

DOI: 10.5846/stxb201909211974

陈心怡, 谢跟踪, 张金萍. 海口市海岸带近 30 年土地利用变化的景观生态风险评价. 生态学报, 2021, 41(3): 975-986.

Chen X Y, Xie G Z, Zhang J P. Landscape ecological risk assessment of land use changes in the coastal area of Haikou City in the past 30 years. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(3): 975-986.

# 海口市海岸带近 30 年土地利用变化的景观生态风险评价

陈心怡, 谢跟踪\*, 张金萍

海南师范大学地理与环境科学学院, 海口 571158

**摘要:**采用海口市海岸带 1988、2000、2009、2017 年 4 期土地利用矢量数据, 运用格网 GIS 法、Kriging 内插法构建景观生态风险指数模型, 对海口市海岸带进行景观生态风险综合评价。结果表明: (1) 各景观面积波动较大, 景观类型以建设用地和耕地为主; (2) 2000—2017 年间人类活动对景观的干扰最为强烈, 各景观的分离度、干扰度、脆弱度最大值均在此时域内出现; (3) 研究时域内研究区的平均生态风险值由 0.3424 增加到 0.4468; 生态风险等级总体呈低等级向高等级转移的趋势, 空间分布呈中部向东西、内陆向沿海递减的趋势, 高等级的风险区逐渐朝沿海地区蔓延; 较高和高生态风险区主要分布在海口建成区、南渡江沿岸、美兰机场、红树林保护区以及三江镇国营农场附近; (4) 城市建设和临港产业的发展导致绿地、水域面积减少且分布趋于破碎、分离, 是研究区生态风险值总趋势呈增高的主要原因。研究结果可为海口市海岸带景观格局的优化、土地资源的保护和可持续发展方面提供科学依据。

**关键词:**景观格局; 土地利用变化; 生态风险评价; 格网化; 海岸带

## Landscape ecological risk assessment of land use changes in the coastal area of Haikou City in the past 30 years

CHEN Xinyi, XIE Genzong\*, ZHANG Jinping

School of Geography and Environmental Sciences, Hainan Normal University, Haikou 571158, China

**Abstract:** Coastal zone, a key area for human settlement and development of economic, has been affected to a certain extent with human activities and rapid urbanization, resulting in landscape pattern changes and environment deterioration. This research field has become the study hotspot of many scholars. Based on ArcGIS and Fragstats, four phases of land use vector data of Haikou coastal zone in 1988, 2000, 2009 and 2017 have been processed. Furthermore, with the help of grid GIS method and Kriging interpolation method, the landscape ecological risk index model has been set up. Thus, we comprehensively evaluated the landscape ecological risk of the coastal zone of Haikou City. The results showed that: (1) the landscape area varied greatly and the main landscape type was construction and the cultivated land. (2) Human activities had the strongest interference to the landscape between 2000 and 2017, and the maximum value of separation, interference and vulnerability appears in this time. (3) The average ecological risk in the study area increased from 0.3424 to 0.4468. The transformation of ecological risk level was generally from low to high. In addition, the spatial distribution presented a decreasing trend from the middle to the east-west and inland to the coast, as well as the high-level risk areas gradually spread to the coast. The area with high and extremely high ecological risk were mainly distributed in the Haikou Built-up Area, the Nandu River bank, Meilan Airport, Mangrove Reserve, and the State Farm in Sanjiang Town. (4) The

基金项目: 国家自然科学基金项目(41761118); 海南省自然科学基金项目(418MS050)

收稿日期: 2019-09-21; 网络出版日期: 2020-12-14

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: 152262552@163.com

main reason for the increased ecological risk values is the area of green space and water is reduced and the distribution tends to fragment and separate, as the development of city and port industry. The results of this study can provide scientific basis for optimization of the landscape pattern, protection of land resources and sustainable development in the coastal zone of Haikou City.

**Key Words:** landscape pattern; land use change; ecological risk assessment; gridding; coastal zone

海岸带是指海陆之间相互作用的地带,是自然、人文活动频繁区域,同时也是典型的生态脆弱带和环境变化敏感区,具有复杂多变性且对全球生态环境变化有重大影响<sup>[1]</sup>。当前海岸带的生态环境已引起国内外广泛关注<sup>[2-3]</sup>,但关于海岸带生态风险方面的研究还有待深入。生态风险评价是指研究区在受一个或多个胁迫因素影响后,对一些不利生态后果出现的可能性进行评估<sup>[4]</sup>。所以在海岸带区域,特别是土地高度开发利用的海岸带区域,为了海岸带的生态环境保护和可持续发展,有必要对其生态环境受到外界干扰时出现风险的可能性进行评价。

国内外对于土地利用带来的生态风险研究一般基于两种评价模式:一种是基于传统的“源分析-受体评价-暴露及危害评价-风险表征”模式,如 Yanes、王辉、Walker 等基于改进的相对生态风险模型,从风险源强度、受体暴露度以及风险效应三方面构建生态风险评价指标体系<sup>[5-8]</sup>;另一种模式则直接从景观格局来评价景观生态风险,如郑杰、余敦、汪翡翠、Ayre 等从景观生态学角度采用景观生态指数来反映 LUC 变化所带来的生态效应<sup>[9-14]</sup>。对比以上两种模式,发现基于景观角度的模式更适合评价人类活动造成的生态风险,因为人类活动会对景观格局产生巨大的影响,而影响带来的后果将直接导致生态环境的改变,且该方面的研究已趋于成熟,已有许多学者对各景观指数做过研究、分析与试验<sup>[15-19]</sup>,因此基于景观格局进行生态风险评价相对科学可行。但目前基于景观格局的生态风险评价在空间维度上主要以流域<sup>[20-21]</sup>、城市<sup>[22-23]</sup>等为主,对海岸带的景观生态风险评价相对较少且一般以区县为评价单元<sup>[24-26]</sup>,由于评价单元范围广且景观空间分布差异大,忽略了空间异质性(即生态、社会等空间格局在空间上分布的不均匀性和复杂性)<sup>[27-29]</sup>,评价结果误差也较大;而本文将基于海岸带的景观格局,考虑空间异质性对结果的影响,抛开传统以行政单元为评价单元的方法,选取网格作为评价单元,相对来说更为精确,且能更好的体现生态风险的空间分布情况。

刘焯等曾以市县为单位,对海南岛海岸带土地利用的生态风险做了考察和分析,其中海口市的生态安全指数在海南省 12 个市县中排名倒数第 3 位,作为海南省开发较早的重要城市建设、滨海旅游、农业、渔业区,海口市海岸带土地利用类型在 30 年间发生了巨大的改变,其生态安全的稳定性已经遭到了破坏<sup>[26]</sup>。因此,对海口市海岸带土地利用问题进行研究对其后续的建设方向具有重大指导意义。目前海口市海岸带对于土地利用研究多是关于土地利用现状及问题<sup>[30]</sup>、格局变化<sup>[31]</sup>、生态系统服务研究<sup>[32]</sup>、生态安全格局的构建<sup>[33]</sup>等方面,未对海岸带整体土地利用的生态风险进行研究。因此本文采用基于景观生态学角度的评价模式,以网格为评价单元,分析其土地利用生态风险等级的时空变化,定量地得出景观生态风险评价,为海口市海岸带景观格局的优化、土地资源的保护和可持续发展方面提供科学依据。

## 1 研究区概况与数据

### 1.1 研究区概况

海口市海岸带(图 1)东近澄迈湾,西至铺前镇,南邻大致坡镇,北临琼州海峡,跨东经 110°07'—110°42',北纬 19°57'—20°04',海岸线长 131 km(包括岛屿、港湾),南渡江从其中部穿过。海岸带地形平坦,主要属沙坝—泻湖、泥质海岸;为热带海洋气候,多年平均降水 1669 mm,年平均气温 24.1℃<sup>[34]</sup>。海口市中心城区位于研究区范围内,人口压力大,至 2017 年海口市常住人口达 227.21 万人,其 75% 以上都位于此区域<sup>[35]</sup>;此外海口市海岸带交通网络密集,拥有海口美兰机场、动车站、汽车站等交通建筑,该区也是通往海南省各市县环岛

高速的枢纽。随着沿海地区快速发展,建设用地需求增加,研究区生态环境压力剧增。

## 1.2 数据来源与处理

使用的数据为 1988、2000、2009、2017 年 4 期海口市海岸带土地利用矢量数据,为保证计算的一致性和精确性,采用 ArcGIS 软件对源数据进行转换,转换后采用投影坐标系 Xian\_1980\_3\_Degree\_GK\_CM\_111E。基于《土地资源现状分类》(GB/T 21010—2017),并参考海口市海岸带土地利用的实际分类和研究主题需要,现将研究区景观划分为耕地、绿地、水域、建设用地、其他用地五类(表 1),利用 ArcGIS 软件的融合工具对转换后的数据进行操作并重分类,得到 1988—2017 年土地利用类型图(图 2)。此外还参考了《海口市统计年鉴》(2012—2017)等相关数据,用于分析海口市人口、交通、经济活动的主要范围。

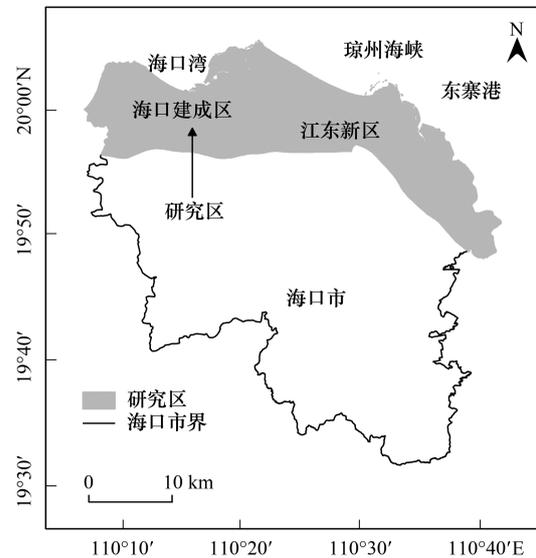


图 1 研究区位置图

Fig.1 Location map of study area

表 1 海口市海岸带土地利用重分类表

Table 1 Reclassification of land use in the coastal zone of Haikou City

景观类型 Landscape type	海口市海岸带土地利用现状 Land use in the coastal zone of Haikou City
耕地 Cultivated land	水田、旱地、水浇地等
绿地 Green land	林地、园地、草地、湿地等
水域 Water land	坑塘水面、河流水面、水库水面、沿海滩涂、内陆滩涂等
建设用地 Construction land	交通用地、工矿用地、居民区、风景名胜、港口码头等
其他用地 Other land	未利用地(如裸地、盐碱地)等

## 2 研究方法

### 2.1 格网 GIS 法

#### 2.1.1 生态风险评价单元的确定

采用格网 GIS 法,以格网为研究单元,运用 ArcGIS 数据管理模块下的 create fishnet 功能,将研究区划分为若干格网并转为栅格数据进行后续研究。参考国家格网 GIS 的相关标准《地理格网》(GB12409—2009)和前人研究,格网宜采用平均斑块面积的 2—5 倍<sup>[3]</sup>,因此在考虑研究区实际情况和工作量的基础上,研究中选取 5 km×5 km 的正方形格网对研究区进行划分(图 3),并对各格网进行编码。取每个格网的中心点为采样点,共 40 个采样点,其中有效采样点(落在第  $k$  个格网内的研究区的面积达格网面积的 50% 以上的点)28 个<sup>[3]</sup>。以此格网划分为基础对研究区  $k$  个小区分别计算景观生态风险指数,以此数值为样区中心点的生态风险值。

#### 2.1.2 空间差值方法的选取

本文利用 ArcGIS 空间分析模块下的普通 Kriging 内插法,经过各种拟合情况的比对,选择半变异函数(是地统计学特有的用来描述区域变化量的空间变异性的函数)对小区样点的风险值进行球状拟合,依此得到整个研究区的生态风险分布图<sup>[36]</sup>。

### 2.2 景观生态风险指数模型的构建

景观指数法是地学常用的定量研究法,它通过多个指数的组合分析来描述景观格局及变化<sup>[16]</sup>。选用景

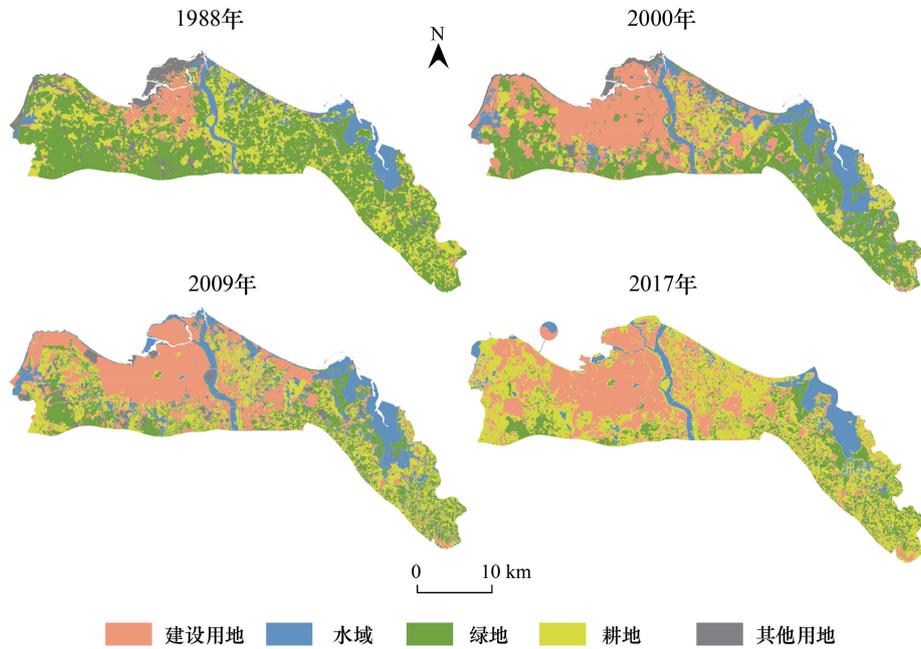


图2 1988—2017年土地利用类型图  
 Fig.2 Map of land use type from 1988 to 2017

景观干扰度和脆弱度建立土地利用类型与区域生态风险间的联系,主要涉及了6个景观指数:景观干扰度指数、景观破碎度指数、景观分离度指数、景观优势度指数、景观脆弱度指数、景观损失度指数,利用Fragstats软件计算以上指数构建景观生态风险指数模型。

2.2.1 景观干扰度指数( $U$ )

景观干扰度指数由景观破碎度指数、景观分离度指数、景观优势度指数加权所得(式1),反映空间结构的复杂性。干扰度越小越利于生物的生存,因此该指数对生物的生态意义较大。

$$U_i = aC_i + bS_i + cD_i \quad (1)$$

式中, $U_i$ 表示景观干扰指数; $C_i$ 表示景观破碎度指数,在一定程度上反映了人类对景观的干扰程度; $S_i$ 表示景观分离度指数,指某一景观类型中不同斑块数个体分布的分离度; $D_i$ 表示景观优势度指数,优势度越小则景观多样性越大;上述指数均可通过Fragstats软件计算得出。 $a, b, c$ 表示各指数的权重,且 $a+b+c=1$ ;目前关于海岸带景观生态风险指数的研究中,多采用专家打分法定义权重,专家认为景观破碎化是海岸带生物多样性丧失的重要原因之一,它与自然资源保护密切相关,参考已有的海岸带景观生态风险研究并分析权衡,认为三者中破碎度最为重要,其次为分离度和优势度;现将各指标权重定义如下: $a=0.5, b=0.4, c=0.1$ <sup>[36-39]</sup>。

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

$$D_i = 1 - SHEI \quad (3)$$

式中, $N_i$ 为景观类型*i*的斑块数目; $A_i$ 为景观类型*i*的总面积。SHEI( $<1$ )表示香农均度指数,与优势度呈反比,其趋近1时说明景观中没有明显的优势类型且各斑块在景观中均匀分布<sup>[36]</sup>,可由Fragstats软件计算得到。

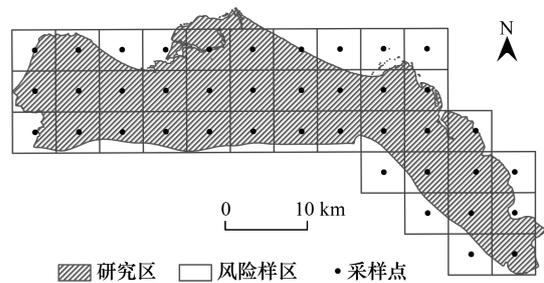


图3 研究区网格划分图  
 Fig.3 Study area grid division

### 2.2.2 景观脆弱度指数( $F$ )

景观脆弱度表示不同的景观面对外界干扰的敏感性和易碎性,脆弱度越高则表示该景观类型对于干扰的抵抗能力越弱。参考相关研究结果<sup>[40-42]</sup>,并结合研究区实际情况,将五种土地利用景观类型的景观脆弱度依次由低至高排列得到景观脆弱度赋值表,并对其进行归一化处理(表 2);另考虑 2017 年景观无其他用地,故对 2017 年各景观类型的景观脆弱度单独归一化处理(表 3)。

表 2 景观脆弱度赋值表

Table 2 Evaluation of the vulnerability of the landscape

景观类型 Landscape type	赋值 Value	归一化处理结果 Results of normalization
建设用地 Construction land	1	0.0667
绿地 Green land	2	0.1333
耕地 Cultivated land	3	0.2000
水域 Water land	4	0.2667
其他用地 Other land	5	0.3333

表 3 2017 年景观脆弱度赋值表

Table 3 Evaluation of the vulnerability of the landscape, 2017

景观类型 Landscape type	赋值 Value	归一化处理结果 Results of normalization
建设用地 Construction land	1	0.1000
绿地 Green land	2	0.2000
耕地 Cultivated land	3	0.3000
水域 Water land	4	0.4000
其他用地 Other land	0	0.0000

### 2.2.3 区域景观生态风险指数模型(ERI)

最终构建模型,得到各小区的景观生态风险指数(式 4—5):

$$ERI_k = \sum_{i=1}^n \frac{A_{ki}}{A_k} R_i \quad (4)$$

$$R_i = U_i \times F_i \quad (5)$$

式中, $ERI_k$ 表示第  $k$  个小区的区域景观生态风险指数; $n$ 表示景观类型的总个数; $A_{ki}$ 表示第  $k$  个小区中景观类型  $i$  的面积; $A_k$ 表示第  $k$  个小区的总面积; $R_i$ 表示景观损失度指数,反映景观类型  $i$  受到人为或自然干扰时其自然属性的损失程度<sup>[16]</sup>; $F_i$ 表示景观脆弱度指数。

## 3 结果与讨论

### 3.1 土地利用格局变化

由 1988—2017 年海口市海岸带土地利用矢量数据得研究时域内的土地利用格局表(表 4);采用单一土地利用动态度(式 6)对海口市海岸带土地利用的变化进行分析,得到 1988—2017 年海口市海岸带土地利用年变化表(表 5)。

$$K = \frac{U_b - U_a}{U_a} \times \frac{1}{T} \times 100\% \quad (6)$$

式中, $K$ 表示研究时段内的土地利用动态度; $U_a$ 、 $U_b$ 分别表示研究期初、末的景观类型面积; $T$ 表示研究时段。

表 4 1988—2017 年土地利用格局表

Table 4 Pattern of land use types from 1988 to 2017

年份 Year	水域 Water land		绿地 Green land		耕地 Cultivated land		建设用地 Construction land		其他用地 Other land	
	面积 Area/km <sup>2</sup>	%	面积 Area/km <sup>2</sup>	%						
1988	55.66	8.03	352.62	50.90	175.47	25.33	49.93	7.21	59.04	8.52
2000	98.52	14.22	232.93	33.63	102.89	14.85	220.62	31.85	37.76	5.45
2009	106.40	15.37	154.58	22.32	172.73	24.94	223.91	32.33	34.86	5.03
2017	69.08	9.90	106.72	15.30	292.81	41.98	228.85	32.81	0.00	0.00

根据土地利用格局表、年变化表(表 4、5)和土地利用类型图(图 2)可知,海口市海岸带土地利用类型以

建设用地和耕地为主。建设用地于 1988—2000 年大幅增长,年变化率达 28.49%,到 2017 年建设用地占比已由 1988 年的 7.21%增加到 32.81%,其原因在于快速推进的城市化进程,如桂林洋开发区、琼山大道等大型建设项目<sup>[35]</sup>。耕地面积在 1988—2009 年间经波动后基本不变,但在 2009—2017 年间年变化率高达 8.69%,这与海南省和海口市政府的一系列政策有关,如 2013 年琼山区组织落实耕地保护责任书,2016 年对土地利用进行“有保有控”差别化管理,出台《海南经济特区海岸带保护与开发管理实施细则》、《关于继续落实“两个暂停”政策进一步促进房地产市场健康发展的通知》、《海南省人民政府关于进一步加强耕地占补平衡工作的意见》等文件,拆迁部分建设用地并整改闲置土地,故该时期耕地骤增。

表 5 1988—2017 年土地利用年变化表/%

Table 4 Table of annual land use change from 1988 to 2017

年份 Year	水域 Water body	绿地 Green land	耕地 Cultivated land	建设用地 Construction land	其他用地 Other land
1988—2000	6.42	-2.83	-3.45	28.49	-3.00
2000—2009	0.89	-3.74	7.54	0.17	-0.85
2009—2017	-4.38	-3.87	8.69	0.28	-12.50

### 3.2 景观格局时序变化

分别基于 Fragstats 软件的 class 和 landscape 水平计算得到 1988—2017 年各景观类型的相关景观指数表(表 6)。

表 6 1988—2017 年各景观类型景观指数统计表

Table 6 Landscape index statistics by landscape type from 1988 to 2017

景观类型 Landscape type	年份 Year	CA/ha	PLAND/%	NP	SHEI	$C_i$	$S_i$	$D_i$	$U_i$	$F_i$
耕地 Cultivated land	1988	17128.15	24.77	518	0.7956	0.0302	8.9464	0.2044	3.6141	0.2000
	2000	10324.21	14.91	419	0.9014	0.0406	15.6147	0.0986	6.2760	0.2000
	2009	17217.72	24.87	447	0.9212	0.0260	19.5542	0.0788	7.8425	0.2000
	2017	29258.97	41.95	382	0.8996	0.0131	13.0555	0.1004	5.2388	0.3000
建设用地 Construction land	1988	4975.36	7.19	155	0.7956	0.0312	8.9464	0.2044	3.6146	0.0667
	2000	21988.59	31.75	512	0.9014	0.0233	15.6147	0.0986	6.2674	0.0667
	2009	22627.41	32.69	606	0.9212	0.0268	19.5542	0.0788	7.8430	0.0667
	2017	22821.76	32.72	608	0.8996	0.0266	13.0555	0.1004	5.2456	0.1000
绿地 Green land	1988	35934.47	51.96	164	0.7956	0.0046	8.9464	0.2044	3.6013	0.1333
	2000	23298.34	33.64	339	0.9014	0.0146	15.6147	0.0986	6.2630	0.1333
	2009	15318.16	22.13	724	0.9212	0.0473	19.5542	0.0788	7.8532	0.1333
	2017	10799.10	15.48	636	0.8996	0.0589	13.0555	0.1004	5.2617	0.2000
水域 Water body	1988	5588.83	8.08	80	0.7956	0.0143	8.9464	0.2044	3.6062	0.2667
	2000	9864.53	14.24	401	0.9014	0.0407	15.6147	0.0986	6.2761	0.2667
	2009	10592.92	15.30	521	0.9212	0.0492	19.5542	0.0788	7.8542	0.2667
	2017	6873.23	9.85	253	0.8996	0.0368	13.0555	0.1004	5.2506	0.4000
其他用地 Other land	1988	5533.06	8.00	364	0.7956	0.0658	8.9464	0.2044	3.6319	0.3333
	2000	3775.46	5.45	406	0.9014	0.1075	15.6147	0.0986	6.3095	0.3333
	2009	3467.88	5.01	482	0.9212	0.1390	19.5542	0.0788	7.8991	0.3333
	2017	0.00	0.00	0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

CA: 斑块面积, Total Class Area; PLAND: 斑块出现概率, Percentage of Landscape; NP: 斑块数, Number of Patches; SHEI: 香农均匀度, Shannon's Diversity Index;  $C_i$ : 景观破碎度指数 Fragmentation Index;  $S_i$ : 景观分离度指数 Splitting Index;  $D_i$ : 景观优势度指数 Dominance Index;  $U_i$ : 景观干扰度指数 Obstruction Index;  $F_i$ : 景观脆弱度指数 Vulnerable Index

从景观水平上来看,研究时域内研究区的斑块数增加了 598 个,斑块的破碎度小幅度上升,耕地、建设用地斑块数降低,绿地、水域斑块数增加;景观分离度和干扰度总体处于增加趋势,表明抗外界干扰能力降低,主要是受到城市化进程中新工业区、新城区建设的影响;景观优势度由 1988 年的 0.2044 降为 2017 年的 0.0131,降低了 93.59%,表明景观的丰富度和复杂度剧增。从类型水平上来看,耕地、建设用地的平均斑块面积增加,其中耕地增长最快,增长率达 131.60%,这与该时期的政策有关;绿地、水域、其他用地的平均斑块面积减小,其中绿地减小速率最快,高达 92.25%;其他用地破碎度、分离度逐年增大,在城市化过程中逐渐消失。这是由于人口增长,城市住房压力增大,老城区不断侵占城市外围的耕地、绿地等进行城市扩张和交通、工矿建设,形成较完整、大范围的新城区,因此耕地逐渐向城市外围移动,开垦林地、草地等,使绿地面积进一步缩减。其中 2000—2017 年间人类活动对研究区内景观的干扰最为强烈,各景观的分离度、干扰度、脆弱度最大值均在此时域内出现。综合来看,1988—2017 年间城区扩张、经济发展等一系列人类活动对研究区的景观产生了较大影响和改变,并给其生态环境带来了较高的风险。

### 3.3 土地利用生态景观风险时序变化

基于景观生态风险指数模型(式(4)),对各年份各样区的生态风险值进行计算,并赋值给每个样区的中心点,将中心点数据进行插值处理;根据研究区各样区 ERI 值所处的范围,采用 ArcGIS 聚类分类法<sup>[43-44]</sup>,现将其分为五类:低生态风险区( $ERI \leq 0.25$ )、较低生态风险区( $0.25 < ERI \leq 0.35$ )、中生态风险区( $0.35 < ERI \leq 0.45$ )、较高生态风险区( $0.45 < ERI \leq 0.55$ )、高生态风险区( $ERI > 0.55$ ),生态风险等级高意味着人类活动对该区域的干扰强、景观破碎程度大;最后得到 1988—2017 年海口市海岸带土地利用生态风险等级分布图表(图 4、5,表 7)。

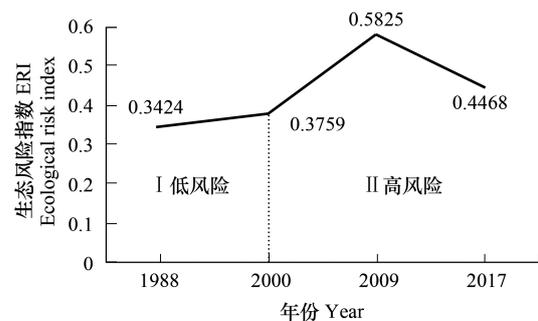


图 4 1988—2017 年平均生态风险指数图

Fig.4 Coastal zone average ecological risk index, 1988—2017

表 7 1988—2017 年土地利用生态风险等级面积及占比

Table 7 Land use ecological risk grade area and its proportion from 1988 to 2017

等级 Grade	1988		2000		2009		2017	
	面积 Area/km <sup>2</sup>	%						
低生态风险区 Low risk area	404.13	58.33	382.70	55.24	0.00	0.00	30.79	4.42
较低生态风险区 Inferior risk area	105.43	15.22	72.48	10.46	7.35	1.06	338.21	48.50
中生态风险区 Mediate risk area	183.18	26.44	93.54	13.50	301.27	43.50	216.71	31.08
较高生态风险区 Relatively risk area	0.05	0.01	136.44	19.69	303.53	43.83	111.61	16.01
高生态风险区 High risk area	0.00	0.00	7.63	1.10	80.38	11.61	0.00	0.00

#### 3.3.1 总体变化分析

计算样区生态风险指数平均值,得到研究区平均生态风险指数折线图(图 4),研究区的平均生态风险值从 1988 年的 0.3424 持续增加,于 2009 年达到峰值 0.5825,至 2017 年降低为 0.4468。可将 1988—2017 年景观生态风险变化过程划分为两个阶段:第 I 阶段(1988—2000 年)为低风险阶段,这一时期研究区平均生态风险值均较低且增长缓慢;第 II 阶段(2000—2017 年)为高风险阶段,该时期的平均生态风险值围绕数值 0.5 上下波动且总体增长迅速。

通过表 7 的统计结果可知,各级生态风险值表现出以下特征:第 I 阶段以低、较低生态风险区为主;第 I 阶段末(2000 年)海口市海岸带生态风险等级以低生态风险区为主,出现较高、高生态风险区但占比较低;通过与研究区景观格局表(表 4)对比可发现,1988—2000 年绿地、水域之和占比均超过 50%,1995 年起海口市开始建造“万绿园”等绿地设施,故该时期研究区整体生态环境质量良好。第 II 阶段以中、较高、高生态风险区为主,在 2000—2009 年间,低生态风险区逐渐减少趋于消失,中、高等级生态风险区几乎占比 100%,绿地面积在该时期骤减,建设用地面积基本保持在 200 km<sup>2</sup>以上,生态环境开始恶化;至第 II 阶段末(2017 年)研究区生态风险等级主要为较低、中、较高生态风险区,高生态风险区消失;原因在于这一时期海口市陆续推出《关于加强东寨港红树林湿地保护管理的决定》、《海口市公园条例》、《海口城市绿线管理办法》、《新海港临港生态新城综合规划》等政策<sup>[45]</sup>,在 2009—2017 年间生态环境恶化问题得到了关注,虽然总体生态风险等级仍偏高,但高等级的生态风险区占比有下降趋势。

### 3.3.2 景观生态风险等级变化方向分析

通过 ArcGIS 叠加分析功能,得到 1988—2017 年间生态风险等级转移矩阵(表 8—表 11)。

表 8 1988—2000 年土地利用生态风险等级面积转移矩阵

Table 8 Land use ecological risk grade area transfer matrix, 1988—2000

	2000									
	低生态风险区 Low risk area		较低生态风险区 Inferior risk area		中生态风险区 Mediate risk area		较高生态风险区 Relatively risk area		高生态风险区 High risk area	
	面积 Area/km <sup>2</sup>	%	面积 Area/km <sup>2</sup>	%	面积 Area/km <sup>2</sup>	%	面积 Area/km <sup>2</sup>	%	面积 Area/km <sup>2</sup>	%
低生态风险区	370.49	91.68	33.63	8.32	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
较低生态风险区	12.21	11.58	38.84	36.84	43.72	41.46	10.65	10.10	0.02	0.02
中生态风险区	0.00	0.00	0.02	0.01	49.81	27.19	125.76	68.65	7.59	4.14
较高生态风险区	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	66.67	0.02	33.33
高生态风险区	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

表 9 2000—2009 年土地利用生态风险等级面积转移矩阵

Table 9 Land use ecological risk grade area transfer matrix, 2000—2009

	2009									
	低生态风险区 Low risk area		较低生态风险区 Inferior risk area		中生态风险区 Mediate risk area		较高生态风险区 Relatively risk area		高生态风险区 High risk area	
	面积 Area/km <sup>2</sup>	%	面积 Area/km <sup>2</sup>	%	面积 Area/km <sup>2</sup>	%	面积 Area/km <sup>2</sup>	%	面积 Area/km <sup>2</sup>	%
低生态风险区	0.00	0.00	2.72	0.71	217.10	56.75	151.20	39.52	11.55	3.02
较低生态风险区	0.00	0.00	4.48	6.19	34.99	48.31	29.82	41.18	3.12	4.32
中生态风险区	0.00	0.00	0.15	0.16	43.70	46.75	46.04	49.26	3.58	3.83
较高生态风险区	0.00	0.00	0.00	0.00	5.47	4.01	76.44	56.02	54.53	39.97
高生态风险区	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.22	0.02	0.22	7.59	99.55

表 10 2009—2017 年土地利用生态风险等级面积转移矩阵

Table 10 Land use ecological risk grade area transfer matrix, 2009—2017

	2017									
	低生态风险区 Low risk area		较低生态风险区 Inferior risk area		中生态风险区 Mediate risk area		较高生态风险区 Relatively risk area		高生态风险区 High risk area	
	面积 Area/km <sup>2</sup>	%	面积 Area/km <sup>2</sup>	%	面积 Area/km <sup>2</sup>	%	面积 Area/km <sup>2</sup>	%	面积 Area/km <sup>2</sup>	%
低生态风险区	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
较低生态风险区	1.86	33.13	3.76	66.87	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
中生态风险区	22.80	7.87	237.33	81.88	12.28	4.24	17.44	6.02	0.00	0.00
较高生态风险区	0.40	0.13	85.16	28.47	135.84	45.42	77.71	25.98	0.00	0.00
高生态风险区	0.00	0.00	0.42	0.53	65.28	81.47	14.43	18.00	0.00	0.00

表 11 1988—2017 年土地利用生态风险等级面积转移矩阵

Table 11 Land use ecological risk grade area transfer matrix, 1988—2017

1988	2017									
	低生态风险区 Low risk area		较低生态风险区 Inferior risk area		中生态风险区 Mediate risk area		较高生态风险区 Relatively risk area		高生态风险区 High risk area	
	面积 Area/km <sup>2</sup>	%	面积 Area/km <sup>2</sup>	%	面积 Area/km <sup>2</sup>	%	面积 Area/km <sup>2</sup>	%	面积 Area/km <sup>2</sup>	%
低生态风险区	7.33	1.87	192.04	48.96	86.12	21.96	106.76	27.22	0.00	0.00
较低生态风险区	6.95	6.89	54.48	53.95	39.40	39.02	0.14	0.14	0.00	0.00
中生态风险区	10.77	5.94	80.17	44.17	87.88	48.42	2.68	1.48	0.00	0.00
较高生态风险区	0.00	0.00	0.02	33.33	0.03	66.67	0.00	0.00	0.00	0.00
高生态风险区	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

结果表明:1988—2000 年,生态风险等级呈上升趋势的面积为 221.39 km<sup>2</sup>,主要为较低风险区向中、高风险区的转移;生态风险等级呈降低趋势的面积为 12.23 km<sup>2</sup>,占总面积 1.77%,主要为较低风险区向低风险区的转移。2000—2009 年,生态风险等级呈上升趋势的面积为 554.65 km<sup>2</sup>,占总面积 80.09%,与前一时期相比约是其 2.51 倍,主要为低、较低风险区向中、较高风险区,以及中风险区向较高风险区的转移;生态风险等级呈降低趋势的面积占总面积 0.82%,主要为较高风险区向中风险区的转移;呈上升趋势生态风险等级的面积约是降低趋势的 98 倍,该时期海口市工业、旅游业、农业上升到一定规模,人口快速增长,城市住房需求增大,占用了大量的林地、园地等绿地进行建设,不合理的用地规划使生态环境迅速恶化。2009—2017 年,生态风险等级呈上升趋势的面积为 17.44 km<sup>2</sup>,占总面积 2.58%,主要为中风险区向较高风险区的转移;生态风险等级呈降低趋势的面积为 563.52 km<sup>2</sup>,占总面积 83.52%,主要为中风险区向较低风险区,以及高和较高风险区向中风险区的转移;该时期呈下降趋势生态风险等级面积约是上升趋势的 32.31 倍。

由表 11 可知,1988—2017 年各等级生态风险区除了其自身转换外,生态风险等级的转换类型有:低至较低、低至中、低至较高、较低至低、较低至中、较低至较高、中至低、中至较低、中至较高、较高至较低、较高至中,共 11 种转换类型。研究时域生态风险等级呈降低趋势的面积为 97.94 km<sup>2</sup>,而呈上升趋势的面积为 427.14 km<sup>2</sup>,约为前者的 4.36 倍,因此生态风险等级总体有低等级向高等级转移的趋势。这都表明 1988—2017 年间海口市海岸带生态风险存在危机,虽然海口市针对海岸带生态环境实施的一系列保护、修护政策使其局部的生态风险有所降低,但由于生态保护和修护是一个较漫长的过程,生态风险等级总体仍呈增高趋势。

### 3.4 土地利用景观生态风险空间分异

将各样区中心点数据进行插值处理并分级,得到研究区生态风险空间分布图(图 5)。由图 5 可知,1988—2000 年,低和较低生态风险区向城区边缘移动,海口建成区和南渡江沿岸大部分中风险区变为较高风险区,1988 年海口市委、市政府编制《海口市城市总体规划》对海口市的城市建设和工业化发展进行了规划,如 1991 年“海南农垦桂林洋经济开发区”成立、1999 年海口美兰国际机场正式通航等<sup>[35]</sup>,但这些区域经济还处于起步到中期的阶段,土地利用较单一,各景观连通性也较好,故该区未出现高风险区;海口建成区东南部边缘开始出现高风险区,其原因在于该时期建成区的扩建以及位于该区域的尚道村沙场的建立,导致斑块破碎度增加,因此生态风险指数提高。2000—2009 年,低风险区消失,较高和高风险区沿着海岸带交通网由内陆向沿海扩张;这一时期海口市逐渐成为海南省经济、文化中心和交通枢纽,新兴产业发展迅速,而沿海和中部交通便利、地势平坦,大部分耕地、绿地都转为了建设用地,用于交通、工矿、房屋建设以及培育临港产业等,土地资源利用程度急剧增加,建成区及交通线附近生态风险上升,导致低生态风险区消失,高生态风险区扩张;除主城区外,高生态风险区还分布在研究区东南部美兰区的三江镇,该区域交通发达,周边有国营三江农场、罗牛山监狱、罗牛山农场等,景观类型复杂且破碎度高,导致景观间连通性差,故潜在生态风险较大。2009—2017 年,较高风险区自西向东移动聚集在海岸带西部且面积缩小,该区景观类型多样,主要为耕地和建设用地;高生态风险区逐渐消失,这与该时期海口市战略有关,2013 年海口市响应海南省“绿色发展”、

“可持续发展”号召,提出“生态立市”的发展战略,调整了产业结构,发展现代农业和低碳海洋产业<sup>[45]</sup>;2017年较2009年生态风险等级有所下降,但分布最广的仍为高等级生态风险区,可见生态政策具有滞后性,需实施较长时间才能看到比较明显的生态效应。

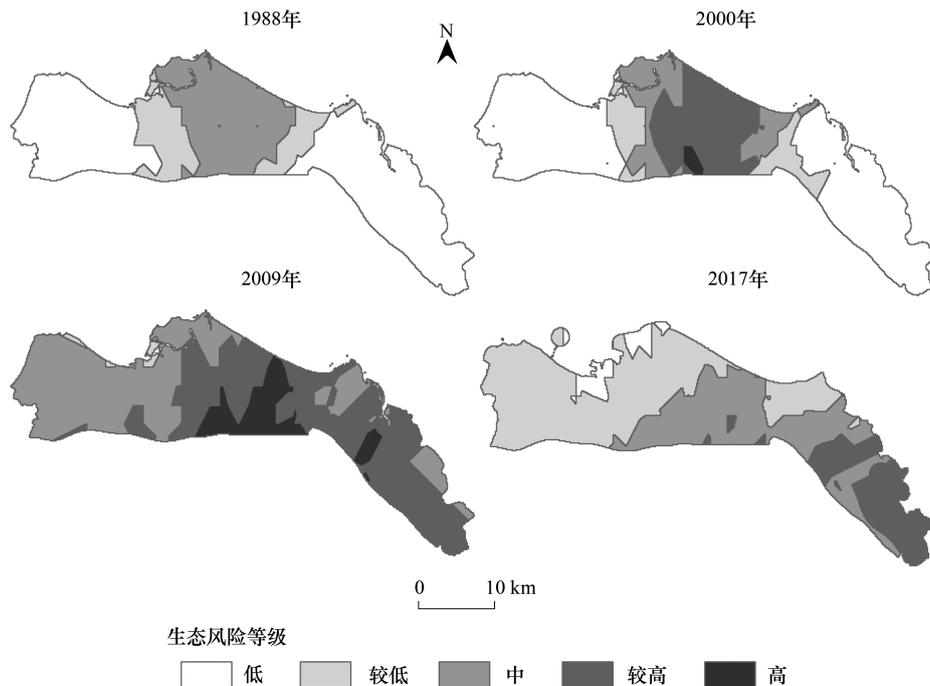


图5 1988—2017年生态风险等级空间分布图

Fig.5 Spatial distribution map of ecological risk, 1988—2017

研究时域内生态风险等级空间差异显著,总体呈由中部向东西、内陆向沿海递减的趋势,高等级的风险区逐渐朝沿海地区蔓延。低和较低生态风险区主要分布在海岸带东西两侧边缘,该区大部分地区景观类型都为绿地、耕地和水域,还包括沿海滩涂、内陆滩涂、红树林等,人为干扰较小。中生态风险区主要分布在海岸带中西部的老城区,随着人类活动的增强,该区不断向沿海推进。较高及高生态风险区主要分布在研究区中部的海口建成区、南渡江沿岸,以及美兰机场、红树林保护区、三江镇国营农场附近,这些地区景观类型以建设用地和耕地为主,相对经济更发达且人口密集,土地利用程度高,因此该区历年来生态风险等级偏高。

#### 4 结论

利用 ArcGIS 和 Fragstats 软件,对海口市海岸带 1988、2000、2009、2017 年土地利用数据进行处理计算,构建区域景观生态风险模型,以 5 km×5 km 格网为研究尺度,进行海口市海岸带土地利用变化的景观生态风险评价。研究表明:

(1) 研究时域内,土地利用类型以建设用地和耕地为主;建设用地呈大幅度增长趋势,斑块数、分离度降低;耕地先减少后增加,破碎度降低,这与该时期海口市对土地利用进行“有保有控”差别化管理有关;绿地、水域和总体处于减少状态,破碎度、分离度均持续增大;其他用地持续减少至 2017 年消失。总体来说,研究区近 30 年景观类型分布趋于复杂化,绿地、水域逐渐破碎分布,2000—2017 年间人类活动对景观的干扰最为强烈,各景观的分离度、干扰度、脆弱度最大值均在此时域内出现,土地利用结构不稳定。

(2) 研究区生态风险空间差异显著,总体呈由中部向东西、内陆向沿海递减的趋势,高等级的风险区逐渐朝沿海地区蔓延。1988—2017 年间研究区的平均生态风险值由 0.3424 增加到 0.4468,生态风险等级区之间转换复杂达 11 种,以低等级向高等级转换为主,生态风险等级呈上升趋势的面积约为呈降低趋势的 4.36 倍,

总体呈增高趋势。海口市海岸带近30年的景观生态风险变化可分为两个阶段:1988—2000年,低风险阶段,全区生态风险均属于中、低等级;2009—2017,高风险阶段,环境人为干扰程度高,虽然已采取一系列生态政策,但由于生态政策的干预具有滞后性,高等级生态风险区依然存在。

(3)分布于海岸带西部和东部美兰区的大面积耕地、绿地和水域,抗人类干扰能力较差,对景观生态风险值的贡献度较高,人类活动干扰导致其面积减少且分布趋于破碎、分离,是研究区生态风险值总趋势呈增高的主要原因。例如研究区东南部三江镇国营农场的建立、红树林保护区的破坏,西北部临海产业的发展等,均使得该区域景观生态风险等级增高;而研究区西部的绿地和耕地景观分布较集中、连通性好,极大的减少了西部的生态风险。

(4)有研究表明,建设用地本身生态风险并不高,但是由于人类活动的影响,建设用地的扩张会增加周边景观的生态风险<sup>[46]</sup>。研究区的建设用地主要位于中部海口市建成区(中心城区)、江东新区以及东南部三江镇、美兰机场附近;1988—2017年间海口市发展迅速,用地需求增大,建设用地边缘由于景观的完整性遭到破坏,影响了原有景观的自然演替且动植物生境面积被压缩,使得建设用地内部出现中、较高等级生态风险区,其边缘增长为高生态风险区。

(5)结合研究区景观生态风险分析,针对海口市海岸带地区土地利用提出以下建议:一,对于中、高等级生态风险区,重视城市建设、临港产业的增加对海岸带生态风险的影响,合理规划并设立缓冲区,加强绿地、水域与其他景观的联系性;二,对于低等级生态风险区,应控制开发强度,扩大自然保护区规模,做到生态建设和经济建设齐头并进,实现可持续发展。

#### 参考文献(References):

- [1] 田鹏, 龚虹波, 叶梦姚, 史小丽, 王丽佳, 刘瑞清, 童晨. 东海区大陆海岸带景观格局变化及生态风险评价. 海洋通报, 2018, 37(6): 695-706.
- [2] 方雪娟, 任海波, 毋瑾超, 魏悦, 倪章华, 张艳兰. 海岸带景观生态格局研究进展及启示. 科技创新与生产力, 2019, (11): 33-37, 40-40.
- [3] Rangel-Buitrago N, Neal W J, de Jonge V N. Risk assessment as tool for coastal erosion management. Ocean & Coastal Management, 2020, 186: 105099.
- [4] Hunsaker C T, Graham R L, Suter II G W, O, O'Neill R V, Barnhouse L W, Gardner R H. Assessing ecological risk on a regional scale. Environmental Management, 1990, 14(3): 325-332.
- [5] Yanes A, Botero C M, Arrizabalaga M, Vásquez J G. Methodological proposal for ecological risk assessment of the coastal zone of Antioquia, Colombia. Ecological Engineering, 2019, 130: 242-251.
- [6] 王辉, 宋长春. 三江平原湿地区域生态风险评价研究. 地理科学进展, 2019, 38(6): 872-882.
- [7] Walker R, Landis W, Brown P. Developing a regional ecological risk assessment: a case study of a Tasmanian agricultural catchment. Human and Ecological Risk Assessment, 2001, 7(2): 417-439.
- [8] Malekmohammadi B, Rahimi Blouchi L. Ecological risk assessment of wetland ecosystems using multi criteria decision making and geographic information system. Ecological Indicators, 2014, 41: 133-144.
- [9] 郑杰, 王志杰, 喻理飞, 王磊, 严令斌. 基于景观格局的草河流域生态风险评价. 环境化学, 2019, 38(4): 784-792.
- [10] 余敦, 梁珍宝, 肖志娟, 孙聪康, 郑媛媛. 基于景观生态思维的南昌市土地生态风险时空特征分析. 水土保持研究, 2020, 27(1): 213-220.
- [11] 汪翡翠, 汪东川, 张利辉, 刘金雅, 胡炳旭, 孙志超, 陈俊合. 京津冀城市群土地利用生态风险的时空变化分析. 生态学报, 2018, 38(12): 4307-4316.
- [12] Ayre K K, Landis W G. A Bayesian approach to landscape ecological risk assessment applied to the upper Grande Ronde watershed, Oregon. Human and Ecological Risk Assessment, 2012, 18(5): 946-970.
- [13] Dale V H, Brown S, Haeuber R A, Hobbs N T, Huntly N, Naiman R J, Riebsame W E, Turner M G, Valone T J. Ecological principles and guidelines for managing the use of land. Ecological Applications, 2000, 10(3): 639-670.
- [14] 彭建, 党威雄, 刘焱序, 宗敏丽, 胡晓旭. 景观生态风险评价研究进展与展望. 地理学报, 2015, 70(4): 664-677.
- [15] 孙天弘, 雷平. 国内土地利用生态风险研究进展. 资源与产业, 2019, 21(1): 95-104.

- [16] 田晶, 邵世维, 黄怡敏, 余梦婷. 土地利用景观格局核心指数提取: 以中国广州市为例. 武汉大学学报: 信息科学版, 2019, 44(3): 443-450.
- [17] Duarte G T, Santos P M, Cornelissen T G, Ribeiro M C, Paglia A P. The effects of landscape patterns on ecosystem services: meta-analyses of landscape services. *Landscape Ecology*, 2018, 33(8): 1247-1257.
- [18] Kong F H, Nakagoshi N. Spatial-temporal gradient analysis of urban green spaces in Jinan, China. *Landscape and Urban Planning*, 2006, 78(3): 147-164.
- [19] Mortberg U M, Balfors B, Knol W C. Landscape ecological assessment: a tool for integrating biodiversity issues in strategic environmental assessment and planning. *Journal of Environmental Management*, 2007, 82(4): 457-470.
- [20] 王涛, 肖彩霞, 刘娇, 禄鑫. 杞麓湖流域景观时空格局演变及其对景观生态风险的影响. 水土保持研究, 2019, 26(6): 219-225.
- [21] 刘春艳, 张科, 刘吉平. 1976—2013年三江平原景观生态风险变化及驱动力. 生态学报, 2018, 38(11): 3729-3740.
- [22] 何莎莎, 李欣, 何春龙, 方斌. 基于土地利用变化的扬州市广陵区景观生态风险评价. 南京师大学报: 自然科学版, 2019, 42(1): 139-148.
- [23] 刘迪, 陈海, 张敏, 商舒涵, 梁小英. 生态脆弱区景观生态风险时空分异及其地形梯度分析——以陕西省米脂县为例. 水土保持研究, 2019, 26(4): 239-244, 251-251.
- [24] 马金卫, 吴晓青, 周迪, 王周龙. 海岸带城镇空间扩展情景模拟及其生态风险评价. 资源科学, 2012, 34(1): 185-194.
- [25] 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. 生态学杂志, 2008, 27(2): 229-234.
- [26] 刘铤, 康慕谊, 吕乐婷. 海南岛海岸带土地生态安全评价. 中国土地科学, 2013, 27(8): 67-72.
- [27] Arfaeina H, Dobaradaran S, Moradi M, Pasalari H, Mehrizi E A, Taghizadeh F, Esmaili A, Ansarizadeh M. The effect of land use configurations on concentration, spatial distribution, and ecological risk of heavy metals in coastal sediments of northern part along the Persian Gulf. *Science of the Total Environment*, 2019, 653: 783-791.
- [28] Tobler W. On the first law of geography: a reply. *Annals of the Association of American Geographers*, 2004, 94(2): 304-310.
- [29] 李小文, 曹春香, 常超一. 地理学第一定律与时空邻近度的提出. 自然杂志, 2007, 29(2): 69-71.
- [30] 邱彭华, 徐颂军, 符英, 谢跟踪. 海南岛海岸带土地利用现状及问题分析. 热带地理, 2012, 32(6): 582-592.
- [31] 王德智, 邱彭华, 方源敏, 李颖. 海口市海岸带土地利用时空格局变化分析. 地球信息科学学报, 2014, 16(6): 933-940.
- [32] 喻露露, 张晓祥, 李杨帆, 赵杏杏, 马生全, Cao H H, 曹均阔. 海口市海岸带生态系统服务及其时空变异. 生态学报, 2016, 36(8): 2431-2441.
- [33] 朱敏, 谢跟踪, 邱彭华. 海口市生态用地变化与安全格局构建. 生态学报, 2018, 38(9): 3281-3290.
- [34] 张彩凤. 海口市海岸防护林现状及景观海防林规划建设研究[D]. 海口: 海南大学, 2010.
- [35] 海口市统计局, 国家统计局海口调查队. 2017年海口市国民经济和社会发展统计公报. 海口日报, 2018-02-05(07).
- [36] 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. 地理研究, 2016, 35(6): 1017-1028.
- [37] Nayak T K, Kundu S. Calculating and describing uncertainty in risk assessment: the Bayesian approach. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 2001, 7(2): 307-328.
- [38] 彭建, 王仰麟, 吴健生, 张玉清. 区域生态系统健康评价——研究方法与进展. 生态学报, 2007, 27(11): 4877-4885.
- [39] Antrop M. The preoccupation of landscape research with land use and land cover//Wu J G, Hobbs R J, eds. *Key Topics in Landscape Ecology*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007.
- [40] Hepinstall-Cymerman J, Coe S, Hutrya L R. Urban growth patterns and growth management boundaries in the Central Puget Sound, Washington, 1986-2007. *Urban Ecosystems*, 2013, 16(1): 109-129.
- [41] 阿娜古丽·麦提依明, 阿里木江·卡斯木, 买尔孜亚·吾买尔. 基于移动窗口法的乌鲁木齐市建成区景观格局变化分析. 中国水土保持科学, 2018, 16(2): 31-38.
- [42] Hayes E H, Landis W G. Regional ecological risk assessment of a near shore marine environment: cherry point, WA. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 2004, 10(2): 299-325.
- [43] Wang S Y, Liu J S, Yang C J. Eco-environmental vulnerability evaluation in the Yellow River Basin, China. *Pedosphere*, 2008, 18(2): 171-182.
- [44] 马晨阳, 甄江红, 冯琰玮, 峰一, 陶云, 韩帅. 基于城市扩展的呼和浩特市综合生态风险评价. 生态学杂志, 2019, 38(11): 3472-3479.
- [45] 王宁初, 钱耀军, 陈玉书. 基于绿色崛起视角下的海口市生态环境可持续发展对策探讨. 沿海企业与科技, 2015, (3): 57-59.
- [46] 方广玲, 香宝, 王宝良, 金霞, 胡钰, 张立坤. 苏南经济快速发展地区人类活动生态风险评价——以镇江市丹徒区为例. 应用生态学报, 2014, 25(4): 1076-1084.