

分形模型在生态学研究中的应用

常学礼

邬建国

Q141

(中国科学院兰州沙漠研究所, 730000)(美国亚利桑那州立大学生命科学系)

Fractal Models and Their Ecological Applications. Chang Xueli (*Institute of Desert Research, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000*), Wu Jianguo (*Arizona State University West, Phoenix, USA*). *Chinese Journal of Ecology*, 1996, 15(3), 35~42.

As an effective tool in describing and explaining the spatial complexity of objects and their patterns in nature, fractal models recently have received increasing attention. Especially in studies of patchiness and landscape ecology, fractal analysis has shown a considerable potential. This paper was intended to introduce the concepts and methods of calculation for exact and statistical fractals, as well as the modified fractal dimension analysis, with examples of their applications in ecology. We focused on the methods of changing measurement scales, grid-based counting, perimeter-area relationship, and density-based fractal dimension. In addition, a comparative evaluation was given for these different methods.

Key words: Fractals, fractal models, fractal dimension, modified fractal dimension.

1 前言

分形模型(fractal models)是建立在分形几何学(fractal geometry)的基础上而发展起来的一种解释物体的空间形状和结构的研究方法^[21,24]。纵观分形几何学的发展也不过 20 多年的历史,它是由数学家 Mandelbrot^[19~21]创立,由众多的科学家不断发展和完善,并应用于研究自然界各种传统几何学难以解决的现象^[7,9~11,13,17,26,37]。特别是在最近几年,科学界的主流刊物如英国的《自然》和美国的《科学》推波助澜和大批的图书问世,使其与混沌理论(Chaos)和其它一些非线性理论得到广泛的应用^[3,41]。分形几何学的核心是描述自然界各种不规则物体,如:云的形状、海岸线的长度、雪花的形状以及植被斑块^[20,21,23~26,38]的形状特点等。分形几何学在生态学中的应用主要体现在分维数(Fractal Dimension)分析方法上,即通过分维数来研究自然界中的物体和空间格局

特征。分维理论目前已经发展了各种维数,如相似性维数(Similarity dimension)、Hausdoff 维数、信息维数(information dimension)等^[21,38]。

最近,国内有关分形分析在生态学中应用的介绍已有报道^[1],并应用于研究黄土区农业景观格局的分析和草原群落格局及其环境因子的分维分析^[2,4,5]。本文将进一步对分形分析作一些简单的、系统的回顾,较为详尽的说明分形模型在生态学研究中的运作过程 and 其所表示的生态学意义,为了解分形模型提供一个基础的框架和索引。

2.1 精确分形

精确分形(exact fractals)是完全符合几何规则的,就象圆和三角形。度量的尺度和组成的单位是有着严格的规律性。以

作者简介:常学礼,男,33岁,1983年毕业于内蒙古大学林学系,曾在内蒙古奈曼旗科研工作站从事野外工作近6年,后调入中国科学院兰州沙漠研究所,从事景观生态学研究,1994~1995年赴美国内华达州沙漠研究所深造。发表论文20余篇。

Sierpinski 地毯为例(见图 1A),它的基本单元结构是一个边长为 $b=3$ 个单位的正方形(b 为度量尺度),除中间一个基本面积单位(以度量尺度 1 为边长的正方形,我们称其为基本面积单位)的格子是空的外,其余皆为地毯。若定义每个基本单位的质量为 1,则不难计算该地毯的质量与面积的比为: $(9-1)/9=0.888$ 。

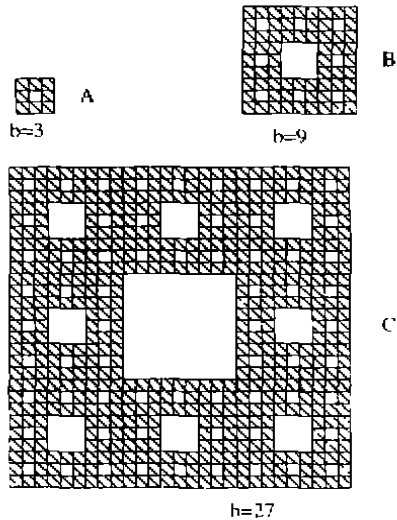


图 1 Sierpinski 地毯

(A)边长为 $b=3$ 的小聚集体,1 个面积单位的洞在中间,其余 8 个面积单位是地毯(阴影部分)。(B)8 个小聚集体组成的中聚集体,边长 $b=9$,地毯面积为 64 个面积单位。(C)8 个中聚集体组成的大聚集体,边长 $b=27$,地毯面积为 512 个面积单位(引自 Milne,1991)

Fig. 1 The sierpink carpet.

(A) The smallest aggregate with $b=3$ segments along one edge, a hole in the center, and eight unit cells (shaded). (B) An aggregate of eight of the smallest aggregate, giving a total of 64 shaded cells. (C) An aggregate of eight the medium aggregate, giving a total of 512 shaded cells.

用上述 8 个带孔的小地毯(基本单元结构),可拼成更大的地毯(如图 1B)。新的地毯中间有更大的孔(9 个基本面积单位),则总面积为 $9 \times 9 = 81$ 个基本面积单位,而有地毯覆盖的面积仅为 $8 \times 8 = 64$ 个基本面积单位。新产生的较大地毯的密度为 $64/81=0.790$ 。当地毯的边长 b 增至 27

时,总面积为 729 个基本面积单位,质量为 512,密度为 $512/729=0.7019$ (见图 1c)。重复这个过程则可产生一个在不同尺度($3n, n$ 为不等于 0 的自然数)上具有相似结构的华丽的地毯。上述过程描述了精确分形的本质,即:小的部分可以用来产生整体,这一特征称为“自相似性”(self-similarity)。在每一次地毯的重新组合中,地毯的质量可以通过计算阴影的面积来获得。如果给定地毯质量随度量尺度(边长 b)的变化称为 $M(b)$,则当地毯的边长由 $b=3$ 增加到 $b=9$ 和 $b=27$ 时,其质量(阴影面积)分别由 8 增加到了 64 和 512(见图 1A,B,C)。

即:

$$M(b=3) = 8 = 3D_5 \quad (1)$$

$$M(b=9) = 64 = 9D_5 \quad (2)$$

$$M(b=27) = 512 = 27D_5 \quad (3)$$

则阴影基本单位数(或总质量)随着度量尺度 b 变化可用公式(4)来表示,即:

$$M(b) = bD_5 \quad (4)$$

$M(b)$ 代表度量尺度为 b (图 1A,B,C)时的地毯质量; D_5 是分维数,描述了度量尺度和质量之间的关系。对(4)式两边同时取自然对数有:

$$D_5 = \ln[M(b)/\ln b] \quad (5)$$

将图 1 中的数据分别代入(5)式有:

$$D_5(A) = \ln 8 / \ln 3 = 1.8928$$

$$D_5(B) = \ln 64 / \ln 9 = 1.8928$$

$$D_5(C) = \ln 512 / \ln 27 = 1.8928$$

$$\text{即: } D_5(A) = D_5(B) = D_5(C)$$

上述结果显示,当地毯的总质量随着其度量尺度从 b 由 3 增加到 9、27 时,由 8 个单位分别增加到 64 和 512 个单位;相反,地毯的密度却从 0.888 减少到 0.790 和 0.702。而此时的分维数 $D_5=1.8928$,保持不变。

同时,我们也不难求出对数变化密度和尺度之间的斜率($\ln 0.888 \sim \ln 0.790$)/ $(\ln 3 \sim \ln 9) = -0.106$,等于 $D_f - 2$ (含四舍五入误差)。这里 2 是在 Sierpiski 地毯范围内的平面维。上述分析可以看出,分维数 D_f 不随尺度变化,而在不同的尺度上,地毯的密度变化可用 D_f 来精确的描述。

在这里,非整数指数(分维数 D_f)的意义可以看作是一种计算有多少量的地毯将要被铺设的方法,如果地毯一直铺到四面墙,并且中间没有孔,则地毯的质量是严格的正方形整体或地板宽度的平方。我们都知道,平面是二维空间,指数 2 反映了二维地板的特征。相对于 Sierpiski 地毯,有少于二维空间的面积,而非整数指数 $D_f = 1.8928$ 恰好反映了衡量过程中质量和尺度之间的关系^[21]。

如果用 d 来表示地毯所占据空间的维数($d=2$),则 Sierpiski 地毯的密度为:

$$P(b) = M(b)/b^2 = b^{D_f}/b^d = b^{D_f - d} \quad (6)$$

$P(b)$ 为地毯的密度,其它符号定义同前。公式(6)反映了一般的关系,它可用来为估测其它物体的分维密度。

总之,精确分形的建立在简单和常数的规则下,通常展示了非常有规律的结构。分形特点(如:质量和密度)被指数 D_f 精确的描述, D_f 是一个包含尺度,而又不受尺度变化影响的常数。精确分形对景观生态学家是非常具有启发性,但是,在自然界中很少有符合精确分形的物体和自然格局。只有严格的人为设计(干扰)景观,才能产生精确的格局。通常,在对自然景观的观测、研究中,往往使用是一些考虑随机性因数的统计分形模型。

3 统计性分形模型在生态学中的应用

前文概括介绍了精确分形的框架,而

在生态学研究则多应用统计性分形模型(statistical fractal model)^[17,18,20,23,38],因为自然界中许多物体形状的复杂性,使它们的分维特征只服从统计学上的自相似性和自仿射性(self-affinity)。那么统计分形模型究竟是如何在生态学研究中的应用?从有关分形研究的文献所反映的特点来看^[15~18,21,22,24],主要有以下几个特点:①由面积和周长尺度所建立的分形模型(确定镶嵌体物体形状、边界长度和景观格局多样性);②由观测物体的长度和观测尺度建立的分形模型(确定物体边界长度或曲线长度);③由观测物体数和度量尺度所建立的质量尺度和密度尺度分形模型。此外,还有衡量有机体运动的扩散模型(diffusion models)^[23,39,40]和建立在地统计学上的半变异矩分形模型(Semivariogram model)^[19~12,35]等。分形模型在最近几年发展十分迅速,它成为用来描述自然现象的有力工具^[18,31]。分形模型的基本表达式为:

$$Q(L) = L^D \quad (7)$$

公式(7)中 $Q(L)$ 为在一定的观测尺度 L 上所获得的某种分形变量; D 为分维数^[24,37]。分形变量 $Q(L)$ 的变化取决于分维数 D 的变化, D 取值越大,则 Q 的结构变化越复杂。在生态学研究中,分形模型的应用关键是如何来确定分维数 D 。下面我们将详细介绍分维数的求法。

3.1 应用变换测量尺度(Measurement Scale)求边界长度的分维数

边界长度的计算公式采用:

$$L(\lambda) = k\lambda^{1-D} \quad (8)$$

在上式中, $L(\lambda)$ 为边界长度, λ 为测量尺度, D 为分维数, k 为常数^[38]。这种方法的主要特点是用变化测量尺度来逐步衡量曲线或边界长度(如:海岸线、植被缀块等的边界长度)。通过一系列变换测量尺度的度

量,可以得到一组分形变量 $L(\lambda)$ 和尺度变量 λ 的数据,从而根据公式(8)用回归方法可计算出分维数 D 和常数项 k 。具体步骤如下:对公式(8)两边取自然对数有

$$\ln[L(\lambda)] = \ln k + (1 - D)\ln \lambda \quad (9)$$

公式(9)中,分维变量 $L(\lambda)$ 和尺度 λ 为已知数,分维数 D 和常数 k 可用最小二乘法求出。线性回归曲线的斜率为 $1 - D$, 此曲线代表了由测量尺度和观测体边界长度所建立的坐标体系中所有的点。分维数 D 可以想象成测量 $\lambda \rightarrow 0$ 的 Hausdoff 维数的极限值。不过,这一点在实践中很难实现,因为所谓的分维数 D 衡量的“内部尺度”将受到图片图象和划分尺度分辨率的约束。

在实际应用中,由于观测体边界弯曲特征的非均一性,当给定一个测定尺度 λ 时,分维变量 $L(\lambda)$ 将有一些变化依赖于从什么地方开始测定。同一测定尺度,不同的起始测定点,得到的边界长度不相同。为了避免这一现象对分形分析带来的影响,可以用多个起始点重复测量所得到 λ 的回归图,保证其包含有更多的点;另一方面可以得到一个 D 值的分布。在一些测量尺度上, D 值发生变化的可能性是存在的,从一个特定的 λ 范围我们可以得到一个值,而在另一个尺度可能得到一个新的 D 值,这也预示着分维数 D 的变化反映了观测体结构随尺度的变化^[6,33,38]。

3.2 格子法测定边界分维数

如果所研究的物体或景观格局已被编制成图,则使用下面的方法来测定分维数将更加方便。首先,在研究对象的图上放置一个边长(测定尺度)为 δ 的正方形组成的格子。计算覆盖研究物体的边界或曲线的格子数量,称作 C 。其次,变换格子(尺度)大小,重复这一过程,可以得到一组由 C 和 δ 组成的数据。同样应用公式(8),使用回归方法就可以求出公式中的常数 k 和分

维数 D 。此外,通过 $\ln C$ 和 $\ln \delta$ 的回归图也可计算出回归曲线的斜率值即分维数 D 和截距 k (即公式(9)中的常数)。在一定的尺度范围内,如果相对于图象,重新放置格子的方向来测定观测体的边界(或曲线)长度,也可导致 C 值发生变化。就像在划分尺度方法中的选择不同的起始点一样,我们同样可以利用不同的放置方向得到数值的平均数来代表对应尺度的边界长度 C ,从而消除这一影响。

格子法测定分维数实际上就是变换测量尺度求分维数,两者的不同不仅仅在于格子法分维数应用于室内作业较方便(如果研究对象已被编制成图);而变换尺度求分维数则更适合于实地测定。

3.3 周长-面积测定缀块分维数

如果观测体是由规律的镶嵌体组成(如:海洋的颜色、植被的缀块等),这些岛屿的边界分维数 D 通过周长和面积数据,应用公式(10)可以被估计。

$$P = kA^{D/2} \quad (10)$$

式中 P 为缀块的周长, A 为缀块面积, D 为分维数, k 为常数^[32]。 D 的理论范围值在 1.0~2.0 之间,很显然,在用(10)式来描述单个缀块时,常数因子 $k = 4$; 如果 $D = 1$,则缀块形状为欧几里得正方形,当 $D = 2$ 则表示该缀块的形状最为复杂。周长和面积可在一些固定的尺度上(如: m 和 m^2 、 m 和 hm^2 、 km 和 km^2 等),通过一些测量手段来获得(如:格子法、图形数值化仪等)。将这些值标绘于对数坐标上,则回归斜率等于 $D/2$ 。观测尺度的选择将不会影响结果,因为观测体是自相似性产生的简单分维。在有些情况下(即观测物体的形状完全符合精确分形), $\ln A$ 对 $\ln P$ 的标绘图将是一条单一直线,对所有的尺度提供一个唯一的分维数 D ^[38]。但是,更普遍的情况是分维数 D 依赖于衡量尺度,反映了

分维变量(周长 P)和尺度(面积 A)的相互关系。例如,Bradbury 等(1984)对澳大利亚珊瑚礁(缀块)的结构进行的分形分析研究表明^[8],从较小的尺度($\lambda=10\text{cm}$)到中等尺度($\lambda=20\sim 200\text{cm}$ 之间),分维数 D 的变化比较大,从 1.1 下降到 1.05;而从中等尺度到大尺度($\lambda=5\sim 10\text{cm}$),分维数增加到 1.15。进一步的分析表明,珊瑚礁的结构符合自相似性,分维数 D 的变化说明了在不同的尺度存在着不同的过程。三个尺度范围(大、中、小)反映了珊瑚礁的三个主要结构:小尺度揭示了单个珊瑚虫聚集结构特征;中等尺度揭示了老珊瑚虫的聚集区域的特征;大尺度则反映了主要的地理地形结构。分维数 D 的变化与珊瑚礁的层次组织结构的变化是一致的,分维数变化的转折点正是珊瑚礁等级组织的分界点。也就是说,分维数的变化反映了缀块(珊瑚礁)结构的变化。此外,Palmer 对不同植被类型斑块的空间结构进行了分形研究,结果同样表明,植被缀块在不同的尺度上存在着不同的植被格局^[33]。

在上述过程中所获得的分维数 D 可以是多个岛屿或缀块集合的整体衡量,也可以是单个缀块的形状描述。

3.4 修改分维数法

Olsen 等^[27]在研究景观多样性时发现,应用公式(10)虽然可以求出单个缀块或整个景观的分维数、描述景观或缀块形状的复杂性,但是不能反映景观组成的多样性。为此,在公式(10)的基础上发展了修改分维数法(modified fractal dimension)。该方法主要有三个特点:其一是引入了缀块相邻斑块数 C ,其二是对周长 P 进行了修正,其三该方法是建立在网格化信息图象的基础上(即景观类型图必须转换成格子化图才能用来分析)。具体定义如下:

$$P_m = P + P_c \quad (11)$$

P_m 为修改周长, P_c 为周长等级修正值, P 定义同前。其中 P_c 又定义为:

$$P_c = Q \cdot C / (C_i - 1) \quad (12)$$

Q 为周长减少系数, C 为相邻斑块数(不包括对角相邻), C_i 为景观中所有斑块类型数。在公式(12)中 Q 又定义为:

$$Q = P_i - P_g \quad (13)$$

其中 P_i 为斑块最大理论周长,对于单个斑块可以用公式(10)求出, P_g 为斑块图格子化后最大理论周长。 Q 值的更简单的计算公式为:

$$Q = 2(A - 1) \quad (14)$$

A 为斑块面积(以斑块格子数为单位)。将公式(11)、(12)、(14)合并有:

$$P_m = P + [2(A - 1) \cdot C / (C_i - 1)] \quad (15)$$

则对于单个缀块的修改分维数 D_m 可用下式求出:

$$D_m = 2 \ln(P_m/4) / \ln(A) \quad (16)$$

当单个缀块的修改分维数求出后,则整个景观的分维数可以通过不同缀块面积所占总面积的比例加权平均来求出。修改分维数 D_m 不仅能描述缀块的形状,而且还能反映缀块的均一性(evenness)和毗邻性(juxtaposition),揭示景观空间格局的多样性^[27]。

此外,Plotnick 等对景观孔隙度(Lacunarity)的研究中提出,对于具有自相似格局的景观也可用孔隙度来决定分维数^[34]。孔隙度的计算方法也是建立在格子化图的基础上,与前面所介绍的分形方法相比较,孔隙度主要描述了景观中非缀块区域的空间结构。有关孔隙度的计算方法和应用我们将另外介绍,对这方面感兴趣的读者还可参阅有关原文(见参考文献)。

3.5 密度分维数的测定

密度是生态学研究常用的一个指标。在自然界中,由于物体分布的非均匀

性,使生态学家通常缺乏系统的、反映整个景观特征的一系列数据。但是,却往往拥有一个特定区域内比较完整的数据。而这些数据不可能是从一个二维客观实体来取样得到的。换句话说,在自然界中我们所调查的对象其分布形式不可能是严格的二维空间。相反,其分布区域仅占据了一个低维的空间(就象 Sierpinski 地毯小于二维)。所以,用传统的调查结果进行尺度推绎是不够准确的。比如,我们调查了 1m^2 内有某种寄生物的数量为 X ,若干个重复后求平均数 \bar{X} ;然后,以此为依据计算更大或更小面积内的某生物体的密度。很显然在上述过程中,只考虑到了生物体分布的不均匀性(通过重复来消除),没有考虑到寄生物体和其寄主分布的尺度依赖性(即二者的分布不是二维空间)。如何更准确的表达该生物体的密度,密度分形模型提供了一个很好的方法。首先调整公式(6),令 $b = D_s$, 则

$$P(b) = (A/k)b^{D_r - D_s} \quad (17)$$

上式中 D_s 为调查对象占据空间的分维数; D_r 为调查对象质量分维数; A 、 k 为系数^[24]。

在欧几里德集中,质量的变化与物体的长度和体积有着密切的关系,服从 $M \propto r^E$, 这里 E 等于 1, 2 和 3, 分别代表线、面和三维空间。在分形模型中,质量的变化与 r 的 D 次方成正比,这里 $D \leq E$ ^[21]。在分形研究中,我们根据质量依赖尺度的关系可知,观测体的密度也依赖尺度^[23]。所以,对于研究观测体的密度而言,分形模型为我们提供了一个极好的工具,应用公式(17)可以恰当的描述观测体在某一缀块内的密度。关于(17)式的分解可通过以下步骤来进行:

首先将(17)式转换,

$$P(b) = (A/k)b^{D_r - D_s} = Ab^{D_r}/Kb^{D_s}$$

$$= M_f/M_s \quad (18)$$

则

$$M_f = Ab^{D_r} \quad (19)$$

$$M_s = Kb^{D_s} \quad (20)$$

在(18)、(19)和(20)式中, M_f 为观测体数量(质量), M_s 为观测体占据观测空间的面积数, D_r 、 D_s 、 A 和 K 定义同前。

又例如:我们在 100hm^2 的自然保护区内调查某一个稀有动物或昆虫的种群密度,首先要考虑的是质量的尺度依赖性,用公式(19)可求得 M_f 。而该种群的密度并不等于 $M_f/100$, 因为该种群所占据的空间并非恰好充满整个调查区 100hm^2 , 其往往仅占有所依赖的某些植被缀块分布区。所以要用其所依赖的植被缀块占据空间面积的分维变量 M_s 来确定其密度,这一过程可由公式(20)来完成。当植被缀块占据空间面积的分维变量确定后,则根据公式(18),该种群的分维密度就可以求出了。在上述分维密度的计算过程中,不仅考虑了调查区种群密度的尺度依赖性,而且还涉及到了该种群占据空间的尺度依赖性,这一点与传统的生物学调查是不相同的。此外,需要指出的是该方法的应用不仅需要野外调查数据,而且还需借助各种专业图件。

4 结束语

通过前面的介绍我们可以清楚地看出,分形分析为我们研究自然界一些复杂物体和现象提供了精确、清晰的模型。它的完善和发展不仅为景观生态学研究注入了新的数学研究方法,而且也对传统生态学研究中的的一些棘手问题(例如:缀块形状、边界线特征、景观多样性等)和定义模糊的概念作了补充(如:密度问题),成为景观生态学研究中的一个有效的数学工具^[24, 31, 38]。就分形模型在生态学研究中的意义而言,

有以下几个特点:

①应用分形分析可以揭示缀块的结构特征^[8,33],也就是说缀块的结构变化可以通过分维数的变化反映出来。

②分形模型可以在不同的观测尺度上定量化的描述过程-格局的关系^[17,18],如果在不同的观测尺度上某一研究对象的分维数保持不变,则意味着我们可选择最方便、最容易的尺度来进行研究。

③分形模型为我们提供了一个较为简单的数学途径,以便直接探讨生态学中涉及尺度、等级等难题。

④分形分析强调了尺度的重要性,其尺度变化的内涵是通过分维数的变化来反映出来。研究分维数的变化关键在于揭示格局与过程的关系。

⑤修改分析分形不仅能够描述景观和缀块的空间形状和格局,而且还能解释缀块间的相邻性和平均性^[27],对研究缀块间的物种分布和能量交换有着重要的意义。

总之,分形模型内容丰富,它可对多样化的现象和物体来进行研究,如:密度、生物体运动、缀块镶嵌体和半岛长度等;同时,它又考虑到了尺度的变化^[24]。涉及到当前生态学研究中的热点,如:缀块性(patchiness)、等级理论(hierarchy theory)、渗透理论(percolation theory)等^[24,41]。特别值得一提的是,分形分析对解决生态学研究格局和尺度及可塑性面积单元问题有所解释^[6]。例如:用格子法来求缀块的分维数过程,就是一个寻找最优化区的途径(optimal zoning approach)^[6,29,30,36]。具体的说,当转换格子方向的角度在某一范围内,缀块的分维数变化最小,则在这一范围内放置格子(划区)是最优化的。同时,在上述过程中,如果分维数的变化在某一角度范围内极为敏感,则这种划分方法对结果的影响强烈,这又恰好是减少可塑性面积

单元问题敏感性分析的途径(sensitivity analysis approach)^[6,14]。此外,在密度分维分析中,强调研究对象和其栖息地的关系,而非研究对象和样地的关系,这一点又联系到减少可塑性面积单元问题的基本实体途径(basic entity approach)^[6,14]。

参考文献

- [1] 祖元刚,马克明.分形理论与生态学,现代生态学讲座(李博主编).科学出版社,1995.65~72.
- [2] 傅伯杰.黄土区农业景观空间格局分析,生态学报,1995,15(2),113~120.
- [3] 范萌.非线性科学——21世纪极富挑战性的研究,科技导报,1995,88(10),3~5.
- [4] 马克明等.东北羊草草原群落格局的分形理论研究,分形理论及其应用(辛厚文主编).合肥:中国科技大学出版社,1993.
- [5] 张喜军等.东北羊草草原主要环境因子的分形分析,分形理论及其应用(辛厚文主编).合肥:中国科技大学出版社,1993.
- [6] 郭建国, Jelinski, D. 生态学中的格局与尺度——可塑性面积单元问题.现代生态学讲座(李博主编),科学出版社,1995.1~9.
- [7] Barnsley, M. Fractals everywhere. Academic Press, Boston, U. S. A. 1988.
- [8] Bradbury, R. H. et al. Fractals in ecology: methods and interpretation. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 1984, 14: 295~296.
- [9] Burrough, P. A. Fractal dimensions of landscapes and other environmental data, *Nature*. 1981, 294: 241~243.
- [10] Burrough, S. A. Multiscale sources of spatial variation in soil. I. Application of fractal concept to nested levels of soil variation. *J. Soil Sci.*, 1983, 34: 577~597.
- [11] Burrough, P. A. Multiscale sources of spatial variation in soil. II. A non-Brownian fractal model and its application in soil survey. *J. Soil Sci.*, 1983, 34: 599~620.
- [12] Davis, J. C. Statistics and Data Analysis in Geology. 2nd ed., John Wiley and sons, New York, USA., 1986.
- [13] Falconer, K. Fractal Geometry, Mathematical Foundation and application. John Wiley and Sons, Chichester, England., 1990.
- [14] Fotheringham, A. S. Scale, independent spatial analysis. In M. F. Goodchild and S. Gopal, (eds), Accuracy of Spatial Databases, Taylor and Francis, London, England, 1989. 221~228.
- [15] Harris, L. The Fragmented Forest: Island Biogeography Theory and the preservation of Biotic Diversity, Univ. of Chicago press, Chicago. USA., 1984. 208.
- [16] Hastings, H. M. et al. Time Scale, Persistence and Patchiness, *Biosystem*, 1982, 15: 281~289.

- [17] Krummel, J. R. et al. Landscape patterns in a disturbed environment. *Oikos*, 1987, **48**: 321~324.
- [18] Lovejoy, S. Area-perimeter relations for rain and cloud areas. *Science*, 1982, **216**: 185~187.
- [19] Mandelbrot, B. B. Stochastic models for the earth's relief, the shape and the fractal dimension of coastlines, and the number-area rule for islands. *Proc. Nat. Acad. Sci. (USA)* 1975, **72**: 3825~3828.
- [20] Mandelbrot, B. B. *Fractals: Form, Chance and Dimension*. W. H. Freeman and Company, San Francisco, USA, 1977.
- [21] Mandelbrot, B. B. *Fractal Geometry of nature*. W. H. Freeman and Company, New York, USA, 1983, 568pp.
- [22] Meakin, P. A new model for biological pattern formation. *J. theor. Biol.*, 1986, **118**: 101~113.
- [23] Miline, B. T. Measuring the fractal geometry of landscape. *Appl. Math. Comput.* 1988, **27**: 67~79.
- [24] Miline, B. T. Lessons from applying fractal models to landscape patterns. In Turner, M. G. and R. H. Gardner eds. *Quantitative Methods in Landscape Ecology* Springer-Verlag, New York, USA, 1991, 199~235.
- [25] Morse, D. R. et al. Fractal dimension of vegetation and the distribution of arthropod body lengths. *Nature*, 1985, **314**: 731~734.
- [26] Nittmann, J. et al. Fractal growth of viscous fingers: Quantitative characterization of a fluid instability phenomenon. *Nature*, 1985, **314**: 141~144.
- [27] Olsen, E. R. et al. A modified fractal dimension as a measure of landscape diversity. *Photogr. Engin. Rem. Sen.*, 1993, **59**: 1517~1520.
- [28] O'Neill, R. V. et al. Indices of landscape pattern. *Landscape Ecol.*, 1988, **1**: 153~162.
- [29] Openshaw, S. Optimal zoning systems for spatial interaction models. *Environ. Plann. A*, 1977, **9**: 169~184.
- [30] Openshaw, S. *The Modifiable Areal Unit Problem*. Geo Books, Norwich, England, 1984.
- [31] Orbach, R. Dynamics of fractal networks. *Science*, 1986, **231**: 814~819.
- [32] Peitgen, E. J. and D. Sauer (ed). *The Sciences of Fractal Images*. Springer-Verlag, New York, USA, 1988, 312pp.
- [33] Palmer, M. W. Fractal geometry: a tool for describing spatial patterns of plant communities. *Vegetatio*, 1988, **75**: 91~102.
- [34] Plotnick, R. E. et al. Lacunarity indices as measures of landscape texture. *Landscape Ecol.*, 1993, **8**: 201~211.
- [35] Robertson, G. P. Geostatistics in ecology, interpolating with known variance. *Ecology*, 1987, **68**: 744~748.
- [36] Sammons, R. Zone definition in spatial modeling. In B. Goodall, and A. Kirby (eds), *Resources and Planning*. Pergamon, Oxford, England, 1979, 77~100.
- [37] Stanley, H. E. Form, an introduction to self-similarity and fractal behavior. In *On Growth and Form: Fractal and Non-Fractal Patterns in Physics*. Stanley, H. E. and N. Ostrowski (eds). Martinus Nijhoff, Boston, USA, 1986, 21~53.
- [38] Sugihara, G. and R. M. May. Application of Fractal in Ecology. *TREE*, 1990, **5**: 79~86.
- [39] Wiens, J. A. and B. T. Miline. Scaling of 'landscapes' in landscape ecology, or, landscape ecology from a beetle's perspective. *Landscape Ecol.*, 1989, **3**: 87~96.
- [40] With, A. K. Using fractal analysis to how species perceive landscape structure. *Landscape Ecol.*, 1994, **9**: 25~36.
- [41] Wu, J. and O. L. Loucks. From balance of nature to hierarchical patch dynamics: A paradigm shift in ecology. *Q. Rev. Biol.*, 1995, **70**: 439~466.

(1996年1月26日)

信息 《微生物生态学》一书,由浙江省微生物研究所许光辉教授、中国科学院南京土壤研究所李振高教授主编。该书既是一部学术专著,又是一部内容极丰富的教学参考书,主要介绍微生物生态学的基本知识及其有关的理论和应用研究的成果。

全书共分十二章,包括绪论;微生物生态学的基本原理;环境中碳、氮和其它元素的微生物转化;土壤、水体和空气中微生物群落的结构和功能;微生物与植物、动物的相互关系;环境污染和微生物;微生物生态学的应用及其研究方法等。书后附有拉丁名称和英汉名词对照。本书可供工、农、林、医以及环保、轻工、食品等有关微生物和发酵等专业的科技人员和高等院校师生参考。

本书由东南大学出版社出版,32开本,34万字,定价:8.50元(含邮资),订购者请将款汇至,沈阳市文化路72号中国科学院沈阳应用生态研究所《生态学杂志》编辑部王伟同志收,款到寄书。邮编110015。