

天目山物种多样性尺度依赖及其与 空间格局关系的多重分形

杜华强, 汤孟平, 周国模, 徐文兵, 刘恩斌, 施拥军

(浙江林学院环境科技学院, 杭州临安, 浙江 311300)

摘要:以浙江省天目山国家级自然保护区为例,采用多尺度分析思想,利用多重分形分析方法,研究了不同尺度下物种多样性的变化、空间分布格局以及多样性与空间格局之间的关系。研究主要得到 3 方面的结论:(1)物种多样性具有尺度依赖性,随着空间尺度的增大,Shannon-Wiener 多样性指数 H 增大,Margalef 多样性指数 K 和均匀度指数 E 减小;(2)多重分形参数 $\alpha_{\min}$ 、多重分形谱的变化范围 SR 等能够定量反映物种的空间分布特征,空间大尺度越大,物种越聚集,空间分布越不均匀;(3)物种多样性与空间格局存在线性或幂函数关系。研究表明多重分形分析定量描述物种空间格局是有效性的,多重分形参数与生物多样性之间的定量关系为研究物种空间格局、生态属性与尺度之间的关系奠定了基础。因此,分形结合传统方法,在生物多样性方面的研究将有很大的潜在价值。

关键词:物种多样性; 尺度; 空间格局; 多重分形

文章编号:1000-0933(2007)12-5038-12 中图分类号:Q948 文献标识码:A

Linking species diversity with spatial scale dependence to spatial patterns using multifractal analysis

DU Hua-Qiang, TANG Meng-Ping, ZHOU Guo-Mo, XU Wen-Bing, LIU EN-Bin, SHI Yong-Jun

School of Environmental Technology, Zhejiang Forestry College, Lin'an, Hangzhou, Zhejiang Province 311300, China

Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(12): 5038 ~ 5049.

Abstract: Ecological scholars have shown spatial scale dependence with biodiversity. However, because there is no single scale appropriate for measuring variation in resource distributions, the relationship between spatial distributions of limiting resources and patterns of plant diversity has eluded plant ecologists. Thus, a multiscale method is imperative for understanding spatial distribution patterns. The objectives of this study were: (1) to quantify species diversity with selected species indices at different spatial scales, (2) to analyze the spatial distribution patterns of species diversity for the same spatial scales using multifractal theory (a multiscale, spatial structure analytical tool) and (3) to determine relationships between them. A 100m × 100m (1hm²) plot, located in TianMu Mountain National Natural Preservation Areas, in the western of Zhejiang Province, was investigated by precision measuring instruments. For spatial pattern analysis of species

基金项目:国家自然科学基金资助项目(30471390);浙江省自然科学基金资助项目(Y305261);浙江林学院科学研究发展基金资助项目(2005FR042)

收稿日期:2006-07-19; **修订日期:**2006-12-13

作者简介:杜华强(1975~),男,陕西人,博士.主要从事高光谱遥感以及分形、地统计在遥感、林业中应用等研究. E-mail: ddhill@126.com

致谢:吴亚琪、陈永刚等老师及林学 2002 级的部分学生在地面调查和资料搜集方面给予帮助! Charles P. Chirko 教授对写作给予帮助,在此一并致谢!

Foundation item: The project was supported by National Natural Science Foundation of China (No. 30471390), Natural Science Foundation of Zhejiang Province (No. Y305261), and Science Research Foundation of Zhe Jiang Forestry College (No. 2005FR042)

Received date: 2006-07-19; **Accepted date:** 2006-12-13

Biography: DU Hua-Qiang, Ph. D., mainly engaged in remote sensing, the application of fractal theory and geostatistics in forestry and remote sensing. E-mail: ddhill@126.com

based on multiscale idea, the plot was divided into 10 subsets of 10 different spatial scales, namely $10\text{m} \times 10\text{m}$, $20\text{m} \times 20\text{m}$, ..., $100\text{m} \times 100\text{m}$. In each scale, species diversity indices, including the Shannon-Wiener index (H), the Margalef index (K), and the Evenness index (E), were first calculated, and then multifractal parameters, such as the singularity index (Lipshitz-Hölder exponents) α and its fractal dimensions $f(\alpha)$ (multifractal spectrums), were computed. All visual algorithm programs were designed with the MatLab language (version 6.5 and above). Then, variations of species diversity and spatial distribution patterns for different scales were analyzed with linear and nonlinear regression and their relationships developed. Results of nonlinear regression analysis with power functions fit to curves of increasing spatial scale versus diversity indices showed strong relationships with H increasing ($R^2 = 0.71$) but E ($R^2 = 0.89$) and K ($R^2 = 0.88$) decreasing indicating that species diversity existed with scale dependence. From the multifractal method, results indicated that species spatial distribution had multifractal features. For instance, through spatial scale changes the multifractal spectrum of species showed a large difference with $f(\alpha)$ being the subset of species with singularity α . So, an infinite hierarchy of dimensions using multifractal formality can characterize the internal spatial pattern. Also, when the spatial scale increased, $\alpha_{\min}$ decreased while $\alpha_{\max}$ increased meaning that large-scale spatial patterns of species were aggregated compared with small-scale patterns. In addition, the $f(\alpha)$ - α spectrum range (SR) and its symmetrical (Dist) in different scales showed that larger spatial scales had a wider SR and less symmetry meaning the spatial distribution of species for larger scales was nonuniform. Moreover, for the diversity indices H , E , and K , strong linear relationships with $\alpha_{\min}$ ($R^2 = 0.67 - 0.94$) and clear nonlinear associations with power functions for SR ($R^2 = 0.58 - 0.89$) and Dist ($R^2 = 0.62 - 0.88$) were found. Since interactions of species diversity and spatial characteristics are very complex, the above relationships need further validation along with precise explanations of any correlations among their ecological processes. Overall, the importance of spatial scale in fractal theory, patterns, processes, and scales can be linked to fractals in ecology with some innovative achievements occurring when traditional research methods are combined with fractal theory.

Key Words: species diversity; scale; spatial pattern; multifractal

尺度问题在地理学、生态学、农林、水文学、大气科学等众多学科领域都具有重要的地位,是当前国内外研究的热点之一^[1~3],最主要的原因就是同一事物、现象采用不同的观测或分析尺度往往会得到差异很大或截然相反的结果,也就是说某尺度上的重要参数和过程,在另一尺度上往往是不重要的或无意义的^[4~8]。在生物多样性研究中,物种与空间尺度关系非常重要,正确揭示生物多样性变化格局对尺度的依赖特性可以使人们认识生物多样性在空间的分布特征,比较不同研究结果,从而理解生物多样性形成机制的基础^[6,9,10]。

多样性的尺度依赖方面,何志斌等^[6]通过 $S = cA^z$ (S 为物种数, A 为空间面积) 研究了荒漠植被生物多样性的尺度依赖关系。Anderson 等^[7]指出有限资源的空间分布和植物多样性之间的关系是植物生态学家的一个困惑,一个重要的需要考虑的原因就是资源变异与尺度有关,而且采用地统计研究了物种多样性、丰富度与半方差函数参数之间的关系,表明物种多样性随着空间尺度变化而不同。岳文泽等^[11]以遥感数据为基础,也采用地统计学相关理论研究了上海城市景观多样性的空间尺度变化。Nagendra 等^[12]以遥感信息为基础,对生物多样性进行了多尺度评价。总之,生物多样性的尺度依赖越来越受到人们的重视,而且基于多尺度采样的生物多样性分析在生态学过程研究中尤为受到学者的推崇。

生物多样性的尺度依赖使得我们不得不进一步提问:不同尺度下物种空间结构、格局如何变化? 它们与生物多样性之间存在什么样的关系? 如何从生态相关而不是数学相关来解释这种关系? 等等,这对于理解相应的生态学过程至关重要。

获取反映空间格局、并具有生态学意义的指数是关键,也是难点。Li^[13]指出,目前的景观指数与生态过程或格局的相关性更多的在于假设,在景观指数生态相关分析中,必须考虑尺度的影响,而且为了充分量化空间异质性、探测景观的特征尺度,空间格局指数应该在多个尺度上计算,多尺度分析方法(分形、地统计等)是

首选。事实上,多尺度方法对于生物多样性的评价是一个更合逻辑的选择,因为相对于单一尺度而言,它在一系列不同的空间尺度上对生物多样性的特征值进行采样和计算,而且空间异质性和复杂性以及生态系统的动态非平衡性质得到重视,这样就能更好地揭示生物多样性格局^[14]。

分形是解释复杂结构和尺度问题的一个优秀的数学工具,能够用来分析数据的各种空间现象,描述现实世界详细的等级层次^[15,16]。在不同的尺度上,自然现象常常有相似的特征即自然界许多目标的大小分布都可以用方程 $M(\sigma) \sim \sigma^{-D}$ 表示(其中 σ 为尺度、 $M\sigma$ 为某尺度 σ 下分形目标的特征数, D 为分形维数)^[17,18],测量这些特征如数目、长度、质量、粗糙度、表面积、丰度等,都依赖所观测特征的尺度。分形模型假设在给定的尺度范围,这种依赖是相同的,如尺度不变。该模型包含联系某尺度和其他所有尺度上特征的参数,分形也正是根据自相似来模拟多尺度变异^[19]。因此,分形模型是联系过程和尺度的一个很有应用前景的方法。正是如此,分形模型在群落多样性和植被空间异质性等方面的研究受到了生态学家的重视^[20,21];Iudin D. I. 等^[22]采用多重分形方法分析了群落中物种结构的自相似特征,给出了多重分形参数的生态学意义,指出多重分形谱、奇异指数等增加了传统方法分析物种多样性的能力。

本文将采用分形和多重分形分析方法研究不同尺度上物种的空间分布格局,试图分析并构建空间格局与物种多样性之间的相互关系,并从生态学的意义上进行解释。

1 研究区域与数据

研究区选择在浙江省天目山国家级自然保护区内。天目山位于浙江省西北部的临安市境内,地处东经 $119^{\circ}23'47'' \sim 119^{\circ}28'27''$,北纬 $30^{\circ}18'30'' \sim 30^{\circ}24'55''$ 。年平均气温 $14.8 \sim 8.8^{\circ}\text{C}$, $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温为 $5100 \sim 2500^{\circ}\text{C}$;年降水量 $1390 \sim 1870\text{mm}$,相对湿度 $76\% \sim 81\%$ 。自然保护区受海洋暖湿气候影响较深,具有中亚热带向北亚热带过渡特征,森林植被十分茂盛。丰富自然资源和复杂地形为多尺度研究生物多样性及其空间格局提供了天然的优势。

表 1 样地数据

Table 1 Plot data from the Tian Mu Mountain National Natural Preservation Areas of western Zhejiang Province

编号 No.	树种代码 Species code	X 方向 (m) X direction	Y 方向 (m) Y direction	Z 方向 (m) Altitude	胸径/地径 (cm) DBH/stem basal	树高 (m) Height
1	100	2.16	8.65	615.49	7.5	5.3
2	100	2.16	8.75	615.49	5	2.7
3	86	0.1	8.32	614.78	14.6	8.5
4	27	2.06	8.6	615.49	26.2	12
...	...	...	...	...	...	...
1783	102	92.06	93.37	644.27	6	6
1784	109	92.11	93.37	644.32	11.5	6.5
1785	26	91.26	94.13	643.13	25.3	14
1786	61	94.12	94.45	643.6	9.5	4

表中树高小于 1.5 为地径;原始调查数据预处理后保留 1769 株(N),包括 79 个物种(SP) Table1 has data from 1769 samples of 79 different species; When tree height is less than 1.5m, DBH is replaced with the stem basal area (at ground level)

1.1 数据调查方法

选择保存较完好的常绿阔叶林设置样地,样地大小 $100\text{m} \times 100\text{m}$ 。用相邻格子调查方法,把样地划分为 100 个 $10\text{m} \times 10\text{m}$ 的调查单元。在每个调查单元内,对高度大于或等于 1.5m 的木本植物进行每木调查,记录树木种类,测定每株树木的胸径、树高、活枝下高、冠幅等因子;对高度小于 1.5m 的木本植物同样进行每木调查,调查因子中除地径取代胸径外,其它调查因子相同。采用激光对中全站仪(徕卡 TCR702Xrange)测定每株树木基部三维坐标(x, y, z),其中: x, y 是平面直角坐标, z 是海拔高度,部分数据如表 1。

1.2 多尺度划分

图 1(a)是研究数据的三维空间分布状况。为了从不同尺度上研究物种多样性及其空间格局变化,对研

究数据在 x - y 平面内按图 1(b) 所示划分为 $10 \times 10, 20 \times 20, 30 \times 30, \dots, 100 \times 100$ 的样本子集并分别命名为 $S_1, S_2, S_3, \dots, S_{10}$ 。

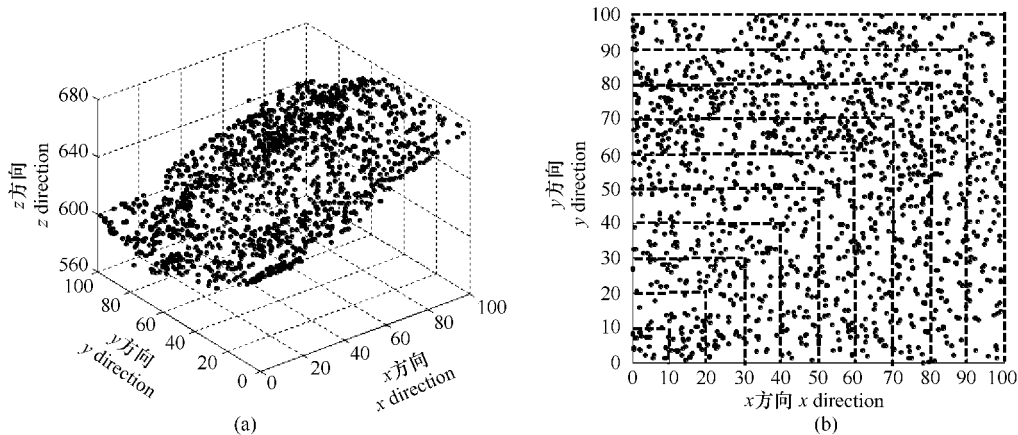


图 1 数据空间分布(a)及多尺度划分(b)

Fig. 1 (a) Spatial distribution of the research data and (b) its multiscale partition

2 研究方法

2.1 生物多样性指数

多样性指数:是基于信息论基础上,用来度量系统结构组成复杂程度的一些指数^[11]。本研究采用 Shannon-Wiener 多样性指数、均匀度指数^[23]以及 Margalef 多样性指数^[22]进行生物多样性分析

2.1.1 Shannon-Wiener 多样性指数。

$$H = - \sum_{k=1}^S P_k \ln(P_k) \quad (1)$$

式中, P_k 是某物种出现的概率, S 是物种数。

2.1.2 均匀度指数

表示物种分布的均匀程度,通常用下式表示:

$$E = \frac{- \sum_{k=1}^S P_k \ln P_k}{\ln(S)} \quad (2)$$

式中, E 越接近 1, 均匀程度越大。

2.1.3 Margalef 多样性指数

Margalef 最早发现物种数 S 与群落内个体总数 N (Community Numbers) 之间存在(3)式所示的幂函数关系,即任何群落的物种结构不随种群大小的变化而变化^[22]。

$$S = N^k \quad (3)$$

幂指数 k ($0 \leq k \leq 1$) 就是 Margalef 多样性指数。

2.2 不同子集多重分形参数计算

用多重分形全面获取群落内物种空间结构或分布格局信息的方法主要是获取其 4 个多重分形参数即:广义维数 $D(q)$ 、质量指数 $\tau(q)$ 、奇异指数 (Lipshitz-Hölder 指数, 或非均匀性标度指数) $\alpha(q)$ 及其维数分布函数 $f(\alpha)$ 。物理量在空间内具有不规则分布的许多实际问题中,借助多重分形参数的计算,可以实现其不均匀分布的定量表征^[24]。

多重分形分析的关键是在不同的尺度上定义一个质量概率 (mass probability) 来定量描述数据分布的局部特征。为了定义质量概率,还是采用与图 1(b) 相同划分方式,对不同的子集再次细分为 10 个子集,命名为 $Ss_1, Ss_2, Ss_3, \dots, Ss_{10}$ 。如图 2,对于 10×10 ,划分为 $1 \times 1, 2 \times 2, 3 \times 3, \dots, 10 \times 10$,对于 20×20 ,划分为 $2 \times$

2、4×4、6×6、……、20×20,其他以此类推。这样某子集 S_i 的多重分形参数计算过程如下^[22,25~26]:

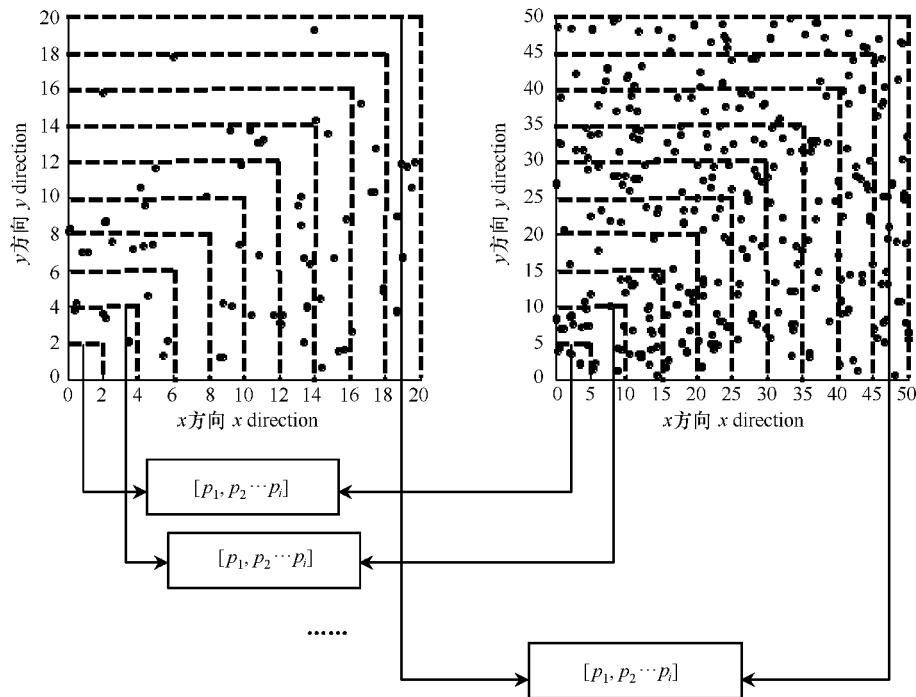


图2 不同子集细分方法示意

Fig. 2 Repartition of different subplots in Figure 1(b)

2.2.1 质量概率

设 SN_i 为 S_i 中第 i 个物种的样本数, N 为 S_i 中样本总数,那么 S_i 中某物种的概率为

$$p_i = \frac{SN_i}{N} \quad (4)$$

p_i 就为质量概率(如果 S_i 为空,相应的概率也为空)。实际上,这与 Shannon 多样性指数计算一样,因此质量概率 p_i 是具有生物学意义的。

2.2.2 权重数

对某子集 S_i 细分为 np 个子块(本研究 $np=10$),每个子块 S_i 的物种数为 Sn ,用下面的分割函数(p_i 的 q 阶矩)来表述物种的权重数,即:

$$M(q, \varepsilon) = \sum_i p_i^q \approx \varepsilon^{-\tau(q)} \quad (5)$$

式中, $\tau(q)$ 为质量指数, ε 为尺度(可以为 S_i 的分割大小如图2,也可以是 S_i 中样本总数,本研究取前者,目的是让计算结构与空间取样尺度相关), $q \in R, i=1, 2, \dots, Sn$ 。

2.2.3 多重分形参数

由(5)式可以很方便的推出 $\tau(q)$:

$$\tau(q) = -\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\log M(q, \varepsilon)}{\log(\varepsilon)} \quad (6)$$

对 $\tau(q)$ 做如下变换,可以得到数据广义分形维数的表达式:

$$D(q) = \frac{\tau(q)}{1-q} = \frac{1}{q-1} \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\log \sum_i p_i^q}{\log(\varepsilon)} = \frac{1}{q-1} \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\log \sum_i M(q, \varepsilon)}{\log(\varepsilon)} \quad (7)$$

即 $\tau(q) = (q-1)D(q)$ 。为了保证 $D(q)$ 的连续性,当 $q=1$ 时令 $D_1 = -\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\log \sum_i p_i \log(p_i)}{\log(\varepsilon)}$ 。

$\tau(q)$ 和 $D(q)$ 是从整体上表征研究对象的多重分形,它们不能反映局部空间结构、分布的特征^[27]。在研究自然界结构或系统的空间格局时,解释产生该格局的基本过程是不可避免的,未知细节可能对原因因子的理解很重要^[28]。因此,为了描述多重分形体的细节变化,需要计算另外一套参数即:奇异指数 $\alpha(q)$ (也称非均匀标度指数、Lipshitz-Hölder 指数)及其维数分布函数 $f(\alpha)$ 。直接给出 $\alpha(q)$ 的计算公式:

$$\alpha(q) = \frac{d}{dq} [\tau(q)] = - \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\sum_i p_i^q \log(p_i)}{\sum_i p_i^q \log \varepsilon} \quad (8)$$

即 $\alpha(q)$ 是 $\tau(q)$ 的一阶微分。如果令 $\mu_i = \frac{p_i^q}{\sum_i p_i^q}$, 则(8)式可改写成:

$$\alpha(q) = - \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\sum_i \mu_i \log p_i}{\log \varepsilon} \quad (9)$$

$f(\alpha)$ 的计算公式如下:

$$f(\alpha) = - \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\sum_i \mu_i \log \mu_i}{\log \varepsilon} \quad (10)$$

以 $f(\alpha)$ 为纵坐标、 $\alpha(q)$ 为横坐标的绘图曲线称为多重分形谱 (Multi-fractal Spectrum)。横坐标 $\alpha(q)$ 的变化范围即: $\Delta\alpha = \alpha_{\max} - \alpha_{\min}$ 被定义为多重分形谱范围 (Spectrum Range SR), SR 越大,研究区空间分布越不均匀^[26]。

3 结果与分析

在以下分析中 δ 为 $S_1, S_2, S_3, \dots, S_{10}$ 、 ε 为 S_i 按图 2 再次细分的尺度; $\uparrow$ 表示增大、 $\rightarrow$ 表示“随着、则或相关的意思”、 $\downarrow$ 表示减小。

3.1 多样性与尺度

按公式(1)~(3),计算研究区的不同尺度下物种的 Shannon-Wiener 多样性指数 H 、均匀度指数 E 和 Margalef 多样性指数 K ,计算结果如图 3(a)~(c)。由图 3(a)~(c)可以看出:① $\rightarrow \delta \uparrow \rightarrow H \uparrow$ 、② $\rightarrow \delta \uparrow \rightarrow E \downarrow$ 、③ $\rightarrow \delta \uparrow \rightarrow K \downarrow$,且大小变化基本呈幂函数关系。显然,随着空间范围的增大($\delta \uparrow$), S 和 N 相应增加,物种的空间分布发生变化,均匀度下降、信息量增加,Shannon-Wiener 多样性指数 H 增大;并且 S 的增加比例远小于 N ,故 K 逐渐降低。当然,根据群落生态学的相关原理,随着 δ 趋向无穷,它们都会稳定在一定水平上而不再发生变化。

3.2 物种空间格局多重分形描述

以上描述物种多样的 3 个指数是以物种的概率或物种与群落大小之间的关系来系统的组成及其变化的。显然,这些指数没有反映物种空间分布、结构及其随尺度的变化情况。基于此,根据分形理论,按(4)~(10)式计算反映不同尺度下物种空间结构的多重分形参数。

图 4(a)、(b)分别是不同尺度下物种的 Lipshitz-Hölder 指数 $\alpha(q)$ 和及其维数分布谱 $f(\alpha)$ 。根据多重参数的几何性质^[29]及图 4 可知,在不同尺度下,物种的空间分布都具有多重分形的特征。故可以通过多重分形方法及其参数分析不同尺度下物种空间分布格局。

3.2.1 主要多重分形参数

表 2 给出了一些主要的多重分形参数及参数间的计算结果。表头部分符号的意义说明如下:假设在计算时 q 的取值范围预设设为 $[-N, N]$ ($N > 0$),但往往在 $[-N, N]$ 之间的部分值会使多重分形谱的右边发生畸变,不满足多重分形参数的几何性质^[30]。因此,在分析时应该取没有发生畸变的 $\alpha(q)$ 进行分析,设此时 q 的范围为 $[-c, d]$ ($0 \leq c, d \leq N, c \geq d$)。因此,表中的 $\alpha(+q) = \alpha(d)$, $\alpha(-q) = \alpha(-d)$, $\alpha_{\min} = \alpha(-c)$, $\alpha_{\max} = \alpha(d)$ 。 $Dist$ 表示以 $\alpha(0) - \alpha(+q)$ 为 x 坐标, $\alpha(-q) - \alpha(0)$ 为 y 坐标的点到直线 $y = x$ 的距离, $Dist$ 越大,

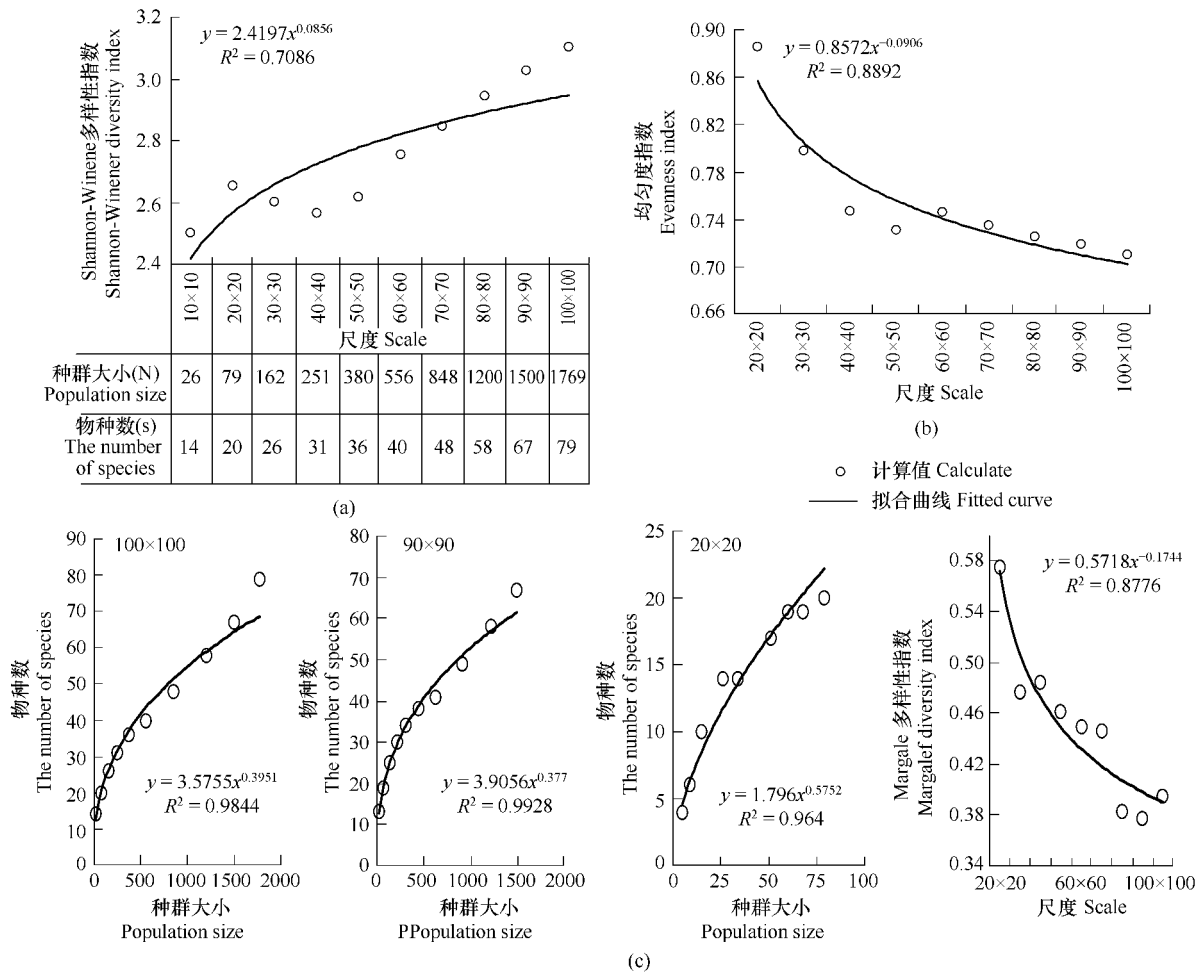


图3 多样性指数: (a) Shannon-Wiener 多样性指数, (b) 均匀度指数, (c) Margalef 多样性指数
Fig. 3 Biodiversity indices: (a) Shannon-Wiener index, (b) Evenness index, and (c) Margalef index

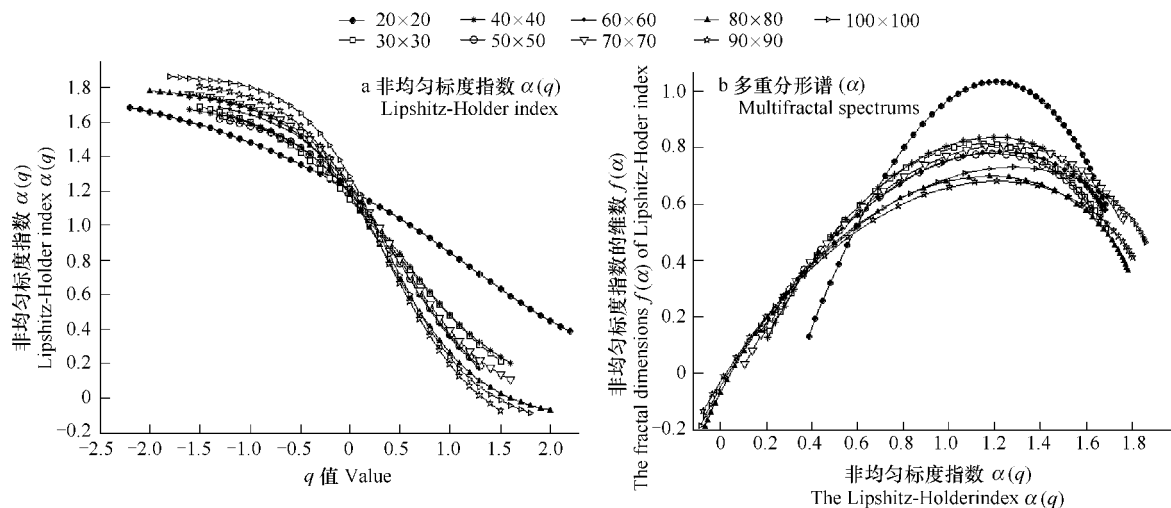


图4 非均匀标度指数 $\alpha(q)$ 和 $\alpha(q)$ 的多重分形谱 $f(\alpha)$
Fig. 4 Curves of (a) the Lipshitz-Holder exponent $\alpha(q)$ and (b) multifractal spectrums

多重分形谱越不对称。

表 2 一些主要的多重分形参数

Table 2 Selected multifractal and other parameters

	$f(\alpha(0))$	$\alpha_{\min}$	$\alpha(+q)$	$\alpha(0)$	$\alpha(-q) = \alpha_{\max}$	$\alpha(0) - \alpha(+q)$	$\alpha(-q) - \alpha(0)$	$SR = \alpha_{\max} - \alpha_{\min}$	$Dist$
20 × 20	1.034	0.3874	0.3874	1.2065	1.681	0.8191	0.4745	1.2936	0.2436
30 × 30	0.8137	0.2132	0.2132	1.1505	1.6867	0.9374	0.5361	1.4735	0.2837
40 × 40	0.8374	0.2034	0.2034	1.1959	1.6724	0.9925	0.4766	1.469	0.3648
50 × 50	0.7801	0.1881	0.1881	1.1884	1.6193	1.0003	0.4309	1.4312	0.4026
60 × 60	0.7862	0.1726	0.1726	1.2237	1.6823	1.0512	0.4585	1.5097	0.4191
70 × 70	0.8079	0.1061	0.1061	1.2411	1.7577	1.135	0.5166	1.6516	0.4372
80 × 80	0.6997	-0.0684	-0.0684	1.1779	1.7801	1.2463	0.6022	1.8485	0.4554
90 × 90	0.6813	-0.0745	-0.0745	1.2132	1.8046	1.2877	0.5913	1.879	0.4924
100 × 100	0.731	-0.0855	-0.0855	1.2849	1.8631	1.3704	0.5782	1.9485	0.5602

3.2.2 空间分布格局描述

(1) 多重分形谱 $f(\alpha)$ 的最大值

由 Legendre 变换变换可知:

$$f(\alpha) = q\alpha(q) - (1 - q)D(q) \quad (11)$$

对 α 求一阶微分, 可得: $\frac{\partial f}{\partial \alpha} = q$ 。因此, 多重分形谱的斜率为 q , 当 $q = 0$ 时, 斜率为 0, 此时对应于多重分形谱的“顶点”, 即 $f(\alpha)$ 的最大值为 $f(\alpha(0))$ 。将 $q = 0$ 代入 (11) 式, 得 $f(\alpha(0)) = D(0)$, 再将 $q = 0$ 代入 (7) 式, 得 $D(0) = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\log S}{\log(1/\varepsilon)}$, 即:

$$f(\alpha(0)) = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\log S}{\log(1/\varepsilon)} \quad (12)$$

另外, 由 (3) 式得 $k = \lim \frac{\log S}{\log N}$, 与 (12) 式对比可知 $f(\alpha(0)) \propto k$, 这一点可以从图 3(c) 和表 2 的第二列对比得到证实。当然, 这里的 $f(\alpha)$ 是具有空间意义的。

根据容量维 $D(0)$ 的意义, $f(\alpha(0))$ 表示分形对象在整个研究空间所占的百分比。显然随着空间尺度的增加, 物种增加的比率会减小, 相应也 $f(\alpha(0))$ 会降低, 这符合群落生态学的一般规律, 也复合 Margalef 多样性指数 k 的意义。

(2) 奇异性指数 α

一个复杂的分形体, 它的内部可分为由一系列不同的 α 值所表示的子集^[31]。对于本研究而言, 而同具有相同 α 值的物种数目 (子集) 可以记为 $S_\alpha(\varepsilon)$, 它与 ε 的大小有关, 可以写成 $S_\alpha(\varepsilon) \sim \varepsilon^{f(\alpha)}$, 因此, $f(\alpha)$ 就表示具有相同奇异性指数为 α 的物种子集维数。对于整个研究区域, 在不同尺度下, α 就表示物种空间分布概率测度的一个变化比率即 $p_i(\varepsilon) \propto \varepsilon^{\alpha_i}$, 也即在 ε 范围内 p_i 的局部行为。因此 α 可以用来描述物种局部空间特征, α_i 越小, 物种降低的比率越小并且该物种代表的范围越广^[22]。

从图 4 可以看出, 在不同尺度下 α 曲线的变化均不相同, 说明不同尺度上物种空间分布的局部特征和空间分布范围不同。

$\alpha_{\min}$ 、 $\alpha_{\max}$ 是 α 的最小值和最大值, 它们是分形集尺度属性的一个测度^[26]。对本研究 $\alpha_{\min}$ 代表概率最大、分形概率测度最为集中的物种子集属性, 而 $\alpha_{\max}$ 代表概率最小、分形概率测度最为分散的物种子集特征。从表 2 可以看出, 随着空间尺度的增大, $\alpha_{\min}$ 呈降低趋势, 而 $\alpha_{\max}$ 呈增加趋势, 说明在大尺度上物种空间分布集中, 而在小尺度上却比较分散。

另外一个重要的方面是分析 $\alpha_{\max}$ 和 $\alpha_{\min}$ 的差即多重分形谱的范围 (SR)。从表 2 可以看出, 随着尺度增加, SR 也逐渐增大, 即多重分形谱的范围在增大。表明空间尺度越大, 物种的空间分布越不均匀。

(3) 多重分形谱的对称性

$Dist$ 可以用来表示多重分形谱的对称性, 它可以从另一个侧面反映物种的空间分布情况: $Dist$ 越大, 越不对称, 物种空间分布越不均匀。从表 2 可以看出, 随着尺度增加, $Dist$ 逐渐增大, 说明尺度越大, 物种多重分形谱对称性越差, 其空间分布越不均匀。

3.3 多样性与空间格局之间的关系

在这里, 我们以 α_{min} 、 $Dist$ 、 SR 等反映物种空间特征的参数为例, 研究物种空间分布格局与生物多样性之间的关系。

图 5(1) ~ (3) 表明, 随着 α_{min} 增加, E 、 K 增加, 而 H 降低。对此, 根据先前的分析, 我们的解释如下:

$\alpha_{min} \uparrow \rightarrow$ 物种聚集度 $\downarrow \rightarrow$ 具有相同 α 值的子集概率测度 $\downarrow \rightarrow H \downarrow (\delta \downarrow)$

$\alpha_{min} \uparrow \rightarrow$ 物种聚集度 $\downarrow \rightarrow$ 物种分散程度 $\uparrow \rightarrow E \uparrow (\delta \downarrow)$

$\alpha_{min} \uparrow \rightarrow$ 物种聚集度 $\downarrow \rightarrow f(\alpha(0)) \uparrow (f(\alpha(0)) \propto k) \rightarrow k \uparrow (\delta \downarrow)$

图 5(4) ~ (6) 表明, 随着光谱范围 SR 的增加, E 、 K 降低, 而 H 增大, 它们之间的变化符合幂函数关系。如果对图 5(1) ~ (3) 的解释是正确的话, 对于 (4) ~ (6) 可以逆向进行解释:

$H \uparrow \rightarrow \alpha_{min} \downarrow \rightarrow \delta \uparrow \rightarrow SR \uparrow \rightarrow$ 物种空间分布越不均匀

$E \uparrow \rightarrow \alpha_{min} \uparrow \rightarrow \delta \downarrow \rightarrow SR \downarrow \rightarrow$ 物种空间分布均匀程度增加

$K \uparrow \rightarrow \alpha_{min} \uparrow \rightarrow \delta \downarrow \rightarrow SR \downarrow \rightarrow$ 物种空间分布均匀程度增加

因为 $Dist$ 在描述物种空间分布特征上与 SR 有同样的功能, 而且 $Dist$ 和 SR 与 E 、 K 、 H 之间的关系基本相同如图 5(7) ~ (9)。因此, $Dist$ 与 E 、 K 、 H 之间关系的解释不在赘述。

显然, 以上的分析与多样性及其空间格局随尺度变化的解释是一致的。可见物种多样性及其空间格局具有尺度依赖性, 且相互影响。故这些关系具有生态属性、格局与尺度的内在联系和意义, 而且数学相关也较高。

4 结论与讨论

(1) 通过分析发现, 在研究区域内基本具有随着空间尺度的增加, 均匀度指数 E 和 Margalef 多样性指数 k 减小、而 Shannon-Wiener 多样性指数 H 增大的规律。这也进一步证实物种多样性的尺度依赖性。

(2) 不同尺度下, 物种空间分布具有多重分形特征, 表明多重分形分析方法可以用来定量分析物种的空间分布格局即: 尺度越大, α_{min} 越小, 多重分形谱范围 SR 宽、其对称性越差, 因而物种越聚集, 空间分布越不均匀。

(3) 不同尺度下的物种多样性与其相应的空间格局存在线性或幂函数关系。物种多样性反映生态属性的重要方面^[6], 而生物多样性及其空间格局都受空间尺度的影响, 因此, 这些关系具有生态属性、格局与尺度的内在联系, 具有生态学意义, 这也基本回答了开篇所提出的问题。

(4) 以上一些变化规律或关系, 对于不同的研究区域或森林类型, 还需要进行深入的研究和验证。但多尺度思想是研究物种多样性变化规律的关键, 多重分形分析本身也是一种多尺度分析方法, 在多重分形参数计算过程中, 整个研究区域被分成一系列具有不同 α 值的子集, 相同子集的维数用 $f(\alpha)$ 表示, 因此, 多重分形方法在分析不同尺度下物种或群落空间结构的细微差别具有很大的优势。

(5) 传统的生物多样性指数如 H 、 E 等不具备反映物种空间特征的能力, 而多重分形参数能够定量反映不同尺度下物种的空间分布格局, 并与多样性指数存在一定的关系。因此, 将多重分形参数作为新的能够反映空间格局的物种多样性指数是值得考虑和研究的课题。

(6) 物种多样性及空间分布格局是很复杂。对所构建的物种多样性指数与空间格局间的线性或非线性关系应该谨慎解释。首先格局中包含尺度, 尺度的变化影响多样性; 其次, 多尺度和多重分形分析是一种非线性的分析思路, 线性关系是复杂的非线性关系的简化; 最后, Goodchild 等人的研究表明, 多种地理现象和过程具有明显的尺度依赖性, 其尺度行为并非按比例线性或均匀变化^[32], 因此, 非线性是思考问题的一种更好的

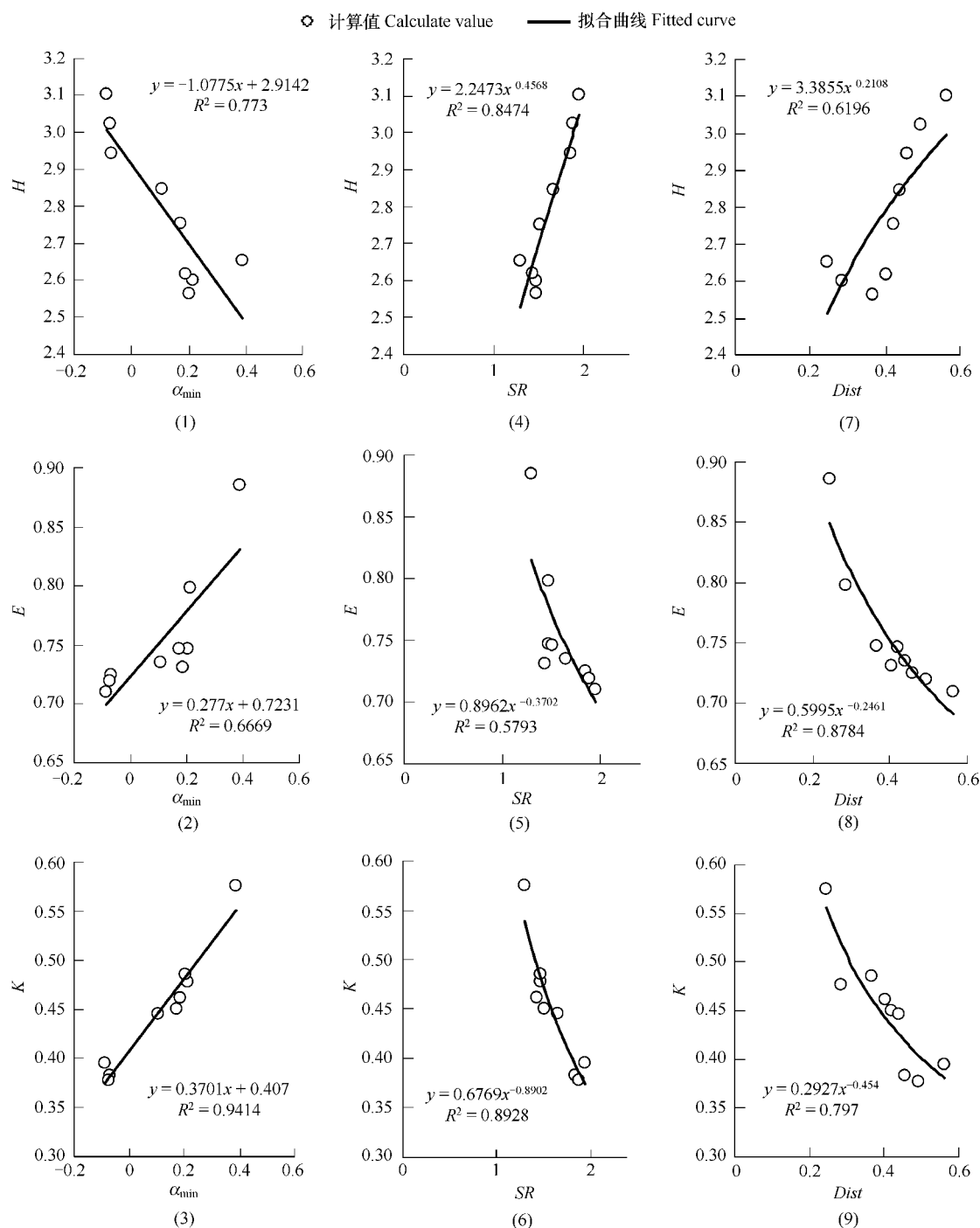


图5 生物多样性指数与空间格局参数之间的关系

Fig. 5 Relationships between biodiversity indices and spatial pattern parameters

$\alpha_{\min}$: 非均匀尺度指数的最小值, the minimum value of the Lipshitz-Hölder index α ; SR : 非均匀尺度指数 α 的变化范围 variable range of the Lipshitz-Hölder index α ; $Dist$: 多重分形谱的对称性, the symmetry of multifractal spectrum; H : Shannon-Wiener 生物多样性指数, Shannon-Wiener biodiversity index; E : 均匀度指数, Evenness index; K : Margalef 生物多样性指数, Margalef biodiversity index

方式。

分形是非线性理论的重要部分,强调尺度的重要性,并可揭示格局与过程的关系,适应现代生态学研究的需要(WWW at URL: <http://www.eedu.org.cn>); 物种多样性是重要的生态属性之一,与生态过程紧密相关。二者结合将为生物多样性方面的研究带来新的动力。

References:

- [1] Nicholas J T, Peter M A. Modelling scale in geographical information science. New York : Wiley, 2001.
- [2] Liu Y C, Fan L X. On Scale Issues of Remote Sensing in Forestry. Journal of Northwest Forestry university, 2004, 19(4): 165 — 169.
- [3] Meng B, Wang J F. A Review on the Methodology of Scaling with Geo-Data. Acta Geographica Sinica, 2005, 60(2): 277 — 288.
- [4] Tunner M G. Spatial and temporal analysis of landscape patterns. Land. Scape Ecology, 1990, 4: 21 — 30.
- [5] Sheng Z H. Multi-scale Study on the Vegetation-environment Relationship of a Mountain Forest Transect. Acta Ecologica Sinica, 2002, 22(4): 461 — 470.
- [6] He Z B, Zhao W Z, Chang X X, *et al.* Scale dependence in desert plant biodiversity. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(6): 1146 — 1149.
- [7] Anderson M T, McNaughton S J, Ritchie M E. Scale-dependent relationships between the spatial distribution of a limiting resource and plant species diversity in an African grassland ecosystem. Oecologia, 2004, 139: 277 — 287.
- [8] Simic A, Chen J M, Liu J, *et al.* Spatial scaling of net primary productivity using subpixel information. Remote Sensing of Environment, 2004, 93: 246 — 258.
- [9] William E K. Extrapolating species abundance across spatial scales. Science, 1998, 281: 1513 — 1515.
- [10] Ren H B, Zhang L Y, Ma K P. comparison of fractal characteristics of species richness patterns between different plant taxonomic groups along an altitudinal gradient. Acta Phytocolorica Sinica, 2005, 29(6): 901 — 909.
- [11] Yue W Z, Xue J H, Tan W Q. Spatial scale analysis of the diversities of urban landscape: A case study within the external circle highway of Shanghai City. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(1): 122 — 128.
- [12] Nagendra H, Gadgil M. Biodiversity assessment at multiple scales: Linking remotely sensed data with field information. Ecology, 1999, 96: 9154 — 9154.
- [13] Li H B, Wu J G. Use and misuse of landscape indices. Landscape Ecology, 2004, 19: 389 — 399.
- [14] Zhao H J, Ji L Q. Biodiversity assessment at broad scale. Biodiversity Science, 2003, 11(1): 78 — 85.
- [15] Lam N S N, De L Cola. Fractal in Geography. Englewood Cliffs, New Jersey, 1993.
- [16] Miguel A M, Yakov A P, Edmund P. Scaling, fractals and diversity in soils and ecohydrology. Ecological Modelling, 2005, 182: 217 — 220.
- [17] Benoît Mandelbrot. The Fractal Geometry of Nature. Shanghai: Shanghai Far East Press, 1998.
- [18] Adolfo N D, Daniel G, Roberto Q, *et al.* Multifractal characterization of soil pore systems. Soil Science Society of America Journal, 2003, 67(5): 1361 — 1369.
- [19] Peter A B. Fractals and Geostatistical methods in landscape studies. In: Lam, N. S. N and L. De Cola. Fractal in Geography, PTR Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1993. 87 — 121.
- [20] Ma K M, Ye W H, Sang W G. Study on plant community diversity in Donlingshan mountain, Beijing, China X. β Diversity and fractal analysis on transect on Different Scales. Acta Ecologica Sinica, 1997, 17(6): 626 — 634.
- [21] Zu Y G, Ma K M, Zhang X J. A fractal method for analyzing spatial heterogeneity of vegetation. Acta Ecologica Sinica, 1997, 17(3): 333 — 337.
- [22] Iudin D I, Gelashvili D B, Rozenberg G S. Multifractal Analysis of the Species Structure of Biotic Communities. Doklady Biological Sciences, 2003, 389: 143 — 146. Translated from Doklady Akademii Nauk, 2003, 389(2): 279 — 282.
- [23] Guo Y P, Zhang J T, Liu X Z. Study on the Species Diversity of the Plant Community in Tianlong Mountain, Shanxi. Journal of Shanxi University (Nat. Sci. Ed.), 2005, 28(2): 205 — 208.
- [24] Sun X, Wu Z Q, H Y. The Theory and Application of Fractal. Hefei: The Press of University of Science and Technology of China, 2003, 53 — 88.
- [25] Du H Q, Zhao X W, Fan W Y. Fractal Characterization for Relationship between Temperature Distribution and Ground Spatial Structure in Beijing Areas. Journal of Remote Sensing, 2005, 9(6): 697 — 707.
- [26] Parrinello T, Vaughan R A. Multifractal analysis and feature extraction in satellite imagery. International Journal of Remote Sensing, 2002, 23(9): 1799 — 1825.
- [27] Cheng Y G, Zhou Y X. A Study of Multifractal Measure of the Spatial Structure of the Urban System in Central Plains. Acta Scientiarum Naturatum, Universitatis Pekinensis, 2001, 37(6): 810 — 818.
- [28] Lee A K, John F W. Quantifying spatial structure of volumetric neutral models. Ecological Modelling, 2005, 186: 312 — 325.
- [29] Zhou W X, Wu T, Yu Z H. Geometrical Characteristic of Singularity Spectra of Multifractals. Journal of East China University of Science and Technology, 2000, 26(4): 390 — 395.
- [30] Du H Q, Fan W Y, Zhao X W, *et al.* The factors of influence fractal measurement of remote sensing data. Application science of mathematic technique. Kunming: Yunnan Science and Technology Press, 2006, 180 — 185.

- [31] Chen Y, Chen L. The Fractal Geometry. Beijing: The Earthquake Press, 1998. 127—128.
- [32] Li L, Wu F. Modeling and visual presentation of multiscale spatial data. Beijing Science Press, 2005. 1—6.

参考文献:

- [2] 刘悦翠,樊新良. 林业遥感信息的尺度问题研究. 西北林学院学报, 2004, 19(4): 165~169.
- [3] 孟斌,王劲峰. 地理数据尺度转换方法研究进展. 地理学报, 2005, 60(2): 277~288.
- [5] 沈泽昊. 山地森林样带植被-环境关系的多尺度研究. 生态学报, 2002, 22(4): 461~470.
- [6] 何志斌,赵文智,常学向,等. 荒漠植被植物种多样性对空间尺度的依赖. 生态学报, 2004, 24(6): 1146~1149.
- [10] 任海保,张林艳,马克平. 不同植物类群物种丰富度垂直格局分形特征的比较. 植物生态学报, 2005, 29(6): 901~909.
- [11] 岳文泽,徐建华,谈文琦,等. 城市景观多样性的空间尺度分析——上海市外环线以内区域为例. 生态学报, 2005, 25(1): 122~128.
- [14] 赵海军,纪力强. 大尺度生物多样性评价. 生物多样, 2003, 11(1): 78~85.
- [20] 马克明,叶万辉,桑卫国,等. 北京东灵山地区植物群落多样性研究 X. 不同尺度下群落样带的 β 多样性及分形分析. 生态学报, 1997, 17(6): 626~634.
- [21] 祖元刚,马克明,张喜军. 植被空间异质性的分形分析方法. 生态学报, 1997, 17(3): 333~337.
- [23] 郭艳萍,张金屯,刘秀珍. 山西天龙山植物群落物种多样性研究. 山西大学学报(自然科学版), 2005, 28(2): 205~208.
- [24] 孙霞,吴自勤,黄昀. 分形原理及其应用. 合肥:中国科学技术大学出版社, 2003. 53~88.
- [25] 杜华强,赵宪文,范文义. 北京地区温度场分布与地面空间结构关系的分形描述. 遥感学报, 2005, 9(6): 697~707.
- [27] 陈彦光,周一星. 豫北地区城镇体系空间结构的多分形分析. 北京大学学报(自然科学版), 2001, 37(6): 810~818.
- [29] 周炜星,吴韬,于遵宏. 多重分形奇异谱的几何特性 II. 配分函数法. 华东理工大学学报, 2000, 26(4): 390~395.
- [30] 杜华强,范文义,赵宪文,等. 影响遥感数据分形测量的因素研究. 2006 数学技术应用科学学术论坛, 云南·昆明. 见:数学技术应用科学. 昆明:云南科技出版社, 2006. 180~185.
- [31] 陈禹贡,陈凌. 分形几何学. 北京:地震出版社, 1998. 127~128.
- [32] 李霖,吴凡. 空间数据多尺度表达模型及其可视化. 北京:科学出版社, 2005. 1~6.