

七星瓢虫对麦长管蚜捕食作用及其模拟模型的研究

蔡晓明 阎桂云*

(北京大学)

摘 要

实验室内:6—21℃ 的温度下,七星瓢虫雌成虫捕食行为集中在 8:00—22:00。瓢虫各龄幼虫及雌成虫对麦长管蚜的功能反应均属Holling I型。28℃时,瓢虫雌成虫的攻击率最大,处理时间最短。随温度增加,攻击率减小,处理时间增加。假设:猎物种群在无捕食者存在时,呈 Logistic 曲线增长;捕食者随机搜寻猎物,对猎物的功能反应为Holling I型,捕食者个体间存在相互干扰,捕食者种群存在一个最低死亡率 K_0 ,随种群增大,死亡率增加,增加速率与密度成反比,捕食者取食的猎物转化为自身部分的比例为 β 。

七星瓢虫-麦长管蚜捕食作用系统模拟模型,

$$\frac{dN}{dt} = N \left[r \left(1 - \frac{N}{K} \right) - \frac{wadP^{1-m}}{1+aThN} \right], \quad \frac{dP}{dt} = P \left(\frac{\beta wadNP^{-m}}{1+aThN} - K_0 - \frac{K_1}{N+K_2} P \right)$$

较好地描述了当麦长管蚜种群增长到某一数量时,放置一头瓢虫雌成虫后蚜虫种群增长过程。本文对模型平衡点作了局部稳定性分析。

关键词:七星瓢虫,麦长管蚜,捕食作用,模拟模型。

以瓢治蚜在农业害虫的防治中,得到人们的重视^[1-3]。本文主要报道了七星瓢虫(*Coccinella septempunctata* L.)不同龄期幼虫及雌成虫对麦长管蚜(*Macrosiphum avenae* F.)的功能反应,并应用微分方程建立系统模型,分析了平衡点的局部稳定性等。这对以瓢治蚜工作的进一步开展,提供了理论依据。

一、材料与方法

1. 实验昆虫是采集越冬代七星瓢虫雌虫,喂以棉蚜。幼虫单头用麦长管蚜饲养于指形管中。在幼虫进入某一龄期的第二天开始饥饿24小时,第三天用于试验。成虫均以羽化后6天的雌成虫,试验前喂饱,再饥饿24小时。实验蚜虫均为若虫,体长 1.804 ± 0.29 毫米,体宽 0.870 ± 0.17 毫米,体重 1.804 ± 0.16 毫克。

2. 实验容器用直径10厘米、高2厘米的培养皿;干扰反应使用直径18厘米、高4厘米的培养皿。田间试验采用 $50 \times 50 \times 100$ 立方厘米24目的聚乙烯罩笼。

3. 实验条件 功能反应实验在室内进行。容器为底部铺一层薄琼脂培养基,上放麦叶。实验时间为5月上旬,温度分别为17℃、21℃、24℃、27℃、31℃和34℃,误差 $\pm 1^\circ\text{C}$ 。

* 现在美国 University of Vermont 学习。

本文工作曾得到于秀林、任潮佐、沈佐锐、丁岩欽等教授的帮助,特此致谢。

本文于1990年2月27日收到。

光照每日为14小时(8:00—22:00)。各种处理条件分述如下:

(1) 七星瓢虫雌成虫24小时食蚜量分布: 培养皿内放置桃蚜40头及一头未饥饿的雌瓢虫成虫, 每隔2小时检查所剩蚜虫数, 并补足培养皿内蚜虫到40头, 重复10次; (2) 年龄等级对功能反应的影响: 每个培养皿内分别放1头不同虫态(年龄)的七星瓢虫及不同密度的若蚜, 重复4—6次, 24小时后记录所剩蚜虫数; (3) 温度对功能反应的影响: 每个培养皿内放置1头雌虫与不同密度的若蚜, 置于恒温箱中, 24小时后记录所剩蚜虫数。重复4次; (4) 干扰反应: 大培养皿内放置若蚜500头及不同数量的雌成虫、各龄幼虫。24小时后检查所剩蚜虫数。4—6次重复; (5) 麦长管蚜种群增长及瓢虫控制蚜虫增长试验: 用笼罩50株长势一致的麦株, 去除其它昆虫, 接种成蚜2头, 次日检查以保证蚜虫基数。以后每隔3天记录笼内蚜虫数。当蚜虫增长到一定密度时, 接入1头雌虫。

全部计算在Super II及IBM PC/XT微机上进行。

二、结果与分析

1. 七星瓢虫雌成虫24小时食蚜量分布

在实验室, 平均气温16—21℃下, 瓢虫取食活动具有日节律, 见图1。取食行为集中在8:00—22:00, 中午取食量最大。

瓢虫对蚜虫取食节律与螳螂(*Hierodula crassa*)对无翅果蝇(*Drosophila virilis*)取食节律一致^[6-8]。这可能是由于环境温度升高, 使瓢虫活动性增大, 增加了与蚜虫的接触机率。七星瓢虫是通过下颚须识别蚜虫的^[7]。

2. 七星瓢虫年龄等级对功能反应的影响

鉴于瓢虫的取食节律, 功能反应实验的时间均应设在8:00—22:00。七星瓢虫各龄幼虫及雌成虫对麦长管蚜的功能反应同其它许多无脊椎动物一样, 是属于Holling II型, 即Holling圆盘方程:

$$Na = \frac{a \cdot T \cdot N}{1 + a \cdot Th \cdot N} \quad (1)$$

其中 Na 为捕获猎物数, N 为猎物密度, a 为攻击率, Th 为处理时间, T 为实验时间。

随瓢虫幼虫龄期增大攻击率也逐渐增加, 处理时间逐渐减小。雌成虫的攻击率及处理时间大于四龄幼虫(见图2)。

3. 温度对功能反应的影响

温度对七星瓢虫对麦长管蚜功能反应参数的影响见图3。在一定温度范围内, 随温度增加, 昆虫体内新陈代谢率增加, 瓢虫活动性加强, 增大了与猎物相遇机率, 缩短取食停滞时间, 表现在攻击率增大, 处理时间减小。然而, 当环境温度大于某一范围时, 生物体内代谢酶活性会受到抑制, 昆虫新陈代谢速率减小, 处理时间增大。

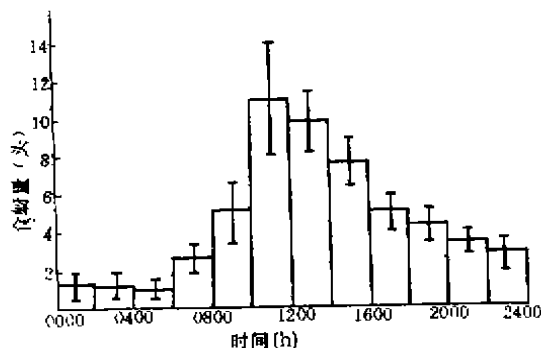


图1 七星瓢虫食蚜量24小时的分布
Fig. 1 Distribution of number of aphids eaten by seven spot ladybird in 24-hrs

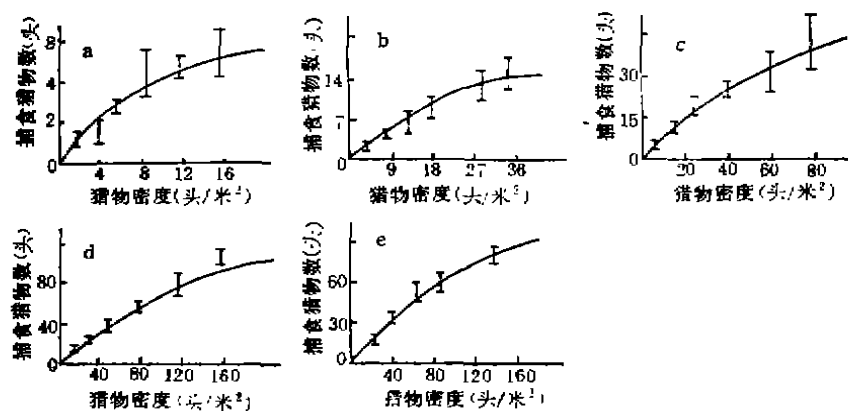


图 2 七星瓢虫各龄幼虫及雌成虫对麦长管蚜的功能反应

a, b, c, d 分别表示一、二、三、四龄幼虫, e 为成虫

Fig. 2 The functional response of seven spot ladybird's larvae and female adults to wheat aphid

a, b, c, d—first, second, third and fourth instar larvae, e—female adults

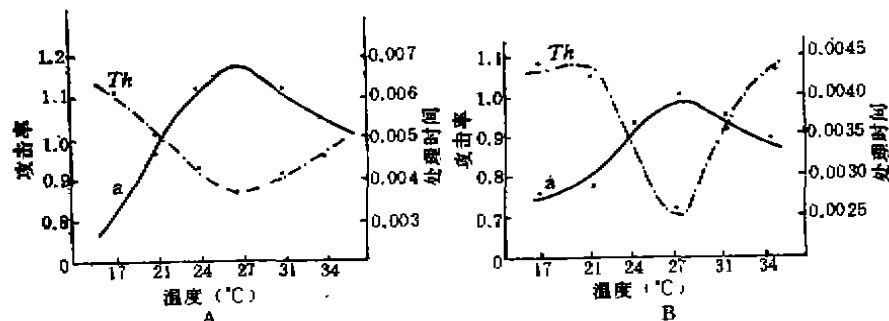


图 3 温度对七星瓢虫功能反应参数影响

A—成虫, B—四龄幼虫

Fig. 3 The effect of temperature on the functional response of ladybird to wheat aphid

A—female adults, B—fourth instars larvae

温度与功能反应的参数关系:

对于四龄幼虫:

$$\alpha = 9.156031 - 1.171099T + (5.271216E - 2)T^2 - (7.583504E - 4)T^3 \quad (2)$$

$$Th = -6.819306E - 2 + (9.1120204E - 3)T - (4.059394E - 4)T^2 + (5.806969E - 6)T^3 \quad (3)$$

对于雌成虫:

$$\alpha = 3.02799 - 0.3883282T + (2.077021E - 2)T^2 - (3.299156E - 4)T^3 \quad (4)$$

$$Th = (-1.822992E - 2) + (3.77472E - 3)T - (1.858327E - 4)T^2 + (2.818978E - 6)T^3 \quad (5)$$

由(2)~(5)式求出,对于四龄瓢虫幼虫,当温度为 27.87℃ 时,有最大攻击率 $\alpha = 1.04447$; 当温度为 27.71℃ 时,有最小处理时间 $Th = 0.00268559$ 。

当温度为27.92℃时,雌瓢虫成虫有最大攻击率($a = 1.19631$);当温度为28.02℃时,有最小处理时间($Th = 0.00458255$)。由此推测,七星瓢虫对麦长管蚜的最大捕食率发生在28℃左右^[8]。

4. 相互干扰作用对功能反应的影响

Hassell 和 Varley 1969^[9] 提出捕食者对猎物的捕食作用率随捕食者密度的增加而呈指数下降,即

$$E = QP^{-\alpha} \quad (6)$$

实验表明(表1),随瓢虫幼虫龄期的增加,干扰系数逐渐增大。

表1 七星瓢虫幼虫及雌成虫的干扰常数及搜索常数

Table 1 Questing coefficient and interaction coefficient of the larve and female adult of seven spot ladybird

项 目	阶段	一龄幼虫	二龄幼虫	三龄幼虫	四龄幼虫	雌成虫
干扰常数 (m)		0.15422	0.25541	0.27100	0.37046	0.30844
搜索常数 (Q)		0.14873	0.20952	0.25429	0.64699	0.41193

5. 模拟模型及稳定性的研究

七星瓢虫和蚜虫种群在田间世代重叠十分显著。尽管蚜虫在种群密度较低时,种群呈指数型增长。但在环境负荷量一定的生境中,蚜虫种群增长仍可看为逻辑斯谛型增长。七星瓢虫有自相残杀习性。当密度增加时,瓢虫之间的自相残杀作用增大了种群死亡率。猎物密度越高,环境空间异质性增加,捕食者的食饵越充分,捕食者种群死亡率越小。假设:

(1) 猎物在无捕食者存在时呈Logistic曲线增长。(2) 捕食者随机捕食猎物,对猎物的功能反应为Holling II型,捕食者个体间存在互相干扰作用。(3) 捕食者取食猎物后转化为自身部分的比例为 β 。(4) 捕食者种群存在一个最低死亡率 K_0 ,随捕食者种群增大,捕食者死亡率增加,死亡率的增加速率与当时猎物密度成反比。

用下列微分方程组作为七星瓢虫-麦长管蚜捕食作用系统的模拟模型:

$$\frac{dN}{dt} = N \left[r \left(1 - \frac{N}{K} \right) - \frac{\omega a d P^{1-\alpha}}{1 + a \cdot Th \cdot N} \right] \quad (7a)$$

$$\frac{dP}{dt} = P \left(\frac{\beta \omega a d N P^{-\alpha}}{1 + a \cdot Th \cdot N} - K_0 - \frac{K_1}{N + K_2} P \right) \quad (7b)$$

其中 N 为蚜虫种群密度; r 为蚜虫内禀增长率; K 为环境负荷量; ω 为由实验室功能反应结果用于田间实验时对捕食作用率的校正系数; d 为考虑干扰反应后引起的校正系数; $K_1/(N + K_2)$ 为捕食者种群增大引起的死亡率增加速率; K_1 为常数; K_2 为避免 N 过小时引起死亡率增加速率过大的校正系数。

如不存在天敌时,蚜虫种群自然增长见图4中曲线a。用Logistic方程模拟结果为:

$$N = 2788.28 / [1 + \exp(6.86221 - 0.454255t)] \quad (8)$$

式中 t 为相对时间。

存在瓢虫时,麦长管蚜种群增长;当蚜虫种群发展到130头(处理b),90头(处理c),50头(处理d)时,分别移入雌瓢虫1头,蚜虫种群增长试验结果见图4。

此时, P 恒等于 1, 方程 (7) 可简化为

$$\frac{dN}{dt} = N \left[r \left(1 - \frac{N}{K} \right) - \frac{wad}{1 + a \cdot Th \cdot N} \right] \quad (9)$$

对模拟模型 (7) 作稳定性分析,

$$dN/dt = F_1(N, P)$$

$$dP/dt = F_2(N, P),$$

猎物等倾线: L_1 即 $F_1(N, P) = 0$; 捕食者等倾线: L_2 即 $F_2(N, P) = 0$, 见图 5。

方程组 (7) 有四个平衡点: $E_1(0, 0)$, $E_2(K_1, 0)$, $E_3(N^*, P^*)$ 及 $E_4(0, -K_0K_2/K_1)$ 。现对 E_3 进行讨论 (其它各点可作类似讨论, E_3 为下列方程组的解。

$$\begin{aligned} r \left(1 - \frac{N}{K} \right) - \frac{wadP^{1-m}}{1 + a \cdot Th \cdot N} &= 0 \\ \frac{w\beta adNP^{1-m}}{1 + a \cdot Th \cdot N} - K_0 - \frac{K_1}{N + K_2}P &= 0 \end{aligned} \quad (10)$$

很难求出方程组 (10) 的解析解。在前面假定的参数条件下^[10], 求出 $N^* = 43.3881$, $P^* = 1.04084$ 。

设 V 是系统在 E_3 的变分矩阵, 则

$$V = \begin{pmatrix} \frac{\partial F_1(N^*, P^*)}{\partial N} & \frac{\partial F_1(N^*, P^*)}{\partial P} \\ \frac{\partial F_2(N^*, P^*)}{\partial N} & \frac{\partial F_2(N^*, P^*)}{\partial P} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} H & T \\ S & R \end{pmatrix} \quad (11)$$

矩阵 V 的特征根为:

$$\begin{vmatrix} \lambda - H & T \\ S & \lambda - R \end{vmatrix} = 0$$

$$(\lambda - H)(\lambda - R) - ST = 0$$

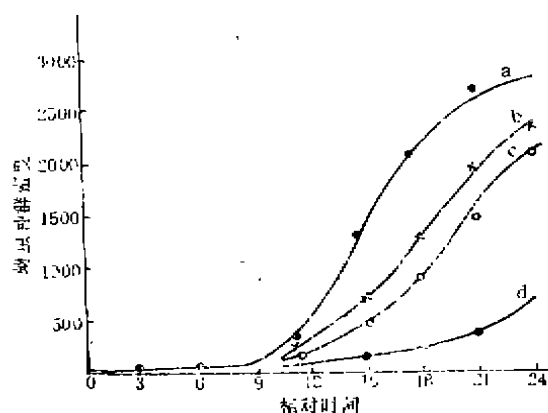


图 4 瓢虫雌成虫对麦长管蚜种群增长的抑制作用

a: 无瓢虫时, 蚜虫种群增长过程; b: 麦蚜基数为 130 头时, 放雌瓢虫 1 头, 麦蚜种群增长过程; c: 麦蚜基数为 90 头时, 放雌瓢虫 1 头, 麦蚜种群增长过程; d: 麦蚜基数为 50 头时, 放雌瓢虫 1 头, 麦蚜种群增长过程。

Fig. 4 Effect of the female adult of ladybird on wheat aphid population increase

- a—Increase in population density of wheat aphid.
- b—population growth curve of wheat aphid introduced at a ratio of 130 aphids to one female predator.
- c—population growth curve of wheat aphid introduced at a ratio of 90 aphids to one female predator.
- d—population growth curve of wheat aphid introduced at a ratio of 50 aphids to one female predator.

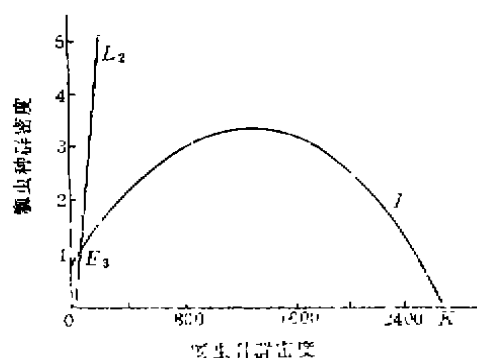


图 5 捕食者等倾线 L_2 与猎物等倾线 L_1

Fig. 5 Zero increase curve for predator L_2 and for prey L_1

$$\lambda^2 (H + R) \lambda + HR - ST = 0$$

$$\lambda = \frac{(H + R) \pm \sqrt{(H + R)^2 - 4(HR - ST)}}{2}$$

$$= \frac{1}{2} (H + R \pm \sqrt{(H + R)^2 - 4L}) \quad (12)$$

其中 $L = HR - ST$ 。当 $R, \lambda < 0$ 时, E_3 为渐近稳定, 当 $R, \lambda > 0$ 时, E_3 不稳定平衡点。在上述参数取值条件下求出: $H = 0.0342305$ $T = -16.8709$ $S = 0.00819376$ $R = -0.0703804$ $L = 0.135827$ $R, \lambda > 0$ E_3 处于 L_1 的上升部分, 所以渐近稳定(图 5)。

干扰系数 m 对等倾线 L_1 、 L_2 有影响。可以推断, m 越大, 系统稳定性越强。

每个参数都影响着平衡点稳定性。例如, 除 $K_0 = 1$ 外, 其它参数赋值同前所述, E_3 变成不稳定。如果取 $m = 0$, 其它参数值不变, E_3 也变成不稳定。使平衡点 E_3 渐近稳定的各参数取值范围如下:

$$0.418924 < r < 0.491565$$

$$K > 814.9706$$

$$1.11336 < d < 1.30682$$

$$0.0017205 < \beta < 0.0221427$$

$$0.363849 < K_0 < 0.863601$$

$$K_1 < 17.4124$$

渐近稳定就是在一定范围内, 从某点 (N, P) 沿某方向出发, 经过时间 t 后, 到达稳定的平衡点 (N^*, P^*) 。以 N 为蚜虫种群密度, P 为瓢虫种群密度, $N(0) = 800$, $P(0) = 6$ 。数值模拟计算步长 $h = 0.02$, 其它参数取值同前。箭头表示时间前进的方向。据此作图 6, 就可以直观地说明这种现象。从而也表明本文提出的七星瓢虫-蚜虫捕食作用系统模拟模型, 用以拟合田间的实验结果, 效果较好。

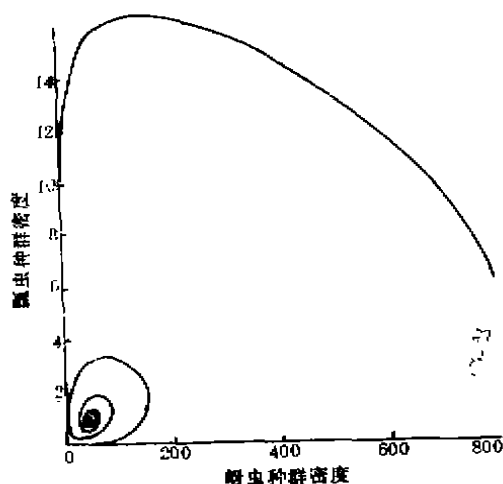


图 6 七星瓢虫和麦长管蚜种群动态相平面图
Fig. 6 Ladybird and wheat aphid population growth curve
(Phase square figure)

参 考 文 献

- [1] 秦晓明、尚玉昌、周波杰, 1980, 中国七星瓢虫迁飞初探, 中国农业科学 (1): 74—79.
- [2] 秦晓明等, 1980, 蚜虫天敌-七星瓢虫的研究 I. 从秦皇岛瓢虫的群聚看七星瓢虫的迁飞, 昆虫天敌 2(2): 1—4.
- [3] 汪世泽, 李 平, 1980, 七星瓢虫的功能反应, 西北农业大学学报 14(4): 13—17.
- [4] Eranson P., 1980, The relative activity and functional response of *Phytoseiulus persimilis* and *Tetranychus urticae*, The effect of temperature, Can. Ent. 112(1): 17—24.
- [5] Holling C.S., 1959, Some characteristics of simple type of predation and parasitism, Can. Ent. 91(1): 385—398.
- [6] Holling C.S., 1966, The functional responses of invertebrate predators to prey density. Men. Ent. Soc. Can. (48): 66.
- [7] Kiyoshi Nakamuta and Tetsuo Saito 1985, Recognition of aphid prey by the lady beetle, *Coccinella septempunctata bruckii* Mulsant. Appl. Ent. Zool. 20(4): 479—483.

- [8] 丁岩钦、兰仲雄、陈玉平, 1983, 天敌-害虫系统中寻找效应的研究, 生态学报 3(2):141—147.
 [9] Hassell M. P. & Varley G. C., 1969, New inductive population model for insect perasites and its bearing on biological control. *Nature*, London, 223(4), 1133—1137.
 [10] 陈兰荪, 1988, 《数学生态学模型与研究方法》, 科学出版社。

STUDIES ON PREDATION AND SIMULATION MODEL OF SEVEN SPOT LADYBIRD, *COCCINELLA SEPTEMPUNCTATA* L. TO WHEAT APHID, *MACROSIPHUM AVENAE* F.

Cai Xiao-Ming Yan Gui-Yun
(Beijing University)

Seven spot ladybird, *Coccinella septempunctata* are beneficial to crop, because of their predacious habits. In recent years, the ladybirds have played an important role in the biological control of cotton aphids in China. In laboratory, the functional response of the larve and female adult of ladybird to aphid belongs to the type of Holling II. Ladybird has the largest attacking rate and smallest handling time at 28°C.

Assuming that

- Prey population has a logistic growth.
 - Predator searches for prey randomly, its functional response to prey is in Holling II, and the individuals of predator interact each other.
 - Predator has the lowest rate of mortality which increases with the enlargement of predator population, and the speed of increase in mortality rate is inverse proportion to prey density.
 - The proportion that predator turns prey eaten into predators body is β .
- The ladybird-wheat aphid predation simulation model is expressed as follows,

$$\frac{dN}{dt} = N[r(1 - N/K) - wadP^{1-m}/(1 + aThN)]$$

$$\frac{dP}{dt} = P[(\beta wadNP^{-m}/(1 + aThN) - K_0 - K_1P/(N + K_2))]$$

The model describes fairly wheat aphid population growth that one female adult of ladybird is planted into the experimental cage, when the density of aphid reaches 50, 90, and 130, respectively. The paper also analyses the local stability of simulation model.

Key words: seven spot ladybird, wheat aphid, predation, simulation model.