

褐飞虱 (*Nilaparvata lugens*) 发生的分形性质研究

马 飞¹, 李红兵², 程遐年¹

(1. 南京农业大学植保系, 南京 210095; 2. 白湖农业科学研究所, 安徽 庐江 231508)

摘要: 运用分形理论以安徽省庐江县植保站和江苏省吴县植保站 1979~1990 年及太湖地区农科所 1986~1998 年间褐飞虱发生的田间系统调查资料为例, 对褐飞虱发生的性质进行了探讨。结果表明: (1) 庐江站、吴县站和太湖地区农科所褐飞虱发生在一定标度域内具有分形性质, 其分维值分别为 0.7158、0.5212 和 0.2816; (2) 褐飞虱发生的分维值是表征一定标度区间的发生程度差异的一个新的参数, 分维值大, 则发生程度轻, 反之则重; (3) 分维数 D 值与褐飞虱发生的聚集程度是密切相关的, D 值小聚集程度大, 反之聚集程度小, D 值可以作为褐飞虱聚集分布程度的一个指标; (4) 褐飞虱发生具有多重分形结构, 其广义维数谱 D_q 曲线可以用于褐飞虱发生的预测预报。

关键词: 褐飞虱; 分形; 多重分形; 分维值

Study on fractal property of *Nilapravata lugens* (BPH) occurrence

MA Fei¹, LI Hong-Bing², CHENG Xia-Nian¹ (1. Department of Plant Protection, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 2. Agricultural Science Institute of Baihu, Lujiang, Anhui 231508, China)

Abstract: The nature of BPH occurrence was investigated by means of fractal theory based on the systematic field investigation data of BPH occurrence. The results indicated: (1) BPH occurrence had a fractal property in fixed scale interval with the D value 0.7158, 0.5212, 0.2816 respectively. (2) The fractal dimension value of BPH occurrence was a new paramater expressing the distinction of occurrence degree in fixed scale interval, and the greater the fractal dimension value, the lighter the BPH occurance, and vice versa. (3) As D value showed a close correlation with aggregation degree, it could be used as an index for aggregation degree. (4) BPH occurrence possessed multifractal structure, and the related D_q curve may have an application in the forecast of BPH occurrence.

Key words: BPH; fractal; multifractal; fractal dimension value

文章编号: 1000-0933(2001)02-0279-07 中图分类号: Q141, Q968.1, S433 文献标识码: A

褐飞虱 (*Nilaparvata lugens* stål) 是东南亚各国、日本、朝鲜半岛、和我国长江流域及其以南稻区主要害虫, 近几十年来, 发生频次显著加大, 危害程度日趋严重。尽管昆虫学家已经对褐飞虱的发生特点、危害损失、迁飞规律、种群管理、预测预报等方面进行了大量的研究工作^[1], 但对褐飞虱的危害控制仍没有得到根本改变^[2]。因此, 深入研究褐飞虱灾变发生的成因是人们面临的迫切任务。

分形理论由美国科学家曼得尔布罗特 (B. B. Mandlbrot) 于本世纪 70 年代中期创立^[3,4], 与混沌论、耗散结构论、突变论、小波理论一样都是近十多年来发展的新兴学科, 现已在包括物理学、生物学、气象学、地质学等在内的众多领域得到了较为广泛的应用^[5~7]。借助分形理论刻画自然界中一些不规则、不稳定和具

基金项目: 本项研究系国家“九五”重大科技攻关资助项目 (No. 96-005-01-01-06)

本研究承蒙江苏吴县市植保站和太湖地区农业科学研究所提供田间系统调查资料, 张孝羲教授给予指导, 谨此谢忱

收稿日期: 1999-10-06; 修订日期: 2000-02-05

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

有高度复杂结构的现象,已取得了异乎寻常的效果^[8~10],这些应用不仅促进了分形理论本身的发展,而且也深化了对纷繁世界诸多事物内部发生机制的认识。本文运用分形理论对目前较少涉及的褐飞虱发生是否具有分形性质以及其分形性质的存在具有何种意义等相关问题作了初步分析。

1 材料与方法

1.1 资料来源

研究中使用的褐飞虱发生资料,取自种植单季中稻为主的我国江淮稻区安徽省庐江县植保站(117.2°E 32.2°N)及种植单季晚稻为主的沿江稻区江苏省吴县市植保站(120.6°E 31.3°N)1979~1990年12a和江苏太湖地区农业科学研究所(120.3°E31.5°N)1986~1998a间6~11月分别为5d和3d田间观察圃系统调查资料(见表1、表2、表3)。

表1 庐江县植保站 1979~1990 年间褐飞虱发生的部分系统调查资料(单位:头/百丛)

Table 1 Partially systematic investigation data of BPH occurrence from Lujiang
forecast station from 1979 to 1990 (unit: head/100 hills)

年份	月/日 Month/day												
Year	...	7/20	7/25	7/30	8/5	8/10	8/15	8/20	8/25	8/30	9/5	9/10	...
1979	...	18	36	6	63	153	180	180	164	540	4300	3500	...
1981	...	18	168	85	8	2	10	58	44	48	288	508	...
1987	...	140	295	125	120	585	6865	670	2765	2490	245	225	...
1990	...	14	18	49	163	310	147	88	317	193	267	362	...

注:鉴于文章篇幅,仅列出数年资料以作示列,下同。

表2 吴县市植保站 1979~1990 年间褐飞虱发生的部分系统调查资料(头/百丛)

Table 2 Partially systematic investigation data of BPH occurrence from Wuxian
forecast station from 1979 to 1990 (head/100 hills)

年份	月/日 Month/day												
Year	...	7/20	7/25	7/30	8/5	8/10	8/15	8/20	8/25	8/30	9/5	9/10	...
1979	...	0	5	0	0	0	0	2	2	44	20	46	...
1981	...	1	9	6	14	46	27	64	218	475	445	905	...
1987	...	262	322	486	752	2153	4580	8187	10473	10130	2127	2350	...
1990	...	36	104	86	118	132	520	1609	5470	9720	10470	5280	...

表3 太湖地区农科所 1986~1998 年间褐飞虱发生的部分系统调查资料(头/百丛)

Table 3 Partially systematic investigation data of BPH occurrence from agricultural
Science institute of Taihu from 1986 to 1998 (head/100 hills)

年份	月/日 Month/day												
Year	...	7/20	7/25	7/30	8/5	8/10	8/15	8/20	8/25	8/30	9/5	9/10	...
1986	...	2	13	196	244	534							
1987	...	1042	1814	1262	1992	2386	8320	34800	29630	14060	6160	7510	
1990	...	28	310	624	562	490	290	1174	2914	1990	1220	842	...
1997	...	2	50	250	196	19516	23664	13516	8360	2292	1184	604	...

1.2 研究原理及方法

1.2.1 分形维数计算 1986年,Mandelbrot把分形定义为“局部以某种方式与整体相似的形”。具体地说,就是局部(部分)与整体在形态、功能、和信息等方面具有相似性。这种相似性在分形理论中称作自相似性(Self-Similarity),它是分形理论研究的核心问题,是分形体的本质特征。对于这一特征进行描述的主要

工具是分形维数(Fractal dimension)^[11],它是对分形体的有效表征。一般求算分形维数所采用的方法是双对数坐标下进行线性回归,所得拟和的斜率(或其转换结果)为分形维数值^[12,13]。其计算公式如下:

$$N(\epsilon) = C/\epsilon^D \tag{1}$$

对(1)式两边同时取以 10 为底的常用对数,则得(2)式:

$$\lg[N(\epsilon)] = - D\lg(\epsilon) + \lg(c) \tag{2}$$

根据(2)式,lg[N(ε)]-lg(ε)散点在一定标度内在一条直线上,则可以通过求取直线的斜率得到分形维数的值。将ε定义为褐飞虱特征发生标度,取值在 100~1000 头/百丛之间不等,将满足具有大于ε的褐飞虱特征发生标度的庐江植保站、吴县植保站和太湖地区农业科学研究所褐飞虱发生频数分别定义为 N1、N2 和 N3,根据 3 站 1979~1990 年及 1986~1998 年间褐飞虱发生的记录资料,通过分别建立庐江植保站、吴县植保站和太湖地区农业科学研究所的 lg[N(1)]-lg(ε)、lg[N(2)]-lg(ε)及 lg[N(3)]-lg(ε)散点图来分析 3 站褐飞虱发生是否具有分形性质等相关问题。

1. 2. 2 多重分形维数计算 对于生物现象的复杂性,单一的分形研究是不能完全刻画它的性质的。因此,人们提出应用多重分形(Multifractal)探讨生物现象的复杂性。多重分形也称“多标度分形”,它是用来表示仅用一个取决于整体的特征标度指数(即分形维数)所不能完全描述的奇异几率分布的形式,或者说用一个谱函数来描述分形体不同层次的生长特征,从系统的局部出发来研究其最终的整体特性。它所涉及的问题是某个参量的几率分布,这点和生物种群的数量或空间结构随时间变化而变化是类似的,从而可以把多重分形理论应用于昆虫种群的研究。

设一个地区在特定数量标度内褐飞虱发生频数的总数为 N,第 i 次褐飞虱发生频数对应于第 i 个发生源点 X_i,则发生源点 X_j 为中心,半径为 r 的圆形区域内发现另一发生源点的概率为:

$$(1/N) \sum_{i=1}^N \theta(r - |X_i - X_j|) \tag{3}$$

其中 θ 是 Heaviside 阶跃函数。由此可计算半径为 r 的圆内发生频数的 q 阶关联积分 C_q(r):

$$C_q(r) = \left\{ (1/N) \sum_{j=1}^N \left[(1/N) \sum_{i=1}^N \theta(r - |X_i - X_j|) \right]^{q-1} \right\}^{1/(q-1)} \tag{4}$$

于是,广义维数谱 D_q 可以通过 q 阶关联积分 C_q 算得:

$$D_q = \lim_{r \rightarrow 0} \log C_q(r) / \log r \tag{5}$$

这种计算方法是 Grassberger-Proccaccia 法的推广^[14,15],是固定质量法与固定半径法的统一,适合于直接从褐飞虱发生的时间序列进行计算^[16]。

分形理论的目的是寻找那些物体独立于尺度的特征,但尺度对于生态学研究具有重要意义。不同的尺度,导致生态学现象和过程存在很大差异。应用分形理论的研究表明,生物现象随尺度的变化是有规律的。例如,依赖于某种植物存在的害虫密度与虫体尺寸具有分形关系^[17]。害虫的种群分布是依赖尺度的,虫体尺寸和代谢率与害虫的密度有关,即虫体尺寸小则密度大,反之则密度小,害虫密度依赖于尺度^[17]。应用分形理论进行生态学研究时,一般是认识研究对象的自相似性和维数,进而借助于自相似性和维数研究不同尺度上生态学现象的特征和规律,因此,利用分形理论(自相似性)来研究不同尺度所对应的生态学现象是非常有效的方法。

2 结果分析

2. 1. 1 不同年份褐飞虱发生的分形值的计算结果 根据表 1~表 3,以 100~1000 头/百丛之间不同的ε值为褐飞虱特征发生标度,统计了 1979~1990 年 6~11 月间具有大于不同ε值的庐江植保站、吴县植保站及 1986~1998 年 6~11 月间太湖地区农科所褐飞虱发生频数 N1(庐江植保站总虫量发生频数)、N2(吴县植保站总虫量发生频数)、N3(太湖地区农业科学研究所总虫量发生频数),结果见表 4。

由表 4 分别建立以庐江植保站、吴县植保站和太湖地区农业科学研究所褐飞虱发生记录资料为基础的 N-ε 双对数图(图 1),见图 1,并计算出在标度内的分形数值见表 5。

表 4 褐飞虱发生频数
Table 4 Frequency of BPH occurrence

ϵ	>10	>20	>30	>40	>50	>60	>70	>80	>90	>100	>200	>300	>400	>500
N1	200	176	166	156	148	141	133	129	123	122	97	70	54	50
N2	179	168	164	161	157	155	152	147	142	139	128	119	111	97
N3	334	313	298	293	287	275	273	272	269	267	243	224	209	191
ϵ	>600	>700	>800	>900	>1000	>2000	>3000	>4000	>5000	>6000	>7000	>8000	>9000	>1000
N1	38	32	30	29	27	17	11	9	7	4	2			
N2	94	91	90	88	85	73	62	57	49	42	33	27	18	14
N3	178	165	158	151	143	110	92	81	72	58	44	38	33	28

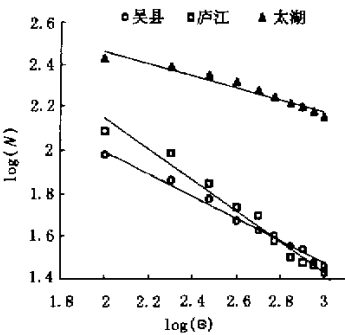


图 1 褐飞虱发生的 N - ϵ 双对数图

Fig. 1 Double-logarithm figure of N - ϵ of BPH

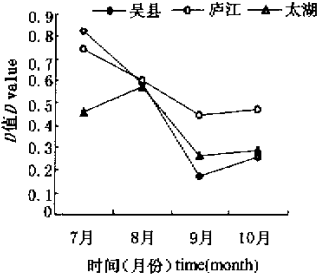


图 2 不同月份田间褐飞虱发生的 D 值比较

Fig. 2 Fractal dimension D value of BPH occurrence in various months

表 5 分维数值
Table 5 Fractal dimension value

项目 Item	分维数值 D Fractal dimension value	相关系数 Correlation coefficient
庐江植保站 Lujiang station	0. 7158	0. 9862
吴县植保站 Wuxian station	0. 5212	0. 9893
太湖地区农业科学研究所 Taihu District Agricultural Science Institute	0. 2816	0. 9525

由表 6, 分别计算出庐江植保站、吴县植保站和太湖地区农业科学研究所褐飞虱发生在标度内的分维数值, 见表 7。并根据表 7 结果作出不同月份褐飞虱发生的分维数 D 值变化图, 见图 2。

2. 1. 3 褐飞虱田间发生的多重分形维数谱计算结果 由表 4。通过公式 3、4、5 计算出褐飞虱田间发生的多重分形维数谱, 结果见表 8, 并画出褐飞虱发生的广义维数谱 D_q - q 曲线如图 3 所示。

2. 2 结果分析

2. 2. 1 由图 1 可知, 对 3 站系统调查资料而言, 在选取的研究区段内(100~1000 头/百丛), 通过线性回归得出 $\lg(N1) - \lg(\epsilon)$ 、 $\lg(N2) - \lg(\epsilon)$ 、 $\lg(N3) - \lg(\epsilon)$ 散点在该区段内存在极好的线形关系, 在特定的发生标定内, 发生频数 $N1$ 、 $N2$ 、 $N3$ 与特征发生标度 ϵ 之间都符合(1)式, 在研究区段内分维数值均为常数, 因此 3 站褐飞虱的田间发生具有分形性质。

2. 1. 2 不同月份褐飞虱发生的分维数值的计算结果

根据表 1、表 2、表 3, 以 100~5000 头/百丛之间不同的 ϵ 值为褐飞虱特征发生标度, 统计了 1979~1990 年 7 月、8 月、9 月及 10 月间具有大于不同 ϵ 值的庐江站、吴县站及 1986~1998 年 7 月、8 月、9 月及 10 月间太湖地区农科所褐飞虱发生频数, 结果见表 6。

表 6 不同月份褐飞虱发生频数
Table 6 Frequency of BPH occurrence in various monthes

月份	地区	ε											
Month	Places	100	200	300	400	500	600	800	1000	2000	3000	4000	5000
7 月 July	庐江 ^①	6	2	2	2	1							
	吴县 ^②	5	3	2	1								
	太湖 ^③	12	11	10	7	7	7	6	5	1			
8 月 August	庐江	31	19	16	9	9	6	5	4	3	1	1	1
	吴县	39	30	25	22	15	13	12	11	8	7	7	5
	太湖	94	79	67	62	55	49	46	39	25	18	15	12
9 月 September	庐江	53	48	32	27	24	20	17	16	15	14	8	6
	吴县	67	65	64	61	57	57	57	55	47	43	39	28
	太湖	110	107	104	101	92	88	76	72	69	59	52	42
10 月 October	庐江 ^①	31	27	19	17	16	12	10	2	2	1		
	吴县 ^②	33	32	31	29	28	27	27	23	21	15	14	7
	太湖 ^③	50	45	42	39	37	34	31	30	25	22	21	18

①Lujiang, ②Wuxian, ③Taihu, ①Lujiagn, ②Wuxian, ③Taihu。

表 7 不同月份褐飞虱发生的分维数 D 值
Table 7 Fractal dimension D value of BPH occurrence in various monthes

项目 Item	D 值 Value			
	7 月 July	8 月 August	9 月 September	10 月 October
吴县植保站 Wuxian station	0.8236	0.5815	0.1701	0.2545
庐江植保站 Lujiang station	0.7424	0.6005	0.4394	0.4644
太湖地区农业科学院 Taihu District Agricultural Science Institute	0.456	0.5681	0.2642	0.2881

表 8 褐飞虱田间发生的多重分形维数谱计算结果
Table 8 Outcome on multifractal dimension spectrum of BHP occurrence in field

D_q	q											
	-5	-4	-3	-2	-1	0	1.1	2	3	4	5	6
太湖 ^①	0.1925	0.1776	0.1649	0.1534	0.1432	0.1341	0.1153	0.1189	0.1126	0.1064	0.1015	0.0968
吴县 ^②	0.4243	0.3784	0.3462	0.3088	0.2733	0.265	0.1894	0.1687	0.1513	0.1365		
庐江	0.3133	0.2999	0.2871	0.2753	0.2661	0.2681	0.227	0.1739 ^③	0.1777	0.1708	0.162	0.1524

①Taihu, ②Wuxian, ③Lujiang。

2.2.2 通过线性回归分析,得出庐江植保站、吴县植保站和太湖地区农业科学研究所所在 100~1000 头/百丛的研究区段内褐飞虱发生的分形分维值分别为 $D_1=0.7158$ 、 $D_2=0.5212$ 、 $D_3=0.2816$,其相关性系数均在 0.95 以上。从表 1~4 中可知,太湖地区农业科学研究所褐飞虱的发生量>吴县植保站>庐江植保站,而在特定标度内 $D_1>D_2>D_3$,这种分维值的大小差异正好反映了在相同标度域内,太湖地区农业科学研究所的褐飞虱发生分布频度大,即发生程度大;庐江植保站的褐飞虱发生分布频度小,即发生程度轻。以 500 头/百丛发生为特征标度,分别计算出庐江植保站、吴县植保站和太湖地区农业科学研究所 500~1000 头/百丛和 100~500 头/百丛的发生频数之比值,则庐江植保站为 0.4602、吴县植保站为 0.7529、太湖地区农业科学研究所为 0.8695。因此,在一定标度域内,褐飞虱发生的分维值越小,其所表征的发生程度就越大,反之则小。所以褐飞虱发生的分维值是表征一定标度区间发生程度差异的一个新的参数。

2.2.3 从表 6、表 7 及图 2 可以看出,3 站褐飞虱的发生在不同月份变异幅度很大,7、8 月份褐飞虱发生数量相对较小,9、10 月份发生数量较大,并且 7、8、9 月份 D 值呈降维排列,到 10 月份 D 值又增加,而在 9 月份的褐飞虱发生量达到最高峰,10 月份褐飞虱的发生量开始下降,因此, D 值的下降说明褐飞虱的发生数量趋于增加,聚集程度集中。所以 D 值与褐飞虱发生的聚集程度是密切相关的, D 值小聚集程度大,反之聚

集程度小,因而, D 值可以作为褐飞虱聚集分布程度的一个指标。

2.2.4 通过表 8 的计算结果和图 3 表明,褐飞虱的田间发生是非均匀的,它们具有明显的多标度分形结构。3 站的 D_q 曲线在整体上都是下降的,这表明从多重分形的观点来研究褐飞虱的田间发生分布时,随着时间的变化是整体降维的,褐飞虱的发生程度显著提高。无论是褐飞虱发生程度小的庐江植保站,还是发生程度大的太湖地区农业科学研究所,褐飞虱的发生都朝着更加群集的方向发展。因此,图 3 所示的褐飞虱发生的广义维数谱 D_q 曲线随时间的变化提供了褐飞虱发生的多重分形模式的信息,多重分形广义维数谱的整体下降,预示着褐飞虱发生数量的增加,所以, D_q 曲线可以用于褐飞虱发生的预测预报。

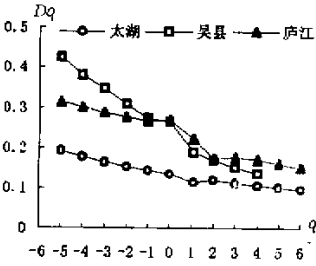


图 3 褐飞虱田间发生的多重分形维数谱变化(广义 G-P 法)

Fig. 3 Field change of BPH occurrence in multifractal dimension spectrum (generalized G-P method)

3 讨论

3.1 当然自然界几乎不存在真正完全数学意义上的分形体,这种通过直线拟和而得到的分形性质,可以确切地称之为统计意义上的自相似性。通过对两类不同地区的庐江植保站、吴县植保站及太湖地区农业科学研究所褐飞虱发生资料的统计分形分析,揭示了褐飞虱的发生在一定标度域内具有分形性质,因而说明形成褐飞虱发生这一高度复杂的生物现象并不一定需要复杂的原理,可通过局部和整体间的内部自相似性,从简单的机理着手,经过多次迭代,就可产生极为复杂的、人类目前尚无法完全了解的褐飞虱发生过程^[18,19]。无疑褐飞虱发生的分形性质存在,为褐飞虱发生成因研究、模型研究和预测研究找到了新的切入点,开辟了新的思路。

3.2 通过对 1979~1990 年间及 1986~1998 年间褐飞虱发生资料的统计分形分析,结果证明褐飞虱发生具有分形性质。因而有:

$$\log N(\epsilon) = u - v \log \epsilon \tag{6}$$

假设 $\log \epsilon = m$ 则有:

$$\log N(\epsilon) = u - vm \tag{7}$$

式中, m 为褐飞虱发生等级, N 为大于某一发生等级的发生频数, u 、 v 为比例常数,具体数值因所选取的标度区间不同而不同,或同标度区间因地区而有差别。由于褐飞虱发生存在分形,因此可以根据在一定标度区间内自相似性的存在,就能提高现有资料的分辨率,由大尺度趋势复原小尺度趋势;也可以由小尺度趋势复原大尺度趋势,以降低分辨率为代价外推现有资料的样本空间范围。

3.3 分维数 D 值与褐飞虱发生的聚集程度是密切相关的, D 值小聚集程度大,反之聚集程度小, D 值可以作为褐飞虱聚集分布程度的一个指标。

3.4 本研究结果证明褐飞虱发生这一自然界高度复杂的生物现象是一个多重分形集合,是由多个分形子集所构成的,每个分形子集具有不同的标度指数及相应的分维数,且该分维数是与可观测的分维数集合相联系的一个连续函数,它表征了不同标度区域内分维值的差别和分布状况^[20],并且可以把 D_q 曲线用于褐飞虱发生的预测预报中。

3.5 基于褐飞虱发生分维值的大小及意义,它既可以用作褐飞虱发生程度的区划指标,也可以计算出区域的分维值,并能进一步探讨其变化规律与内在原因,是用来度量褐飞虱发生的空间分布特征,以及对相关问题进行深入研究的新参数。

3.6 分形几何(Fractal geometry)能够对物体随尺度变化的特征给予刻画。目前对生物种群、群落结构的研究,仅局限于在单一尺度对种群结构、群落多样性的空间变异进行测定,研究结果只代表一个尺度的种群结构、群落结构的特征,难免出现片面性和不确定性。通过分形分析方法,不但可以对任意间隔的样

方进行比较,还能得到不同尺度上种群及群落特征之间相关关系,从而能够揭示种群及群落结构的尺度变化特征,并能对其进行准确的定量描述。通过认识最容易了解尺度上的生态现象特征,借助自相似性规律便可以掌握所有其它尺度上生态现象的特征,并可以对害虫的发生进行预测。因此,分形理论是研究复杂生态学现象的有力工具。

参考文献

- [1] 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. 1~314.
- [2] 程家安,章连观,等. 水稻褐飞虱种群动态模拟模型及其有效性检验. 浙江农业大学学报,1989,15(2):131~136.
- [3] Mandelbrot BB. *Fractal: forms, chances and dimension*. New york: W. H. freeman, 1997.
- [4] 张济忠 编著. 分形. 北京:清华大学出版社,1995. 294~347.
- [5] 仪垂祥 编著. 非线性科学及其在地学中的应用. 北京:气象出版社,1995. 176~267.
- [6] 李后强,汪富泉 著. 分形理论及其在分子科学中的应用. 北京:科学出版社,1993. 1~319.
- [7] 张建树 编著. 混沌生物学. 西安:陕西科学技术出版社,1998. 1~10.
- [8] 董连科 编著. 分形理论及其应用. 沈阳:辽宁科学技术出版社,1991. 64~210.
- [9] 辛厚文 主编. 分形理论及其应用. 合肥:中国科学技术大学出版社,1993. 1~456.
- [10] 冯长根,李后强,祖元刚,主编. 非线性科学的理论、方法和应用. 北京:科学出版社,1997. 1~198.
- [11] Falconer K J. 曾文曲,等译. 分形几何——数学基础及其应用. 沈阳:东北工学院出版社,1991.
- [12] Milne B T. Lessons from applying fractal methods to landscape patterns. In: Turner M G & Gardner R H Eds. *Quantitative methods in landscape ecology*. . New York: Springer-Verlag, 1991.
- [13] Frontier S. Application of fractal theory to ecology. In: Legendre P & L Eds. *Developments in Numerical Ecology*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1987.
- [14] Grassberger P and Procaccia I. On the characterization of strange attractors. *Physica*, 1983, 9D 349.
- [15] Hao B L. Elementary symbolic dynamics and chaos in dissipative systems. 1989, World Scientific.
- [16] 汪秉宏 编著. 非线性科学在地震预报中的应用, 北京:地震出版社, 1992.
- [17] Morse D R, Lawton J H, Dodson M M, *et al.* Fractal dimension of vegetation and the distribution of arthropod body lengths. *Nature*, 1985, 314: 731~734.
- [18] May R M. Simple mathematical models with very complicated dynamics. *Nature*, 1976, 261: 459~467.
- [19] May R M. Chaos and the dynamics of biological populations. *Proc. R. Soc. Lond.*, 1987, A413: 27~44.
- [20] 李后强,方 曙. 分形若干理论进展. 自然杂志, 1991, 14(4): 245~252.