

基于 RS 和 GIS 技术的湿地景观格局变化研究进展*

孔凡亭 郝敏 李悦** 孔范龙 陈苑

(青岛大学化学化工与环境学院, 山东青岛 266071)

摘要 湿地是自然界最富生物多样性的生态景观, 具有独特的生态结构与功能, 蕴含的丰富资源为人类生存与发展提供了物质保证. 湿地景观格局是各种生态过程综合作用的结果, 湿地景观格局研究是湿地生态学领域研究的热点问题, 目前 RS 和 GIS 技术的结合已成为湿地景观格局变化研究的重要途径和手段. 本文从 RS 和 GIS 技术支持下的湿地景观格局研究方法、湿地景观格局指数和湿地景观格局演变驱动力等方面综述了国内外湿地景观格局变化的研究进展, 探讨了 RS 和 GIS 技术相结合在湿地景观格局变化监测研究、湿地景观格局指数选取与应用以及自然和人为共同作用的驱动机制问题中的应用, 指出目前研究中存在的不足, 并对未来的研究进行了展望.

关键词 RS GIS 湿地景观格局 景观格局指数 驱动机制

文章编号 1001-9332(2013)04-0941-06 **中图分类号** Q149; X144 **文献标识码** A

Wetland landscape pattern change based on GIS and RS: A review. KONG Fan-ting, XI Min, LI Yue, KONG Fan-long, CHEN Wan (College of Chemical and Environmental Engineering, Qingdao University, Qingdao 266071, Shandong, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2013, 24(4): 941-946.

Abstract: Wetland is an ecological landscape with most biodiversity in nature, which has unique ecological structure and function, and contains abundant natural resources to provide material guarantee for human's living and development. Wetland landscape pattern is the comprehensive result of various ecological processes, and has become a hot issue in wetland ecological study. At present, the combination of geographic information system (GIS) and remote sensing (RS) technologies is an important way to study the wetland landscape pattern change. This paper reviewed the research progress in the wetland landscape change based on GIS and RS from the aspects of the research methods of wetland landscape pattern, index of wetland landscape pattern, and driving forces of wetland landscape pattern evolution, and discussed the applications of the combination of GIS and RS in monitoring the wetland landscape pattern change, the index selection of wetland landscape pattern, and the driving mechanisms of the combined action of human and nature. Some deficiencies in the current studies were put forward, and the directions of the future studies were prospected.

Key words: RS; GIS; wetland landscape pattern; landscape pattern index; driving mechanism.

湿地是一类既不同于水体、又不同于陆地的特殊过渡类型生态系统, 为水生、陆生生态系统界面相互延伸扩展的重要空间区域, 是自然界最富生物多样性的生态景观和人类最重要的生存环境之一. 湿地在调蓄洪水、净化水质、调节气候、维持生物多样性和区域生态安全等方面发挥着巨大作用, 对地区、

区域乃至全球气候变化、经济发展和人类生存环境有着重要的影响^[1]. 景观空间格局是指大小和形状不一的景观斑块在空间上的排列, 它是景观异质性的重要表现, 又是各种生态过程在不同尺度上的作用结果. 湿地景观格局取决于湿地资源的地理分布和组分, 与湿地生态系统抗干扰能力、恢复能力、稳定性、生物多样性等有着密切联系. 同时, 湿地景观格局不是一成不变的, 目前的格局是在过去景观流的基础上形成的^[2].

自 20 世纪 80 年代以来, 景观生态学关于格局、

* 国家自然科学基金项目(41101080)、山东省自然科学基金项目(ZR2011QD009)、山东省高等学校科技计划项目(J12LC04)和青岛市公共领域科技支撑计划项目(12-1-3-71-nsh)资助.

** 通讯作者. E-mail: qdenv@126.com

2012-07-27 收稿, 2012-10-18 接受.

过程、尺度和驱动机制分析等原理与方法逐渐应用于湿地科学领域中,推动了湿地景观格局演变的研究^[3].我国湿地景观系统研究开始较晚,20世纪90年代对辽河三角洲湿地景观生态研究开拓了湿地景观研究的新领域^[4],进入21世纪以来,随着RS和GIS技术的应用,湿地景观研究得到了迅速发展.本文主要从RS和GIS技术支持下的湿地景观格局研究方法、湿地景观格局指数和湿地景观格局演变驱动力等方面综述了国内外湿地景观格局变化的研究进展,分析了RS和GIS技术在湿地景观格局研究中的应用和存在的一些问题,并对未来的研究进行了展望,为湿地景观格局变化研究提供科学参考.

1 基于RS和GIS技术的湿地景观格局研究方法

从现有的湿地景观结构和格局研究方法来看,98%的研究是利用RS和现有图件获取地表湿地景观信息,利用GIS技术实现湿地信息定量化和空间化分析^[5].RS为获取湿地资源环境状况提供了有效的空间信息源,通过它可以获得大范围、多分辨率、多波段、多时相的地表信息,为从不同时序上对湿地景观进行分析创造了条件.GIS具有强大的空间信息处理和分析功能,能够快速、精确和综合地对复杂的湿地系统进行空间定位和过程动态分析^[6].RS和GIS技术的发展使景观监测的数据源更加丰富,连续且大范围的湿地景观格局监测变得更加容易^[7-8].

1.1 RS数据源的选择与分类

湿地景观格局研究在数据挖掘上的首要问题是数据源的选择,即采用何种遥感图像.通过比较已有的湿地研究文献发现,TM、ETM+、MSS、SPOT、JERS-1等影像数据在湿地景观格局研究中具有较高的使用频率,其中Landsat-TM系列影像最为常用^[9].这些遥感影像因其波段选择和分辨率等技术参数各不相同,适用于不同目的.近年来,由于分辨率的优势,Ikonos、Quickbird等一批高分辨率卫星影像也开始应用到湿地景观研究中.闫淑君等^[10]选取1989、1997年的Landsat TM影像和2005年的SPOT5影像为数据源,研究了琅岐岛湿地景观格局变化,结果表明人类活动对湿地景观的干扰较大;Shengli等^[11]在搜集1910—2009年美国北达科他州三叶湖地区(Cottonwood Lake area)的Palmer干旱指数、Landsat影像和航拍记录的基础上,利用新开发的湿地水面积指数(wetland water area index,WWAI)、水分配模型和附加程序来模拟和分析湿地景观水面变化,为

湿地生态系统服务提供了依据.

湿地景观遥感分类是湿地景观格局研究中的关键环节,目前遥感分类技术还未形成较为成熟、统一的方法体系.Maingi和Marsh^[12]利用Landsat MSS/TM数据对肯尼亚塔纳河(Tana River)下游进行了湿地景观动态监测和研究;杜红艳等^[13]对扎龙湿地研究区Landsat-7 ETM遥感影像数据采用了非监督分类和人工解译相结合的方法,提高了计算机自动分类的精度;王薇等^[14]在研究黄河三角洲新生湿地景观格局特征时采用非监督分类,对分类后的图像进行重组、聚类统计、合并相同类别地物,纠正错分象元,得到最终的遥感影像分类图像.由于湿地遥感分类精度直接影响到湿地景观的制图精度,进而关系到湿地景观信息的提取和分析,因此,为了提高湿地遥感影像的分类精度,当前湿地景观格局研究在遥感分类上需要进行深入探索^[9].

遥感技术对某些特定的研究还存在不足,例如应用遥感技术进行植被类别区分目前仍存在“同谱异物”、“同物异谱”现象,使得其对于湿地植被的详细划分很难达到理想的精度;遥感技术发展的历史比较短,所积累的遥感资料不足100年,在某些时间跨度较长的湿地景观变化研究中,这一缺陷凸显出来,此时各种长期的自然、社会、经济和历史资料将成为主要的信息来源^[6].

1.2 GIS参数的获取与应用

GIS在湿地景观格局研究中的应用主要是在辅助景观类别分类、景观指数统计、景观动态信息提取等方面.GIS参数是指在湿地遥感数据处理中基于湿地景观尺度利用GIS方法量算出的属性数据,主要代表了湿地景观或斑块的分佈、类型、形状、大小等指标.从参数的获取和数据的应用来看,湿地基础数据可以在研究中直接用于分析湿地景观的斑块分佈、面积变化等景观的静态格局,如果数据具有足够的时间序列,还可以用于分析不同时间尺度下湿地景观格局的变化^[9].Kingsford和Thomas^[15]利用卫星影像研究了1975—1998年澳大利亚Murrumbidgee河的洪泛湿地的面积变化,发现该区洪泛湿地近23年丧失了大面积湿地;张华兵等^[16]将盐城国家级自然保护区核心区划分为人工管理区和自然湿地两种模式,根据1987、1997和2007年3个时相的景观资料,运用RS、GIS技术和景观生态学方法,选取景观多样性和景观优势度等指数,分析了不同驱动力下湿地景观格局的变化差异.

对于湿地景观格局研究,仅利用GIS传统的空

间分析功能是不够的,还可以在 GIS 基础上,建立湿地专题信息系统。该系统除了具有常规的数据存储、浏览和查询功能外,还可通过 GIS 从湿地信息数据库中获取相关的自然、社会、经济评价指标,用其对湿地景观格局进行评价^[6]。

2 基于 RS 和 GIS 技术的湿地景观格局指数分析

景观格局指数是指能够高度浓缩景观空间格局信息,反映其结构组成和空间配置等方面特征的简单定量指标^[17]。湿地景观格局指数可以用于湿地景观格局特征和变化的分析,可以实现湿地景观空间格局同时异地、同地异时和异地异时的比较研究^[18]。

2.1 景观格局指数的类型及相关性

景观格局指数的分类标准多种多样,需要从景观生态学的基本原理出发,从斑块、廊道、基质的基本结构出发,对景观指数进行分类^[19]。景观格局指数通常采用 Fragstats、Apack 和 Patch Analyst 3 种常用软件计算获得。随着 GIS 和计算机技术的迅速发展,一些新的景观格局指数不断产生,如孔隙度指数、聚集度指数等^[20]。目前,反映景观格局变化的特征指数已有 200 个左右,这些指数中有些具有相同的生态学意义,如均匀度和优势度指数与多样性指数差不多,只是前两者增加了对类型数目的不敏感性^[21];有些指数不具有明确的生态学意义,甚至有些指数之间相互矛盾,如平均斑块周长/面积比有时与形状指数通用,但后者已被证明现实意义不大,有时甚至自相矛盾^[21]。因此,在选用景观格局指数时,应充分了解所选指数的特点和各指数之间的相互独立性,根据研究内容和目的以及指数对景观格局的敏感度,选取能说明问题并尽量简单的指数,综合运用 RS 和 GIS 技术对景观格局指数进行筛选。

2.2 湿地景观格局指数的选取

在自然或人为干扰下,景观一般由单一、连续和均质的整体向复杂、不连续和异质的斑块镶嵌体变化,由于各种指数对景观所表征的生态环境具有不同的影响程度,可借鉴前人的研究成果并结合研究区的实际情况,综合分析各景观指数对生态环境的贡献大小^[22]。通常采用 RS 和 GIS 技术在监测和分析湿地景观结构类型的基础上选取景观格局指数。首先,根据国际湿地分类原则和实际情况,考虑遥感的可操作性,设计出研究区域湿地遥感分类系统;然后,选取适当波段组合对不同时期的 RS 图像进行处理,以充分判读所获取的湿地类型,对影像图中不

同颜色斑块进行人工判读后,在 GIS 系统中进行计算机屏幕勾绘,并进行数据处理、输出以及地理数据库的更新;最后,选用一些最能反映湿地景观格局变化特征的景观格局指数,根据指数在不同时段内的动态变化来反映景观格局空间结构特征的变化。如采用斑块数、斑块面积、最大斑块指数和斑块密度等分析研究区湿地景观斑块特征;采用分离度指数和破碎度指数分析湿地景观破碎状况;采用景观多样性指数、优势度指数和均匀度指数分析景观多样性特征;通过各景观要素转移概率研究湿地景观要素的变化方向和稳定性等^[23-24]。

吴涛等^[25]利用高分辨率遥感数据,建立了适合不同分辨率的河口湿地景观分类体系,通过 GIS 技术进行数据处理,计算出研究区最大斑块指数、破碎化指数、聚合度指数等湿地景观格局指数,分析了 1984—2008 年大洋河河口湿地景观格局的动态变化;王茜等^[26]利用 GPS 进行空间定位辅助,综合运用 RS 和 GIS 技术选取出景观多样性指数、景观优势度指数、景观均匀度指数和景观形状破碎度指数等 4 个指数,对洪湖湿地结构类型进行监测;McKinney 等^[27]于 2008 年 5 月中旬至 6 月期间,通过对美国东北部城乡湿地及邻近山地 99 个随机地点湿地景观中鸟类物种丰富度指数进行了计算,结果表明,城市景观湿地为鸟类的觅食和繁殖提供了资源和空间,保护和恢复湿地资源是维持城市湿地景观生物多样性的的重要手段。总之,研究者需要结合研究目的选用合适的景观格局指数或构建新指数,以加强对湿地景观格局演变特征的研究。

2.3 湿地景观格局指数的应用

国外湿地景观研究以景观结构与生态过程和功能的研究为主,研究方法具有多样化特点,许多方法表现在 GIS 应用的多样性^[28],而且,在湿地景观格局指数的应用上,很少通过罗列景观指数的方式揭示景观结构,而是针对具体研究问题,构建合适的景观格局指数。例如,Abdullah 和 Nakagoshi^[29]利用 GIS 缓冲区分析方法获得景观形状破碎度指数来揭示不同空间尺度下湿地景观丧失、破碎化以及格局特征与动态规律;Kelly 等^[30]在研究美国旧金山河口地区植被景观格局的异质性对湿地功能的影响时,采用高分辨率(20 cm)的遥感彩色红外图像获取了 2 年的植被格局变化数据,并进行了多尺度分析。我国大多数湿地景观研究在解译判读遥感影像的基础上,除了简单应用 GIS 技术实现数据量化,采用景观格局指数揭示湿地景观结构与格局一般特征

和变化规律外,很少使用湿地景观结构与功能分析结合 GIS 技术的方法,无法反映具体的生态过程和景观功能,难以满足更高层次的景观格局分析要求^[31]. 因此,针对不同区域湿地景观要素空间分布特征及其与自然和人文地理要素之间的关系,需要在获取遥感数据的前提下采用合适的方法(如 GIS 窗口法^[32])揭示湿地景观结构特征和变化规律.

3 基于 RS 和 GIS 技术的湿地景观格局演变驱动力分析

在 RS 和 GIS 技术支持下对湿地景观格局演变驱动力的分析,主要包括确定引起湿地景观格局演变的驱动因子和定量分析引起湿地景观格局演变的各驱动因子之间的相对重要性.

湿地景观格局演变的驱动因子是指导致湿地景观类型、格局及功能发生变化的主要自然和社会经济因素. 在自然系统中,气候、土壤、水文和自然灾害等被认为是主要的驱动因子类型;在社会经济系统中,通常将驱动因子分为 5 类,即人口、技术、经济体制、政策和文化^[33]. 社会经济因素通过影响人们在土地利用上的决策对湿地景观的变化产生直接影响,它们相对活跃,是目前和未来短时空尺度内塑造湿地景观格局变化的主要外生驱动因素^[34]. 王永丽等^[35]利用 GIS 技术、RS 影像和 Fragstats 3.3 景观统计软件,研究了黄河三角洲 2000 和 2009 年湿地不同时空尺度的景观格局变化,结果表明,人类活动已成为黄河三角洲滨海湿地景观格局变化的主要驱动因子;刘艳芬等^[36]利用 1995 和 1999 年的 Landsat TM 遥感影像,结合 GIS 技术,分析黄河改道清 8 汉前后的黄河三角洲东部自然保护区湿地景观格局的变化特征,得出影响保护区湿地景观格局变化的主要因素是黄河改道、黄河断流和人类活动; Bao 等^[37]结合 RS 和 GIS 技术对西班牙 Traba 滨海湿地进化过程中主要驱动力进行分析,发现不同时期湿地进化有着不同的驱动因素,包括海平面上升、地形继承、大陆的沉积物供给等.

驱动因子的状态与功能随研究时空尺度的不同而异,因此必须在特定时空尺度下利用合适的模型通过定量分析法对驱动因子进行辨识,其关键是如何在一个模型中最大程度地量化各个驱动因子并体现它们之间的相对重要性. 目前,国内外学者主要采用经验模型和统计模型方法对湿地景观格局演变的驱动力进行定量分析^[38-41]. 经验模型主要是以过去几十年观测到的湿地景观格局变化数据为基础,通

过选取各种数学形式对数据进行分析,以达到在一定时空尺度上定量表征各驱动因素的目的,如反映研究时段内湿地景观空间变化规律的斑块空间质心模型、反映不同景观要素空间分布方向性差异的矢量景观方向指数模型. 统计模型是指以概率论为基础,采用统计方法建立的模型,如反映景观要素类型间相互转化情况的马尔柯夫模型、反映湿地时空动态变化特征的细胞自动机模型. 其主要分析方法包括相关分析、主成分分析与回归分析^[42]. 刘艳艳等^[43]以珠海市 1988、1998 和 2008 年 3 期 TM 影像为基础数据,在 RS 和 GIS 技术支持下,运用土地利用转移矩阵和相关景观格局指数,对珠海市滨海湿地 20 年间景观格局的动态变化过程进行定量分析; Brazner 等^[44]利用函数指标分析方法,选取 2002—2004 年美国五大湖区沿线 450 个点的 6 种生物组合指标和 66 种候选物种,研究了地理、地貌和人类活动对湿地的影响; Withey 和 van Kooten^[45]利用直线回归分析方法,研究了气候变化对加拿大西部地区湿地的影响,结果显示气候变化和降水减少使湿地减少率在 7% ~ 47%,其中保留的最优湿地减少量高达 38%.

4 研究展望

近年来,RS 和 GIS 技术的不断发展为分析湿地景观格局变化提供了坚实的资料基础. 基于 RS 和 GIS 技术的湿地景观格局变化研究在湿地景观格局的研究方法、指数选用和演变驱动力分析等方面取得了一定进展.

本文归纳总结了基于 RS 和 GIS 技术的湿地景观格局变化研究现状,并提出研究中存在的几个问题:1) RS 技术发展历史较短,存在积累资料不足的缺点,不能用于时间跨度较长的湿地景观变化研究,需要采用 RS 和 GIS 技术并结合相关资料进行研究;2) 越来越繁杂的各类湿地景观指数经演算后的数据不能完全揭示真实湿地景观的结构组成及其空间形态与功能特征,需辅以其他方法进行分析;3) 建立适合于研究领域的驱动机制模型,确定各种驱动因子在湿地景观格局演变中所起的作用,是定量分析湿地景观格局演变驱动力的发展方向.

针对基于 RS 和 GIS 技术的湿地景观格局变化研究,还需要开展以下几方面的研究:1) 针对特定的湿地景观格局动态变化研究,应抓住湿地关键生态过程,结合湿地景观格局多样性、空间差异性和多功能特征,深刻认识和揭示湿地景观格局与生态过

程之间的关系;2) 土地利用变化和人类活动直接导致湿地景观变化, 栖息地缩减、生物多样性减少, 以及区域水文环境、气候环境等累积环境效应的产生, 加强对湿地景观格局及其累积环境效应的研究, 为湿地保护和恢复研究提供科学依据;3) 利用 RS 影像, 在 GIS 环境下, 提取湿地景观格局空间数据, 以相关的湿地景观格局指数为评价指标研究生态安全, 从整体上认识自然与人为干扰对湿地景观格局的影响, 进而了解湿地生态安全状况和生态环境的变化趋势, 为湿地资源开发、社会经济活动提供预警信息, 避免由决策失误带来的重大生态、经济损失。

参考文献

- [1] Liu H-Y (刘红玉). Characteristics of wetland resources and ecological safety in China. *Resources Science* (资源科学), 2005, **27**(3): 54–59 (in Chinese)
- [2] Zhang D-S (张东水), Lan Z-R (兰樟仁), Li Z (李铮), *et al.* Analysis system of spatio-temporal evolution information of the Minjiang River estuary wetlands based on ComGIS. *Wetland Science* (湿地科学), 2007, **5**(3): 221–226 (in Chinese)
- [3] Liu H-Y (刘红玉), Lü X-G (吕宪国), Zhang S-K (张世奎), *et al.* Progress on the study of process of wetland landscape changes and cumulative environmental effects. *Progress in Geography* (地理科学进展), 2003, **22**(1): 60–68 (in Chinese)
- [4] Xiao D-N (肖笃宁), Hu Y-M (胡远满), Li X-Z (李秀珍), *et al.* Research on Landscape Ecology of Wetlands in Bohai Rim Delta. Beijing: Science Press, 2001 (in Chinese)
- [5] Bai J-H (白军红), Ouyang H (欧阳华), Yang Z-F (杨志峰), *et al.* Changes in wetland landscape patterns: A review. *Progress in Geography* (地理科学进展), 2005, **24**(4): 36–44 (in Chinese)
- [6] Yang F (杨帆), Zhao D-Z (赵冬至), Ma X-F (马小峰), *et al.* The application of RS and GIS techniques in wetland landscape ecological study. *Remote Sensing Technology and Application* (遥感技术与应用), 2007, **22**(3): 471–478 (in Chinese)
- [7] Herold M, Scepán J, Clarke KC, *et al.* The use of remote sensing and landscape metrics to describe structures and changes in urban land uses. *Environment and Planning A*, 2002, **34**: 1443–1458
- [8] McGarigal K, Tagil S, Cushman A, *et al.* Surface metrics: An alternative to patch metrics for the quantification of landscape structure. *Landscape Ecology*, 2009, **24**: 433–450
- [9] Guo C-X (郭程轩), Xu S-J (徐颂军), Yuan Z-Y (袁中友), *et al.* Review on application of 3S and modeling methods in wetland landscape pattern researches. *Ecological Science* (生态科学), 2007, **26**(3): 250–255 (in Chinese)
- [10] Yan S-J (闫淑君), Hong W (洪伟), Wu C-Z (吴承祯), *et al.* The dynamic of wetland landscape pattern of Langqi Island in the mouth of Min River. *Wetland Science* (湿地科学), 2010, **8**(3): 287–292 (in Chinese)
- [11] Shengli H, Devendra D, Claudia Y, *et al.* Integration of Palmer drought severity index and remote sensing data to simulate wetland water surface from 1910 to 2009 in Cottonwood Lake area, North Dakota. *Remote Sensing of Environment*, 2011, **115**: 3377–3389
- [12] Maingi JK, Marsh SE. Assessment of environmental impacts of river basin development on the riverine forests of eastern Kenya using multi-temporal satellite data. *International Journal of Remote Sensing*, 2001, **22**: 2701–2729
- [13] Du H-Y (杜红艳), Zhang H-Y (张洪岩), Zhang Z-X (张正祥), *et al.* A study on the accurate classification approaches for remote sensing image based on GIS. *Remote Sensing Technology and Application* (遥感技术与应用), 2004, **19**(4): 244–248 (in Chinese)
- [14] Wang W (王薇), Chen W-F (陈为峰), Wang R-L (王燃黎), *et al.* Landscape pattern characteristic and dynamic change of Newborn wetland in the Yellow River delta. *Research of Soil and Water Conservation* (水土保持研究), 2010, **17**(1): 82–87 (in Chinese)
- [15] Kingsford RT, Thomas RF. Use of satellite image analysis to track wetland loss on the Murrumbidgee River floodplain in arid Australia, 1975–1998. *Water Science and Technology*, 2002, **45**: 45–53
- [16] Zhang H-B (张华兵), Liu H-Y (刘红玉), Hao J-F (郝敬锋), *et al.* Spatiotemporal characteristics of landscape change in the coastal wetlands of Yancheng caused by natural processes and human activities. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2012, **32**(1): 101–110 (in Chinese)
- [17] Zhang Q-J (张秋菊), Fu B-J (傅伯杰), Chen L-D (陈利顶), *et al.* Several problems about landscape pattern change research. *Scientia Geographica Sinica* (地理科学), 2003, **23**(3): 264–270 (in Chinese)
- [18] Lü Y-H (吕一河), Chen L-D (陈利顶), Fu B-J (傅伯杰), *et al.* Analysis of the integrating approach on landscape pattern and ecological processes. *Progress in Geography* (地理科学进展), 2007, **26**(3): 1–10 (in Chinese)
- [19] Chen W-B (陈文波), Xiao D-N (肖笃宁), Li X-Z (李秀珍), *et al.* Classification, application, and creation of landscape indices. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2002, **13**(1): 121–125 (in Chinese)
- [20] Bu R-C (布仁仓), Hu Y-M (胡远满), Chang Y (常禹), *et al.* A correlation analysis on landscape metrics. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2005, **25**(10): 2764–2775 (in Chinese)
- [21] Li X-Z (李秀珍), Bu R-C (布仁仓), Chang Y (常禹), *et al.* The response of landscape metrics against pattern scenarios. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2004, **24**(1): 123–134 (in Chinese)
- [22] Han Z-H (韩振华), Li J-D (李建东), Yin H (殷红), *et al.* Analysis of ecological security of wetland in Liaohhe River delta based on the landscape pattern. *Ecology and Environmental Sciences* (生态环境学报), 2010, **19**(3): 701–705 (in Chinese)
- [23] Yan S-J (闫淑君), Hong W (洪伟). Spatiotemporal dynamics of land use in Langqi Island at Minjiang Estuary. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报)

- 学报), 2009, **20**(5): 1243–1247 (in Chinese)
- [24] Wu J-G (邬建国). Landscape Ecology: Pattern, Process, Scale and Grade. Beijing: Higher Education Press, 2002 (in Chinese)
- [25] Wu T (吴涛), Zhao D-Z (赵冬至), Zhang F-S (张丰收), *et al.* Changes of wetland landscape pattern in Dayang River Estuary based on highresolution remote sensing image. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2011, **22**(7): 1833–1840 (in Chinese)
- [26] Wang Q (王茜), Ren X-Y (任宪友), Xiao F (肖飞), *et al.* Landscape patterns in Honghu wetland using RS and GIS. *Chinese Journal of Eco-Agriculture* (中国生态农业学报), 2006, **14**(2): 224–226 (in Chinese)
- [27] McKinney RA, Raposa KB, Cournoyer RM, *et al.* Wetlands as habitat in urbanizing landscapes: Patterns of bird abundance and occupancy. *Landscape and Urban Planning*, 2011, **100**: 144–152
- [28] Antos MJ, Ehmke GG, Tzaros CL, *et al.* Unauthorised human use of an urban coastal wetland sanctuary: Current and future patterns. *Landscape and Urban Planning*, 2007, **80**: 173–183
- [29] Abdullah SA, Nakagoshi N. Changes in landscape spatial pattern in the highly developing State of Selangor, Peninsular Malaysia. *Landscape and Urban Planning*, 2006, **77**: 263–275
- [30] Kelly M, Tuxen KA, Stralberg D. Mapping changes to vegetation pattern in a restoring wetland: Finding pattern metrics that are consistent across spatial scale and time. *Ecological Indicators*, 2011, **11**: 263–273
- [31] Chen L-D (陈利顶), Liu Y (刘洋), Lü Y-H (吕一河), *et al.* Landscape pattern analysis in landscape ecology: Current, challenges and future. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2008, **28**(11): 5521–5531 (in Chinese)
- [32] Lu T (卢涛), Ma K-M (马克明), Fu B-J (傅伯杰), *et al.* Effects of ditch network structure on landscape pattern in the Sanjiang Plain, Northeast China. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2008, **28**(6): 2746–2753 (in Chinese)
- [33] Fu B-J (傅伯杰), Chen L-D (陈利顶), Ma K-M (马克明), *et al.* Landscape Ecology Principles and Applications. Beijing: Science Press, 2002 (in Chinese)
- [34] Shao J-A (邵景安), Li Y-B (李阳兵), Wei C-F (魏朝富), *et al.* The drivers of land use change at regional scale: Assessment and prospects. *Advances in Earth Science* (地球科学进展), 2007, **22**(8): 798–809 (in Chinese)
- [35] Wang Y-L (王永丽), Yu J-B (于君宝), Dong H-F (董洪芳), *et al.* Spatial evolution of landscape pattern of coastal wetlands in Yellow River Delta. *Scientia Geographica Sinica* (地理科学), 2012, **32**(6): 717–724 (in Chinese)
- [36] Liu Y-F (刘艳芬), Zhang J (张杰), Ma Y (马毅), *et al.* Changes of wetland landscape pattern in eastern Yellow River Delta nature reserve from 1995 to 1999. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2010, **21**(11): 2904–2911 (in Chinese)
- [37] Bao R, Alonso A, Delgado C, *et al.* Identification of the main driving mechanisms in the evolution of a small coastal wetland (Traba, Galicia, NW Spain) since its origin 5700 cal yr BP. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2007, **247**: 296–312
- [38] Serra P, Pons X, Sauri D, *et al.* Land cover and land use change in a Mediterranean landscape: A spatial analysis of driving forces integrating biophysical and human factors. *Applied Geography*, 2008, **28**: 189–209
- [39] Zheng Q-H (郑青华), Luo G-P (罗格平), Zhu L (朱磊), *et al.* Prediction of landscape patterns in Ili River Delta based on CA_Markov model. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2010, **21**(4): 873–882 (in Chinese)
- [40] Getachew M, Ambelu A, Tiku S, *et al.* Ecological assessment of Cheffa wetland in the Borkena Valley, northeast Ethiopia: Macroinvertebrate and bird communities. *Ecological Indicators*, 2012, **15**: 63–71
- [41] Kern AK, Harzhauser M, Soliman A, *et al.* Precipitation driven decadal scale decline and recovery of wetlands of Lake Pannon during the Tortonian. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2012, **317**: 1–12
- [42] Gao C-J (高常军), Zhou D-M (周德民), Luan Z-Q (栾兆擎), *et al.* Review on researches of wetland landscape pattern change. *Resources and Environment in the Yangtze Basin* (长江流域资源与环境), 2010, **19**(4): 460–464 (in Chinese)
- [43] Liu Y-Y (刘艳艳), Wu D-F (吴大放), Zeng L-C (曾乐春), *et al.* Evolvment of landscape pattern of the coastal wetland in Zhuhai during 1988–2008. *Tropical Geography* (热带地理), 2011, **31**(2): 199–204 (in Chinese)
- [44] Brazner JC, Danz NP, Niemi GJ, *et al.* Evaluation of geographic, geomorphic and human influences on Great Lakes wetland indicators: A multi-assemblage approach. *Ecological Indicators*, 2007, **7**: 610–635
- [45] Withey P, van Kooten GC. The effect of climate change on optimal wetlands and waterfowl management in Western Canada. *Ecological Economics*, 2011, **70**: 798–805

作者简介 孔凡亭,女,1988年生,硕士.主要从事湿地景观格局与生态过程研究. E-mail: kongfanting1988@126.com

责任编辑 孙菊