

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.01.007.

胡纪汉, 毛铭江, 龚文峰, 等. 基于 PSR-OWA 模型的海口市生态风险评价及模拟研究[J]. 水土保持研究, 2024, 31(1): 301-314.

Hu Jihan, Mao Mingjiang, Gong Wenfeng, et al. Ecological Risk Assessment and Simulation of Haikou City Based on PSR-OWA Model[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(1): 301-314.

基于 PSR-OWA 模型的海口市生态风险评价及模拟研究

胡纪汉^{1,2}, 毛铭江^{1,2}, 龚文峰^{1,2}, 刘铁冬^{1,2}, 邱新彩^{1,2}, 吴庚鸿^{1,2}, 谢艺丹^{1,2}

(1.海南大学 林学院, 海口 570228; 2.海南大学 海口市智慧林业重点实验室, 海口 570228)

摘要: [目的] 评价区域生态风险并揭示其时空演变规律, 对于降低区域生态风险、维护生态安全和合理开发与规划国土空间具有重要意义。[方法] 基于海口市 2000 年、2010 年、2020 年 Landsat TM/OLI 遥感影像, 引入区域累计气旋能量、城市开发利用强度和旅游压力等评价因子, 构建基于网格尺度下的 PSR(Pressure-State-Response) 典型自然和社会经济背景下的区域生态风险评估模型, 探究 20 年间区域生态风险空间分布格局、时空分异及其关联特征, 基于双变量全局空间自相关揭示海口市城镇化水平对区域生态风险的响应关系, 同时耦合 GIS-OWA 模型模拟不同情景下海口市生态风险时空格局配置及其生态保护对策。[结果] (1) 2000—2020 年期间海口市低和高生态风险区分别增加 229.7 km², 91.38 km², 中生态风险区减少的面积最大, 为 150.48 km², 研究区生态状况总体上有所改善; (2) 研究期间区域高等级生态风险区呈持续扩张趋势, 海口市中西部生态风险整体优于北部及江东新区等城镇建设区; (3) 3 期 Moran's I 均高于 0.6 且呈递增趋势, 生态风险空间聚集特征明显并呈现显著的空间上正相关, 生态风险格局及其空间关联格局整体呈现出“南北高中间低”“东热西冷”的异质性特征, 城镇化水平对区域生态风险的影响程度不断加深; (4) 低风险(87.5%)、中风险(33.6%)和高风险(70.7%)分别在“生态优先型”“维持现状型”和“开发优先型”3 种模拟模型中占据一定优势地位。[结论] 海口市生态风险呈现向好发展趋势, 存在显著空间异质性, 且发展趋势受到决策者影响巨大。研究结果可为海口市生态风险防范、土地利用优化决策和区域生态系统可持续管理提供理论依据和决策支持。

关键词: 生态风险; PSR; 空间自相关; 空间分异特征; OWA

中图分类号: X826

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)01-0301-14

Ecological Risk Assessment and Simulation of Haikou City Based on PSR-OWA Model

Hu Jihan^{1,2}, Mao Mingjiang^{1,2}, Gong Wenfeng^{1,2},

Liu Tiedong^{1,2}, Qiu Xincan^{1,2}, Wu Genghong^{1,2}, Xie Yidan^{1,2}

(1. College of Forestry, Hainan University, Haikou 570228, China;

2. Intelligent Forestry Key Laboratory of Haikou City, Hainan University, Haikou 570228, China)

Abstract: [Objective] Evaluating regional ecological risks and revealing their spatial-temporal evolution patterns are important for reducing regional ecological risks, maintaining ecological security, and rational spatial development and planning of national land. [Methods] Based on the Landsat TM/OLI remote sensing images of Haikou in 2000, 2010 and 2020, evaluation factors such as regional accumulative cyclone energy, urban development and utilization intensity and tourism pressure were introduced. A regional ecological risk assessment model based on Pressure-State-Response (PSR) under typical natural environment and socio-economic background at grid scale was constructed to explore the spatial distribution pattern, spatial-temporal differentiation and correlation characteristics of regional ecological risks in the past 20 years. Based on bivariate

收稿日期: 2022-10-17

修回日期: 2022-11-20

资助项目: 海南省自然科学基金(621RC507); 中国气象局海南生态环境监测项目(ZQC-J20142); 海口市智慧林业重点实验室资助(2020-057); 海南大学自然科学基金(KYQD(ZR)20058)

第一作者: 胡纪汉(1999—), 男, 安徽淮南人, 硕士研究生, 研究方向为资源环境遥感与 GIS 应用。E-mail: jihanhu@163.com

通信作者: 龚文峰(1976—), 男, 河南省南阳市人, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为资源环境遥感与 GIS 应用。E-mail: gwf101@163.com

<http://stbcj.paperonce.org>

global spatial autocorrelation, the response relationship of urbanization level to regional ecological risk in Haikou City was revealed, and the GIS-OWA model was coupled to simulate the spatial and temporal configuration of ecological risk in Haikou City and its ecological protection countermeasures under different scenarios. [Results] (1) From 2000 to 2020, the low and high ecological risk areas in Haikou City increased by 229.7 km² and 91.38 km², respectively, and the area of medium ecological risk area decreased the most, which was 150.48 km². The ecological status of the study area was generally improved. (2) During the study period, the regional high-level ecological risk area showed a continuous expansion trend, and the ecological risk in the central and western parts of Haikou City was better than that in urban construction areas such as the north and Jiangdong New Area. (3) Moran's *I* was higher than 0.6 in the three periods and showed an increasing trend. The spatial aggregation characteristics of ecological risks were obvious and showed a significant spatial positive correlation. The ecological risk pattern and its spatial correlation pattern showed heterogeneity characteristics of 'high in the north and south, low in the middle' and 'hot in the east and cold in the west'. The impact of urbanization level on regional ecological risk was deepening. (4) Low risk (87.5%), medium risk (33.6%), and high risk (70.7%) occupied a certain dominant position in the three simulation models of 'ecological priority', 'maintenance status' and 'development priority', respectively. [Conclusion] Ecological risks in Haikou city show a positive development trend, with significant spatial heterogeneity, and the development trend is greatly influenced by policy makers. The results of this study can provide the theoretical basis and decision support for ecological risk prevention, land use optimization decision-making, and sustainable management of regional ecosystems in Haikou City.

Keywords: ecological risk; PSR; spatial autocorrelation; spatial differentiation characteristics; OWA

21 世纪以来,随着人口及其活动的增加,土地利用变化、能源利用和污染对全球生态环境的影响不断加深^[1]。加之受全球气候变化及其局部自然灾害和极端天气频发^[2],在多种因素的综合作用下,区域生态系统直接或间接地承受着人类活动和自然环境变化所带来的负面影响^[3],直接体现在景观和环境变化上就是城市建设用地不断蚕食农田、林地、草地等生态空间^[4],原有区域的土地利用格局发生显著变化,区域生态系统平衡被打破,自我调节能力下降^[5],区域人地矛盾进一步激化^[4,6],加剧局部区域环境问题,危及区域生态环境健康和生态安全^[7-8],进而增加生态风险来源种类及其发生概率和强度。

生态风险评价是对生态系统结构和功能正在受到或将来可能受到的危害和胁迫而进行表征的一种评估方法^[9]。作为生态风险评价一个重要分支的区域生态风险评价,不仅重视空间要素配置对生态风险过程的影响^[10],且从区域尺度上描述和评估自然因素和人为活动对生态系统及其各个组分所产生不利影响的可能性和大小的过程^[11],更是发现和解决环境问题的决策基础^[12],并对区域生态环境质量的提高和发展具有指导意义^[13]。已逐渐成为研究和解决局部环境问题的重要手段^[14]和保护生态安全的热点问题^[15],其研究尺度可以为城镇^[1]、湖泊^[16]、湿地^[17]、流域^[18]和山脉等^[19]。此外,目前大部分区域

生态风险评价研究主要基于土地利用和景观结构展开,更多学者基于土地利用结构变化^[20]、地统计学理论^[21]和空间自相关分析等^[22]成熟方法构建区域生态风险指数,探究区域生态风险状况及变化特征。然而,上述研究重点关注区域人口压力、景观结构、土地利用现状、地形和气温等人为和自然因素等评价因子,缺少聚焦于典型自然环境和社会经济背景下的区域生态风险时空演变研究,且基于多种胁迫复合因子对热带和亚热带区域生态风险评价的研究相对稀少,利用双变量全局空间自相关探讨海域城市城镇化水平与生态风险响应关系的研究则更稀少。

海南省是 1988 年建省且为中国最大的经济特区和唯一的热带岛屿省份,作为省会城市的海口市,是国家“一带一路”战略支点城市和海南自由贸易港核心城市,更是北部湾城市群核心城市,具有重要的战略地位。2018 年海南宣布建设国际自由贸易岛以来,海陆兼备的地缘优势不仅带来巨大的发展机遇,在城市建设规模、生态滨海旅游业、热带高效农业、房地产业和现代渔业都取得了长足的发展,但也让海口市面临双重生态问题。其一,在人口压力增大、城市快速扩张和经济急速发展等综合因素影响下,部分陆域生态用地被侵占,局部土地资源和森林资源遭到严重破坏;其二,城市建设转向滨海和水域,滨海和河流滩涂被侵占现象严重,区域土地利用格局和生态系统发生巨大变化,

危及区域生态系统稳定性,区域生态风险概率进一步增长。目前对海口市研究更多关注其土地利用及格局变化和城市扩张^[23-24]、海岸带生态安全^[25]、生态系统服务^[26]、生态安全格局^[27]和重金属风险评价等^[28],但基于人为活动和自然因素且从多角度、多层次和多准则探究海口市生态风险状况相对稀少,耦合 GIS 和 OWA 模型模拟、探讨不同情景下区域生态风险时空格局配置及其生态保护对策更加稀少。

鉴于此,本研究以海口市 2000 年、2010 年、2020 年 3 期遥感影像为数据源,基于 RS 和 GIS 定量获取区域土地利用数据,引入区域累计气旋能量、城市开发利用强度和旅游压力等综合生态风险评价因子,构建基于网格尺度的 PSR (Pressure-State-Response) 区域生态风险评价模型评估区域生态风险,结合空间自相关与双变量空间自相关方法,探究区域尺度城镇化水平与生态风险空间分布格局、时空变化特征及关联特征和城镇化水平与生态风险的响应关系,耦合 GIS 和 OWA 模型模拟和探究不同情景下海口市生态风险空间分布特征和生态保护措施,对今后维护区域生态安全和土地资源的科学合理开发利用具有重要意义。

1 研究区概况与数据

1.1 研究区概况

海口市位于海南岛的东北部(图 1),地处 $110^{\circ}10' - 110^{\circ}41'E$, $19^{\circ}32' - 20^{\circ}05'N$ 。东临文昌、西接澄迈、南连定安、北隔 18 海里与广东省海安镇相望。地表主要为第四纪基性火山岩和松散沉积物,呈较大面积分布,海滨以滨海台阶式地貌为主,西部以典型的火山地貌为主;土壤类型主要是砖红壤、水稻土、菜园土、滨海盐土等^[29]。海口市属于热带海洋性季风气候,年均日照时数 2 000 h 以上,年均温度 $23.8^{\circ}C$, 平均降水量为 1 669 mm。海口由本岛海南岛部分、海甸岛和新埠岛组成,是一座富有海滨自然旖旎风光的南方滨海城市,地形略呈长心形,地势平缓,全市地貌基本分为北部滨海平原区,中部沿江阶地区,东部、南部台地区,西部熔岩台地区。耕地、草地、片林和滩涂主要分布于北部区域,该区域不仅是陆域城市建设转向滨海和水域的主要地带,更是海口链接北部内陆、融入大湾区区域经济循环和建设琼州海峡经济带的核心地带。东部和东北部主要分布着热带稀树草原和滨海红树林群落,东部的江东新区是海南省打造中国特色自由贸易港集中展示区。尤其东部和北部区域在人口急剧扩张、经济飞速增长和快速城镇化的综合作用,区域原始的自然、半自然环境和生态系统发

生剧烈改变,城市土地利用变化对区域生态产生了深刻影响,在形成北部城镇建设区和东部热作农林区的同时,导致区域生态系统失衡及生态环境问题日益突出,进而加剧区域生态风险。南部及东南部台地区主要分布着的稀树灌木群落,然而随着热带高效农业的迅猛发展,农业产业结构调整导致部分自然植被群落结构被区域特色农业所代替,在形成近郊热带特色产业发展的同时,造成区域水土流失,增加生态风险种类和来源。西部熔岩台地区主要以杂木林群落为主,主要以台地农林区为主,但随着西海岸休闲度假区开发建设、行政中心西移和局部区域房地产业的兴起,城市化建设进程加快,建设用地不断蚕食区域耕地、林地和草地,导致区域人地矛盾和生态风险增加。西南部的多以稀树草原和杂木林群落为主,然而随着热带经济作物栽培推广和应用,部分天然林景观被人工植被代替,加之受频繁台风等自然灾害的综合影响,森林植被结构变化导致区域水土流失加剧,生态风险发生概率增加。

1.2 数据来源及处理

基础数据:遥感影像数据、气象数据、人口数据、DEM 高程数据和社会经济数据等。其中,2000 年、2010 年 Landsat5 TM 及 2020 年 Landsat8-OLI 遥感影像数据和 DEM 数据均源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>)。气象数据主要源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>)和海南省气象局(<http://hi.cma.gov.cn/>)。人口数据和社会经济数据等其他数据源于《海口市统计年鉴》和《海南省统计年鉴》。

首先,运用 ENVI 5.3 完成遥感影像的辐射定标、大气校正、波段组合、图像拼接和裁剪等处理。参照《中国土地利用现状分类标准》(GB/T21010-2017)和海口市土地利用现状,采用最大似然法(maximum Likelihood, ML)完成遥感分类,分为耕地、草地、林地、湿地、建筑用地和水体 6 个地类,借助部分野外实地调查数据和 BIGEMAP,采用人机交互的模式完成遥感图像分类处理,总体分类精度达 90% 以上,并以 GRID 的格式存储于 ArcGIS 10.8 中。

2 研究方法

2.1 生态风险小区的划分

结合海口市地域状况,参照《地理格网》(GB12409-2009)标准和相关研究^[10,30],在 ArcGIS 10.8 中采用网格化对研究区域进行 $3\text{ km} \times 3\text{ km}$ 的幅度采样,以此作为生态风险评价单元(图 1),共划分生态风险小区 302 个,基于评价单元计算生态风险值,并赋值每个网格中心点,通过空间插值获取其空间格局分布特征。

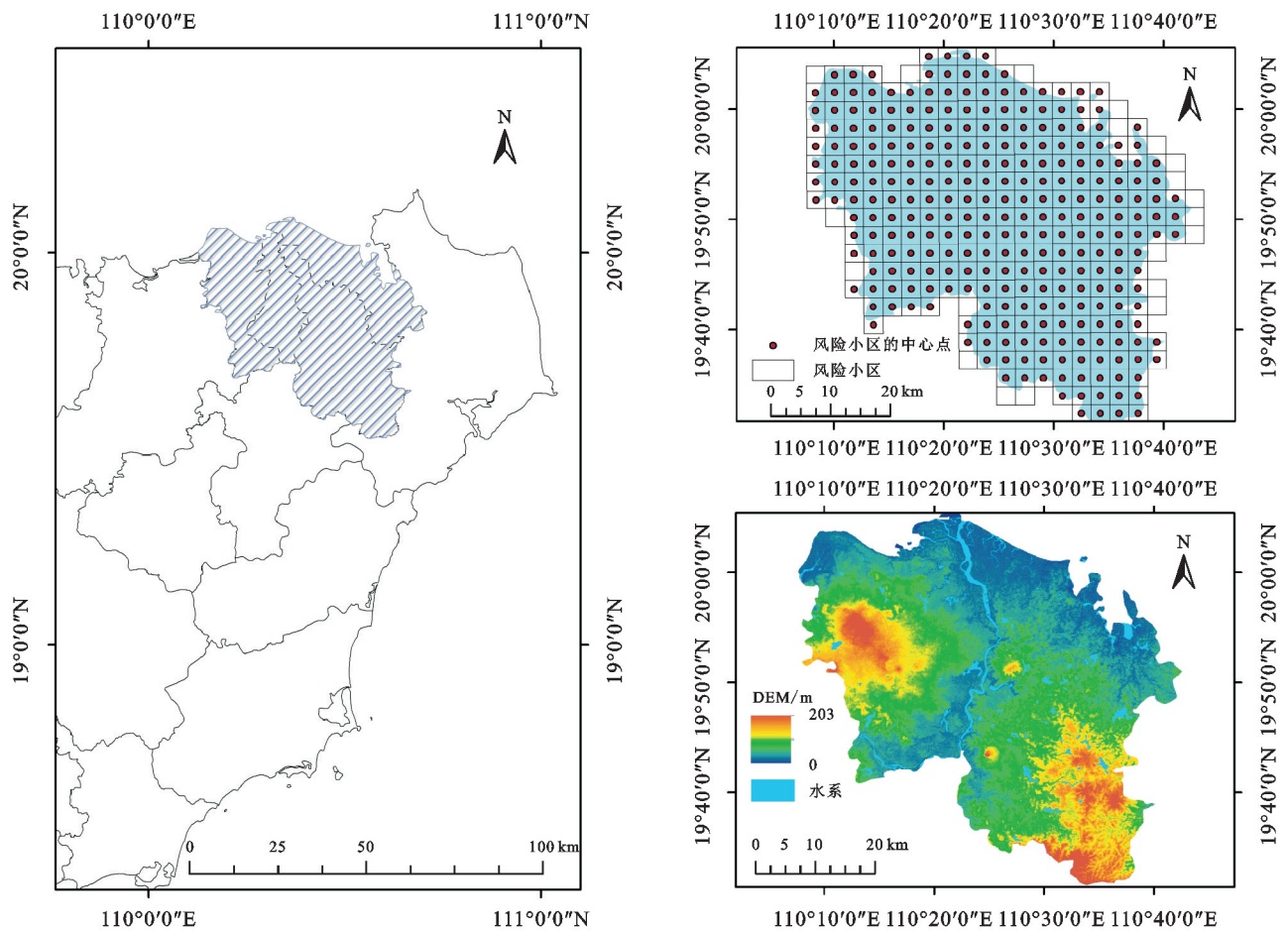


图 1 研究区位置

Fig. 1 Study area location

2.2 生态风险评价指标体系构建及权重的确定

参照相关研究成果基础上^[31-36],本研究利用PSR模型,从自然因素、人类活动、景观格局指数、景观活力、生态敏感性和恢复力6个方面出发,选取能够反映研究区域自然、经济、社会、环境、资源和生态等综合方面的17个细化指标,尤其引入区域累计气旋能量、城市开发利用强度和旅游压力等生态风险评估因子,以此构建海口市生态风险评价指标体系(表1)。具体流程如下:

(1) 生态风险指标计算。以行政区域为统计单元,基于统计年鉴完成社会、经济和环境等与人类活动等相关数据的收集和整理,首先应用ArcGIS 10.8完成相关数据统计和空间插值计算;其次使用Fragstats 4.2完成景观格局指数和景观活力等景观指标计算;最后基于ENVI 5.3, ArcGIS 10.8, InVEST 3.10.2和相关模型完成区域生态敏感性和恢复力等风险指标计算。

(2) 指标细化处理。正向指标:城市开发利用强度、人口密度和区域累积气旋能量等指标越高会导致生态和环境压力越大,出现生态失衡和环境恶化等问题,从而使生态风险升高。因此,对于促进区域生态

风险的指标设为正向指标。

$$Y_{ij} = (1 - e) + e \times \frac{X_{ij} - X_{\min j}}{X_{\max j} - X_{\min j}} \tag{1}$$

负向指标:造林面积、固碳能力和归一化植被指数等指标越高,则反映区域生态用地稳定性越高,自我调节能力越强,从而使生态风险降低。因此,缓解区域生态风险的指标设为负向指标。

$$Y_{ij} = (1 - e) + e \times \frac{X_{\max j} - X_{ij}}{X_{\max j} - X_{\min j}} \tag{2}$$

式中: Y_{ij} 为标准化之后的值; X_{ij} 为第*i*年第*j*项指标原始值; $X_{\max j}$ 和 $X_{\min j}$ 分别是对应指标的最大值和最小值。为避免0值,参考张晓瑶等人研究^[32]设置修正值*e*,*e*取值为0.9。

(3) 权重计算。利用综合指数法,分析层次分析法和熵权法优缺点,基于熵权法修正层次分析法获取各指标的组合权重^[37],具体结果见表1。

$$u_i = \frac{a_{ri} S_{ri}}{\sum_{i=1}^n a_{ri} S_{ri}} \tag{3}$$

式中: u_i 为组合权重; a_{ri} 为层次分析法计算的权重; S_{ri} 为熵权法计算的权重。

表 1 2000—2020 年海口市生态风险指标体系及组合权重

Table 1 Ecological risk indicator system and portfolio weights for Haikou City, 2000—2020

目标层	指标层	属性	指标来源	指标解释	组合权重
压力	年均温度 w_{16}	+	气象网数据	温度越高对研究区生态环境发展不利	0.0179
	区域累计气旋能量 w_7	+	$RACE=\sum_{i=1}^N\frac{v_i^2}{d_i}$	台风会对研究区造成严重危害,区域累计气旋能量越大,对研究区生态风险的压力越大	0.0777
	降雨量 w_{17}	+	气象网数据	降雨量越大,区域生态环境压力越大	0.0233
	旅游人数 w_5	+	统计年鉴	旅游人数越多,对生态环境压力越大	0.0582
	城市开发利用强度 w_1	+	$U=\frac{S_{city}}{S_{total}}$	反映城市化建设水平,值越大对区生态风险压力越高	0.0767
	人口密度 w_2	+	统计年鉴	人口密度越大,对生态环境压力越大	0.0953
	人均 GDP w_{11}	+	统计年鉴	人均 GDP 越大,对生态风险压力越大	0.0428
	第三产业占比 w_{10}	—	统计年鉴	第三产业占比越大,人类生产生活对生态系统破坏程度越小,生态风险压力越低	0.0367
	化肥施用量 w_6	+	统计年鉴	反映农业对环境的污染强度,体现对生态环境的破坏性	0.0492
状态	景观破碎度 w_3	+	$F_i=\frac{N_i}{A_i}$	景观破碎度值越大,所对应的景观生态系统稳定性越低	0.1572
	香农多样性指数 w_4	—	$SHDI=-\sum_{i=1}^n P_i \log_2 P_i$	香农多样性指数越大,景观异质性强,生态系统越稳定	0.1121
	分维数指数 w_{15}	—	$D=2\ln(\text{Perimeter}/4)/\ln A$	分维数指数值越大,表示景观斑块的形状越复杂,生态系统稳定性越强	0.0226
	归一化植被指数 w_9	—	$NDVI=\frac{NIR-RED}{NIR+RED}$	归一化植被指数值越大,植被覆盖越茂密,越有利于土地生态系统的稳固	0.0480
响应	水土流失敏感指数 w_8	+	$SE=\sqrt[4]{(R\times\text{slope}\times NDVI\times I)}$	反映生态环境问题的难易程度和可能性大小,值越大对生态风险的破坏的可能性越大	0.0876
	生态弹性度 w_{12}	—	$ECO_{res}=\sum_{i=1}^m (S_i E_i)$	生态弹性度指数是指生态系统自我调节、自我维持及抵抗外界干扰的能力	0.0451
	造林面积 w_4	—	统计年鉴	造林面积越大,区域地表森林覆盖率越高,区域土地生态系统稳定性越高	0.0247
	固碳能力 w_{13}	—	InVEST 模型计算	反映碳储量对生态系统服务功能的影响,用来表现对生态风险的响应	0.0249

2.3 生态风险综合评价

参照相关研究成果^[38],基于 PSR 模型构建区域生态风险综合评价模型。计算公式如下:

$$ERI=\sum_{i=1}^n u_i \times C_i \tag{4}$$

式中:ERI 表示生态风险指数; C_i 为各个指标的标准
化值。基于 ArcGIS 10.8 的 Natural breaks 完成区域生态风险等级划分,共分为:低生态风险区、较低生态风险区、中生态风险区、较高生态风险区和高生态风险区 5 个等级。

2.4 空间分异特征分析

空间自相关模型能够反映某种因素在空间位置的相关程度^[39],多采用 Moran's I 和 Local Moran's I 指数来描述全局空间自相关和局部空间自相关^[40]。为了探究海口市生态风险空间分布格局及分异特征,揭示研究区生态风险发生的响应机制及时空演变趋势,本文利用 Geoda 计算 Moran's I 指数,以期反映区域

生态风险整体空间关联和差异状况。计算公式如下:

$$I=\frac{n\sum_i\sum_j w_{ij}(x_i-\overline{x})(x_j-\overline{x})}{(\sum_i\sum_j w_{ij})\sum_i(x_j-\overline{x})^2} \tag{5}$$

式中: w_{ij} 为空间权重矩阵; x_i 和 x_j 是变量 x 在相邻配对单元栅格的 i 和 j 属性值; \overline{x} 为属性值的平均值。Moran's $I>0$,表明存在正空间自相关,呈趋同集聚,值越大空间聚集程度越高;Moran's $I<0$,表明存在空间负相关,呈离散分布;Moran's $I=0$,表明不存在空间自相关。

局部空间自相关指标 LISA 能够有效地反映观测值的高值或低值的局部空间聚集状况,以此表述局部集聚和离散效应。为了全面反映区域生态风险之间的空间关联性^[41],本文采用 LISA 进行局部空间自相关分析,探究局部空间异常特征,以识别局部空间高高集聚的“热点”和低低集聚的“冷点”。具体计算公式如下:

$$LISA_i = \frac{(x_i - \bar{x})}{\sum_i (x_i - \bar{x})^2 / n} \sum_j w_{ij} (x_j - \bar{x}) \quad (6)$$

同时,为了进一步探究城镇化和区域生态风险的空间关联特征,本研究采用双变量空间分析模型^[42],分析海口城镇化进程与生态风险的内在关联,揭示城镇化程度对区域生态风险的影响机制。

$$I_{lm}^p = Z_l^p \sum_{q=1}^n W_{pq} Z_m^q \quad (7)$$

式中: $Z_l^p = (X_l^p - \bar{X}_l) / \sigma_l$; $Z_m^q = (X_m^q - \bar{X}_m) / \sigma_m$; X_l^p 是空间单元 p 中属性 l 的值; X_m^q 是空间单元 q 属性 m 的值; \bar{X}_l 和 \bar{X}_m 分别是属性 l 和 m 的平均值; σ_l 和 σ_m 分别是属性 l 和 m 的方差; W_{pq} 为空间单元 p, q 之间的空间连接矩阵。本文中城镇化水平用归一化建筑指数 (NDBI) 来体现, 计算公式如下^[43]:

$$NDBI = \frac{MIR - NIR}{MIR + NIR} \quad (8)$$

式中: MIR, NIR 分别为短红外波段、近红外波段, 对应 Landsat5 的第 4, 5 波段, Landsat8 的第 5, 6 波段。

2.5 基于 GIS—OWA 海口生态风险情景模拟

参考美国数学家 Yager 的空间多准则评价方法^[44], 将语言量化算子与 OWA 方法相结合, 根据组合权重大小进行排序, 通过给定决策风险确定位序权重, 对组合权重与次序权重进行线性组合得出评价结果, 公式如下^[45]:

$$OWA = \sum_{i=1}^n \left(\frac{u_i w_i}{\sum_{i=1}^n u_i w_i} \right) Z_i \quad (9)$$

式中: Z_i 为经过最大、最小值标准化后各指标栅格化

图层, u_i 为组合权重, w_i 为次序权重, $w_i \in [0, 1]$, 且 $w_1 + w_2 + \cdots + w_n = 1$ 。

次序权重的确定是 OWA 方法的核心^[37], 本文基于模糊量化模型完成次序权重计算 (表 2), 公式如下:

$$w_i = f(i) - f(i-1) \quad (10)$$

$$f(i) = \left[\frac{\sum_{k=1}^i (n - r_k + 1)}{\sum_{k=1}^n (n - r_k + 1)} \right]^a \quad (11)$$

$(k=1, 2, 3, \cdots, n)$

式中: a 为决策风险系数, $a \in (0, \infty)$; $f(i)$ 为重要指标等级, 依据指标数值大小确定; n 为指标个数; r_k 为根据组合权重大小对指标进行排序后的重要性取值, 最大值取 1, 最小值取 n 。

当风险系数 a 从 0 趋向 ∞ 时, 决策者呈现出由极乐观到极悲观态度。当 $a=1$ 时, 决策者无偏向任何态度, 保持中立, 此时各决策指标与组合权重一样; 若 $a<1$, 各生态风险指标对生态环境压力大, 因此决策者重视生态环境保护, 处于可控范围内; 当 $a>1$ 时, 各生态风险指标对生态环境压力小, 因此决策者更重视经济发展, 不会采取任何生态环境保护措施, 处于不可控范围内。本文中, 次序权重根据 17 个指标值的组合权重的数值大小进行排序, 并结合对决策风险的认识来确定, 从而确定每个指标对生态风险的重要性程度。即人口密度、城市开发利用强度等指标对生态风险有促进作用, 则在乐观态度中占比较高。反之, 造林面积和固碳能力等缓解区域生态风险的指标, 在悲观中占比较高。

表 2 海口市生态风险指标次序权重

Table 2 Seaport ecological risk indicator order weights

w_i	$a=0.00001$	$a=0.1$	$a=0.5$	$a=1$	$a=5$	$a=10$	$a=10000$
w_1	1.0000	0.9783	0.3333	0.0588	0.0000	0.0000	0.0000
w_2	0.0000	0.0065	0.1311	0.0588	0.0004	0.0000	0.0000
w_3	0.0000	0.0037	0.0957	0.0588	0.0026	0.0000	0.0000
w_4	0.0000	0.0025	0.0765	0.0588	0.0079	0.0001	0.0000
w_5	0.0000	0.0019	0.0636	0.0588	0.0174	0.0007	0.0000
w_6	0.0000	0.0015	0.0539	0.0588	0.0311	0.0027	0.0000
w_7	0.0000	0.0012	0.0463	0.0588	0.0484	0.0081	0.0000
w_8	0.0000	0.0010	0.0398	0.0588	0.0674	0.0191	0.0000
w_9	0.0000	0.0008	0.0343	0.0588	0.0862	0.0377	0.0000
w_{10}	0.0000	0.0007	0.0294	0.0588	0.1025	0.0641	0.0000
w_{11}	0.0000	0.0005	0.0250	0.0588	0.1140	0.0960	0.0000
w_{12}	0.0000	0.0004	0.0209	0.0588	0.1190	0.1279	0.0000
w_{13}	0.0000	0.0004	0.0171	0.0588	0.1163	0.1523	0.0000
w_{14}	0.0000	0.0003	0.0134	0.0588	0.1055	0.1616	0.0000
w_{15}	0.0000	0.0002	0.0100	0.0588	0.0870	0.1501	0.0000
w_{16}	0.0000	0.0001	0.0066	0.0588	0.0620	0.1162	0.0000
w_{17}	0.0000	0.0001	0.0033	0.0588	0.0323	0.0635	1.0000

3 结果与分析

3.1 海口市生态风险时空分异规律

3.1.1 海口市生态风险总体变化特征 海口市 2000 年、2020 年主要以低、较低生态风险区为主,两者面积比例达到 66.76%和 70.40%,生态风险等级整体偏低,其中 2000 年较低生态风险区面积比例最高,达到 36.59%,低生态风险区在 2020 年的面积比例最大,为 40.23%。2010 年主要以中、较低生态风险为主,面积比例为 65.86%,生态风险等级整体相对偏高,中生态风险区占据一定优势地位,面积比例为 43.63%,分布较为广泛,几乎散布于整个研究区(图 2)。高生态风险区 3 个时期所占的面积比例均为最小,分别为 1.08%,6.87%和 5.08%(表 3)。

20 年间,低生态风险区呈先减少而后增加的变化趋势,2000 年、2010 年、2020 年面积比例分别为 30.17%,7.03%和 40.23%,总体上呈现增加趋势且面积增加了 229.70 km²,在一定程度上表明区域生态系统内部的稳定性增强,生态环境得到进一步改善。中生态风险区面积呈现先增加而后减少的变化趋势,3 个时期的比例分别为 22.51%,43.63%和 15.92%,总体上面积减少 150.48 km²。此外,较高、高生态风险区面积比例在 2010 年均最高,分别为 20.24%和 6.87%,主要原因有两方面,其一,随着区域经济的快速发展和城镇化进程的加速,部分生态用地被侵占,局部土地利用结构和格局发生改变,区域生态系统不确定性提升,稳定性减弱;另一方面很大程度上源于海口市 2010 年经历两次强台风及强降雨,局部极端天气等自然灾害不仅给研究区域造成了严重财产损失,同时也严重威胁当地民众的正常生产

和生活,致使区域高生态风险区面积增加,生态系统内部的稳定性减弱,在一定程度上彰显了自然灾害对区域生态风险的影响。

表 3 2000—2020 年生态风险面积及比例

Table 3 Ecological risk area and proportion from 2000 to 2020						
生态风险等级	2000 年		2010 年		2020 年	
	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%
低风险区	689.33	30.17	160.55	7.03	919.03	40.23
较低风险区	835.90	36.59	507.88	22.23	689.31	30.17
中风险区	514.15	22.51	996.73	43.63	363.67	15.92
较高风险区	220.36	9.65	462.47	20.24	196.34	8.59
高风险区	24.75	1.08	156.85	6.87	116.13	5.08

3.1.2 海口市生态风险空间特征分布 由图 2 可知,2000—2020 年海口市生态风险空间分布异质性显著。高风险区呈团块状聚集于滨海、滩涂和沿江地区,呈持续扩张趋势,主要涵盖北部城镇建设区、江东新区和南渡江部分沿岸,主要以规模较大的居民区、商业区、经济开发区和高新开发区等城镇建设区为主,这些区域水陆交通相对便利且人口分布相对聚集,建设用地是区域土地利用的主体。尤其在 2018 年海南省宣布建设国际自由贸易岛后,更加剧了局部区域城镇化进程,加速建设用地向海岸带和沿江滩涂地扩展和侵占,改变区域土地利用格局并危及其生态安全,致使生态风险升高。较高生态风险区呈带状及散点状分布于高生态风险区周围,且沿着主要交通道路和部分乡镇向外扩展延伸,使得高风险区域进一步向外扩张。中生态风险区呈团状分布于较高生态风险区周围,土地类型多为耕地,未来土地利用将存在一定潜在危险。低、较低风险区主要分布于中部生态功能区和西部台地农林区等区域,土地利用类型主要以林地和草地为主,植被覆盖相对较高。

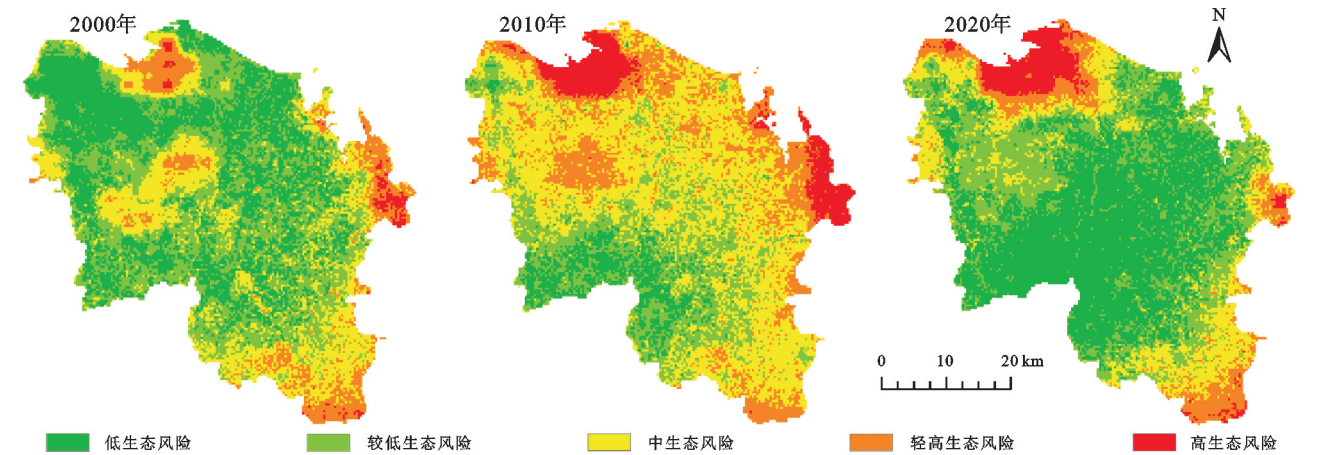


图 2 2000—2020 年海口市生态风险空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of ecological risks in Haikou City, 2000 to 2020

3.1.3 海口市生态风险时空演变特征 由表 4 和图 3 可知:2000—2010 年低、较低风险区主要为转出源,中

风险区为主要转入源,其转出面积分别为 608.13 km² 和 602.68 km²,“低、较低→中”风险区面积分别

为 334.33 km² 和 359.19 km²;同时“低→较低”和“较低→较高”面积达到 187.22 km² 和 164.84 km²,高风险区转出面积仅为 3.14 km²,而低风险区转入面积也仅为 78.79 km²,在一定程度上反映该时期研究区生态风险处于上升期。低→高等级风险区转移主要集中在海口市北部城镇建设区、中部特色发展区和东部台地热作农林区,该区域地势平坦、气候适宜且水资源充足,受经济利益驱使和城镇化进程影响,人为加大对该区域土地的干扰程度,最终导致区域林地、湿地等生态用地转变为耕地或建设用地,改变和破坏区域土地利用格局和土地利用结构,导致区域生态风险等级升高。

2010—2020 年,中风险区主要为转出源,转出面积达到 804.46 km²;“中→低”“中→较低”风险区是其主要转换类型,面积分别为 371.38 km²、364.11 km²;较高、高风险区转出面积达到 370.99 km² 和

69.72 km²,高风险区转入面积仅为 26.96 km²,转出面积是转入面积的 2.59 倍,高风险区范围逐渐缩小;同时“较高→较低”和“高→较高”风险区面积达到 175.97 km² 和 31.23 km²,低、较低风险区的转入面积达到 784.85 km² 和 570.86 km²,生态风险等级降低,随着国家生态环境治理政策出台和生态保护措施实施,当地政府积极推进区域土地综合治理工程、流域及海岸带等重点地带生态修复工程,使部分生态用地得以保护且连通性增加,区域总体生态风险等级下降,局部区域生态环境得到了较好的保护。

总之,海口市 20 a 间高、较高生态风险区面积增加了 236.92 km²,低、较低生态风险区面积增加了 993.42 km²,后者是前者的 4.19 倍,生态风险总体呈下降趋势,环境质量有所改善且得到一定好转,但高风险区面积增加了 91.38 km²,局部区域生态建设任务依旧严峻。

表 4 海口市生态风险转移矩阵

Table 4 Ecological risk transfer matrix for Haikou City

%

年份	风险区类别	低风险区	较低风险区	中风险区	较高风险区	高风险区
2000—2010	低风险区	11.78	27.16	48.50	12.48	0.08
	较低风险区	8.18	27.90	42.97	19.72	1.23
	中风险区	1.94	15.90	48.97	26.58	6.61
	较高风险区	0.20	2.95	25.29	31.50	40.06
	高风险区	0.00	0.00	0.49	12.19	87.32
2010—2020	低风险区	89.49	9.58	0.72	0.19	0.02
	较低风险区	69.47	23.29	6.16	1.05	0.03
	中风险区	37.26	36.53	19.29	6.41	0.51
	较高风险区	12.77	38.05	24.71	19.78	4.69
	高风险区	1.01	9.82	13.71	19.91	55.55
2000—2020	低风险区	51.86	28.82	12.58	5.80	0.94
	较低风险区	50.29	31.84	11.05	4.91	1.91
	中风险区	25.91	35.94	24.52	7.63	6.00
	较高风险区	7.52	17.66	23.34	27.82	23.66
	高风险区	0.20	3.42	13.74	45.42	37.22

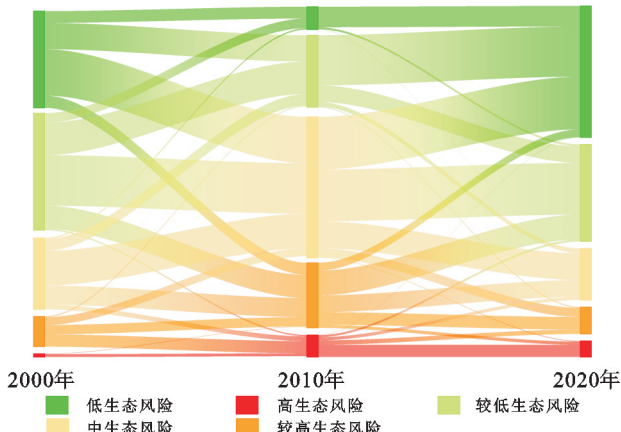


图 3 2000—2020 年海口市生态风险区变化轨迹

Fig. 3 Ecological risk change trajectory in Haikou City from 2000 to 2020

3.2 海口市生态风险空间关联

利用 GeoDa 计算海口市 2000 年、2010 年、2020 年生态风险空间自相关指数(表 5)。结果显示研究区 3 期 Moran's I 分别为 0.633, 0.754, 0.788 ($p = 0.01$),均高于 0.6 并呈现递增趋势,说明研究区生态风险的空间聚集现象明显,生态风险值在空间上呈现显著的正相关,但总体水平表现一般,在一定程度上说明区域不同级别生态风险在空间上相互影响,即高生态风险区域周围区域的风险值高,低生态风险区域周围区域的风险值低。

为进一步分析生态风险在空间上的分异规律和聚集特征,本文基于 GeoDa 完成研究区生态风险 LISA 分析(图 4,表 5)。结果表明该区域生态风险集

聚,空间分布格局呈现一定变化,高高集聚“热点”和低低集聚“冷点”聚集现象十分突出,“热点”和“冷点”集中分布于第一(H-H)和第三象限(L-L);高低或低高离群“奇异点”相对较少,集中分布于第二(L-H)与第四象限(H-L)。20 a 间,热点区域面积比

例为 21.16%,14.48%和 18.46%,呈现先减少而后略微增加的趋势,自相关类型数量下降 2.7%;“冷点”区域面积比例分别为 21.12%,22.65%和 31.19%,呈现持续增加趋势,增长 10.07%。总体上研究区生态风险值分布分散且规律不明显。

表 5 海口市生态风险空间自相关类型统计

Table 5 Statistics of ecological risk space autocorrelation types in Haikou City %

年份	不显著	H-H	L-L	L-H	H-L	Moran's I	Z 得分	p 值
2000	57.22	21.16	21.12	0.16	0.34	0.633	46.24	0.001
2010	62.37	14.48	22.65	0.21	0.29	0.754	53.61	0.001
2020	50.13	18.46	31.19	0.09	0.14	0.788	55.97	0.001

由海口市 2000—2020 年生态风险 LISA 聚集指数可知(图 4):2000 年 H-H 聚集区分布相对分散,主要分布在北部城镇建设区、中部特色发展区和东部台地热作农林区,北部城镇建设区因人口聚集、经济相对发达,生态风险等级偏高;L-L 聚集区主要分布在北部城镇建设区周围及南渡江下游局部农林区。2010 年 H-H 聚集区依旧主要集聚于北部城镇建设区和东部热作农林区,聚集区分布明显且呈扩大趋势,很大程度受区域城镇化的影响;而 L-L 聚集区主要分布在西部台地农林区和海口市国家地质公园等生态功能区,很大程度上源于政府积极推行生态保护措施,加大对自然保护区、森林公园和重要水源点的保护和管理力度。

2020 年 H-H 聚集区主要分布在北部城镇建设区和东部台地热作农林区,且呈明显扩张趋势,20 年间海口建成区面积由 2000 年的 33.64 km² 迅猛扩展到 2020 年的 203.7 km²,与海口国际自由贸易岛建设、生态旅游开展、高效农业(渔业)发展及房地产业的繁荣等都直接相关,在有限陆地资源被侵占的同时,更加速城市建设由陆地向沿海的无序扩张延伸,致使区域生态安全状况严峻。L-L 聚集区呈南北收缩、东西扩张趋势,分布在南渡江下游农林区和台地农林区,主要原因在于该区域地形复杂,为高低落差较大的台状地貌,人类干扰强度较小,土地利用类型多以林地为主,植被覆盖度高。3 个时期 L-H 和 H-L 聚集区规模小、数量变化不明显且分布零散。

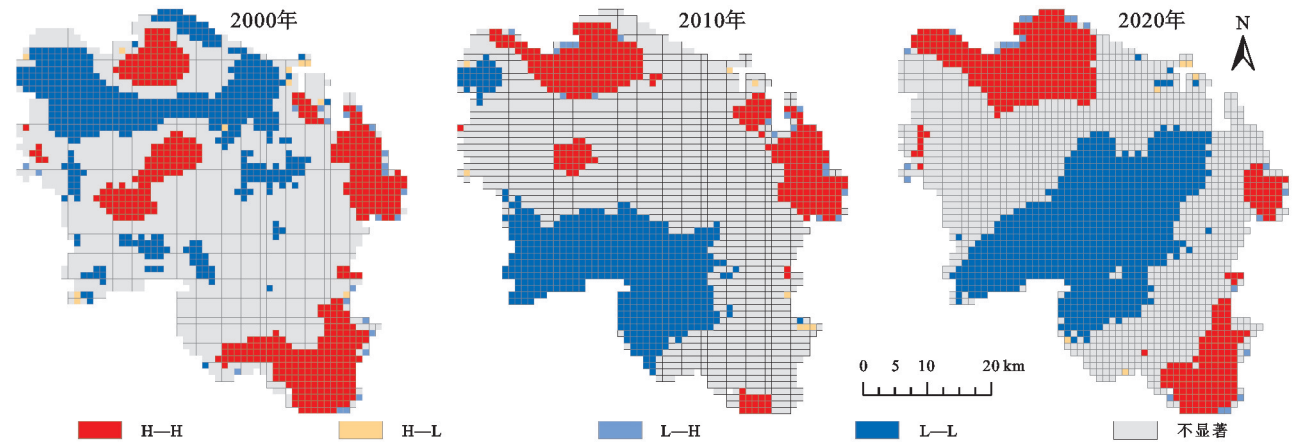


图 4 2000—2020 年海口市生态风险指数聚类

Fig. 4 Clustering of ecological risk index in Haikou City, 2000–2020

为了进一步探究城市化进程与生态风险之间的关系,本文基于 GeoDa 空间分析工具,使用双变量全局空间自相关探究海口市城镇化水平对区域生态风险的影响(图 5)。2000 年、2010 年、2020 年 Moran's I ($p=0.01$)分别为 0.242,0.263,0.428,Moran's I 散点在 4 个象限均有分布,散点分布于每个象限中,其中第一、三象限分布较多,表明海口市城镇化水平与生态风险存在显著的正相关关系,且这种关系不断增强,城镇化对区域生态风险的影响程度不断加深。Moran's I

散点图中的第一象限为高风险—高归一化建筑指数聚集区,第三象限为低风险—低归一化建筑指数聚集区,2000—2020 年期间,一三象限的散点数目均有所上升。高风险—高归一化建筑指数聚集于北部沿海海岸带和江东新区等地带。2018 年海南省政府规划海口江东新区作为中国(海南)自由贸易试验区的重点区域,在“临空经济+服务经济+生态经济”的开放、创新型产业体系指引下,区域经济和城镇化进程得到迅猛发展,部分耕地、滩涂地、草地、林地和灌木林地等半自然和自然

景观被建筑用地挤压、侵占,土地利用方式、格局和结构特征发生重大变化,导致区域生态环境脆弱、景观稳定性下降和生态风险增强。低风险—低归一化建筑指数

分布于东北部湿地公园及中部和南部的林区,而在国家积极的林业政策,该区域受到外界人类活动干扰相对较小,景观内部稳定性高且生态风险低。

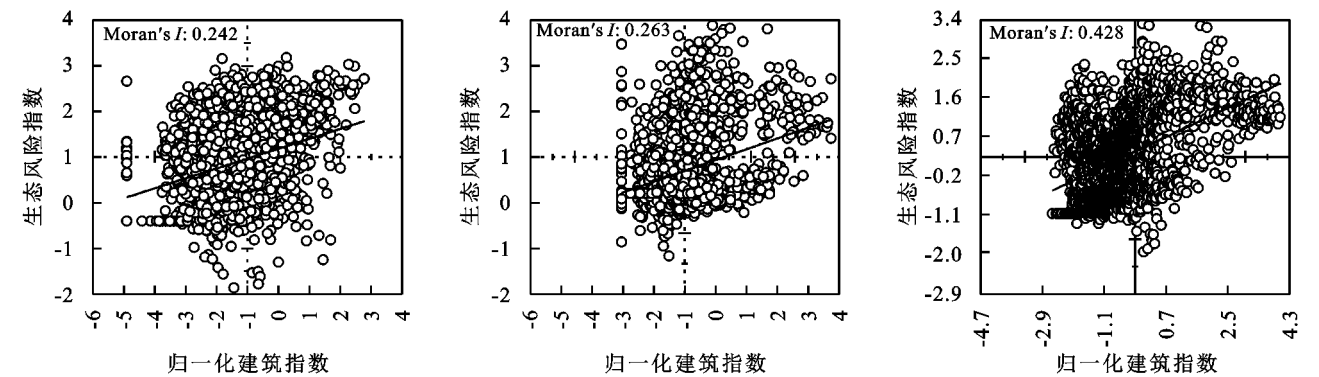


图 5 2000—2020 年生态风险指数与归一化建筑指数相关性 Moran 散点图

Fig. 5 Moran scatter plot of correlation between ERI and NDBI, 2000—2020

3.3 耦合 GIS-OWA 模型的海口市不同情景下生态风险模拟

在综合分析海口市社会、经济发展状况与自然资源条件的基础上,本研究在 ArcGIS 10.8 和 IDRISI 2020 支持下,选取其中 3 种决策系数,耦合 GIS-OWA 模型完成研究区不同情景生态风险的多准则模拟、风险等级划分及时空格局配置(图 6)。

- (1) 生态优先型情景: $a=0.5$ 表示研究区重视生态保护,加强生态风险治理和投入,严禁在生态保护区进行无序建设开发和扩张;
- (2) 维持现状型情景: $a=1$ 表示研究区生态风险整体处于向高风险过渡的一个临界点;
- (3) 开发优先型情景: $a=5$ 表示研究区更侧重经济发展,开发和扩张建设用地为主线,忽视生态保护和自然灾害治理。

生态优先型情景:低生态风险占据绝对优势,较低风险次之,面积比例分别为 87.5% 和 12.5%,没有较高、高风险区,表明区域生态环境得到了极大的保护。较低风险区主要位于海口市北部城镇建设区和江东新区,其余均是低风险区。该情景模拟表明在国土空间三条红线和海南省总体规划(2015—2030)纲要框架下,决策者注重生态环境保护,加强对生态保护政策的实施力度,加大对区域生态风险投资治理力度,同时强化土地利用规划编制,合理化、规范化土地利用方式^[3],杜绝因发展而浪费土地资源的现象。但同时在保护生态环境前提下,决策者应适当加大社会经济投入并强化区域社会经济发展,同时协调经济的快速发展和生态土地的合理利用。

维持现状型:中生态风险面积比例最大,为 33.6%,较高与较低生态风险次之,分别为 28.7% 和 25.6%。表

明研究区整体生态风险处于预警状态,高风险区聚集在海口市北部城镇建设区、江东新区及毗邻的乡镇,较高和中风险区则聚集在高风险地区周边,低、较低风险区分布在海口市中部农林区和南渡江下游水源保护与农业区。在空间上呈现以南渡江为轴心,南渡江两侧呈现从北到南的“高一中—低”的梯度递减。与生态优先型情景对比,此情景决策者无任何偏好,其决策态度处于保守向冒险过度的临界点。因此,决策者应该强化国土综合整治与生态保护修复意识,尤其针对江东新区等侵占生态用地的区域,确保在不增加生态风险的前提下发展经济^[3],同时在海岸带和南渡江流域开展以自然恢复为主和人工修复为辅的中、较高、高生态风险区生态修复工作,在做好生态重点区生态保护的前提下发展经济。

开发优先型:高生态风险面积比例高达 70.7%,占据绝对优势地位,较高生态风险次之,为 22.7%,低和较低生态风险占据较小的比例,仅为 2.4%。该情景下研究区今后重点工作是生态环境质量恢复。决策者应正视生态保护和经济发展之间的矛盾^[3],在生态红线和国土空间规划的框架下,科学、合理制定土地利用规划,严格遵守和积极实施生态保护政策,以“生态保护优先”为前提,重视生态环境保护,积极推进退化及受损的湿地、草地和林地生态系统的修复工作,尤其加强海岸带综合生态治理、东寨港红树林湿地生态保护及江东新区生态环境保护和相关监督管理,真正做到“一江两岸、东西双港驱动,南部协调发展”的发展格局,完善江东新区、海岸带、南渡江流域和红树林湿地保护区等生态环境监测网络,建立健全环境自动监测数据共享机制,在空间上寻求国土资源空间结构的最优化比配,提高研究区国土空间的生态恢复能力。

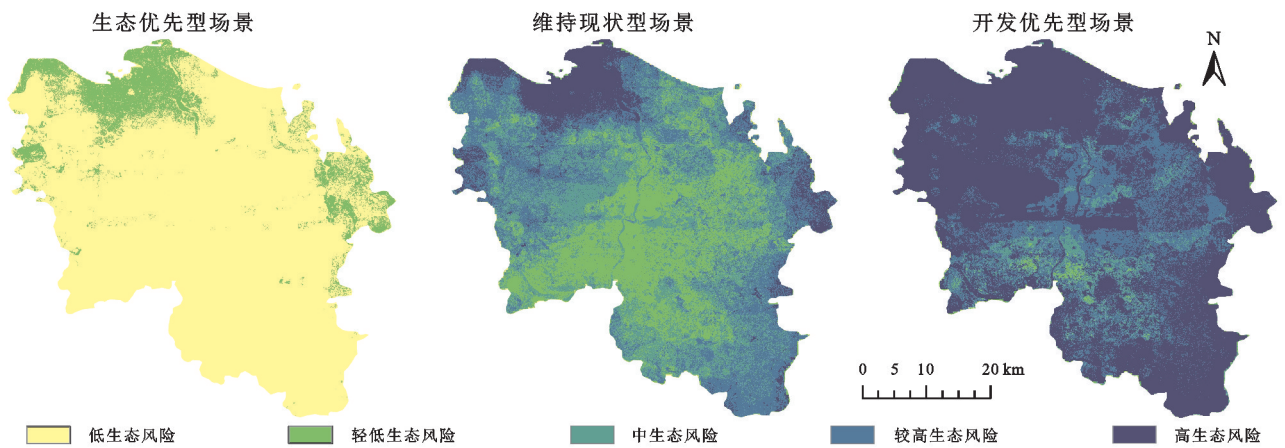


图 6 不同政策情景下海口市生态风险分级

Fig. 6 Ecological risk classification of Haikou City under different policy scenarios

4 讨论与结论

4.1 讨论

本文在综合分析海口市社会、经济发展状况与自然资源条件的基础上,基于 PSR 模型构建区域生态风险评估模型,耦合 GIS-OWA 模型模拟、探讨不同情景下海口市生态风险空间分布特征,为维护区域生态安全和国土空间资源合理利用提供参考。

2000 年以来,在经济特区政策和城市化进程的影响下,研究区的经济、热带高效农业和渔业、房地产业和生态旅游等得到了迅猛的发展,尤其 2002 年琼山市并入海口市,人口数量由 2000 年的 150.83 万人增加到 2020 年的 288.7 万人,增长 135.66%。同时 20 年间,海口的国内生产总值(GDP)由 2000 年的 175.2 亿元达到 1 791.6 亿元,增加了 4.99 倍,旅游人数由 324.81 万人增加到 1 620.27 万人,增加了 398.84%,人口压力大,更加剧了对住房、商服等建设用地需求,加之海口政府加大对区域基础设施投资力度,例如国际机场、高速公路、新埠岛和阳光假日海滩修建等,局部出现向海要地、向岸要房等现象,粗放开发模式在加剧建设用地与生态用地之间矛盾的同时,使生态环境受到了严重破坏,导致高等级风险区面积增加。目前,特别是海南建设以江东新区为核心区的国际自由贸易港后,局部区域建设规模得到迅猛扩张,经济飞跃式发展,但同时也消耗了局部大量社会和自然资源^[3],更加速城市区域土地结构的破碎化^[46],危及其生态安全。

基于此,2010—2020 年海南省在省域生态保护红线基础上制定最严格的海南生态环境标准,进一步加强了对开发区和建成区生态恢复和环境治理力度,加大生态用地灾害风险治理投入。如美舍河湿地公园修复工程、五源河湿地公园修复工程和开展海口市南渡江河口右岸生态修复项目等,特别针对江东新区已开工建设生态环保项目 33 个,其中“两河一堤”、海口

迈雅河区域生态修复、海南东寨港国家级自然保护区生态修复与资源保护等 16 个项目已完工,10 年间低和较低风险区面积增加,低风险区增加了 5.72 倍,但高风险区面积增加 105.43 km²。因此,今后在海口市国土空间规划和生态红线的共同管控下,参照《海口市国土空间规划(2020—2035 年)》等意见,以生态优先原则下实现高质量发展为目标,要进一步防止人类对土地的不合理干扰,要防止过度开发和自然灾害给生态格局带来的不确定性问题,首先:加大对海口市林地、草地和湿地等自然生态空间和生态用地的严格保护,尤其海岸带区域和河岸带地段保护及管理,同时加强自然保育宣传和区域生态用地的生态风险监测和评估;其次,构建国土空间规划新格局,在以海口石火山群国家地质公园和东寨港自然保护区等生态功能区为核心的低等级风险区,统筹规划生态空间、农业空间、城镇空间和海洋空间,强化区域景观的聚合度和连接度,坚持省域生态保护红线,严格控制非生态用地的侵占;再次,在以南渡江下游水源保护与农业区和桂林洋开发区等经济开发区为中等风险区的区域,要继续推进防护林建设工程、天然林保护工程,巩固退耕还林成果,提高森林覆盖率并加强水土保持工作;最后,构建海口市北部建成区及江东新区沿岸等城镇建成区的高级生态风险区区域监测体系,进一步加强生态恢复与环境治理力度,加大生态用地灾害治理投入,合理利用国土空间,实现区域生态系统的自我恢复和生态空间休养生息。

耦合 GIS-OWA 模型模拟不同决策情景的海口市生态风险空间特征,有助于决策者更全面、科学地对今后区域生态风险做出研判。但本研究由于选取权重的社会指标相对较多,反映区域特色自然特征等指标相对较少,需要进一步完善指标评价体系,尤其增加海南国际自由贸易岛对区域生态环境的自然和

社会影响指标,未来区域生态风险研究中,从景观异性的视角去评价自贸岛建设对局部区域生态环境可能潜在的生态风险。

4.2 结论

(1) 2000年、2020年研究区以较低和低生态风险等级为主,面积增加了83.11 km²,且受外界人类活动干扰相对较小且景观内部稳定性高;2010年区域以较低、中生态风险等级为主;20年间高生态风险区面积增加91.38 km²,呈持续扩张的态势,其时空分布与土地利用结构及其强度、人类活动之间关系密切。

(2) 基于海口市生态风险时空演变特征分析可知,2000—2010年研究区以“低、较低→中”风险区转换类型为主,生态风险处于上升期;2010—2020年研究区以“中→低、较低”风险区为主,生态风险处于下降期。

(3) 海口市生态风险格局及其空间关联格局整体呈现出“南北高中间低”、“东热西冷”的异质性特征。高一高聚集区主要分布于海口市北部城镇建设区和江东新区等以建设用地为主体的人工景观区,低—低聚集区主要分布在以农林复合体系为主的中西部山地丘陵区。海口市城镇化水平与风险热点区空间分布存在显著的正相关关系,城镇化对区域生态风险的影响程度不断加深、增强;冷点区分布与研究区生态空间保护相一致。

(4) 耦合GIS-OWA模型模拟不同情景下海口市生态风险,生态风险指数从低到高依次为“生态优先型”“维持现状型”和“开发优先型”,3种决策下区域生态风险主要以低生态风险(占87.5%)、中生态风险(占33.6%)和高生态风险(占70.7%)为主。

参考文献:

- [1] Ju H, Niu C, Zhang S, et al. Spatiotemporal patterns and modifiable areal unit problems of the landscape ecological risk in coastal areas: A case study of the Shandong Peninsula, China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021,310:127522.
- [2] Depietri Y. The social-ecological dimension of vulnerability and risk to natural hazards[J]. *Sustainability Science*, 2019,15(2):587-604.
- [3] 尉芳,刘京,夏利恒,等.基于LUCC的陕西渭北旱塬区景观生态风险评价[J]. *中国环境科学*, 2022,42(4):1963-1974.
- [4] Wei F, Liu J, Xia L H, et al. Landscape ecological risk assessment in Weibei dryland region of Shaanxi Province based on LUCC [J]. *China Environmental Science*, 2022,42(4):1963-1974.
- [5] 徐庆勇,黄玫,刘洪升,等.基于RS和GIS的珠江三角洲生态环境脆弱性综合评价[J]. *应用生态学报*, 2011,22(11):2987-2995.
- [6] 虞燕娜,朱江,吴绍华,等.多风险源驱动下的土地生态风险评价:以江苏省射阳县为例[J]. *自然资源学报*, 2016,31(8):1264-1274.
- [7] 吕立刚,周生路,周兵兵,等.区域发展过程中土地利用转型及其生态环境响应研究:以江苏省为例[J]. *地理科学*, 2013,33(12):1442-1449.
- [8] 宋戈,李娜,李静,等.建三江垦区土地利用/覆盖变化与生态环境效应作用机理研究[J]. *经济地理*, 2011,31(5):816-821.
- [9] Hunsaker C T, Graham R L, Glenn W S, et al. Assessing ecological risk on a regional scale[J]. *Environmental Management*, 1990,14(3):325-332.
- [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] 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.
- [12] Serveiss V B. Applying ecological risk principles to watershed assessment and management[J]. *Environ Manage*, 2002,29(2):145-154.
- Xu Q Y, Huang M, Liu H S, et al. Integrated assessment of eco-environmental vulnerability in Pearl River Delta based on RS and GIS [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011,22(11):2987-2995.
- Yu Y N, Zhu J, Wu S H, et al. Assessment of land ecological risks driven by Multi-sources: A case study of Sheyang County, Jiangsu Province[J]. *Journal of Natural Resources*, 2016,31(8):1264-1274.
- Lv L L, Zhou S L, Zhou B B, et al. Land use transformation and its eco-environmental response in process of the regional development: A case study of Jiangsu Province[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2013,33(12):1442-1449.
- Song G, Li N, Li J, et al. The land use/cover change and its eco-environmental effect the interaction mechanism in Jian-sanjiang[J]. *Economic Geography*, 2011,31(5):816-821.

- [13] 卢远,苏文静,华瑾,等.左江上游流域景观生态风险评价[J].热带地理,2010,30(5):496-502.
Lu Y, Su W J, Hua C, et al. Landscape ecological risk assessment for Upper Zuojiang River Basin[J]. Tropical Geography, 2010,30(5):496-502.
- [14] 李雅婷,赵牡丹,张帅兵,等.基于景观结构的眉县土地利用生态风险空间特征[J].水土保持研究,2018,25(5):220-225,233.
Li Y T, Zhao M D, Zhang S B, et al. Analysis of the characteristics of land utilization ecological risk space of Meixian County based on landscape structure[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018,25(5):220-225,233.
- [15] 孙东琪,张京祥,朱传耿,等.中国生态环境质量变化态势及其空间分异分析[J].地理学报,2012,67(12):1599-1610.
Sun D Q, Zhang J X, Zhu C G, et al. An assessment of China's ecological environment quality change and its spatial variation [J]. Acta Geographica Sinica, 2012,67(12):1599-1610.
- [16] Xie H, Wang P, Huang H. Ecological risk assessment of land use change in the Poyang Lake Eco-economic Zone, China[J]. Int J Environ Res Public Health, 2013,10(1):328-346.
- [17] Liu Y, Liu Y, Li J, et al. Evolution of landscape ecological risk at the optimal scale: A case study of the open coastal wetlands in Jiangsu, China[J]. Int J Environ Res Public Health, 2018,15(8):1691.
- [18] Karimian H, Zou W, Chen Y, et al. Landscape ecological risk assessment and driving factor analysis in Dongjiang river watershed[J]. Chemosphere, 2022, 307(3):135835.
- [19] Cui L, Zhao Y, Liu J, et al. Landscape ecological risk assessment in Qinling Mountain[J]. Geological Journal, 2018,53:342-351.
- [20] 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.
Lv L T, Zhang J, Sun C Z, et al. Landscape ecological risk assessment of Xi River Basin based on land-use change [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018,38(16):5952-5960.
- [21] 叶长盛,冯艳芬.基于土地利用变化的珠江三角洲生态风险评价[J].农业工程学报,2013,29(19):224-232,294.
Ye C S, Feng Y F. Ecological risk assessment for Pearl River Delta based on land use change[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013,29(19):224-232,294.
- [22] Wang D, Xiang J, Cheng L, et al. Spatiotemporal variations of landscape ecological risks in a Resource-based city under transformation[J]. Sustainability, 2021,13(9):5297.
- [23] 王德智,邱彭华,方源敏,等.海口市海岸带土地利用时空格局变化分析[J].地球信息科学学报,2014,16(6):933-940.
Wang D Z, Qiu P H, Fang M Y, et al. Research on spatial-temporal changes of land use in Haikou City's Coastal Zone[J]. Journal of Geo-Information Science, 2014,16(6):933-940.
- [24] 邱彭华,徐颂军,符英,等.海南岛海岸带土地利用现状及问题分析[J].热带地理,2012,32(6):582-592.
Qiu P H, Xu S J, Fu Y, et al. Present situation of land use and its problems in Coastal Zone of Hainan [J]. Tropical Geography, 2012,32(6):582-592.
- [25] 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[J].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[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021,41(3):975-986.
- [26] 朱敏,谢跟踪,邱彭华.海口市生态用地变化与安全格局构建[J].生态学报,2018,38(9):3281-3290.
Zhu M, Xie G Z, Qiu P H. Ecological land use change and construction of ecological land security pattern in Haikou city[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018,38(9):3281-3290.
- [27] 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.
Zhang C F. Study on the status of coastal shelterbelt and landscape shelterbelt construction planning in Haikou City[D]. Haikou:Hainan University, 2010.
- [28] 何玉生.海口城市土壤重金属污染特征与生态风险评估[J].生态学杂志,2014,33(2):421-428.
He Y S. Pollution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in Haikou urban soils[J]. Chinese Journal of Ecology, 2014,33(2):421-428.
- [29] 谷秀兰,黄朝明,栾乔林,等.基于多指标测度的土地利用结构分析:以海口市为例[J].农学学报,2015,5(7):132-140.
Gu X L, Huang C M, Luan Q L, et al. Analysis of land use structure based on multiple index: A case study of Haikou[J]. Journal of Agriculture, 2015,5(7):132-140.
- [30] 靳甜甜,张云霞,朱月华,等.黄土高原林区生态系统服务价值与景观生态风险时空变化及其关联性:以子午岭区为例[J].应用生态学报,2021,32(5):1623-1632.
Jin T T, Zhang Y X, Zhu Y H, et al. Spatiotemporal variations of ecosystem service values and landscape ecological risk and their correlation in forest area of Loess Plateau,

- China: A case study of Ziwouling region[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(5): 1623-1632.
- [31] 宋豫秦, 曹明兰. 基于 RS 和 GIS 的北京市景观生态安全评价[J]. 应用生态学报, 2010, 21(11): 2889-2895.
Song Y Q, Cao M L. Landscape ecological security assessment of Beijing City based on RS and GIS[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(11): 2889-2895.
- [32] 张晓瑶, 虞虎, 张潇, 等. 基于多源数据的三江源国家公园土地生态安全综合评价[J]. 生态学报, 2022, 42(14): 1-12.
Zhang X Y, Yu H, Zhang X, et al. Comprehensive evaluation of land ecological security in the Sanjiangyuan National Park based on multi-source data[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(14): 1-12.
- [33] 周启刚, 张晓媛, 杨霁, 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.
Zhou Q G, Zhang X Y, Yang F, et al. Land use ecological risk evaluation of the Three Gorges Reservoir Area in Chongqing based on PSR model[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2013, 20(5): 187-192.
- [34] 周才扬, 殷成团, 章卫胜, 等. 长江口台风影响能力研究[J]. 人民长江, 2021, 52(1): 27-30.
Zhou C Y, Yin C T, Zhang W S, et al. Study on impact ability of typhoons affecting[J]. Yangtze Estuary, 2021, 52(1): 27-30.
- [35] 徐明德, 李静, 彭静, 等. 基于 RS 和 GIS 的生态系统健康评价[J]. 生态环境学报, 2010, 19(8): 1809-1814.
Xu M D, Li J, Peng J, et al. Ecosystem health assessment based on RS and GIS[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2010, 19(8): 1809-1814.
- [36] Gong W, Duan X, Mao M, et al. Assessing the impact of land use and changes in land cover related to carbon storage by linking trajectory analysis and InVEST models in the Nandu River Basin on Hainan Island in China[J]. Frontiers in Environmental Science, 2022, 10, DOI:10.3389/fenvs, 2022, 1038752.
- [37] 陈理庭, 蔡海生, 张婷, 等. 基于多准则决策的万年县生态脆弱性研究[J]. 西南农业学报, 2022, 35(1): 226-234.
Chen L T, Cai H S, Zhang T, et al. Ecological vulnerability of Wannian county based on multi-criteria decision making[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2022, 35(1): 226-234.
- [38] 周启刚, 张晓媛, 王兆林. 基于正态云模型的三峡库区土地利用生态风险评价[J]. 农业工程学报, 2014, 30(23): 289-297.
Zhou Q G, Zhang X Y, Wang Z L. Land use ecological risk evaluation in Three Gorges Reservoir area based on normal cloud model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(23): 289-297.
- [39] 贾艳艳, 唐晓岚, 任宇杰. 长江流域安徽段生态系统服务价值与景观生态风险时空演变及其关联分析[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2022, 46(3): 31-40.
Jia Y Y, Tang X L, Ren Y J. Spatial-temporal evolution and correlation analyses of ecosystem service values and landscape ecological risks in Anhui section of the Yangtze River basin[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2022, 46(3): 31-40.
- [40] 金贵, 邓祥征, 赵晓东, 等. 2005—2014 年长江经济带城市土地利用效率时空格局特征[J]. 地理学报, 2018, 73(7): 1242-1252.
Jin G, Deng X Z, Zhao X D, et al. Spatio-temporal patterns of urban land use efficiency in the Yangtze River Economic Zone during 2005—2014 [J]. Acta Geographica Sinica, 2018, 73(7): 1242-1252.
- [41] 李俊翰, 高明秀. 滨州市生态系统服务价值与生态风险时空演变及其关联性[J]. 生态学报, 2019, 39(21): 7815-7828.
Li J H, Gao M X. Spatiotemporal evolution and correlation analysis of ecosystem service values and ecological risk in Binzhou[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(21): 7815-7828.
- [42] Wartenberg D. Multivariate spatial correlation: A method for exploratory geographical analysis[J]. Geogr Anal, 1985, 17: 263-283.
- [43] 武鹏飞, 王茂军, 张学霞. 基于归一化建筑指数的北京市城市热岛效应分布特征[J]. 生态环境学报, 2009, 18(4): 1325-1331.
Wu P F, Wang M J, Zhang X X. Distribution of urban heat island effects based on normalized difference built-up index in Beijing city[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2009, 18(4): 1325-1331.
- [44] Yager R R. On ordered weighted averaging aggregation operators in multicriteria decisionmaking[J]. Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1988, 18(1): 183-190.
- [45] 张正昱, 金贵, 郭柏枢, 等. 基于多准则决策的长江经济带国土空间脆弱性与恢复力研究[J]. 自然资源学报, 2020, 35(1): 95-105.
Zhang Z Y, Jin G, Guo B S, et al. Research on the spatial vulnerability and resilience of land in the Yangtze River Economic Belt based on multi-criteria decision[J]. Journal of Natural Resources, 2020, 35(1): 95-105.
- [46] 王文旭, 曹银贵, 苏锐清, 等. 基于政策量化的中国耕地保护政策演进过程[J]. 中国土地科学, 2020, 34(7): 69-78.
Wang W X, Cao Y G, Su R Q, et al. Evolution characteristics and laws of cultivated land protection policy in China based on policy quantification[J]. China Land Science, 2020, 34(7): 69-78.