

江苏沿海地区景观格局的生态风险研究

田颖, 李冰, 王水

(江苏省环境科学研究院, 南京 210036)

摘要:以江苏省沿海地区为研究区,利用1989年、1995年和2009年3个时期的TM遥感影像为数据源,计算各风险小区的景观生态风险指数。利用GIS和地统计学方法,对研究区景观风险指数进行采样和空间插值,得到基于景观格局的生态风险分布图。运用相对指标法对景观生态风险指数进行分级,将研究区域划分为低生态风险区、较低生态风险区、中等生态风险区、较高生态风险区和高生态风险区5个等级。叠加不同时期的生态风险区划图层,利用土地覆被重心转移模型以分析景观生态风险的时空变化。结果表明:近20a来研究区生态风险主要以较高程度为主,处于低、较低生态风险程度的区域面积变化不大,空间分布也一直位于盐城市,高风险区区域面积增加较为显著,主要位于盐城市的滩涂。低生态风险区和高生态风险区偏移量较大,分别为116.6 km和4.9 km。

关键词:江苏沿海地区;景观生态风险;变异函数

中图分类号:X820.4

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2015)01-0241-05

Study on Landscape Ecological Risk of the Coastal Areas of Jiangsu Province

TIAN Ying, LI Bing, WANG Shui

(Jiangsu Provincial Academy of Environmental Science, Nanjing 210036, China)

Abstract: The ecological risk index was calculated by taking the coastal areas of Jiangsu Province as studying area, using the remote sensing images of Landsat TM in 1989, 1995 and 2009 as the main data sourced. Ecological risk maps were obtained by resampling and interpolation by GIS and geostatistics method. Based on its ecological risk maps, the study area was classified into five kinds of areas: extremely low, low, moderate, high and extremely high ecological risk areas by relative index method. And then the temporal and spatial dynamics of ecological risk were analyzed by overlying the ecological risk maps in different periods. The results show that: in recent 20 years, most of the study area had moderate ecological risk; the area with extremely low and low ecological risk had no obvious change and mainly located in Yancheng City; the area of high ecological risk increased significantly and mainly distributed in the coastal beach of Yancheng City. The gravity shift distances of extremely low ecological risk and the high ecological risk were the greatest which were 116.6 km and 4.6 km, respectively.

Keywords: coastal areas of Jiangsu; landscape ecological risk; semivariogram

生态风险是指生态系统及其组分所承受的风险,指一个种群、生态系统或整个景观的正常功能受到外界胁迫,从而在目前和将来减少该系统内部某些要素或其本身的健康、生产力、遗传结构、经济价值和美学价值的可能性^[1-2]。区域生态风险评价是生态风险评价的一个分支,它是在区域尺度上描述和评价环境污染、人为活动或自然灾害对区域内的生态系统结构域功能等产生不利作用的可能性和危害程度^[3-5]。区域性风险问题是众多因素交互作用的结果,其作用所影

响的范围较大,作用时间及其产生的后果也很难预测^[6]。土地利用/覆被变化(LUCC)已经成为全球变化研究的前沿和热点,LUCC改变了全球生态系统格局与结构,对区域生态风险起着决定的作用^[7-9]。景观生态风险分析是在景观的基础上,描述人类活动或自然灾害对区域内生态系统结构、功能等产生不利生态效应的可能性和危害程度的过程^[10],通过专业判断和统计分析,建立景观组分结构与生态影响类型和强度之间的经验联系^[11-13],同时景观结构还可以准确

收稿日期:2014-02-20

修回日期:2014-04-04

资助项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项课题(2012 ZX07506-001)

第一作者:田颖(1982—),女,河北承德人,工程师,硕士,主要从事地理信息系统、土地利用/覆被变化等研究。E-mail:searchty@126.com

地显示出各种生态影响的空间分布和梯度变化特征,使各种空间分析的手段成为可能^[14-18]。

本文运用景观生态学原理与空间统计学分析方法,以江苏沿海地区为例,基于其景观结构和土地利用信息,构建景观生态风险指数,对以人类生产生活活动为主要风险源的土地利用进行景观生态风险分析,揭示研究区生态风险的时空变化特征,为该区域实现生态保护、经济建设和环境管理之间的协调发展提供理论依据和技术支持。

1 研究区概况

江苏沿海地区包括连云港、盐城和南通三市市区以及下属赣榆、东海、灌云、灌南、响水、滨海、阜宁、射阳、建湖、大丰、东台、海安、如东、通州、如皋、海门、启东 17 个县(市),共计 20 个行政单元,面积 3.25 万 km²,海岸线长 954 km,位于东经 118.40°—121.95°,北纬 31.65°—35.10°,江苏沿海地区由于滩涂的淤积,在不同的年份淤积成陆地的面积不同,本文选取三个年份进行比较分析,选用统一的边界进行裁切。

研究区位于北亚热带与暖温带过渡区,地势低平,土地资源和滩涂资源十分丰富,水网密集。研究区土地利用具有以下特征:(1)盐田和滩涂等后备资源丰富,但利用效率较低;(2)农用地面积较大,但优质耕地资源流失严重;(3)建设用地布局不合理,集约利用水平低;(4)沿海湿地具有重要的生态功能,但土地围垦对生态环境造成了一定的破坏^[19]。

2 研究方法

2.1 数据来源

在本研究中,以数据可获得性和数据质量较高为原则,分别选用 1989 年、1995 年以及 2009 年三个年份共 12 景分辨率为 30 m 的 TM 七波段的影像数据以及地形图数据研究 20 a 间江苏沿海地区的土地利用变化。在土地覆被信息获取方面,采用了 3S 集成技术,首先在 Erdas 环境下,采用三次多项式及最近邻域插值法对各期遥感影像进行几何纠正,其中包括对影像的几何纠正、大气校正、图像拼接、图像裁剪等。其次,运用 GPS,到研究区进行实地考察,并根据地表覆盖分布的空间特征和光谱特征,建立遥感解译标志。再次,以 ArcGIS 10.0 为支撑,对不同时期的遥感影像进行解译,分别得到三个时期的土地覆被图,并统计了不同时期各种土地利用类型的面积及其比例,得到研究区 1989 年、1995 年和 2009 年的景观格局矢量图,以此为基础计算三个时期的景观生态风险指数,利用地统计学中的空间分析方法和 ArcGIS

软件,得到研究区景观生态风险指数的空间分布图,进而研究其景观生态风险空间特征的动态变化。

2.2 景观生态风险小区的划分

基于网格采样的方法将研究区划分为 3 km×3 km 的单元网格,采用等间距分割,建立 LUCC 生态风险评价单元,共有风险小区 335 个,利用景观生态风险指数公式得到每个景观生态风险指数值,作为采样网格点的景观生态风险值,以此为基础计算样地中心点的生态风险值^[20]。

2.3 景观生态风险指数的构建

通过建立景观干扰度指数和景观脆弱度指数,构建景观生态风险指数。选取与干扰密切相关联的,能够反映生态系统概念与空间分布状况的景观破碎度(C_i)、平均分维数(N_i)和景观优势度(D_i)三个景观格局分析指标,三者赋予相应的权重并且叠加,得到景观干扰度指数(S_i)。其公式如下。

$$S_i = aC_i + bN_i + cD_i \quad (1)$$

$$C_i = NP_i / A_i \quad (2)$$

$$N_i = 1/N \sum_{i=1}^N 2 \ln(P_i/4) \ln A_i \quad (3)$$

$$D_i = (Q_i + M_i) / 4 + L_i / 2 \quad (4)$$

式中: NP_i ——景观类型 i 的斑块个数; A_i ——景观类型 i 的面积; P_i ——斑块 i 的周长; N_i ——这一景观的斑块总数; Q_i 、 M_i 、 L_i ——斑块频度、斑块密度和景观类型 i 占总景观比例; a 、 b 、 c ——响应各景观指数的权重,且 $a+b+c=1$,根据分析权衡,并结合其他学者的研究成果,认为景观破碎度指数最为重要,其次为平均分维数和优势度指数,最终分别赋以 0.5、0.3、0.2 的权重。

不同的景观类型在维护生态多样性、保护物种、完善整体结构和工程、促进景观结构自然演替等方面的作用是有差别的;同时对于外界干扰的抵抗能力也不同^[21]。根据借鉴他人的研究成果并结合研究区内 6 种景观类型所代表的生态系统的敏感程度得出,以未利用地最为脆弱,其次为滩涂,而建设用地最稳定。依照此结论,分别对 6 种景观类型赋值脆弱度指数为:未利用地为 6,滩涂为 5,水域为 4,耕地为 3,林地 2,建设用地为 1,同时进行归一化处理,得到研究区景观脆弱度指数(F_i)。

最终,确定能够反映不同景观类型所代表的生态系统在受到自然和人为干扰时其自然属性损失程度的景观损失度指数(R_i)以及景观生态风险指数(ERI)。其公式分别为:

$$R_i = S_i \times F \quad (5)$$

$$ERI = \sum_{i=1}^N \frac{A_i}{A} R_i \quad (6)$$

式中: A_i ——区域内景观类型 i 的面积; A ——景观总面积。

2.4 空间分析方法

生态风险指数本身是一种空间变量,其空间变化特征具有结构性和随机性,本文采用地统计学中变异函数的方法,借助半方差函数进行区域景观生态风险程度的空间分析^[22-25]。其具体公式为:

$$\gamma(h)=\frac{1}{2N(h)}\sum_{i=1}^{N(h)}[Z(x_i)-Z(x_i+h)]^2$$

$i=1,2,\cdots,N(h)$

(7)

式中: $\gamma(h)$ ——变异函数; h ——步长,即为了减少各样点组合对的空间距离个数而对其进行分类的两点空间间隔距离; $N(h)$ ——间隔距离为 h 时的样点对数; $Z(x_i),Z(x_i+h)$ ——景观生态风险指数在空间位置 x_i 和 x_i+h 的观测值。

半方差是度量空间依赖性与空间异质性与空间异质性的一个综合指标,它具有 3 个重要的参数:块金值(Nugget)、基台值(Sill)、变程(Range)。当间隔距离 $h=0$ 时, $\gamma(h)=C_0$,该值为块金值;当 h 增大到 A_0 时, $\gamma(h)$ 从非零值达到一个相对稳定的常数,该常数成为基台值(C_0+C), A_0 为变程, C 为结构方差;块金值 C_0 表示由随机因素引起的空间异质性,较大的块金值就预示着较小尺度的某些过程不可忽略;结构方差 C 表示空间自相关部分引起的空间异质性;基台值(C_0+C)表示最大变异程度,基台值越大表示总的空间差异性程度越高;结构方差与基台值的比例 $C/(C_0+C)$ 是对变量在空间上的可预测性的一种重要度量,块金值占基台值的比例 $C_0/(C_0+C)$ 则可用来表示系统变量空间相关程度,若其小于 25%,说明变量具有强烈的空间相关性;若大于 75%,则表明变量空间相关性很弱。

2.5 生态风险空间变化分析

土地覆被重心迁移模型可以很好地从空间上描述土地利用主要类型的时空演变过程^[26-27]。借助于土地利用的重心模型研究该区域生态风险的空间分布及时空演变,揭示其空间变化特征及驱动机制。重心坐标(经纬度)计算见公式(8),(9)。

$$X_t=\frac{\sum_{i=1}^n(C_{ti}\times X_i)}{\sum_{i=1}^nC_{ti}}$$

(8)

$$Y_t=\frac{\sum_{i=1}^n(C_{ti}\times Y_i)}{\sum_{i=1}^nC_{ti}}$$

(9)

式中: X_t,Y_t ——第 t 年某种景观生态风险区重心的经纬度坐标; C_{ti} ——第 i 个某生态风险区的景观生态

风险指数; X_i,Y_i ——与之相对应的几何中心的经纬度坐标; n ——研究区内小区域的总个数。

3 结果与分析

3.1 景观生态风险空间分异

利用地统计学方法进行生态风险空间分异研究,通过对 1989 年、1995 年和 2009 年数据变异函数的计算,进行理论变异函数的拟合。在理论变异函数拟合中,发现 1989 年和 2009 年高斯模型拟合较好,而 1995 年球形模型拟合比较理想。模拟结果表明,结构方差与基台值的比例均低于 25%,说明变量具有强烈的空间相关性,相关参数见表 1。

表 1 变异函数理论模型的相关参数

年份	模型	块金值	基台值	块金值/ 基台值	变程
1989	高斯模型	0.0019	0.0114	16.67	365982
1995	球形模型	0.0032	0.018	17.78	87757
2009	高斯模型	0.0023	0.0176	13.07	365982

基于变异函数的理论模型,利用 ArcGIS 10.0 软件的地统计分析模块,对 1989 年、1995 年和 2009 年 335 个风险小区的景观生态风险指数进行克里格插值。采用 Natural Breaks 分类方法对插值结果进行重分类和景观生态风险的划分,进而生成空间分布图,共分为 5 个层次,即:高生态风险区($ERI\geq 0.5$)、较高生态风险区($0.45\leq ERI<0.5$)、中生态风险区($0.4\leq ERI<0.45$)、较低生态风险区($0.3\leq ERI<0.4$)和低生态风险区($ERI<0.3$),如表 2 所示。

表 2 景观生态风险级别克吕格插值面积及其比例统计

生态风险 级别	1989 年		1995 年		2009 年	
	面积/ 万 hm^2	比例/ %	面积/ 万 hm^2	比例/ %	面积/ 万 hm^2	比例/ %
高生态风险	92.99	26.57	89.85	25.67	123.28	35.22
较高生态风险	167.16	47.76	170.30	48.65	157.92	45.13
中生态风险	56.42	16.12	50.15	14.33	47.01	13.43
较低生态风险	31.34	8.95	38.66	11.05	20.9	5.97
低生态风险	2.09	0.60	1.04	0.30	0.89	0.25

1989—1995 年,高生态风险区、中生态风险区和低生态风险区的面积呈现减少的趋势,其中高生态风险区的面积减少了 3.14 万 hm^2 ,占全区的面积由 1989 年的 6.57%减少到 25.67%。而较高生态风险区和较低生态风险区的面积呈现增加的趋势,其中较高生态风险区的面积增加了 3.14 万 hm^2 。

1995—2009 年高生态风险区呈现增加的趋势,增加的面积为 33.34 万 hm^2 ,占全区面积的比例由 25.67%增加到 35.22%。同时较高生态风险区、中生态风险区、较低生态风险区和低生态风险区均呈现

下降的趋势。

1989—2009 年 20 a 间,高生态风险区呈现增加的趋势,增加的面积为 30.29 万 hm^2 ,占全区的比例由 26.57%增加至 35.22%。较高生态风险区、中生态风险区、较低生态风险区和低生态风险区均呈现下降的趋势。

1989 年的高风险区主要集中在盐城市的滩涂,到 1995 年,江苏沿海滩涂的高风险区面积增加,依然集中在盐城市,南通市有少部分滩涂由原来的较高风险区转化为高风险区,同时阜宁县、建湖县和盐城市区的部分区域也由原来的较高风险区转化为高风险区,到 2009 年,江苏沿海的滩涂依然是高风险区,同时滩涂部分的高风险区有向连云港转移的趋势,大丰市、灌南县和阜宁县依然为高风险区。纵观 20 a 间的变化,江苏沿海景观高风险区始终是滩涂,景观高风险有继续蔓延的趋势,并且从原来的连片状态向块状发展,景观破碎化区域加剧,这与近年来沿海开发是密不可分的,尤其是对沿海滩涂的围垦,围垦面积的增加,速度的加快,使江苏沿海滩涂湿地面积逐渐减少,是造成沿海滩涂持续为景观高风险区的重要原因。

较高生态风险区占据江苏沿海地区的大部分,比例均在 45%以上,其中以盐城市为主,连云港市相对

来说较低,但是有逐渐增加的趋势,这主要是近年沿海开发主要集中在盐城,而连云港山地较多,对景观风险的改善有一定的作用。

1989—2009 年 20 a 间,江苏沿海的景观风险主要集中在高风险区和较高风险区,二者比例之和大于 70%,尤其是江苏沿海地区的滩涂,20 a 间始终为景观高风险区的集中所在地,而湿地生态系统对维护生态系统功能具有重要的作用,近年来由于海岸带的滩涂湿地围垦后形成的人工湿地的利用方式具有多样化,景观加剧破碎化,芦苇地、滩涂、草地等自然景观的斑块数目不但增加不多,而且其平均斑块面积的减幅增大,同时滩涂湿地面积的减少,动摇了沿海生态系统赖以生存的基础,因此江苏沿海地区的景观生态风险不容乐观,在对湿地围垦的过程中要注意对湿地的保护。

3.2 景观生态风险动态分析

利用 ArcGIS 10.0 对 1989 年和 2009 年 2 期景观生态风险等级数据进行叠加分析,分析 1989—2009 年 20 a 间 ERI 的变化情况,进而综合分析江苏沿海地区景观生态风险时空演变特征,根据 ERI 的变化幅度进行动态分级^[28],分为 4 个等级,即基本变差、略微变差、基本不变、略微变好 4 个等级,见表 3,江苏沿海地区的景观生态风险变化见表 4。

表 3 景观生态风险级别状况变化分级

级别	基本变差	略微变差	基本不变	略微变好
变化值	$-2 \leq \Delta \text{ERI} < -1$	$-1 \leq \Delta \text{ERI} < 0$	$0 \leq \Delta \text{ERI} < 1$	$1 \leq \Delta \text{ERI} < 2$

表 4 景观生态风险级别分级

变化类别	基本变差	略微变差	基本不变	略微变好
面积/ km^2	282.22	11562.49	20223.18	432.09
百分比/%	0.87	35.57	62.23	1.33

由表 4 可知,20 a 间江苏沿海地区景观生态风险总体呈现上升的趋势,生态环境总体形势不容乐观。基本和略微变差的面积比例为 36.44%,其中景观生态风险呈现上升的区域主要集中在滨海县、阜宁县、建湖县、盐城市市区和东台市等,均属于盐城市辖区范围内。略微变好仅为 1.33%,而基本不变的比例为 62.23%,占据优势地位。该地区生态风险的加剧主要和近年来江苏沿海滩涂围垦有关,在江苏沿海各地市中,盐城处于滩涂围垦的核心地段,围垦面积远高于其他地市,由于滩涂的大面积围垦,造成湿地面积的减少,潮滩面积的减少引起大量低栖生物的降低,整个生态系统生物多样性的不断下降,同时不断的围垦也造成了景观破碎化的加剧,景观生态风险上升。

3.3 景观生态风险空间变化分析

在对江苏沿海地区 20 a 间区域景观生态风险时空演变特征分析的基础上,基于 ArcGIS 10.0 定量分

析其重心坐标偏移,有助于探讨在城市化背景下,分析基于土地利用时空演变的景观生态风险空间变化规律及形成机理,从而最大程度地降低城市化进程中土地利用风险水平。江苏沿海地区景观生态风险重心转移变化见表 5。

由表 5 分析可知,生态风险区的重心在 1989—1995 年向西北转移了 31.37 km,1995—2009 年向西北转移了 86.18 km,较低生态风险区的重心在 1989—1995 年向东南转移了 59.68 km,1995—2009 年向东南转移了 26.79 km,中生态风险区的重心在 1989—1995 年向东南转移了 9.87 km,1995—2009 年向西北转移了 32.12 km,较高生态风险区的重心 1989—1995 年向西北转移了 6.83 km,1995—2009 年向东南转移了 13.52 km,高生态风险区的重心 1989—1995 年向西北转移了 9.19 km,1995—2009 年向东南转移了 5.89 km。

总体上看,1989—2009 年的 20 a 间,较高生态风险区和高生态风险区均位于盐城市,并且两个区均有向东部沿海滩涂转移的趋势,中生态风险区的重心由南通市转移到盐城市,亦有向沿海滩涂转移的趋势。这主要是

由于经济的发展,加快了城市化的进程,造成景观破碎化程度的加剧,同时由于滩涂围垦面积的增加,而滩涂围垦的核心主要位于盐城市,城市的发展和滩涂的围垦

加剧了对江苏沿海地区生态环境的破坏,尤其是盐城市生态环境的破坏,因此,在城市发展和滩涂围垦的过程中应尤为注意对盐城市生态环境的保护。

表 5 景观生态风险级别重心变化统计表

生态风险 级别	1989 年重心坐标		1995 年重心坐标		2009 年重心坐标		转移量	
	X(°)	Y(°)	X(°)	Y(°)	X(°)	Y(°)	1989—1995	1995—2009
低生态风险区	120.7482	32.4522	120.6529	32.7255	120.1426	33.3710	(-0.0953,0.2733)	(-0.5103,0.6455)
较低生态风险区	119.5381	34.1426	120.0142	33.5009	119.9081	33.7033	(0.4761,-0.6417)	(-0.1061,0.2024)
中生态风险区	120.0667	33.3756	120.1219	33.2987	119.9349	33.5404	(0.0552,-0.0769)	(-0.1870,0.2417)
较高生态风险区	120.1709	33.3715	120.1237	33.4194	120.1992	33.3114	(-0.0472,0.0479)	(0.0755,-0.1080)
高生态风险区	120.2327	33.3405	120.2116	33.4213	120.2553	33.3857	(-0.0210,0.0808)	(0.0437,-0.0356)

4 结 论

本研究基于景观格局的景观干扰度指数和景观脆弱度指数构建了景观生态风险指数,较客观地反映了研究区景观生态风险状况。利用 ArcGIS 中的地统计模块,对研究区景观生态风险指数变异函数的理论模型进行了最优拟合并对其进行了空间插值,同时在 ArcGIS 软件的支持下,利用土地覆被重心迁移模型,对景观生态风险的空间变化进行了分析,结果表明:

(1) 1989—2009 年的 20 a 间,高生态风险区呈现增加的趋势,较高生态风险区、中生态风险区、较低生态风险区和低生态风险区均呈现下降的趋势,较高生态风险区占据江苏沿海地区的大部分,比例均在 45% 以上,其中以盐城市为主,连云港市相对来说较低,但是有逐渐增加的趋势。江苏沿海景观高风险区始终是滩涂,景观高风险有继续蔓延的趋势,并且从原来的连片状态有向块状发展,景观破碎化区域加剧。

(2) 20 a 间江苏沿海地区景观生态风险总体呈现上升的趋势,景观生态风险呈现上升的区域主要集中在滨海县、阜宁县、建湖县、盐城市市区和东台市等。较高生态风险区和高生态风险区均位于盐城市,并且两个区均有向东部沿海滩涂转移的趋势,中生态风险区的重心由南通市转移到盐城市,亦有向沿海滩涂转移的趋势。

由于本研究没能建立起景观结构与具体区域生态问题类型之间的直接关系,没有综合考虑社会、经济和生态环境的其他因素,故不具有绝对性。但通过对江苏沿海地区的区域景观生态风险的评价,可为区域生态环境管理提供数量化的决策依据和理论支持。

参考文献:

[1] 卢宏伟,曾光明,谢更新,等.洞庭湖流域区域生态风险评价[J].生态学报,2003,23(12):2520-2530.
[2] 李国旗,安树青,陈兴龙,等.生态风险研究评述[J].生态学杂志,1999,18(4):57-64.
[3] Hunsaker C T, Granham R L, Suter G W. Assessing

ecological risk on a regional scale[J]. Enviromental Management,1990,14(3):325-332.
[4] Barrell S M, Gardner R H, Neill R V. Ecological Risk Assessment[M]. Chelsea:Lewis Publishers,1992.
[5] IrouméA, Huber A, Schulz K. Summer flows in experimental catchments with different forest covers chile[J]. Journal of Hydrology,2005,300(1/4):300-313.
[6] 王娟,崔保山,刘杰,等.云南澜沧江流域土地利用及其变化对景观生态风险的影响[J].环境科学学报,2008,28(2):269-277.
[7] Franoise B, Jaeques B. Landscape Ecology: Concepts, Methods and Applications[M]. New Hampshir:Science Publishers,Inc,2003:206-210.
[8] Goldewijk K K. Estimating global land use change over the past 300 years: the HYDE Database[J]. Global Biogeo chemical Cycles,2001,15(2):417-434.
[9] 周启刚,张晓媛,杨霏,等.基于 PSR 模型的三峡库区重庆段土地利用生态风险评价[J].水土保持研究,2013,20(5):187-192.
[10] Barrell S M, Gardner R H, O' Neill R V. Ecological Risk Estimation [M]. Boca Raton: Lew Publishers, 1992.
[11] 曾辉,刘国军.基于景观结构的区域生态风险分析[J].中国环境科学,1999,19(5):454-457.
[12] 彭建,王仰麟,刘松,等.景观生态学与土地可持续利用研究[J].北京大学学报:自然科学版,2004,40(1):151-160.
[13] 邬建国.景观生态学:格局、过程、尺度与等级[M].北京:高等教育出版社,2000.
[14] 陈立顶,傅伯杰,黄河三角洲地区人类活动对景观结构的影响分析:以山东省东营市为例[J].生态学报,1996,22(4):116-120.
[15] 李晓燕,张树文.基于景观结构的吉林西部生态安全动态分析[J].干旱区研究,2005,22(1):57-62.
[16] 陈鹏,潘晓玲.干旱区内陆流域区域景观生态风险分析:以阜康三工河流域为例[J].生态学杂志,2003,22(4):116-120.

测。结果显示,2011—2015年武汉市人均生态足迹逐年增加,而人均生态承载力逐年减少,按照现行发展模式,到2015年,武汉市人均生态赤字率将达到253%。

3.2 讨论

通过以上分析可知,武汉市的生态环境状况不容乐观,城市发展不具有可持续性。未来武汉市生态足迹将主要受经济发展、人口增长和以生产、消费活动为核心的各种人为活动的影响,因此为控制人类对自然造成的压力,维持武汉市生态环境的可持续发展,应积极转变武汉市现行的经济发展模式,切实考虑城市的生态环境容量,使经济增长与环境保护相协调,促进区域经济、社会和环境的和谐发展。同时还应调整土地利用结构,通过植树造林等减少土地利用碳排放,利用先进的生产技术提高单位土地单位面积的生产能力等。在控制生态足迹的同时提高生态承载力,从而逐步缩小城市的生态赤字,使城市的生态环境发展回归到健康、可持续的轨道上。

由于土地利用类型的面积数据收集较困难,因此本文对所选区域的分析具有一定的滞后性。在今后的研究中,首先要增加相关数据的时间跨度,通过对更长时间序列的生态足迹状况进行测算来提高预测的准确性。其次,可考虑采用张恒义^[12]研究的基于“省 hm^2 模型”的生态足迹法来测算市域的生态足迹,更能精确反映武汉市实际生产力状况和区域发展特征。

参考文献:

- [1] 姜伟,李萌. 低碳经济规划:理论·方法·模型[M]. 北京:社会科学文献出版社,2011.
- [2] 蒋依依,王仰麟,卜心国,等. 国内外生态足迹模型应用的回顾与展望[J]. 地理科学进展,2005,24(2):13-23.
- [3] 张鸣,叶艳妹. 杭州市生态足迹计算与分析[J]. 中国土地科学,2004,18(4):25-30.
- [4] 熊德国,鲜学福,姜永东. 生态足迹理论在区域可持续发展评价中的应用及改进[J]. 地理科学进展. 2003,22(6):618-626.
- [5] 徐中民,程国栋,张志强. 生态足迹方法的理论解析[J]. 中国人口·资源与环境,2006,16(6):69-78.
- [6] 秦耀辰,牛树海. 生态占用法在区域可持续发展评价中的运用与改进[J]. 资源科学,2003,25(1):1-8.
- [7] 刘英,赵荣钦,焦士兴. 河南省土地利用碳源/汇及其变化分析[J]. 水土保持研究,2010,17(5):154-157.
- [8] 赵荣钦,秦明周. 中国沿海地区农田生态系统部分碳源/汇时空差异[J]. 生态与农村环境学报. 2007,23(2):1-6.
- [9] 张旺锋,苏珍贞,解雯娟. 基于生态足迹的资源性城市土地利用低碳模式的探求[J]. 生态经济,2010(11):73-76.
- [10] 韩红彩. 灰色系统预测的研究与分析[J]. 中国科技信息,2010(14):29-30.
- [11] 汪晓银,周保平. 数学建模与数学试验[M]. 北京:科学出版社,2010:258-259.
- [12] 张恒义,刘卫东,林育欣,等. 基于改进生态足迹模型的浙江省域生态足迹分析[J]. 生态学报. 2009,29(5):2738-2748.
- [17] Manfred W B. The landscape-ecology risk information system for Namibia concept, methodology and examples of application [J]. Applied Geography and Development, 1999, 53(Z3):7-25.
- [18] 郝瑞卿,刘富民. 基于分形理论的土地利用景观格局变化研究[J]. 水土保持研究,2013,20(2):217-222.
- [19] 李冰,吴海锁. 从决策源头保护生态敏感区:江苏沿海地区发展规划环评经验[J]. 环境保护,2009(21):44-46.
- [20] 范一大,史培军,辜智慧,等. 行政单元数据向网格单元转化的技术方法[J]. 地理科学,2004,24(1):105-108.
- [21] 梵文华,白中科,李慧峰,等. 复垦区土壤重金属污染潜在生态风险评价[J]. 农业工程学报,2011,27(1):348-354.
- [22] 臧淑英,梁欣,张思冲. 基于 GIS 的大庆市土地利用生态风险分析[J]. 自然灾害学报,2005,14(4):141-145.
- [23] 荆玉平,张树文,李颖. 基于景观结构的城乡交错带生态风险分析[J]. 生态学杂志,2008,27(2):229-234.
- [24] 岳文泽,徐建华,徐丽华,等. 不同尺度下城市景观综合指数的空间变异特征研究[J]. 应用生态学报,2005,16(11):2053-2059.
- [25] 王波,王元仲,李冬梅,等. 迁安市农田重金属含量空间变异性[J]. 应用生态学报,2006,17(8):1495-1500.
- [26] 王欣,吴殿廷,肖敏. 产业发展与中国经济重心迁移[J]. 经济地理,2000,26(6):978-981.
- [27] 王思远,刘纪远,张曾项,等. 近 10 a 中国土地利用格局及其演变[J]. 地理学报,2002,57(5):523-530.
- [28] 程晋南,赵庚星,李红,等. 基于 RS 和 GIS 的土地生态环境状况评价及其动态变化[J]. 农业工程学报,2008,24(11):83-88.

(上接第 245 页)