

生态学中的尺度及尺度转换方法

吕一河, 傅伯杰

(中国科学院生态环境研究中心 系统生态开放研究室, 北京 100085)

摘要: 尺度作为生态学的重要范式, 已经引起了广泛重视, 但对尺度问题的研究还不够成熟。尺度具有多维性特点, 即功能尺度、空间尺度、时间尺度等, 但生态学研究的重点是空间和时间尺度。并且时空尺度还具有复杂性、变异性特征。尺度研究的根本目的在于通过适宜的空间和时间尺度来揭示和把握复杂的生态学规律。为此, 科学有效的尺度选择和尺度转换方法不可或缺。常见的尺度转换方法有图示法、回归分析、变异函数、自相关分析、谱分析、分形和小波变换, 同时遥感和地理信息系统技术在尺度研究中也发挥着重要作用。结合实例对上述方法进行了分析和论述, 认为各种方法都有其内在的优势和不足, 新方法的引入和应用对于尺度转换方法体系的充实和完善非常重要。有关尺度的研究将进一步加强, 研究的重点是尺度变异性、不同尺度间的相互作用机制以及尺度转换方法等。

关键词: 生态学; 尺度; 尺度转换

Ecological scale and scaling

LÜ Yi-He, FU Bo-Jie (Department of Systems Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(12): 2096~2105.

Abstract: Scale, as an important paradigm in ecology, has aroused wide attention. But the study of ecological scale, which is far behind maturity, will be enhanced. The variously defined ecological scale is multi-dimensional. So there are spatial, temporal and functional scales, etc. Functional scale and spatial-temporal scales are different and closely related. In general, functional scale does not have a precisely defined physical dimension. We can find the spatial-temporal scales of the specific organization within some ecological hierarchy. Ecological scale is different from the scale in cartology. The issues concerning ecological scale are very complex and variant. The very purpose of scale related research in ecology is to find the underlying mechanisms of the ecological world by the use of the appropriately selected spatial-temporal scales. Therefore, the selection of suitable research scales and the methods of scaling is very important.

The establishment of the right scales is the basis and origin, because it has direct effects on the experimental design and data collection. Different research scales can result in different interpretation and understanding of the ecological regimes. In this respect, ecologists generally think much of it. In a theoretical sense the best should be achieved using a hierarchy of scales having the capacity to correlate abiotic, biotic and human processes. Often the scales are chosen according to perceptual capabilities or by technological or logistical constraints. The status of research projects and the features and complexity of the ecological entities being observed are the main factors influencing scale selection.

The ecological entities and processes are subject to the constraints from the ecological scales related. There are constraints and thresholds on each scale. The results of scaling are difficult to understand according to the classical hierarchy theory. There are exchanges of material, energy and information

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973 项目, G2000046807)和中国科学院知识创新工程项目(中国陆地生态系统评价研究)(KZCX2-405)资助项目。

收稿日期: 2000 12 25; **修订日期:** 2001-05-10

作者简介: 吕一河(1974~), 男, 河北涞水县人, 博士研究生。主要从事景观生态学研究。

among various scales. Scaling, including scaling-up and scaling-down, can be carried through by the control of grain and extent. Mathematical models and computer simulation techniques are often used in the process of scaling because of the complexity of ecological systems. There are often chaos and other nonlinear behaviors in the transition zone of scale dominions.

Several methods and mathematical models are often used in scaling. They are graphics, regression analysis, variogram, autocorrelation analysis, spectral analysis, fractal analysis and wavelet transformation. The techniques of geographical information system (GIS) and remote sensing (RS) are very helpful in the process of scaling.

The hotspots of research will be the variability and interaction of ecological scales and methods of scaling. The principles and applications of ecological scale will be improved through the deepening and advancing of the understanding and skills.

Key words: ecology; scale; scaling

文章编号:1000-0933(2001)12-2096-10 中图分类号:Q141 文献标识码:A

生态学中的尺度最具复杂性和多样性,它是生态学研究的核心问题之一。但是在几乎所有生态学研究和应用中,尺度问题都没有明确清晰的论述和充分量化^[1]。格局与过程是生态学的重要范式。过程产生格局,格局作用于过程。若要正确理解格局与过程的关系就必须认识到其依赖于尺度的特点,即尺度效应^[2]。对生态学中的尺度进行广泛而深入的研究具有非常重要的理论和实践意义。一方面,生态学家在研究同一生态系统时,由于各自所采用的时间和空间尺度大小不一,结论往往差别很大;虽然生态学家已经认识到时空尺度的重要意义,但是如何选择合适的尺度对某一生态过程进行研究,还没有形成完整的理论和方法体系^[3];同时,对不同尺度上生态过程相互作用机制的研究也还很不充分。另一方面,从自然生态系统到社会-经济-自然复合生态系统,生态学家所面临的研究对象异常复杂;尺度便成为解析这些复杂系统的有效手段以及整合生态学知识和研究成果的核心轴线。深刻理解和把握生态学尺度和尺度效应对于顺利开展生态系统评价与管理,生物多样性和自然资源保护、利用与可持续管理等实践活动,保证其科学性和实效性也同样非常必要和迫切。本文通过分析近十几年来生态学中有关尺度问题的主要研究成果,在此基础上就生态学中尺度的概念、特征和分析方法等进行了论述。对生态学尺度问题认识的深入无疑会在一定程度上促进生态学理论和实践的进一步发展。

1 尺度的概念与特征

尺度是生态学中的一个基本概念,早已引起了广泛关注。尽管通常意义上的尺度是研究对象或现象在空间上或时间上的量度,即空间尺度和时间尺度^[4],但是生态学家们对尺度仍是众说纷纭。尺度还可以指研究对象或过程的时间或空间维、用于信息收集和处理的时间或空间单位^[5]、由时间或空间范围决定的一种格局变化^[6]等。诚然生态学家们是从不同出发点和角度对尺度概念进行表述的,因而侧重点不尽相同。总起来讲,尺度的存在根源于地球表层自然界的等级组织和复杂性。尺度本质上是自然界所固有的特征或规律,而为有机体所感知。因而尺度又可分为测量尺度和本征(Intrinsic)尺度。测量尺度是用来测量过程和格局的,是人类的一种感知尺度,随感知能力的发展而不断发展。本征尺度是自然现象固有而独立于人类控制之外的。测量尺度相当于研究手段,隶属方法论范畴,而本征尺度则是研究的对象。尺度研究的根本目的在于通过适宜的测量尺度来揭示和把握本征尺度中的规律性。

要准确把握尺度概念还要清楚通常意义的时空尺度与组织尺度(Organizational scale)或功能尺度(Functional scale)的区别与联系。所谓组织尺度和功能尺度是生态学组织层次(如个体、种群、群落、生态系统、景观)在自然等级系统中所处的位置^[1]和所完成的功能,类似于常用的种群尺度、群落尺度等。通常应用中尺度是抽象的、精确的;而组织尺度和功能尺度存在于等级系统之中,以等级理论(Hierarchy theory)为基础,是具体的,在自然等级结构中的位置是相对明确的,但是其时空维度是模糊的。这也正是尺度区别于等级理论中具体的等级或组织层次之所在。尽管组织尺度和功能尺度不等同于通常意义上的时空尺度,

但是它们却可以通过某些特定的时空尺度来刻画^[7]。

在生态学中,尺度的用法往往不同于地理学或地图学中的比例尺(Scale),并且表现为相反的含义。大尺度通常指较大的空间范围,对应于小比例尺、低分辨率;而小尺度则对应于大比例尺和高分辨率。尺度的概念主要有以下几个基本特征:

(1)多维性与二重性 广义上,尺度有多种维度,例如组织尺度和功能尺度、时空尺度等。这对于分析和描述不同性质的生态学问题是必要的。但是,尺度的空间和时间两个维度在生态学研究实践中更受重视,因而主要表现为时空二重性特征。截至目前,对空间尺度的研究较多,所涉及的问题也较广,而对时间尺度的研究相对较少。实际上,自然现象和过程的空间和时间尺度是紧密相关的,一定空间尺度内的生态实体都有一定的形成演化过程,从而也就与一定的时间尺度相对应。在生态学研究把二者结合起来就能够更为充分地获得研究对象的信息,也就更有助于揭示和把握其规律性。

(2)层次复杂性 尺度层次复杂性是地表自然界等级组织和复杂性的反映。地表自然界的发展演化是一个系统性的复杂过程。因而在研究中也应该构筑相应的尺度体系。Delcourt 提出了宏观生态研究的 4 个尺度域^[3,8]:①微观尺度域(Micro-scale Dominion),包括 1~500a 的时间范围和 $1\sim 10^6\text{m}^2$ 的空间范围。在这一尺度域内可以研究干扰过程(火干扰、风干扰和砍伐等)、地貌过程(土壤剥蚀、沙丘运动、滑坡崩塌、河流输移等)、生物过程(种群动态、植被演替等)和生境破碎化过程等。②中观尺度域(Meso-scale Dominion),包括 500~ 10^4a 的时间范围和 $10^6\sim 10^{10}\text{m}^2$ 的空间范围。这一尺度域囊括了最近间冰期以来次级支流流域上的事件。③宏观尺度域(Macro-scale Dominion),包括 $10^4\sim 10^6\text{a}$ 的时间范围和 $10^{10}\sim 10^{12}\text{m}^2$ 的空间范围。在这一尺度域内发生了冰期-间冰期过程以及物种的特化和灭绝。④超级尺度域(Mega-scale Dominion),包括 $10^6\sim 4.6\times 10^9\text{a}$ 的时间范围和大于 10^{12}m^2 的空间范围,与类似于地壳运动的地质事件相适应。Delcourt 所定义的尺度域是粗线条的。在每一个尺度域内还可以做进一步细化。在近年来的生态学研究,所涉及的尺度问题多集中于微观和中观尺度域内。有的研究所涉及的尺度更小,在空间上达到了 cm 级以下^[9],时间上达到季、月以下。

(3)变异性 生态学的格局和过程在不同尺度上会表现出不同的特征。正是这种变异性增加了跨尺度预测的难度。不同尺度的现象和过程之间相互作用、相互影响,表现出复杂性特征。大尺度上发现的许多全球和区域性生物多样性变化、污染物行为、温室效应等,都根源于小尺度上的环境问题;同样,大尺度上的改变(如全球气候变化和大洋环流异常)也会反过来影响小尺度上的现象和过程。不同尺度间的相互作用机制正是生态学研究的重要课题。

鉴于尺度问题的变异性、复杂性和研究上的不充分性,美国环保局在 1992 年建立了多尺度生态系统实验研究中心(MEERC)。其目的在于:建立一系列在大小、形状和生物复杂性上不同的试验生态系统;量化生态系统对营养和污染物输入的尺度依赖性响应;以实验生态系统为依托建立和发展具有广泛适用性的跨尺度预测模型;最后,将这三方面的工作进行综合以解决尺度依赖性效应的评价和预测。

2 尺度分析

尺度分析在生态学理论和实践上都是相当重要的。要想准确预测自然干扰和人为因素对生态系统的影响,首先必须了解和评价格局与过程随尺度的变化。因此,在自然和干扰系统的研究和量测、试验的设计与分析以及管理目标和政策的建立等方面,尺度分析方法将会受到越来越多的重视。

尺度分析主要面临两方面的问题,即怎样进行尺度选择和如何完成尺度间的转换与推绎。这两方面的问题紧密联系、相辅相成。

尺度分析中涉及粒度(Grain)、幅度(Extent)和范围(Scope)3 个重要概念。粒度为研究范围内最小的空间或时间单位;幅度即研究区域的大小或需要考虑的时程长度;范围通常是幅度与粒度之比,其结果为无量纲化数据。按照同质性原理,同一方程的各项应该具有相同的范围^[10]。

2.1 尺度选择

尺度选择关系到尺度研究中的试验设计和信息收集,是研究的起点和基础。尺度选择的不同,可能会导致对生态学格局和过程及其相互作用规律不同程度的把握,最终会影响到研究成果的科学性和实用性。

因此,生态学家一向重视尺度选择。

理论上讲,应该选取能够将生物、非生物和人类过程关联起来的最佳尺度^[1],但是尺度选择却经常按照感知能力或技术的、逻辑的限制来完成^[12]。在研究景观格局时,尺度的选择对于减少误差是非常重要的,因此,O'Neill 等人认为粒度应该比研究的空间范围小 2~5 倍,而在应用优势度(Dominance)、形状(Shape)、聚集度(Contagion)等景观结构指标时为避免偏差,取样面积必须比斑块大 2~5 倍^[13]。

实际上,尺度的选择受到一系列因素的影响和制约。首先是研究项目的状况,例如项目的规模、资助强度、目标、任务和时限等;其次是研究对象的性质和复杂程度。在充分考虑这些因素的情况下,尺度选择应该具有层次性,即至少应包括核心尺度、小尺度组分和大尺度背景三个层次。这样有助于全面把握研究对象的特征与规律。

2.2 尺度转换

尺度转换(Scaling)就是跨越不同尺度的辨识、推断、预测或推绎。不同尺度上生态实体和过程的性质受约于相应的尺度,每一尺度上都有其约束体系和临界值。经典等级理论认为,尺度转换必然要超越这些约束体系和临界值,转换后所获得的结果将很难理解。但是,在不同尺度的系统之间存在着物质、能量和信息的交换与联系,正是这种联系为尺度转换提供了客观依据。

尺度转换,包括尺度上推(Scaling-up)和尺度下推(Scaling-down),可以通过控制模型的粒度和幅度来实现^[14]。由于生态系统的复杂性,尺度转换往往采用数学模型和计算机模拟作为其重要工具^[1]。在同一尺度域中,由于过程的相似性,尺度转换容易,模型简单适宜,预测的准确性高;而跨越多个尺度域时,由于不同过程在不同尺度上起作用,尺度转换则必然复杂化。在尺度域间的过渡带多会出现混沌、灾变或是其它难以预测的非线性变化^[2]。

2.2.1 图示法 图示法是将变量或属性值以图形方式直观表达,揭示其中的规律性,是最为简便易行的方法,因而获得了广泛的应用。例如:方差估计(S^2)与样本大小成反比关系, $S^2 \propto 1/n$,其中 n 是样本容量,或对于空间数据而言的样地大小,方程两边取对数并引进比例常数有: $\ln S^2 = a - \ln n$ 。令 $y = \ln S^2$ 、 $x = \ln n$ 得到斜率为 -1 的直线 $y = a - x$ 。只要样本在空间上是随机和独立分布的,这种关系便成立。图示法的最显著特点是其直观性,能以可视化的形式展现尺度转换过程中多个尺度上生态学格局和过程及其相互作用特征的变化规律。叶万辉、马克平等对北京东灵山地区植物群落多样性进行了研究,研究中用图示法很好地表达了空间尺度变化对群落 α 多样性测度的影响^[15]。严格地讲,图示法并不是一种独立的尺度转换方法,而是其他定性特别是定量研究方法结果分析和表达的有效手段,其最重要的作用在于能将抽象的结果生动直观地表现出来,从而有助于生态学相关过程和规律的理解、分析与把握。

2.2.2 回归分析 尺度研究中,回归分析的应用也比较常见,而且主要应用于尺度上推。回归分析模型的类型是多样的(线性、非线性、一元、多元),根据实际问题的特点,在实际应用中就会选择适宜性高的模型类别。例如,S. Kathleen Lyons 等在评价物种丰富度纬度梯度尺度依赖性的研究中应用的非线性回归模型,建立了物种数 S 、面积 A 、纬度 L^* 间的非线性关系^[16],它们之间的基本关系可以表示为:

$$S = A + L^* + AL^* + e \quad (1)$$

式(1)中 e 为随机误差。将物种面积关系 $S = CA^Z$ 和物种纬度关系 $S = Fe^{G(L^*+1)}$ 引入式(1)有:

$$S = CA^Z + Fe^{G(L^*+1)} + B\{e^{G(L^*+1)}\}(A^Z) + e \quad (2)$$

式(2)中 S 为物种丰富度; A 为面积因子(尺度因子); L^* 为纬度因子; C 、 Z 、 F 、 G 为待估常数,而 B 为面积因子与纬度因子间的交互影响系数,反映纬度梯度上物种丰富度的尺度依赖性。这项研究通过上述模型对整个美洲大陆 Marsupials 和 Bats 两类动物进行了分析,结果表明,从 1 000km² 到 25 000km² 的五种尺度上,纬度因子都起主导作用;而面积(尺度)因子和纬度因子的交互影响很小。在所选的尺度范围内,尺度效应不明显的原因主要有三个方面:首先是物种分布范围的重叠性;其次,对于所研究的两类动物物种来说取样尺度已经足够大,但并不意味着研究更多物种时会出现类似情形;第三,所依据的专题地图不够精确。因此,上述模型在类似的尺度范围内分析多个物种时(或者在更小的多重尺度上)可能会表现出更明显的尺度效应。

Morris 采用多元线性回归模型研究了两种温带啮齿类动物在小生境 (Microhabitat) 和大生境 (Macrohabitat) 两种尺度上的种群密度、资源利用和生境选择的尺度转换特征^[12]。他发现大生境和时间都是预测种群密度的显著因子,而小生境却不是。Morris 所采用的方法成功地揭示了种群密度、资源利用和生境选择在两种生境尺度上的转换特征,对传统的关于物种共栖的解释是一个补充。

2.2.3 半变异函数 半变异函数分析是地统计学中进行空间异质性研究的重要方法。通过比较为特定滞后距离分隔的同一随机变量的不同值,可以在多个尺度上对区域化随机变量的变异性进行量度。半变异函数的形式为:

$$g(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [X(i) - X(i+h)]^2 \quad (3)$$

式(3)中, $N(h)$ 为滞后距离等于 h 时的点对数, $X(i)$ 、 $X(i+h)$ 分别为区域化随机变量 X 在位置 i 和 $i+h$ 时的取值。通过式(3)可以获得半变异函数的估计值,要得到半变异函数的理论模型还必须对估计值进行参数拟合。变异函数理论模型的拟合过程主要包括确定曲线类型、参数最优估计和回归模型的统计检验^[15]。变异函数的理论模型及其变换见表1。一般根据最小二乘法进行参数估计。可以通过残差平方和、标准误、 F 检验、相关系数和决定系数来检验回归方程的显著性^[19]。变异函数理论模型中 a 称为变程,即最大可测变异尺度, h 为变程以内的变异尺度。

表1 变异函数的几种理论模型及变换

Table 1 Theoretical models of Variogram and transformations

理论模型类别 Theoretical model categories	变换 Transformations	线性模型 Linear models
球状模型 (Spherical model)		
$\gamma(h) = \begin{cases} 0 & h=0 \\ C_0 + C \left[\frac{3h}{2a} - \frac{h^3}{2a^3} \right] & 0 < h \leq a \\ C_0 + C & h > a \end{cases}$	$\gamma(h) = y \quad \begin{cases} C_0 = b_0 \\ h = x_1 \quad \frac{3c}{2a} = b_1 \\ h^3 = x_2 \quad \frac{-c}{2a^3} = b_2 \end{cases}$	$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2$
指数模型 (Exponential model)		
$\gamma(h) = \begin{cases} 0 & h=0 \\ C_0 + C(1 - e^{-\frac{h}{a}}) & h > 0 \end{cases}$	$\gamma(h) = y \quad \begin{cases} e^{-\frac{h}{a}} = x_1 \\ C_0 + C = b_0 \\ C = b_1 \end{cases}$	$y = b_0 + b_1 x_1$
高斯模型 (Gaussian model)		
$\gamma(h) = \begin{cases} 0 & h=0 \\ C_0 + C(1 - e^{-\frac{h^2}{a^2}}) & h > 0 \end{cases}$	$\gamma(h) = y \quad \begin{cases} e^{-\frac{h^2}{a^2}} = x_1 \\ C_0 + C = b_0 \\ -C = b_1 \end{cases}$	$y = b_0 + b_1 x_1$
幂函数模型 (Power model)		
$\gamma(h) = Ah^\theta \quad 0 < \theta < 2$	$\lg \gamma(h) = y \quad \begin{cases} \lg h = x_1 \\ \lg A = b_0 \\ \theta = b_1 \end{cases}$	$y = b_0 + b_1 x_1$
对数模型 (Logarithmic model)		
$\gamma(h) = A \log h$	$\gamma(h) = y \quad \begin{cases} \lg h = x_1 \\ A = b_0 \end{cases}$	$y = b_0 x_1$

根据数理统计原理,区域化随机变量 X 可以分解为两部分,即自相关部分 X_a 和随机部分 X_r 。自相关部分引起的空间异质性随尺度而变化,变异函数分析则是研究空间自相关部分引起的空间异质性随尺度

变化的有效工具。变异函数分析多用于尺度上推,但是这种上推有一定限度,即受制于变程 a 。变异函数适合于对一定范围内空间尺度上的变异特征和规律进行研究。

E. W. Sanderson 等应用地统计学的变异函数和克里格法(Kriging)研究了沼泽盐生植物冠层含水量的尺度转换特征^[20]。郭旭东等应用类似的方法分析了河北省遵化平原土壤表层速效磷、速效钾和有机质 3 种养分的时空变异规律^[21]。他们发现从 1980 年到 1999 年经过 20a 的时间,3 种土壤养分的空间分布格局都发生了不同程度的变化,而发生这些变化的主要原因是土地利用变化和农田管理。这项研究为合理利用和管理土地资源提供了必要的决策依据。

Joe E. Meisel 等用半变异函数分析法研究了不同景观中变异性的尺度探测问题^[22]。他们用变异函数法比较了美国黄石国家公园大型有蹄类动物冬季游牧空间格局与公园北部环境因子影响下的牧草丰富性,同时评价了变异函数在具有一个或多个不同尺度格局地图上探测已知变异性尺度的能力,以及缺失数据数量和空间分布对变异函数结果及其解译的影响。黄石公园北部,变异函数通过景观环境数据(方位、海拔、生境类型、坡度)在每一图层上明显识别出了变异的优势尺度;但是对于从不连续的研究区域上获得的有蹄类动物游牧数据,变异函数却难以解释。尽管对模拟二进制地图的适用性良好,但是标准变异函数分析仍然难以探测出实际生态数据的多尺度格局。变异函数对于数据缺失量表现敏感。

2.2.4 自相关分析 自相关分析扩展了相关系数概念,用以描述变量自身的相关性,在一定的滞后距离(h)或时间(t)上可以研究变量在空间或时间上的自相关特征^[23], h 或 t 即代表空间或时间尺度。自相关分析是一种多尺度分析方法,可用于尺度上推。时间自相关分析的基础是时间序列,空间自相关的量度是空间自相关指标(Spatial autocorrelation indices)。空间自相关指标主要有莫兰系数(Moran Coefficient)、盖利比(Geary Ratio)和克利夫-奥德统计量(Cliff-Ord statistic)^[24]。其数学形式见表 2。

基于上述空间自相关指标,Y. Qi 和 J. Wu 研究了空间尺度变化对景观格局的影响。研究表明,空间自相关指标是尺度依赖性的,由这些指标量测到的空间自相关程度随着进行分析的空间尺度变化而变化。随着空间尺度的增大,莫兰系数和克利夫-奥德统计量减小而盖利比增大。这说明随着空间尺度的加大,总的空间自相关程度在下降。空间自相关格局随尺度变化表现出阈限行为,就是说,当超过一定的空间尺度时,尺度效应便很快消失。因此,在研究空间格局时必须考虑尺度效应,以及多尺度转换特征,否则难以保证结果的科学性。

表 2 空间自相关指标

Table 2 Spatial autocorrelation indices

类型 Categories	表达式 Formula	符号说明 Symbols denotation
莫兰系数 Moran Coefficient	$MC = \frac{(n / \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n C_{ij}) \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n C_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$	n 为取样单元数, x_i, x_j 分别为第 i, j 单元值, $\bar{x}$ 为所有单元均值, C_{ij} 为 i, j 单元的邻接性($C_{ij}=1$ 或 0), w_{ij} 为 i, j 单元的
盖利比 Geary Ratio	$GR = \frac{((n-1)/2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n C_{ij}) \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n C_{ij} (x_i - x_j)^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$	标准化邻接性, $\sum_{i=1}^n w_{ij} = 1$ 且 $0 \leq w_{ij} \leq 1$,
克利夫-奥统计量 Cliff-Ord statistic	$CO = \frac{(n / \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij}) \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$	

2.2.5 谱分析 谱分析(Spectral analysis)常用于时间数据序列的尺度转换分析。谱分析是一种频域

(Frequency domain)方法,因此需要对原始数据序列进行转换(如傅立叶变换),将序列分解成与序列中隐藏的周期性相适应的不同频率的正弦、余弦波。通过在数据集中进行横截,谱分析也可用于空间数据的尺度转换。但是,除去斑块以外,由于缺乏周期性或规则性,这种方法在空间统计分析中并不常见。谱是一系列频率的函数,为尺度变化研究提供了有力的评价方法。例如 George A. Rose 等在研究捕食与被捕食物种空间相关关系重要性时就应用了谱分析法^[25]。谱分析是一种多尺度分析方法。在尺度转换中,它的优势在于几乎能够适用于任何研究和取样尺度,并且精度较高。然而,由于谱分析的复杂性、结果分析的难度以及对大样本的要求,也就从一定程度上限制了它在尺度研究中的应用。

2.2.6 分形 多种尺度上的结构变化是分形(Fractal)的特色,能同时适用于尺度上推和尺度下推,特别是对于研究生态学过程、格局的异质性和复杂性方面特别有用。分形模型有多种,其中面积-周长关系、密度、扩散等模型较为常见^[26]。分形在描述自然界空间格局复杂性的多种方法中,用于揭示多种景观特征的不规则空间结构斑块性(Patchiness)方面可能是最为适宜的^[27]。因此, Vladimir I. Nikora 等用分形方法研究了一系列空间尺度上的空间异质性,特别是斑块性。考察了个体斑块(Individual patches)和斑块镶嵌体(Mosaics of patches)两种水平上的尺度转换特征,包括单个斑块形状(形状指数 H)、斑块方向和斑块边界(自相似和自亲合)。

研究单个斑块形状采用“面积-长度”模型:

$$A = c_1 L^{1+H}, (A/L = W \propto L^H) \quad (4)$$

式(4)中, c_1 是系数、 A 和 L 分别是斑块面积和边界上两点间最大直线距离、 W 是斑块特征宽度、 H 是单个斑块的 Hurst 指数,其中 L 为尺度因子。当 $H=1$ 时,表现为自相似性;当 $H<1$ 时,表现为自亲合性。研究斑块边界采用 6 种方法,分别为:周长-长度关系、周长-面积关系、容量维数(Capacity dimension)、信息维数、相关维数和自亲合指数。周长-长度关系、周长-面积关系模型为:

$$P_r = c_2 L^{D_w} \quad (5)$$

$$P_r = c_3 A^\alpha \quad (6)$$

P_r 是斑块周长, D_w 是斑块边界分维数, α 为尺度转换指数, c_2 和 c_3 为系数, L 和 A 为尺度因子,含义同式(4)。综合(4)、(5)、(6)式得到: $D_w = \alpha(1+H)$ 。容量维数: $N(r) \propto r^{-D_{cap}}$, $N(r)$ 为覆盖斑块需要的边长为 r 的正方形数, D_{cap} 为容量分维数。信息维数:信息熵 $S(r) = -\sum_{i=1}^m P_i(r) \ln P_i(r)$, $P_i(r) = n_i(r)/N_i$ 随尺度 r 变化,有: $S(r) \propto r^{-D_{inf}}$, $P_i(r)$ 为在尺度 r 的第 i 个单元中发现边界点的概率, $n_i(r)$ 是在第 i 单元中边界点的数目, N_i 是边界点的总数。相关维数 D_{cor} : $C(r) \propto r^{-D_{cor}}$, $C(r) = \lim_{r \rightarrow 0} (1/N_i^2) \sum_{ij} \theta(r - |x_i - x_j|)$, 其中, $C(r)$ 为相关和, $\theta(x)$ 为 Heaviside 函数, $|x_i - x_j|$ 为 i, j 两点间距离。容量维数、信息维数和相关维数模型中, r 均为尺度因子。

一般认为,如果一系列斑块的聚集分布表现为指数形式: $F(a > A) \propto A^{-\beta}$, 斑块镶嵌体便具有分形特征。 Vladimir I. Nikora 等采用斑块质心、斑块总边界和总面积等参数,从斑块面积的统计分布、斑块质心空间分布尺度转换和斑块总边界的空间尺度转换三个方面对斑块镶嵌体的特征进行了研究。

通过研究, Vladimir I. Nikora 等发现,单个斑块的形状和边界都表现出尺度转换行为。斑块形状的 Hurst 指数 H 在 0.75~0.95 之间变动。多数情况下斑块边界是自相似的,也有一些表现为自亲合。亲合度与斑块大小呈正相关关系,即斑块越小则自亲合度越小。同样,当斑块尺度减小时,尽管斑块的平均方向与大尺度上的地质结构明显相关,斑块方向的分布仍趋于一致。结果表明,从大尺度到小尺度单个斑块行为趋向于各向同性。斑块镶嵌体的 3 个参数也表现出尺度转换的分形特征。所有这些都反映了分形斑块集群的特殊斑块性组织。

Vladimir I. Nikora 等的研究在一定程度上揭示了个体斑块和斑块镶嵌体之间尺度转换特征的相互影响。这项研究证实了分形分析在量化景观特征上的重要用途,同时也强调分形分析在生态学中的应用和解析需要谨慎。

2.2.7 小波 小波是 20 世纪 80 年代初期发展起来的纯数学理论,但是自产生以来较短的时间里就在信号处理、图像压缩和应用统计等领域表现出了非凡的应用潜力和价值。在尺度研究方面小波的应用基本上是刚刚起步,但是已经在遥感数据的尺度和格局分析中表现出了一定优势。在空间分析方面,它的优势在于在格局或模式分解的过程中还能够保持和表现等级信息。尤其是借助卫星图像进行尺度上推过程中能够检测空间格局相互作用以及信息丢失。小波的主要优点是:适用于时间和空间数据分析并且可以很好地对具有明显不连续性的数据进行近似;在一定的近似水平上,小波可以表达多种类型的函数;在计算上,小波变换效率很高;小波没有对数据平稳性的要求,因而可以分析非平稳空间数据。与傅立叶分析类似,小波也是表达其他函数的基础函数。一旦母波 $\varphi(x)$ 确定,就可以通过拉伸(a)和平移(b)变换得到小波 $\varphi(\frac{x-b}{a})$ 。通过小波变换可以将任何函数表示为小波加和的形式。对于连续性小波变换,可以表示成:

$$f(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} W(a,b) \varphi_{a,b}(x) \frac{1}{a^2} da db \quad (7)$$

对于离散性小波变换,可以表示成:

$$f(x) = 2^j \sum_{k=0}^N \sum_{l=0}^N W(k,l) \varphi_{k,l}(x) dk dl \quad (8)$$

式(7)、(8)中的求和权重 W 称为小波系数,是所研究尺度下局部变异强度的量度; $\varphi_{k,l}(x)$ 为基础函数,是线性独立和正交的。G. A. Bradshaw 等应用小波分析方法研究了森林中的林窗结构^[28],T. J. Burns 等对多尺度时空数据的小波分析方法进行了理论研究^[29]。祖元刚等利用小波分析方法对兴安落叶松林窗分布规律进行了研究^[30]。他们选用了墨西哥帽小波 $\psi_t = (1-t^2)e^{-t^2}$,具体的离散化小波变换公式为: $W\psi f(a,b) = \frac{1}{a} \sum_{i=1}^n f(b_i) g \frac{(b_i - a_j)}{a}$,其中 a 为尺度因子; b_i, a_j 为沿样带的距离; $\frac{1}{a} g \frac{(b_i - a_j)}{a}$ 为尺度函数; $f(b_i)$ 为第 i 个样方的林窗分布百分率。小波变换的结果表明:兴安落叶松林样带内计算林窗分布百分率的最佳尺度为 10m;林窗疏密变化尺度约为 20m,在样带 $20 \times 20m^2$ 小区域内具有较为稳定的分布特点。在样带内林窗分布具斑块状特点,且沿海拔梯度呈间断性分布。初步研究表明,小波分析能够揭示比较复杂的数据信息中的潜在规律,适合于多尺度时空数据的尺度转换与优化问题,特别是复杂的非线性问题更能体现小波变换的优势。

2.2.8 遥感和地理信息系统技术 遥感和地理信息系统技术在多尺度问题研究与决策中发挥着非常重要的作用。遥感技术为较大时空尺度上的研究提供了很好的数据源,结合地面观测、调查和试验,为多尺度生态学研究奠定了基础;地理信息系统为各种数据的分析处理、维护和管理提供了基本平台,为尺度上推和尺度下推提供了基本的技术支持,通过二次开发,可以形成功能更强的集成系统。集成应用系统的开发,能够将研究者的专业智能实体化,一方面为用户提供有力的决策支持工具;同时,这类集成系统一般都具有扩充和更新性能,通过网络环境可以实现数据和信息共享,能够提高后续研究工作的效率。

Robert N. Coulson 等研究了智能地理信息系统(IGIS)在自然资源管理中的重要意义^[31],目的在于说明 IGIS 对基于空间数据的表达、分析和解释的便捷性和优势,以促进景观管理、规划和实施。IGIS 主要由两部分构成:GIS 和人工智能环境。人工智能环境的主要功能在于知识表达和规则推理。尽管 Robert N. Coulson 等的研究着重于概念和方法的探讨,系统的真正完善还需要多学科的共同努力,但是这项研究仍然具有重要的借鉴价值。Thomas J. Stohlgren 等采用改进的多尺度取样技术、数学模型以及基于地理信息系统的生态学模型研究了科罗拉多洛矶山国家公园的资源问题^[32]。作为研究的最终成果之一,他们还开发了基于地理信息系统,景观水平上的资源管理决策支持系统(DSS)。Robert N. Coulson 和 Thomas J. Stohlgren 所主持的研究有很大的类似之处。他们都以地理信息系统为基础,以遥感技术为数据获取和分析的重要手段,分别通过人工智能技术和数学模型方法对地理信息系统的功能进行了拓展。这些工作对于涉及多个尺度的生态评价、规划与管理非常有帮助。

总之,每一种方法都有其内在的优势和不足,在实际应用中应充分考虑,视具体问题的特点选择适宜

的模型和方法。若能应用多种方法进行相互验证和比较,将会收到更好的效果^[33]。同时,新方法的不断引入和应用对于尺度转换方法体系的充实和完善非常重要。尽管如此,尺度转换的实际困难总是存在的。这种困难主要来源于两个方面。一方面,几乎所有的方法都对样本大小和取样间隔等因素敏感,但是对研究区域不可能无限取样;另一方面,不同尺度间的转换会产生误差。在这两方面的问题没有很好解决之前,作为研究者应该清楚地阐明其数据和推断的时空尺度以及不同尺度是如何在概念和数量上发生联系的,存在哪些不确定性或风险因素,这样的研究成果对于管理者和决策者来说才会更具现实意义。

3 结语与讨论

人类已经迈入了 21 世纪,面对生物多样性丧失、自然资源退化或耗竭、环境质量下降等一系列生态环境问题,生态学有责任对生态世界复杂性做出科学的解析,而尺度正是这种解析的核心框架。尺度在生态学中的重要性已经获得了广泛的认可,但是对尺度问题的研究尚未达到成熟的程度。尽管尺度有空间、时间和功能等多种维度,但是时空尺度和功能尺度既有联系又有区别,严格来讲不能混用。在实际研究中,时空尺度获得了普遍重视。

生态学家认识到考虑尺度约束对于生态学模型的建立和求解是很关键的^[34],等级理论是构建多尺度模型的重要理论依据。系统动态的抽象化模型可能在某一尺度有效而在其它尺度就会失去作用,因此,跨尺度分析或尺度综合非常必要^[35]。景观生态学研究的一个重要方面就是大尺度过程与生态系统之间的相互作用与影响。传统生态学以有机体相互作用、系统生产力、矿物营养库以及其它一些小尺度问题作为研究的焦点。在大尺度上可能会提出一些问题,但是答案的寻求仍会在小尺度上完成。但是生态学研究在尺度上必须与客观问题相匹配。近年来,全球气候变化、景观火动态和半球天气模式对海洋系统的影响等大尺度问题逐渐成为研究的热点。但是由于人们所选择的具体尺度不同,使用的方法各异,因而研究成果通常缺乏系统性和可比性,也就难以形成完备的理论和方法体系。幸运的是在尺度问题上生态学家们仍在不懈地探索。可以预见,有关尺度的研究将进一步加强,研究的重点将会是尺度变异性、不同尺度间的相互作用机制以及尺度转换方法。多尺度和长期生态学研究将会成为研究的主流,而且时空尺度的结合可能会得到更多重视。以地理信息系统和遥感技术为依托的多种方法的集成将会促进尺度研究不断深入,同时也可以为管理者、决策者提供功能强大的决策支持工具。尺度研究的每个进步都会推动生态评价、资源开发与管理、环境整治、生物多样性保护等涉及多重尺度生态实践的科学化。

参考文献

- [1] David Peterson and V. Thomas Parker, *Ecological scale: Theory and Application*. Columbia University Press, 1998. 1~4.
- [2] 邬建国. 生态学范式变迁综论. 生态学报, 1996, 16(5): 449~460.
- [3] 伍业钢, 李哈滨. 景观生态学的理论发展, 见: 刘建国等主编. 当代生态学博论. 北京: 中国科学技术出版社, 1992. 30~39.
- [4] 邬建国. 景观生态学—概念与理论. 生态学杂志, 2000, 19(1): 42~52.
- [5] Almo Farina, *Principles and Methods in Landscape Ecology*. Chapman & Hall, 1998. 35~49.
- [6] David Peterson and V. Thomas Parker, *Ecological scale: Theory and Application*. Columbia University Press, 1998. 5~16.
- [7] David Peterson and V. Thomas Parker, *Ecological scale: Theory and Application*. Columbia University Press, 1998. 17~34.
- [8] 肖笃宁, 布仁仓, 等. 生态空间理论与景观异质性. 生态学报, 1997, 17(5): 453~461.
- [9] Stephen G Weller. The effect of disturbance scale on sand dune colonization by *Lithospermum carolinense*. *Ecology*, 1989, 70(5): 1244~1251.
- [10] David Peterson and V. Thomas Parker, *Ecological scale: Theory and Application*. Columbia University Press, 1998, 253~270.
- [11] Krummel J R, Gardner R H, et al. Landscape patterns in a disturbed environment. *Oikos*, 1987, 48: 321~324.

- [12] Magnuson J J. Long-term ecological research and the invisible present. *BioScience*, 1990, **40**: 495~501.
- [13] O'Neill R V, Hunsaker C T, et al. Scale problems in reporting landscape pattern at the regional scale. *Landscape Ecology*, 1996, **11**(3): 169~180.
- [14] Anthony W King. Translating Models Across Scales in the Landscape. In: Monica G. Turner, Robert H. Gardner eds. *Quantitative Methods in Landscape Ecology*. Springer-Verlag, 1991. 479~518.
- [15] 叶万辉, 马克平, 等. 北京东灵山地区植物群落多样性研究: I. 尺度变化对 α 多样性的影响. *生态学报*, 1998, **18**(1): 10~14.
- [16] S. Kathleen Lyons and Michael R. Willig. A Hemispheric Assessment of Scale Dependence in Latitudinal Gradients of Species Richness. *Ecology*, 1999, **80**(8): 2483~2491.
- [17] Douglas W. Morris. Ecological scale and habitat use. *Ecology*, 1987, **68**(2): 362~369.
- [18] 王 军, 傅伯杰, 等. 黄土丘陵小流域土壤水分的时空变异特征——半变异函数. *地理学报*, 2000, **55**(4): 428~437.
- [19] 王政权. 地统计学及在生态学中的应用. 北京: 科学出版社, 1999. 65~100.
- [20] Sanderson E W, Zhang M, et al. Geostatistical scaling of canopy water content in a California salt marsh. *Landscape Ecology*, 1998, **13**: 79~92.
- [21] 郭旭东, 傅博杰, 等. 河北省遵化平原土壤养分的时空变异特征——变异函数与 Kriging 插值分析. *地理学报*, 2000, **55**(5): 555~566.
- [22] Jeo E Meisel and Monica G Turner. Scale detection in real and artificial landscapes using semivariance analysis. *Landscape Ecology*, 1998, **13**: 347~362.
- [23] Pierre Dutilleul. Incorporating Scale in Ecological Experiment: Data Analysis. In: David Peterson and V. Thomas Parker, eds. *Ecological scale: Theory and Application*. Columbia University Press, 1998. 387~425.
- [24] Ye Qi and Jianguo Wu. Effects of changing spatial resolution on the results of landscape pattern analysis using spatial autocorrelation indices. *Landscape Ecology*, 1996, **11**(1): 39~49.
- [25] George A Rose and William C Leggett. The importance of scale to predator-prey spatial correlations: an example of Atlantic fishes. *Ecology*, 1990, **71**(1): 33~34.
- [26] Bruce T. Milne. Lessons from applying fractal models to landscape patterns. In: Monica G. Turner, Robert H. Gardner. *Quantitative Methods in Landscape Ecology*. Springer-Verlag, 1991. 479~518.
- [27] Vladimir I Nikora, Charles P Pearson, et al. Scaling properties in landscape patterns: New Zealand experience. *Landscape Ecology*, 1999, **14**: 17~33.
- [28] Bradshaw G A and Thomas A Spies. Characterizing canopy gap structure in forests using wavelet analysis. *Journal of Ecology*, 1992, **80**(2): 205~215.
- [29] Burns T K, Rogers S K, et al. A wavelet multiresolution analysis for spatio-temporal signals. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1996, **32**(2): 628~649.
- [30] 祖元刚, 赵则海, 等. 兴安落叶松林林窗分布规律的小波分析研究. *生态学报*, 1999, **19**(6): 927~931.
- [31] Robert N Coulson, Clark N Lovelady, et al. Intelligent Geographic Information Systems for Natural Resource Management. In: Monica G. Turner, Robert H. Gardner. *Quantitative Methods in Landscape Ecology*. Springer-Verlag, 1991. 153~172.
- [32] Thomas J Stohlgren, Michael B Coughenour, et al. Landscape analysis of plant diversity. *Landscape Ecology*, 1997, **12**: 155~170.
- [33] Claude Bellehumeur and Pierre Legendre. Multiscale sources of variation in ecological variables: modeling spatial dispersion, elaborating sampling designs. *Landscape Ecology*, 1998, **13**: 15~25.
- [34] Simon F Thrush, Judi E Hewitt, et al. The generality of field experiments: integrations between local and broad scale processes. *Ecology*, 2000, **81**(2): 399~415.
- [35] Crawley M J and Harral J E. Scale dependence in plant biodiversity. *Science*, 2001, **291**: 864~868.