

DOI: 10.5846/stxb202103150695

张海涛, 李加林, 田鹏, 王中义, 沈杏雯. 基于土地利用变化的东海区大陆海岸带生境质量时空演变研究. 生态学报, 2023, 43(3): 937-947.

Zhang H T, Li J L, Tian P, Wang Z Y, Shen X W. Spatio-temporal evolution of habitat quality in the East China Sea continental coastal zone based on land use changes. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(3): 937-947.

基于土地利用变化的东海区大陆海岸带生境质量时空演变研究

张海涛¹, 李加林^{1,2,3,*}, 田 鹏¹, 王中义⁴, 沈杏雯¹

1 宁波大学地理与空间信息技术系, 宁波 315211

2 宁波大学东海战略研究院, 宁波 315211

3 宁波陆海国土空间利用与治理协同创新中心, 宁波 315211

4 浙江省龙泉市第一中学, 丽水 323799

摘要:人类活动对生态环境的影响主要表现为土地利用方式的变化。土地利用变化影响下的生境质量时空格局演变,对优化区域国土生态布局具有重要意义。利用 DEM 数据、气象数据、社会经济数据与 1980、1990、2000、2010、2018 年 5 期土地利用数据,通过 InVEST 模型、景观格局指数、地理探测器评估、描述、分析东海区大陆海岸带生境质量时空演变特征。结果表明:(1)1980—2018 年东海区大陆海岸带陆地面积增加,土地利用中林地所占比重最大,耕地、建设用地面积变化最明显,2000—2010 年土地利用转化最显著。土地变化北部大于南部、东侧大于西侧。(2)1980—2018 年生境质量均值为 0.75,总体生境质量较好,但呈下降趋势,2000—2010 年生境质量下降最明显,2010 年后下降速度减缓。生境质量斑块趋于破碎化、多样化、均匀化。(3)生境质量总体上从沿海向内陆下降,受岸线性质与围垦影响,北部生境质量由陆向海退化,南部生境退化沿海向陆推进。低等生境质量区呈现点一面一带的扩张趋势。(4)建设用地指数、高程、夜间灯光亮度、土壤类型、坡度为影响生境质量分布的主要因素,38 年间主导因素由高程变为建设用地指数。自然因素奠定了生境质量的梯级分布格局、人类活动的位置与强度推动了生境质量的演化。

关键词:InVEST 模型;生境质量;景观格局;因子探测;东海区大陆海岸带

Spatio-temporal evolution of habitat quality in the East China Sea continental coastal zone based on land use changes

ZHANG Haitao¹, LI Jialin^{1,2,3,*}, TIAN Peng¹, WANG Zhongyi⁴, SHEN Xingwen¹

1 Department of Geography and Spatial Information Techniques, Ningbo University, Ningbo 315211, China

2 Ningbo University Donghai Academy, Ningbo University, Ningbo 315211, China

3 Ningbo Universities Collaborative Innovation Center for Land and Marine Spatial Utilization and Governance Research at Ningbo University, Ningbo 315211, China

4 Zhejiang Province Longquan No.1 Middle School, Lishui 323799, China

Abstract: The impact of human activities on the ecological environment is mainly manifested in the change of land use patterns. The spatio-temporal pattern evolution of habitat quality under the influence of land use changes is of great significance to optimize the regional land ecological layout. Using DEM data, meteorological data, socio-economic data and land use data in 1980, 1990, 2000, 2010, 2018, the spatio-temporal evolution characteristics of habitat quality in the continental coastal zone of the East China Sea were evaluated, described and analyzed through InVEST model, landscape pattern index, and the geographical detector. The results indicate that: (1) the land area of the East China Sea continental coastal zone increased from 1980 to 2018. The forest land accounted for the largest proportion of land use, while the area of farmland and built-up land had the most obvious change. The most prominent land use conversion was in 2000—2010. The

基金项目:国家自然科学基金项目(41976209)

收稿日期:2021-03-15; 网络出版日期:2022-10-10

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: nbj2001@163.com

land use change in the northern was greater than that in the southern and the eastern was greater than that in the western. (2) The average value of habitat quality from 1980 to 2018 was 0.75, and the overall habitat quality was relatively good, but it showed a downward trend. The decline of habitat quality was the most obvious from 2000 to 2010, and the decline rate slowed down after 2010. Habitat quality patches tend to be fragmented, diversified and uniform. (3) Habitat quality generally declined from the coast to the inland. Affected by shoreline nature and reclamation, the habitat quality in the northern degraded from land to sea, and in the southern degraded from coast to land. Areas with low habitat quality presented a point-surface-zone expansion trend. (4) Bulid-up land index, elevation, night light index, soil type and slope were the main factors affecting habitat quality distribution, and the dominant factors changed from elevation to bulid-up index in 38 years. The natural factors determined the cascade distribution pattern of the habitat quality, and the location and intensity of human activities promoted the evolution of habitat quality.

Key Words: InVEST model; habitat quality; landscape pattern; factor detection; East China Sea continental coastal zone

联合国第五版《全球生物多样性展望》(GBO-5)报告中指出:2010—2020年的20个全球生物多样性目标仅部分实现了其中的6个,没有1个目标完全实现,其中陆地和海洋受保护区域的增长比例达标,但保护区的质量并不达标。生境质量退化已经成为全球面临的重要问题^[1-3]。生境质量是生态系统对个体或种群持续提供适宜性条件的能力^[4-5],具有显著的空间化特征。随着全球人口增加,人类活动的范围与强度日趋增大,人类对自然生态环境的干预越来越大^[6],城市化进程不断推进,人造景观代替自然景观破坏了生物多样性,生态环境遭到破坏出现不同程度退化。生境质量评价与时空演变研究,便于展现退化、受损或被破坏的生态系统,是脆弱区生态环境保护与修复的基础。开展高强度开发下的生境质量评价有助于揭示区域生态风险,对区域生态安全、土地利用规划提供决策依据。

当前生境质量评价主要包含基于实地测量的生境指标建模评价和基于模型的区域景观格局研究的方法。实测指标主要针对小尺度生境,如河流水质^[7-8]、土壤组分^[9]、植被演替^[10]、水生生物^[11]等。生境指标建模评价具有精度高、针对性强、利于研究微观机制的特点,但局限于小尺度生境质量的研究,样本数量受限,数据获取成本较高,不适于大范围生境质量评价。基于模型的区域景观格局研究方法综合了遥感和地理信息技术,虽然在小范围的精度不及指标建模评价法,但能从大尺度揭示生境演变的宏观特征,具有较好的空间可视化效果,数据易收集,成本相对较低。景观生态学研究的重点主要集中在空间异质性或格局的形成及动态;景观的等级结构特征;人类活动与景观结构,功能的反馈关系以及景观异质性(或多样性)的维持和管理等方面^[12]。土地利用是自然环境与人类活动相互作用的产物,土地利用类型的变化影响生态系统的物质与能量流动^[13],生境质量退化与土地利用变化密切相关^[14-16]。通过分析土地利用变化及其对生物多样性的胁迫程度计算生境质量的InVEST模型能够高效准确的评价大尺度区域的生境质量,能反映生境指数的空间分布格局^[17]。InVEST模型在探究城市化景观格局变化对生境质量的影响^[18]、重建区域过去及未来的生境演化特征^[19],评估土地利用的数量控制和空间控制的生态效应^[20]等方面得到了广泛应用。

海岸带是海陆作用的交界地带,是地表环境中敏感而复杂的地区。人口密集,经济活动频繁,开发强度较大。东海区大陆海岸带是中国最发达的海岸带之一,特别是改革开放后,作为我国海洋经济的前沿阵地,社会经济高速发展,迅速的城市化进程和高强度的开发不断重塑土地利用的方式与结构^[21],深刻影响着海岸带地区的生态环境质量^[22]。随着“绿水青山就是金山银山”的提出与落实,生态环境初步得到改善。监测与评价生境质量是合理开发和有效保护的必要前提,对优化国土空间布局、推动绿色发展,促进生态环境可持续具有重要的现实意义。本文基于土地利用对东海区大陆海岸带生境质量进行测算,分析不同等级生境质量斑块的面积与形态特征,从自然与社会经济因素方面选取指标探测影响生境质量空间分异与时间演变的驱动因素,对提升区域整体生境质量具有一定的理论与现实意义。

1 研究区概况

东海区大陆海岸带位于23°36'N—31°30'N,116°53'E—122°08'E之间,面积约 1.17×10^5 km²,北起苏沪交

界处,南至闽粤交界处,隶属上海、浙江、福建三省市,位于长江三角洲地区的东南部。岸线曲折、海湾发育,北部沿海以平原为主,海岸多为淤泥质,南部多低山丘陵,以基岩海岸为主(图 1)。区内盛行亚热带季风,降水丰富,河网密布。具有中纬度沿海平原的特点,人口密集,经济发达,城市发展迅速,2018 年已有上海、杭州、宁波三市 GDP 超万亿元。农耕历史悠久,是人类活动影响最大的地区之一。向陆一侧山地丘陵分布、人工林与次生林广布。区内历史上围填海频繁,沿海地带土地利用变化明显。

2 数据与方法

2.1 数据来源

1980、1990、2000、2010、2018 年 5 期土地利用数据、DEM 数据(SRTM)来源于中国科学院资源环境科学与数据中心,土地利用数据空间分辨率为 30 m,结合遥感影像对土地利用数据进行修正,考虑到研究区范围及 InVEST 模型计算速度将其重采样为 90 m,社会经济数据来源于统计年鉴,气象数据来源于中国气象局。受海岸线变迁的影响,为便于时空分析,统一采用 2018 年海岸线,为结合社会经济数据分析,向陆取到市级行政边界,由于海岛部分数据缺失,因此仅研究大陆海岸带。土地利用数据裁剪后将重分类为水田、旱地、有林地、灌木林地、疏林地、其他林地、高覆盖度草地、中覆盖度草地、低覆盖度草地、河渠、湖泊、水库坑塘、海涂、滩地、城镇用地、农村居民点、其他建设用地、未利用地、海水 19 种类型。

2.2 研究方法

2.2.1 InVEST 模型

InVEST(Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs)模型是美国自然资本项目组开发的、用于评估生态系统服务功能及其经济价值、支持生态系统管理和决策的模型系统^[23-24]。已在 20 多个国家和地区的空间规划、生态补偿、风险管理等环境管理决策中得到广泛应用^[25-27]。其中 Habitat Quality 模块主要利用每种威胁的相对影响、每种生境类型对每一种威胁的相对敏感性,生境栅格与威胁源之间的距离,将土地覆被和生物多样性威胁因素的信息生成生境质量地图^[28]。模型假设生境质量值高的区域能够更好地支持生物多样性的发展,生境质量值降低的区域则表示生物多样性的可持续性、弹性、自我恢复能力的降低,即生境质量值越高,生态服务能力越强。

生境退化度表示生境受威胁因子影响后的退化程度,威胁因子对生境的作用分为线性衰退与指数衰退,计算公式为^[19,29-30]:

$$i_{xy} = \begin{cases} 1 - \left(\frac{d_{xy}}{d_{rmax}} \right) \\ \exp \left[- \left(\frac{2.99}{d_{rmax}} \right) \times d_{xy} \right] \end{cases} \quad (1)$$

$$D_{xj} = \sum_1^r \sum_1^y \left(\frac{\omega_r}{\sum_{r=1}^n \omega_r} \right) \times r_y \times i_{rxy} \times \beta_x \times S_{jr} \quad (2)$$

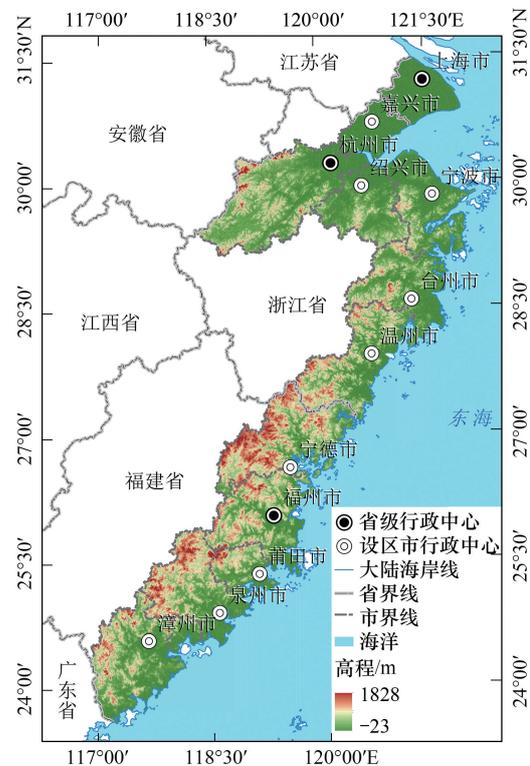


图 1 研究区位置及地形

Fig.1 Location and terrain of the study area

式中, i_{rxy} 为栅格 y 中的威胁因子 r 对栅格 x 的影响; d_{xy} 是栅格 x 和 y 之间的线性距离; d_{\max} 是威胁 r 的最大作用距离; D_{xj} 为土地利用类型 j 中栅格 x 的生境退化度; ω_r 为不同威胁因子的权重; r_y 为威胁因子强度; β_x 为生境抗干扰的水平; S_{jr} 为不同生境对不同威胁因子的敏感程度。生境退化度介于 0—1 之间, 值越大退化程度明显。

生境质量值是评价区域生境质量的无量纲的值, 计算公式为:

$$Q_{xj} = H_{xj} \times \left[1 - \left(\frac{D_{xj}^2}{D_{xj}^2 + k^2} \right) \right] \quad (3)$$

式中, Q_{xj} 是土地利用类型 j 中栅格 x 的生境质量; H_{xj} 为土地利用类型 j 中 x 的生境适宜性; k 是半饱和常数。生境质量值在 0—1 之间, 值越高生境质量越好。

根据研究区实际状况, 参考相关文献^[29,31-32], 选择水田、旱地、城镇用地、农村居民点、其他建设用地、未利用地作为威胁因子, 设置各威胁因子的相对权重、最大影响距离、空间衰退类型(表 1) 及各地类对威胁因子的生境适宜度(表 2)。

表 1 威胁因子及其胁迫强度

Table 1 Threat factors and their stress intensity

威胁因子 Threat factors	权重 Weight	最大影响距离 Maximum impact distance/km	衰退类型 Decay type
水田 Paddy field	0.8	1	线性
旱地 Non-irrigated arable land	0.6	1	线性
城镇用地 Urban land	0.8	8	指数
农村居民点 Rural settlements	0.7	5	指数
其他建设用地 Other built-up land	0.7	2	指数
未利用地 Bare land	0.5	1	线性

表 2 不同土地利用类型对威胁因子的敏感度

Table 2 Sensitivity of different land use types to threat factors

土地利用类型 Land use type	生境适宜性 Habitat suitability	威胁因子 Threat factors					
		水田 Paddy field	旱地 Non-irrigated arable land	城镇用地 Urban land	农村居民点 Rural settlements	其他建设用地 Other built-up land	未利用地 Bare land
水田 Paddy land	0.5	0	1	0.8	0.6	0.7	0.4
旱地 Non-irrigated arable land	0.5	1	0	0.8	0.7	0.8	0.4
有林地 Forest	1	0.6	0.7	0.9	0.8	0.8	0.5
灌木林地 Shrub	1	0.6	0.8	0.8	0.6	0.7	0.4
疏林地 Woods	0.8	0.7	0.7	0.8	0.7	0.8	0.5
其他林地 Other woodland	0.7	0.7	0.7	0.8	0.7	0.8	0.4
高覆盖度草地 Dense grass	0.9	0.7	0.6	0.8	0.8	0.7	0.6
中覆盖度草地 Moderate grass	0.8	0.7	0.6	0.7	0.7	0.7	0.6
低覆盖度草地 Spare grass	0.5	0.7	0.6	0.8	0.8	0.7	0.7
河渠 Stream and rivers	0.8	0.3	0.2	0.4	0.3	0.1	0.1
湖泊 Lakes	0.7	0.4	0.3	0.4	0.3	0.2	0.1
水库坑塘 Reservoir and ponds	0.7	0.3	0.3	0.5	0.3	0.2	0.2
海涂 Beach and shore	0.8	0.5	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2
滩地 Bottomland	0.7	0.5	0.2	0.2	0.3	0.2	0.3
城镇用地 Urban land	0	0	0	0	0	0.1	0
农村居民点 Rural settlements	0	0	0	0	0	0.4	0
其他建设用地 Other built-up land	0	0	0	0.6	0.5	0	0
未利用地 Bare land	0.3	0.4	0.3	0.5	0.4	0.4	0
海水 Sea	0.8	0.1	0	0	0.1	0.1	0.2

2.2.2 景观指数

景观指数是描述景观格局的重要指标,能够反映景观内部的结构组成与空间配置。本研究借助景观格局计算软件 Fragstats 4.2,从景观层面选取边缘密度、形状指数、蔓延度指数、香浓多样性指数、香浓均匀度指数,从类型层面选取斑块密度、最大斑块指数、面积加权平均形状指数、面积加权平均斑块分形指数、散布与并列指数作为景观格局指标^[33],分析生境质量等级斑块的结构与空间分布特征。

2.2.3 地理探测器

地理探测器是由王劲峰等^[34]提出的一种探测空间分异性、揭示其背后驱动因子的一种统计学方法。此方法所需的自变量为类型量,便于数据收集与处理,且对自变量的共线性免疫,利于进行驱动因子探测。参考相关文献^[35-37],选取自然因素(高程、坡度、土壤类型、降水量、气温、蒸散量)与社会经济因素(GDP、人口密度、建设用地指数、夜间灯光数据)作为自变量,生境质量值为因变量,其中土壤类型重分类为12类、其余因素以自然断点法分为6类。在研究区建立边长为10 km的格网,取格网中心点为采样点。建设用地指数为每个格网内建设用地面积占总面积的比重,由于1980年社会经济统计数据缺失,本研究对1990、2000、2010、2018年生境质量分布的驱动因子进行分析。

3 结果与分析

3.1 土地利用时空变化

东海区大陆海岸带土地总面积约 $1.17 \times 10^5 \text{ km}^2$,1980、1990、2000年土地利用以林地、耕地、草地为主,比重都高于90%,三类面积总占比逐年下降,2010、2018年林地、耕地、建设用地是主要土地利用类型,比重都高于87%,三类面积总占比逐年上升。2000—2010年期间,主要土地利用类型的组成结构发生了变化,主要表现为耕地减少、建设用地增长,2010年建设用地面积大于草地。

1980—2018年间土地利用类型变化的总面积为 $2.30 \times 10^4 \text{ km}^2$,占研究区总面积的19.58%,其中耕地面积净缩减 7177.83 km^2 ,海水净缩减 1102.17 km^2 ,草地净缩减 683.90 km^2 ,建设用地净增长 8658.68 km^2 ,林地面积净增长 248.15 km^2 ,未利用地净增长 43.23 km^2 ,水域面积净增长 13.83 km^2 (表3)。

表3 1980—2018年土地利用面积转移矩阵/ km^2

Table 3 The transfer matrix of land use area from 1980 to 2018

土地利用类型 Land use type	耕地 Farmland	林地 Woodland	草地 Grassland	水域 Water	建设用地 Build-up land	未利用地 Bare land	海水 Sea	总计 Total
耕地 Farmland	24276.24	2756.52	376.74	618.67	7259.21	3.75	18.71	35309.83
林地 Woodland	2163.15	57077.85	1929.02	204.99	997.23	12.98	26.93	62412.16
草地 Grassland	393.42	2529.03	6995.36	34.48	279.72	14.27	12.96	10259.24
水域 Water	607.65	144.56	72.52	2470.14	527.77	11.45	24.66	3858.74
建设用地 Build-up land	525.48	100.14	24.21	88.17	3286.60	0.17	3.62	4028.41
未利用地 Bare land	1.97	25.40	3.66	0.85	3.25	21.23	0.15	56.52
海水 Sea	164.08	26.81	173.83	455.28	333.30	35.90	309.60	1498.80
总计 Total	28132.00	62660.31	9575.34	3872.57	12687.09	99.75	396.63	117423.69

东海区大陆海岸带北部多为淤泥质海岸,南部多为基岩质海岸,土地利用变化总体上北部大于南部,东侧大于西侧。东侧沿海地带主要为耕地转建设用地,西侧山区主要为林地、草地变化,上海、杭嘉湖平原土地变化最为明显,平坦的地形为建设用地扩张提供了条件,南部土地利用变化主要集中于海湾附近,受山地与基岩海岸的影响,土地利用变化较小;长江入海口沿岸、杭州湾南岸、台州大港湾地区受淤泥质海岸淤进与围垦影响主要表现为水域转耕地、海水转水域,南部岸线附近土地利用基本保持不变(图2)。

3.2 东海区大陆海岸带生境质量评价

应用 Habitat Quality 模型计算出1980—2018年东海区大陆海岸带地区生境质量,将生境质量等间距分为

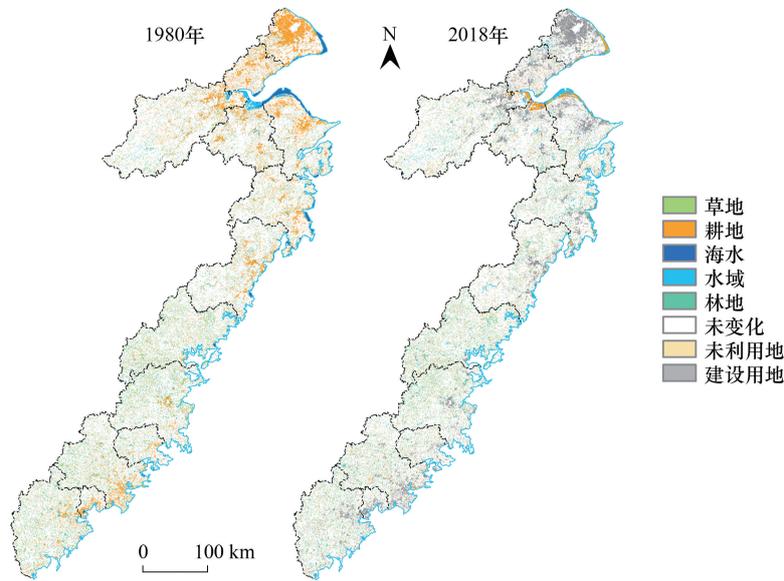


图 2 东海区大陆海岸带土地利用变化图

Fig.2 Land use change in the continental coastal zone of the East China Sea

5 类,低(0.00—0.20)、较低(0.20—0.40)、中等(0.40—0.60)、较高(0.60—0.80)、高(0.80—1.00),并利用景观格局指数对生境质量的演变进行表征。

1980 至 2018 年东海区大陆海岸带生境质量呈下降趋势,1980—2000 年经济发展速度较慢,土地利用变化较小,生境质量小幅下降,2000 至 2010 年经济迅速发展,城市化进程不断推进,生境质量下降最明显,随着国家对围垦的管控、城市扩张减缓和生态环境保护措施的布局与实施,2010 至 2018 年生境质量下降速度减缓。

由表 4 可知区内边缘密度整体呈上升趋势,2000—2010 年增长最多,主要是由于快速的城市化导致生境质量斑块破碎,边界密度增大。景观形状指数(LSI)用来表征斑块形状特点,区内 LSI 总体增加,生境斑块不规则程度增大,2000 至 2010 年开发强度最大,LSI 增长最多,生境斑块不规则程度最大。蔓延度指数是描述景观中斑块的团聚程度或延展趋势,高蔓延度值说明景观中的某种优势斑块类型形成了良好的连接性;反之则表明景观是具有多种要素的密集格局,景观的破碎化程度较高。1980—2018 年蔓延度指数整体较低并逐年减小,反映出研究区生境质量较为破碎。香浓多样性指数与香浓均匀度指数可以反映不同时期景观的多样性变化,不同年份香浓多样性指数增大说明斑块类型增加或各斑块类型在景观中呈均衡化分布,研究区香浓均匀度指数趋近于 1 表示优势度较低,说明生境等级中没有明显的优势类型且各类斑块在景观中趋于均匀分布。

表 4 不同年份生境质量景观指标

Table 4 Habitat quality landscape indicators in different years

年份 Year	平均生境质量值 Average habitat quality value	边缘密度 Edge density/ (m/hm ²)	形状指数 Landscape shape index	蔓延度指数 Contagion index	香浓多样性指数 Shannon's diversity index	香浓均匀度指数 Shannon's evenness index
1980	0.7671	26.1296	230.1417	51.3416	1.1153	0.6930
1990	0.7630	26.5674	233.8934	50.7507	1.1278	0.7007
2000	0.7622	25.7047	226.5008	50.8750	1.1346	0.7050
2010	0.7400	27.8868	245.1994	47.6874	1.2011	0.7463
2018	0.7270	27.6506	243.1757	46.9948	1.2231	0.7600

由图 3 可知总体上生境质量等级自沿海向内陆提高,沿海平原地区聚集了大量的人口、农田与城镇,高强度的土地开发与利用加大了生态环境的破坏,在不同的发展阶段,城市化速度不同,低等级的生境质量区域早期以城市为中心,呈点-面-带的趋势扩张,北部主要集中在环杭州湾地区,向海推进,南部低等级区域集中在海湾附近,向陆扩张。生境质量高、较高的区域主要分布在西侧山地,西侧山地后期生境退化出现了低等级的生境质量点状区域。中等生境质量分布的区域与耕地的分布密切相关,杭州南岸由于围垦,低等级生境质量区向海推进。

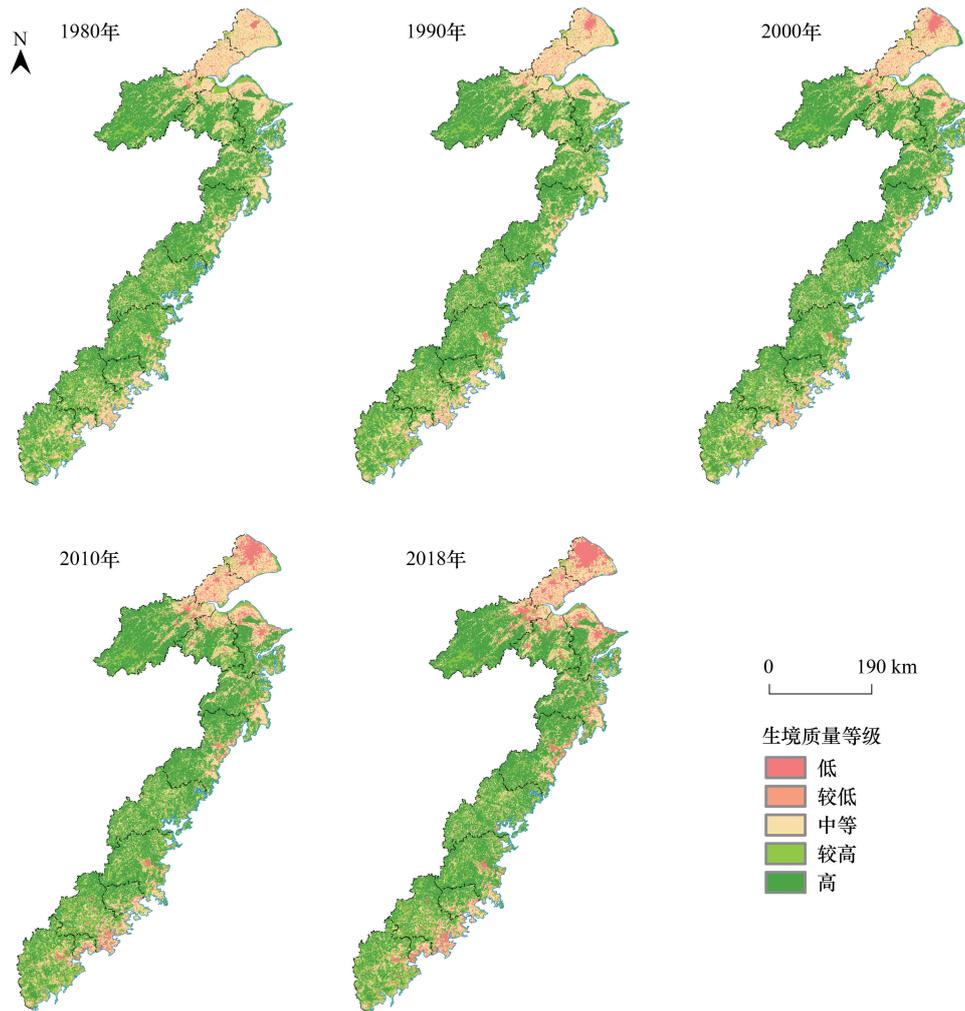


图 3 生境质量分布图

Fig.3 Habitat quality distribution

从不同年份相同等级生境质量的面积中可看出研究区生境质量以中、高等为主,低、较低等生境质量面积增加,中等、较高、高等级生境质量面积小幅下降,生境质量整体下降。不同等级斑块密度变化较小。最大斑块面积与同类景观面积的比为最大斑块指数,可表征最大斑块对同类景观的影响程度,1980 至 2018 年除中、高等生境外,其余等级生境质量最大斑块指数整体小于 1%,表示斑块较为破碎,低、较低等生境最大斑块指数增大,中、较高、高等生境最大斑块指数减小。面积加权平均形状指数越接近 1 表示斑块形状越接近方形,值越大表示边界越不规则,中、高等生境质量主要分布在耕地与林地区域,受城市化、草地分布、生境小斑状退化等影响,斑块形状呈不规则化,面积加权平均形状指数较大,由此造成的负向边缘效应可能导致这些区域生境质量退化。面积加权平均斑块分形指数在一定程度上反映了人类活动对景观格局的影响,值越高表示人类

活动对其干扰越小,通常其值上限可能为 1.5,从整体看 1980 至 2018 年除低等生境的值增加外,其余等级均有所下降,中、高等生境的值较大,表示其受人类活动的影响相对较小。散布与并列指数可以在一定程度上反映景观类型的混合程度,值越高表示景观之间彼此临近,所有类型的散布与并列指数都在增长,表示不同等级生境在空间上逐渐均匀分布,较低、中等等级生境的值较高,表示其相对分散(表 5)。

表 5 1980—2018 年不同等级生境质量景观格局指标

Table 5 Landscape pattern indicators of different classes of habitat quality from 1980 to 2018

类型 Class	年份 Year	面积 Area/hm ²	斑块密度 Patch density/ (个/hm ²)	最大斑块指数 Largest patch index/%	面积加权平 均形状指数 Area-weighted mean shape index	面积加权平均 斑块分形指数 Area-weighted mean patch fractal dimension	散布与并列指数 Interspersion and juxtaposition index
低 Extremely low	1980	403075.44	0.2029	0.1293	2.2150	1.1045	40.4752
	1990	477227.70	0.2025	0.3186	3.1597	1.1241	40.9616
	2000	586820.70	0.1998	0.4629	3.4821	1.1332	41.8093
	2010	1021934.07	0.2094	0.9437	6.1810	1.1719	54.0384
	2018	1269056.97	0.2029	1.2030	5.2028	1.1618	59.7620
较低 Low	1980	5659.47	0.0022	0.0094	2.7520	1.1256	78.0116
	1990	5898.42	0.0023	0.0094	2.7281	1.1250	76.8963
	2000	5243.94	0.0017	0.0028	2.4565	1.1222	82.0089
	2010	5497.47	0.0019	0.0026	2.3909	1.1177	85.1201
	2018	9990.54	0.0020	0.0110	2.5122	1.1177	88.8488
中等 Medium	1980	3670350.57	0.1944	7.0453	34.5218	1.2951	74.2142
	1990	3633052.50	0.1973	6.7707	35.5818	1.2960	74.5719
	2000	3471289.83	0.1876	6.3030	35.9845	1.2959	74.8789
	2010	3080820.42	0.2077	4.5060	28.1681	1.2783	76.3974
	2018	2916803.52	0.2077	3.9711	22.8235	1.2656	76.0529
较高 High	1980	1784979.99	0.2502	0.9209	6.5205	1.1799	60.0082
	1990	1759899.15	0.2561	0.5366	6.1524	1.1772	60.3507
	2000	1681957.71	0.2160	0.4794	6.2225	1.1778	62.0402
	2010	1793715.03	0.2399	0.6754	6.4030	1.1779	65.8803
	2018	1739714.76	0.2379	0.6883	6.5488	1.1774	67.1963
高 Extremely high	1980	5887822.77	0.0683	22.4285	80.2297	1.3444	55.1401
	1990	5875810.47	0.0682	22.4180	80.3241	1.3451	55.5830
	2000	6006576.06	0.0596	23.2914	77.8231	1.3409	55.2429
	2010	5849921.25	0.0661	21.0055	74.9848	1.3382	61.6854
	2018	5816322.45	0.0652	20.7997	75.7020	1.3389	63.8241

3.3 驱动因子分析

从因子解释力 q 值来看(图 4),1990 年影响因子对生境质量的解释程度中高程>土壤类型>建设用地指数>坡度>夜间灯光亮度>GDP>人口密度>气温>降水量>蒸散量。可见高程是影响 1990 年生境质量分布的主导因素,2000 年影响因子对生境质量的解释程度中高程>建设用地指数>土壤类型>夜间灯光亮度>坡度>GDP>人口密度>气温>降水量>蒸散量,主导因子为高程,2010 年影响因子对生境质量的解释程度中建设用地指数>高程>夜间灯光亮度>坡度>土壤类型>GDP>人口密度>降水量>气温>蒸散量,城市建设用地指数为主导因素,2018 年影响因子对生境质量的解释程度中建设用地指数>夜间灯光亮度>高程>土壤类型>坡度>GDP>人口密度>气温>降水量>蒸散量,主导因素为建设用地指数。1990 至 2018 年影响生境质量分布的主导因素由高程转为建设用地指数。

自然因素与社会经济因素对东海区大陆海岸带生境质量空间分布的解释力不同,自然因素解释力整体呈

下降趋势,其中高程、坡度、土壤类型的解释力较高,降水量、气温、蒸散量的解释力较低,社会经济因素解释力呈波动上升趋势,其中 GDP 与人口密度的解释力相对较低。自然因素的解释力相对比较稳定、社会经济因素解释力变化较为明显,生境质量空间分布与建设用地指数、高程、夜间灯光亮度、土壤类型、坡度、GDP、人口密度密切相关。自然因素的奠定了生境质量梯级分布的基本格局,社会经济因素的位置与强度推动了生境质量的时空演化。

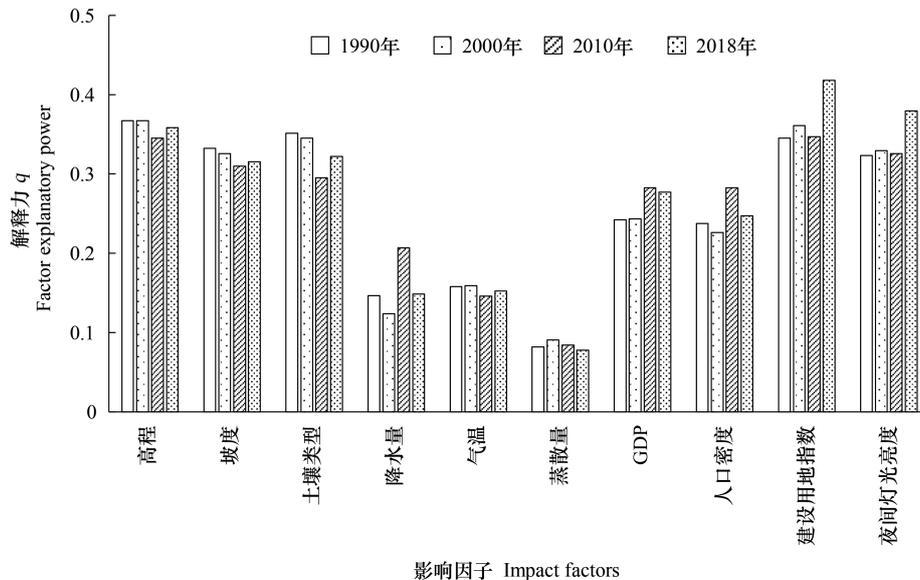


图4 不同影响因子解释力

Fig.4 Explanatory power of different influencing factors

4 讨论与结论

4.1 讨论

东海区大陆海岸带生境质量均值为 0.75,处于较高水平,1980—2018 年总体呈下降趋势,不同年代下降速度不同,土地利用类型转化与生境质量变化显示 2000—2010 年是土地利用变化最显著、生境质量下降最明显的时期。这一时期是东海区大陆海岸带经济快速发展时期。城市规模不断扩大、人口持续增加、建设用地扩张加速了区域生境质量退化。1980—2018 年自然因素对生境质量空间分异的解释力小幅下降,社会经济因素的解释力较大幅度上升。高程、坡度、土壤类型奠定了生境质量空间分异的基础,海拔较高区域以山地丘陵为主,林地、草地广布,山区作为陆地生态系统的重要组成部分,物种丰富、生态系统生产力较高,受高程与坡度组合影响,不适于经济开发,人类活动干扰较小,生境质量较好^[38],生境质量退化区域集中在向海一侧,受人类高强度的经济开发影响,滩涂围垦,建设用地大面积扩张导致土地利用类型转变,生态系统提供服务的能力减弱,生境质量下降。

栖息地斑块的面积和形态影响区域生物多样性与生态系统服务供给,高等级生境质量斑块面积下降、分布趋于均匀破碎。在保护与修复中,应优先对生境质量退化的山区进行生态恢复,由于城市扩张,沿海平原地带已被城市侵占,生态系统发生不可逆性损坏,受社会经济因素影响,大面积生态重建已不符合发展规划,为保障城市地区基本的生态安全与生态系统服务供应,应采取针对性较强的生态重建措施,调整与布局城市绿色空间、设置禁止开发边界、加强城市生态廊道建设、构建海绵城市。

InVEST 模型对大尺度生境质量评估具有较高的精度^[32, 39],对生境质量退化区具有较好的空间化效果。但目前参数设定受限于经验系数,具有一定的主观性,添加验证环节有助于提高 InVEST 模型的评估精度,同

时由于社会经济因素缺失与难以附加高分辨率的空间信息,导致以空间采样分析驱动因素的实现仍有一定难度。在未来的研究中对东海区土地覆被、生境质量变化驱动力的深入研究,不同情景生境质量的模拟与预测^[40],及生境保护措施实施效果的评价也更利于揭示生境质量的演化机制^[20]。

4.2 结论

本研究从土地利用变化、生境质量评价与驱动因素分析三方面描述了东海区大陆海岸带生境质量的时空演变格局,得出如下结论:

(1) 1980—2018 年受围填海影响,东海大陆海岸带陆地面积增加,土地利用类型中林地所占比重最大,耕地、建设用地面积变化最明显,2000—2010 年土地利用变化最明显。土地变化北部大于南部、东侧大于西侧。

(2) 1980—2018 年生境质量均值为 0.75,总体生境质量较好,但随时间变化呈下降趋势,2000—2010 年生境质量下降最明显,2010 年后下降速度减缓。生境质量等级斑块趋于破碎化、多样化、均匀化。

(3) 生境质量总体上从沿海向内陆下降,受岸线性质与围垦影响,北部生境质量由陆向海退化,南部生境退化沿海向陆推进。低等生境质量区呈现点—面—一带的扩张趋势。

(4) 建设用地指数、高程、夜间灯光亮度、土壤类型、坡度为影响生境质量分布的主要因素,主导因素由高程变为建设用地指数。自然因素奠定了生境质量的梯级分布格局、人类活动的位置与强度推动了生境质量的变化。

参考文献(References):

- [1] Vitousek P M, Mooney H A, Lubchenco J, Melillo J M. Human Domination of Earth's Ecosystems. *Science*, 1997, 227(5325): 494-499.
- [2] Wilcove D S, Rothstein D, Dubow J, Phillips A, Losos E. Quantifying Threats to Imperiled Species in the United States. *BioScience*, 1998, 48(8): 607-615.
- [3] Czech B, Krausman P R, Devers P K. Economic Associations among Causes of Species Endangerment in the United States; Associations among causes of species endangerment in the United States reflect the integration of economic sectors, supporting the theory and evidence that economic growth proceeds at the competitive exclusion of nonhuman species in the aggregate. *BioScience*, 2000, 50(7): 593-601.
- [4] Hall L S, Krausman P R, Morrison M L. The Habitat Concept and a Plea for Standard Terminology. *Wildlife Society Bulletin*, 1997, 25(1): 173-182.
- [5] 欧阳志云,王效科,苗鸿. 中国陆地生态系统服务功能及其生态经济价值的初步研究. *生态学报*, 1999, 19(5): 607-613.
- [6] 魏建兵,肖笃宁,解伏菊. 人类活动对生态环境的影响评价与调控原则. *地理科学进展*, 2006, 25(2): 36-45.
- [7] 陈森,苏晓磊,黄慧敏,高婷,党成强,董蓉,曾波,陶建平. 三峡库区河流生境质量评价. *生态学报*, 2019, 39(1): 192-201.
- [8] 曾鹏,汪昱昆,刘焱焱,王话翔,陈氏权,车越. 基于河段尺度的太湖流域城市河流生境评价. *应用生态学报*, 2020, 31(2): 581-589.
- [9] Zhang Y H, Xu X L, Li Z W, Xu C H, Luo W. Improvements in soil quality with vegetation succession in subtropical China Karst. *Science of the Total Environment*, 2021, 775: 145876.
- [10] Li T, Wu M H, Duan C Q, Li S Y, Liu C E. The effect of different restoration approaches on vegetation development in metal mines. *Science of the Total Environment*, 2022, 806: 150626.
- [11] Simeone D, Tagliaro C H, Beasley C R. Amazonian freshwater mussel density: a useful indicator of macroinvertebrate assemblage and habitat quality. *Ecological Indicators*, 2021, 122: 107300.
- [12] 邬建国. 景观生态学——概念与理论. *生态学杂志*, 2000, 19(1): 42-52.
- [13] 傅伯杰,张立伟. 土地利用变化与生态系统服务:概念、方法与进展. *地理科学进展*, 2014, 33(4): 441-446.
- [14] 傅伯杰,陈利顶,马克明. 黄土丘陵区小流域土地利用变化对生态环境的影响——以延安市羊圈沟流域为例. *地理学报*, 1999, 54(3): 241-246.
- [15] 郭旭东,陈利顶,傅伯杰. 土地利用/土地覆被变化对区域生态环境的影响. *环境科学进展*, 1999, 7(6): 66-75.
- [16] 刘硕. 国际土地利用与土地覆盖变化对生态环境影响的研究. *世界林业研究*, 2002, 15(6): 38-45.
- [17] 唐尧,祝炜平,张慧,宋瑜. InVEST 模型原理及其应用研究进展. *生态科学*, 2015, 34(3): 204-208.
- [18] Zhu C M, Zhang X L, Zhou M M, He S, Gan M Y, Yang L X, Wang K. Impacts of urbanization and landscape pattern on habitat quality using OLS and GWR models in Hangzhou, China. *Ecological Indicators*, 2020, 117: 106654.
- [19] 张学儒,周杰,李梦梅. 基于土地利用格局重建的区域生境质量时空变化分析. *地理学报*, 2020, 75(1): 160-178.
- [20] 吴健生,冯喆,高阳,彭建. 基于 DLS 模型的城市土地政策生态效应研究——以深圳市为例. *地理学报*, 2014, 69(11): 1673-1682.

- [21] Adrianto H A, Spracklen D V, Arnold S R. Relationship between fire and forest cover loss in Riau Province, Indonesia between 2001 and 2012. *Forests*, 2019, 10(10): 889.
- [22] 马万栋, 张渊智, 施平, 邢前国. 海岸带土地利用/土地覆被变化研究进展. *地理科学进展*, 2008, 27(5): 87-94.
- [23] 侯红艳, 戴尔阜, 张明庆. InVEST 模型应用研究进展. *首都师范大学学报:自然科学版*, 2018, 39(4): 62-67.
- [24] 张徐, 李云霞, 吕春娟, 毕如田, 夏露, 郭岩松, 王煜, 许彩彩, 孙波. 基于 InVEST 模型的生态系统服务功能应用研究进展. *生态科学*, 2022, 41(1): 237-242.
- [25] Terrado M, Sabater S, Chaplin-Kramer B, Mandle L, Ziv G, Acuña V. Model development for the assessment of terrestrial and aquatic habitat quality in conservation planning. *Science of the Total Environment*, 2016, 540: 63-70.
- [26] He J H, Huang J L, Li C. The evaluation for the impact of land use change on habitat quality: a joint contribution of cellular automata scenario simulation and habitat quality assessment model. *Ecological Modelling*, 2017, 366: 58-67.
- [27] Gong J, Xie Y C, Cao E J, Huang Q Y, Li H Y. Integration of InVEST-habitat quality model with landscape pattern indexes to assess mountain plant biodiversity change: a case study of Bailongjiang watershed in Gansu Province. *Journal of Geographical Sciences*, 2019, 29(7): 1193-1210.
- [28] 马良, 金陶陶, 文一惠, 吴秀芹, 刘桂环. InVEST 模型研究进展. *生态经济*, 2015, 31(10): 126-131, 179.
- [29] 刘园, 周勇, 杜越天. 基于 InVEST 模型的长江中游经济带生境质量的时空分异特征及其地形梯度效应. *长江流域资源与环境*, 2019, 28(10): 2429-2440.
- [30] 钟莉娜, 王军. 基于 InVEST 模型评估土地整治对生境质量的影响. *农业工程学报*, 2017, 33(1): 250-255.
- [31] 李胜鹏, 柳建玲, 林津, 范胜龙. 基于 1980—2018 年土地利用变化的福建省生境质量时空演变. *应用生态学报*, 2020, 31(12): 4080-4090.
- [32] 程爱国, 程鹏, 吴楠. 基于 InVEST 模型的区域生境质量对土地覆被变化的响应——以合肥市为例. *安徽农学通报*, 2020, 26(18): 60-66.
- [33] 田鹏, 李加林, 姜忆涓, 史小丽, 王丽佳, 刘瑞清, 童晨, 周子靖, 邵姝遥. 海湾景观生态脆弱性及其对人类活动的响应——以东海区为例. *生态学报*, 2019, 39(4): 1463-1474.
- [34] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望. *地理学报*, 2017, 72(1): 116-134.
- [35] 杨洁, 谢保鹏, 张德罡. 黄河流域生境质量时空演变及其影响因素. *中国沙漠*, 2021, 41(4): 12-22.
- [36] Wu J S, Li X C, Luo Y H, Zhang D N. Spatiotemporal effects of urban sprawl on habitat quality in the Pearl River Delta from 1990 to 2018. *Scientific Reports*, 2021, 11(1): 1-15.
- [37] Wu L L, Sun C G, Fan F L. Estimating the characteristic spatiotemporal variation in habitat quality using the InVEST model—A Case Study from Guangdong-Hong Kong-Macao greater bay area. *Remote Sensing*, 2021, 13(5): 1008.
- [38] Yu Y Y, Li J, Zhou Z X, Ma X P, Zhang X F. Response of multiple mountain ecosystem services on environmental gradients: how to respond, and where should be priority conservation? *Journal of Cleaner Production*, 2021, 278: 123264.
- [39] 陈雅倩, 赵丽, 陶金源, 张蓬涛. 基于 InVEST 模型的未利用地开发前后生境质量评价——以唐县为例. *中国生态农业学报:中英文*, 2020, 28(7): 1093-1102.
- [40] 褚琳, 张欣然, 王天巍, 李朝霞, 蔡崇法. 基于 CA-Markov 和 InVEST 模型的城市景观格局与生境质量时空演变及预测. *应用生态学报*, 2018, 29(12): 4106-4118.