基于模式识别的景观格局分析与尺度转换研究框架

陈利顶, 吕一河, 傅伯杰, 卫 伟

(中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085)

摘要:景观格局分析和尺度转换是生态学和地理学研究的核心问题之一。尽管多年来投入了大量的精力,然而由于尺度效应的复杂性和尺度转换过程的不确定性,仍然没有找到合适的方法。目前关于尺度转换的研究存在两个误区,其一是过分重视空间尺度的转换,忽略了过程尺度的转换;其二是过分强调了对不同尺度间数量关系的外推与转换,忽略了不同尺度间生态规律的外推与转换。在系统分析了景观格局与尺度转换研究现状、存在问题和难点的基础上,提出了借用模式识别的原理和方法,针对特定的生态过程,开展景观格局分析与尺度转换的思路。认为尺度转换的关键在于通过识别不同尺度上影响生态过程的主导因子,找到各个尺度上“格局(环境因子空间组合)-过程”、尺度间“格局-格局”之间的对应关系,通过建立“环境-格局-过程”模式识别数据库,就能够建立不同尺度之间基于模式识别的尺度转换方法。

关键词:景观格局分析;生态过程;模式识别;尺度转换

文章编号:1000-0933(2006)03-0663-08 中图分类号:Q149 文献标识码:A

A framework on landscape pattern analysis and scale change by using pattern recognition approach

CHEN Li-Ding, LÜ Yi-He, FU Bo-Jie, WEI Wei (Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(3): 663 ~ 670.

Abstract: Landscape ecology mainly deal with the relationship between landscape pattern and ecological processes. However, because of the difficulty on ecological process quantification from various scales, few achievements were made. To clarify the relationship between landscape pattern and ecological processes at different scales, a key bottleneck to be resolved was the methodology on how to extend ecological rule from small scales to large scales. Due to the complexity of scale effects and the uncertainty of scale change, few scientific methods on scale change were established despite years of substantial research efforts.

Landscape pattern analysis and scale change are one of the core issues in ecology and geography. However, due to the complexity of scale impact and the uncertainty of scale change, an appropriate method is yet to be found even though much research effort has been given toward this issue. There are existing two misunderstandings in scale change. The first one tends to overly emphasize the effect of spatial scale change while ignore the effect of process scale change. The second one is to pay too much attention on the extrapolation of quantitative relationships among different scales, but lack of understanding about the ecological impact of different scales. This research points out a new idea, based on the systematic analyses on the previous studies on landscape pattern and scale change, that is to conduct landscape pattern analyses and scale change for a particular ecological process using pattern recognition approach. We believe that the key issue in scale change is to establish relationships between the

基金项目:国家自然科学基金资助项目(30570319);国家基金委创新群体资助项目(40321101)

收稿日期:2005-08-15; **修订日期:**2005-11-30

作者简介:陈利顶(1965~),男,河南人,博士,研究员,主要从事景观格局与生态过程、土地利用变化的生态环境效应与区域可持续发展研究. E-mail: Liding@mail.rcees.ac.cn; chenliding@sohu.com

Foundation item: The project was supported by National Natural Science Foundation of China (No. 30570319); NSFC Innovation Research Group Program (Grant No. 40321101)

Received date: 2005-08-15; **Accepted date:** 2005-11-30

Biography: CHEN Li-Ding, Ph.D., Professor, mainly engaged in landscape pattern and ecological processes, land use change and its environmental effect, and sustainable land use. E-mail: liding@rcees.ac.cn; chenliding@sohu.com

pattern and process for each scale and the relationships between the patterns of different scales through identifying dominant factors of ecological processes at each scale. A new scaling mechanism can be established after the database of environment-pattern-process pattern recognition was built.

Key words: landscape pattern analysis; ecological processes; pattern recognition; scaling

景观格局分析和尺度转换是生态学和地理学研究的核心问题之一,多年来,许多生态学和地理学工作者针对景观格局分析和尺度转换中的难点开展了大量工作,试图提出可以进行尺度转换的科学方法^[1-9]。然而由于尺度效应的复杂性和尺度转换过程的不确定性,目前这项研究仍然缺乏突破性进展。描述格局就是描述变异性,而量化变异性就需要确定尺度^[10]。在研究自然系统过程中,一个基本事实是不存在对动力学特征进行研究的单一正确尺度^[9]。对于尺度的理解影响着预测生态系统对于环境变化响应方式的能力^[8]。对于任何系统的描述依赖于特定时空范围和组织水平的选择,这样就提出了尺度转换的问题^[1,11,12]。由于人类认识的局限和各种观测、研究手段的有限性,将所有尺度上的地理现象/生态过程研究清楚,在一定程度上说是不现实的,但是仅仅开展一个尺度上的实验/观测研究,往往不能解决其他尺度上存在的问题。即使将现实世界的景观格局依据一定的比例进行缩小,开展解剖、模拟研究,得出的结果也常常与实际情况相去甚远。如何通过景观格局分析与尺度转换,将在局部地区获得的结果推广到更多的尺度上,是景观生态学研究的核心,也是目前研究中的难点。

1 景观格局分析与尺度转换

1.1 景观格局分析与生态过程研究

景观格局分析的目的不是描述景观格局,而是要解释和理解其中存在的生态过程和现象,然而通过景观格局分析揭示其中的地理过程或生态现象,是景观生态学研究中的难点^[6,13]。景观格局分析是阐明生态过程的基础,格局决定过程,过程影响格局的形成。为此,许多学者提出了各种各样景观格局指数和评价方法^[14-16],并且利用这些指数,从不同尺度上研究了景观格局时空变化的特征和演变趋势^[17-19],探讨了空间粒度和幅度变化对景观格局指数的影响^[7,20,21],但对于景观格局指数变化的生态学意义和不同尺度间景观格局的内在联系研究的相对较少。正确理解景观格局与生态过程的关系是进一步深化景观生态学研究的关键。但由于景观格局和生态过程涉及到不同的研究尺度,并且随着尺度的变化而变化,使得定量描述景观格局与生态过程之间的关系,成为目前景观生态学研究的一个热点和难点。

1.2 尺度效应与尺度转换

尺度效应的普遍性:在生态学、地理学中,尺度是普遍存在的一个重要问题^[4,22-24]。尺度的存在根源于地球表层自然界的等级组织和复杂性。从自然生态系统到社会-经济-自然复合生态系统,生态和地理学家所面临的研究对象异常复杂^[25];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。即使面对同一研究对象,如果采用的时空尺度不同,结论也会大不相同;虽然生态学家和地理学家已经认识到时空尺度的重要意义,但如何选择合适的尺度开展相应的研究工作,还没有形成完整的理论和方法体系^[5]。

尺度转换的定义:尺度转换是指利用某一尺度上获得的信息和知识来推测其他尺度上发生的现象和过程的方法与手段^[7,26]。一般认为宏观生态学研究涉及到4个尺度域:① 微观尺度域,包括1~500a的时间范围和1~10⁶m²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,包括500~10⁴a的时间范围和10⁶~10¹⁰m²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,包括10⁴~10⁶a的时间范围和10¹⁰~10¹²m²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,包括10⁶~10⁹a的时间范围和大于10¹²m²的空间范围,与类似于地壳运动的地质事件相适应。当某一空间尺度的事件或现象影响其他空间尺度的事件或现象

时,就产生了跨尺度的联系和相互作用^[27]。

综合各方面的分析,刘纪根等将尺度转换分为以下4种:①按照尺度转换的方向不同,分为尺度上推和尺度下推,前者是指将小尺度的信息推绎到大尺度的过程,是一种信息聚合;后者是将大尺度上的信息推绎到小尺度上的过程,是一种信息分解。②按照构建尺度转换模型的过程不同,可分为显式尺度转换和隐式尺度转换。隐式尺度转换是指针对特定的环境条件,在模型构建过程中将与尺度有关的特征要素考虑在内。这样,模型本身就体现了对模型进行尺度转换的具体过程。显式尺度转换是在数字集成或综合分析的基础上,在时间和空间尺度上对“局部”模型的响应进行尺度上推。在具体应用中显式与隐式尺度转换的分类方法多出现在尺度上推的研究中。③根据所依赖的时空维度不同,可分为空间尺度转换和时间尺度转换。④根据其转换的空间过程不同,可分为相邻尺度转换和跨尺度转换,前者是指在相邻尺度上的信息转换,而后者则是在多个尺度间进行的信息转换。

尺度转换研究的重要性:尺度转换是景观生态学和地理学研究中一种重要的方法和手段^[26]。由于地球表层各种地理现象和生态过程的复杂性,加上人类认识的局限性,通过人类定点观测、试验、模拟,穷尽所有生态过程和地理现象在不同地区的分布特征及其内在规律,几乎是不可能的。因此利用目前人类所掌握的基本数据,通过合理的外推与综合,将一些局部地区的研究结果推广到更大的尺度上,已经成为生态学家和地理学家广泛使用的手段^[3,5]。然而,直接通过野外实验来分析、验证大尺度上的问题十分困难或者不可能。因而,根据小尺度研究成果和不同尺度间的作用关系,来对大尺度问题做出预测就成为解决这类问题的必然选择^[28]。目前,针对尺度转换,已经尝试了许多方法,如图示法、回归分析、半变异函数、自相关分析、谱分析、分形分析、小波分析^[29-33]。但是这些方法未能解决尺度转换的关键问题。解决尺度转换的关键在于深入研究格局与过程之间的关系。

1.3 景观格局分析与尺度转换研究中存在的问题

20世纪80年代以来,不同景观生态学家提出了各种各样的景观格局分析指数^[15,16,20],然而对于这些景观格局指数的生态学意义探讨不够。更多的工作停留在景观格局几何特征的分析 and 描述以及简单的比较分析,忽略了对景观格局的意义或内涵的理解,如何将景观格局指数与具体生态过程相关联,仍然是目前研究中的不足。

在尺度效应与尺度转换方面,更多的工作集中在尺度效应、尺度选择、尺度转换3个方面^[5,34]。通常认为,尺度转换的核心是将一种尺度上或局部地区研究得出的规律合理拓展到其他更多尺度上,便于人们了解生态过程的空间变化及其形成机理^[7,27,33]。然而,在尺度转换研究中,人们往往将尺度转换的重点集中在空间尺度的变化,忽视了过程尺度的变化。比如土壤侵蚀是随着流域大小的发生变化,从汇水区到集水区、小流域、中流域、大流域,在研究水土流失时,必须以流域为单元开展相应的研究;如果在研究水土流失时,仍然选取不同大小的粒度进行尺度转换研究,获得的结果将是不科学的。对于物种保护来说,物种生存的基本单元是资源斑块,资源斑块的空间关系直接影响到生物多样性的保护,这样就需要考虑如何建立科学的自然保护区、自然保护区网来达到保护生物多样性的目的。在小尺度上,环境因子的作用更为明显,随着尺度变大,主控因子的组合作用,即空间格局将起到决定性作用。尺度转换应该在正确认识生态现象和生态过程的基础上,根据生态过程变化的尺度范围和性质,确定尺度转换的空间幅度和尺度转换的方法。

1.4 景观格局分析与尺度转换研究中的难点

由于不同尺度上影响生态过程的因子差异较大,研究景观格局与生态过程之间的关系十分困难。通常情况下,通过小尺度观测,如样地观测、径流小区观测、实验室仿真模拟等,研究生态过程的主控因子及其时空变化规律。但在研究大尺度格局与生态过程的关系时,由于缺乏空间过程观测数据,如土壤侵蚀、水分运移、动植物迁徙等,而无法深入研究景观格局与生态过程的关系。对于土壤侵蚀,除了一些径流小区的观测数据外,拥有更多的只是一些流域出口水文和泥沙的观测数据,如何将这些一个观测点的数据和整个流域的格局联系起来是一个难题。目前更多的是利用小区的观测结果来推断大中尺度上景观格局对生态过程(如水土流失、养分

迁移、动物栖息等)的影响。然而许多研究表明,小尺度上建立的模型往往不适合大中尺度上的模拟研究^[28]。

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,可能会导致对景观格局和过程及其相互作用不同程度的把握,最终会影响到研究结果的科学性和实用性。由于尺度具有多维性、时空尺度的复杂性、变异性等特点^[5],以及人类在尺度认识上的局限性,直接导致在研究工作中科学地选择合理的尺度具有较大的难度^[34]。因此,在实验设计上选择适宜的尺度,在研究格局与过程关系上探究科学有效的尺度转换方法已经成为目前景观生态学发展中必须认真解决的问题。

2 基于模式识别的景观格局分析与尺度转换框架

2.1 模式识别及其在尺度转换中的应用

尺度转换需要对生态过程动态获得深入的理解。等级性和自相似性是研究尺度转换问题的两种启发性视角。因为模型能够将发生在不同尺度上的过程综合起来,对于理解生态复杂性和决策过程能够发挥关键性作用^[9]。而相似性模型可以作为辨识不同尺度自然和社会文化过程中相似性的方法论^[6]。模式识别,就是通过计算机,用数字分析技术来研究模式的自动处理和判读的过程。一般把环境与客体统称为“模式”。随着计算机技术的发展,人类有可能研究复杂的信息处理过程。信息处理过程的一个重要形式是生命体对环境及客体的识别。识别过程就是将输入的环境信息与已经找到的模式进行比较,找出最相近的模式就是识别结果。模式识别还有一个重要组成部分是对具体对象的“版面分析”或称“分割”,属于图象处理范畴。通过图像处理找到不同现象之间的内在联系。研究了物种类型与栖息斑块、物种类型与景观的关系^[35],分析了物种多样性与样带和森林恢复年龄的关系,为模式识别在尺度转换中的应用提出了基础。因此,模式识别本质上就是以相似性为基础的理论与方法体系,将模式识别的理论和方法应用到景观生态学尺度转换的研究中将是一个新的尝试。通过计算机对地理过程及其环境的综合分析,建立“环境-格局-过程”模式识别数据库,找到不同尺度间格局-过程模式的共性和特点,为尺度转换模型的建立奠定基础。

2.2 模式识别用于景观格局分析与尺度转换的理论前提

假设1:不同生态过程具有相应的空间发生尺度。理解生态过程发生的空间尺度是实现尺度转换的基础。由于尺度转换的目的在于将已知发生在不同尺度上的现象联系在一起,从而找到不同尺度生态过程(或生态现象)之间的有机联系,进而实现不同尺度之间的转换,因此尺度转换的关键在于对生态过程发生空间尺度的把握,而不是仅仅着眼于空间范围几何大小的变化。因此,尺度转换应该因研究的生态过程不同,确定研究的尺度范围,选择适宜的尺度转换方法。

假设2:一定的格局决定了特定的生态过程。不同尺度上环境因子的空间组合总是呈现出一定的格局特征,同一尺度上总是存在着相应的格局-过程关系,不同尺度间的生态格局和过程也通过一定机制相关联。只有深刻理解了这种作用关系才能为尺度转换找到突破口。在每一个尺度上影响生态过程的因子有关键因子和次要因子,环境因子的空间组合关系(格局)将影响到生态过程的演变。找到了格局-过程间的作用关系就为进一步寻找不同尺度生态过程间的关系奠定了基础。

假设3:尺度转换的核心是生态规律,而不是简单的数量关系。不同尺度间生态过程(或生态现象)总是存在一定的转换关系,但是这种转换关系不是直接的表面数量关系,而是复杂的基于生态规律的非线性关系。开展尺度转换时,不能将在小尺度上获取的数量关系直接外推到其他尺度上,而应该将小尺度上获得的生态规律适当地外推到其他相关尺度上。

假设4:“环境-格局-过程”的不同时空耦合关系形成了不同的模式。如果将任一“环境-格局-过程”间的关系看作是一种自然界存在的模式,那么找到了不同尺度上存在的“环境-格局-过程”关系,将为进一步开展尺度转换奠定基础。因此我们可以通过大量的数理统计分析和灰色关联分析,建立多尺度“环境-格局-过程”模式识别数据库,在此基础上,通过不同尺度之间的比对研究和模式识别,探讨不同尺度之间的转换方法。

2.3 景观格局分析与尺度转换的基本框架

开展景观格局分析与尺度转换的基本基本(以土壤侵蚀过程为例)可以表示为图1:

2.4 景观格局分析与尺度转换的步骤

开展景观格局分析和尺度转换的关键有两点:其一是解析尺度间“格局与格局”的关系;其二是解析同一尺度上“格局与过程”间的关系。为了达到尺度分析的目的,需要开展以下工作。

(1) 确定待研究的过程(或生态现象):景观格局分析和尺度转换是为了了解生态过程,因此,在开展景观格局分析和尺度转换前,首先要明确研究的过程类型和特征。例如,研究的是土壤侵蚀过程、元素迁移与循环过程,还是生物迁徙、人口流动、社会经济活动等。因为生态过程的形成取决于不同环境因子和格局特征,所发生的空间尺度将会有所差异。

(2) 确定过程发生的空间尺度:不同生态过程性质不同,所发生的空间范围将会不同。比如,在研究土壤侵蚀过程时,河流水系的特征在很大程度上决定了地表径流过程和土壤侵蚀特征。在开展尺度转换时,应该以流域作为基本单元,研究流域中发生的土壤侵蚀过程,尺度转换也应该考虑不同级别流域之间的土壤侵蚀关系;但对于人口流动与经济活动来说,由于人类活动均以行政单元为基础,从村到乡、县、市、省、国家以及全球尺度,在研究相关过程时,应该以行政单元作为尺度转换的基本单位;对于生物保护来说,应该以生物栖息地斑块、自然保护区、自然保护网络等空间尺度作为尺度转换的基础。

(3) 识别影响过程的关键因子:不同尺度上影响生态过程的因子不同,在开展尺度转换时需要识别各种尺度上生态过程的主导影响因子,识别不同尺度上影响的生态过程的约束体系,根据每一个尺度上制约过程的约束体系,确定需要分析的关键环境因子。如对于土地利用变化来说,从田块-农场-流域-区域(或国家)-全球尺度,土地利用的主导影响因子从农业技术转变为微观经济因子、生态因子、宏观经济与社会因子、宏观生态因子。对于其他生态过程来说,也需要分析不同尺度上主导影响因子的变化。

(4) 确定“格局(关键因子空间组合)-过程”对应关系:格局决定过程,过程影响格局的形成。格局与过程间具有密不可分的关系。在某一尺度上,一定的格局将决定相应的生态过程。如何找到各种尺度上格局(各种主导影响因子的空间组合)与过程之间的对应关系,将成为研究格局与过程,以及尺度转换的关键。在不同尺度上,总是存在着各种各样的格局,同时每一种格局就会对应一种特殊的生态过程,找到了格局与生态过程之间的对应关系,就为进一步开展尺度转换提供了基础。

(5) 确定尺度间“格局-格局”的对应关系:尽管不同尺度之间影响生态过程的因子有所不同,但是格局与格局之间应该存在一定的对应关系。如在小尺度上地形的坡度、坡向、凹凸度等将会对小流域尺度上的起伏度、沟壑密度等产生影响。如果知道了小尺度生态过程主要影响因子的格局与中大尺度上格局之间的定量关系,那么就可以找到不同尺度之间生态过程之间的转换关系。

(6) 建立“环境-格局-过程”模式识别数据库:从小尺度上的环境因子系统分析,到中大尺度上的景观格局分析,找到不同尺度间主导环境因子与其他尺度上格局的定量关系;在与各种尺度上相应的生态过程相关联后,可以获得不同尺度间生态过程的关联特征,利用聚类分析方法和人工神经网络方法,可以建立不同尺度间“环境-格局-过程”模式识别数据库。

(7) 对比研究现实自然环境格局与模式识别数据库:将在实际观测和实验中获得的各种环境因子的基本数据,通过分析获得特定尺度上的景观格局特征,通过与“环境-格局-过程”模式识别数据库的比对研究,可以找到不同尺度间环境因子、景观格局、生态过程之间的共性和特点,寻找不同尺度间尺度转换的切入点。

(8) 建立多尺度转换模型:在上述研究工作基础上,结合地理信息系统,从格局-过程的角度,建立针对特定生态过程的基于景观格局评价的尺度转换方法和模型。

3 结语

在景观生态学研究,一个关键的尚未解决的难题就是如何把不同时空尺度上的生态过程联系起来,实现宏观与微观尺度上的衔接与综合。尺度转换是景观生态学和地理学面临的一个复杂而又必须解决的问题。任何生态过程(或现象)总是受到各种环境因子的综合作用,不同尺度影响生态过程的关键因子不同。实现尺度转换,必须首先找到影响生态过程的主控因子,然后分析主控因子的空间格局及其与相应过程的关系,同时

分析不同尺度上影响生态过程主控因子对景观格局的支配作用。阐明不同尺度上景观空间分布规律及其不同尺度间景观格局的内在联系,从而找到不同尺度间生态过程或生态现象的尺度转换方法。本文针对目前景观格局分析与尺度转换中的难点,提出了利用数理统计分析、空间相关分析、聚类分析和人工神经网络方法,分析不同尺度景观格局与环境因子的关系,确定不同尺度间关键影响因子、景观格局、生态过程的相关关系,建立不同尺度间“环境-格局-过程”的模式识别数据库;通过计算机模式识别和对比研究,找到不同尺度间格局-过程模式的共性和特点,建立基于格局-过程的尺度转换方法,为解决景观生态学和地理学中的尺度转换提供一种新的研究思路。

References:

- [1] Levin S A. The problem of scale in ecology. *Ecology*, 1992, 73: 1743 ~ 1767.
- [2] Marquet P A. Invariants, scaling laws, and ecological complexity. *Science*, 2000, 289: 1487 ~ 1488.
- [3] Peterson D and Parker V T. *Ecological scale: Theory and Application*. Columbia University Press, 1998. 253 ~ 270.
- [4] Schneider C D. *Scaling Theory: Application to Marine Ornithology*. *Ecosystems*, 2002, 5: 736 ~ 748.
- [5] Lv Y H, Fu B J. Ecological scale and scaling. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(12):2096 ~ 2105.
- [6] Xiao D N. Recent advance of international landscape ecology. *Chinese Journal of Ecology*, 1999, 18(6):75 ~ 76.
- [7] Zhao W W, Fu B J and Chen L D. Some fundamental issues in Scaling. *Advance in Earth Sciences*, 2002, 17(6):905 ~ 911.
- [8] Haila Y. Scaling environmental issues: problems and paradoxes. *Landscape and Urban Planning*, 2002, 61: 59 ~ 69.
- [9] Chave J and Levin S. Scale and scaling in ecological and economic systems. *Environmental and Resource Economics*, 2003, 26: 527 ~ 557.
- [10] Habersack H M. The river-scaling concept (RSC): a basis for ecological assessments. *Hydrobiologia*, 2000, 422/423: 49 ~ 60.
- [11] Duarte L C, Boldrini J L and dos Reis S F. Scaling phenomena and ecological interactions in space: cutting to the core. *TREE*, 1998, 13(5): 176 ~ 177.
- [12] Caldow R W G and Racey P A. Large-scale processes in ecology and hydrology. *Journal of Applied Ecology*. Suppl., 2000, 1: 6 ~ 12.
- [13] Ludwig J A, Wiens J A and Tongway D J. A Scaling Rule for Landscape Patches and How It Applies to Conserving Soil Resources in Savannas. *Ecosystems*, 2000, 3: 84 ~ 97.
- [14] Li H B and Wu J G. Use and misuse of landscape indices. *Landscape Ecology*, 2004, 19(4): 389 ~ 399.
- [15] O'Neill R V, Krummer J R, Gardner R H, et al. Indices of landscape pattern. *Landscape Ecology*, 1:153 ~ 162.
- [16] Turner M G and Gardner R H (eds.). *Quantitative methods in Landscape Ecology*. New York: Springer-Verlag, 1990. 3 ~ 16.
- [17] Xiao D N, Li X W and Wang L P. Landscape dynamics and sustainable land use of coastal wetlands resources in Liaohe Delta. *Resources Sciences*, 2001, 23(2):31 ~ 36.
- [18] Zeng H, Jiang Z Y, Kong N N and Gao L Y. Auto-correlation analysis of landscape pattern for a fast urbanization area—a case study of Longhua area, Shenzhen City. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2000, 36(6):824 ~ 831.
- [19] Zhang M. Landscape pattern change in Yulin ecological fragile region. *Geographical Research*, 2000, 19(1):30 ~ 36.
- [20] He H S. An aggregation index (AI) to quantify spatial patterns of landscapes. *Landscape Ecology*, 2000, 15(7): 591 ~ 601.
- [21] Wu J G. Effects of changing scale on landscape pattern analysis: scaling relations. *Landscape Ecology*, 2004, 19(2):125 ~ 138.
- [22] Levin S A. Multiple scales and the maintenance of biodiversity. *Ecosystems*, 2000, 3: 498 ~ 506.
- [23] Qiu Y, Fu B J. Spatial variation and scale variation in soil and water loss in heterogeneous landscape: a review. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(2): 330 ~ 337.
- [24] Wang F, Li R, Yang Q K and Zhang X P. Effect of scale and its mechanism in soil and water loss research. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2003, 17(2):167 ~ 169.
- [25] Farina A, Bogaert J, Schipani I. Cognitive landscape and information: new perspectives to investigate the ecological complexity. *BioSystems*, 2005, 79: 235 ~ 240.
- [26] Liu J G, Cai Q G, Fan L X and Liu Q J. Methods of scale transfer in modeling of soil erosion and sediment yield in catchments. *Journal of Sediment Research*, 2004, 3:69 ~ 74.
- [27] Yue T X and Liu J Y. Issues on multi-scales in ecogeographical modeling. *Quaternary Sciences*, 2003, 23(3):256 ~ 261.
- [28] Fu B J, Chen L D, Wang J, Meng Q H and Zhao W W. Land use structure and ecological processes. *Quaternary Research*, 2003, 23(3):247 ~ 255.
- [29] Burns T J, 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] Meisel J E and Turner M G. Scale detection in real and artificial landscapes using semivariance analysis. *Landscape Ecology*, 1998, 13:347 ~ 362.

- [31] Nikora V I, Pearson C P, *et al.* Scaling properties in landscape patterns: New Zealand experience. *Landscape Ecology*, 1999, 14: 17 ~ 33.
- [32] Rose G A and Leggett W C. The importance of scale to predator-prey spatial correlations: an example of Atlantic fishes. *Ecology*, 1990, 71 (1): 33 ~ 34.
- [33] Qi Y and Wu J. Effects of changing spatial resolution on the results of landscape pattern analysis using spatial autocorrelation indices. *Landscape Ecology*, 1996, 11 (1): 39 ~ 49.
- [34] Lu X J, Zhou C H, Zhang H Y and Xu Z G. Analytical scheme on scale-structure of geographical space. *Progress in Geography*, 2004, 23(2): 107 ~ 114.
- [35] Jansson G. Scaling and habitat proportions in relation to bird diversity in managed boreal forests. *Forest Ecology and Management*, 2002, 157: 77 ~ 86.
- [36] Minns A W and Hall M J. Artificial neural networks as rainfall-runoff models. *Hydrological Sciences Journal*, 1996, 41 (3), 399 ~ 417.

参考文献:

- [5] 吕一河,傅伯杰. 生态学中的尺度及尺度转换方法. *生态学报*, 2001, 21(12): 2096 ~ 2105.
- [6] 肖笃宁. 国际景观生态学研究最新进展. *生态学杂志*, 1999, 18(6): 75 ~ 76.
- [7] 赵文武,傅伯杰,陈利顶. 尺度推绎研究中的几点基本问题. *地球科学进展*, 2002, 17(6): 905 ~ 911.
- [17] 肖笃宁,李晓文,等. 辽东湾滨海湿地资源景观演变与可持续利用. *资源科学*, 2001, 23(2): 31 ~ 36.
- [18] 曾辉,江子瀛,等. 快速城市化景观的空间自相关特征分析. *北京大学学报(自然科学版)*, 2000, 36(6): 824 ~ 831.
- [19] 张明. 榆林地区脆弱生态环境的景观格局与演变研究. *地理研究*, 2000, 19(1): 30 ~ 36.
- [23] 邱扬,傅伯杰. 异质景观中水土流失的空间变异与尺度变异. *生态学报*, 2004, 24(2): 330 ~ 337.
- [24] 王飞,李锐,杨勤科,等. 水土流失研究中尺度效应及其机理分析. *水土保持学报*, 2003, 17(2): 167 ~ 169.
- [26] 刘纪根,蔡强国,樊良新,等. 流域侵蚀产沙模拟研究中的尺度转换方法. *泥沙研究*, 2004, 3: 69 ~ 74.
- [27] 岳天祥,刘纪远. 生态地理建模中的多尺度问题. *第四纪研究*, 2003, 23(3): 256 ~ 261.
- [28] 傅伯杰,陈利顶,王军,等. 土地利用结构与生态过程. *第四纪研究*, 2003, 23(3): 247 ~ 255.
- [34] 鲁学军,周成虎,张洪岩,徐志刚. 地理空间的尺度-结构分析模式探讨. *地理科学进展*, 2004, 23(2): 107 ~ 114.