

陈 燕,陈星宇,李 君,等. 基于土地利用时空格局演变的上海市生态风险评价[J].江苏农业学报,2020,36(3):613-619.  
doi:10.3969/j.issn.1000-4440.2020.03.012

## 基于土地利用时空格局演变的上海市生态风险评价

陈 燕<sup>1</sup>, 陈星宇<sup>1</sup>, 李 君<sup>1</sup>, 邱晓敏<sup>2</sup>, 宋新山<sup>1</sup>, 王宇晖<sup>1</sup>

(1.东华大学环境科学与工程学院,上海 201620; 2.密苏里州立大学地理地质规划系,美国 斯普林菲尔德 65897)

**摘要:** 随着上海社会经济的迅猛发展,土地资源的需求不断增大,土地利用格局的不合理变化会带来区域生态环境风险。以上海市土地利用数据为主要数据源,借助 ArcGIS10.0 及 Fragstats4.2 软件,在景观格局的基础上计算生态风险指数,由此分析生态风险空间分布特征及其时空演变规律。结果表明,土地利用结构发生较大变化,土地利用转移以耕地、水域向建设用地及林地转移为主;时间尺度上,上海市生态风险等级逐渐由以低等级为主导转化为以较低等级为主导的格局,总体生态风险呈现不断加剧趋势;空间分布上,南部大部分地区生态风险呈降低趋势,而长江入海口处及崇明北部等区域恶化趋势明显,较高生态风险区、高生态风险区集中在临海地带及浦东新区黄浦江沿岸地区;各生态风险等级中转移面积最大的是中风险降低为较低风险,主要集中在金山、奉贤、浦东南汇等。总体而言,上海市生态风险格局演变与土地利用、景观指数变化相一致,生态风险格局的波动响应于土地利用的快速变化。

**关键词:** 土地利用;景观指数;生态风险;时空演变

**中图分类号:** F301.23

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-4440(2020)03-0613-07

## Ecological risk assessment based on spatial-temporal evolution of land use in Shanghai

CHEN Yan<sup>1</sup>, CHEN Xing-yu<sup>1</sup>, LI Jun<sup>1</sup>, QIU Xiao-min<sup>2</sup>, SONG Xin-shan<sup>1</sup>, WANG Yu-hui<sup>1</sup>

(1. College of Environmental Science and Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China; 2. Department of Geographical and Geological Planning, Missouri State University, Springfield 65897, America)

**Abstract:** With the rapid development of social economy in Shanghai, the demand for land resources is increasing. At the same time, the unreasonable change of land use also brings risks to the regional ecological environment. The ecological risk pattern was constructed based on the landscape indicators with Fragstats4.2 and ArcGIS10.0 softwares, and the spatial distribution of ecological risk as well as law of time and space evolution were investigated. The results showed that the structure of land use had changed a lot, and the land use transfer was mainly converted from cultivated land and waters to construction land and forest land. From the time scale, the ecological risk was dominated by the low level, and gradually transformed into a pattern that dominated by the medium level, and the overall ecological risk was increasing. In terms of spatial distribution, the ecological risk in most south areas was decreasing, while the ecological damage in the Yangtze River estuary and northern Chongming was obvious. Most of the high ecological risk areas were distributed in the coastal zone and areas along Huangpu River in Pudong New Area. The largest transfer area at different ecological risk levels was from middle-risk area

to lower-risk area, mainly concentrated in Jinshan, Fengxian, Pudong Nanhui. In general, the evolution of ecological risk pattern is consistent with the changes of land use and landscape index, and the fluctuation of ecological risk pattern responds to the rapid changes of land use.

**Key words:** land use; landscape index; ecological risk; spatial-temporal evolution

收稿日期:2019-11-17

基金项目:国家自然科学基金项目(41471089);中央高校专项科研基金项目(2232016D3-11)

作者简介:陈 燕(1976-),女,山东淄博人,博士,副教授,主要研究方向为生态安全、环境遥感与环境信息系统。(E-mail) chenyan-hjxy@dh.edu.cn

生态风险是指生态系统受到来自外界的胁迫后导致该系统内部某些要素的减少或其自身结构和功能变化的可能性<sup>[1-2]</sup>。土地作为人类活动的载体,其动态变化会直接影响区域生态环境系统的结构与组成,进而威胁区域生态安全。在区域土地利用格局时空演变研究的基础上分析评价地区生态风险,可以起到生态风险预警及区域生态格局优化的作用<sup>[3-4]</sup>。

截至目前,国内外已有众多学者在土地利用的基础上对区域生态风险进行了评价,评价的对象大多为湿地<sup>[5]</sup>、流域<sup>[6-8]</sup>、海岸带<sup>[9-10]</sup>及干旱地带<sup>[11-12]</sup>等典型生态脆弱区。部分对城市土地利用生态风险的评价案例中,研究对象大多为内陆中小型城市或地区,对于上海这种临海特大经济中心城市的研究较少。上海市作为中国最大的经济中心城市,经济发展及人口扩张使土地资源的开发利用程度不断加深,面临的生态压力和风险极大,同时由于其位于长江入海口,特殊的地理位置使区域生态环境对土地利用变化的响应更为强烈<sup>[13]</sup>,因此对土地利用格局演变带来的生态风险评估十分具有代表性。本研究利用遥感影像提取土地利用数据并计算其景观指数,借助 ArcGIS10.0 软件进行生态风险评价,为上海市合理开发土地资源、降低生态风险提供理论依据,也为生态安全起到预警作用。

## 1 研究区概况及数据来源

### 1.1 研究区概况

上海地处中国东南沿海长江入海口,是中国金融、贸易、信息、科技和航运的中心。地形地貌多为坦阔的平原,水网稠密<sup>[14]</sup>。作为长三角地区的经济中心,道路四通八达,江海港口众多,城市发展迅速,土地利用程度不断增大,人均耕地面积已由 2000 年的 188.34 m<sup>2</sup> 降至 2018 年的 132.76 m<sup>2</sup>,路网、水利等基础设施的建成也加剧了土地破碎化。与此同时,得益于生态城市建设,在城市绿化环境保护方面取得一定进展,截止 2018 年,上海市人均公共绿地面积为 8.2 m<sup>2</sup>,森林覆盖率达 16.8%。

### 1.2 数据来源

以上海市 2000 年、2018 年的 Landsat TM 遥感影像为基础,结合 1:50 000 地形图及行政区划图等,利用 ENVI5.1 遥感软件对各期影像进行几何纠正、图像配准、图像拼接及研究区裁剪等处理,再经

目视解译及人机交互解译得到土地利用数据,解译精度约为 89.4%。结合全国土地资源分类系统及上海市实际情况,将景观类型划分为:耕地、林地、草地、水域、建设用地及其他土地。其中水域包括河流湖泊、水库坑塘、滩涂湿地等,其他土地主要为空闲地与裸地等<sup>[15]</sup>。研究范围包括上海市陆地面积及长江入海口部分,总面积约为 8 000 km<sup>2</sup>。上海市 2000 年及 2018 年土地利用分布如图 1 所示。

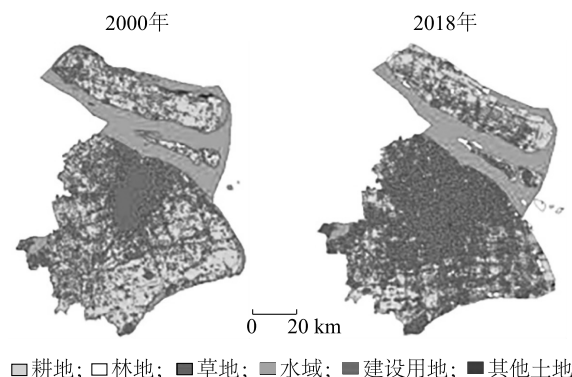


图 1 上海市 2000 年、2018 年土地利用分布图

Fig.1 Land use distribution of Shanghai in 2000 and 2018

## 2 研究方法

### 2.1 土地利用动态分析方法

将 2 个时期的土地利用数据在 ArcGIS10.0 软件中叠加相交来分析不同土地利用类型发生转换的方向及数量。通过土地利用动态模型计算得到单一土地利用度及综合土地利用度,分别代表单一土地类型和土地整体在一定时期内的变化情况<sup>[16]</sup>。

### 2.2 生态风险分析方法

2.2.1 生态风险小区的划分 本研究采用等间距网格采样分析法,结合实际情况及计算难度,将研究区划分为 3 km×3 km 的网格作为小区,共计 998 个。计算各小区的生态风险值并作为该小区中心处生态风险值<sup>[17]</sup>。

2.2.2 景观生态风险指数的计算 本研究采用景观生态风险指数(ERI)来表示研究区受外界影响产生生态损失的相对值。依据研究区内各土地利用类型占比及其景观损失度指数,计算公式如下<sup>[1]</sup>:

$$ERI_i = \sum_{k=1}^N R_k \frac{A_{ki}}{A_k}$$

式中,  $ERI_i$  为第  $i$  个生态风险小区的风险指数;

$A_{ki}$  为第  $k$  个生态风险小区内第  $i$  种土地利用类型的面积;  $A_k$  为第  $k$  个生态风险小区的面积。

景观损失度指数 ( $R_i$ ) 是指在外界影响下, 生态系统内各景观类型所承受的生态损坏程度, 通过景观干扰度指数 ( $E_i$ ) 及景观脆弱度指数 ( $F_i$ ) 计算得出, 具体公式<sup>[18]</sup> 如下:

$$R_i = E_i \times F_i$$

景观干扰度指数, 是指生态系统内不同景观被外界干扰影响的相对大小, 由景观破碎度指数 ( $C_i$ )、景观分离度指数 ( $S_i$ ) 及景观优势度指数 ( $D_i$ ) 加权叠加得到, 具体计算公式<sup>[19]</sup> 如下:

$$E_i = aC_i + bS_i + cD_i$$

式中,  $a$ 、 $b$ 、 $c$  分别为 3 种指标对应的权重, 总和为 1.0。根据研究区的实际情况, 确立权重分别为 0.6、0.3、0.1<sup>[20]</sup>。

景观脆弱度指数, 指不同景观类型应对生态环境变化时的承受能力强弱。依据专家打分法, 分别对 6 种景观类型赋值并归一化处理, 得到各景观类型的脆弱度指数值<sup>[21]</sup>。

2.2.3 空间分析方法 地统计分析是指对某一研究区域内指标的相关关系及分布情况进行检测、估计及模拟<sup>[4, 22-24]</sup>。利用 ArcGIS10.0 软件的地统计分析功能对各小区的样本值进行半变异函数拟合筛

选, 将优化后的样本值通过普通克里金插值得到研究区的生态风险指数分布<sup>[25]</sup>。目前对于生态风险等级没有统一的划分方法, 而本研究对于土地生态风险的评价更着重于空间演变分析, 根据计算的指数范围及图像呈现的效果, 基于自然断点法, 统一间隔为 0.001 2, 将风险值划分为低生态风险区 ( $ESI \leq 0.005 6$ )、较低生态风险区 ( $0.005 6 < ESI \leq 0.006 8$ )、中生态风险区 ( $0.006 8 < ESI \leq 0.008 0$ )、较高生态风险区 ( $0.008 0 < ESI \leq 0.009 2$ ) 及高生态风险区 ( $ESI > 0.009 2$ ) 5 个等级。

### 3 结果与分析

#### 3.1 土地利用变化

3.1.1 总量变化 上海市 2000–2018 年的土地利用总量变化如图 2 所示。耕地面积波动最为剧烈, 减少了 1 347.45 km<sup>2</sup>。其次为建设用地与林地, 面积分别增长了 1 266.38 km<sup>2</sup> 和 647.18 km<sup>2</sup>。水域面积 2018 年较 2000 年下降了 213.68 km<sup>2</sup>。草地在整个研究区域内面积占比较小且变化幅度不大。其他土地面积增加了 34.47 km<sup>2</sup>。其中面积占比超过三分之一的耕地一直为第一大景观类型, 建设用地逐渐替代水域成为第二大景观类型。

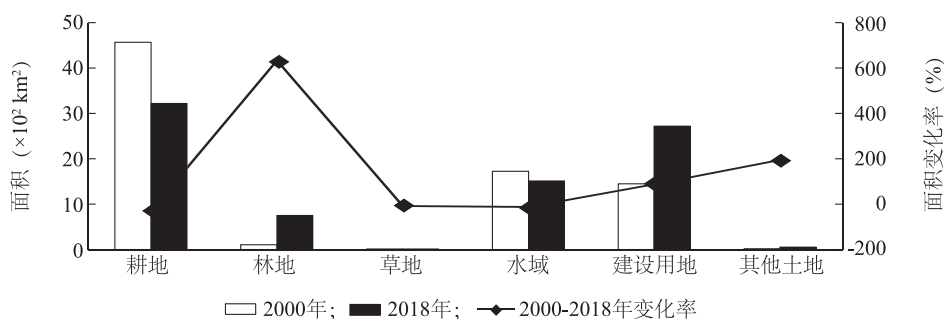


图 2 2000–2018 上海市土地利用面积变化

Fig.2 Changes of land use area in Shanghai during 2000–2018

3.1.2 土地利用结构变化 将 2 个时期的土地利用图相交处理, 整理得到土地利用类型的转化方向及数量。如表 1 所示, 2000–2018 年发生转化最大的为耕地, 其转为建设用地及林地的面积分别是 1 405.78 km<sup>2</sup>、451.07 km<sup>2</sup>, 占耕地总面积的 30.92% 和 9.92%。说明在此时段耕地因为土地开发、生态建设等需要不断被其他土地类型所侵占。水域中的滩涂湿地等主要转变为耕地、林地及建设用地。其

它土地类型间转化不明显。

3.1.3 土地利用动态度变化 根据测算, 2000 年及 2018 年土地综合利用动态度分别为 294.62% 及 304.13%, 说明土地整体利用度上升。从各土地类型的角度分析, 变化速率最大的为林地及其他土地, 分别为 35.20% 及 11.09%。建设用地扩张, 耕地则为负增长。水域及草地总体呈下降趋势。

表 1 上海市 2000–2018 年土地利用类型转移面积及比例

Table 1 Transition area and proportion of each land use type in Shanghai during 2000–2018

	耕地		林地		草地		水域		建设用地		其他土地	
	转移面积 (km <sup>2</sup> )	比例 (%)	转移面积 (km <sup>2</sup> )	比例 (%)	转移面积 (km <sup>2</sup> )	比例 (%)	转移面积 (km <sup>2</sup> )	比例 (%)	转移面积 (km <sup>2</sup> )	比例 (%)	转移面积 (km <sup>2</sup> )	比例 (%)
耕地	2 584.55	56.84	451.07	9.92	3.54	0.08	71.40	1.48	1 405.78	30.92	30.78	0.76
林地	52.61	51.04	20.47	19.86	0	–	7.10	6.89	22.45	21.78	0.45	0.44
草地	6.19	46.86	2.83	21.42	0.01	0.08	1.56	11.81	2.44	18.47	0.18	1.36
水域	198.30	14.44	81.04	4.67	3.18	0.18	1 376.89	79.00	69.40	4.00	4.97	0.29
建设用地	177.23	12.20	77.12	5.31	0.79	0.05	19.36	1.33	1 163.85	80.11	14.46	0.10
其他土地	14.29	80.83	2.79	15.78	0	–	0.45	2.55	0.15	0.85	0	–

### 3.2 土地利用生态风险评价

3.2.1 景观格局指数变化 利用 Fragstats4.2 软件提取得到各时期不同土地利用类型的斑块数量和面积,计算得到各景观指数(表 2)。由表 2 可知,耕地景观面积的减少导致了优势度指数下降明显,与此同时斑块数的变化加剧了破碎度指数及分离度指数的增长。表明原本连片的耕地景观受外界干扰变得分散且破碎。水域面积及斑块数都有所减少,面积减少部分主要发生在长江入海口及崇明岛周边地区,泥沙淤积、海岸开发及人类围垦活动使水域景观分布波动较大,破碎分离化程度加深。林地面积涨幅明显,景观破碎度与分离度下降,受干扰度减小。

草地面积下降 1 km<sup>2</sup>的同时斑块减少了 8 个,说明原本较分散的草地斑块逐渐聚集形成更大的斑块,景观干扰程度有所下降。建设用地在面积大量增长的同时斑块数量却明显减少,说明其不断扩张聚集,破碎度及分离度大大降低。其他土地的面积及斑块数均呈现增长状态,损失度上升。可能是由于在老工业区“绿色转身”过程中,关停、搬迁后遗留下大批废旧厂房,部分地区规划建设为公园绿地、滨水绿廊、道路绿廊、休闲防护林带、街头绿地和附属绿地等,2018 年遥感图像获取的时段内,刚好处于老旧厂房拆除后向生态用地转变的建设过程中,在图像上表现为其他土地利用类型。

表 2 上海市景观格局指数表

Table 2 Landscape pattern index of Shanghai

土地利用类型	年份	斑块数 (个)	面积 (km <sup>2</sup> )	景观 破碎度	景观 分离度	景观 优势度	景观 干扰度	景观 脆弱度	景观 损失度
耕地	2000	47	4 565	0.000 1	0.006 7	0.433 8	0.045 5	0.190 5	0.008 7
	2018	209	3 218	0.000 6	0.020 4	0.313 5	0.037 9	0.190 5	0.007 2
林地	2000	213	102	0.020 9	0.639 5	0.038 7	0.208 2	0.095 2	0.019 8
	2018	1 034	749	0.013 8	0.194 8	0.171 2	0.083 9	0.095 2	0.008 0
草地	2000	21	13	0.016 3	1.593 2	0.004 1	0.488 1	0.142 9	0.069 7
	2018	13	12	0.011 0	1.389 2	0.002 4	0.423 6	0.142 9	0.060 5
水域	2000	395	1 726	0.002 3	0.052 7	0.219 8	0.038 8	0.238 1	0.009 2
	2018	339	1 509	0.002 4	0.057 7	0.170 5	0.036 1	0.238 1	0.008 7
建设用地	2000	1 146	1 450	0.008 0	0.104 5	0.292 7	0.065 3	0.047 6	0.003 1
	2018	768	2 716	0.002 8	0.046 2	0.323 6	0.048 0	0.047 6	0.002 3
其他土地	2000	3	17	0.001 7	0.448 7	0.002 0	0.135 8	0.285 7	0.038 8
	2018	78	51	0.023 6	0.889 3	0.020 0	0.283 0	0.285 7	0.080 8



3.2.2 土地利用生态风险时空变化 利用克里金插值获取 2 个时期的生态风险分布情况,整理得到上海市各时期生态风险分布图(图 3)与不同风险等级土地面积及占比(表 3)。

由表 4 可知,2000 年上海市低生态风险区、较低生态风险区面积分别占总面积的 38.97% 及 33.18%。低生态风险区主要集中在静安、黄埔、徐汇、长宁、普陀、闸北、虹口、杨浦、宝山和浦东部分地区,以面积广泛、聚集度高,抵抗外界干扰的能力强的建设用地为主,生态风险值较低。较低生态风险区面积广阔,主要分布在青浦、松江、嘉定及崇明部分地区,大多为开发程度较低的区域,主要土地利用类型为耕地、建设用地及水域,未面临较严重的生态风险。较高生态风险主要在南部以及崇明南端部分水域,面积约为 259.60 km<sup>2</sup>,土地类型多为单一又分布广泛的耕地和水域,景观脆弱度较高,易受外界干扰而被破坏。除此之外,耕地、水域、建设用地等错落分布的中生态风险区主要集中在金山、奉贤、浦东及崇明部分地区。与 2000 年相比,2018 年上海市低生态风险区及中生态风险区面积分别减少了 801.67 km<sup>2</sup> 及 152.96 km<sup>2</sup>,而较低生态风险区面积增加了 975.19 km<sup>2</sup>。与此同时,生态风险等级较高区域的面积也增长了近一倍。上海市西南部及南部地区原本单一成片的耕地转化为脆弱度较低的建设用地、林地、草地等,区域生态风险指数降低的同时提高了景观异质性,大大提升了抗干扰能力。且耕地景观的破碎度及分离度略有增加的同时优势度却降低明显,综合表现为景观风险指数降低。

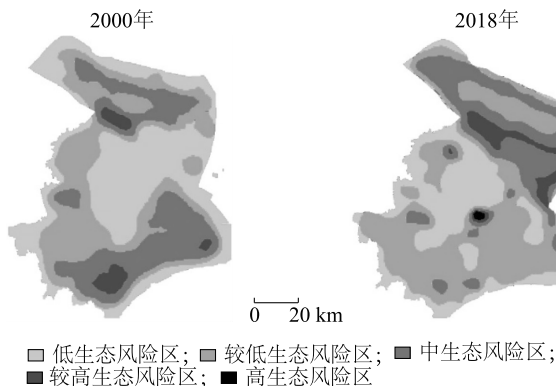


图 3 土地利用生态风险变化

Fig.3 Changes in land use ecological risk

表 3 上海市各生态风险等级土地利用的面积及比例

Table 3 Land use area and proportion at different ecological risk levels in Shanghai

	2000 年		2018 年	
	面积 (km <sup>2</sup> )	比例 (%)	面积 (km <sup>2</sup> )	比例 (%)
低生态风险区	3 120.06	38.97	2 318.39	28.15
较低生态风险区	2 657.20	33.18	3 632.39	44.10
中生态风险区	1 970.42	24.61	1 817.46	22.06
较高生态风险区	259.60	3.24	431.00	5.23
高生态风险区	0	0	37.65	0.46

上海市中部低生态风险区逐渐西移,浦东新区西端近黄浦江沿岸地带出现高风险区域。可能是由于浦东新区开发建设速度较快,不同于斑块聚集度高稳定性强的中心城区,原本的耕地逐渐被建设用地侵占,导致这 2 种土地类型的分布都较分散且破碎,生态风险加剧。

以崇明为主的北部地区及长江入海口处生态风险加剧,表现为风险等级提高,中生态风险区及较高生态风险区不断向周边地带延伸。崇明岛旅游业及海洋渔业迅速发展,近年来由于建设生态岛,岛内林地覆盖率大大增加,随着道路、农场、公园等基础及休闲娱乐设施的建设,生态风险有所波动。崇明、浦东沿海地带及长兴岛生态风险增长明显。由于长江水在流入河口地区时流速变缓造成的泥沙沉积及人类大规模的围垦活动,导致水域面积明显减少。崇明、上海宝山、浦东等地区都临近长江入海口,江水裹挟的泥沙不断冲积,使原本的水体逐渐转变为滩涂湿地,并在人类活动的干预下最终转变为耕地等其他景观类型。并且近年来港口码头建设、围海造田及海岸开发等活动都使海岸线不断向水域景观内推移。同时随着生活水平的提高,临海地带水产养殖业发展迅速,不断有邻岸海域及内陆耕地被改建为水塘。其中大部分的养殖水塘为渔民围垦,分布零散且不具规模,缺乏合理的整体规划布局,导致水域、耕地等土地被大范围且无规划的侵占,加剧了生态风险。

3.2.3 生态风险等级转移分析 不同等级的生态风险区面积在各时期均发生变化,为研究各等级生态风险区的时空转移变化,将各时期的生态风险分布图进行空间相交分析,整理得到研究区内生态风险转移数据。

表4 2000–2018年各生态风险等级土地利用转移面积及比例

Table 4 Transition area and proportion of land use at different ecological risk levels during 2000–2018

生态风险区	低生态风险区		较低生态风险区		中生态风险区		较高生态风险区		高生态风险区	
	转移面积 (km <sup>2</sup> )	比例 (%)	转移面积 (km <sup>2</sup> )	比例 (%)	转移面积 (km <sup>2</sup> )	比例 (%)	转移面积 (km <sup>2</sup> )	比例 (%)	转移面积 (km <sup>2</sup> )	比例 (%)
低生态风险区			843.33	27.10	737.17	23.69	114.48	3.68	29.97	0.69
较低生态风险区	638.51	23.97			744.23	27.94	113.40	4.26	6.46	0.24
中生态风险区	171.25	8.69	1 425.80	72.36			116.52	5.91	0	0
较高生态风险区	0	0	136.62	52.63	46.62	17.96			0	0
高生态风险区	0	0	0	0	0	0	0	0		

上海市 2000–2018 年生态风险等级转移面积如表 4 所示。这段时期内,发生转换的类型共 13 种,除高生态风险区外,低、较低、中、较高生态风险等级均发生了明显的转移,转移率分别为 55.43%、56.42%、86.96%及 100.00%。其中由低风险向高风险转移面积为 2 705.56 km<sup>2</sup>,主要发生在浦东、崇明及长江入海口等地区。由高风险向低风险转移的面积为 2 418.80 km<sup>2</sup>,主要发生在以耕地为主的青浦、金山、奉贤、浦东等部分区域,转移量对比结果说明研究时段内总体生态风险加剧。转移量较大的为中风险向较低风险、低风险向较低风险及中风险区的转移,转移面积分别为 1 425.80 km<sup>2</sup>、843.33 km<sup>2</sup>及 737.17 km<sup>2</sup>。这些较大的生态风险转变与经济发展趋势及土地利用类型变化相吻合。

## 4 结 论

(1)上海市土地利用格局不断演变,主要表现为耕地和水域大面积转变为建设用地及林地。

(2)上海市生态风险分布在时空上发生了巨大的演变。整个研究时段内,主要集中在中部的低生态风险区逐渐向西偏移。南部地区生态环境整体优化,但浦东新区黄浦江沿岸地带出现高生态风险区;而北部地区生态风险加剧,较高等级生态风险区主要聚集在长江入海口处及中西部临海地区。

(3)上海市生态风险发生了明显的转移。除高生态风险区外,其他生态风险区均发生了转移,总体以低等级向高等级转移为主。各生态风险等级转移的不对等是生态风险波动的成因。

(4)2000 年以来,上海市不同区域生态风险转化差异明显。得益于生态环境保护政策,部分地区生态风险值降低;而土地开发不合理的地区生态逐

步恶化。未来上海市应该在合理进行土地开发利用的同时,通过提高绿地覆盖率,建设生态廊道,发展生态海域,严守生态敏感区及生态保护红线等措施强化生态调控,构建合理的景观生态格局。

## 参考文献:

- [1] 许凤娇,吕 晓. 基于土地利用变化的江苏沿海地区生态风险格局[J]. 生态学报, 2018, 38(20):7312-7325.
- [2] 吕乐婷,张 杰,孙才志,等. 基于土地利用变化的细河流域景观生态风险评估[J]. 生态学报, 2018, 38(16):5952-5960.
- [3] 李加林,徐凉慧,杨 磊,等. 浙江省海岸带景观生态风险格局演变研究[J]. 水土保持学报, 2016, 30(1):293-299.
- [4] PENG J, DANG W, LIU Y, et al. Review on landscape ecological risk assessment[J]. Acta Geographical Sinica, 2015, 29(2):664-677.
- [5] CHANG Q Z, BIN D, LI P L, et al. Study on ecological risk assessment for land-use of wetland based on different scale[J]. Journal of the Indian Society of Remote Sensing, 2015, 44(5):1-8.
- [6] 黄木易,何 翔. 近 20 年来巢湖流域景观生态风险评估与时空演化机制[J]. 湖泊科学, 2016, 28(4):785-793.
- [7] 刘永超,李加林,史小丽,等. 1985~2015 年美国 Tampa Bay 流域景观生态风险态势研判[J]. 水土保持通报, 2016, 36(3):125-130.
- [8] ANGELA M O, WAYNE G L. A regional multiple stressor risk assessment of the codorus creek watershed applying the relative risk model[J]. Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal, 2002, 8(2):134-141.
- [9] YANES A, BOTERO C M, ARRIZABALAGA M, et al. Methodological proposal for ecological risk assessment of the coastal zone of Antioquia, Colombia[J]. Ecological Engineering, 2019, 130:242-251.
- [10] CHEN C W, LIM Y C, CHEN C F, et al. Spatial distribution and ecological risk assessment of sediment metals in a highly industrialized coastal zone southwestern Taiwan[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2019, 26(15):14717-14731.
- [11] 唐利华,张永福,刘小辉. 干旱区河谷城市土地利用生态风险

- 动态预测——以新疆伊宁市为例[J]. 水土保持研究, 2016, 116(3):246-251.
- [12] 吴楠,张永福,李瑞. 基于景观指数的干旱区河谷县域土地利用生态风险分析及预测[J]. 水土保持研究, 2018, 25(2):207-212.
- [13] JIN X, JIN Y, MAO X. Ecological risk assessment of cities on the Tibetan Plateau based on land use/land cover changes-Case study of Delingha City[J]. Ecological Indicators, 2019, 101:185-191.
- [14] 谢花林. 基于景观结构的土地利用生态风险空间特征分析——以江西兴国县为例[J]. 中国环境科学, 2011, 31(4):688-695.
- [15] 余挚海. 基于 RS 与 GIS 的上海市生态环境演变研究[D]. 上海:东华大学, 2013.
- [16] 朱会义,李秀彬. 关于区域土地利用变化指数模型方法的讨论[J]. 地理学报, 2003, 58(5):643-650.
- [17] 赵卫权,杨振华,苏维词,等. 基于景观格局演变的流域生态风险评价与管控——以贵州赤水河流域为例[J]. 长江流域资源与环境, 2017, 26(8):111-120.
- [18] 李潇然,李阳兵,韩芳芳. 基于土地利用的三峡库区生态屏障带生态风险评价[J]. 水土保持通报, 2015, 35(4):188-194.
- [19] 周汝佳,张永战,何华春. 基于土地利用变化的盐城海岸带生态风险评价[J]. 地理研究, 2016, 35(6):1017-1028.
- [20] 任志远,孙艺杰,吴林筱. 1990-2012 年榆林市土地生态风险综合评价[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(5):36-44.
- [21] DALE V H, KLINE K L. Issues in using landscape indicators to assess land changes[J]. Ecological Indicators, 2013, 28(5):91-99.
- [22] 于芳,李海明. 基于地统计学和 GIS 的湖北省土壤有机质空间变异性研究[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(15):282-286.
- [23] 申若禹,张吴平,王国芳,等. 基于地统计学的山西省不同类型土壤有机质空间变异分析研究[J]. 山东农业科学, 2019, 51(4):110-116.
- [24] 齐伟恒,彭琳,郇鲁涛,等. 基于 ArcGIS 地统计分析模块的土壤养分与 pH 值空间变异分析——以云南省寻甸县为例[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(23):287-291.
- [25] 邬建国. 景观生态学:格局、过程、尺度与等级[M]. 2 版. 北京:高等教育出版社, 2007.

(责任编辑:陈海霞)