

水生植物叶片的分形特征研究

潘文斌^{1,2} 黎道丰¹ 唐 涛¹ 蔡庆华¹

(中国科学院水生生物研究所, 淡水生态与生物技术国家重点实验室, 武汉 430072;
福州大学环境与资源工程系, 福州 350002)

摘要:应用分形几何理论对保安湖部分水生植物叶的分形特征进行研究, 以寻找其中的自相似性特征, 计算其分形维数, 并力图了解各个分维的生态学含义。计算得到各物种分维平均值, 马来眼子菜为 1.441 (1.322–1.520, $sd=0.0547$), 菹草为 1.472 (1.381–1.565, $sd=0.0489$), 大茨藻为 1.325 (1.209–1.406, $sd=0.0470$), 轮叶黑藻为 1.103 (1.001–1.217, $sd=0.0456$)。按分维值排序, 菹草> 金鱼藻> 马来眼子菜> 茨藻> 黑藻。叶片分维的大小, 说明了不同种类水生植物叶片占据空间的程度和利用生态空间的能力有差异。通过对五种植物叶的空间格局的定量化描述, 更好地理解水生植物对水环境的适应机理, 为进一步对更大尺度下的水生植物空间格局研究提供基础信息。

关键词:水生植物; 构件; 分形特征

中图分类号: Q948.8 文献标识码: A 文章编号: 1000-3207(2004)01-0023-06

构件(Module)是由单一顶端分生组织, 由始至终生长发育形成的, 一个独立的, 具有与其相连的节、叶片和腋生分生组织的, 终止于一顶生花序的轴^[1-3]。高等植物是构件生物, 是由构件不断重复增加形成的, 具体地说, 植物是通过其构件—如叶、芽、枝、花、根等的反复形成实现其生长^[2]。

构件研究最初的对象主要是一些陆生植物。Prevost 首次报道了植物构件的研究工作, 但是直到 20 世纪 70 年代植物学家才对构件的概念引起重视。英国的著名生态学家 Harper 最早将其译作英文的“Module”^[4], 同时他将这个思想应用于植物种群统计学的研究中, 极大地推动了植物种群生态学的发展。近年来, 构件理论已被广泛接受并运用于植物种群生态学研究^[2,3,5,6]。关于植物构件格局的研究一般侧重于枝、叶、花、果、芽的大小、形状、角度及位置等空间分布几何特征方面^[7,8]。

在水生植物的形态结构上起着重要作用的构件是叶和枝^[9]。叶片是水生植物进行光合作用的主要

器官, 叶片的多少、叶面积的大小以及叶片的配置等空间结构特征直接影响着叶片的受光量、光照强度和光谱成分等, 进而决定着水生植物的光能利用效率。枝条的主要功能一是作为叶片的支撑体, 并决定着叶片的空间分布; 二是连接叶片与主茎, 并担负着它们之间的水分和营养物质的输送。

虽然水生植物不同等级构件的尺度、结构和空间复杂度存在差异, 但其形态结构具有自相似特征, 并形成一等级系列, 叶是这个等级系统的最小分辨尺度。水生植物分枝结构是具有自相似性的分形体。由于分形体不存在特征尺度, 即分维不依赖于尺度, 故可以用分维来刻画分形体各尺度上特征的共性, 揭示水生植物构件本质特征。

本文应用分形几何理论对部分水生植物叶的分形特征进行研究。目的是寻找其自相似性特征, 计算分形维数, 并力图了解各个分维的生态学含义, 同时完成对各个构件格局定量化描述, 更好地理解水生植物对水环境的适应机理, 为进一步对更大尺度下的水生植物空间格局研究提供基础信息。

收稿日期: 2003-05-23; 修订日期: 2003-09-30

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2002CB412310); 国家自然科学基金项目(30070153, 39670150); 中科院知识创新工程重要方向项目(KSCX2-SW-111); 中科院知识领域前沿项目(220208)和湖北省涝渍灾害与湿地农业重点实验室基金(HNKFJ2002A02)资助; 福州大学科技发展基金项目(XKJ(QD)-0134)

作者简介: 潘文斌(1973—), 男, 浙江临安人; 博士; 主要从事环境工程教学和科研工作, 研究方向为水生生物学、流域生态学与流域环境管理

通讯作者: 蔡庆华, E-mail: qhcai@ihb.ac.cn

1 研究地点概况与方法

1.1 采样地 保安湖(114°23'E, 30°15'N) 位于湖北黄石的大冶市西北, 为长江中游南岸的一个浅水草型湖泊^[10, 11]。它东接三山湖, 西隔梁子湖, 南邻保安镇, 北濒长江, 属于梁子湖湖群。湖表面积为39.3km², 由主体湖区(26.7km²)、桥墩湖(8.0km²)、扁担塘(3.3km²)和肖四海(1.3km²)等四个湖区组成, 平均水深为1.5—2.5m, 最大深度为3.7m, 常年水位17.5m(吴淞)。保安湖地处中亚热带, 水热条件比较丰富, 多年平均气温在16—17℃之间, 最热月(7月)平均温度29℃以上, 最冷月(1月)平均温度一般却超过3.5℃; 历年绝对最高气温为40.3℃, 最低气温为-10.8℃。多年平均降水量为1283mm。

1.2 取样方法 在野外采集一些水生植物的完整植株, 有生长良好的植株和生长不良的植株, 然后用照相的方法将得到其叶的格局图。

1.3 计算方法 在此采用的是栅格化法, 即将所得到的各个不同的构件, 用网格进行覆盖。首先在图上确定一个大的正方形边框, 正好可以将分形体包含在内, 然后将正方形四等分; 然后是在每个小正方形内进行4等分; 此后一直那么细分下去^[12]。这样就可以求得对应于不同正方形边长(尺度)下的非空正方形数目。文中所采用的栅格化法原理和上面是一样的, 但具体做法有点不同。首先将照片经扫描仪扫入后, 用PhotoStudio Windows(版本2.0)处理, 先转化成单色的BMP文件, 然后再转化为16色的BMP文件(512×512像素), 用自编的软件将16色的BMP文件转变为只有0和1的ASCII文件(每个像素上的数值为0或1), 然后用计盒维数软件计算图形的分维。上面的1表示在此像素上有图像, 0表示没有。也就是说这里的最小分辨率是像素。

计盒维数(Box counting dimension) 采用如下公式计算^[10, 11]:

$$D_b = - \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\ln N(\varepsilon)}{\ln \varepsilon}$$

其中ε是正方形的边长, N(ε)为对应于划分尺度ε的非空正方形数。

由于在软件划分图像的时候, 从2⁰到2⁹个像素, 共有十对数据(即在每一个尺度下有一个非空正方形数)。故用回归显著性的方差分析来对拟合结果进行检验时, 只要F值大于F_{0.01(1, 8)} = 11.26, 便认为双对数直线拟合具有极其显著的水平 and 较高的相关系数。

文中分形维数的推算(用软件计算), 虽然最小的分辨率是像素, 但也远未达到计盒维数公式中的ε→0的程度, 采用的是一种近似算法, 即在双对数的坐标下, 将尺度和非空正方形数目进行直线回归, 得到的拟合直线的斜率便是分维数值^[13-17]。因为自然界中并没有真正的分形体, 只是在一定的尺度下表现出分形体的性质^[14], 于是可将其近似地看成是分形体。以后的分形维数计算也是类似的处理。

2 结果

2.1 叶的分形特征

将几种水生植物的叶照相并进行上述方法的处理后, 即可比较不同水生植物种类叶片的分维。

下面以马来眼子菜(Potamogeton malaianus Miq.)为例子, 分析叶片的分维。马来眼子菜是多年生的水生植物, 叶片长椭圆形或椭圆状披针形, 膜质, 薄而透明, 褐绿色或暗绿色。从所有叶片分析的结果来看, 双对数拟合效果都非常好(F> 11.26), 这说明所有的叶都具有明显自相似性特征。计算得到马来眼子菜的叶分维值列于表1。

表 1 马来眼子菜的叶分维值、相关系数和 F 值
Tab. 1 Fractal dimension, correlation coefficient and F value of leaves of *P. malaianus*

马来眼子菜的叶 Leaves of <i>P. malaianus</i>	分维值 Fractal dimension	相关系数 Correlation coefficient	F
1	1.509	0.9950	692.22
2	1.459	0.9929	490.71
3	1.446	0.9922	442.47
4	1.395	0.9850	228.76
5	1.473	0.9952	724.01

续表			
马来眼子菜的叶 Leaves of <i>P. malaiamus</i>	分维值 Fractal dimension	相关系数 Correlation coefficient	F
6	1.520	0.9962	927.32
7	1.440	0.9922	443.22
8	1.461	0.9952	720.17
9	1.383	0.9843	217.47
10	1.413	0.9848	224.44
11	1.483	0.9927	475.99
12	1.392	0.9927	473.91
13	1.483	0.9955	770.61
14	1.322	0.9845	220.65

马来眼子菜的叶的分维值在 1.322—1.520 之间; 平均值是 1.441; 样本标准差为 0.0547; 变异系数 CV 为 3.796%。这说明了尽管从形态结构上看上述叶片有很大的差异, 但叶片分维的离散程度比较低, 分布变异程度也较小, 比较整齐。分维平均值为 1.441 表明马来眼子菜的叶的空间占有能力较强。

同样可计算出菹草 (*Potamogeton crispus* L.)、大茨藻 (*Najas marina* L.)、轮叶黑藻 (*Hydrilla verticillata* Royle.)、金鱼藻 (*Ceratophyllum oryzetorum* Kom.) 的叶的分维值(表 2)。从所有叶片分析的结果来看, 双对数拟合效果都非常好 ($F > 11.26$), 说明所有的叶都具有明显自相似性特征。

表 2 五种水生植物的叶分维值
Tab. 2 Fractal dimension of leaves of 5 macrophytes

	马来眼子菜 <i>Potamogeton malaiamus</i> Miq.	菹草 <i>Potamogeton crispus</i> L.	大茨藻 <i>Najas marina</i> L.	轮叶黑藻 <i>Hydrilla verticillata</i> Royle.	金鱼藻 <i>Ceratophyllum oryzetorum</i> Kom.
样本数 Sample Numbers	14	21	17	19	10
分维平均值 Mean of FD	1.441	1.472	1.325	1.103	1.442
分维范围 Range of FD	1.322—1.520	1.381—1.565	1.209—1.406	1.001—1.217	1.221—1.542
SD	0.0547	0.0489	0.0470	0.0456	0.0862
CV	3.796%	3.322%	3.547%	4.134%	5.978%
F	217.47—927.32	271.40—999.17	305.09—519.64	111.57—320.28	699.04—5164.65
Correlation coefficient	0.9843—0.9962	0.9873—0.9965	0.9887—0.9933	0.9700—0.9892	0.9950—0.9957

菹草叶宽披针形或线状披针形, 先端钝或尖锐, 有小锯齿, 基部近圆形或狭, 边缘浅波状褶皱, 有细锯齿。其分维值在 1.381—1.565 之间, 平均为 1.472, 样本标准差 0.0489, 变异系数 CV 为 3.322%。说明菹草叶的分维离散程度比较低, 分布变异程度也较小, 比较整齐。与马来眼子菜相比较, 菹草叶的分维平均值更高一点, 这说明其空间占有能力更强。

大茨藻叶对生, 挺坚, 线形至椭圆状线形, 顶端锐尖, 边缘每侧具 6—11 个粗齿。其叶分维值在

1.209—1.406 之间, 平均 1.325, 标准差 0.0470, 变异系数 CV 为 3.547%。其叶的分维离散程度较低, 分布变异程度较小, 比较整齐。从其分维平均值来看, 均小于马来眼子菜和菹草, 这表明其空间占有能力较弱。

轮叶黑藻的叶片轮生, 无柄, 膜质, 狭线形或线状长圆形, 全缘或具小锯齿。其叶的分维值在 1.001—1.217 之间, 平均 1.103, 标准差 0.0456, 变异系数 CV 为 4.134%。轮叶黑藻叶的分维离散程度

比较低, 分布变异程度也较小, 比较整齐。从其分维平均值来看, 与前三者相比, 它的分维平均值最小, 空间占有能力最弱。

金鱼藻的叶轮生, 裂片线形。其分维值在 1. 221—1. 542 之间, 平均为 1. 442, 标准差为 0. 0862, 变异系数 CV 为 5. 978%。与前面的几种水草相比, 金鱼藻的分维离散程度相对较高, 分布变异程度也较大。从其分维平均值来看, 与前四者相比, 它的分维平均值较大, 表明其空间占有能力较强。

3 讨论

为了比较不同种类水生植物之间的叶空间格局

间的差异, 用独立自变量间的 t 检验来达到上述目的。主要的结果列于表 3。可以看出, 就叶而言, 只有菹草、金鱼藻和马来眼子菜之间的差异最不明显, 原因可能是由于马来眼子菜和菹草是同属于眼子菜科, 均为多年生草本; 而金鱼藻的叶则具有与前两者近似的占据空间能力。上述几种植物叶的平均分维值的序列是: 菹草> 金鱼藻> 马来眼子菜> 大茨藻> 轮叶黑藻。

从空间格局研究角度看, 个体可以被区分的亚成分有: 部分或全部挺水的叶片; 浮水叶; 沉水叶; 直立茎、叶梗和花梗; 繁殖结构, 如花序、花和果; 地下部分, 如根和根状茎。水生植物构件—叶和枝形成

表 3 五种水生植物叶格局的分维值的 t 检验
Tab. 3 The t test for fractal dimension of 5 macrophytes' leaves

t test 分组 Group	A verage Group 1	Average Group 2	t value	df	p	Std. Dev. Group 1	Std. Dev. Group 2
菹草 vs. 大茨藻 <i>P. crispus</i> vs <i>N. marina</i>	1. 472	1. 325	9. 379	36	0. 0000	0. 0489	0. 0470
菹草 vs. 马来眼子菜 <i>P. crispus</i> vs <i>P. malaianus</i>	1. 472	1. 441	1. 737	33	0. 0918	0. 0489	0. 0547
菹草 vs. 轮叶黑藻 <i>P. crispus</i> vs <i>H. verticillata</i>	1. 472	1. 103	24. 611	38	0. 0000	0. 0489	0. 0456
大茨藻 vs. 轮叶黑藻 <i>N. marina</i> vs <i>H. verticillata</i>	1. 325	1. 103	14. 379	34	0. 0000	0. 0470	0. 0456
马来眼子菜 vs. 大茨藻 <i>P. malaianus</i> vs. <i>N. marina</i>	1. 441	1. 325	6. 373	29	0. 0000	0. 0547	0. 0470
马来眼子菜 vs. 轮叶黑藻 <i>P. malaianus</i> vs. <i>H. verticillata</i>	1. 441	1. 103	19. 365	31	0. 0000	0. 0547	0. 0456
金鱼藻 vs. 大茨藻 <i>C. oryzetorum</i> vs. <i>N. marina</i>	1. 442	1. 325	4. 6042	25	0. 0001	0. 0862	0. 0470
金鱼藻 vs. 轮叶黑藻 <i>C. oryzetorum</i> vs. <i>H. verticillata</i>	1. 442	1. 103	13. 961	27	0. 0000	0. 0862	0. 0547
金鱼藻 vs. 马来眼子菜 <i>C. oryzetorum</i> vs. <i>P. malaianus</i>	1. 442	1. 441	. 0293	22	0. 9769	0. 0862	0. 0547
金鱼藻 vs. 菹草 <i>C. oryzetorum</i> vs. <i>P. crispus</i>	1. 442	1. 472	1. 2323	29	0. 2277	0. 0862	0. 0489

分枝格局, 然后在更高的层次上形成草冠(Macrophyte canopy)。草冠在水生植物个体的空间构型中是很重要的一个部分, 它不仅影响草冠周围的一些环境因子(如光照), 还影响着水体的水文学特征^[18]。草冠又作为个体生长发育的结构基础, 决定了种群的分布格局。因而叶片格局是深入研究水生植被空间分布格局的基础和起点, 是植被格局研究的最小尺度。这些被分化的亚成分, 形成了许多的

微生境, 也就是提供了尽可能多的生境多样性。
分形维数反映出上述不同层次构件和个体的空间占有程度和利用生态空间的能力, 其中的生态学意义在于刻画出各个构件的光能利用率以及对其他环境资源的利用能力。它不仅对于研究水生植物本身的生长十分有意义, 而且对于其他的一些生态学问题的研究也可能会有积极的意义。例如上述构件(亚成分)形成了许多的微生境(空间格局), 这些微

生境和附生生物之间的关系到底是怎么样的, 也就是说这些微生境是如何支撑着附生生物的多样性。运用分维对亚成分的空间格局定量以后, 就为这方面的工作提供了新的思路和方法。

参考文献:

- [1] Chang J, Chen G, Ge Y. Fractal character and simulation of plant structure[M]. Hangzhou: Hangzhou University Press, 1995. [常杰, 陈刚, 葛滢, 1995. 植物结构的分形特征及模拟. 杭州: 杭州大学出版社, 1995]
- [2] Li Y X, Liu Y C, Zhong Z C. Modular theory in plant population ecology[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 1995, **14**(6): 35—41. [黎云祥, 刘玉成, 钟章成. 植物种群生态学中的构件理论. 生态学杂志, 1995, **14**(6): 35—41]
- [3] Hölle F R, Oldeman A A, Tomlinson P B. Tropical trees and forests: An architecture analysis[M]. New York: Springer Verlag, 1978
- [4] Harper J L, White J. The demography of plants [J]. *Ann. Rev. Ecol. Syst.*, 1974, **5**: 419—463
- [5] Jones M, Harper J L. The influence of neighbours on the growth of trees I. The demography of buds in *Betula pendula* [J]. *Proceedings of the Royal Society of London, B*, 1987, **232**: 1—18
- [6] Maillette L. Seasonal model of modular growth in plants [J]. *Journal of Ecology* 1992, **80**: 123—130
- [7] Dibble E D, Kilgore K J. Measurement of Plant Architecture in Aquatic Plants [J]. *Journal of Freshwater Ecology*, 1996, **11**: 311—318
- [8] Molenaar H, Bartlémy D, de Reffye P, *et al.* Modelling architecture and growth patterns of *Posidonia oceanica* [J]. *Aquatic Botany*, 2000, **66**: 85—99
- [9] Li W and Zhong Y. Theories and methods of the study of aquatic vegetation [M]. Wuhan: Huazhong Normal University Press, 1992. [李伟, 钟扬. 水生植被研究的理论与方法. 武汉: 华中师范大学出版社, 1992]
- [10] Pan W B and Cai Q H. Studies on macrophytes community pattern in a bay of Baoan Lake, Hubei [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2000a, **24**(5): 412—417. [潘文斌, 蔡庆华. 保安湖—湖湾大型水生植物群落格局的研究. 水生生物学报, 2000a, **24**(5): 412—417]
- [11] Pan W B and Cai Q H. Preliminary studies on fractal character of horizontal pattern of *Ass. Nymphaeaceae* in Baoan Lake [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2000b, **24**(5): 405—411. [潘文斌, 蔡庆华. 保安湖莲群丛分布格局分形特征的初步研究. 水生生物学报, 2000b, **24**(5): 405—411]
- [12] Morse D R, Lawton J H, Dodson M M, *et al.*, Fractal dimension of vegetation and the distribution of arthropod body lengths [J]. *Nature*, 1985, **314**: 731—733
- [13] Mandelbrot B B. The Fractal Geometry of Nature [M]. San Francisco: W. H. Freeman, 1983
- [14] Falconer K. Fractal geometry: Mathematical foundations and applications [M]. New York: Wiley, 1990
- [15] Cai Q H and Wu G. Growth pattern of reed in Caogang Lake, Huanghuaihai Plain, China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 1999, **11**(1): 100—105
- [16] Huang Z L, Chang J B. Fractal characteristics of length weight relationship in fish [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 1999, **23**(4): 330—336. [黄真理, 常剑波. 鱼类体长与体重关系中的分形特征. 水生生物学报, 1999, **23**(4): 330—336]
- [17] Cai Q H, Zhao B. and Pan W B. Preliminary study on fractal character of growth pattern of reed [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 1998, **22**(2): 123—127. [蔡庆华, 赵斌, 潘文斌. 芦苇生长格局分形特征的初步研究. 水生生物学报, 1998, **22**(2): 123—127]
- [18] Sand-Jensen K. Influence of submerged macrophytes on sediment composition and near-bed flow in lowland streams [J]. *Freshwater biology*, 1998, **39**: 663—679

STUDIES ON FRACTAL CHARACTER OF MACROPHYTES' LEAVES

PAN Wei-Bin^{1,2}, LI Dao-Feng¹, TANG Tao¹ and CAI Qing-Hua¹

(State Key Laboratory for Freshwater Ecology and Biotechnology, Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072;
Environment and Resources Engineering Department, Fuzhou University, Fuzhou 350002)

Abstract: The issue applied the fractal theory to study the character of dominant macrophytes' leaves in Baoan Lake of Hubei Province. The leaves are the most representative modules, and many scientists study the morphology of them. The leaves of macrophytes are the main organs that participate the photosynthesis in the water. The leaf numbers, the leaf surface and spatial pattern of them directly influence the illumination intensity and spectrum component, which affects the plant's utilization efficiency of light. By introducing the Box-counting dimension (self-made software), one method the fractal theory provided, the scanned photos of leaves were treated. The fractal dimension (FD) of *Potamogeton malaianus* leaves was between 1.322 and 1.520, with an average of 1.441, and a standard deviation of 0.0547. The FD of *Potamogeton crispus* leaves was between 1.381 and 1.565, with an average of 1.472, and a standard deviation of 0.0489. The FD of *Najas marina* leaves was between 1.209 and 1.406, with an average of 1.325, and a standard deviation of 0.0547. The FD of *Hydrilla verticillata* leaves was between 1.001 and 1.217, with an average of 1.103, and a standard deviation of 0.0456. The FD of *Ceratophyllum oryzetorum* leaves was between 1.221 and 1.542, with an average of 1.442, and a standard deviation of 0.0862. By compared with the morphological differences among their leaves, we can well realize the ecological meanings of the fractal dimensions (FD) calculated. The sequence of average FD of leaves was: *Potamogeton crispus* > *Ceratophyllum oryzetorum* > *Potamogeton malaianus* > *Najas marina* > *Hydrilla verticillata*, which indicated the difference in the ability of spatial occupying and utilizing among different species' leaves. The t-test for fractal dimension of 5 macrophytes' leaves showed that there are no significant differences between *Potamogeton crispus*, *Ceratophyllum oryzetorum* and *Potamogeton malaianus*, which could be caused by the reason *Potamogeton crispus* and *Potamogeton malaianus* belonging to *Potamogetonaceae*. The t-test also showed that the leaves of *Ceratophyllum oryzetorum* have a spatial pattern more similar to them. The work well describes the morphology of different species' leaves in quantity. It will benefit realization of the macrophytes' adaption to water body, and provide the basic information for our further study on the macrophytes pattern at large scale.

Key words: Macrophytes, Leaf, Module, Fractal character