

景观格局与生态过程相互关系研究进展

胡巍巍^{1,2,3}, 王根绪¹, 邓 伟^{1,3}

(1.中国科学院成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041; 2.安庆师范学院资环学院, 安庆 246003; 3.中国科学院研究生院, 北京 100093)

摘 要 景观格局的形成反映了不同的景观生态过程, 与此同时景观格局又在一定程度上影响着景观的演变过程。空间格局、生态过程与尺度之间的相互关系是景观生态学研究的核心内容。本文对景观格局与生态过程的研究方法、景观格局与生态过程相互关系等方面的国内外研究进展进行了综述。最后分析了目前景观格局与生态过程相互关系研究中存在的问题与不足、未来的研究热点及发展趋势。

关 键 词 景观格局; 生态过程; 尺度

1 概述

景观是由多个生态系统构成的异质性地域或不同土地利用方式的镶嵌体。实质上这些不同的生态系统经常可以表现为不同的土地利用或土地覆被类型。因此, 景观格局主要是指构成景观生态系统或土地利用/覆被类型的形状、比例和空间配置^[1,2]。它是景观异质性的具体体现, 又是各种生态过程在不同尺度上作用的结果。空间异质性 (spatial heterogeneity) 是指某种生态学变量在空间分布上的不均匀性及其复杂程度。空间异质性是分析景观格局的重点。空间异质性是空间缀块性 (patchiness) 和空间梯度 (gradient) 的综合反映^[3]。空间缀块性包括生境缀块性和生物缀块性两类。生境缀块性的因子包括气象、水文、地貌、地质、土壤等的空间异质性特征。生物缀块性包括植被格局、繁殖格局、生物间相互作用、扩散过程、疾病和生活史等。空间梯度指沿某一方向景观特征变化的空间变化速率, 在大尺度上可以是某一方向的海拔梯度, 在小尺度上可以是缀块核心区—缀块边缘的梯度。也有学者把空间异质性按照两种组分定义, 即系统特征及其复杂性和变异性。系统特征包括具有生态意义的任何变量, 如水文、气温、土壤养分、生物量等。异质性就是系统特征在空间和时间上的复杂性和变异性^[4]。

在景观镶嵌体中发生着一系列的生态过程。这些过程可分为垂直过程和水平过程, 垂直过程发生

在某一景观单元或生态系统的内部, 而水平过程发生在不同的景观单元或生态系统之间。与格局不同, 过程强调事件或现象的发生、发展的动态特征。生态学过程包括生物过程与非生物过程, 生物过程包括种群动态、种子或生物体的传播、捕食者-猎物相互作用、群落演替、干扰传播等等; 非生物过程包括水循环、物质循环、能量流动、干扰等等。景观格局与生态过程之间存在着紧密联系, 这是景观生态学的基本前提。二者相互作用而表现出一定的景观生态功能, 并且这种相互作用受尺度的制约。

传统的生态学思想强调生态学系统的平衡态、稳定性、均质性、确定性以及可预测性, 这些反映“自然均衡”的观点在自然保护和资源管理的应用中长期以来占有统治地位。然而, 生态系统并非处在“均衡”状态, 时间和空间上的异质性才是它们的普遍特征, 而日益剧增的人为干扰使这些特征愈为突出。因此, 强调多尺度上空间格局和生态学过程相互作用以及缀块动态的景观学观点为解决实际的环境和生态问题提供了一个更合理、更有效的概念构架^[3]。空间格局、生态过程与尺度之间的相互关系是景观生态学研究的核心所在。

2 国内外研究现状

2.1 研究方法

2.1.1 景观格局分析方法

收稿日期: 2007-05; 修订日期: 2008-01.

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目“湿地系统水生态过程与格局耦合机理”(编号: 2006CB403301)资助。

作者简介: 胡巍巍 (1970-) 男, 博士研究生, 安徽怀宁人, 主要从事资源环境、景观生态方面的研究。E-mail: hz_f97@126.com

景观格局的静态和动态研究通常借助各种格局指数的设计和分析来实现。在这类研究中,地理信息系统、遥感、数学模型和计算机技术得到广泛应用,并发挥着关键作用。迄今为止,已经提出大量景观格局指数,甚至还包括一些景观格局动态的度量指标。并且以 Fragstats 为代表的景观格局指数计算软件也不断涌现,大大推动了景观格局研究在国际上的快速发展。一方面通过格局指数的计算,定量描述景观的空间形态、结构和异质性,基于此可以实现同一时段不同景观空间格局的比较研究(同时、异地);另一方面,还可以完成同一景观不同时段空间格局的动态分析(同地、异时)和不同景观不同时段空间格局动态的比较研究(异时、异地)。这些方面构成了景观空间格局分析的主要内容^[5]。

景观的空间格局采用缀块、廊道和基底模式进行描述,这种模式为生态规划提供了一种有用的工具,可用于对不同景观进行识别与分析研究景观的结构,是研究景观功能和动态的基础^[4]。空间格局分析方法是指用来研究景观结构组成特征和空间配置关系的分析方法。分析景观结构或空间格局一般由以下几个基本步骤组成:收集和处理景观数据(如野外考察、测量、遥感、图像处理等),然后将景观数字化,并适当选用格局研究方法进行分析,最后对分析结果加以解释和综合。

(1) 景观格局指数

景观格局指数是为定量分析景观格局而设计的反映景观结构组成和空间配置某些方面特征的指标。景观格局特征在三个层次上分析:单个缀块;由若干单个缀块组成的缀块类型;包括若干缀块类型的整个景观镶嵌体。因此,景观格局指数相应地分为缀块水平指数(patch-level index)、缀块类型水平指数(class-level index)以及景观水平指数(landscape-level index)。应用这些指数定量地描述景观格局,比较不同景观之间的结构特征,揭示景观空间配置以及动态变化趋势,研究它们结构、功能和过程的异同。自20世纪70年代以来,不同景观生态学家提出了众多景观格局分析指数^[6-9],然而对于这些景观格局指数的生态学意义缺乏深入的探讨。目前,很多研究只关注景观格局几何特征的分析 and 描述,但忽略了对景观格局意义或内涵的理解,这种趋势因数字化景观数据的容易获得和GIS的广泛应用而进一步得到加强^[10]。如何将景观格局指数与实际的生态过程联系起来依然是目前

研究中的不足。实际应用时应该在充分了解所用指标特点的前提下,根据研究的具体内容和目的,慎重选取能说明问题的、尽量简单的指标,而不是片面追求复杂的公式。不管使用何种指标,都应以理解其所代表的生态学意义为前提^[11]。不是去计算和设计各种格局指标,而是将这些指标同现实景观中的生态过程或自然地理过程、乃至人为过程结合起来。另外,由于许多格局指数的计算基础是对斑块的周长和面积进行各种统计处理,难免存在冗余,因此在选择时应注意各指标间的相互独立性。

景观指数是对景观格局的量化,反应变量(或过程速率)是对生态过程的量化。Lutz Tischendorf作了用景观指数预测生态过程的研究。他认为格局指数,特别是缀块类型水平指数能很好地解释特定类型缀块在异质景观中的扩散过程。然而,一个单一的景观指数不可能对生态过程景观结构的响应作出解释^[12]。用景观指数预测生态过程有一定潜力但是也有缺陷。Lutz Tischendorf通过实验得出以下结论:一、景观格局与生态过程的反应变量之间有统计学上的关系。缀块类型水平指数比景观水平指数通常显示出更强的与反应变量之间的统计学上的关系。二、绝大多数指数与反应变量之间都显示出潜在的不一致和不确定的关系。三、对相应的覆被类型,在低生境数量和破碎化程度下,缀块类型水平指数与生态过程反应变量之间有更强的相关性。四、中性景观模型在有关异质性景观之间扩散的空间格局效应研究中具有应用前景。

(2) 空间统计学方法

许多景观格局的数据以类型图来表示,也就是说,景观格局是以空间非连续型变量来表示的。景观指数方法可以用来分析这类景观数据,以描述空间异质性的特征,然而,在实际景观中,异质性在空间上往往是连续的。从另一方面而言,了解空间异质性在景观中是如何连续变化的,即是否具有某种趋势或统计学规律,是理解景观格局本身及其与生态学过程相互作用的重要环节。这就要求景观格局以连续变量来表示,或通过抽样产生点格局数据来表示。这时景观指数方法不再适用,空间统计学方法正是为解决这些问题发展起来的。空间统计学的目的是描述事物在空间上的分布特征(如随机的、聚集的或有规则的),以及确定空间自相关关系是否对这些格局有重要影响。主要的、常用的和具有代表性的空间统计学方法包括空间自相关分析、克

瑞金空间插值法、波谱分析、尺度方差、小波分析、趋势面分析等。

2.1.2 计算机模拟和景观模型的建立

数学模型,尤其是计算机模拟模型,在景观生态研究中占有十分重要的地位。景观模型的重要性和必要性体现在以下几个方面。一、由于受时间、空间以及设备和资金的限制,在大尺度上进行实验和观测研究往往困难重重,而模型可以充分利用和推广所得的有限数据。二、在实际景观研究中,由于很难找到两个在时间和空间上相同或相似的景观,重复性研究往往不可能,而这一问题可通过模型模拟来帮助解决。三、景观空间结构和生态学过程在多重尺度上相互作用、不断变化,对于这些动态现象的理解和预测就必须借助于模型。四、景观模型可以综合不同时间和空间尺度上的信息,成为环境保护和资源管理的有效工具。与其它生态学领域相比,景观生态学中模型的应用更广泛^[3]。

(1) 主要景观模型

对景观格局进行定量分析,探讨景观格局演变的驱动机制,一个重要目标就是预测未来景观格局演变趋势。景观格局演变模拟模型的研究已经取得了重要进展。按照性质的差异,可以将景观格局动态模型划分为 5 大类型,即基于行为者(agent-based)的景观变化模型、经验统计模型、最优化模型、动力模拟模型和混合/综合模型。按照机理,可进一步把景观动态模型归并为 3 个大类,包括随机模型、邻域规则模型和过程模型^[3]。在各类模型的构建和应用过程中都不可避免地面临着数据采集、尺度依赖性、格局演变的空间位置和规模、算法的优化、适度综合以及验证和评价等问题。这些问题都还没有很好地解决,因而成为未来景观模拟模型研究的重要内容。

生态过程的模型研究也有相当快的发展。较为常见模型类型有作物生长模拟模型、森林生态系统及其干扰与管理模型、野生动物物种的竞争和共生模型等^[4]。然而,生态过程模型通常需要大量的实测数据支撑,模型开发的原型尺度相对较小,而且对空间异质性考虑不足,因而一定程度上限制了模型的尺度扩展和推广应用。

景观格局与生态过程之间的关系是十分复杂的,往往是非线性的、复杂的、耦合与反馈关系。建立格局——过程模型是景观生态学的重要研究领域。景观格局涉及系统的生物、生境诸多因子,建立

数学模型不可能包括全部因子,只能选择对于生态过程具有重要影响的关键因子以及对于人类社会影响巨大的部分因子。一个合理的模型为处理浩瀚的生态空间数据提出一种实用的模型结构和方法,在此基础上,进一步建立空间异质性与生态系统结构与功能之间的关系。依据不同的标准对于景观格局—生态过程模型有不同的分类。如果按照模型涉及的内容分类,可以区分为干扰传播模型、复合种群模型、植被动态模型、土地利用模型等。按照数学方法分类,可以分为解析模型和数值分析模型。传统的解析模型,大多为线性模型,尽管具有精确解,但是仅有少数几个变量,难以模拟生态系统的复杂过程,所以有很大的局限性。景观模型的发展趋势是利用信息技术和计算机技术模拟复杂生态演进过程,处理大量数据并且演算求解,即采用数值分析模型。求解过程中对于现实的生态空间信息的数学处理方法,可以采用连续型模型,也可以采取离散型模型。一般认为,离散型模型在处理数学的场问题方面更具优势,比如位移场、流场、污染场等。离散型模型是把连续问题离散化,即划分为若干细小单元,在地理信息系统中称为“栅格”,每个栅格都包含若干生态信息(水文、气象、土壤、植被类型、生物量、种群密度、养分含量等),每个栅格又具有精确的空间定位,成为所谓空间生态数据。由全部栅格组成了区域的栅格网。这种栅格网可以反映生态系统的空间异质性,也可以反映各个栅格之间的相互耦合及反馈关系。有了这种离散型的数据结构,通过建立基本方程,进而可以模拟生态系统的结构与功能的动态演进过程。所谓离散型模型都存在着场问题的离散—整合的过程,最终求得全局的解。求解基本方程可以采用微分方程、差分方程的数值解法。与 GIS 相对应,空间景观模型按照处理空间信息的方式可以分为栅格型景观模型(grid-based landscape model)和矢量型景观模型(vector-based landscape model)^[4]。

(2) 尺度推绎

具有等级缀块动态思想的景观生态学概念强调相对尺度,它考虑格局与过程的异质性和多尺度特征。尺度存在的重要根源之一在于地球表层自然界的等级组织性。等级理论为尺度及尺度推绎的研究提供了一种系统的科学思路^[13],此理论的核心观点之一就是系统的组织性来自于各层次间过程速率的差异^[14]。在一个复杂的系统内可分为有序的层

次若干,从低层次到高层次,行为或过程的速率逐渐减小。即在高的层次中某一要素的变化过程较慢,而在低层次中其变化过程却比较快。不同等级层次系统之间具有相互作用的关系,高层次对低层次有制约作用,低层次为高层次提供机制与功能。景观生态学的研究基本上对应于中尺度范围,即从几平方公里到几百平方公里、从几年到几百年。格局与过程的时空尺度化是景观生态学的研究热点,尺度分析和尺度效应受到格外重视和发展。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。无论是时空上的还是结构与功能上的格局,都与观察尺度密切相关,必须要考虑尺度效应。尺度分析一般是将小尺度上的斑块格局经过重新组合而在较大尺度上形成空间格局的过程,与之相伴的是斑块形状趋向规则化以及景观类型的减少。

生态学中大多数研究是在小范围和短时间内完成的,而且缺乏重复性。这些短时间和小空间上的研究成果很难说明在大的时间尺度(几十年或更长)和空间尺度(如区域景观层次及更高层次)上发生的生态学格局和过程。然而,这些大尺度上的现象往往很重要。首先,大多数环境和资源管理问题发生在大、中尺度上,而且需要在这些相应的尺度上解决;其次,为了理解自然,我们必须考虑大尺度上的格局和过程并把它们与我们比较熟悉的小尺度上格局和过程联系起来。要解决大尺度的问题,就必须将一个尺度上的信息推绎到另一个尺度上,这就是所谓的尺度推绎。通过建立景观模型和应用GIS技术,可以根据研究目的选择最佳尺度,并对不同尺度的研究成果进行转换。但是,由于地理现象和生态过程的尺度效应,不同尺度上影响生态过程的因子变化较大,由此导致在将一种尺度上的生态规律转换到另外一种尺度上时往往会出现较大的偏差。因此直到目前为止,一直未能找到适宜的尺度转换方法^[15]。

2.2 景观格局与生态过程相互关系研究现状

景观格局的形成反映了不同的景观生态过程,与此同时景观格局又在一定程度上影响着景观的演变过程。从某种意义上说,景观格局是各种景观生态演变过程中的瞬间表现。然而由于生态过程的复杂性和抽象性,很难定量地、直接地研究生态过程的演变特征。生态学家往往通过研究景观格局的

变化来反映景观生态过程。

在景观格局分析中,从数据采集到定量分析方法和过程以及结果解释都普遍存在着不确定性,应该引起高度重视。基于矢量的格局分析理论的提出,为从分析方法上减少不确定性提供了良好的支持,沿着矢量化的方向深入下去,可以弥补传统上基于栅格算法的不足,有望在景观格局的量化分析和模型建设方面取得重要进展。现实景观中,格局与过程是不可分割的客观存在。只是为了使问题简化,在研究中有的侧重景观格局及其动态的分析,有的则侧重生态过程的深入探讨。实际上,景观格局和生态过程之间具有多种多样的相互影响和作用,忽略任何一方,都不能达到对景观特性的全面理解和准确把握。除此之外,研究中的顾此失彼还引发了一些具体问题,主要表现为以下几方面。

首先,景观格局的刻画以各种景观指数的设计和计算分析为主要手段,然而,由于缺乏对景观格局与生态过程之间关系的深刻理解,很容易导致景观格局指数的误用或滥用^[5]。在理论认识上,“过程产生格局,格局作用于过程,格局与过程的相互作用具有尺度依赖性”,在以往的景观生态学研究几乎被认为是一个公理,未经深入论证就得到了广泛应用。但事实上,格局与过程的关系及其尺度变异性的表现跟景观本身一样复杂。特定的景观空间格局并不必然地与某些特定的生态过程相关联,而且即便相关的话也未必是双向的互作。在这一问题上, Li 和 Wu(2004)分三种情形展开了精彩的论述。这三种情形包括格局与过程的单向关联、非空间生态过程、格局和过程变化节律不同并且不在相同的空间尺度域内^[16]。在这些情形下,景观格局与生态过程之间便不存在互为因果或相互依赖的关系。因此,格局——过程原理需要进一步深入分析和论证,以明确其关联的性质及其尺度依赖性特征。

其次,作为景观格局分析主要工具的景观指数,其生态学意义很多情况下不够确切,甚至很模糊,这也为景观格局与生态过程关系的研究制造了一定困难。同时,景观格局指数本身还存在其它一些明显的局限,主要表现在:(1)对景观格局变化的响应以及格局指数与某些生态过程的变量之间的相关关系不具有一致性^[16];(2)景观指数对数据源(遥感图像或土地利用图)的分类方案或指标以及观测或取样尺度敏感而对景观的功能特征不敏感^[11];(3)很多景观指数的结果难以进行生态学解释。

由于上述种种原因的存在,景观生态学研究中有两种主要倾向。一种是就格局论格局,忽视了格局的生态学意义及其与生态过程和功能的关系;另一种是虽然考虑到了景观格局与生态过程的关系,却把相关关系与因果关系混为一谈。这两种倾向都是景观格局与生态过程相互关系研究的重要障碍。

景观格局与生态过程的相互关系及其尺度转换是国际景观生态研究的热点领域。早期景观格局与生态过程的研究多集中在对各种干扰的研究,尤其是关于林火干扰的研究。为自然保护区设计和生物多样性保护而进行的物种在异质景观中的分布、运动和生存的分析,也是格局与过程的重要研究内容^[17]。目前所取得的研究成果包括森林生态系统对景观破碎化的敏感性模型、土地利用结构与生态过程,主要有土地利用结构与土壤水分动态、土壤养分变化以及与土壤侵蚀的研究、土地利用方式与景观格局演变对生物过程的影响研究、景观空间格局对生态系统养分循环以及河流水质的影响;农业景观中的篱笆、沟渠网络与水分、养分运动关系研究;岸边植被缓冲带与水分、养分流动之间关系研究;尹澄清等研究了白洋淀水陆交错带对营养物质的截留作用和我国南方农村地区多水塘系统在截留农田中氮磷以及农药方面的重要作用^[18];李秀珍等做了不同景观格局对湿地养分去除功能的影响研究^[19],还有关于微景观结构对水分、养分的影响研究^[1],景观格局与过程对鸟类繁殖、迁移、觅食等活动影响的研究。这些成果以不同的方法、从不同的侧面,剖析了景观格局对自然生态过程的影响,在理论上加深了对景观异质性作用的了解。

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研究的关键,但是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,加上面状生态过程监测数据无法直接获得,导致很难定量描述景观格局与生态过程之间的关系^[15]。目前的研究主要还是零散的、经验式的、定性的居多,远没有达到系统化、定量化、理论化的高度。

3 研究展望

目前的研究多集中在景观结构和格局上,景观格局与生态过程间相互关系的研究相对较少。现在

虽然已经认识到格局、过程与尺度三者之间关系的重要性,然而,这些关系的研究仍处于初级阶段。往后应该多重视过程本身,以及过程和格局的关系。目前虽然有格局对景观生态过程的影响方面的研究,但只是停留在理论探讨阶段,其主要困难在于数据的难以获得,尤其是横向的通量数据无法或者很难观测。现在关于流或过程的研究大都是经验性的,但这些经验性的信息积累也会成为未来景观生态学原理形成的基础。进一步的发展应主要依赖概念公理体系的建立和技术的改进^[20]。在长期定位观测、空间数据管理和分析(如GIS、RS、GPS)、多准则决策、基于个体的建模、复杂性科学等方面新技术、新领域的不断发展和综合集成趋势下,景观格局和生态过程的耦合研究,作为解析生态复杂性的重要途径尽管还有相当的难度,其可行性已毋庸置疑^[9]。

土地利用结构与土壤水分、养分、水土流失等生态过程之间关系的研究,是近年来景观格局与生态过程研究的重要方面。土地利用及其结构的变化不仅能够改变自然景观的面貌,而且深刻影响着景观中的物质循环和能量流动,改变着土壤水分、养分和土壤侵蚀等生态过程的时空分布。深入探讨土地利用结构与生态过程的关系,有助于把握土地利用变化的生态环境效应,对探讨区域生态环境乃至全球环境的变化具有重要的意义。同时,由于生态过程具有明显的时空尺度特征,研究土地利用结构与生态过程的关系,也为建立相应的生态过程模型和尺度转换提供科学依据。然而,由于生态过程的复杂性和抽象性,目前的研究多集中在孤立的中、小尺度上开展,大尺度和多尺度的综合研究相对不足,难以为大规模的综合治理与开发服务。在今后的土地利用结构与生态过程的研究中,尚需要注重区域范围内的研究,通过尺度转换方法和空间信息技术等,探讨多尺度格局与生态过程的相互关系,揭示区域尺度上生态过程研究的特点与规律^[4]。

今后景观格局与生态过程的研究重点应是:区域的综合和区域内的异质性研究;多学科的区域综合实验研究,区域综合的方法与模型;区域内景观多样性、景观格局与生态过程研究;景观生态过程方面的重点是生态水文过程、生物地球化学循环过程、人地相互作用过程、物种迁徙过程等;尺度推绎与转换;模型的发展;非线性科学和复杂性科学在景观生态研究中的应用;景观生态过程模型的发展;模型的有效性检验与验证。在方法上要加强对

测、实验、调查与模拟;加强遥感与野外观测的结合;加强基础和应用基础研究;加强区域综合和全球研究;加强学科交叉,特别是一级学科的交叉^[21]。今后景观格局与过程相互作用研究的趋势可概括为:理论的规范化、方法的定量化及实证内容的广泛化等三点。即理论总结应具较高的抽象意义和普遍性,定量化研究的结果和模式要有明确的生态意义,实证调查和研究范围应涉及不同尺度的景观格局和各种各样的景观过程。只有这样,景观格局与过程相互作用的研究才可能达到一个新的水平。

参考文献:

- [1] 傅伯杰,陈利顶,马克明等. 景观生态学原理及应用. 北京: 科学出版社, 2001.
- [2] 傅伯杰, 陈利顶, 王军, 孟庆华, 赵文武. 土地利用结构与生态过程. 第四纪研究, 2003, 23(3): 247~255.
- [3] 邬建国. 景观生态学——格局、过程、尺度与等级. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [4] 董哲仁. 河流生态修复的尺度格局和模型. 水利学报, 2006, 37(12): 1476~1481.
- [5] 吕一河, 陈利顶, 傅伯杰. 景观格局与生态过程的耦合途径分析. 地理科学进展, 2007, 26(3): 1~10.
- [6] He H S. An aggregation index (AI) to quantify spatial patterns of landscapes. Landscape Ecology, 2000, 15(7): 591~601.
- [7] Olsen E R, Ramsey R D, Winn D S. A modified fractal dimension as a measure of landscape diversity. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 1993, 59: 1517~1520.
- [8] O'neill R V, Kreummer J R, Gardner R H, et al. Indices of landscape pattern. Landscape Ecology, 1998, (1): 153~162.
- [9] Turner M G and Gardner R H, eds. Quantitative methods in Landscape Ecology. New York: Springer-Verlag, 1990, 3~16.
- [10] Haines-Young R H and Chopping M. Quantifying landscape structure: a review of landscape indices and their application to forested landscapes. Progress in Physical Geography, 1996, 20: 418~445.
- [11] 李秀珍, 布仁仓, 常禹等. 景观格局指标对不同景观格局的反应. 生态学报, 2004, 24(1): 124~132.
- [12] Lutz Tischendorf. Can landscape indices predict ecological processes consistently? . Landscape Ecology, 2001, 16: 235~254.
- [13] 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.
- [14] 王国平, 刘景双. 湿地生物地球化学研究概述. 水土保持学报, 2002, 16(4): 144~148.
- [15] 陈利顶, 傅伯杰, 徐建英等. 基于“源-汇”生态过程的景观格局识别方法. 生态学报, 2003, 23(11): 2406~2413.
- [16] Li H, Wu J. Use and misuse of landscape indices. Landscape Ecology, 2004, 19: 389~399.
- [17] 臧淑英, 黄樨, 郑树峰. 资源型城市土地利用变化的景观过程响应. 生态学报, 2005, 25(7): 1700~1706.
- [18] Baoqing Shan, Chengqing Yin, Guibao Li. Transport and Retention of Phosphorus Pollutants in the Landscape with a Traditional, Multipond System. Water, Air, and Soil Pollution, 2002, 139: 15~34.
- [19] 李秀珍, 肖笃宁, 胡远满等. 辽河三角洲湿地景观格局对养分去除功能影响的模拟. 地理学报, 2001, 56(1): 33~41.
- [20] 王仰麟. 农业景观格局与过程研究进展. 环境科学进展, 1998, 6(2): 29~34.
- [21] 傅伯杰, 吕一河. 景观生态学的进展与展望, 2004, 8.4
- [22] 胡金明, 邓伟, 夏佰成. LASCAM 水文模型在流域生态水文过程研究中的应用. 地理科学, 2005, 25(4): 427~432.
- [23] Mitchell D S, Raisin G W, Croome R L. The effectiveness of a small constructed wetland in ameliorating diffuse nutrient loadings from an Australian rural catchment. Ecol Eng, 1997, 9: 19~35.
- [24] 丰华丽, 王超, 朱光灿. 土地利用变化对流域生态需水的影响分析. 水科学进展, 2002, 13(6): 757~761.
- [25] Georg A. Janauer. Ecohydrology: fusing concepts and scales. Ecological Engineering 16, 2000, 9~16.
- [26] Stefan Krausea, Jörg Jacobsb, Axel Bronstert. Modelling the impacts of land-use and drainage density on the water balance of a lowland-floodplain landscape in northeast Germany. Ecological modeling, 2006.
- [27] 高超, 朱继业, 窦贻俭等. 基于非点源污染控制的景观格局优化方法与原则. 生态学报, 2004, 24(1): 110~113.
- [28] 岳隽, 王仰麟, 李贵才, 吴健生. 基于水环境保护的流域景观格局优化理念初探. 地理科学进展, 2007, 26(3): 38~46.
- [29] 王学雷, 吴宜进. 马尔柯夫模型在四湖地区湿地景观变化研究中的应用. 华中农业大学学报, 2002, 21(3): 288~291.
- [30] 黄方, 刘湘南, 王平. 嫩江中下游沼泽湿地景观空间格局变化. 资源科学, 2005, 27(4): 140~145.
- [31] 李颖, 张养贞, 张树文. 三江平原沼泽湿地景观格局变化及其生态效应. 地理科学, 2002, 22(6): 677~681.
- [32] 赵彦伟, 杨志峰. 河流生态系统修复的时空尺度探讨. 水土保持学报, 2005, 19(3): 196~199.

- [33] 李秀珍. 从第十五届美国景观生态学会看当前景观生态学发展的热点和前沿. 生态学报, 2000, 20 (6):1114~1115.
- [34] 白军红, 欧阳华, 杨志锋. 湿地景观格局变化研究进展. 地理科学进展, 2005, 24 (4):36~42.
- [35] 刘红玉, 李兆富. 流域湿地景观空间梯度格局及其影响因素分析. 生态学报, 2006, 26(1):214~218.
- [36] Robert H. Gardner, Dean L. Urban. Neutral models for testing landscape hypotheses. *Landscape Ecol*, DOI 10.1007/s10980-006-9011-4.
- [37] Kimberly A. With, Anthony W. King. Dispersal success on fractal landscapes: a consequence of lacunarity thresholds. *Landscape Ecology* 14: 73–82, 1999.
- [38] Robert H. Gardner, Dean L. Urban. Neutral models for testing landscape hypotheses. *Landscape Ecol*, 2006, 20(4):407–418.
- [39] Georg A. Janauer. Ecohydrology: fusing concepts and scales. *Ecological Engineering* 16, 2000, 9~16.
- [40] Victor V. Klemas. Remote sensing of landscape-level coastal environmental indicators. *Environmental Management*, 27 (1): 47~57.
- [41] Annette Bař, Jořg Löffler. Ecological process indicators used for nature protection scenarios in agricultural landscapes of SW Norway. *Ecological Indicators* xxx, 2006, xxx–xxx.
- [42] Zalewski M. Ecohydrology—the scientific background to use ecosystem properties as management tools toward sustainability of water resources. *Ecological Engineering*, 2000, 16 (1): 1–8.
- [43] I. OpNeill, R. V. DeAngelis, D. L., et al. A hierarchical concept of ecosystem. New Jersey: Princeton Univ Press, 1986.

Advance in Research of the Relationship between Landscape Patterns and Ecological Processes

HU Weiwei^{1,2,3}, WANG Genxu¹, DENG Wei^{1,3}

(1. Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS, Chengdu 610041, China;

2. Resource and Environment College, Anqing Normal College, Anqing 246003, China;

3. Graduate University of Chinese Academy of Science, Beijing 100093)

Abstract: Landscape is a heterogeneity region formed by a lot of ecosystems or mosaic constituted by different land uses. Landscape patterns are the concrete embodiment of landscape heterogeneity and the result of functions of various ecological processes. The formation of landscape patterns reflects different ecological processes; at the same time, landscape patterns affect landscape succession and variation processes in a certain degree. The relationship between spatial patterns, ecological processes and scales is the core research contents of landscape ecology. This article reviews the domestic and foreign research progress in research methods of landscape patterns and ecological processes and the relationship between landscape patterns and ecological processes. Finally the authors analyze the problems and insufficiency of the present studies, hot research spots, and the tendency of the relationship between landscape patterns and ecological processes in the future.

Key words: landscape patterns; ecological processes; scale