

褐飞虱发生的一维时间序列相空间重构及混沌吸引子维数的确定

马 飞¹, 丁宗泽², 沈龙元³, 程遐年¹

(1. 南京农业大学植保系 南京 210095; 2. 太湖地区农科所 苏州望亭 215155; 3. 吴县 植保站 苏州 215128)

摘要: 利用我国长江流域的吴县 1979~1990 年及太湖地区农科所 1986~1998 年 6~11 月份褐飞虱田间发生时间序列资料, 将褐飞虱发生的一维时间序列拓展到多维相空间中去。研究结果表明: (1) 我国长江流域短期褐飞虱发生演化, 在相空间中存在吸引子, 并具有分维结构, 其维数分别是 1.6 和 0.68, 为混沌吸引子(或奇异吸引子); (2) 就我国长江流域褐飞虱发生的短期变化而言, 为了能在多维相空间支撑上述奇怪吸引了, 最好选取 4 个变量或建立最低为 4 阶的动力学模式来进行描述。

关键词: 褐飞虱; 相空间; 混沌; 混沌吸引子; 嵌入维; 关联维数

Phase space reconstruction of one-dimension time series on *Nilaparvata lugens* (stål) occurrence and determination of chaotic attractor dimension

MA Fei¹, DING Zong-Ze², SHEN Long-Yuan³, CHENG Xia-Nian¹ (1. Department of Plant Protection, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095; 2. Taihu District Institute of Agricultural Science, Wangting, Suzhou 215155; 3. Wuxian Station of Plant Protection, Suzhou 215128). *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(9): 1542~1548.

Abstract: The brown planthopper (BPH), *Nilaparvata lugens* (stål), is an important insect pest of rice crops both in tropical and temperate areas in the East and South Asia. Rice damage caused by BPH has become an increasingly serious problem since the 1970s in China. Outbreaks have increased in frequency and the area regularly infested has extended into Jiangsu Province (between the Yangtse and Huaihe Rivers) and even north of the Huaihe River. On average, some 13.3 million hm² of the crop are likely to be affected, with an annual loss of some half a million tones of grain. Despite the substantial manpower and material resources are invested to study, the long-term forecasting power is still weak in these days. For the sake of further studying and providing theoretical proof for prediction, based on time series data, phase space reconstruction in time delay coordinates and correlation dimension [$D_2(m)$], the chaotic phenomenon of BPH in Yangtse River Valley are first studied in this paper.

Time series data from June to November on BPH occurrence in 1979~1990 observed by Wuxian station and those in 1986~1998 by Taihu District Institute of Agricultural Science are used to extend the 1-D time series of BPH occurrence into a multi-dimensional phase space in Yangtse River Valley.

Takens (1981) proposed "embedding theorem", and has proved that strange attractor of D_0 dimensions could be depicted with higher dimensions d of phase space, usually $d = 2D_0 + 1$.

Supposing one-dimension time series $x(t_0), x(t_1), \dots, x(t_i), \dots, x(t_n)$, is extended to a phase type of m dimensions phase space

基金项目: "九五" 国家重大科技攻关计划 (96-005-01-01-06) 资助项目

致谢: 本文承蒙张孝羲教授指导, 谨此谢忱。

收稿日期: 1999-11-18, 修订日期: 2000-05-30

作者简介: 马飞 (1968~), 男, 安徽怀远人, 博士, 讲师。主要从事昆虫信息生态和害虫预测预报等研究。

$$\begin{matrix}
 X(t_0) & X(t_1) & \cdots & X(t_i) & \cdots & X(t_n - (m - 1)\tau) \\
 X(t_0 + \tau) & X(t_1 + \tau) & \cdots & X(t_i + \tau) & \cdots & X(t_n - (m - 2)\tau) \\
 X(t_0 + 2\tau) & X(t_1 + 2\tau) & \cdots & X(t_i + 2\tau) & \cdots & X(t_n - (m - 3)\tau) \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
 X(t_0 + (m - 1)\tau) & X(t_1 + (m - 1)\tau) & \cdots & X(t_i + (m - 1)\tau) & \cdots & X(t_n)
 \end{matrix} \quad (1)$$

Where $\tau = k\Delta t (k = 1, 2, \dots)$ is delay time, a phase point of phase space is made up of every row in (1) formula. Every phase point $X(t_i)$ has m weights $X(t_i), X(t_i + \tau), X(t_i + 2\tau), \dots, X(t_i + (m - 1)\tau)$. Every phase point of m -dimension phase space embodies a certainly instantaneous state, and the point's trajectory of phase space is composed of the link-line of phase point, whereas it exhibits system state evolution with time. And then, the system dynamics can be studied in multiple dimension phase space.

A pair of phase point in m dimensions phase space (usually it is bigger) is

$$\begin{aligned}
 X_m(t_i) &= X(t_i), X(t_i + \tau), X(t_i + 2\tau), \dots, X(t_i + (m - 1)\tau) \\
 X_m(t_j) &= X(t_j), X(t_j + \tau), X(t_j + 2\tau), \dots, X(t_j + (m - 1)\tau)
 \end{aligned}$$

Where the distance is

$$r_{ij}(m) = \| X_m(t_i) - X_m(t_j) \|$$

Given a critical distance r , examining less than r' phase point pair (X_i, X_j) , and less than r' phase point pair (X_i, X_j) in proportion to whole phase point pair, thus cumulative distribution function is followed as

$$C_2(r, m) = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i,j=1(i \neq j)}^N \theta(r - \| X_i - X_j \|) \quad (2)$$

Here θ is Heaviside function, if $z < 0, \theta(z) = 0; if z > 0, \theta(z) = 1. N$ is all points.

Obviously, $C_2(r, m)$ not only describes the probability of distance between two attractor of phase space $< r$, but also depicts X_i phase point's assemble degree in r . Where it is called incidence function of attractor. Essentially, if r is too small, all $\| X_i - X_j \| > r, \theta(z) = 0, C_2(r, m) = 0$, and vice versa $C_2(r, m) = 1$. Too big and small r , hence, can't reflect system inherence property. Generally, r value is contented with $0 \leq C_2(r, m) \leq 1$.

To illustrate how to compute the fractal dimension, let us suppose that we wish to measure the length of a curve. Suppose we have a set of rulers of size $\{r_i\}$. Determining that $C_2(r_i, m)$ of rulers will "cover" the curve to be measured. To each rulers r_i , we get a $C_2(r_i, m)$. If the curve is fractal, the following relationship holds

$$C_2(r, m) \propto r^{-D_2}$$

Or

$$D_2 = \left| \frac{\lg(C_2(r, m))}{\lg(r)} \right| = \left| \frac{\ln(C_2(r, m))}{\ln(r)} \right| \quad (3)$$

Where D_2 is the corresponding fractal dimensions. In logarithm coordinates system, we may get an approximate straight line of which the negative slope is the corresponding fractal dimension D_2 .

Embedding dimension m is not increased until m is up to m_c , i.e. $D_2(m)$ is not added with m' increase. And then they have

$$D_2(m_c) = D_2(m_c + 1) = D_2((m_c) + 2) \cong \dots$$

Hence here has $D_2 = D_2(m_c)$

$D_2(m_c)$ is the corresponding fractal dimensions of attractor, m_c is saturation embedding dimension. Specially, if m_c does not exist, $D_2(m_c) \rightarrow \infty$, no attractor exists, and then time series diagnosed is a stochastic system; if $D_2(m_c)$ is m' line function, it is white noise system; and if $D_2(m_c)$ is up to saturation, it is chaotic system.

The research results indicate that the BPH occurrence system is a chaotic system with fractal dimension $D_2(m) = 0.68, 1.6$ and saturation embedding dimension $m_c = 7, 8$ respectively. It could be inferred that the BPH occurrence evolution would be described by 4 variables or a dynamic model with no less than 4 steps required by the development of these chaotic attractors in the multi-dimensional phase space.

Key words: 万方数据 *lugens(stål)*; BPH; phase space; chaos; chaotic attractor; embedding dimension; incidence dimension

文章编号:1000-0933(2001)09-1542-07 中图分类号:Q141,Q968.1,S433 文献标识码:A

混沌(Chaos)理论自 20 世纪 70 年代中期发展至今,已广泛地渗透到物理学^[1]、电子学^[2]、化学^[3]、医学^[4]、经济学^[5]乃至军备竞赛^[6]等领域,它在确定性系统与随机过程之间架起了一座桥梁,为认识事物的发展规律,预见其未来发展的状态行为提供了崭新的思想和方法。

混沌理论的发展与生物学是密不可分的。1976 年 May^[7]在《自然》杂志上总结指出:生态学中一些非常简单的数学模型,如

$$X_{n+1} = \mu X_n(1 - X_n)$$

就具有极其复杂的动力学行为,包括分岔序列和混沌;Allen^[8]在对经典的两种种群作用 Lotka-Volterra 模型研究;Logan^[9]在对昆虫与天敌模型研究,以及 Blasius^[10]对美洲兔、猞猁及植被的动态研究中都存在混沌,因而,说明混沌现象在生物界中是大量存在的。

褐飞虱(*Nilaparvata lugens*)是一远距离迁飞性水稻害虫,广泛分布于南亚、东南亚、日本、朝鲜半岛、太平洋半岛,是我国稻区的主要害虫。进入 20 世纪 70 年代以来,它的危害面积日益扩大、危害加剧,暴发频次显著增加,从而对长江流域及南方水稻的生产构成严重威胁^[11]。因此,深入研究褐飞虱发生机制及建立快捷准确的预测预报体系是刻不容缓的。本文就试图对褐飞虱的田间发生动态是否具有混沌机制以及如何利用混沌研究成果为预测预报服务进行了初步研究。

1 资料来源

研究中使用的褐飞虱发生资料,取自种植单季晚稻为主的江苏省吴县植保站(120.60E 31.30N)1979~1990 年 12a、太湖地区农科所(120.30E31.50N)1986~1998 年 13a 间 6~11 月份分别为 5d 和 3d 田间观察圃系统调查资料。

2 原理及方法

所谓混沌序列,可以看作是考察混沌系统所得到的一组随时间变化的观察量值。研究混沌一般要经过两个步骤:相空间重构和关联维的计算。

2.1 一维时间序列的相空间重构 设时间序列 $\{x_i\}$,其时间间隔是 Δt (单位时间)。显然,吸引子的结构特性就包含在这时间序列中。为了从实际的单变量时间序列中估计出系统的信息,Packard^[12]在 1980 年提出了用时间序列重构吸引子的相空间图象。

对 n 个变量的动力系统(即一组 n 个一阶微分方程):

$$dx_i/dt = f_i(x_1, \dots, x_n) \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

可通过消元法,使其变换为一个 n 阶非线性微分方程:

$$x^{(n)} = f(x, x^{(1)}, \dots, x^{(n-1)})$$

变换后,系统的新轨迹: $X(t) = (x(t), x'(t), \dots, x^{(n-1)}(t))$ 描写了同样的动力学,它在由坐标 $x(t)$ 加上其 $(n-1)$ 阶导数 $x'(t), \dots, x^{(n-1)}(t)$ 所张成的相空间中演变。代替这种连续变量 $x(t)$ 和它的导数,可考虑不连续的时间序列和它的 $(n-1)$ 时滞位移 $X(t) = [x(t), x(t+\tau), \dots, x(t+(n-1)\tau)]$,只要将时滞 τ 选作时间序列的长时间尺度,将会保证延滞坐标线性无关。

Takens^[13]在 1981 年提出嵌入定理,表明只要相空间的维数 d 足够大(通常为 $2D_0+1$),它就可以刻划 D_0 维混沌吸引子。

设一维时间序列为: $x(t_0), x(t_1), \dots, x(t_i), \dots, X(t_n)$,将此时间序列延拓成 m 维相空间一个相型分布:

$$\begin{array}{cccccc} X(t_0) & X(t_1) & \cdots & X(t_i) & \cdots & X(t_n - (m-1)\tau) \\ X(t_0 + \tau) & X(t_1 + \tau) & \cdots & X(t_i + \tau) & \cdots & X(t_n - (m-2)\tau) \\ X(t_0 + 2\tau) & X(t_1 + 2\tau) & \cdots & X(t_i + 2\tau) & \cdots & X(t_n - (m-3)\tau) \end{array} \quad (3)$$

万方数据

$$X(t_0 + (m-1)\tau) \quad X(t_1 + (m-1)\tau) \quad \cdots \quad X(t_i + (m-1)\tau) \quad \cdots \quad X(t_n)$$

这里的 $\tau = k\Delta t$ ($k=1, 2, \dots$) 为延滞时间, (3) 式中的每一列构成 m 维相空间中的一个相点, 任一点 $X(t_i)$ 有 m 个分量: $X(t_i), X(t_i + \tau), X(t_i + 2\tau), \dots, X(t_i + (m-1)\tau)$ 。 m 维空间中的一个相点表示了该系统在某个瞬时的状态, 而相点的连接线构成了点在相空间中的轨道, 这条轨线便表示了系统状态随时间的演化。于是, 在 m 维相空间中得到了一个相型, 从原则上讲, 便有了足够的信息把体系的动态展现在多维相空间上来考察。

2.2 关联分维的计算^[14]考察 m 维 (m 足够大) 相空间中的一对相点:

$$X_m(t_i) = (X(t_i), X(t_i + \tau), X(t_i + 2\tau), \dots, X(t_i + (m-1)\tau))$$

$$X_m(t_j) = (X(t_j), X(t_j + \tau), X(t_j + 2\tau), \dots, X(t_j + (m-1)\tau))$$

设它们之间的距离, 即欧式模 $r_{ij}(m)$, 显然 $r_{ij}(m)$ 是相空间 m 维数的函数, 且

$$r_{ij}(m) = \|X_m(t_i) - X_m(t_j)\|$$

这里符号 $\| \cdot \|$ 表示欧式模。

给定一临界距离 r (r 为一个数), 检查有多少对相点 (X_i, X_j) 之间的距离小于 r , 并把距离小于 r 的“点对”在所有“点对”中占的比例, 记为:

$$C_2(r, m) = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i,j=1(i \neq j)}^N \theta(r - \|X_i - X_j\|) \quad (4)$$

其中 θ 是 Heaviside 函数, 当 $z < 0$ 时, $\theta(z) = 0$; 当 $z > 0$ 时, $\theta(z) = 1$ 。 N 是总点数。

显然, $C_2(r, m)$ 是一个累积分布函数, 它描写了相空间中的吸引子上两点之间欧式距离小于 r 的概率, 刻画了相对于相空间某参考点 X_i 在 r 内的相点聚集程度。所以, 称 $C_2(r, m)$ 为吸引子的关联函数。若 r 选得太小, 以至距离 $\|X_i - X_j\|$ 都比 r 大, 则 $\theta(z) = 0$; 求和后, $C_2(r, m) = 0$, 表示相点分布在 r 范围外。若 r 选太大, 一切“点对”的距离都不会超过它, 则 $C_2(r, m) = 1$; 所以太大的 r 反映不了系统的内部性质。一般, r 的取法要使得 $0 \leq C_2(r, m) \leq 1$, 才有意义。

现在考察一下 $C_2(r, m)$ 与 r 的关系, 给定一个微量 δ , 用 δ 来探测吸引子的结构。如果吸引子结构是一维的线型, 则在与相对于参考点的距离在 r 以内的相关点将正比于 r/δ ; 如果吸引子结构是二维的面型, 则所对应的相关点数将正比于 $(r/\delta)^2$; 如此类推可知, 如果吸引子的结构是 D_2 维流型的, 则所对应的相关点数应正比于 $(r/\delta)^{D_2}$, 所以:

$$C_2(r, m) \propto r^{D_2}$$

由于上式的比例关系与本文所取的试探量的取值无关, 故取比例系数为 1 个单位得:

$$C_2(r, m) = r^{D_2} \quad \text{则}$$

$$D_2 = \left| \frac{\lg(C_2(r, m))}{\lg(r)} \right| = \left| \frac{\ln(C_2(r, m))}{\ln(r)} \right| \quad (5)$$

上式所定义的 $D_2(m)$ 就是所谓的关联维的定义。但按上式所算出的 D_2 与所嵌入的相空间的维数 m 有关, 即 D_2 是 m 的函数, 故一般称 $D_2(m)$ 为关联维 D_2 的估计值。

不断提高嵌入维数 m , 直至 m 达到某一值 m_c 时, 相应的关联维数的估计值 $D_2(m)$ 不在随 m 的增长而发生有意义的变化为止。这在 $\ln(C_2(r, m)) - \ln(r)$ 图里表现为一些曲线的直线部分的斜率不再随 m 的变化而变化, 此时:

$$D_2(m_c) = D_2(m_c + 1) = D_2((m_c) + 2) \cong \dots$$

记作: $D_2 = D_2(m_c)$ 。

D_2 就是所要求的吸引子的关联维, m_c 为饱和嵌入维数, 它的存在与否决定了时间序列的性质。如果 m_c 不存在, 那么关联维数的估计值 $D_2(m)$ 将随 m 的增长趋于无穷大, 表示吸引子不存在。从而可知, 被诊断的时间序列是一个随机系统。所以, 对于白噪声, $D_2(m)$ 是 m 的线形函数, 而对于混沌系统, $D_2(m)$ 可达到饱和。

3 研究结果与方数据

3.1 时间序列的相空间重构及分析 取长江流域内二个站点, 吴县和太湖 6~11 月份 5d 和 3d 一次调查

的田间褐飞虱发生资料序列为例,分析它们的相型。资料长度吴县为 1979~1990 年共 12a,序列长度为 211;太湖为 1986~1998 年共 13a,序列长度为 385。按滞后时间 $\tau=1$ 进行漂移,分别组成 $m=2,3,4,5,6,7,8,9,10$ 维空间。以太湖为例,经过处理后的多维时间序列的部分数据如表 1 所示。

表 1 太湖田间褐飞虱 3d 一次发生的时间序列的拓展

Table 1 Extension of time series from field data of *BPH* occurrence every four days in Taihu

时间序列 Time series	褐飞虱发生量(log 值) Logarithm value of <i>BPH</i> occurrence amount									
	0	0.3010	0.6990	0.6990	0.3010	0.4771	1.1139	1.7160	2.2923	2.4014...
$x(t)$	0	0.3010	0.6990	0.6990	0.3010	0.4771	1.1139	1.7160	2.2923	2.4014...
$x(t+\tau)$	0.3010	0.6990	0.6990	0.3010	0.4771	1.1139	1.7160	2.2923	2.4014	2.3874...
$x(t+2\tau)$	0.6990	0.6990	0.3010	0.4771	1.1139	1.7160	2.2923	2.4014	2.3874	2.4346...
$x(t-3\tau)$	0.6990	0.3010	0.4771	1.1139	1.7160	2.2923	2.4014	2.3874	2.4346	2.7275...
$x(t-4\tau)$	0.3010	0.4771	1.1139	1.7160	2.2923	2.4014	2.3874	2.4346	2.7275	2.6794...
$x(t+5\tau)$	0.4771	1.1139	1.7160	2.2923	2.4014	2.3874	2.4346	2.7275	2.6794	2.7694...
$x(t+6\tau)$	1.1139	1.7160	2.2923	2.4014	2.3874	2.4346	2.7275	2.6794	2.7694	3.2380...
$x(t+7\tau)$	1.7160	2.2923	2.4014	2.3874	2.4346	2.7275	2.6794	2.7694	3.2380	3.5866...
$x(t+8\tau)$	2.2923	2.4014	2.3874	2.4346	2.7275	2.6794	2.7694	3.2380	3.5866	3.8764...
$x(t+9\tau)$	2.4014	2.3874	2.4346	2.7275	2.6794	2.7694	3.2380	3.5866	3.8764	3.7220...

将表 1 中经过处理后的多维序列,按不同的时间滞后作为坐标可得 2,3,...各个不同维数相空间中的相型,根据表 1 作相型如图 1、图 2、图 3 所示。

由图 2、图 3,很明显,在二维和三维相空间中的轨线是复杂的。采样是按天进行的。从褐飞虱发生序列来看,大致有一年的变化周期,如图 1 所示。但近 20a 来,长江流域曾出现过大大发生,如 1987 年、1991 年、1997 年,也出现过较轻发生,如 1986 年、1990 年、1992 年、1994 年,并由于褐飞虱发生量的极大值有时出现在 8 月,有时出现在 9 月,从而破坏了年变化周期的单一特点,再加上各年之间的年变化振幅也在不断改变着,实际上,这个时间序列表现为复杂的结构。

然而,不论轨线有多么复杂,它在相空间中只占一个有限的部分,即它在相空间中是紧缩的,相点在空间有限部分作一种不规则的运动,故可以认为存在吸引子,如图 2、图 3 所示。至于这一吸引子是否是混沌吸引子,就需要看该吸引子的维数是否是分数维。

3.2 关联维的计算及结果 为了搞清吸引子的性质,需要进一步作关联分维的计算。利用吴县、太湖两地褐飞虱田间发生资料按公式(3)和(4),分别就 $m=2,3,4,5,6,7,8,9,10$ 维,以给定的 r 值求得 $C_2(r, m)$,然后,以 $\ln(r)$ 和 $\ln(C_2(r, m))$ 为坐标,将结果绘于图 4。

由图 4 可见,靠近坐标原点的区域,曲线 $\ln(C_2(r, m))$ 存在着一个线形区,就线形区中各曲线求出每一条线的斜率,可以看到对吴县田间褐飞虱发生资料时间序列来说, $m=8$ 时,斜率达到饱和值,即当 $m=8$ (也就是饱和嵌入维数 $m_c=8$) 后,各曲线在线形区域中斜率近于相等,而对太湖资料来说, $m=7$ 时斜率达到饱和(即饱和嵌入维数 $m_c=7$)。为清楚表达,将斜率 $D_2(m)$ 与相空间维数 m 的关系表示在图 5 中。

按图 4 结果,用(5)式计算可求得:吴县田间褐飞虱发生的吸引子维数到 $m=8$ 时达到饱和约为 1.6 维,太湖田间褐飞虱发生的吸引子维数到 $m=7$ 时达到饱和约为 0.68 维。两站褐飞虱发生的吸引子维数是分数维,因此,褐飞虱发生存在混沌吸引子,具有混沌现象。

4 讨论

4.1 混沌理论 是一门研究非线性系统动态行为的新学科。它的基本观点是:简单确定的非线性系统可以产生简单确定的行为,也可以产生不稳定但有界的貌似随机的不确定现象。由于混沌系统对初始状态的极

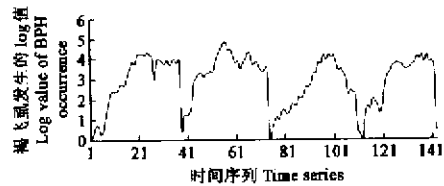


图 1 太湖田间褐飞虱 3d 一次发生的一维序列(部分)

Fig. 1 The 1-D time series from field data of *BPH* occurrence every four days in Taihu

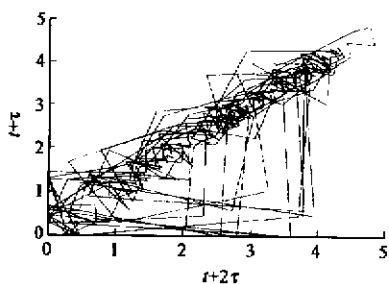


图2 太湖田间褐飞虱3d一次发生的二维相空间的相型

Fig. 2 Phase type from field data of BPH occurrence every four days in Taihu in 2-D phase space

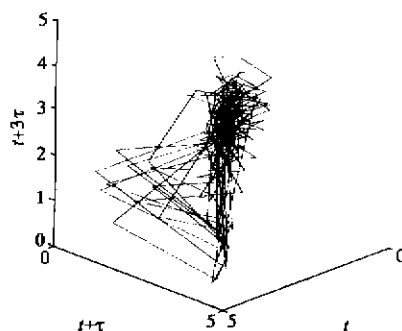


图3 太湖田间褐飞虱3d一次发生的三维相空间的相型

Fig. 3 Phase type from field data of BPH occurrence every four days in Taihu in 3-D phase space

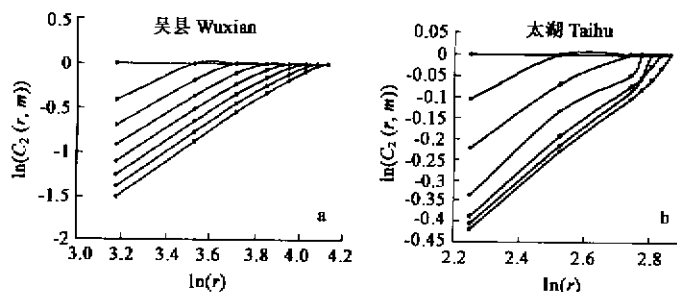


图4 吴县(a)和太湖(b)田间褐飞虱发生的关联函数 $\ln(C_2(r, m)) - \ln(r)$ 图

Fig. 4 The incidence function $\ln(C_2(r, m)) - \ln(r)$ from field data of BPH occurrence in Wuxian(a) and Taihu(b)

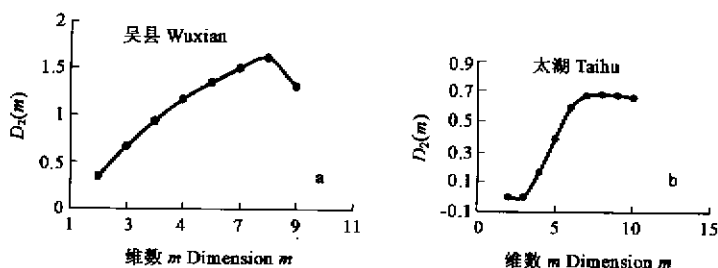


图5 吴县(a)和太湖(b)田间褐飞虱发生的关联函数斜率 $D_2(m)$ 与相空间维数 m 的关系

Fig. 5 The relation on incidence function slope $D_2(m)$ from field data of BPH occurrence in Wuxian(a) and Taihu (b) and phase space dimension m

端敏感性,因而本质上是不可预测的,但是混沌并非混乱,作为一个科学概念,它不等同于概率意义上的随机,本质上是确定系统产生的行为。因此,混沌现象的发现开创了科学模型化的新时期。一方面,它意味着

预测能力受到了根本性的限制,在确定系统中,混沌的动力学特性能够放大微小的差异,导致系统长期行为的不可预测。另一方面,混沌现象所固有的确定性表明大量的随机现象实际上比过去想象的更容易预测。研究表明,由吴县和太湖褐飞虱田间发生资料序列所表示的长江流域褐飞虱发生变化是一个非常复杂系统的表现。当将褐飞虱发生的一维时间序列拓展到多维相空间时,表现出在相空间中存在吸引子,并且具有分维结构,是一个奇异吸引子。因此,褐飞虱发生具有混沌现象。混沌现象是确定系统内禀随机性的表现,说明长江流域褐飞虱田间发生系统既是确定的,也是随机的。系统出现混沌的结果,意味着存在褐飞虱田间发生的短期可预报性与长期不可预测性的辩证统一。因此,要不断分析褐飞虱的发生变化,才能把握褐飞虱的发生演变规律。

4.2 分析结果表明,吴县和太湖两地褐飞虱发生序列,都得到了几乎相同的 d 值($m_c=7\sim 8$)。当分析长江流域的褐飞虱发生时,如果能够拥有褐飞虱发生序列,就可以写出具有 8 个自由度的一组差分方程。 $m_c=8$ 这一结果反映了褐飞虱发生的复杂程度。

4.3 由吴县和太湖田间褐飞虱发生序列所显示的长江流域褐飞虱发生演化的奇异吸引子所具有的分维数分别为 1.6 和 0.68,这一结果为研制用几个关键变量(或几阶确定性动力学模式)来描述褐飞虱发生变化,提供了可靠的依据。维数 $\text{INT}(D_2+1)$ 是描述系统所需要因素的最少数目,但不充分,充分描述系统吸引子所需的相空间维数是 $\text{INT}(2D_2+1)^{[14]}$ 。因此,为能使具有分维为 0.68 和 1.6 维的奇异吸引子都能在相空间中支撑起来,就长江流域褐飞虱发生变化而言,最好选取 4 个变量或建立最低为 4 阶的动力学模式来加以描述。

4.4 虽然吴县和太湖两地都同在我国长江流域,但所选取两地的资料序列长度以及发生时段不同,所以造成了吴县和太湖两地的研究结果有所不同。同时,对于混沌诊断理论来说,一般要求时间序列的长度不低于 260 个^[14],而吴县的数据序列仅 211 个,尚不足进行较准确的混沌分析,因此,分析以太湖为主,而吴县仅做参考对照。

4.5 混沌序列的预测研究在许多领域受到越来越多的学者关注,如天气预报、经济、信号处理与自动控制等,都取得了有意义的成果。目前,这一领域还比较年轻,尚有许多问题有待解决。如何应用混沌理论中的建模原理,改进传统的褐飞虱发生预测模型,开发出新的有效预报技术,是一项昆虫学者亟待研究和解决的新课题。混沌理论必将为人们更深刻地认识褐飞虱发生和发展规律及其在危害控制中做出贡献。

参考文献

- [1] Feigenbaum M J. Universal behavior in nonlinear systems. *Physica*, 1983, **7D**: 16~39.
- [2] Matsumoto T. Chaos in electronic circuits. *Proc. IEEE*, 1987, **75**: 1033~1057.
- [3] Simoyi R H, et al. One-dimensional dynamic in a multicomponent chemical reaction. *Phys. Lett.*, 1982, **49**: 245~248.
- [4] Glass L, et al. Bifurcation and chaos in a periodically stimulated cardiac oscillator. *Physica*, 1983, **7D**: 89~101.
- [5] Jensen R V, et al. Chaotic price behavior in a nonlinear cobweb model. *Econ. Lett.*, 1984, **15**: 235~240.
- [6] Saperstein A M. Chaos: a model for the outbreak of war. *Nature*, 1984, **309**: 303~305.
- [7] May R M. Simple mathematical models with very complicated dynamics. *Nature*, 1976, **261**: 459~467.
- [8] Allen J C. Are natural enemy populations chaotic? *See Ref.*, 1989, **70**: 190~205.
- [9] Logan J A, et al. Nonlinear dynamics and chaos in insect population. *Annu. Rev. Entomol.*, 1992, **37**: 455~477.
- [10] Blasius B, et al. Complex dynamics and phase synchronization in spatially extended ecological systems. *Nature*, 1999, **399**: 354~359.
- [11] 李汝铎, 丁锦华, 等. 主编. 褐飞虱及其种群管理. 上海: 复旦大学出版社, 1996. 1~5.
- [12] Packard N H, et al. Geometry from a time series. *Phys. Rev. Letts.*, 1980, **45**(9): 712~716.
- [13] Tekens F. Detecting strange attractors in turbulence. In: Rand, D. A. Young, L. S. eds. *Dynamical Systems and Turbulence*. Springer-Verlag, 1981.
- [14] 林振山 著. 长期预报的相空间理论和模式. 北京: 气象出版社, 1993.