

基于 TM 影像的升金湖湿地生态安全研究

汪庆, 董斌, 李欣阳, 盛书薇, 李鑫, 杨少文

(安徽农业大学 理学院, 安徽 合肥 230036)

摘要: [目的] 分析安徽省升金湖湿地景观格局动态变化过程, 建立升金湖湿地生态安全(PSR)模型, 并探讨其驱动力, 为进一步开展升金湖湿地保护及其恢复研究提供科学依据。[方法] 在遥感和 GIS 技术支持下, 用 1986, 2003, 2011 年的 3 期 TM 影像为基本信息源进行分析。[结果] 景观格局变化幅度较大, 草地和水域面积减幅较显著; 多样性指数呈上升趋势而优势度指数呈下降趋势, 破碎化程度加剧, 斑块类型呈多样性发展; 随着景观破碎化程度增强, 斑块数增加, 将造成湿地生态系统片断化越严重, 也会影响到湿地的调蓄能力, 改变整个湿地的水文情势, 减弱湿地的生态效益; 另外, 景观格局变化下的湿地生态安全指数趋于逐年下降状态, 湿地生态安全形式处于预警状态, 形势不容乐观。[结论] 近年来, 随着经济的发展, 人口数量的增加, 围垦等活动的加剧, 人类活动对研究区的改造导致了自然湿地面积相对减少, 升金湖湿地生态功能不断下降, 经济增长和人口增长成为湿地格局变化主要驱动力。

关键词: 升金湖湿地; 土地利用; 景观格局; 驱动力; PSR 模型; 升金湖

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2015)05-0138-06

中图分类号: X87

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2015.05.091

Research on Wetland Ecological Security of Shengjin Lake Based on TM Images

WANG Qing, DONG Bin, LI Xinyang, SHENG Shuwei, LI Xin, YANG Shaowen

(School of Science, Anhui Agriculture Univresity, Hefei, Anhui 230036, China)

Abstract: [Objective] We analyzed the dynamic change of landscape pattern of Shengjin Lake in Anhui Province. Ecological security model was established and the driving forces that influence the landscape pattern change were discussed to provide the scientific basis for protecting and recovering Shengjin lake wetland. [Methods] Based on remote sensing and GIS technology, we used TM images in 1986, 2003 and 2011 to analyze the ecological security. [Results] The land use pattern in Shenjin Lake changed greatly. The area of grassland and water decreased dramatically. The diversity index increased while the dominance index declined. The intensified fragmentation in landscape pattern had significantly influenced the regulation and storage capacity of the wetland resources. In addition, the index of wetland ecological security tended to decline year by year. [Conclusion] Due to human activities, the area of nature wetland is reducing, and ecological function is declining. Growths in economy and population are the main driving forces that influence the dynamic change of landscape pattern in Shengjin Lake wetland.

Keywords: Shenjin Lake wetland; landuse; landscape pattern; driving force; PSR model; Shengjin Lake

湿地生态系统是一个生物多样性丰富和人类赖以生存和发展的自然景观^[1]。被誉为“地球之肾”、“生命摇篮”、“文明的发源地”和“物种的基因库”。因而在世界自然保护区大纲中, 湿地与森林、海洋一起并列为全球三大生态系统^[2]。湿地生态系统是最具生产力的, 最多样化的生态系统之一, 它为野生动物提供重要的栖息地。但是, 快速城市化和飞速的经济发展导致湿地严重退化^[3]。

生态安全主要研究人与生态环境的相互协调, 所以生态安全评价应从生态系统与社会经济的协调出发, 分析人与自然之间的各种作用机制^[4]。目前, 国内外针对不同的湿地类型开展了生态安全研究, 1990 年美国环保署 (USEPA) 启动了环境监测评价计划 (EMAP), 用于监测和评价河流、湖泊湿地的状态和趋势^[5]; 20 世纪 90 年代英国开展了“河流健康”一系列措施 (SERCON), 评价河流湿地的自然价值^[6]; 21

收稿日期: 2014-06-10

修回日期: 2014-07-27

资助项目: 安徽省国土资源厅科技项目“升金湖国家自然保护区土地利用/覆被变化与生态风险评价研究”(2012-K-24); 安徽省国土资源厅科技项目 (2011-K-23); 安徽省国土资源科技项目 (2013-K-10)

第一作者: 汪庆(1987—), 男(汉族), 安徽省桐城市人, 在读硕士, 研究方向为 3S 技术及应用等。E-mail: 634045291@qq.com。

通信作者: 董斌(1970—), 男(汉族), 安徽省怀宁市人, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要从事测绘与 3s 技术及应用等研究。E-mail: dbhy123@si-na.com。

世纪初期,中国长江水利委员会提出了总目标层、系统层、状态层和要素层 4 级构成的健康长江流域评价指标体系。目前国内外学者从生态服务价值、生态风险及其生态环境影响等方面对湿地生态安全评价做了大量研究:蒋卫国等^[7]对洞庭湖湿地生态系统进行综合评价研究,高占国等^[8]基于多尺度生态系统对宁波市进行健康综合评价。Conway TM 等^[9]研究在城市化下的区域土地利用政策生态系统模型, Saroinsong F. 等^[10]研究了农业景观规划土地资源信息系统的实际应用。Aiping 等^[11]运用 GIS 和 FRAGSTAT 软件来计算若尔盖县地区的土地利用/覆盖变化(LUCC)。

尽管国外理论界对土地利用与生态安全关系研究相对成熟,但针对景观尺度上研究自然—经济—社会因子与生态系统之间反馈机制的案例较少^[12]。本项目选择升金湖湿地保护区为研究对象,利用 TM 遥感影像,在遥感和 GIS 技术支持下,提取景观空间数据,运用景观格局指数、社会经济因子构建湿地生态安全模型,将有助于从整体上掌握自然—经济—社会协同作用对景观格局影响,进而了解湿地生态安全状况和生态演变趋势,构建生态安全的评价指标体系,并运用层次分析法对升金湖湿地进行生态安全评价,以期为进一步开展升金湖湿地保护及其恢复研究提供科学依据。

1 研究区概况

升金湖国家自然保护区位于安徽省西南部,长江

南岸池州市境内(东经 116°55′—117°15′,北纬 30°15′—30°30′)。升金湖地区的区域面积约 33 340 hm²,气候属亚热带季风气候,特点是四季分明、光照充足,雨量充沛。多年平均降雨量 1 554.4 mm,多年平均气温 16.14 ℃。

优越的地理位置和丰厚的资源使得升金湖成为池州市农业主产区和人口集中区域。近年来,湖区人民经济来源主要依赖于湿地资源的利用,特别是湖区的养殖业。该区域受到人为干扰较大,在带来经济利益的同时,也造成了一定的环境问题,尤其对于湿地野生动物的栖息地造成不可预估的影响。

2 材料和方法

2.1 数据源的选择

为分析升金湖湿地格局变化,选择 1986 年 7 月,2003 年 7 月,2011 年 8 月(月平均降雨量分别为 173,171 和 170 mm)3 期 TM 影像,其空间分辨率为 30 m。该项目通过 Erdas Imagine, GIS, Fragstat 等软件技术支持,利用部分 Spot 5 高清影像和 1:1 万地形图比对。

本文按照湿地景观类型并结合野外实地调查(取样 300 个点),计算景观格局指数。根据 2 个不同时期的湿地土地利用类型现状分布计算出不同时期土地利用类相面积所占比率变化(如表 1 所示)。社会经济数据来源于《池州市统计年鉴》和《安徽省统计年鉴》。

表 1 1986,2003 和 2011 年升金湖湿地不同时期的土地利用类型面积所占比率变化

%

年份	建设用地	草地	耕地	林地	水域	未利用地	交通用地	园地
1986	1.48	6.57	42.41	11.59	27.61	7.17	1.41	1.77
2003	5.44	3.35	39.45	15.13	25.31	3.96	5.30	2.07
2011	6.22	1.76	33.10	19.82	23.71	1.94	6.73	5.72
1986—2011	2.53	-0.73	-0.14	0.70	-0.07	-0.729	1.63	2.23

从表 1 可以看出:升金湖保护区主要土地覆被类型是耕地,占地面积接近 40%,其次是水域和林地,建设用地、草地、园地、交通用地和未利用地比重不大。近 25 a 来,升金湖保护区各土地利用类型的面积发生了不同程度的增减变化。表 1 显示,1986 年,各土地利用类型面积由大到小的排序是:耕地>水域>林地>未利用地>草地>园地>建设用地>交通用地;而到了 2003 年,各土地利用类型面积由大到小的排序则是:耕地>水域>林地>建设用地>交通用地>未利用地>草地>园地;2011 年交通用地超出建设用地,草地降至同期最低。

由此可见,从 1986 年至今,升金湖保护区各类土

地利用类型面积都发生了不同程度的消长变化。其中耕地、草地和未利用土地面积减少,林地、园地、交通用地和建设用地面积增加,水域面积变化不大。面积变化最大的是建设用地,最小的是水域。各景观类型面积变化量由大到小的排序是:建设用地>园地>交通用地>草地>未利用地>林地>耕地>水域。升金湖保护区建设用地与交通用地的面积急速增加,而草地的锐减对湖区动植物的栖息地造成了不利的影

2.2 景观指数类型的选取

景观格局指数以高度浓缩信息量来反映景观格局信息,同时也反映景观结构组成、景观格局和空间配置的静态量化指标,因此,定量地分析景观格局是

景观生态学的核心研究内容^[12]。根据本文研究内容,挑选试验需要的景观格局指数定量分析研究区域的时空动态变化。选取景观多样性指数、优势度指数、破碎度指数、斑块数目、斑块分维数和香农均匀度指数,从景观的角度分析湿地动态变化及其发展趋势。具体景观指数的公式、概念及其生态学意义请参考有关文献^[13-15]。

表 2 1986,2003 和 2011 年升金湖湿地地区景观格局指数

年份	1986 年	2003 年	2011 年
景观多样性指数	1.530	1.565	1.626
优势度指数	0.549	0.467	0.454
斑块分维数	1.473	1.480	1.526
破碎度指数	0.403	0.490	0.585
斑块数目	13 435	15 991	19 498
香农均匀度指数	4.591	4.632	4.877

从表 2 可以看出,研究区域在近 25 a 间斑块数变化和景观破碎度值变化趋势完全一致:2011 年 > 2003 年 > 1986 年,呈缓慢上升的趋势。2011 年值最高,1986 年值最低,反映出 1986—2011 年外界干扰对升金湖湿地景观格局影响强烈,使 2011 年斑块数和破碎度均最高。随着景观破碎化程度增强,斑块数增加,将造成湿地生态系统片断化越严重,也会影响到湿地的调蓄能力,改变整个湿地的水文情势,减弱湿地的生态效益。景观多样性指数有所增加,景观多样性指数的不断变化,使各景观类型产生镶嵌、分割、破碎、缩减和损耗等空间过程,从而造成整体景观格局的异质性越来越高;景观优势度指数下降与均匀度指数的上升表明了水域和耕地被其他景观类型所替代,造成自然湿地水域面积萎缩,湿地生态安全形势不容乐观。

综上所述,近 25 a 的土地利用格局变化明显,人类活动影响该区域的土地利用格局。不仅如此,景观格局变化造成的湿地生态安全形势不容忽视,本文基于 PSR 模型对升金湖区域生态安全进行系统研究。通过湿地生态安全与景观格局有机结合,分析升金湖湿地土地利用景观格局变化驱动力。

2.3 湿地生态安全评价及其驱动力分析

湿地生态安全是指湿地生态系统的结构是否受到破坏,其生态功能是否受到损害。当湿地生态系统所提供服务的数量或质量出现异常时,则表明该系统的生态安全受到了威胁,即处于“生态不安全”状态^[16]。研究生态安全评价指标主要是根据经济合作发展组织(OECD)的 PSR 系统“压力—状态—响应”。“压力”指标是指直接施加压力,根据环境因子人类活动,如废物排放,处理,公路网络密度,煤炭开采;“状

态”是指环境的当前状态和未来的发展趋势,如污染物浓度,品种。“响应”是指一系列环保政策,其中提到的指标部分在环境治理的过程中不断演变。运用 PSR 模型对升金湖进行评价,可以直接有效的反映区域安全形势,为升金湖湿地生态保护提供决策依据。

2.3.1 湿地安全评价指标选取 基于 PSR 模型选取适于该项目的 19 个独立指标,并通过层次分析法软件获得各指标权重用于生态安全分析(表 3)。具体指标的选择,本文参考关于生态安全的国内外项目评价方法并征询了 32 位专家意见,判断矩阵一致性数值为 0.012。湿地景观格局的变化,通过自然—经济—社会各驱动因子影响,最终建立湿地生态安全指标体系。

2.3.2 湿地生态安全综合评价 标准化指数:由于不同指标没有内在定量关系,彼此没有可比性,有必要将各指标进行标准化处理。该模型使用以下两种计算方式:

积极的影响指标:对于某些指标的标准化,其值越大将会带来积极的湿地生态安全影响。此外,其值越大,会降低生态风险值。其标准化的方法是:

$$P_i = \frac{X_i - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (1)$$

式中: X_i ——第 i 指标因子; X_{\max} ——第 i 指标的最大值; X_{\min} ——第 i 指标的最小值。下同。

负面的影响指标:其他指标,其值越大将会带来更大的负面生态影响,也会提高湿地生态风险值。其标准化的方法是:

$$P_i = \frac{X_{\max} - X_i}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (2)$$

综合指标体系:为了定量评估湿地生态安全综合指数(X),需要建立可行的评判体系。其中 X 从 0~1 不同值所代表湿地生态安全的不同等级。为了便于分析,将 X 值分 5 组:0~0.3,0.3~0.5,0.5~0.6,0.6~0.8,0.8~1 这 5 个健康状态,“重度预警”、“中度预警”、“预警”、“较安全”、“安全”进行一一对应^[17]。

$$X = \sum_{i=1}^n (Y_i \times W_i) \quad (3)$$

式中: X ——人工合成的湿地生态安全评价指数; Y_i ——每个指标标准化值; W_i ——每个标所代表的权重值; n ——总项目数。

湿地生态安全指数是湿地环境指标,从 1986—2011 年的发展趋势可知:升金湖湿地的安全指数呈下降趋势,2011 年升金湖湿地生态安全指数在 0.562 左右(表 4)。这表明该区人口经济等社会压力加大,景观破碎化加剧,水文调节能力降低,湿地生态系统处于预警状态。

表 3 升金湖湿地生态安全指标体系

目标层	指标层(权重)	主要因子(权重)	次级指标层	次级指标权重
升金湖湿地生态安全指标	湿地生态压力 (0.36)	人口压力(0.032 5)	人口密度	0.030 1
			经济人口	0.002 4
		土地压力(0.132 5)	建设用地	0.082 1
			交通用地	0.025 2
			耕地	0.025 2
			水资源压力(0.097 5)	人均水资源
	湿地生态状态 (0.54)	社会资源压力(0.097 5)	工业废水机组负荷	0.074 4
			人均国民生产总值	0.097 5
		环境质量(0.380 0)	游客量接待量	0.091 5
			水体 pH 值	0.057 7
			水体浑浊度	0.057 7
			水体溶解氧	0.057 7
	湿地生态响应 (0.10)	相关景观指数(0.160 0)	烟尘排放量	0.057 7
			废水排放量	0.057 7
			二氧化硫排放量	0.048 4
		生物多样性(0.075 0)	景观多样性指数	0.048 4
			平均斑块面积指数	0.063 2
			均匀度指数	0.048 4
投资能力(0.025 0)	鸟类数量	0.050 0		
	浮游生物种数	0.025 0		
		环境保护投入	0.020 0	

表 4 1986,2003 和 2011 年的湿地安全指数

年份	1986 年	2003 年	2011 年
湿地生态安全指数	0.847	0.746	0.562
湿地健康状态	安全	较安全	预警

2.3.3 湿地土地利用景观格局驱动力分析 驱动力是导致景观格局变化的根本因素,它是主要由自然—经济—社会元素共同改变的结果。升金湖与长江一起组成了世界独特的江—湖复合型湿地,是中国最重要的生态系统之一。目前,每年随季风而来的江水、泥沙和营养物质流入湖中,提供了维持湿地高生产力和生物多样性的物质基础。然而,随着当地居民对资源利用由传统低强度转向掠夺式开发,升金湖湿地水文动力发生了改变,同时极大地破坏了生态系统的平衡,资源的可持续利用面临严重的威胁。升金湖保护区景观格局与湿地生态安全动态变化与湿地动植物数量变化有着内在联系和反馈关系。从图 1 可以看出,白枕鹤的数量急剧减少,由 1993 年的 700 只减少到 2013 年的 2 只;白头鹤数量波动较大,2003—2008 年急剧下降,到 2011 年底数量有所回升数量为 494 只;东方白鹤数量经历先下降后上升的趋势,2011 年底回到正常水平数量为 251 只。

本文通过景观格局指数解译并结合 PSR 模型对研究区域进行驱动力调查研究,湿地土地利用景观变

化起主要作用的自然、人为驱动力主要表现为以下几个方面:

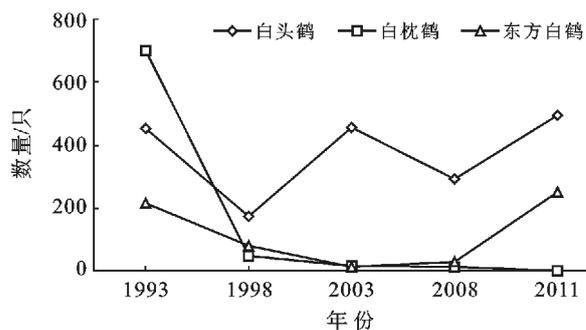


图 1 1993—2011 年升金湖湿地国家保护水禽数量统计

(1) 自然驱动力。自然驱动力会引起区域景观变化,研究区的自然干扰因子主要包括年平均温度和年平均降雨量,其中,年平均降雨量是自然驱动力的主导因子。升金湖湿地位于长江以南,湖区的水源来自于天然降雨和河流,此外在长江汛期时起着蓄洪的作用。水库水源主要用于农业和生活用水,水是维系湿地生态和土地利用景观格局的支点。近 25 a 来升金湖湿地年平均水位变化幅度较明显,年最高水位为 1996 年的 12 m,年最低水位为 2000 年的 10.2 m,水位直接影响升金湖湿地土地利用景观格局和野生动物栖息地;年降雨总量变化也有大幅波动,最大值为

1996 年的 210 mm, 最低值为 2003 年的 108 mm, 降雨量的变化影响到水域、滩涂等湿地土地利用景观类型的面积, 从而影响湿地景观格局; 年平均温度变化幅度不大, 最高气温为 2003 年的 17.6 °C, 最低温度为 1986 年的 16.7 °C, 但总体趋势缓和, 对湿地景观格局的影响不明显(图 2)。综上所述, 自然驱动力一些影响因子波动不大, 偶尔出现极值。如 2003 年降雨量较平均值偏低而温度高于略高于平均值, 尽管如此, 水位较往年没有下降。

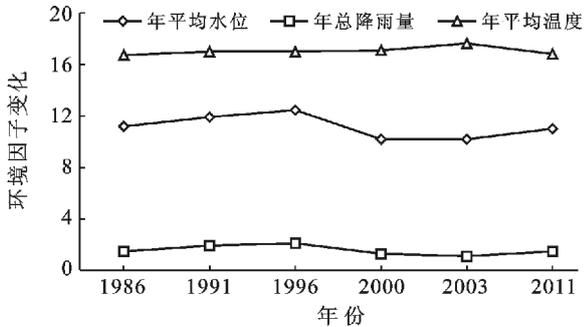


图 2 升金湖湿地主要自然环境因子变化趋势

(2) 人为驱动力。人为干扰对升金湖湿地景观格局变化起决定性作用, 其中人为驱动力主要包括经济发展、政府政策、人口增长和旅游开发等因素, 经济发展是主要驱动因子。经济驱动力加速该地区土地利用景观格局并成为湿地景观格局变化的主要驱动力因子之一, 主要体现在以下几个方面(图 3): ① 农林牧渔业总产值从 1986 年的 4 092.9 万元激增到 2011 年 38 224 万元, 水产养殖带来了一系列的生态环境的破坏, 使得湖区各区域水生动植物数量和栖息地受到限制和影响; ② 基本建设投资的增加与工业总产值的产出明显提高, 1986—2011 年, 基本建设投资成几何式的增长, 从 56.8 万元增至 35 278.3 万元, 工业总产值增长近 8 倍, 直接导致二氧化硫、污水排放等一些环境问题, 如二氧化硫从 1986 年 37.38 t 增至 2011 年的 53.99 t; ③ 粮食产量的增速较快, 近 25 a 间, 粮食产量由当初的 1.67×10^4 t 增至 2.29×10^4 t, 粮食产量与当地化肥使用量成正比关系, 当地化肥由 1986 年的 1 678.4 t 而 2011 年总需求则达到 2 982.4 t; ④ 经济增长必然会带来当地人民收入增加, 人均收入从 309 元快速增长到 6 946 元。

尽管地区经济发展对当地居民收入的提高起到促进作用, 但随着经济发展, 铁路、高速公路陆续在保护区内建成并通行, 对湿地野生动物栖息地影响较明显, 政策实施对于升金湖湿地的景观格局有着直接影响。早期围湖造田会加速水体富营养化, 后期可能会

导致大面积的蓝藻爆发。然而, 为了多造农田, 1964 年国家在升金湖入江口建了黄溢闸, 但没有建鱼道, 阻隔了长江鱼类洄游通道, 入湖鱼类急剧减少。

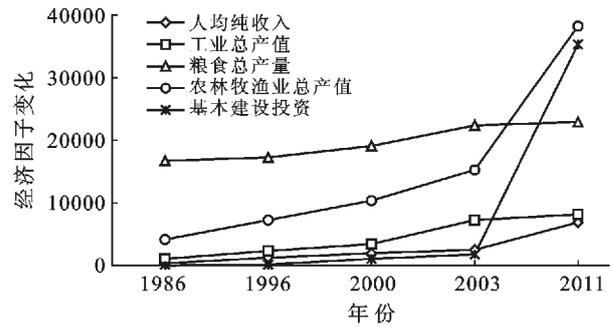


图 3 升金湖湿地主要经济因子变化趋势

3 结论

通过对升金湖湿地进行景观格局结果分析, 并由此建立了生态安全(PSR)模型, 得出以下结论: 景观破碎化程度增强, 斑块数增加, 将造成湿地生态系统片断化越严重, 也会影响到湿地的调蓄能力, 改变整个湿地的水文情势, 减弱湿地的生态效益; 水域和草地被其他景观类型所替代, 造成自然湿地面积萎缩, 对升金湖区域鸟类等生物栖息地造成破坏, 并影响其数量和生存环境; 升金湖保护区湿地生态安全处于预警状态, 急需恢复措施进行生态保护和恢复; 当地气候的变化并不明显, 人口、经济增长是升金湖湿地土地利用变化的主要驱动力。

独特的地理位置和资源特点, 使得升金湖湿地成为经济发展热点之一。密集的经济活动, 再加上政策和管理的职位空缺, 导致大面积湿地被改造, 空气和土壤污染, 湖区生态环境恶化有大幅度上升。升金湖具有长江中下游湿地的典型特征, 通过研究获得的系统规律, 对长江中下游湿地的生态规划和保护有着积极的应用意义。本文对遥感影像的解译, 分析时空变化下的景观格局变化及其驱动力机制, 为湿地保护区区域规划和生态建设提供直接的科学数据。

[参 考 文 献]

- [1] Holland C C, Honea J E, Gwin S E, et al. Wetland degradation and loss in the rapidly urbanizing area of Portland, Oregon[J]. *Wetlands*, 1995, 15(4): 336-345.
- [2] 杨永兴. 国际湿地科学研究的主要特点、进展与展望[J]. *地理科学进展*, 2002, 21(2): 111-120.
- [3] Ma C, Zhang G Y, Zhang X C, et al. Application of Markov model in wetland change dynamics in Tianjin coastal area, China[J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2012(13): 252-262.

- [4] 马克明,傅伯杰,黎晓亚. 区域生态安全格局:概念与理论基础[J]. 生态学报,2004,24(4):761-768.
- [5] Environment Auency. River habitat survey: 1997 field survey guidance manual incorporating SERCON [R]. Center for Ecology and Hydrology, National Environment Research Council, UK, 1997.
- [6] Kleynhans C J. A qualitative procedure for the assessment of the habitat integrity status of the Luvuvhu River: Limpopo system, South Africa[J]. Aquatic Ecosystem Health, 1996,5(1):41-54.
- [7] 蒋卫国,潘英姿,侯鹏,等. 洞庭湖区湿地生态系统健康综合评价[J]. 地理研究,2009,28(6):1665-1672.
- [8] 高占国,朱坚,翁燕波,等. 多尺度生态系统健康综合评价:以宁波市为例[J]. 生态学报,2010,30(7):1706-1717.
- [9] Conway T M, Lathrop R G. Modeling the ecological consequences of land-use policies in an urbanizing region[J]. Environmental Management, 2005,35(3):278-291.
- [10] Saroinsong F, Harashina K, Arifin H, et al. Practical application of a land resources information system for agricultural landscape planning[J]. Landscape and Urban Planning, 2007,79(1):38-52.
- [11] PANG Ai'ping, LI Chunhui, WANG Xuan, et al. Land use/cover change in response to driving forces of Zoige County, China[J]. Procedia Environmental Sciences, 2010(2):1074-1082.
- [12] 蔡崇玺,陈燕. 生态安全的研究进展与展望[J]. 环境科学与管理,2010,35(2):126-129.
- [13] 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[J]. 生态学报,2004,24(1):123-134.
- [14] 梁国付,丁圣彦. 河南黄河沿岸地区景观格局演变[J]. 地理学报,2005,60(4):665-672.
- [15] 陈志科,吕宪国. 两个时期若尔盖草原沼泽湿地景观格局的对比研究[J]. 湿地科学,2010,8(1):8-14.
- [16] Ye Hua, Ma Yan, Dong Limin. Land ecological security assessment for Bai Autonomous Prefecture of Dali based using PSR model: With data in 2009 as Case[J]. Energy Procedia, 2011,5(23):2172-2177.
- [17] Montague C L, Ley J A. A possible effect of salinity fluctuations on abundance of benthic vegetation and associated fauna in northeastern Florida Bay[J]. Estuaries, 1993,8(16):707-717.

(上接第 137 页)

- [5] 张绪美,董元华,王辉,等. 中国畜禽养殖结构及其粪便 N 污染负荷特征分析[J]. 环境科学,2007,28(6):1311-1318.
- [6] 王方浩,马文奇,窦争霞,等. 中国畜禽粪便产生量估算及环境效应[J]. 中国环境科学,2006,26(5):614-617.
- [7] 杨飞,杨世琦,诸云强,等. 中国近 30 年畜禽养殖量及其耕地氮污染负荷分析[J]. 农业工程学报,2013,29(5):1-11.
- [8] Song K Y, Li Y, Ouyang W, et al. Manure nutrients of pig excreta relative to the capacity of cropland to assimilate nutrients in China[J]. Procedia Environmental Sciences, 2012(13):1846-1855.
- [9] 孟岑,李裕元,许晓光,等. 亚热带流域氮磷排放与养殖业环境承载力实例研究[J]. 环境科学学报,2013,33(2):635-643.
- [10] 高懋芳,邱建军,李长生,等. 应用 Manure-DNDC 模型模拟畜禽养殖氮素污染[J]. 农业工程学报,2012,28(9):183-189.
- [11] 张克强,高怀有. 畜禽养殖业污染物处理与处置[M]. 北京:化学工业出版社,2004.
- [12] 仇焕广,廖绍攀,井月,等. 我国畜禽粪便污染的区域差异与发展趋势分析[J]. 环境科学,2013,34(7):2766-2774.
- [13] 国家环境保护总局自然生态保护司. 全国规模化畜禽养殖业污染情况调查及防治对策[M]. 北京:中国环境科学出版社,2002.
- [14] 彭里,王定勇. 重庆市畜禽粪便年排放量的估算研究[J]. 农业工程学报,2004,20(1):288-292.
- [15] 全国农业技术推广服务中心. 中国有机肥料养分志[M]. 北京:中国农业出版社,1999.
- [16] 陈微,刘丹丽,刘继军,等. 基于畜禽粪便养分含量的畜禽承载力研究[J]. 中国畜牧杂志,2009,45(1):46-50.
- [17] 闫庆武,卞正富,赵华. 人口密度空间化的一种方法[J]. 地理与地理信息科学,2005,21(5):45-48.
- [18] 阎波杰,吴文英,潘瑜春,等. 畜禽养殖废弃物统计数据空间化方法[J]. 江南大学学报:自然科学版,2011,10(6):653-657.
- [19] Oenema O, Van Liere L, Plette S, et al. Environmental effects of manure policy options in the Netherlands [J]. Water Sci. Technol., 2004,49(3):101-108.