水 生 生 物 学 报
ACTA HYDROBIOLOGICA SINICA

芦苇生长格局分形特征的初步研究*

蔡庆华　赵　斌　潘文斌
(中国科学院水生生物研究所　武汉　430072)

摘要　应用非线性科学中的分形几何理论，以黄淮海平原封丘试区的芦苇为例，研究芦苇生长格局的分形特征。计算表明，芦苇大小分布的分形维数在 0.6235—0.8761 之间。统计分析表明，其分布格局可明显地分为两个时期：在芦苇生长的初期，其大小分布较为均匀(分维 > 0.8)，而在芦苇生长的中后期(6 月底以后)，大小分布差异较大(分维 < 0.7)。

关键词　分形，格局，生长，芦苇，湿地生态系统

芦苇(*Phragmites communis* Trin) 在我国是一种重要的水生植物资源：一方面，它是非常重要的工业原材料，另一方面，它在沼泽和湖泊沿岸带等典型的湿地景观中有着独特的功能，不仅提供了许多生物生存和繁衍场所，对区域小气候亦有重要的影响。因此，研究芦苇生长的特征与格局，对于合理利用这一宝贵的自然资源以及保护湿地生态系统的生物多样性，均有十分重要的意义。

有关芦苇生长的研究，主要集中在季节生长动态[1—3]、不同生态类型芦苇的比较等[4—6]，未见有关生长格局的报道。本工作应用非线性科学中的分形几何理论[7,8]，以黄淮海平原封丘试区的芦苇为例，研究芦苇生长格局的分形特征，以期探讨定量芦苇生长的机理。

1　材料与方法

根据封丘试区的水体生物生长季节短的特点，选择 1990 年 5—9 月间对封丘试区最大的自然水体—曹岗湖的芦苇样方收割数据进行分析。

曹岗湖(114°E, 35°N)位于黄河北岸，封丘试区的东南部，是试区内一个较大的天然湖泊，南北长，东西窄。湖区地处暖温带大陆性季风型气候区，全年四季分明，春季干旱少雨，夏季炎热多雨，年平均气温 13.9℃。该湖由黄河决口冲刷而成，湖水常年不涸，水源通过渠道直接来自黄河。全湖底部平坦，水深平均为 1.5m。内涵及外源物质较为丰富，近年来大量投放草鱼，使湖泊从草型转向了藻型。湖四周多为农田和居民点，沿岸芦苇丛生，间杂部分湿生植物。在湖的北部芦苇成片面积较大的沿岸带布有若干样方，以监测芦苇生长的动态[1]。

---

* 中国科学院湖沼特别支持领域和国家自然科学基金资助(编号：39670150)。
1996-09-02收到；1997-12-29修回

研究芦苇的生长格局,主要有两种途径: 一是芦苇生长的季节动态格局,这已有许多报道(如上文所述); 一是芦苇大小的分布格局,此方面的工作尚无人涉足,但实际上,研究芦苇的大小分布,对合理利用其资源亦有重要意义。

有关芦苇大小分布格局的研究,经典的方法是作直方图,并在此基础上拟合分布曲线。但直方图的获得强烈地依赖于所划分的组数及相应的组距。组数少则组距大,而组数多则组距小。确定合适的组数和组距,取决于研究者的经验,故有一定的随意性。但一般而言,不同的组数和组距所刻划的直方图有一定的相似性,这就可以应用分形几何的概念来研究不同组数的直方图之间的关系,从而得出更为可信的结果。

分形(Fractal)一词来源于拉丁文 Fractus(破碎的)及英文 Fraction,是分形理论的创始人 Mandelbrot 于 1975 年首先使用的,一般系指复杂的不规则几何图形,如材料表面裂纹、海岸线、云彩等,对这些对象的描述,欧氏几何显然是无能为力的[7]。Mandelbrot 在研究"英国海岸线到底有多长"时发现,海岸线的总长度随测量尺度的减小而增加[8]。测量尺度的减小意味着被测对象的扩大,如同增加显微镜的放大倍数去观察同一个标本一样。海岸线在不同测量尺度下表现的弯曲反映了这一类不规则几何对象的共有特性,即在不同尺度层次上表现出某种自相似性(Self-similarity):局部放大与整体相似,形成一种无穷嵌套的自相似结构。具有这样特性的几何图形称为分形。分形几何的维数一般不再是整数,而是分数,称为分形维数(Fractal dimension),简称分维[7]。

计算分形体的维数即分维的基本方法是: 用边长为 S 的小盒子把分形体覆盖起来,数一数非空小盒子的总数,将其记为 N(S)。显然,N(S)会随尺度 S 的缩小不断增加,在双对数坐标中画出 lnN(S)随 ln(1 / S)的变化的回归直线,其斜率即为分维 D_0。这种分形维数也叫盒维数(Box-dimension),或 Hausdorff 维数,此外,尺度为 S 的小盒子有时包含了分形中的一个点,有时包含许多点,盒维数不能真正反映分形内部的不均匀性。如果将小盒子编号,并知道分形体落入第 i 个小盒子的概率为 P_i,根据 Shannon 信息熵的定义,用尺度为 S 的小盒子所测算的平均信息量为:

$$I = -\sum P_i \ln P_i$$

画出 I 随 ln(1 / S)变化的回归直线,其斜率即为分形体的信息维 D_1(又叫 Renyi 维数)。

数据处理采用自编和通用统计软件在 OCTEC PC486 / 66 微机上进行。

2 结果与讨论

曹岗湖芦苇的长度一般未超过 400cm, 为便于比较,取分析尺度为 S = 400cm。将 S 一半一半地不断平分下去,并分别计数落在每一段 S 内的样本数 N(S)及相应的信息熵 I(表 1)。在此基础上,可计算出芦苇生长格局的盒维数及信息维。表 2 列出了不同采样时期分维计算过程中的回归公式,其斜率 b 即为不同时期的分维。从表 2 可知,芦苇大小分布的分维在 0.6235—0.8761 之间。进一步对回归直线的平行性作统计检验,以判断不同采样时期芦苇分形维数之间的差异是否显著。表 3 和表 4 分别列出了不同时期盒维数及信息维间的检验结果,其中,下三角的数据为 t 值,上三角为差异不显著(即两条直线平行)时的公共斜率。

结果表明，不管是盒维数还是信息维，5 月份的两次采样的差异均不显著，6 月份及以后的三次采样亦不显著，而 5 月份与其后的差异相当显著。将差异不显著的数据视为同一组数据，分别计算其相应的分维，回归公式如下：

盒维数　5 月　$\ln N(S) = -0.2747 + 0.8410\ \ln(1/S)$　$r = 0.9875$　$p < 0.00001$

　　　　6 月及以后　$\ln N(S) = 0.4464 + 0.6634\ \ln(1/S)$　$r = 0.9824$　$p < 0.00001$

信息维　5 月　$I = -0.4845 + 0.8556\ \ln(1/S)$　$r = 0.9935$　$p < 0.00001$

　　　　6 月及以后　$I = 0.1992 + 0.6828\ \ln(1/S)$　$r = 0.9870$　$p < 0.00001$

这些结果说明，芦苇生长的分布格局可明显地分为两个时期：在芦苇生长的初期，其大小分别较为均匀(分维 > 0.8)，而在芦苇生长的中后期，大小分布差异较大(分维 < 0.7)。

将同年 9 月初在封丘试区采集到的香蒲(*Typha angustifolia* L.)数据作同样处理，回归公式为(见表 2 的最后一行)：

盒维数　$\ln N(S) = 0.2294 + 0.6160\ \ln(1/S)$　$r = 0.9735$　$p = 0.00001$

信息维　$I = -0.0079 + 0.6269\ \ln(1/S)$　$r = 0.9840$　$p < 0.00001$

与 9 月份芦苇的分维相比，不管是盒维数还是信息维，香蒲的分维均小于芦苇，但差异不显著(t 分别为 1.2910 和 1.7059)。

表1　计算芦苇生长格局的分维的基本参数

Tab.1　Basic parameters for estimating fractal dimension of growth pattern of reed.

1/s	区间 (cm)	采样时间 Sampling time (1990) 5月5日 N(S)	5月5日 −I	5月31日 N(S)	5月31日 −I	6月27日 N(S)	6月27日 −I	8月4日 N(S)	8月4日 −I	9月2日 N(S)	9月2日 −I	9月2日*) N(S)	9月2日*) −I
1	400	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
2	200	1	0	2	0.1164	2	0.6898	2	0.6927	2	0.6626	2	0.4512
4	100	2	0.6327	3	0.7525	3	1.0085	4	0.9529	4	0.8532	3	0.6768
8	50	3	1.0968	5	1.3970	6	1.4955	6	1.5340	6	1.4948	5	1.3013
16	25	6	1.7267	9	2.0233	11	2.1421	11	2.1917	10	2.0621	8	1.8305
32	12.5	12	2.3622	17	2.6777	21	2.7477	20	2.8106	18	2.6657	14	2.4292
64	6.25	23	3.0217	32	3.3316	31	3.2385	33	3.3668	32	3.2746	26	3.0406
128	3.125	44	3.6717	62	3.9704	43	3.6574	44	3.6646	55	3.7950	41	3.5034
256	1.563	73	4.1339	105	4.4743	58	3.9773	49	3.8133	73	4.1340	52	3.8140
512	0.781	98	4.4460	145	4.8198	64	4.0889	56	3.9925	81	4.2605	55	3.8984

*) 为开花植株的生长情况，表2—4同注。

表2　计算芦苇生长格局分维的回归公式

Tab.2　Regressions of estimating fractal dimension of growth pattern of reed.

	ln (N(S))=a+b ln(1/S) a	b	r	p	I=a+b ln(1/S) a	b	r	p
5月5日	−0.5579	0.8619	0.9971	<0.00001	−0.5508	0.8351	0.9976	<0.00001
5月31日	0.0086	0.8200	0.9978	<0.00001	−0.4181	0.8761	0.9979	<0.00001
6月27日	0.4053	0.6666	0.9826	<0.00001	0.2337	0.6714	0.9900	<0.00001
8月4日	0.5573	0.6235	0.9769	0.00001	0.2896	0.6544	0.9815	<0.00001
9月2日	0.3765	0.7000	0.9913	<0.00001	0.0741	0.7225	0.9872	<0.00001
9月2日*)	0.2943	0.6541	0.9889	<0.00001	−0.0740	0.6928	0.9898	<0.00001
蒲草	0.2294	0.6160	0.9735	<0.00001	−0.0079	0.6269	0.9840	<0.00001

表3　不同时期盒维数的比较(下三角为t值，上三角为公共维数)

Tab.3　Test of box-dimension between different sampling time (lower triangle shows t value, upper common dimension)

	5月5日	5月31日	6月27日	8月4日	9月2日	9月2日
5月5日		0.8410				
5月31日	1.2925					
6月27日	3.6319	2.9496		0.6450	0.6833	0.6603
8月4日	4.1680	3.5380	0.6146		0.6617	0.6388
9月2日	3.7627	2.9412	0.5638	1.2274		0.6770
9月2日*)	4.6533	3.9023	0.2077	0.4819	0.8991	

表 4　不同时期信息维的比较(下三角为 t 值，上三角为公共维数)

Tab. 4　Test of information-dimension between different sampling time (lower triangle shows t value, upper common dimension)

	5月5日	5月31日	6月27日	8月4日	9月2日	9月2日
5月5日		0.8556				
5月31日	1.3250					
6月27日	3.8647	4.8591		0.6629	0.6969	0.6821
8月4日	3.4090	4.1966	0.2819		0.6884	0.6736
9月2日	2.6654	3.6549	1.0002	1.1307		0.7077
9月2日*)	3.2592	4.2197	0.4106	0.6282	0.5683	

参　考　文　献

[1] 倪乐意，蔡庆华，黎道丰等．黄淮海平原封丘试区水生植被．湖泊科学，1995，7(4)：357—364

[2] 邵庆春，韩顺正．三江平原沼泽芦苇种群高度和地上生物量季节动态初步研究．见：陈宜瑜主编，中国湿地研究，长春：吉林科学技术出版社，1995，134—140

[3] 中国科学院长春地理研究所．中国沼泽研究．北京：科学出版社，1988

[4] 任东涛，张承烈．河西走廊不同生态类型芦苇可溶性蛋白质、总氨基酸和游离氨基酸分析．植物学报，1992，**34**(9)：698—704

[5] 任东涛，张承烈，陈国仓等，芦苇生态型划分指标的主分量及模糊聚类分析．生态学报，1994，14(3)：266—273

[6] 张承烈，陈国仓．河西走廊不同生态类型芦苇的气体交换特点的研究．生态学报，1991，**11**(3)：250—255

[7] Falconer K, J. Fractal geometry: Mathmetical foundations and applications. New York: John Wiley & sons. 1990

[8] Mandelbrot B. How long is the coast of Britain? Statistical self-similarity and fractional dimension. *Science*, 1967, **156**:636—638

PRELIMINARY STUDY ON FRACTAL CHARACTER OF GROWTH PATTERN OF REED

Cai Qinghua　Zhao Bin and Pan Wenbin

(*Institute of Hydrobiology The Chinese Academy of Sciences Wuhan* 430072)

Abstract　The researches about reed (***Phragmites communis***) growth were mainly concentrated on seasonal dynamics, investigation of large area resource, and comparison of different ecological forms of reed. The study on size distribution of reed, however, was scarcely reported. By means of fractal geometric theory of non-linear science, we studied the fractal character of growth pattern of reed, for the purpose of quantitatively exploring the mechanism of reed growth. The classical method of studying size distribution is to draw histogram and then to fit distribution curve. It is well known, however, that the obtained histogram is strongly depended on the number of class interval and its correspondent width. The determination of rational number and width of class interval is somewhat arbitrary, since it is gotten according to analyst's experience. In general, there are a certain similarity among histograms described at different class number of class interval and width somehow. It implies that we could use the fractal geometry to analyze the relationship among them, and reach more reliable conclusion.

The data we used in our analyses is from the monthly sampling in Caogang Lake (114° E, 35° N), an emergent macrophyte dominated lake in Fengqiu Experimental Area of the Huanghuaihai Plain, Henan Province, P. R. China. The way to calculate fractal dimension (FD) of reed growth is box-dimension (BD) and information dimension (ID). Because the longest reed occasionally exceeds 400 cm, for the reason of convenience, we define the largest scale $S = 400$ cm. Halving the scale S until it could recognize each individual reed ($S < 1$ cm), the relationship between different scale S and the number of samples fallen in each S and their correspondent entropy were calculated, respectively (cf. Tab. 1,2). The slope of each regression is the FD at different growth stages. In order to answer whether the difference between FD at any two different growth stages is significant, t-test was carried out to judge if the regressions are parallel. The common slope of two regressions, i.e., the common FD of reed at any two growth stages was therefore calculated while the functions are parallel (cf. Tab. 3 and 4). The results showed that the difference between two samplings in May and those among three samplings in June and later were not remarkable for both BD or ID. It was noted, however, that the difference between samplings in and after May is significant. It was demonstrated that the fractal dimension of size distribution of reed ranged from 0.6235 to 0.8761. The distribution pattern could be statistically divided as two significant periods: the size of reed is quite welldistributed at the beginning of reed growth (fractal dimension > 0.8), but is irregular in the middle and later growth season (fractal dimension < 0.7). These results are benefit to reach the goal of rational use of reed resources and to protect the biodiversity in wetland ecosystem.

Key words Fractal, Pattern, Growth, Reed, Wetland ecosystem