

褐飞虱发生系统的混沌诊断*

许晓风^{1,3} 马飞² 邹运鼎³ 程遐年²

(¹ 南京师范大学生命科学学院, 南京 210097; ² 南京农业大学农业部病虫监测与治理重点开放实验室, 南京 210095; ³ 安徽农业大学, 合肥 230036)

【摘要】 褐飞虱在我国常年发生面积约为 $1.3 \times 10^7 \sim 2 \times 10^7$ hm², 年均损失稻谷 10×10^8 kg. 为更深入地研究褐飞虱发生系统的特性与规律, 并为预测和防治提供理论依据, 以我国长江流域太湖地区 1986~1998 年 6~11 月褐飞虱田间发生时间序列资料为例, 运用混沌理论中的自相关函数、功率谱图、相轨迹图、Poincare 截面、返回映象图等方法, 研究了褐飞虱发生系统的特性. 结果表明, 即使有随机性噪声的影响, 仍可判明我国长江流域褐飞虱发生系统具有混沌特性.

关键词 褐飞虱 混沌 功率谱图 返回映象 自相关函数 Poincare 截面 相轨迹图
文章编号 1001-9332(2003)08-1359-04 **中图分类号** S435.112 **文献标识码** A

Chaotic diagnosis of *Nilaparvata lugens* occurrence system. XU Xiaofeng¹, MA Fei², ZOU Yunding³, CHENG Xianian² (¹Life School of Nanjing Normal University, Nanjing 210097, China; ²Key Laboratory of Monitoring and Management of Plant Disease and Insects, Ministry of Agriculture, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; ³Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2003, 14(8): 1359~1362.

It is estimated that there are nearly 20 million hectares of rice crop being infested by *Nilaparvata lugens*, with an annual loss of some half a million tones of grain. In order to study the properties and laws of *Nilaparvata lugens* occurrence system further, the time series data of *Nilaparvata lugens* occurrence from 1986 to 1998 collected in Taihu Lake District were analyzed by using the methods of autocorrelation function, power spectrum figure, phase trajectory figure, poincare section, and return map of chaos theory. The results indicated that *Nilaparvata lugens* occurrence system in Yangtze River valley area in China had an obvious chaotic property, even though there was some interference of random noises.

Key words *Nilaparvata lugens*, Chaos, Power spectrum figure, Return map, Autocorrelation function, Poincare section, Phase trajectory figure.

1 引言

混沌理论自 20 世纪 70 年代中期发展至今, 已广泛渗透到各学科领域^[3-6, 10, 11]. 在确定性系统与随机过程之间, 混沌理论起着桥梁的作用, 为认识事物的发生规律及预测其发展的状态行为, 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. May^[9]指出: 生态学中一些非常简单的数学模型, 如 $X_{n+1} = \mu X_n(1 - X_n)$, 具有极其复杂的动力学行为, 包括分岔序列和混沌. Allen^[1]的 Lotka-Volterra 模型研究, Logan^[8]的昆虫与天敌模型研究, 以及 Blasius^[2]对美洲兔、猞猁及植被的动态研究, 都发现混沌现象的存在.

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、太平洋岛屿, 是我国稻区的主要害虫. 自 1970 年以来, 其危害面积日益扩大, 危害加剧, 暴发频次显

著增加, 长期对长江流域及南方水稻的生产构成严重威胁. 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. 本研究试图就褐飞虱的田间发生动态是否具有混沌特性进行探索.

2 研究方法

2.1 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太湖地区农科所(120°30' E, 31°50' N)1986~1998 年间 6~11 月 3 d 1 次的田间系统调查资料.

2.2 原理及方法

2.2.1 考察混沌的方法 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. 考察混沌的方法通常有 4 种^[7]: 1) 相空间重构, 即考察时间序列信号随

* 国家重点基础研究发展规划项目(G20000016210)和“948”资助项目(201065).

** 通讯联系人.

2001-03-22 收稿, 2001-06-13 接受.

时间变化的波形图或相轨迹图. 2) 考察庞卡莱 (Poincare) 截面, 由于混沌兼具确定性和随机性, 其奇怪吸引子 (strange attractor) 在庞卡莱截面上将形成有一定形状的线条、带或其他图案. 在相空间中, 运动轨迹趋向某条稳定轨道, 称之为“吸引子”. 人们比较熟悉的吸引子是不动点和极限环 (limit cycle), 不动点表明系统将趋向定态, 而极限环是一种周期运动的模式; 奇怪吸引子又叫混沌吸引子 (chaotic attractor), 是指相空间中吸引子的集合, 在该集合中混沌轨道在运行, 此吸引子不是不动点, 也不是极限环, 也不是周期吸引子, 而是具有分维数的吸引子. 3) 考察自相关函数, 若用 $C(\tau)$ 量度相隔时间 τ 的信号之间的关联, 对于混沌运动 $C(\tau)$ 将随 τ 迅速衰减, 常常带有一个指数尾巴. 4) 考察功率谱图, 把带有噪声、复杂的多周期行为与真正的混沌区别开来, 可考察时间序列信号的功率谱.

2.2.2 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. 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 $2D_0 + 1$), 它就可以刻画 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 维相空间的一个相型分布:

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

其中, $\tau = k\Delta t$ ($k = 1, 2, \dots$) 为延滞时间, (1) 式中的每一列构成 m 维相空间中的一个相点, 任一相点 $X(t_i)$ 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该系统的瞬时状态, 而相点的连线构成了点在相空间中的轨道, 这条轨道便表示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.

2.2.3 Poincare 截面法 在多维相空间中适当选取一截面, 通常称为庞卡莱截面. 观察运动轨迹与此截面的截点称为庞卡莱点, 设它们依次为 $P_0, P_1, \dots, P_n, \dots$. 这样, 原来相空间的连续轨迹在庞卡莱截面上便表现为这些离散点之间的映象, 即:

$$P_{n+1} = TP_n \quad (2)$$

式中, T 称为庞卡莱映象. 如果运动时两变量 X_1 和 X_2 的周期相等, 则运动轨迹通过庞卡莱截面都是同一点上, 即庞卡莱点是一不动点. 如果两变量的频率 ω_1 和 ω_2 不等, 则轨线相邻两次穿过庞卡莱截面不会落在同一点上. 设

$$\alpha = \omega_1 / \omega_2 \quad (3)$$

其中, α 为转动数, 表示在庞卡莱截面相邻两代表点之间的角位移 (以 2π 为单位). 如果 α 是无理数, 则 X_1 方向运动与

X_2 方向运动将永远不能协调一致, 因此系统的整体运动是非周期性的. 而 α 取无理数的运动虽然是非周期运动, 但两变量 X_1 和 X_2 的运动还是规则的, 两初始条件靠近的运动的轨线也可维持很靠近, 从而人们仍可对运动状态做出预测. 我们称这种运动为准周期运动.

对于更多变 ($N \geq 3$) 的情形, 周期运动和准周期运动的轨线是在 N 维环面上, 其与二维庞卡莱截面的交点也同样是一些离散点或封闭曲线. 至于混沌, 因其即具有确定性又具有随机性, 它在庞卡莱截面上将形成有一定形状的线条、带或其他图案. 因此, 可以抛开相空间的轨道, 借助计算机画出庞卡莱截面上的截点, 由它们可得到关于运动特性的信息.

2.2.4 返回映象 对于用连续流的微分方程 (组) 表征的系统或测量得到的时间序列, 可以很简单地仿照一维离散映象方式得到其二维平面上的相图. 这就是把得到的时间序列数据 $x(t)$ [对于微分方程, 就是求解时得到的 $x(t)$] 做横坐标, $x(t + \tau)$ 做纵坐标 (或简单地取 $\tau = 1$), 然后作图, 在二维平面上得到一定规则的图形. 这样的离散映象称为返回映象 (return map). 对于周期运动, 这样的映象的结果也是有限个点: nP 周期运动有 n 个极大值, 因此映象是 n 个点. 对于完全随机的运动, 映象是一些杂乱无章的密集点. 对于混沌运动, 则将是有形状图案.

2.2.5 自相关函数和功率谱 一般自相关函数 (autocorrelation function, 也称离散卷积):

$$C(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)x(t + \tau)dt \quad (4)$$

或

$$C(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t)x(t + \tau)dt \quad (5)$$

式中, τ 是时间的移动值. $C(0)$ 表示系统的功率. 当 $\tau \neq 0$ 时, $C(\tau)$ 的值表示相差为 τ 的两时刻运动的相互关联或相似的程度, 如对于理想白噪声, $x(t + \tau)$ 和 $x(t)$ 毫无关联, $\tau \neq 0$ 时便有 $C(\tau) = 0$. 当 $x(t)$ 的幅值一定时, $C(\tau)$ 越大, 就意味着 $x(t + \tau)$ 与 $x(t)$ 也越相似, 从而 $C(\tau)$ 值越大. 反之, τ 越大时, $x(t + \tau)$ 与 $x(t)$ 差别可能越来越大, 最后以至于 $x(t + \tau)$ 与 $x(t)$ 完全无关, 而 $C(\tau)$ 越来越小直至趋于零. 正因为如此, $C(\tau)$ 才取名为自相关函数, 用它表示时间序列的规律性或系统的确定性程度. 为了表示运动 (特别是随机过程) 的频谱特性, 可以对自相关函数进行傅里叶变换:

$$S(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} C(\tau)e^{-i\omega\tau}d\tau \quad (6)$$

其中,

$$C(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega)e^{i\omega\tau}d\omega \quad (7)$$

(6)、(7) 式有时称为维纳-辛钦定理. $C(\tau)$ 的傅立叶变换 $S(\omega)$ 即表征运动的频谱特性. $S(\omega)$ 具有以下一些性质: 1) $S(\omega)$ 是频率 ω 的实偶函数. 这可以很容易从上面讲的 $C(\tau)$ 是 τ 实偶函数推得. 2) $S(\omega)$ 曲线下的面积等于运动变量 $x(t)$ 的均方值, 即有:

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x^2(t)dt = C(0) = \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega)d\omega \quad (8)$$

3) 上式左边表示系统的平均功率, 因此 $S(\omega)$ 表示功率的

(频)谱密度(power spectrum density, 简称为 PSD). 如果测得的谱是典型的线谱, 而且各谱线频率是 $n\omega$ ($n = 1, 2, 3$), 则运动是周期的; 如果谱是连续的则运动是纯随机的; 如果谱是在连续本底上有一些线(或带), 则运动即可能是混沌, 也可能是有噪声干扰的周期运动.

3 结果与分析

图 1a 是长江流域内太湖地区农科所 1986~1998 年(共 13 年) \ 序列长度为 385 的褐飞虱田间发生的时间序列. 图 1b、c 给出的则是与图 1a 对应的自相关函数和功率谱. 图 1a 显示了褐飞虱的发生, 大致的变化周期为 1 年. 但近 20 年来, 长江流域曾出现过大大发生年份, 如 1987、1991 和 1997 年, 也出现过较轻发生年份, 如 1986、1990、1992 和 1994 年. 由于褐飞虱发生量的极大值有时在 8 月, 有时在 9 月, 使年变化的周期性特点呈不规则状态, 再加上年变化振幅的差异, 使该时间序列的结构较为复杂. 图 1b 所示自相关函数 $C(\tau)$ 随 τ 迅速衰减, 并带有一个指数尾巴. 图 1c 也显示了功率谱在低频段基本没有规整的大峰, 且具有指数下降的特征. 通过对自相关函数和功率谱的分析, 可以初步判明长江流域褐飞虱发生系统具有混沌特征. 长江流域褐飞虱发生变化呈混沌运动, 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, 需要不断地积累资料和分析褐飞虱的发生变化, 才能更准确地把握褐飞虱的发生演变规律.

按滞后时间 $\tau = 1$ 进行漂移, 分别组成 2~10 维空间, 由此分析它们的相型. 经过处理后的多维时间序列的部分数据见表 1. 将表 1 中经过处理后的多维序列, 按延迟坐标 $X(t)$ 、 $X(n+1)$ 、 $X(n+2)$ 重构的吸引子见图 2.

由图 2 可以看出, 这些轨迹构成大体像是漏斗

型的吸引子. 由重构后的状态空间得到庞卡莱截面

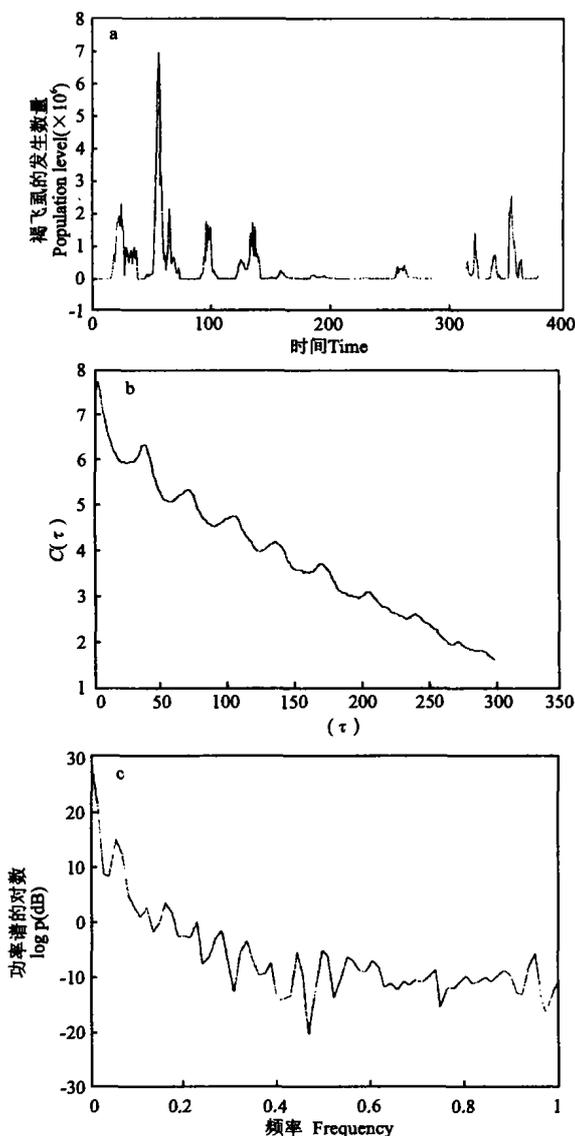


图 1 褐飞虱发生量对时间作图得到的时间序列和相应的自相关函数及功率谱图

Fig. 1 Autocorrelation function and power spectrum of *Nilaparvata lugens* population level vs. time.

a) 褐飞虱发生的时间序列图 Time series figure, b) 相应的自相关函数图 Autocorrelation function figure, c) 相应的功率谱图 Power spectrum figure.

表 1 太湖田间褐飞虱发生的时间序列的拓展

Table 1 Extension of time series from field data of *Nilaparvata lugens* populations in Taihu rice-growing area

| 时间序列 Time series | 褐飞虱发生量(log 值)Logarithm value of population level. | | | | | | | | | |
|---------------------|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-----------|
| $x(t)$ | 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 | 0.4346 | 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... |

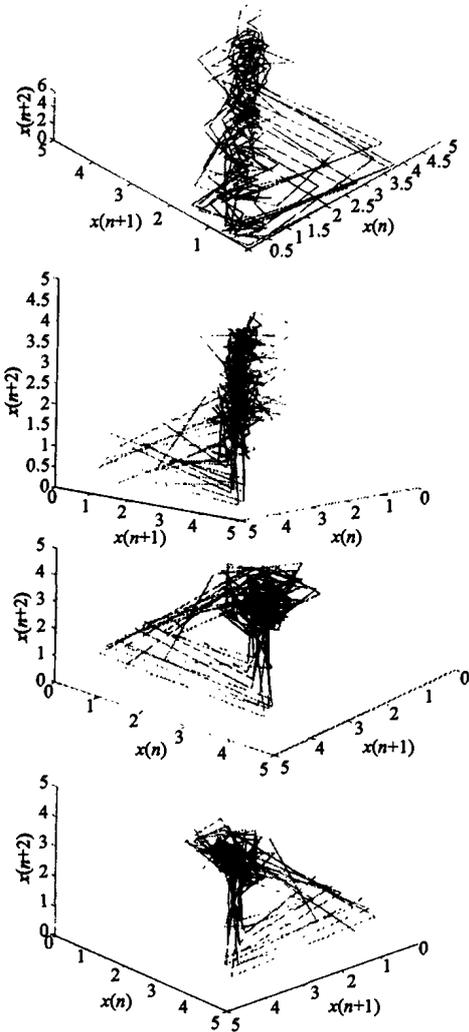


图2 太湖田间褐飞虱发生的三维相空间相型
Fig.2 Phase type from field data of *Nilaparvata lugens* population in Taihu rice growing area in 3D phase space.

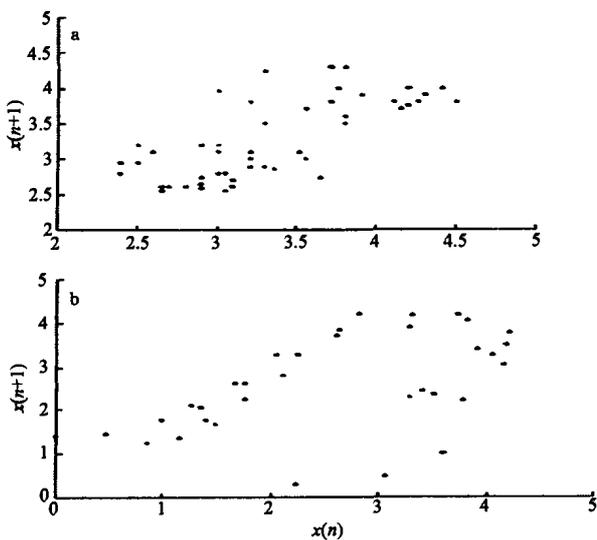


图3 庞卡莱截面和返回映像图。
Fig.3 Poincaré section and return map.
a) 庞卡莱截面图 Poincaré section; b) 返回映像图 Return map.

和返回映像图(图 3a、b), 其中选用的截面是 $X_{n+1}(t) - X_n(t) = 0$. 图 3a 所示吸引子在庞卡莱截面形成密集的几乎封闭的环, 从而也可以表示像一维离散映象方式所得到的由倍周期分叉通向混沌. 从图 3b 中可以看出, 返回映像图呈(开口向下的)类抛物线型, 表明了确定性混沌的特征.

4 讨 论

本文通过考察褐飞虱发生的时间序列信号随时间变化的波形图, 及自相关函数、功率谱图、相轨迹图、Poincaré 截面、返回映像图等的分析表明, 即使有随机性的噪声影响, 仍可判明褐飞虱发生系统具有混沌特性, 服从一定的规律, 而不是完全随机的.

上述的方法没有哪一种是最普遍适用的有效方法. 对于实际测得的时间序列, 总难免或多或少混有噪声, 这就必然使所得结果复杂化, 如混有噪声的周期运动的映象不是少数孤立点, 而是点集团, 甚至是成片的图形. 混有噪声的混沌图形也可能很模糊不清, 甚至无法分辨. 在这样的情形下, 单靠这类方法自然不能有效. 比较可靠的作法往往是同时采用不止一种方法, 特别是应计算刻画系统运动性质的一些特征量的数值, 如 Lyapunov 指数、K 熵、关联维数等(作者已另文描述), 从不同的深度和广度了解混沌系统的非线性特征, 然后进行综合分析, 才可能得出较准确的结论, 使对混沌系统的认识从定性上升到定量的高度.

参考文献

- Allen JC. 1989. Are natural enemy populations chaotic? *See Ref.*, 70: 190-205
- Blasius B, Huppert A, Stone L. 1999. Complex dynamics and phase synchronization in spatially extended ecological systems. *Nature*, 399: 354-359
- Fox RF. 1990. Quantum chaos in two-level quantum systems. *See Ref.*, 50: 105-114
- Jensen RV. 1990. Quantum chaos. *See Ref.*, 50: 98-104
- Kerr RA. 1989. Does chaos permeate the solar system? *Science*, 244: 144-145
- Laskar J. 1989. A numerical experiment on the chaotic behavior of the solar system. *Nature*, 238: 237-238
- Li X-Q (李学勤), Wang W-L (王万良), Xu W-S (许维胜), et al. 1999. Advances in chaos and its control. *MEEM (机电工程)*, 5: 56-59 (in Chinese)
- Logan JA, Allen JC. 1992. Nonlinear dynamics and chaos in insect population. *Ann Rev Ent*, 37: 455-477
- May RM. 1976. Simple mathematical models with very complicated dynamics. *Nature*, 261: 459-467
- Murray C. 1989. Is the solar system stable? *New Sci*, 25: 60-63
- Nobili AM, Burns JA. 1989. Solar system chaos. *Science*, 244: 1425
- Packard NH, Cratchfield JP, Farmer JD, et al. 1980. Geometry from a time series. *Phys Rev Letts*, 45(9): 712-716
- Tekens F. 1981. Detecting Strange Attractors in Turbulence, Dynamical System and Turbulence. Warwick: Springer-Verlag. 366-381

作者简介 许晓风, 男, 1959 年生, 博士, 教授, 主要从事昆虫学研究. E-mail: xxf@jlonline.com