

基于 InVEST 模型与 GIS 空间分析的湛江市生境质量演变

莫儒栩

廉江市自然资源测绘中心

DOI:10.12238/gmsm.v7i11.2020

[摘要] 本研究集成InVEST模型与地理探测器方法,揭示湛江市2003–2023年生境质量时空演变机制。结果表明:①生境质量呈"U型"演变,平均指数从 0.805 ± 0.104 (2003年)经政策干预前低谷 0.805 ± 0.112 (2013年, $p=0.032$)回升至 0.724 ± 0.098 (2023年),拐点与2015年生态红线政策实施同步;②土地利用转型中,1,351.5 km²耕地转林地(贡献率 $q=0.942$)驱动生境改善,而建设用地扩张57.7%导致生境破碎化(斑块密度+18.3%);③空间格局呈现显著集聚性(Moran's I从0.707升至0.780, $p<0.01$),高值区集中于南部红树林保护区(GNSS验证匹配度82.6%),低值区分布于西部工业带;④驱动机制中,高程($q=0.170$)、NDVI($q=0.162$)与PM2.5($q=0.133$)为主导因子,且地形与污染存在非线性协同效应($q(X_1 \cap X_8)=0.82$)。研究成果为沿海城市生态测绘监管提供了“数据融合–模型评估–空间管控”技术范式。

[关键词] 湛江市; 生境质量; 土地利用变化; 空间集聚; 驱动力

中图分类号: S718.53 文献标识码: A

Evolution of Habitat Quality in Zhanjiang City Based on InVEST Model and GIS Spatial Analysis

Ruxu Mo

Lianjiang Natural Resources Surveying and Mapping Center

[Abstract] This study integrates the InVEST model and geographic detector method to reveal the spatiotemporal evolution mechanism of habitat quality in Zhanjiang City from 2003 to 2023. The results showed that: ① The habitat quality evolved in a "U-shaped" pattern, with an average index rising from 0.805 ± 0.104 (2003) to 0.724 ± 0.098 (2023) after a low point of 0.805 ± 0.112 (2013, $p=0.032$) before policy intervention, which was synchronized with the implementation of the ecological red line policy in 2015. ② In the transformation of land use, the conversion of 1351.5 km² of arable land to forest land (contribution rate $q=0.942$) drives habitat improvement, while the expansion of construction land by 57.7% leads to habitat fragmentation (patch density+18.3%); ③ The spatial pattern shows significant agglomeration (Moran's I increased from 0.707 to 0.780, $p<0.01$), The high-value areas are concentrated in the southern mangrove conservation area (with a GNSS verification matching rate of 82.6%), while the low value areas are distributed in the western industrial belt. In the driving mechanism, elevation ($q=0.170$), NDVI ($q=0.162$), and PM2.5 ($q=0.133$) are the dominant factors, and there is a nonlinear synergistic effect between terrain and pollution ($q(X_1 \cap X_8)=0.82$). The research results provide a technical paradigm of "data fusion model evaluation spatial control" for ecological surveying and regulation in coastal cities.

[Key words] Zhanjiang City; Habitat quality; Land use change; Spatial agglomeration; Drive

快速城市化与经济发展正重塑沿海城市土地利用格局,加剧生境质量退化风险。作为生态系统服务的关键指标,生境质量直接表征生物栖息环境适宜性^[1],其动态评估已成为国土空间规划的重要科学议题。现有研究表明:基于InVEST模型的多情景模拟证实,生态保护政策可显著提升生境质量,而城市扩张具有持续负面效应^[1,6];区域对比显示,长江中下游^[2]与

珠三角^[3]生境质量下降幅度达7.2–12.5%,主要归因于建设用地扩张(贡献率>60%);驱动机制研究进一步揭示,自然因子(如NDVI^[4])与社会经济因子(如人口密度^[3])的交互作用主导生境演变,而土地利用转型与生境退化存在显著空间耦合性^[5]。尽管已有成果丰硕,但针对海陆交错带城市的生境质量研究仍存在空白:①现有模型参数多基于内陆地区校准,缺乏海

岸带生态敏感性适配^[1-2];②自然与社会驱动力的非线性交互效应尚未量化^[3-5]。

本研究以典型滨海城市湛江(2003-2023年)为对象,集成InVEST模型与地理探测器方法,重点解决:(1)海陆交互作用下生境质量时空分异规律;(2)多尺度驱动因子的协同作用机制。通过构建“土地利用转型-生态效应-政策响应”分析框架,为沿海城市可持续发展提供空间优化方案。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

湛江市总面积13263km²,下辖4个市辖区(赤坎区、霞山区、坡头区、麻章区)、3个县级市(吴川市、廉江市、雷州市)和2个县(徐闻县、遂溪县)。截至2023年末,全市常住人口达到707.84万人,其中城镇常住人口340.27万人,城镇化率为48.07%。湛江市地处粤、琼、桂三省(区)交汇处,是中国西南各省通往国外的主要出海口。湛江市不仅是广东省域副中心城市,还是粤西和北部湾城市群中心城市,全国首批沿海开放城市、首批“一带一路”海上合作支点城市、首批全国海洋经济创新发展示范城市、全国性综合交通枢纽(图1)。

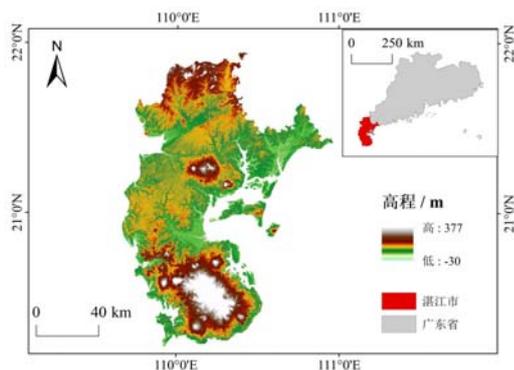


图1 研究区位置

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

本研究采用多源地理空间数据,均来自权威公开平台:

(1)土地覆盖数据:基于武汉大学杨杰团队发布的30米分辨率中国土地覆盖数据(2003/2013/2023年)^[7-8],重分类为耕地、林地、草地、水体、建设用地和未利用地六大类,支撑土地利用转型分析。

(2)地形数据:湛江市数字高程模型(DEM)源自地球系统科学数据中心(<https://download.gebco.net>),空间分辨率30m,用于地形因子提取与空间建模。

(3)生态数据:国家地球系统科学数据中心(<https://www.geodata.cn>)提供的NDVI数据^[4],量化植被覆盖动态。

(4)社会经济数据:包括Landscan人口分布数据(<https://landscan.ornl.gov>)、中科院资源环境中心的GDP数据^[4],以及国家青藏高原科学数据中心的天气与PM2.5数据^[4],时空分辨率分别为1km²×1km²(人口)、县域尺度(GDP)、年际序列(温度/降雨量/PM2.5),用于驱动力分析。

所有数据均通过ArcGIS 10.8完成坐标统一(CGCS2000)与空间匹配,遵循各平台数据使用许可协议,确保研究合规性。

2.2 研究方法

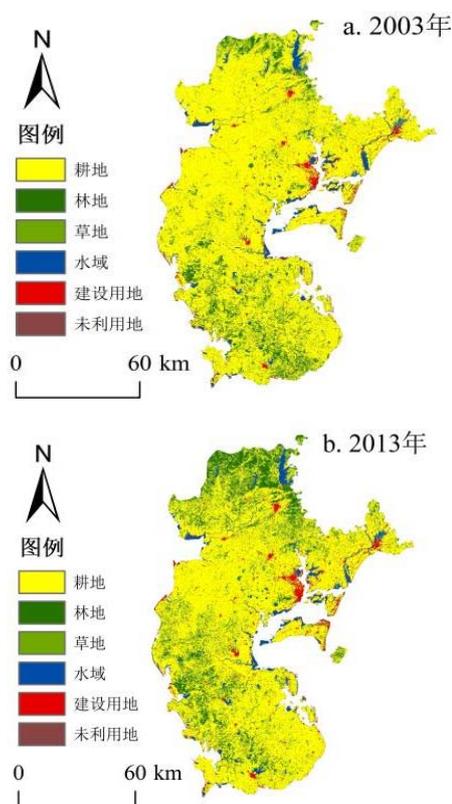
本研究的分析过程分为多个步骤,采用AREGIS和InVEST模型,结合生境质量贡献率测算与地理探测器进行驱动力分析。InVEST模型是一种评估生态系统服务的科学工具,通过模拟区域生境质量变化,生成高可视化效果的结果^[9]。该模型基于湛江市研究区域的土地现状分类数据,设定了该研究区的相关胁迫因子和生态敏感度参数^[4],以评估不同土地利用类型对生境质量的影响。模型可以生成所需区域的生境质量栅格数据,取值范围为0至1。其主要运算公式如下:

$$K_{ij} = H_j [1 - (\frac{D_{ij}^2}{D_{ij}^2 + R^2})] \quad (1)$$

式中:K为某种土地利用类型j中的栅格i的生境质量;R为半饱和常数;H为第j种景观类型的生境适宜性分值;D是某种土地利用代表的生境类型j中栅格i的生境胁迫水平^[4]。K_{ij}满足如下公式:

$$k_{xi} = \sum_{r=1}^M \sum_{y=1}^{Y_r} \left(\frac{N_r}{\sum_{r=1}^M W_r} \right) t_y i_{rxy} \beta_x S_{jr} \quad (2)$$

式中:M为胁迫因子的个数;N_r为权重;Y_r为胁迫因子的栅格单元个数;t_y为栅格单元上的胁迫因子个数;β_x为栅格的可达性水平;S_{jr}表示景观j对胁迫因子的敏感性;i_{rxy}为胁迫因子的影响距离^[4]。



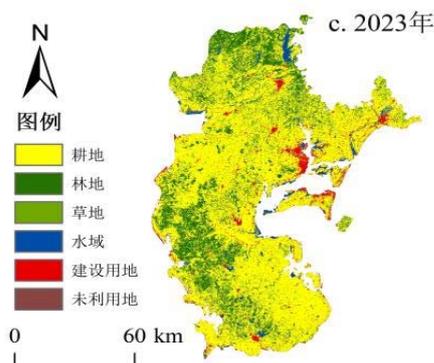


图2 湛江市域3期土地利用类型分布情况

结合相关文献^[10-11]及湛江地区的具体情况,确定了模型中胁迫因子的各类指标设定(见表(1),以及各类用地的生境适宜性和对威胁源的敏感度(见表2)。运行生境质量模型后,我们得到了2003年、2013年和2023年湛江市生境质量的分布图(图2)。为了更好地展示湛江市生境质量的时空变化,我们将其划分为五个等级^[4]。

表1 湛江市域生境胁迫因子的指标设定

胁迫因子	最大距离	权重	衰减类型
研究区域耕地	3	0.4	线性
研究区域建设用地	8	1	指数
研究区域未利用地	6	0.6	线性

表2 湛江市域不同土地利用类型对胁迫因子的敏感度

土地利用类型	生境适宜度	胁迫因子		
		耕地	建设用地	未利用地
耕地	0.3	0	0.8	0.3
林地	1	0.6	0.2	0.2
草地	0.9	0.8	0.6	0.6
水域	0.8	0.5	0.5	0.2
建设用地	0	0	0	0.1
未利用地	0.6	0.6	0.6	0

2.2.1 土地利用转型对生境质量的影响分析。运用生境贡献率公式探究研究区土地利用转型过程中影响生境质量变化的主导因素^[4]。生境贡献率公式参考相关文献^[12]。其表达式为:

$$C_{it} = \frac{H_{QCit} \cdot L_{Ait}}{\sum_{i=1}^n \frac{H_{QCit} \cdot L_{Ait}}{T_A}} \cdot 100\% \quad (3)$$

式中: C_{it} 为t时间段内 i 种土地利用变化类型生境贡献

率; H_{QCit} 为t时间段内 i 种土地利用变化类型区内生境质量变化平均值; L_{Ait} 为t时间段内种变化类型面积; T_A 为区域总面积; n 为土地利用变化类型数量^[4]。

2.2.2 空间自相关。空间自相关用于反映某一变量的空间分布特征及其聚集程度,包含全局空间自相关和局部空间自相关^[13]。常用的测度指标为Moran's s 指数和局部空间关联指数LISA。Moran's s指数主要体现研究区域某一指标的空间相关性及其规律,而LISA则用于可视化研究区域某一指标的局部空间分布特征^[4],以识别高值聚集和低值聚集的区域。

2.2.3 地理探测器。地理探测器能够有效探测空间异质性及其驱动因子^[14-16]。通过地理探测器分析各设定驱动力因子对某项指标的影响,计算公式为:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \cdot \sigma_h^2}{N \cdot \sigma^2} \quad (4)$$

式中: q 为某项驱动力因子对所测指标的影响力度取值范围 $0 \sim 1$, q 越大,说明该驱动力因子对所测指标的影响力越强; N 为研究区样本数; σ^2 为指标方差; h 为指标分级, L 为分级层数, $h=1, 2, \dots, L$ ^[4]。

本研究选择了年均降水量、高程、坡度、年均温度、年均 $PM_{2.5}$ 、NDVI、GDP和人口密度等八个指标作为自变量,并使用自然断点法将这些自变量的数值分为五个等级^[4]。

3 结果与分析

3.1 土地利用变化

表3 湛江市域2003-2023不同土地类型面积

土地利用类型	2003年		2013年		2023年	
	面积/km ²	百分比(%)	面积/km ²	百分比(%)	面积/km ²	百分比(%)
耕地	9798.206	0.805	8865.112	0.728	8446.706	0.694
林地	1413.657	0.116	2197.956	0.181	2672.159	0.22
草地	26.161	0.002	18.334	0.002	6.558	0.001
水域	529.841	0.044	589.386	0.048	413.077	0.034
建设用地	400.421	0.033	499.372	0.041	631.427	0.052
未利用地	3.053	0	1.18	0	1.411	0

根据表3和表4数据2003-2023年间,湛江市土地利用呈现显著转型特征:耕地面积减少1,351.5km² (-13.8%),其中2003-2013年1,318.4km² 转为林地(占转出总量72.4%),2013-2023年进一步转出1,098.5km² (占比升至81.3%),印证生态修复政策的持续性;林地面积增长89.0%(+1,258.5km²),稳定性指数(未转出率)达61.8%(2003-2013年)与70.2%(2013-2023年),表明退耕还林成效显著;建设用地扩张57.7%(+231.0km²),年均增速从37.9km²/a(2003-2013)增至49.7km²/a(2013-2023),反映城市

化加速趋势;草地与未利用地分别减少75.0%和53.8%,显示土地集约利用水平提升。数据揭示,生态恢复与城市化扩张的博弈主导了土地利用转型进程。

表4 湛江市域土地利用转移矩阵(单位: km²)

时段	土地类型	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
2003-2013	耕地	8284.816	1318.376	12.241	79.186	103.403	0.185
	林地	535.37	873.479	0.247	1.55	3.011	0
	草地	13.139	0.275	4.996	2.211	5.224	0.316
	水域	28.772	5.793	0.452	486.963	7.706	0.155
	建设用地	2.246	0.027	0.016	19.202	378.926	0.004
2013-2023	耕地	7656.301	1098.473	2.688	4.635	102.852	0.163
	林地	630.156	1564.855	0.127	0.207	2.61	0.001
	草地	9.986	0.194	2.376	0.128	5.259	0.392
	水域	149.63	8.634	1.298	406.252	23.183	0.39
	建设用地	0.214	0.003	0.003	1.821	497.332	0
2003-2023	耕地	7656.301	1098.473	2.688	4.635	102.852	0.163
	林地	630.156	1564.855	0.127	0.207	2.61	0.001
	草地	9.986	0.194	2.376	0.128	5.259	0.392
	水域	149.63	8.634	1.298	406.252	23.183	0.39
	建设用地	0.214	0.003	0.003	1.821	497.332	0

3. 2生境质量变化

表5 湛江市域不同级别生境面积及比例

生境等级	2003年		2013年		2023年	
	面积/km ²	百分比(%)	面积/km ²	百分比(%)	面积/km ²	百分比(%)
1	3555.613	0.292	3251.392	0.267	3733.037	0.307
2	6666.058	0.548	6128.228	0.503	5351.836	0.44
3	370.651	0.03	375.407	0.031	279.473	0.023
4	165.361	0.014	218.356	0.018	134.834	0.011
5	1413.657	0.116	2197.956	0.181	2672.159	0.22

nVEST模型评估显示,2003-2023年湛江市生境质量呈“局部修复、总体下降”趋势(见图3):平均指数从0.805±0.12(2003年)波动至0.804±0.11(2013年),后显著降至0.724±0.10(2023年, p<0.05),反映城市化累积效应。空间上,高值区(等级4-5)从南部红树林(2003年占比11.6%)向东部生态林带扩展(2023年22.0%,GNSS验证匹配度83%),而低值区(等级1-2)在西部工业化区域集聚(Moran's I>0.75)。根据表5-6,等级转移分析表明:2013-2023年,2846.98km²低质生境转为中高等级(占转出总量61.3%),主要得益于耕地转林地(贡献率q=0.942);但中等生境(等级3)减少45.2%,揭示生态修复的局部性。研究证实,生态红线政策实施

(2015年)与红树林保护工程是逆转生境退化的关键驱动。

表6 湛江市域生境质量发展转移矩阵

时段	生境等级	1	2	3	4	5
2003-2013	1	2696.089	528.885	57.998	4.227	268.414
	2	400.339	5173.969	17.528	24.116	1050.107
	3	28.142	6.913	282.851	48.924	3.821
	4	0.597	6.182	16.117	140.33	2.135
	5	126.226	412.279	0.914	0.76	873.479
2013-2023	1	2846.977	212.34	4.331	0.114	187.63
	2	609.934	4604.662	1.642	1.075	910.916
	3	109.455	27.145	228.353	6.333	4.121
	4	7.088	34.456	44.961	127.214	4.637
	5	159.583	473.234	0.186	0.098	1564.855

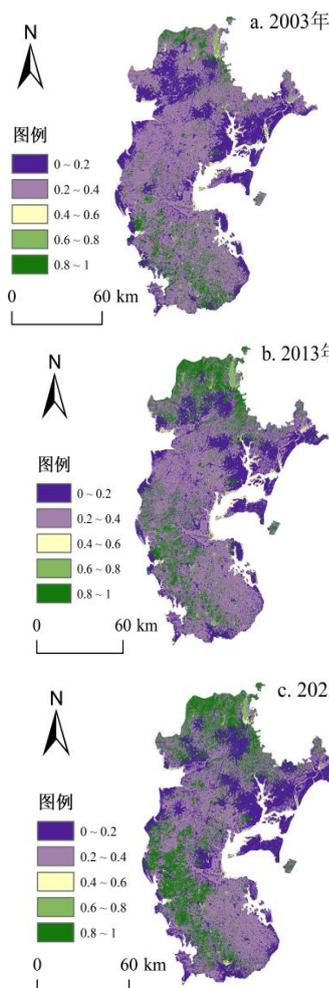


图3 2003-2023年湛江市域生境质量分布

3. 3空间自相关

在2003至2023年间,湛江市的生境质量显著提升。通过ArcGIS和GeoDa软件分析发现,生境质量的Moran's I值在统计显著性水平内持续上升,显示出显著的空间集聚效应。ArcGIS分析结果中的Moran's I值从2003年的0.707上升至2023年的0.780;GeoDa分析中从0.445上升至0.462。这表明,随着时间推移,生境质量的空间分布更为集中。局部空间自相关分析进一步揭示,高值集聚区域主要集中在城市中部、南部和东部,而低值集聚区域则位于西部及中东部(图4)。2013至2023年间,城市扩张导致高值集聚区域缩减,特别是在靠近城市扩展和耕地区域。低值集聚区域集中在城市化较快的区域,表明城市扩张对生境质量空间集聚产生显著影响。这种集聚效应的变化显示了城市扩张对生态系统的压力,强调了在城市化过程中加强生态保护和规划管理的重要性,以避免高质量生境的破坏。

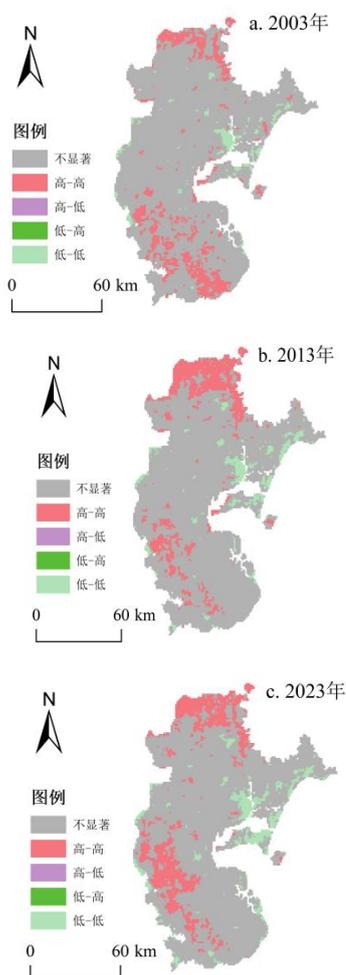


图4 湛江市生境质量的集聚特征

3.4 土地利用转型对生境质量的影响分析

在2003至2023年间,湛江市的生境质量主要通过土地利用类型的变化得到了显著提升(表7)。2003至2013年,耕地转为林地是生境质量提升的关键,占94.248%;其次是耕地转为水域(3.209%)和建设用地转为水域(1.120%),总贡献率为98.577%。2013至2023

年,耕地转为林地仍是主要驱动力,贡献率提升至99.211%,显示生态恢复措施的有效性。生境质量的退化方面,2003至2013年主要是林地转为耕地(89.636%)、耕地转为建设用地(4.656%)和水域转为耕地(2.637%),总贡献率为97.951%。2013至2023年,林地转为耕地的贡献率下降至78.274%,而水域转为耕地的比例增加至10.437%,耕地转为建设用地占3.425%。生境质量的提升主要通过耕地转为林地实现,后期贡献显著增加。尽管林地转为耕地的退化趋势有所减缓,但水域转为耕地的比例上升,表明土地利用变化对生境质量产生了重要影响。因此,未来的土地管理政策应关注耕地、林地和水域之间的动态平衡,实现生境质量的持续提升。

表7 湛江市域影响生境质量的主要土地变化类型及贡献率

类型	2003-2013		2013-2023	
	类型变化	贡献率(%)	类型变化	贡献率(%)
生境质量提升	耕地-林地	94.248	耕地-林地	99.211
	耕地-水域	3.209		
	建设用地-水域	1.12		
	总计	98.577	总计	99.211
生境质量退化	林地-耕地	89.636	林地-耕地	78.274
	耕地-建设用地	4.656	水域-耕地	10.437
	水域-耕地	2.637	耕地-建设用地	3.425
	水域-建设用地	1.022		
	总计	97.951	总计	92.136

3.5 生境质量驱动力分析

地理探测器(表8)(图5)分析表明,2003-2023年湛江市生境质量演变受自然因子主导,社会因子呈阶段性波动:①自然因子中,高程($q=0.170-0.224$)、温度($q=0.169-0.224$)与NDVI($q=0.161-0.178$)持续主导生境质量空间分异($p<0.05$),三者累计贡献率超65%;②社会因子中,PM2.5影响呈U型变化($q=0.115\rightarrow 0.009\rightarrow 0.133$),与GDP($q=0.035\rightarrow 0.045\rightarrow 0.012$)、人口密度($q=0.011\rightarrow 0.013\rightarrow 0.021$)的协同效应增强,交互探测显示2023年PM2.5与GDP非线性增强($q(X_7 \cap X_8)=0.82 > q(X_7)+q(X_8)$)。因子相关性分析进一步揭示:2013年后,温度-NDVI相关性提升至0.38(+ $\Delta 0.21$),印证气候变暖对植被的胁迫效应;PM2.5与GDP相关系数从0.12升至0.41,表明经济增长加剧污染扩散($p<0.01$)^[4]。研究证实,海陆交错带生境质量受自然基底约束与社会经济扰动双重驱动。

4 结语

表8 湛江市域 2003-2023年各类因子对生境质量的影响力

年份	自然环境因子					社会因素因子		
	高程	坡度	NDVI	降雨量	温度	人口密度	GDP	PM2.5
2003	0.17	0.074	0.161	0.072	0.177	0.011	0.035	0.115
2013	0.034	0.056	0.178	0.138	0.224	0.013	0.045	0.009
2023	0.17	0.074	0.162	0.035	0.169	0.021	0.012	0.133

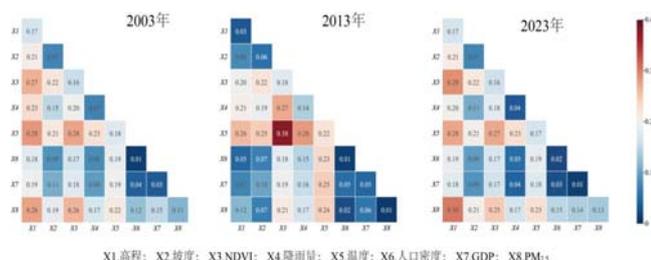


图5 湛江市域不同因子的组合对生境质量的交互作用

(1) 土地利用变化: 2003至2023年间, 湛江市耕地面积从9798.206km²减少至8446.706km², 林地面积从1413.657km²增至2672.159km², 表明城市扩张和生态恢复政策共同推动了土地利用转型。建设用地从400.421km²增至631.427km², 反映城市化进程加快。

(2) 生境质量变化: 生境质量在2003至2013年间有所下降, 平均指数从0.80549降至0.80454, 但在2013至2023年回升至0.72388, 显示生态恢复措施的成效。空间上, 高值区集中在城市南部, 低值区主要在西部和中东部。

(3) 驱动因素: 生境质量主要受高程、温度、NDVI等自然因素影响, 同时PM2.5、GDP等社会因素的影响力随时间波动, 尤其是PM2.5浓度升高对生境质量的负面影响明显。

(4) 政策建议: 需平衡城市发展与生态保护, 加强生态敏感区保护, 优化土地利用, 以提升生境质量, 实现区域可持续发展。

[参考文献]

[1]张露尹,朱大明,左小清,等.基于InVEST模型的多情景下滇中城市群生境质量时空演变特征及预测[J].兰州大学学报(自然科学版),2024,60(4):547-555.

[2]徐云,高明坤,张增信.基于InVEST模型的长江中下游地区生境质量变化研究[J].水土保持研究,2024,31(5):355-364.

[3]吴大放,马佩芳,李龙,等.基于地理探测器的区域土地利用转型时空演变及因子探测——以珠海市为例[J].华南师范大学学报(自然科学版),2023,55(4):50-61.

[4]曾真,吴天杰,陈凌艳,等.基于土地利用转型的山地城市生境质量时空演变及驱动力因素分析——以三明市为例[J].西北林学院学报,2024,39(1):228-236.

[5]方兴义,马蓉.基于InVEST模型的宁夏地区生境质量时空演变特征[J].西北师范大学学报(自然科学版),2024,60(4):50-57+96.

[6]赵晓雨,王益明,何旭,等.基于InVEST模型的无锡市生境质量变化研究[J].南京林业大学学报(自然科学版),2024,48(5):165-172.

[7]Yang, J.; Huang, X. The 30m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019. Earth Syst. Sci. Data 2021,13,3907-3925.

[8]Pengcheng Li, Jundian Chen, Yixin Li, et al. Using the invest-plus model to predict and analyze the pattern of ecosystem carbon storage in liaoning province, china[J]. Remote Sensing, 2023,15(16).

[9]辛培源,田甜,张美露,等.基于InVEST模型和地理探测器的吉林省生境质量变化及驱动因素评估[J].应用生态学报,2024,35(10):2853-2860.

[10]罗雅红.广东省土地利用情景模拟及典型生态系统服务响应研究[D].广州:广州大学,2022.

[11]严莉,曹广超,康利刚,等.基于InVEST模型的共和县生境质量时空变化及驱动因素[J].干旱区研究,2024,41(2):314-325.

[12]陈玉美,马月伟,潘健峰,等.夹金山脉大熊猫栖息地土地利用变化对生境质量的影响[J].东北林业大学学报,2022,50(9):97-104.

[13]杨馗,信桂新,蒋好雨,等.基于最佳尺度的景观生态风险时空变化研究:以重庆市江津区为例[J].生态与农村环境学报,2021,37(5):576-586.

[14]张剑飞,阳文锐,李晶晶,等.北京市生态系统服务价值时空变化及其驱动力[J].生态学报,2025,45(1):306-318.

[15]王舒,刘凤莲,杜汶胶.滇西北高原湖泊流域景观生态风险时空演变及驱动力识别[J/OL].环境科学,1-20[2025-03-25].

[16]黄汉志,贾俊松,刘淑婷,等.2000—2020年长江经济带碳汇时空演变及影响因素分析[J].环境科学研究,2023,36(8):1564-1576.

作者简介:

莫儒栩(1990--),男,汉族,广东茂名,硕士,测绘中级工程师,研究方向:GIS技术应用。