 1989, 萝卜蚜实验种群参数及生命表的研究, *西北农业大学学报* 17: 84—89.

MODELLING OF THE EFFECT OF TEMPERATURE ON THE DEVELOPMENT AND REPRODUCTION OF THE SPIDER, *MISUMENOPS TRICUSPIDATUS*

Li Dai-Qin Zhao Jing-Zhao

(Laboratory of Insect Natural Enemies, Hubei University, Wuhan)

Based on regularities drawn from experimental data, the mathematical model series of the effect of temperature on the development and reproduction of *Misumenops tricuspidatus* were established. By digital simulation, the temperature-dependent growth models with lower and upper boundary developed by Wang Rusong (1982):

$$V(T) = \frac{K}{1 - \exp(-r(T - T_0))} \left[1 - \exp\left(-\frac{T - T_L}{\delta}\right) \right] \left[1 - \exp\left(-\frac{T_H - T}{\delta}\right) \right]$$

along with parabolic model and logistic model are demonstrated to fit very well the relations of temperature to, developmental rate, the survival rate, and reproductional ability, respectively, of *M. tricuspidatus*. The life parameters about the effect of temperature on the ontogenesis, the survival status and reproduction of *M. tricuspidatus* and their biological implications were also discussed.

Key words: temperature, *Misumenops tricuspidatus*, development, reproduction, mathematical model.