

## 分形理论对水生态系统空间格局研究初探

赵 斌 蔡庆华

(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)

**摘要:**首先对分形理论在生态学中的应用情况作了简要介绍,然后应用它对梅子垭水库的藻类叶绿素 a 浓度场水平 2 维空间格局进行了分析,通过对不同时间各浓度轮廓线的空间占据能力进行比较分析,确定了各浓度的稳定程度。可由此说明浮游植物的变化情况和生长潜力。

**关键词:**分形理论;梅子垭水库;叶绿素 a

**中图分类号:** Q178.1    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1000-3207(2000)05-0474-07

20 世纪 90 年代以来,生态学研究的重点已从面向结构、功能和生物生产力转变到面向过程、格局和尺度相关性。随着生态学家们越来越认识到“在一个尺度上所得到的结果,在应用于另一个尺度上时,尽管做得十分小心,也是不合适的(甚至可能是错误的)”<sup>[1]</sup>,1992 年,英国生态学会和美国湖沼海洋学会联合举办的第 34 届学术研讨会即提出要研究格局-过程关系怎样由尺度调整。

分形理论的主要研究内容是某一测度指标随尺度变化的自相似性规律,其主要工具为分数维数,自相似性和分形维数是分形理论研究的主要内容。业已证明自然界中的很多物体具有分形的特征,能够用分形理论来描述<sup>[2]</sup>。在生态学研究中存在很多现象是欧氏几何无能为力的,而适于应用分形理论进行描述。近年来,分形理论在生态格局的研究中已经得到了较为广泛的应用<sup>[3-8]</sup>,特别是在森林生态学的研究中取得了一些较深入而系统的研究成果<sup>[9]</sup>。

就淡水生态而言,由于具有相对明确和稳定的边界,其研究“一直作为生态学思考和管理实践的领导者而十分自豪”<sup>[10]</sup>,但由于淡水系统的相对不连续性(作为陆地海洋的生境岛屿,它们往往在空间上断裂,在功能上相互隔离),也由于相对于陆地系统它们多了一个水的介质和具有较短的生命周期,淡水生态格局一般不易被描述。国内有关分形理论在水生态学中的应用报道极少<sup>[11]</sup>,国外相关的研究也多注重于腐殖质、景观和环境数据、废水处理过程以及生物聚合物等方面,而对水生态系统中生态因子的研究仍属空白。本研究拟从这方面入手,探索水环境中的分形规律,这一方面将验证自然界分形规律的普遍性,另一方面又为水体系统的研究提供了新的定量方法。作为一个初步探索,

收稿日期:1999-10-15;修订日期:2000-05-30

基金项目:国家自然科学基金项目(39670150);国家“九五”科技攻关专题(96-920-04-12)

作者简介:赵斌(1969—),男,湖北钟祥人,主要从事淡水生态学研究 and 网络信息系统的开发工作

本研究选择水体中较具代表性的藻类叶绿素 a 作为研究对象,通过对空间格局的分形测度的考察来提取它们的尺度相关性(或与之相反的尺度独立性)。

## 1 研究地点概况

梅子垭水库( $30^{\circ}39'N, 111^{\circ}31'E$ )位于三峡库区移民安置示范区的湖北省宜昌县梅子垭村。全区以低山丘陵为主,海拔 70—200m,属于鄂西山地向江汉平原的过渡地带,具有较典型的低山丘陵地貌。区内年平均日照时数为 1669.3h,年降雨量为 1100—1300mm,年无霜期 278.2d,年平均气温  $16.9^{\circ}C$ ,一月份平均气温为  $4^{\circ}C$ ,七月份平均气温为  $28^{\circ}C$ ,是典型的三峡冬暖区,属亚热带季风气候。区内土壤主要有砂页岩发育的黄棕壤和石灰岩发育的钙质土。植被覆盖率为 11%,盛产柑桔。据宜昌县 1987 年森林资源二类调查资料,该区林业用地总面积为  $580\text{hm}^2$ ,有林地 110 $\text{hm}^2$ ,其中用材林 90 $\text{hm}^2$ ,占有林地的 81%,经济林 21 $\text{hm}^2$ ,占有林地的 19%。区内水域面积占总面积的 11%,是发展渔业理想基地;现有面积约 30 $\text{hm}^2$  的梅子垭水库是宜昌市、县的重要饮用水源地。

## 2 研究方法

为了便于比较不同时期的水体理化因子的变化情况,在 1997 年的 5,6,7 三个月进行。由于受降雨的影响,这三个月中梅子垭水库水位变化比较明显,相应水体的水化学指标也有较为明显的变化。将梅子垭水库以网格的形式均匀划分设定采样点,在某些特定水域根据实际情况增设或减少,最后共设定了 43 个采样点(图 1)。

数据获得分两个方面:野外测定和室内试验。野外采样中同时测定和记录水体的理化参数。测定藻类叶绿素 a 的水样在采样后不超过 4h 内抽滤,并溶解在提取液中,并在 24h 内完成测定。

采样点采用 GPS 与目测相结合的方法进行定位。三次采样分析的指标和位点均保持一致。

## 3 分形分析方法与步骤

**3.1** 将野外和实验室的各项测定数据汇总,输入计算机,并按照 Surfer 软件的要求转化成相应的数据格式(包括采样点的坐标 X, Y 和测定值,为了便于计算和分析,以下的计算中并没有采用大地的经纬度坐标,而是采用的一个相对坐标)。

**3.2** 用等值线绘制软件(Surfer for Windows, 5.01 版)计算分析并生成具有水体边界的

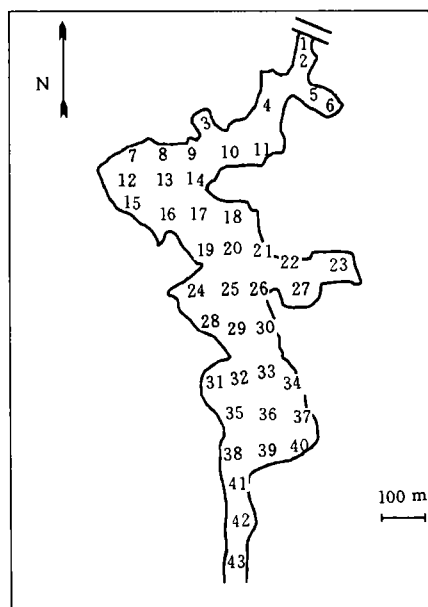


图 1 梅子垭水库采样点示意图

Fig. 1 Distribution of sampling stations in Meiziya Reservoir

各项指标浓度线轮廓图形,并输出为 .WMF 图形文件,它是一种矢量图形文件,为了便于分析,需要转化为位图格式的文件。

3.3 提取特征浓度轮廓图块并转化成 16 色位图 BMP 文件。

3.4 将位图文件转化成 0—1 数据矩阵文件 ASC(采用自编的 BMP2ASC 程序);计算各指标不同浓度轮廓图块的计盒维数(采用自编的 BCD for WIN95 软件)。

4 结果分析

对于各指标在三个不同时间的数据根据其相应的浓度范围划分成不同的浓度区间进行分析。例如叶绿素 a,对 5 月份采样所分析的浓度范围为 0—20.8 $\mu\text{g/L}$ ;6 月份的浓度范围为 0—17.7 $\mu\text{g/L}$ ;7 月份的采样结果仅为 0—3.39 $\mu\text{g/L}$ ,但在分形维数分析中,以相同的梯度间隔划分浓度范围进行计算比较。需要说明的是:以上的浓度范围只是实地采样所得到的值,并不是浓度场分析的范围,因为等值线分析其实是一个统计分析过程,在具有统计学意义的基础上进行了外推,因而等值线的浓度范围一般比上述范围要宽。

4.1 生态因子场的自相似性

生态因子场是否具有自相似性特征?表 1 所示的是叶绿素 a 不同浓度轮廓线的计盒维数。从 F 值来看,除了 1997 年 7 月份  $[\text{Chla}] = 4\mu\text{g/L}$  时不能满足  $F > F(1,8) = 11.26$  外,其他浓度均能保证双对数直线拟合的极显著水平( $\alpha = 0.01$ )和极高的相关系数,说明浓度轮廓线自相似性特征比较明显,比较典型。在以下各种不同指标的分析中,计盒维数仅选用具极显著水平( $\alpha = 0.01$ )浓度轮廓线,也就是具有自相似性结构的轮廓线。

表 1 叶绿素 a 不同浓度轮廓线的计盒维数( $\alpha = 0.01, F(1,8) = 11.26$ )  
Tab.1 Box-counting dimension of various concentration contour of Chl a

	Chl a( $\mu\text{g/L}$ )	Box-counting dimension D	r	F
May, 1997	1	1.678	0.9983	2011
	2	1.671	0.9981	1874
	3	1.659	0.9979	1686
	4	1.610	0.9975	1422
	5	1.569	0.9960	872
	6	1.552	0.9949	679
	7	1.565	0.9968	1073
	8	1.507	0.9962	915
	9	1.453	0.9946	647
	10	1.373	0.9929	491
	11	1.357	0.9894	325
	12	1.274	0.9845	220
	13	1.213	0.9760	141
	14	1.216	0.9708	115
	15	1.197	0.9653	96
	16	1.312	0.9788	160
	17	1.319	0.9672	102

续表

	Chl a( $\mu\text{g/L}$ )	Box - counting dimension D	r	F
	18	1.257	0.9672	102
	19	1.200	0.9651	95
	20	1.122	0.9624	88
June, 1977	1	1.701	0.9986	2425
	2	1.699	0.9986	2466
	3	1.688	0.9986	2552
	4	1.655	0.9982	1940
	5	1.654	0.9981	1826
	6	1.621	0.9980	1788
	7	1.488	0.9965	993
	8	1.390	0.9926	470
	9	1.270	0.9888	308
	10	1.306	0.9906	368
	11	1.211	0.9887	306
	12	1.125	0.9842	216
	13	0.976	0.9781	155
	14	0.981	0.9612	85
	15	0.920	0.9311	46
	16	0.754	0.9275	43
	17	0.438	0.8895	27
July, 1997	1	1.680	0.9982	1980
	2	1.464	0.9952	726
	3	1.090	0.9698	111
	4	0.183	0.7100	7

4.2 分维的含义

分形维数是分形理论的主要工具,它包含相应研究对象几何性质的许多信息。分形理论的目的就是通过尺度与某一测度参量的关系,寻找其自相似性规律,最终的结果就是分形维数,它是对物体独立于尺度的共性特征的表征。不同的研究对象分形维数具有不同的生态学含义。

景观生态学中对斑块结构动态的研究发现,如果限制边界具有一个固定的分形维数,当一个斑块在其中扩散时,只有当二者的边界维数相等时才达到稳定状态<sup>[6]</sup>。斑块最初的扩散未受到限制边界的影响,其边界近似圆形,分形维数为 1;当其扩散至限制边界时,边界维数增大而接近限制边界维数;最后扩散稳定时,斑块的边界与限制边界的褶皱程度相同,具有相同的分形维数。淡水生态系统就存在这样一个限制边界(河岸),其中的生态因子场就是斑块结构,可见淡水生态系统的生态学过程采用斑块在不同时期的边界维数来量化表征是很适宜的。

在一定条件下,每一个物体所在空间都有一个固定不变的维数,它反映了该物体的空间占据程度,这是维数的本质内涵。文中所考虑的生态因子场均是在一个平面内进行的,

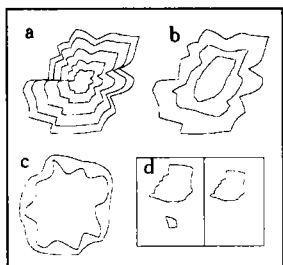


图2 几种不同图形的分维数比较  
Fig.2 Comparison of Box-counting dimension of several patterns

a. 外缘轮廓线的分维值等于内部轮廓线;  
b. 外缘轮廓线的分维值大于内部轮廓线;  
c. 外缘轮廓线的分维值小于内部轮廓线;  
d. 轮廓线的破碎化导致分维值降低

a. Outer fractal dimension is equal to inner fractal dimension;  
b. Outer fractal dimension is greater than inner fractal dimension;  
c. Outer fractal dimension is less than inner fractal dimension;  
d. Fragmentation reduce fractal dimension of contour.

而且还因为水体边界的限制,生态因子场的维数总是小于2的;另一方面,如果某一生态因子场的边界是一个规则的圆,它的维数将为1。但在自然条件下,生态因子场的边界总是形成近似的圆,其维数大于1,所以实际的分维应当介于1和2之间。当然在实际的分维计算中,有时可能得到的分数维低于相应的拓扑维数,比如在本研究中,如果分维小于1,这在物理上是不可能成立的,它说明了分形模型在此处是不合适的,一般是多种物质的交界处,所以在下面的分析中,计盒维数小于1的情况一般不作考虑。

空间维数反映的是物体占据空间的程度,可以将其理解为某一测度指标(如长度、面积或体积)在不同尺度上符合的一种共性的规律。对于所考虑的生态因子场来讲,其分形维数反映出空间结构在不同尺度上对空间占据的变化规律。当尺度由大至小变化时,如果发现越来越多的细节,那么该结构的尺度依赖效应较强,结构复杂,则分维数值较高,占据空间的能力强。反之,则说明空间占据能力低,即空间异质性强。

如果比较相邻生态因子浓度场分维的大小,能说明什么问题?以图2为例,设定外沿曲线为低浓度场轮廓线,内部曲线为高浓度场轮廓线。a类形状的轮廓线,虽然图形的大小不同,但形状相似,分维也相近,空间占据潜力相同,各浓度场分布比较均衡,浓度变化比较均匀,是一种相对稳定的

浓度场分布状态;b类形状的轮廓线中,外沿的轮廓线的不规则程度大于内部,相应其分维值也是外沿轮廓线大于内部,这种类型的轮廓线比较多见,内部轮廓线空间占据能力弱,向外扩散的能力不大,是一种非常稳定的浓度场分布状态。由于外沿浓度空间占据能力强,在一定的条件下,外沿浓度可能会“吞噬”内部浓度而消除浓度差异,变成更加稳定的空间分布状态;c类形状的轮廓线,内部轮廓线的不规则程度大于外沿,分维值也相应较高,内部的空间占据能力反而大于外沿,存在向外扩散的潜力,是一种不稳定的浓度场分布状态;d类形状的轮廓线,较低浓度的轮廓线有某种程度的破碎化,而在较高浓度,破碎化消失,仅存在一个独立的轮廓线,这种情况也可能导致高浓度场轮廓线的分维大于低浓度场轮廓线,这种因轮廓线破碎化而导致的分维值的降低不能说明其空间占据能力的下降。因此在对分维结果分析的时候应当注意以上的不同点而分别进行考察,不仅只比较相邻轮廓线的差异,还要同前后数个轮廓线进行比较。

### 4.3 叶绿素a浓度场的空间占据能力分析

在对浮游植物叶绿素a的轮廓线计算中,高浓度是被包含在低浓度之内的,即浓度为 $10\mu\text{g/L}$ 的浓度场实际上是包含了所有浓度大于 $10\mu\text{g/L}$ 的浓度范围的。一般情况下,随着浓度的增加,浓度场的空间占据范围相应减少,似乎分维应当逐渐减小。但叶绿素a的实际情况并非如此:从图3可以看出,5月份在 $[\text{Chl a}] = 6\mu\text{g/L}$ 和 $[\text{Chl a}] = 15\mu\text{g/L}$ 处,6

月份在 $[\text{Chl a}] = 9\mu\text{g/L}$ 处分别出现了反弹,即高浓度场的分维值大于低浓度场分维值的情况。如果分别考察出现反弹附近的两个浓度,从前面的分析中可以发现出现这种情况一般有两种可能:1. 较高浓度场形状更加复杂,具有更大的空间占有潜力,是一不稳定浓度场,它有可能扩散而占据更大的空间范围;2. 较低的浓度场形状比较破碎化,即分成了数个相

互不连结的独立的块,而高浓度场中消失了一些块,浓度场的聚集度相应提高,维数增加。另外5月份从浓度0到 $6\mu\text{g/L}$ 之间分维没有较大的下降,这说明在 $<6\mu\text{g/L}$ 的浓度范围内,各浓度场具有几乎相同的空间占据能力,在空间竞争上几乎持平,是相对稳定的浓度范围。同样6月份的叶绿素a浓度0到 $5\mu\text{g/L}$ 也是相对稳定的浓度范围。

如果将叶绿素a浓度看成是浮游植物数量多少的一个度量指标,则从上述结果可以看出,浮游植物在水体中的分布格局是符合分形规律的,在一定的浓度范围内可保持稳定的生长,稳定地占据一定的生长空间。比如上述例子中,不管是5月份还是6月份,在 $<5\mu\text{g/L}$ 的范围中都非常稳定,而在较高浓度中相继出现不同程度的波动,表现出对空间占有的不稳定性;而7月份由于受降雨的影响,叶绿素a的浓度下降幅度很大,采样所测定的最高浓度不足 $4\mu\text{g/L}$ ,浮游植物处于生长的恢复阶段。很明显,7月份叶绿素a并不存在一个相对稳定的浓度段,从 $1.0\text{--}3.0\mu\text{g/L}$ 均匀下降,高浓度的叶绿素(生长旺盛的浮游植物)并不存在较具竞争力的空间占有能力,相应可以理解为此时浮游植物生长缓慢。虽然在 $[\text{Chl a}] = 3.2\mu\text{g/L}$ 处出现了一个反弹,但此时因其维数太小( $D(3.4) = 1.03$ ),已经不属于具有较强空间占据优势的范围了。

从以上分析可以看出,降雨不仅在数量上,而且在空间分布格局上都对梅子垭水库的藻类叶绿素a产生了影响:由于雨水的进入,稀释了水体中的藻类叶绿素a,使得叶绿素的浓度下降;同时由于雨水的进入,改变了藻类原来的生存环境,在新的环境下,藻类生长需要一个适应过程,此时其生长速度缓慢。

所以,通过对叶绿素a浓度场的空间占据能力的分析可以看出:利用分形维数可以反映某一考察指标不同浓度的空间占据潜力,同时通过比较不同浓度下其浓度场的分维可以发现哪些浓度具有更大的扩散潜力,哪些浓度相对稳定。

通过以上应用分形理论对梅子垭水库藻类叶绿素a不同时期各浓度场分布格局的研究,可以归纳得到如下的结论:

生态因子场是一种分形结构,它存在自相似性,其空间维数为分数,具有空间竞争优势的分维介于 $1.3\text{--}1.7$ 之间。生态因子场自相似性的存在,使得作者寻找其结构复杂性背后的共同特性,脱离了尺度的束缚,可采用分形维数对其结构实现准确的定量化描

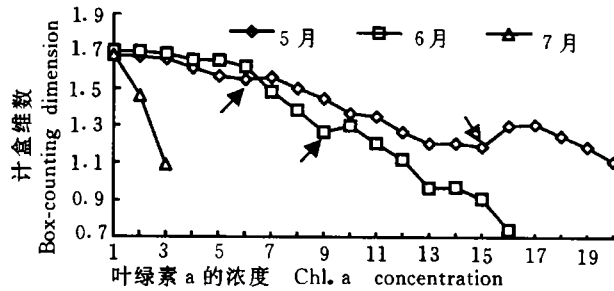


图3 1997年5—7月份叶绿素a不同浓度轮廓线的计盒维数  
Fig.3 Box-counting dimension of various concentration contour of Chla of Meiziya Reservoir from May to July in 1997

述。生态因子场的分形维数反映出其结构的复杂性程度和占据空间、利用空间的能力。通过相邻浓度场分形维数的比较,可以从结构的角度了解哪些浓度是稳定存在的,哪些浓度具有较强的扩散潜力,进而为更大尺度空间格局的研究奠定基础。

降雨对上述讨论的生态因子不仅在数量上,而且在空间分布格局上均有一定的影响。藻类叶绿素 a,降雨后浓度下降,空间占据能力降低,藻类的生长速度变得缓慢。

### 参考文献:

- [1] Fisher S G. Pattern, process and scale in freshwater systems: some unifying thoughts [C]. In ed. by Giller PS *et al.* Aquatic Ecology: scale, pattern and process. Blackwell Science Ltd. 1994, 575—592
- [2] Mandelbrot B B. The fractal geometry of nature [M]. W. H. Freeman. 1982
- [3] Morse DJ *et al.* Fractal dimension of vegetation and the distribution of arthropod body lengths [J]. *Nature*, 1985, **314**:731—733
- [4] Krummel J R *et al.* Landscape patterns in disturbed environment [J]. *Oikos*, 1987, **48**:321—324
- [5] Palmer M V. Fractal geometry: a tool for describing spatial pattern [J]. *Vegatation*, 1988, **75**:91—102
- [6] Milne B T. Measuring the fractal geometry of landscapes [J]. *Appl. Math. and Comp.*, 1988, **27**:67—79
- [7] 张喜军,等. 东北羊草草原主要环境因子的分形分析[C]. 辛厚文. 分形理论及其应用[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社,1993. 252—257
- [8] 马克明,等. 东北羊草草原群落格局的分数维(Fractal)理论研究[C]. 辛厚文. 分形理论及其应用. 合肥. 中国科学技术大学出版社,1993. 258—264
- [9] 祖元刚,等. 分形理论与生态学[A]. 李博. 现代生态学讲座[M]. 北京. 科学出版社,1995. 65—72
- [10] Harris G P. Pattern, process and prediction in aquatic ecology—a limnological view of some general ecological problems [J]. *Freshwater Biology*, 1994, **32**:143—160
- [11] 蔡庆华等. 芦苇生长格局分形特征的初步研究[J]. 水生生物学报, 1998, **22**(2):123—127

## PRELIMINARY STUDY ON FRACTAL CHARACTER OF SPATIAL PATTERN IN FRESHWATER ECOSYSTEM

ZHAO Bin and CAI Qing-hua

(*Institute of Hydrobiology, The Chinese Academy of Sciences; State Key Laboratory of Freshwater Ecology and Biotechnology, Wuhan 430072*)

**Abstract:** The development of fractal theory and its application in ecology is reviewed in the paper, following with the analysis of horizontal two-dimension spatial pattern of concentration field of algae chlorophyll-a in Meiziya Reservoir. *Thro After* the comparison and analysis of spstaial occupancy potential of various concentration contours in different time, The authors determine that the concentration is of steady presence which can decide phytoplankton's growth and change potential.

**Key words:** Fractal theory; Meiziya Reservoir; Chlorophyll-a