

快速城镇化地区景观生态风险变化评估

——以上海市青浦区为例

王敏, 阮俊杰, 王卿, 沙晨燕

(上海市环境科学研究院, 上海 200233)

摘要: [目的] 研究区域生态风险的时空变化规律, 为区域生态规划和生态建设提供技术支持。[方法] 基于景观格局指数构建区域综合生态风险评价模型, 并利用空间自相关分析方法, 开展快速城镇化地区生态系统变化及其生态风险时空分异研究。[结果] 2000—2013 年上海市青浦区城镇和林地大面积增加, 农田大面积减少, 湿地保持稳定; 研究区生态风险空间分布差异明显, 青浦东部地区的生态风险高于西部地区, 且东部风险扩张速度高于西部, 城市化对生态风险的影响显著。[结论] 区域生态风险具有显著的空间集聚特征, 其生态风险值呈现显著的空间正相关关系。这些变化与生态系统变化及人类活动之间关系密切。

关键词: 上海市青浦区; 景观格局; 生态风险; 城镇化; 空间分析

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2016)05-0185-06

中图分类号: F301.24, X82

文献参数: 王敏, 阮俊杰, 王卿, 等. 快速城镇化地区景观生态风险变化评估[J]. 水土保持通报, 2016, 36(5): 185-190. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2016.05.037

Landscape Ecological Risk Assessment and Its Spatiotemporal Variation in Rapid Urbanization Areas

—A Case Study at Qingpu District, Shanghai City

WANG Min, RUAN Junjie, WANG Qing, SHA Chenyan

(Shanghai Academy of Environmental Sciences, Shanghai 200233, China)

Abstract: [Objective] The aim of this study is to reveal the spatial and temporal variation of regional ecological risk in rapid urbanization areas (Qingpu District of Shanghai City), in order to provide technical support for regional ecological planning and construction. [Methods] With the employment of GIS technology, the regional integrated ecological risk assessment model was constructed based on landscape pattern index. Spatial distribution of ecological risk in the study area was analyzed by spatial autocorrelation. [Results] The land use in the study area changed greatly from 2000 to 2013. The area of forest and urban increased gradually while the area of farmland decreased, wetland remained stable. The spatial variation of ecological risk in the study area was significant. The ecological risk of the area in the eastern was higher than that of the area located in the west, and the expansion speed of ecological risk in the east was higher than that in the west. Urbanization had a significantly impact on ecological risk. [Conclusion] Regional ecological risk has significant spatial agglomeration characteristics, and its ecological risk value represents a significant positive correlation. These changes are closely related to ecosystem change and human activities.

Keywords: Qingpu District; landscape pattern; ecological risk; urbanization; spatial analysis

生态风险指生态系统及其组分所承受的风险, 是一个种群、生态系统或整个景观的正常功能所受到的外界胁迫, 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]。生态风险是生态安全的反函数, 是生态系统健康和完整状况的重要表征^[2]。城市化是城市扩展的影响过程, 其实质是区域自然生态系统和农业生态系统向城市生态系统不断转化的过程^[3]。

收稿日期: 2015-10-12

修回日期: 2015-12-18

资助项目: 上海市环保局科研基金项目“基于 RS 和 GIS 技术分析城市绿地对城市热岛改善效益研究”(沪环科 2015-100)

第一作者: 王敏(1978—), 女(汉族), 上海人, 博士, 高级工程师, 主要从事环境管理研究。E-mail: dhurjj@126.com。

通讯作者: 阮俊杰(1984—), 男(汉族), 浙江省绍兴市人, 硕士, 工程师, 主要从事生态遥感研究。E-mail: 271960610@qq.com。

城市化过程通过直接或间接的改变地面形态及原本自然的生物地球化学过程,使生态系统的结构、过程和功能受到影响或发生不可逆转的变化^[4]。进入 20 世纪以来,随着中国社会经济发展,城市化进程快速推进,截止 2013 年,中国城镇人口总数为 73 111 万人,城镇化率达到 53.73%,超过 50%,进入了快速发展阶段^[5]。随着城市化进程的不断推进,景观格局特征越来越复杂,受格局影响的生态过程、功能也不断发生变化,生态风险加剧,影响着区域的生态安全^[6-7]。因此,如何对快速城市化地区的生态风险水平定量化成为众多学者关注的焦点,并对此开展了大量相关研究。景观指具有高度空间异质性的区域,它由相互作用的景观要素或生态系统以一定的规律组成^[8]。从景观角度上看,城市化可理解为一种土地利用/覆被景观转变的过程,即从由水、土、植被等要素组成的自然景观转变为由水泥、沥青、化工材料、金属等要素组成的人工景观,从而影响物种个体行为、种群动态、生物多样性、物质能量流等多尺度生态过程^[9]。在人为活动占优势的快速城市化区域,不同土地利用方式和强度产生的生态影响具有区域性和累积性的特征,并且可以直观地反映在生态系统的结构和组成上^[10-11]。因此,从景观格局角度出发,评价区域生态风险,研究区域生态安全是可行的、有效的。

上海市青浦区地处江浙沪两省一市交界处,坐拥良好的生态环境,又处于上海东西向城市发展主轴线和嘉青松西翼新城轴线的交汇处,在周边城市的辐射下,城市化进程加快,生态风险增大,区域生态安全问题日益突出。本研究拟针对青浦区社会经济快速发展面临的主要风险类型,将景观类型单元作为风险受体,在现行区域生态风险评价方法基础上,构建景观生态风险评价模型,评价区域生态风险,并且利用 ArcGIS 10.0 空间分析功能,研究区域生态风险的时空变化规律,以期为区域的生态规划和生态建设提供技术支持,促进城市化发展中的土地合理开发利用。

1 研究区域

上海市青浦区位于东经 120°53′—121°17′,北纬 30°59′—31°16′,地处上海西南部,太湖下游,黄浦江上游,东与上海市闵行区毗邻,南与松江区和金山区相接;西连江苏省的吴江和昆山市及浙江嘉善县,北与嘉定区相接。全区下辖 8 个镇,3 个街道,行政面积 670 km²,人口 117 万。青浦区境内地势平坦,河网密集,东部河江交错,西部湖荡群集。青浦属亚热带海洋性季风气候,常年主导风为东南风,气候温和,日照充足,四季分明,雨水充沛。

2 研究方法

2.1 数据来源与处理

本研究以研究区 2000,2006 年和 2013 年 1:50 000 的彩红外遥感影像为数据源,影像由上海市测绘院提供,空间分辨率为 0.5 m,各类地物均可以从影像上清楚识别,非常适合人工目视判读和解译用地类型。遥感影像以上海市 1:2 000 数字化地形图为参照进行几何校正后拼接,在 ArcGIS 环境下,参照《城市生态系统中土地利用/土地覆盖》标准,通过人机交互式解译,得到土地利用/土地覆盖数据库,解译后的土地利用/土地覆盖类型经野外验证和校正后,精度达 99% 以上。最后根据需要,将生态系统划分为林地、湿地、农田和城镇四种类型。景观格局指数的通过 Fragstats 4.0 计算获得,空间分析在 ArcGIS 和 GeoDa 环境下进行。

2.2 生态风险评价

生态风险源包括自然因素和人为因素 2 种。由于青浦地理位置特殊,自然灾害风险较少,而近十余年,青浦区经济飞速发展,GDP 增长率保持在 10% 以上,城镇扩展迅速,城市化进程加快。因此,需对干扰生态系统的人类活动进行综合度量。在快速城市化地区,各景观类型所代表的生态系统都受到人类活动的影响,并存在一定的生态风险,因此,将不同景观类型作为生态风险受体。根据暴露—响应分析^[12]与相关学者的研究成果^[13-16],基于景观响应与生态系统服务价值,构建度量生态终点的生态风险表征指数 (ecological risk index, ERI),计算公式如下:

$$ERI = S_j \times \sum_{i=1}^n \frac{A_{ij}}{A_j} \times V_i \quad (1)$$

式中:ERI——生态风险指数,可以反映区域内潜在综合生态损失的相对大小; S_j ——第 j 类风险区域的干扰度,反映了人类干扰活动的强弱程度; V_i ——第 i 类景观类型的生态系统服务价值系数; A_{ij} ——第 j 类风险区域第 i 类景观类型面积 (km²); A_j ——第 j 类风险区域的总面积 (km²)。

$$S_j = aC_j + bN_j + c/G_j \quad (2)$$

式中: S_j ——景观干扰度指数; C_j ——景观破碎度指数; N_j ——景观分离度指数; G_j ——面积周长分维度指数; a, b, c ——相应各景观指数的权重,且 $a + b + c = 1$,根据相关研究^[17-20],结合专家打分法,分别赋以景观破碎度指数、景观分离度指数和面积周长分维度指数的权重分别为 0.5, 0.3, 0.2。

C_j, N_j 和 G_j 在 Fragstats 环境下,用移动窗口法 (边长 200 m) 计算获得。生态系统服务价值系数的

确定参照谢高地等提出的“中国陆地生态系统生态服务价值当量表”^[21],并且结合陈鹏^[22]和金妍等^[23]在相应生态系统和地区的生态系统服务价值研究成果,然后对其归一化处理,得到的林地、湿地、农田和城镇生态系统服务价值系数分别为0.49,0.79,0.15,0.04。最后根据研究区范围和景观面积等情况,采用2 km×2 km的正方形网格,对生态风险指数进行空间化采样。

2.3 空间数据分析

2.3.1 空间插值分析 生态风险指数是一种空间变量,可以利用地统计学方法进行空间特征分析^[24]。将每个风险区域的生态风险指数赋予采样网格中心点,运用 ArcGIS 地统计分析(geostatistical analyst)模块,采用普通 Kriging 法进行内插,从而分析研究区生态风险情况。

2.3.2 全局空间自相关 空间自相关反映了某一变量在空间上是否相关及其相关程度,常用测度指标为 Moran's I 指数,计算公式详见参考文献^[25]。Moran's I 系数取值在-1~1之间,其绝对值越趋近于1,表示研究单元的空间自相关程度越强。当 Moran's $I > 0$,表明存在正的空间自相关,研究单元属性值呈趋同集聚;Moran's $I < 0$,表明存在负的空间自相关,研究单元属性值呈离散分布;Moran's $I = 0$,表明不存在空间自相关,空间单元观测值呈随机分布^[26]。

2.3.3 局部空间自相关 全局 Moran's I 指数能够测度事物在整体空间上的相关程度,但对于局部异常现象,需引入 LISA(local indicators of spatial association,局域空间关联指数)分析方法进行探析^[25-26],

其计算公式如下:

$$I_i = Z_i \sum_{j=1}^n W_{ij} \times Z_j \quad (3)$$

式中: I_i ——LISA 数空间单元值; Z_i, Z_j ——空间单元 i 和 j 上观测值的标准化值; W_{ij} ——空间权重矩阵。LISA 的实质在于将 Moran's I 分解并呈现到各个区域单元,并形成 LISA 聚类图,由此识别局部空间高高集聚的“热点”和低低集聚的“冷点”,并探析局部空间异常特征。

3 结果和分析

3.1 生态系统变化特征

由表1和附图1可知,随着城市化进程的推进,青浦区的生态系统结构发生了改变,2000年,全区以农田为主,湿地次之,城镇和林地分别占比15.5%和0.84%;而到2013年以城镇为主,农田和湿地次之,林地占比11.01%。2000—2006年城镇面积增加量最大,农田面积减少量最大,但从变化幅度上看,林地的动态度最大,变化最剧烈。2006—2013年,面积增加最大的仍是城镇,但变化幅度大幅度下降,面积减少最大的仍是农田,从变化幅度上看,林地的动态度最大,但变化幅度较前6a有所下降。

在整个研究期间,城镇大面积增加,农田大面积减少,林地大幅度增加,湿地基本保持,东部地区变化幅度明显大于西部地区,基本表明:2000—2013年,青浦区社会经济和城乡建设不断发展,人类活动影响越来越强烈。

表1 2000—2013年青浦区生态系统变化及其动态度

类型	2000年		2000—2006年	2006年		2006—2013年	2013年		2000—2013年
	面积/km ²	比例/%	年动态度/%	面积/km ²	比例/%	年动态度/%	面积/km ²	比例/%	年动态度/%
城镇	103.90	15.50	12.69	183.03	27.30	3.38	226.31	33.76	9.06
林地	5.64	0.84	43.74	20.44	3.05	37.28	73.78	11.01	92.95
农田	379.12	56.55	-4.05	286.99	42.81	-4.62	194.16	28.96	-3.75
湿地	181.73	27.11	-0.16	179.94	26.84	-0.30	176.14	26.27	-0.24

3.2 生态风险时空变化特征

对插值得到的生态风险分布数据进行归一化处理,然后按照 ArcGIS 的 natural breaks 将研究区的生态风险划分为低风险区($ERI \leq 0.25$)、较低风险区($0.25 < ERI \leq 0.46$)、中等风险区($0.46 < ERI \leq 0.63$)、较高风险区($0.63 < ERI \leq 0.75$)和高风险区($ERI > 0.75$),如图1所示。青浦区生态风险空间差异明显,东部地区相对较高,西部地区较低,且高与较高风

险区扩张迅速。高风险区主要分布在徐泾镇、华新镇以及香花桥街道、盈浦街道、夏阳街道和赵巷镇的交界处;较高风险区主要分布在高风险区的外围,白鹤镇东北部、朱家角镇中心地区以及练塘镇局部地区;中等风险区分布在青东除高风险区和较高风险区外的绝地大部分区域,以及青西的朱家角镇中部和练塘镇、金泽镇的局部地区;较低风险区集中分布在青西地区,分布较大;低风险区主要分布在淀山湖周缘以及太浦河两侧。

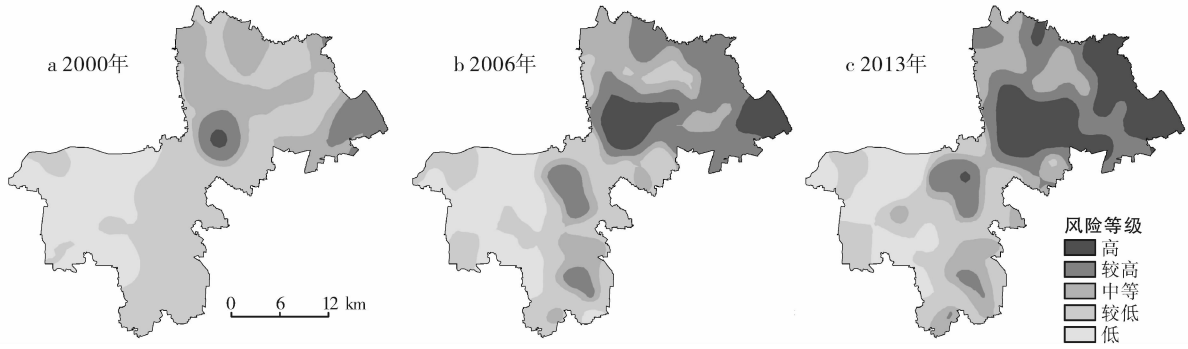


图 1 上海市青浦区 2000,2006,2016 年生态风险空间分布

图 2 显示,2000—2006 年,区域生态风险明显增加,主要表现为高和较高风险区大面积增加,较低风险区大面积减少。其中高风险区和较高风险所占比重从 10.6%增加到 34.15%,较低风险区所占的比重从 44.77%下降到 26.39%,中等和低风险区面积变化相对较少。2006—2013 年,区域生态风险增加,但变化幅度较前 6 a 小,主要表现为高风险区面积增加,低风险区面积减少。其中高风险区面积增加 64.71 km²,低风险区面积减少 45.36 km²,而较高和较低风险区面积变化相对较少,中等风险区面积基本保持不变。

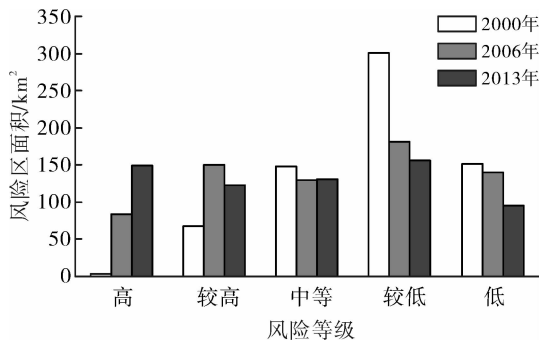


图 2 2000—2006 年上海市青浦区生态风险等级面积变化

从转移变化可以看出(图 3),2000—2013 年,青浦区 66.77% 的景观生态风险等级发生了变化,除 6.8 km² 的较低—低转换外,其余都向高一级的风险转换,其中较低—中等的转换面积最多(104.78 km²)。在发生转换的面积中,31.72% 的转换为高风险区,30.41% 转换为较高风险区,24.86% 转换为中等风险区,可以看出,青浦区城市化进程迅速,人类干扰剧烈,生态风险严峻。从空间上看,青浦区生态风险加剧的地区主要集中在东部地区,如香花桥街道、赵巷镇、华新镇和徐泾镇等,西部地区相对较好,仅在各镇的中心区域生态风险有所加剧。

3.3 生态风险的区域差异

图 4 显示,2000—2013 年,青浦区下辖的 8 镇 3 街道生态风险均有所增加,高风险区比重明显提升。其中华新、赵巷和徐泾的风险等级最高,高风险区面

积大幅度增加,基本处于较高风险以上,高风险区面积占 80% 以上;盈浦和香花桥的风险也较高,80% 的面积处于较高风险以上,高风险区面积占 50% 以上;夏阳、重固和白鹤受中心地区辐射,高风险区面积增加,有近 1/2 的地区处于较高风险及以上;朱家角和练塘的生态风险相对较低,1/2 以上的地区处于较低风险以下;金泽生态风险最低,低风险区面积有所减少,但全镇基本处于较低风险以下。

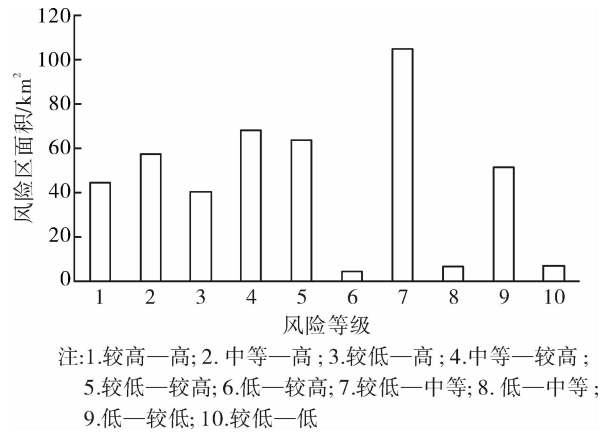


图 3 2000—2006 年上海市青浦区生态风险等级面积转移变化

3.4 生态风险空间自相关分析

由全局空间自相关统计结果可知(图 5),3 期景观生态风险强度 Moran's *I* 指标均为正值,呈现较强空间正相关特征,生态风险在空间上集聚形成密集区,空间相关性显著。3 期 Moran's *I* 数值不断升高,可以推断青浦区生态风险强度的整体空间分异性增加。

由 LISA 指数分析可知(图 6),青浦区生态风险的集聚空间分布格局变化相对较大,“热点”和“冷点”集聚现象十分突出。“热点”(高风险区)主要集聚在人口较多、社会经济相对较发达的青东地区,并且随着时间面积不断扩大。“冷点”(低风险区)主要集聚在青西淀山湖地区,也随着时间而扩大。“热点”和“冷点”区域的空间位置与功能分区的对应关系,证明人类活动的集聚程度与风险的空间集聚程度是对应的。

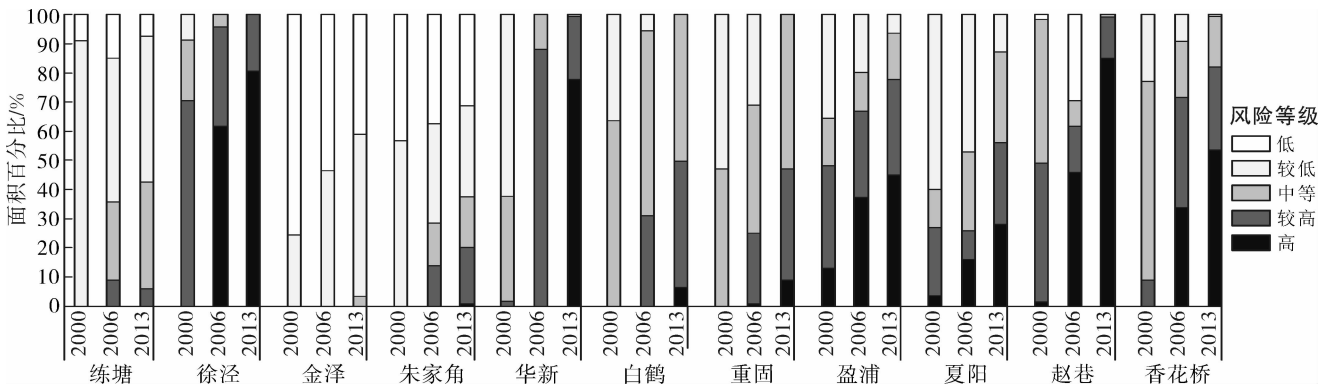


图 4 各乡镇区域生态风险等级分布

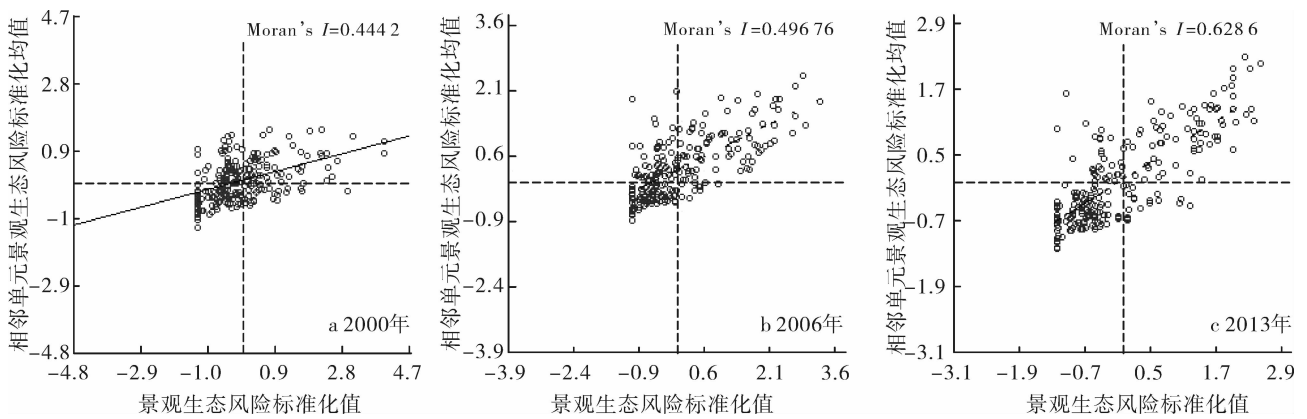


图 5 2000—2013 年生态风险值 Moran's I 指数散点分布

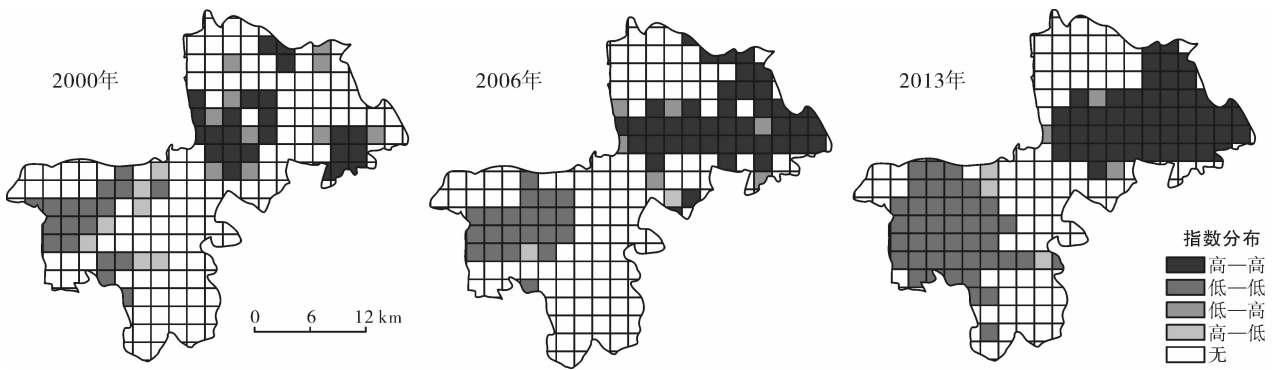


图 6 2000—2013 年上海市青浦区生态风险值 LISA 指数空间分布特征

4 讨论与结论

4.1 城镇化对生态风险的影响

城市化过程影响着生态风险的空间分布及其变化。近 13 a, 青浦区城市化进程加快, 城镇面积从 103.9 km² 增长到 226.31 km², 增加了 1 倍, 城镇人口从 22.61 万人增长到 82.83 万人, 增加了近 3 倍。城市化进程加快带来的土地利用更迭剧烈, 使景观格局特征趋于复杂, 环境污染加重, 区域生态风险日益

显著, 高风险地区增加。从图 7 可见, 青浦区各乡镇的城市化水平和生态风险之间具有良好的线性关系, 3 个时期的生态风险值的线性拟合方程的决定系数分别达到 0.680 3, 0.822 7 和 0.959 1, 拟合效果较佳。也可以看出, 随着城市化水平的提升, 区域生态风险呈现出明显的增加趋势, 城市化对生态风险的正效应明显。青浦城市化过程最为明显的是东部地区, 城镇面积增加 1.5 倍, 而西部 3 镇受城市化过程影响最小, 城镇面积仅增加 0.6 倍。生态风险的空间分布

及其变化与城市化过程表现相一致:青东地区,生态风险水平整体较高,随着城市化过程的推进,区域生态风险也随之升高,面积也在扩张;而在青西地区,由于受城市化过程影响较小,生态风险水平较低,变化较小。

4.2 区域生态风险管理

根据青浦区生态风险空间异质性特点,针对不同风险的等级地区提出不同的管理对策,最终落实生态风险管理目标。

(1) 高风险区和较高风险区主要分布在盈浦街道至徐泾镇一带,以城镇景观为主,这些地区城市化

速度快,人类活动集中。对于建成区,重点考虑人居生态风险缓解的需求,以提升缓解城市热岛、减少城市内涝、调节局部小气候、提升景观效果等生态服务功能为主,如构建以行道树为主的生态廊道,增强立体绿化来充实生态空间等。其他区域首要合理规划土地利用,以此调控人类活动。在规划过程中,以绿色基础设施为城市基础设施建设的规划方向,如构建蓝绿生态廊道,隔绝污染,连通生态小斑块,提升生态服务功能。通过源头防范与末端治理相结合,对该区域的生态风险进行综合管理,满足社会、经济和生态效益的多赢。

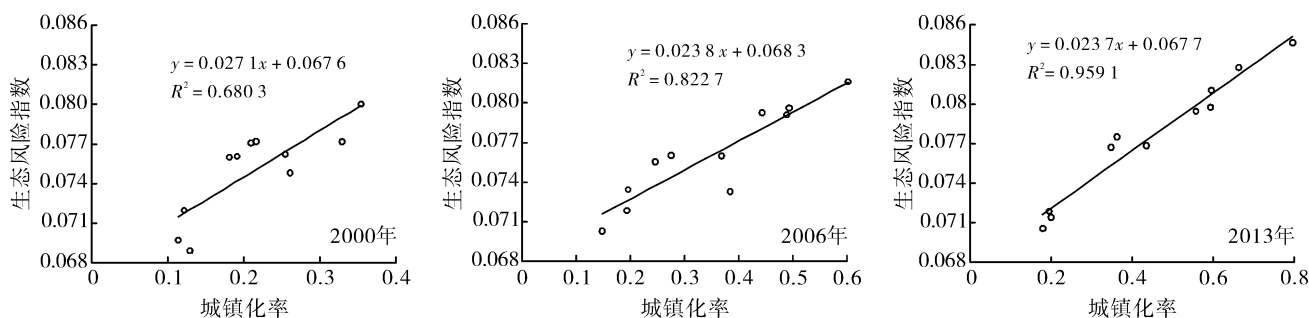


图 7 上海市生态风险与城市化的关系

(2) 中等风险区主要处在较高风险区的外围,以农田为主,包括部分城镇,这些地区的人类活动干扰相对较弱,且自身具有一定的恢复能力。为了维持现状和降低未来的生态风险,这些区域首要保护好基本农田,同时,因地制宜,做好统筹规划,合理布局农业生产和建设活动,开展生态环境治理,进行产业转型,实现生态建设和经济建设的双赢。

(3) 低风险区和较低风险区主要分布在青西 3 镇,该区域河网密集,植被分布较高,是黄浦江上游水源保护区所在地,人类活动干扰较少。但值得注意,这些区域一旦受到人类活动破坏后,其恢复重建比较困难,不仅危害区域的生态安全,还会影响上海全市的生态安全。因此,该区域首要加强生态保护建设,保护敏感的生态环境,如加强水源涵养林建设,预防生态环境被污染和破坏,防患于未然。优化产业准入制度,有助于保护或修复受损生态系统及提升生态服务功能的产业应予以扶植;农业生产要进行从产业方式上进行引导,从政策上完善管理要求,使之能发挥更多的发挥正面的、积极的效应;农业旅游、生态旅游等产业也要进行引导和适度控制。完善生态补偿制度,拓展补偿范围和补偿对象,提升补偿资金,加强生态补偿的监督考核。

4.3 结论

在快速城市化过程中,青浦区土地更迭剧烈,对景观格局产生了十分复杂的影响。本研究基于景观

格局,构建生态风险指数,较好的评价了区域生态风险状况及其变化趋势,可为区域生态环境管理提供决策依据和理论支持。研究表明:① 青浦区 13 a 间生态系统发生了显著变化,生态风险整体呈加快增涨趋势。低生态风险区面积不断缩减,高生态风险区面积逐渐扩大。② 生态风险空间差异明显,高生态风险区主要分布于青浦东部地区,低风险区域主要分布在西部淀山湖周缘地区。③ 城镇是区域生态风险的主要来源,城镇扩张和生态风险增加显著相关,对生态风险的贡献率越来越大。

[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] 孙才志,闫晓露,钟敬秋. 下辽河平原景观生态安全评价及空间结构分析[J]. 安全与环境学报,2014,14(2):266-272.
- [3] 郭冻,杜世宏,薛达元,等. 快速城市化进程中广州市景观格局时空分异特征的研究[J]. 北京大学学报:自然科学版,2009,45(1):129-136.
- [4] 李双成,赵志强,王仰麟. 中国城市化过程及其资源与生态环境效应[J]. 地理科学进展,2009,28(1):63-70.
- [5] 周迪,施平,吴晓青,等. 烟台市城镇空间扩展及区域景观生态风险[J]. 生态学杂志,2014,33(2):477-485.
- [6] 于开芹,冯永军,郑九华,等. 城乡交错带土地利用变化及其生态效应[J]. 农业工程学报,2009,25(3):213-218.

(下转第 197 页)

数呈现出轻微波动的整体下降趋势,影响指数呈现整体增长趋势,安全状态也由不安全转变为安全;影响安全指数呈现波动变化状态,证明了土地生态系统本身存在的自我恢复和调控机制在发挥作用;重庆土地生态安全的响应生态安全指数一直处于缓慢增长的阶段。因此,减少对土地驱动力和压力,通过产业结构的调整、环境保护力度及资金投入的加大以及技术的提高,农业生产技术改进,对现有水土流失、土地污染等环境问题的治理及森林覆盖率的提高,加强对土地生态安全的响应力度,进而提升重庆市土地生态安全的状态,从根本上保障重庆市土地生态安全。

(3) 本文仅仅在此讨论了重庆市土地生态安全的时间变化,重庆作为全国唯一的大城市带大农村的直辖市,区域发展不均衡,土地生态安全的地区差异也很明显,但限于数据采集的困难,本文没有涉及,下一步应该进一步完善。以上不足也是今后该研究继续努力的方向。

[参 考 文 献]

- [1] 张军以,苏维词,张凤太. 基于 PSR 模型的三峡库区生态经济区土地生态安全评价[J]. 中国环境科学, 2011, 31(6):1039-1044.
- [2] 李玉平,蔡云龙. 河北省土地生态安全评价[J]. 北京大
 学学报:自然科学版, 2007, 43(6):784-789.
- [3] 李智国,杨子生. 中国土地生态安全研究进展[J]. 中国安全科学学报, 2007, 17(12):5-14.
- [4] 荣慧芳,张乐勤,严超. 基于熵权物元模型的皖江城市带土地生态安全评价[J]. 水土保持研究, 2015, 22(3):230-236.
- [5] 陈美婷,匡耀求,黄宁生. 基于 RBF 模型的广东省土地生态安全时空演变预警研究[J]. 水土保持研究, 2015, 22(3):217-225.
- [6] 孙奇奇,宋戈,齐美玲. 基于主成分分析的哈尔滨市土地生态安全评价[J]. 水土保持研究, 2012, 19(1):234-239.
- [7] 马瑛. 北方农牧交错带土地利用生态安全评价[J]. 干旱区资源与环境, 2007, 21(7):53-59.
- [8] 刘炎,康慕谊,吕乐婷. 海南岛海岸带土地生态安全评价[J]. 中国土地科学, 2013, 27(8):75-83.
- [9] 韩蕾,孔祥斌,郭洪峰,等. 西南山区生态敏感区土地生态安全评价[J]. 水土保持研究, 2015, 22(1):230-237.
- [10] 张凤太,苏维词,周继霞. 基于熵权灰色关联分析的城市生态安全评价[J]. 生态学杂志, 2008, 27(7):1249-1254.
- [11] 张凤太,王腊春,苏维词. 基于 DPSIRM 概念框架模型的岩溶区水资源安全评价[J]. 中国环境科学, 2015, 35(11):3511-3520.
- [12] 马子惠,梁成华,孟庆欢,等. 基于 PSR 模型的大港油田土地生态安全评价研究[J]. 环境污染与防治, 2015, 37(1):41-47.
- [7] 于大炮,唐立娜,王绍先,等. 长白山北坡植被垂直带群落交错区的定量判定[J]. 应用生态学报, 2004, 15(10):1760-1764.
- [8] 李景刚,何春阳,李晓兵. 快速城市化地区自然/半自然景观空间生态风险评价研究:以北京为例[J]. 自然资源学报, 2008, 23(1):33-47.
- [9] Li Yangfan, Zhu Xiaodong, Sun Xiang, et al. Landscape effects of environmental impact on bay-area wetlands under rapid urban expansion and development policy: A case study of Lianyungang, China[J]. Landscape and Urban Planning, 2010, 94(3/4):218-227.
- [10] 许妍,高俊峰,高永年. 基于土地利用动态变化的太湖地区景观生态风险评价[J]. 湖泊科学, 2011, 23(4):642-648.
- [11] 彭建,刘焱序,潘雅婧,等. 基于景观格局—过程的城市自然灾害生态风险研究:回顾与展望[J]. 地球科学进展, 2014, 29(10):1186-1196.
- [12] 毛小琴,倪晋仁. 生态风险评价研究述评[J]. 北京大学学报:自然科学版, 2005, 41(4):646-654.
- [13] 陈春丽,吕永龙,王铁宇,等. 区域生态风险评价的关键问题与展望[J]. 生态学报, 2010, 30(3):808-816.
- [14] 曾勇. 区域生态风险评价:以呼和浩特市为例[J]. 生态学报, 2010, 30(3):668-673.
- [15] 徐丽芬,许学工,卢亚灵等. 基于自然灾害的北京幅综合生态风险评价[J]. 生态环境学报, 2010, 19(11):2607-2612.
- [16] 肖杨,毛显强. 区域景观生态风险空间分析[J]. 中国环
 境科学, 2006, 26(5):623-626.
- [17] 石浩朋,于开芹,冯永军. 基于景观结构的城乡结合部生态风险分析:以泰安市岱岳区为例[J]. 应用生态学报, 2013, 24(3):705-712.
- [18] 阮俊杰,王卿,黄沈发,等. 海峡西岸经济区景观格局特征研究[J]. 水土保持通报, 2013, 33(4):31-34.
- [19] 王若凡,南忠仁. 基于景观生态学的黑河流域生态风险评价[J]. 安全与环境学报, 2013, 13(6):133-137.
- [20] 王永丽,于君宝,董洪芳,等. 黄河三角洲滨海湿地的景观格局空间演变分析[J]. 地理科学, 2012, 32(6):717-724.
- [21] 谢高地,甄霖,鲁春霞,等. 一个基于专家知识的生态系统服务价值化方法[J]. 自然资源学报, 2008, 23(5):911-919.
- [22] 陈鹏. 厦门湿地生态系统服务功能价值评估[J]. 湿地科学, 2006, 4(2):101-107.
- [23] 金妍,车越,杨凯. 基于最小累积阻力模型的江南水网分区保护研究[J]. 长江流域资源与环境, 2013, 22(1):8-4.
- [24] 高宾,李小明,李志刚,等. 基于景观格局的锦州湾沿海经济开发区生态风险分析[J]. 生态学报, 2011, 31(12):3441-3450.
- [25] 宣国富,徐建刚,赵静. 基于 ESDA 的城市社会空间研究:以上海市中心城区为例[J]. 地理科学, 2010, 30(1):22-29.
- [26] Anselin L. Local indicators of spatial association: LISA [J]. Geographical Analysis, 1995, 27(2):93-115.

(上接第 190 页)