

DOI: 10.20103/j.stxb.202303110455

刘江容, 林晓凤, 王豪伟, 王翠平. 海峡两岸生态环境质量差异性评价及港口发展对其的影响. 生态学报, 2024, 44(5): 1837-1853.

Liu J R, Lin X F, Wang H W, Wang C P. Ecological quality differentiation of the environment and impacts of port development on both coasts of the Taiwan Strait. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(5): 1837-1853.

海峡两岸生态环境质量差异性评价及港口发展对其的影响

刘江容^{1,2}, 林晓凤^{1,2}, 王豪伟³, 王翠平^{1,2,*}

1 集美大学港口与海岸工程学院, 厦门 361021

2 厦门市绿色与智慧海岸工程重点实验室, 厦门 361021

3 中国科学院城市环境研究所城市环境与健康重点实验室, 厦门 361021

摘要: 21 世纪以来, 中国城市化进程不断加快, 大量人口涌入沿海地区, 海峡两岸经贸活动也越来越频繁, 导致脆弱的沿海地区面临较大的生态风险, 因此动态监测并评价两岸生态质量对推动两岸城市生态文明建设及促进两岸和谐统一发展具有重要意义。利用谷歌地球引擎(GEE)平台调用 2000—2022 年 Landsat 及 MODIS 数据集, 采用主成分分析法构建遥感生态指数基础上, 运用差值分析、空间自相关分析评价两岸生态环境质量的差异性, 并在建立两岸主要港口多环缓冲区的基础上探讨港口规模及其周边城市建设对生态环境质量的影响。结果表明: (1) 2000—2010 年海峡两岸生态环境质量呈“西升东降”的特征, 2010—2022 年海峡两岸生态环境质量均呈波动上升趋势, 新冠疫情期间呈先增后减的趋势, 两岸生态环境质量差距逐渐缩小。(2) 东岸生态环境质量优于西岸, 生态环境质量优良等级区域主要分布在太姥山、玉山山脉等山地区域, 较差等级区域主要分布在湖里区和晋江市等城市工业聚集区, 2000—2010 年生态环境质量等级显著退化的区域主要为东岸的山地区域, 2010—2020 年等级显著退化的区域主要为西岸的沿海区域。(3) 两岸生态环境质量具有较强的空间自相关性, 处于山地区域的城市呈高值聚集, 西岸的漳州泉、福州市和莆田市以及东岸近海岸城市呈低值聚集。(4) 海峡两岸港口规模及其周边城市建设对生态环境质量的影响具有相似性, 离港口距离越远, 城市建设用地面积占比越小, 生态环境质量越好, 班轮运输阶段港口规模越大其周边生态环境质量也越差; 直航运输阶段港口规模对生态环境质量的影响减弱并逐步改善。(5) 受新冠疫情影响, 港口周边生态环境质量稍有转好, 且西岸港口规模较大的厦门港和福州港较东岸港口更注重生态建设。研究可为海峡两岸城市生态文明建设提供基础数据支撑, 也为生态港口规划提供科学决策依据, 同时为促进两岸和谐发展提供助力。

关键词: 海峡两岸; 遥感生态指数; 谷歌地球引擎平台; 港口; 生态建设

Ecological quality differentiation of the environment and impacts of port development on both coasts of the Taiwan Strait

LIU Jiangrong^{1,2}, LIN Xiaofeng^{1,2}, WANG Haowei³, WANG Cuiping^{1,2,*}

1 College of Harbour and Coastal Engineering, Jimei University, Xiamen 361021, China

2 Xiamen Key Laboratory of Green and Smart Coastal Engineering, Xiamen 361021, China

3 Key Laboratory of Urban Environment and Health, Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, China

Abstract: Since the 21st century, there has been an influx of people into the coastal areas with the rapid urbanization process in China, and the trade activities of both coasts of the Taiwan Strait became more and more frequent, which led to ecological risks along the fragile seaboard. Therefore, it is important to dynamically monitor and evaluate the ecological

基金项目: 福建省科技计划项目(2022H0044); 福建省自然科学基金面上项目(2023J01798); 福建省自然科学基金青年项目(2021J05169); 厦门市科技计划项目(3502Z20191021)

收稿日期: 2023-03-11; **网络出版日期:** 2023-12-11

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

quality of both coasts of the Taiwan Strait, which will promote ecological civilization construction and harmonious development across the Taiwan Strait. In this paper, Google Earth Engine platform was used to invoke the datasets of Landsat and MODIS from 2000 to 2022, based on which principal component analysis was adopted to construct the remote sensing-based ecological index. Then, difference analysis and spatial autocorrelation analysis were used to evaluate the eco-environmental quality differentiation of the Cross-Strait. In addition, the multi-ring buffer zones were established to study the effects of the size of main ports and city construction on the eco-environmental quality of the Cross-Strait. The results showed that: (1) from 2000 to 2010, the trend of eco-environmental quality was raised on the western coast and declined on the eastern coast of the Cross-Strait, and it was wavelike raised from 2010 to 2022 with the narrowing of the gap of the eco-environmental quality of the Cross-Strait. (2) The eastern coast's eco-environment was of higher quality than the western coast's. The eco-environmental quality level of Taimu Mountain and Yushan Mountain was excellent and good, and the relatively poor level was mainly in Huli District and Jinjiang City. Areas with significantly degraded eco-environmental quality levels were the mountainous regions on the eastern coast from 2000 to 2010, and the western coastal regions from 2010 to 2020. (3) There was a strong spatial correlation of the eco-environmental quality among cities on both coasts of the Strait, which showed that the remote sensing-based ecological index in the mountainous regions was higher and aggregated, while in the offshore regions was lower and aggregated. (4) On both coasts of the Strait, the effects of port size and its nearby urban construction on the eco-environmental quality were similar, showing that the eco-environmental quality was higher in areas farther away from the ports and where the proportion of urban construction was lesser. In the liner shipping stage, the eco-environmental quality around ports was worse when the port size was larger; the port size had a weaker impact on the eco-environmental quality which improved in the direct shipping stage. (5) Additionally, the eco-environmental quality of nearby ports slightly improved during the COVID-19 pandemic, and the ecological construction was taken seriously in Xiamen Port and Fuzhou Port. This study could provide basic data support for the construction of urban ecological civilization and a scientific decision-making basis for the plan of the ecological port, and could provide a boost to promote harmonious development on both coasts of the Taiwan Strait.

Key Words: Cross-Strait; Remote sensing based ecological index; Google Earth Engine platform; ports; ecological construction

21 世纪以来,我国社会经济飞速发展,全国国内生产总值(GDP)年均增长速率约为 8.7%,而沿海地区 GDP 年均增长速率超过 12%,环境风险随之凸显^[1]。同时,受陆地与海洋相互作用的沿海城市拥有丰富多样的资源^[2],吸引大量的人口向该地区迁移定居^[3]。强烈的人类活动导致沿海城市面临诸如港口重金属富集^[4]、水土地表变化^[5]、植被物候变化^[6]、热岛效应^[7]等一系列生态环境问题^[8-9]。受新冠疫情影响,城市环境污染在一定程度上减弱^[10],但疫情后沿海城市港口经济逐步复苏,又对其生态环境产生了压力,如何应对海岸生态环境面临的威胁与挑战是值得关注的问题^[2,11-12]。

在坚持“一国两制”基本方针下^[13],海峡两岸经贸交流蓬勃发展^[14]。一方面,台湾岛是中国第一大岛,岛陆面积狭小,两岸经贸联系紧密,港口航运繁忙^[15];另一方面,海西经济区与台湾岛隔海相望,两岸协作搭建交流平台,经济综合竞争力快速增长^[16],但若不加以控制和管理,沿海城市本就脆弱的环境将面临生态风险。相关研究表明,海峡两岸快速的城市建设对其生态环境产生较大威胁^[17-19],而良好的生态环境是城市高质量发展的基础^[20-21],是生态港口建设的核心目标^[22],因此动态监测海峡两岸生态环境状况并予以评估,不仅是推动海峡两岸可持续发展的重要依据,也对两岸和谐发展具有重要意义。

在国家不断推进生态文明建设和经济高质量发展的大背景下,生态环境评价受到国内外学者广泛关注。依据研究范围可分为区域^[23]、省域^[24]、城市^[25-26]、流域^[27]、建设区^[28]等空间尺度,依据定量评价方法包括生态环境指数(EI)^[29]、城市生态环境状况指数(CEI)^[30]、遥感生态指数(RSEI)^[31]等。在县域尺度以下,EI 存在时空精度较低且数据获取较难等问题,RSEI 因其高效和客观的特征而被广泛采用^[26,32-33],但因该方法基于大量遥感数据且计算过程繁琐而面临大范围、长时序数据较难获取且预处理费时耗力等问题,而微软行星

计算机(MPC)^[34]、像素信息专家引擎(PIE-Engine)^[35]、谷歌地球引擎(GEE)^[36]等遥感云平台的发展为该方法的实现提供便利。其中 GEE 发展较为成熟,是由谷歌云计算支持的地理空间数据服务平台,可处理拍字节(PB)级遥感数据,常被用于生态环境质量监测研究^[37—39],如王渊等^[40]和杨泽康等^[41]基于 GEE 在计算 RSEI 基础上对粤港澳大湾区和黄河流域生态环境进行了长时序监测和转移矩阵分析,证明 RSEI 借助 GEE 平台能够在时空上较好地表征研究区的生态环境质量状况。

RSEI 也被广泛用于海峡两岸生态环境状况分析,Liu 等^[32]和 Lin 等^[39]分别分析了海峡西岸厦门岛、金门岛以及平潭海岛生态环境质量时空演变,杨永健^[42]分析了海峡西岸主要市区生态环境质量空间自相关性,Wang^[43]运用 RSEI 结合土地利用变化探讨了台北市生活圈的生态环境质量,但目前研究多为单一城市或同类型城市,鲜少运用 GEE 平台以县域为研究单元针对海峡两岸不同类型城市的生态环境质量长时序特征进行对比分析。港口作为沿海城市的重要组成部分,其建设和发展对所在城市的生态环境质量影响较大,而港口研究多采用统计指标分析方法^[44—45],采用遥感和地理信息系统技术分析港口发展对生态环境质量影响的研究也较少,存在数据缺失、时效性差等问题,导致海峡两岸生态文明建设缺乏一定本底数据支撑。

因此,本文基于 GEE 平台采用 Landsat 影像和 MODIS 影像数据,计算海峡两岸 RSEI,运用线性回归、差值监测和空间自相关方法评价 21 世纪以来海峡两岸生态环境质量的差异性,并在建立海峡两岸主要港口多环缓冲区的基础上,通过多项式拟合分析港口建设对其周边生态环境质量的影响,为海峡两岸城市建设提供生态环境质量时空数据,旨在为打造可持续生态港口,构建绿色海峡经济,进而提高两岸城市生态文明建设和促进两岸和谐统一发展提供决策支撑。

1 研究区及研究方法

1.1 研究区概况

海峡两岸,地处台湾海峡,位于我国东南部($21^{\circ}51'—27^{\circ}26'N$, $116^{\circ}55'—122^{\circ}04'E$)(图 1),属于亚热带或

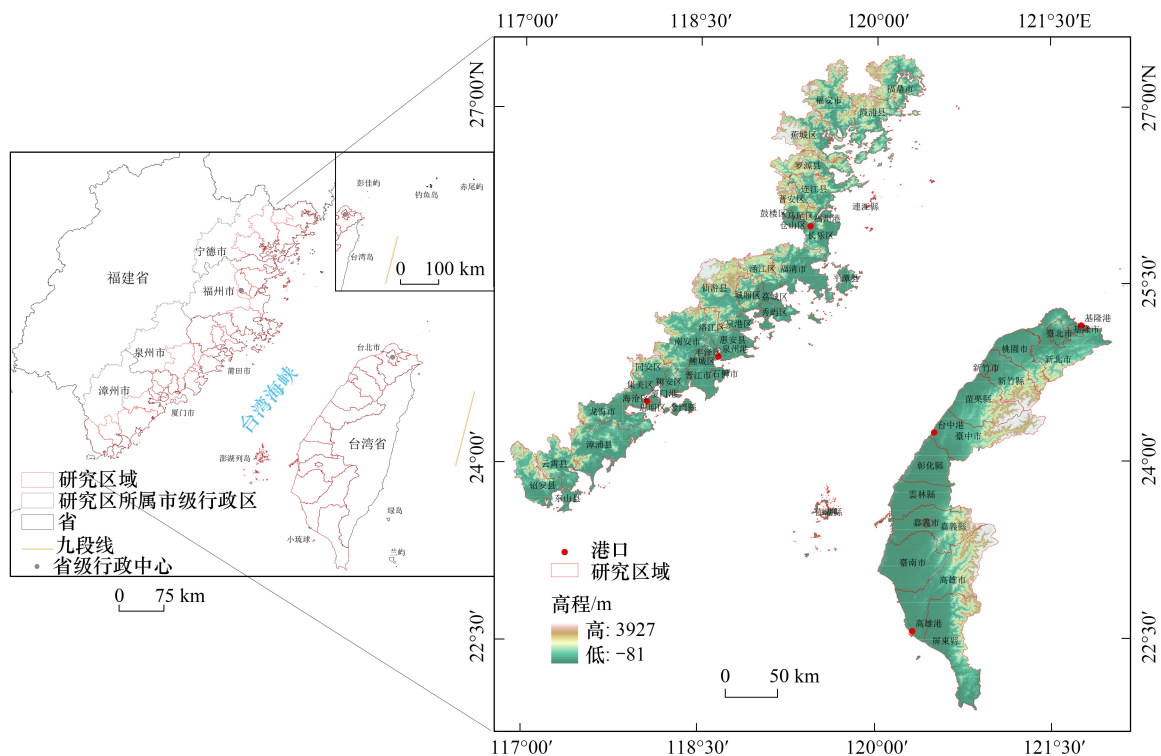


图 1 研究区位置

Fig.1 The location of the study area

热带气候,湿润多雨。海峡西岸平均气温约 20.6℃,海岸狭长且曲折,具有天然河口湾区可供港口建设开发,2008 年实施两岸直航后厦门港货物吞吐量超 1 亿吨,年均增长 14%;海峡西岸位于我国生态文明先行示范区,但福州和厦漳泉都市区作为福建省区域发展增长极,生态环境与高质量发展濒临失调^[19]。海峡东岸平均气温约 20.9℃,地势呈东高西低,山脉丘陵覆盖了台湾岛的 67%,台北、台中、高雄等都市区分布于平原、盆地,21 世纪以来高雄港货物吞吐量一直为 1 亿吨以上^[46]。

本文以海峡西岸福建省和东岸台湾省海陆结合部的县区级行政区为研究对象,即福建 38 个县,面积约为 2.8 万 km²,台湾 18 个县,面积约占 2.2 万 km²。两岸港口主要为海峡西岸的厦门港、福州港、泉州港,海峡东岸的基隆港、台中港、高雄港,各港口位置通过百度地图拾取坐标获得,如图 1 所示。

1.2 数据来源与预处理

本文采用 2000—2022 年 Landsat 系列遥感影像数据计算 RSEI,2000—2011 年采用 Landsat5 TM 遥感影像,2013—2022 年采用 Landsat8 OLI/TIRS 遥感影像,由于 Landsat7 ETM+遥感影像数据存在条带问题,故本文未获取 2012 年遥感影像。基于 GEE 通过 JavaScript API 获取经过大气校正等预处理的各年份地表反射率日数据集,分辨率为 30m,重访周期 16d;另外,本文采用 MODIS 系列遥感影像数据对 Landsat 数据进行补充,分别为分辨率 500m 的 MOD09A1 和分辨率 1km 的 MOD11A2 遥感影像数据,周期 8d。

为了解决遥感云量遮挡以及大片水域影响湿度指标的问题,本文首先使用 GEE 所提供的 C 函数掩膜 (CFMASK)算法进行云掩膜,然后采用改进归一化差异水体指数 (MNDWI)掩膜掉水体信息^[47]。另外,海峡东岸北部早期数据云量较多,缺失部分由 MODIS 数据填补,同时为了避免由于云缺失而发生难补全问题,将数据重采样至 30m。因 Landsat 数据为全年影像,MODIS 地表温度数据须考虑全天情况,因此首先利用质量评估波段选出 MOD11A2 最佳值,剔除异常值后分别求夜间及日间中值后取两者均值作为地表温度的最终结果。

用于分析港口建设对其周边生态环境质量影响的城市建设用地面积基于 GEE 生成的土地覆盖数据集获得^[48]。

港口货物吞吐量与沿海城市经济发展相关性较高^[49–50],因此本文从台湾地区交通官网、《福建统计年鉴》《中国港口年鉴》以及中华人民共和国交通运输部官网公开数据中获取 2000—2022 年以年为周期的货物吞吐量来表征港口规模。

1.3 研究方法

1.3.1 遥感生态指数

(1) 指标计算

绿度、湿度、热度、干度是构成遥感生态指数的 4 个主要指标,具体计算公式如式 (1) — (8) 所示。

$$\text{NDVI} = (B_{\text{NIR}} - B_{\text{Red}}) / (B_{\text{NIR}} + B_{\text{Red}}) \quad (1)$$

$$\text{WET}_{\text{TM}} = 0.0315 \times B_{\text{Blue}} + 0.2021 \times B_{\text{Green}} + 0.3102 \times B_{\text{Red}} + 0.1594 \times B_{\text{NIR}} - 0.6806 \times B_{\text{SWIR1}} - 0.6109 \times B_{\text{SWIR2}} \quad (2)$$

$$\text{WET}_{\text{OLI}} = 0.1511 \times B_{\text{Blue}} + 0.1973 \times B_{\text{Green}} + 0.3283 \times B_{\text{Red}} + 0.3407 \times B_{\text{NIR}} - 0.7117 \times B_{\text{SWIR1}} - 0.4559 \times B_{\text{SWIR2}} \quad (3)$$

$$\text{WET}_{\text{MOD}} = 0.1509 \times B_{\text{Blue}} + 0.1973 \times B_{\text{Green}} + 0.3279 \times B_{\text{Red}} + 0.3406 \times B_{\text{NIR}} - 0.7112 \times B_{\text{SWIR1}} - 0.4572 \times B_{\text{SWIR2}} \quad (4)$$

$$\text{LST} = (B_T / [1 + (\frac{\lambda}{\rho}) \ln \varepsilon]) - 273.15 \quad (5)$$

$$\text{NDBSI} = (SI + IBI) / 2 \quad (6)$$

$$SI = (B_{\text{SWIR1}} + B_{\text{Red}} - B_{\text{Blue}} - B_{\text{NIR}}) / (B_{\text{SWIR1}} + B_{\text{Red}} + B_{\text{Blue}} + B_{\text{NIR}}) \quad (7)$$

$$\text{IBI} = [(2 \times B_{\text{SWIR1}} / (B_{\text{SWIR1}} + B_{\text{NIR}})) - (B_{\text{NIR}} / (B_{\text{Red}} + B_{\text{NIR}})) - (B_{\text{Green}} / (B_{\text{Green}} + B_{\text{SWIR1}}))] / [(2 \times B_{\text{SWIR1}} / (B_{\text{SWIR1}} + B_{\text{NIR}})) + (B_{\text{NIR}} / (B_{\text{Red}} + B_{\text{NIR}})) + (B_{\text{Green}} / (B_{\text{Green}} + B_{\text{SWIR1}}))] \quad (8)$$

式中, B_{Blue} 、 B_{Green} 、 B_{Red} 、 B_{NIR} 、 B_{SWIR1} 、 B_{SWIR2} 、 B_T 分别对应 TM/OLI/MOD09A1 影像中蓝、绿、红、近红外、短红外 1、短红外 2、热红外波段的反射率; ρ 为常数; λ 为热红外波段中心波长; ε 为地表辐射率,根据植被覆盖度求

得^[38];NDVI 为归一化植被指数表示绿度指标;WET_{TM}、WET_{OLI}、WET_{MOD} 分别表示以 TM、OLI、MOD09A1 影像为数据源的湿度指标,参考指标数据库(<https://www.indexdatabase.de/>)获得;LST 为地表温度表示热度指标;NDBSI 表示干度指标,由土壤指数(SI)和建筑指数(IBI)两者平均值获得^[37,41]。

(2) 构建遥感生态指数

首先依据式(1)~(8),计算各指标日值;然后为了消除色差,提取各指标年中值^[40]并重采样至 500m。为了排除指标量纲影响,依据式(9)将 4 个指标进行归一化。

$$NI_i = (I_i - I_{\min}) / (I_{\max} - I_{\min}) \quad (9)$$

式中, NI_i 为指标的第 i 个像元归一化结果; I_i 为第 i 个像元指标值; $I_{\min}$ 和 $I_{\max}$ 分别为指标的最小值和最大值。

依据徐涵秋^[31]所创建的遥感生态指数以及 Li 等^[51]对指数的改进,本文基于 GEE 对归一化后的 4 个指标进行主成分分析,并取第一主成分结果为初始 RSEI₀^[31,42](式 10),同时为方便比较将其归一化至 [0,1] 之间(式 11),得到最终遥感生态指数(RSEI)。

$$RSEI_0 = \begin{cases} PC1(f(NDVI, WET, NDBSI, LST)) & V_{NDVI}, V_{WET} > 0 \\ 1 - PC1(f(NDVI, WET, NDBSI, LST)) & V_{NDVI}, V_{WET} < 0 \end{cases} \quad (10)$$

$$RSEI = (RSEI_0 - RSEI_{0\min}) / (RSEI_{0\max} - RSEI_{0\min}) \quad (11)$$

式中,RSEI₀ 表示初始遥感生态指数,RSEI_{0min} 为其最小值,RSEI_{0max} 为其最大值;RSEI 数值越接近 1,生态环境状况越好;PC1 表示第一主成分; f 表示对 4 个指标分别归一化处理(式 9); V_{NDVI} 、 V_{WET} 分别表示 NDVI、WET 的 PC1 特征向量。

1.3.2 Pearson 相关系数

Pearson 相关系数是用于描述两个连续变量之间的相关联程度,适用于 RSEI 等呈正态分布的变量。运用 GEE 计算 PearsonCorrelation 函数得到相关系数,与平均相关度模型结合(式 12)检验 RSEI 的可行性。

$$\bar{C} = \frac{|C_q| + |C_r| + \dots + |C_s|}{n - 1} \quad (12)$$

式中, $\bar{C}$ 代表平均相关度,数值越接近 1,说明指标越能表征城市生态环境状况^[31]; n 为进行相关分析的指标个数, C_q 、 C_r 、 C_s 为各指标之间的相关系数。

2 遥感生态指数检验

依据式(1)~(9),基于 GEE 平台计算 2000—2022 年研究区 NDVI、WET、LST、NDBSI,并进行主成分分析得到各指标第一主成分,如表 1 所示。除 2000 年(72.41%)、2007 年(73.40%)外,研究区各指标第一主成分特征值贡献率均在 75%以上,表明第一主成分集中了各指标部分特征。此外,除 2001 年和 2002 年,各年份 4 个指标的荷载不会出现时大时小的情况,表明由主成分分析得到的各指标权重绝对值具有相对稳定性。

利用 Pearson 相关系数及式(12)得到相关系数矩阵及平均相关度,结果如表 2 所示。RSEI 平均相关度为最高,表明基于 GEE 平台构建的海峡两岸 RSEI 能较好地表征城市生态环境状况,采用 RSEI 评价海峡两岸的生态环境状况是可靠的。

本文依据式(1)~(11)计算海峡两岸 RSEI,具体结果如图 2 所示。

3 海峡两岸生态环境质量差异性评价

3.1 海峡两岸生态环境质量演变趋势

如图 3 和图 4 所示,总体来看,2000—2022 年海峡两岸 RSEI 均值均高于 0.5,西岸 RSEI 均值一直低于东岸。2000—2010 年西岸 RSEI 均值远小于东岸且趋势相反,东岸 RSEI 均值呈“波动下降-上升-下降”趋势,西岸 RSEI 均值则呈“上升-下降-缓慢上升”趋势;2010—2022 年两岸 RSEI 均值在 0.7—1 之间的年份增

表 1 第一主成分分析结果

Table 1 The results of the first principal component analysis

指标 Indicators	第一主成分 PC1										
年份 Year	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
绿度 NDVI	0.5918	0.6676	0.7922	0.5890	0.5948	0.5996	0.5996	-0.6102	-0.6345	0.5944	0.6258
湿度 WET	0.4934	0.4858	0.5434	0.4802	0.4514	0.4465	0.4613	-0.4626	-0.4556	0.4658	0.4345
热度 LST	-0.3170	-0.1937	-0.0872	-0.3650	-0.3991	-0.4082	-0.3964	0.3608	0.3394	-0.3933	-0.4079
干度 NDBSI	-0.5531	-0.5300	-0.2636	-0.5378	-0.5321	-0.5239	-0.5201	0.5325	0.5241	-0.5244	-0.5032
特征值 EV	0.0897	0.0770	0.0584	0.1038	0.1037	0.0965	0.1011	0.0882	0.0939	0.1043	0.1008
CREV%	72.41	79.11	78.76	76.72	79.75	77.22	80.15	73.40	75.20	81.04	80.08
年份 Year	2011	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
绿度 NDVI	0.6127	0.6743	0.6483	0.6592	0.6672	0.6642	0.6496	0.6644	0.7104	0.6549	0.5022
湿度 WET	0.4744	0.4495	0.4432	0.4400	0.4407	0.4444	0.4355	0.4450	0.4766	0.4318	0.4962
热度 LST	-0.3495	-0.3971	-0.3604	-0.3639	-0.3553	-0.3881	-0.3758	-0.3701	-0.4119	-0.3786	-0.4137
干度 NDBSI	-0.5266	-0.4307	-0.5034	-0.4894	-0.4841	-0.4590	-0.4971	-0.4728	-0.3139	-0.4913	-0.5748
特征值 EV	0.0944	0.0995	0.1025	0.1047	0.1001	0.1033	0.1087	0.1044	0.0917	0.1082	0.0900
CREV%	76.70	80.71	79.85	81.21	78.58	81.26	82.20	80.57	79.90	81.72	79.88

PC1:第一主成分 First principal component; EV:特征值 Eigenvalue; CREV:特征值贡献率 Contribution rate of eigenvalue; NDVI:归一化植被指数 Normalized difference vegetation index; WET:湿度指标; LST:地表温度 Land surface temperature; NDBSI:建筑土壤指数 Normalized difference built-up and soil index

表 2 2000—2022 年各指标相关性矩阵 (Pearson 相关系数)

Table 2 The correlation matrix of indicators (Pearson) from 2000 to 2022

指标 Indicators	绿度 NDVI	湿度 WET	热度 LST	干度 NDBSI	遥感生态指数 RSEI
绿度 NDVI	1	0.635	-0.521	-0.917	0.935
湿度 WET	0.635	1	-0.546	-0.841	0.841
热度 LST	-0.521	-0.546	1	0.556	-0.705
干度 NDBSI	-0.917	-0.841	0.556	1	-0.975
平均相关度 $\bar{C}$	0.691	0.674	0.541	0.771	0.864

RSEI:遥感生态指数 Remote sensing based ecological index; $\bar{C}$:平均相关度 Average correlation degree

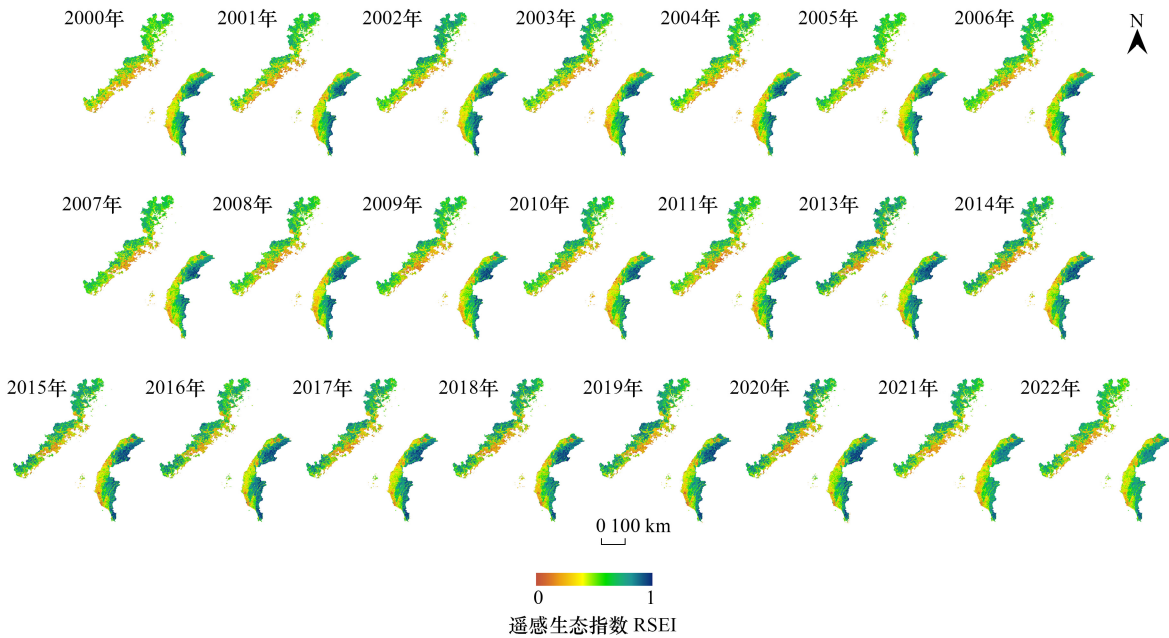


图 2 2000—2022 年海峡两岸 RSEI 空间分布

Fig.2 The spatial distribution of Cross-Strait RSEI from 2000 to 2022

RSEI:遥感生态指数 Remote sensing based ecological index

多,且均呈波动上升趋势,西岸年均增长率(0.0052)略高于东岸(0.0042);新冠疫情期间(2020—2022 年),东岸 RSEI 均值变化不大,2021—2022 年西岸 RSEI 均值达峰值(0.605)后显著下降;2000—2022 年海峡两岸 RSEI 均值差值总体呈缩小趋势,2000 年差值最大(0.110),2010 年和 2021 年差值最小,2022 年差值增大。

上述分析表明,21 世纪以来两岸生态环境质量具有较显著的阶段差异性,东岸生态环境质量总体呈先下降后上升的趋势,西岸生态环境质量总体呈上升趋势;海峡东岸生态环境质量一直优于西岸,但西岸生态环境质量改善速度略大于东岸,二者差距逐步缩小;新冠疫情对海峡东岸生态环境质量影响较小,海峡西岸生态环境质量受新冠疫情影响较大。

3.2 海峡两岸生态环境质量等级特征差异性分析

为了透彻分析海峡两岸生态环境质量的差异性,本文将 RSEI 均值划分为 5 个等级^[31]:差[0—0.2]、较差[0.2—0.4]、一般[0.4—0.6]、良[0.6—0.8]、优[0.8—1],如图 5 所示。2000—2022 年生态环境质量等级为优良的占比提升,主要分布在西岸的太姥山、戴云山东坡以及东岸台湾的雪山山脉、阿里山脉及玉山山脉等山地丘陵区域;生态环境质量等级为差、较差的区域主要分布为东岸的三大都市区及台南市等;西岸生态环境质量具有明显的条带状特征,呈沿海岸向内陆逐渐降低的趋势。

本文进一步分析了海峡两岸生态环境质量等级的变化,如图 6 和图 7 所示。2000—2022 年海峡两岸生态环境质量等级变化具有较大差异性,东岸生态环境质量等级未发生变化的区域占据绝对优势,西岸生态环境质量等级提高的区域占比最高;2000—2015 年两岸生态环境质量等级提高区域占比呈上升趋势,2015—2022 年两岸生态环境质量等级提高区域占比呈下降趋势,生态环境质量等级下降的区域变化趋势则相反;2000—2010 年东岸生态环境质量等级退化区域占比较高,主要由南部、台中盆地、台北生活圈区域扩散至玉山山脉、中央山脉以及澎湖列岛;2010—2015 年两岸生态环境质量等级总体提高,2010 年开启海岛型城市建设的西岸平潭岛^[33]以及东岸台北市中心生态环境质量等级明显退化;2015—2020 年两岸生态环境质量退化差异较大,西岸的晋江^[52]、翔安以及金门等近海岸区域退化显著,东岸退化显著的区域为高雄市的东北部和基隆市的南部;2020—2022 年两岸生态环境质量等级退化区域占比均较高,特别是西岸退化区域较显著,主要分布在生态环境等级为优良的东北部。

上述分析表明,21 世纪以来海峡两岸生态环境质量等级呈先退化后改善的趋势,从生态质量等级较低的沿海平原区域开始退化,且退化区域逐渐扩散至生态质量较高的内陆山地丘陵区域,2000—2010 年东岸山地丘陵区域生态环境质量等级退化显著,2010—2020 年西岸近海岸区域生态环境质量等级退化显著,2020—2022 年西岸东北部山地丘陵区域生态环境质量等级退化较显著。

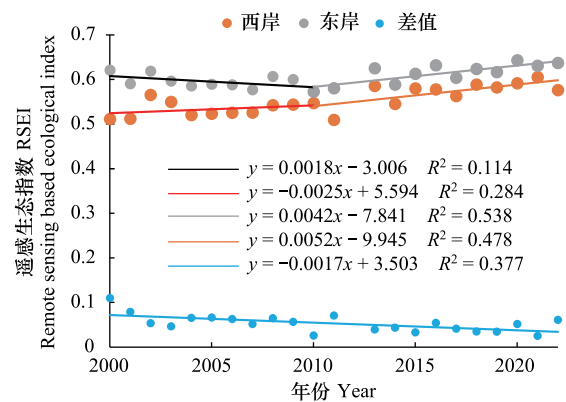


图 3 2000—2022 年海峡两岸 RSEI 均值年际变化

Fig. 3 The annual variation of Cross-Strait RSEI mean from 2000 to 2022

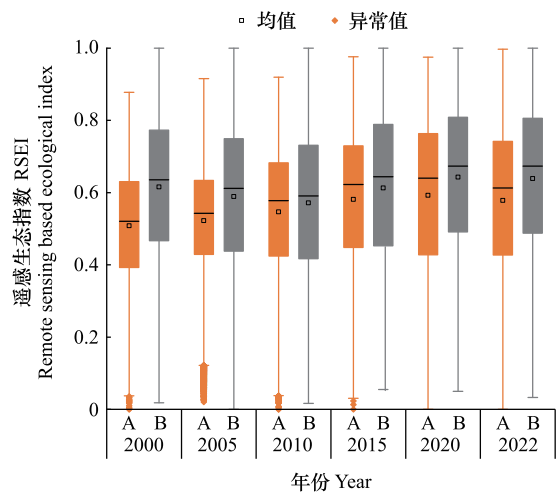


图 4 2000—2022 年海峡两岸 RSEI 均值箱型图

Fig. 4 The box diagram of Cross-Strait RSEI mean from 2000 to 2022

A: 西岸; B: 东岸

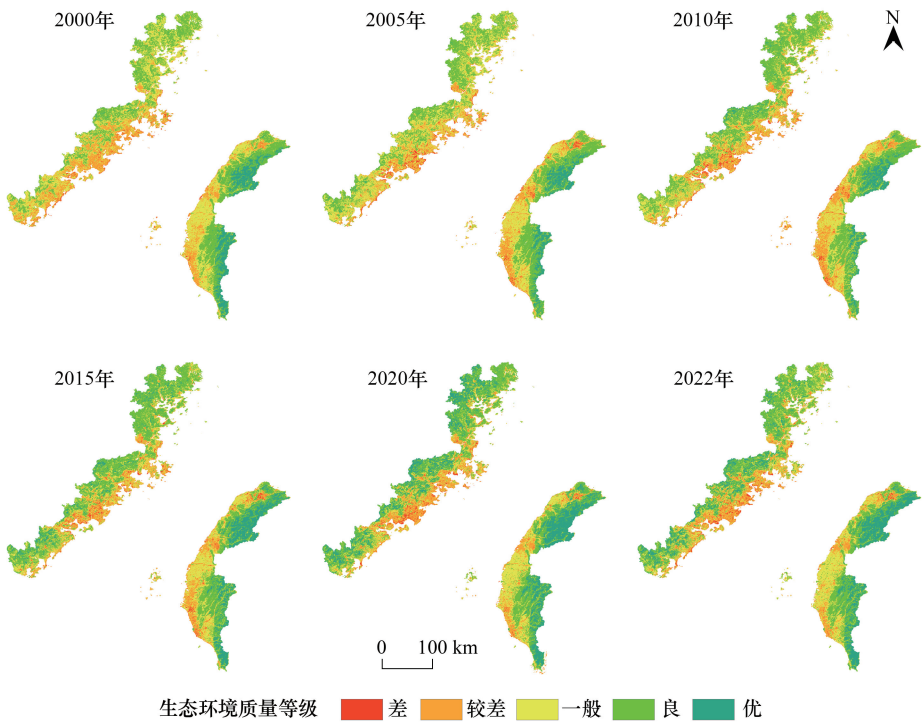


图 5 2000—2022 年海峡两岸生态环境质量等级分布
Fig.5 Distribution of Cross-Strait ecological environment quality levels from 2000 to 2022

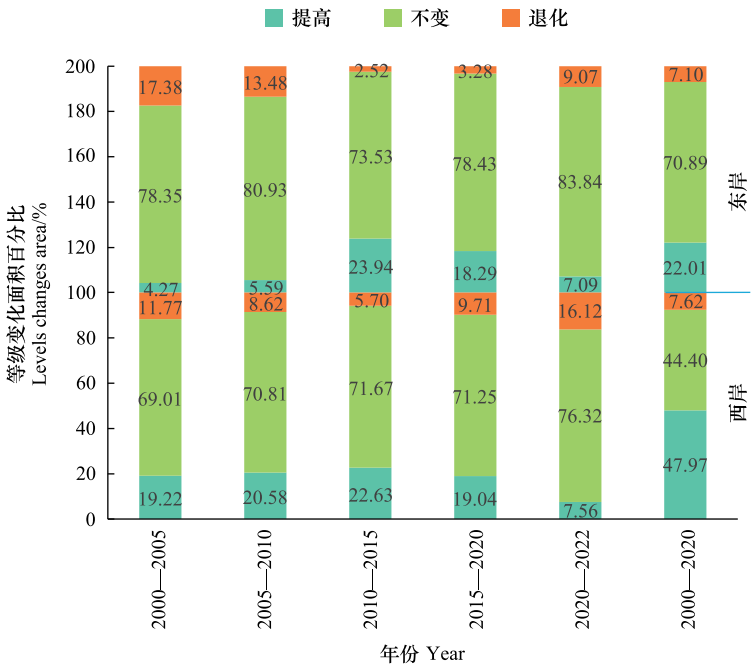


图 6 2000—2022 年海峡两岸生态环境质量等级比例变化
Fig.6 Proportion changes of Cross-Strait ecological environment quality levels from 2000 to 2022

3.3 生态环境质量空间自相关分析

空间自相关分析研究的是空间实体与其相邻的空间实体之间相似的程度,本文采用 Moran's *I* 指数及空间关联局部指标(LISA)中的局部 Local Moran's *I* 指数分析海峡两岸生态环境质量空间聚集性的差异性^[53]。

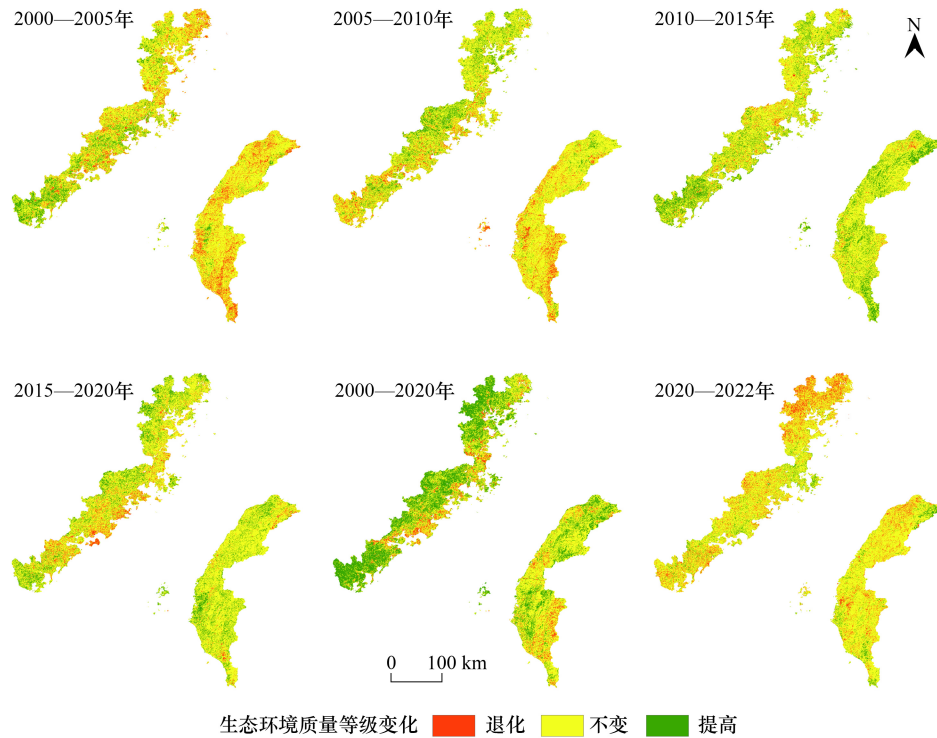


图 7 2000—2022 年海峡两岸生态环境质量等级变化

Fig.7 Changes of Cross-Strait ecological environment quality levels from 2000 to 2022

本文采用 Moran's I 判别海峡两岸生态环境质量是否存在自相关,值大于 0 表明具有空间正相关性,越接近 1 空间正自相关越强,如表 3 所示。2000—2022 年东岸生态环境质量 Moran's I 呈下降趋势,西岸生态环境质量 Moran's I 呈波动上升趋势;东岸生态环境质量 Moran's I 始终高于西岸,值均大于 0。表明海峡两岸生态环境质量具有空间正相关性,东岸呈逐步减弱趋势,西岸呈波动增强趋势,东岸生态环境质量空间正相关性强于西岸。

表 3 2000—2022 年海峡两岸生态环境质量莫兰指数

Table 3 Moran's I of Cross-Strait ecological environment quality from 2000 to 2022

	2000	2005	2010	2015	2020	2022
东岸 East coast	0.822	0.808	0.794	0.790	0.789	0.788
西岸 West coast	0.620	0.597	0.644	0.634	0.690	0.648

本文采用 LISA 分析海峡两岸生态环境质量聚集区是否具有显著分布特征,如图 8 所示。两岸 L-L(低值周围仍多为低值)聚集区主要位于西岸的东南部近海岸以及东岸近海岸区域;H-H 聚集区(高值周围仍多为高值)主要分布在两岸的山地丘陵区域,宁德市、苗栗县 H-H 聚集最显著;西岸南部的 NS(低值聚集与高值聚集之间的过渡带)逐渐向近海岸转移,H-H 聚集区逐渐向沿海扩张,东岸南部 H-H 聚集区呈破碎化趋势。

4 港口发展对生态环境质量的影响

4.1 港口缓冲区内生态环境质量特征

为了分析海峡两岸港口发展对生态环境质量的影响,本文通过 GEE 平台建立以港口为中心的 20km 范围内的多环缓冲区^[28],缓冲区间隔 1km。新冠疫情的发生限制了两岸直航^[54],因此本文研究年份为 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年及疫情期间的 2019—2022 年各缓冲区内 RSEI 均值和总均值。由图 9、图 10 可知,

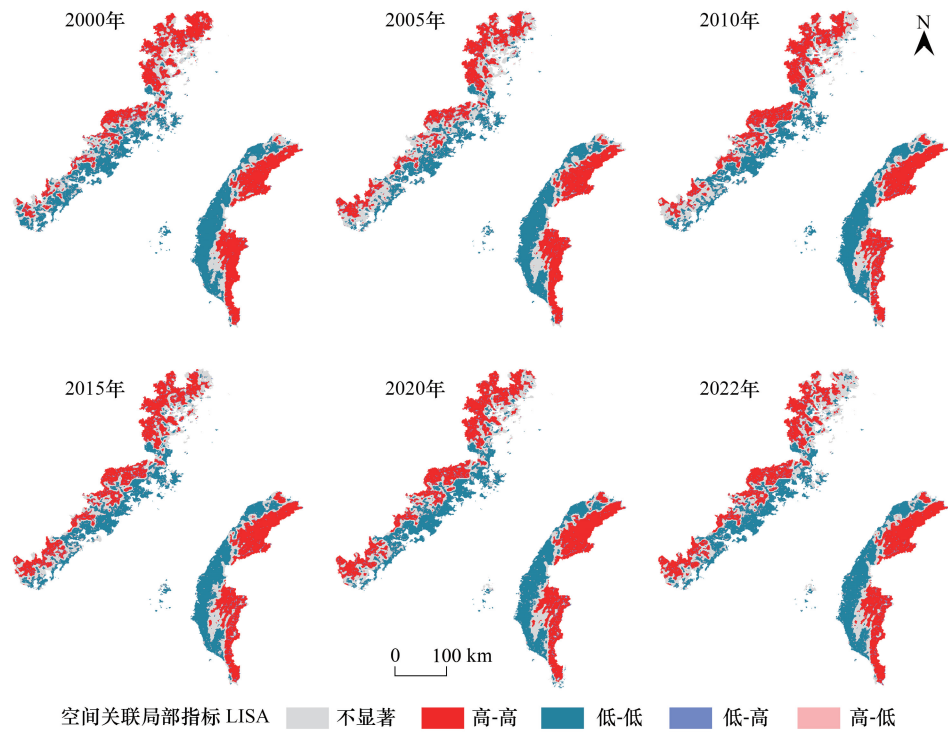


图 8 2000—2022 年海峡两岸生态环境质量 LISA 分布
Fig.8 LISA distribution of Cross-Strait ecological environment quality from 2000 to 2022
LISA;空间关联的局部指标 Local Indicators of Spatial Association

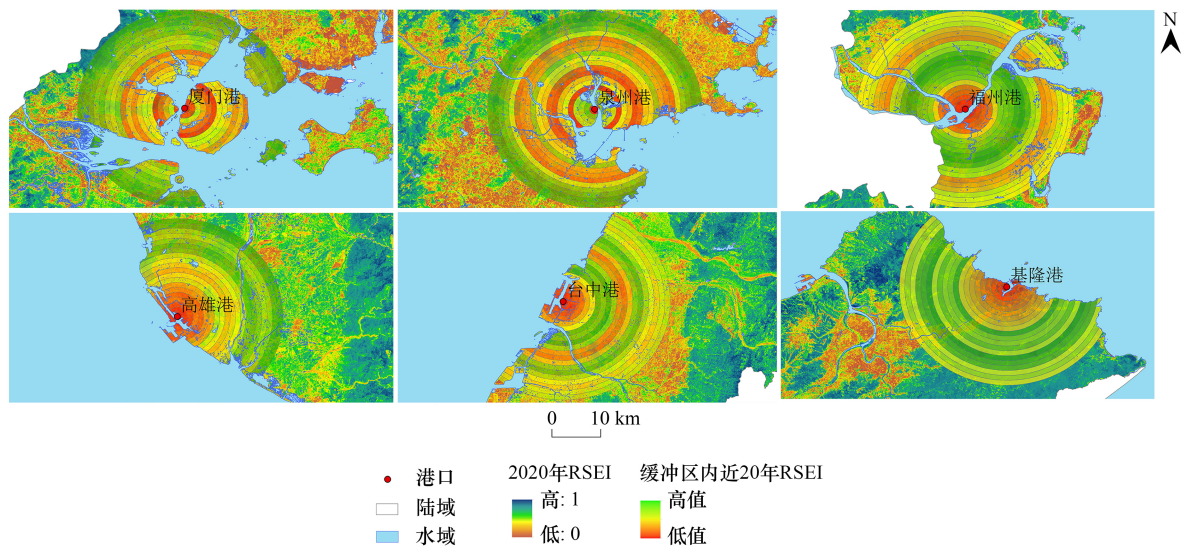


图 9 海峡两岸主要港口多环缓冲区 RSEI 分布
Fig.9 RSEI distribution in the multi-ring buffer zones of the main Cross-Strait ports

RSEI 均值随与港口距离增加而波动增加,离港口近的区域 RSEI 值较低,表明港口设施对周边地区的生态环境质量具有负面影响;各港口周边RSEI值的变化曲线具有相似性,但曲线变化的拐点不同;厦门港、福州港、基隆港、台中港第一个拐点为 3km,泉州港、高雄港分别为 2km、5km,在此范围内生态环境质量随距离增加而增加,但变化幅度存在较大差异,厦门港、福州港增幅较大,基隆港、泉州港次之,台中港、高雄港则较平缓,表

明不同港口对周边地区的生态环境质量的影响范围和程度具有显著差异;在 10km 范围内厦门港与泉州港的 RSEI 均值波动增加,其余港口则持续增加;福州港、台中港在 10km 到 20km 之间随离港口距离增大生态环境质量呈先下降后上升,其余港口则表现为波动增长,表明各港口所在城市的生态环境质量存在较大差异。

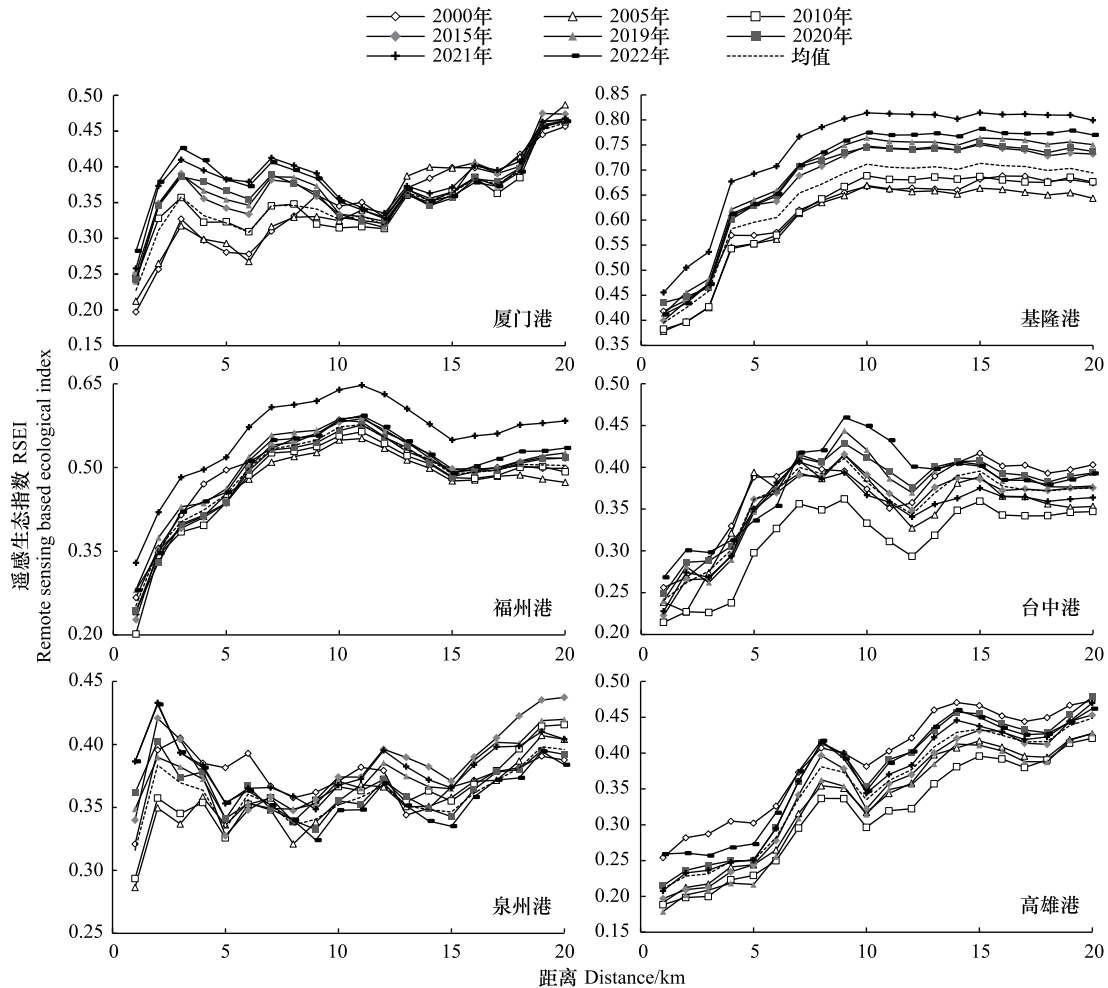


图 10 海峡两岸主要港口各缓冲区 RSEI 均值变化

Fig.10 The mean variation of RSEI in the multi-ring buffer zones of the main Cross-Strait ports

4.2 港口发展对生态环境质量的影响

4.2.1 港口城市建设对生态环境质量影响

为了探究各港口周边生态环境质量差异性的成因,本文分析了各港口周边城市建设用地情况。由图 10、图 11 可知,各港口生态环境质量第一拐点范围内城市建设用地面积占比随与港口距离增加而波动减小。2000—2022 年,海峡东岸仅台中港生态环境质量第一拐点范围内城市建设用地面积占比略有增大,其他港口未发生显著变化,表明 21 世纪以来海峡东岸各港口无大规模建设工程;2000—2020 年,海峡西岸仅厦门港生态环境质量第一拐点范围内城市建设用地面积占比略有增大,其他港口呈逐年增加趋势,2020—2022 年城市建设用地面积占比无显著变化,表明 21 世纪以来海峡西岸各港口仍在持续建设,新冠疫情期间建设工程较少。

图 11 对比各港口生态环境质量变化趋势可知,2000—2010 年,海峡西岸福州港 3km 及泉州港 2km 范围内港口建设持续开展,其生态环境质量大幅下降,且随建设用地占比下降生态环境质量提高,2010—2020 年,泉州港和福州港城市建设规模仍较大,但其生态环境质量提升;2000—2020 年厦门港 3km 范围内港口建设开

展不显著,生态环境质量呈逐年增加趋势,生态环境质量也随建设用地占比下降而提高。2000—2020 年,海峡东岸各港口第一拐点范围内建设不显著,基隆港生态环境质量呈逐年波动上升,台中港和高雄港生态环境质量呈逐年波动下降。

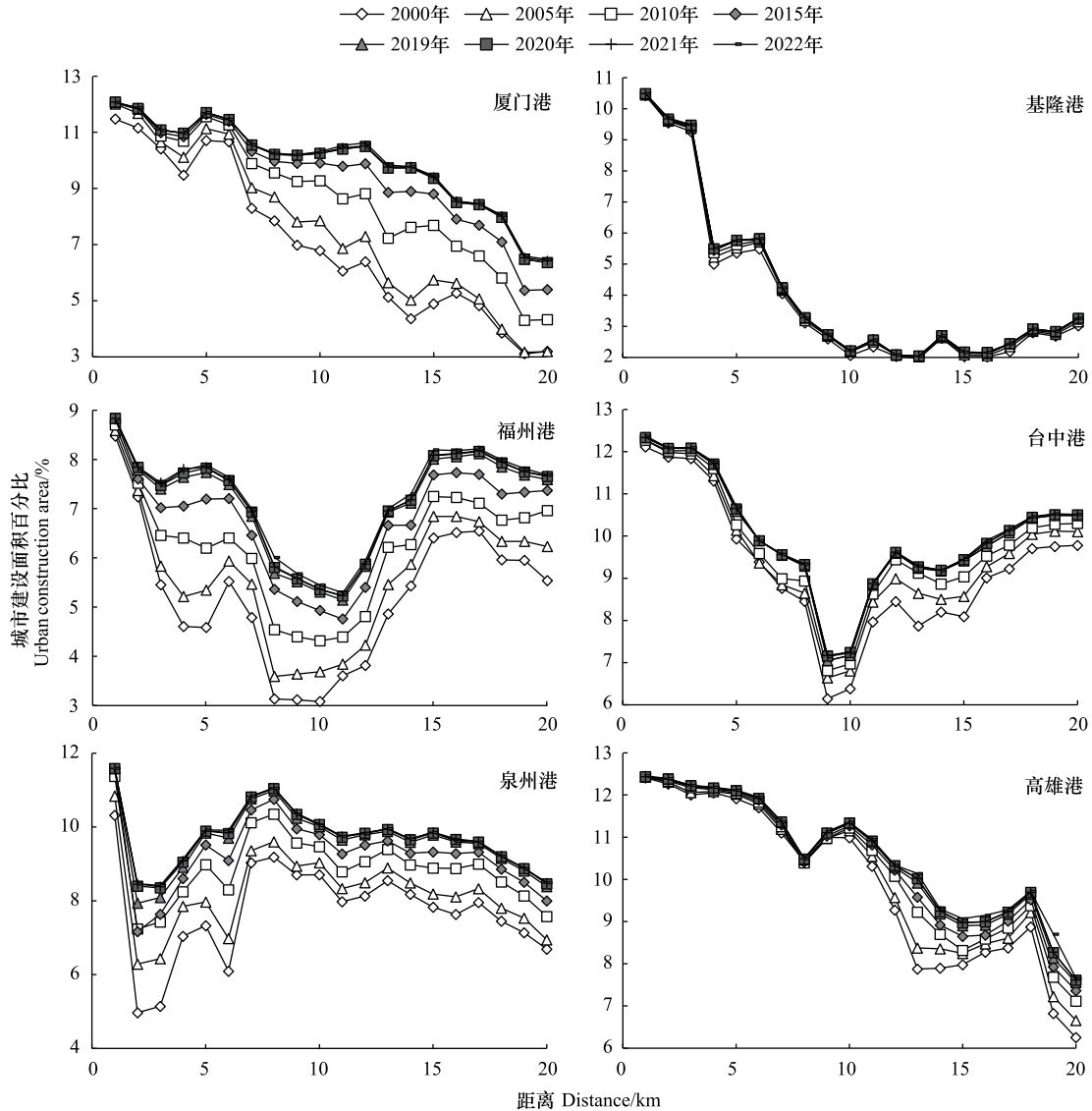


图 11 海峡两岸主要港口不同缓冲区城市建设面积比例变化

Fig.11 Proportion change of urban construction area in the multi-ring buffer zones of the main Cross-Strait ports

4.2.2 港口规模与生态环境质量关系

由上述分析可知,海峡两岸各港口对其周边生态环境质量影响的范围具有较大差别,为了进一步分析原因,本文分析了港口规模与生态环境质量的相关性,如表 4、图 12 所示。西岸两者呈正相关,东岸则相反,且在不同运输阶段具有较大差异性。厦门港生态环境质量随其规模的增大而改善;班轮运输阶段(2000—2008 年),福州港、泉州港规模越大生态环境质量越差,直航运输阶段(2008—2020 年)则相反,其中泉州港改善幅度显著,表明直航运输阶段港口建设及扩大规模的同时注重对生态环境的保护。班轮运输阶段,东岸港口规模越大生态环境质量越差,而直航运输阶段,台中港口规模及其生态环境质量均提升,高雄港口规模变化较小且生态环境质量常年较低,基隆港规模减少的同时生态环境质量改善幅度也变小。

表 4 不同运输阶段港口规模与 RSEI 关系

Table 4 The relationship between port size and RSEI at different stages of shipping

港口 Ports	班轮运输阶段 Liner Shipping stage	拟合度 R^2	直航运输阶段 Direct Shipping stage	拟合度 R^2
厦门港	$2 \times 10^6 x^2 - 971527x + 132044 = y$	0.5090	$2 \times 10^6 x^2 - 816731x + 107603 = y$	0.6854
福州港	$2 \times 10^6 x^2 - 2 \times 10^6 x + 314808 = y$	0.6526	$4 \times 10^6 x^2 - 2 \times 10^6 x + 413297 = y$	0.7833
泉州港	$543455x^2 - 414497x + 80749 = y$	0.9589	$-169948x^2 + 164444x - 26326 = y$	0.8436
基隆港	$-170199x^2 + 129593x - 21131 = y$	0.7390	$-788066x^2 + 642628x - 128521 = y$	0.6876
台中港	$-317616x^2 + 159234x - 14689 = y$	0.6405	$-355965x^2 + 198591x - 20402 = y$	0.5976
高雄港	$-2 \times 10^6 x^2 + 792591x - 86230 = y$	0.6243	$1 \times 10^6 x^2 - 641046x + 87693 = y$	0.5498

x 指 RSEI, y 指港口规模即货物吞吐量 ($\times 10^4 t$)

4.2.3 港口规模对生态环境质量的影响

如图 13、图 14 所示。班轮运输阶段随着港口规模的增大,其周边生态环境质量显著下降的范围增加,高雄港规模最大,其周边生态环境质量显著下降的范围为 10km,基隆港港口规模相对较小,其周边生态环境质量显著下降的范围为 3km。直航运输阶段海峡东岸各港口规模变化不显著,西岸各港口的规模不断提升,周边生态环境质量改善程度随离港口中心距离的增加具有一定的差异性,泉州港显著下降,厦门港和基隆港显著增加,其他港口生态环境质量随离港口中心距离的增加波动变化。由图 13、图 15 可知,2019—2020 年大部分港口货物吞吐量下降,周边生态环境质量随离港口中心距离的增加仍呈下降趋势,高雄港周边生态环境质量略有好转,仅福州港规模大幅扩大,且临港区域生态环境质量显著降低;2020—2021 年,港口规模逐步恢复,周边生态环境质量随离港口中心距离的增加仍呈提升趋势,表明随着港口的发展,城市建设越来越注重生态建设。

综上所述,港口建设和港口规模对生态环境质量均具有较大影响,海峡两岸存在较大差异。总的来说,距离港口越近,城市建设用地比例越高,生态环境质量也越差,港口规模越大其影响范围也越大。而随着社会经济的发展,西岸虽然港口规模继续增加,但由于率先开展生态文明建设,生态环境质量得到改善;东岸港口发展较早,进入 21 世纪以来,港口规模变化不大,生态环境质量改善也不显著。

5 结论与讨论

5.1 结论

本文运用 GEE 平台调用了除 2012 年以外的 2000—2022 年 4436 景 Landsat 影像及 1917 景 MODIS 影像数据集,经过预处理构建了遥感生态指数,采用差值变化、空间自相关及多环缓冲区对海峡两岸及主要港口周边生态环境质量进行分析,主要结论为如下:

(1) 2000—2022 年,海峡东岸生态环境质量优于西岸,东岸生态环境质量具有较显著的先下降后改善的特征,而西岸生态环境质量则呈稳步提升的特征,且二者的差距逐渐缩小。空间上,生态环境质量优良的区域主要集中在太姥山、玉山山脉等丘陵山地区域,生态环境质量等级为较差、差的区域东岸呈块状分布于都市聚集区,西岸呈条状分布于沿海平原区域。西岸生态环境质量退化的区域为生态环境质量较差的福州、厦门、漳

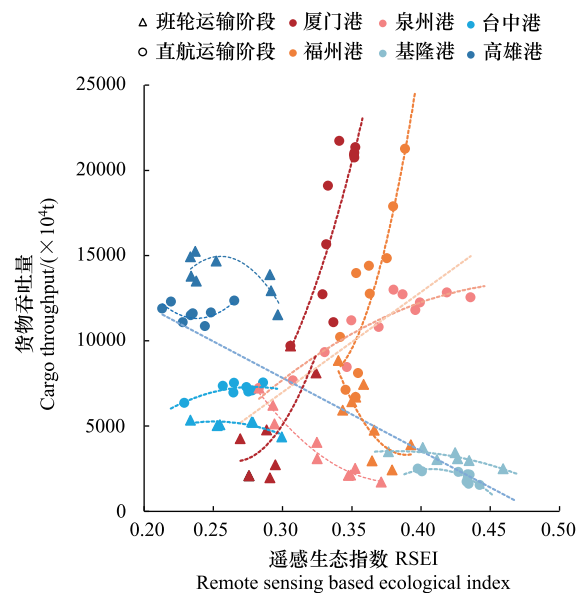


图 12 海峡两岸港口规模与 RSEI 的关系

Fig.12 The relationship between the Cross-Strait port size and RSEI

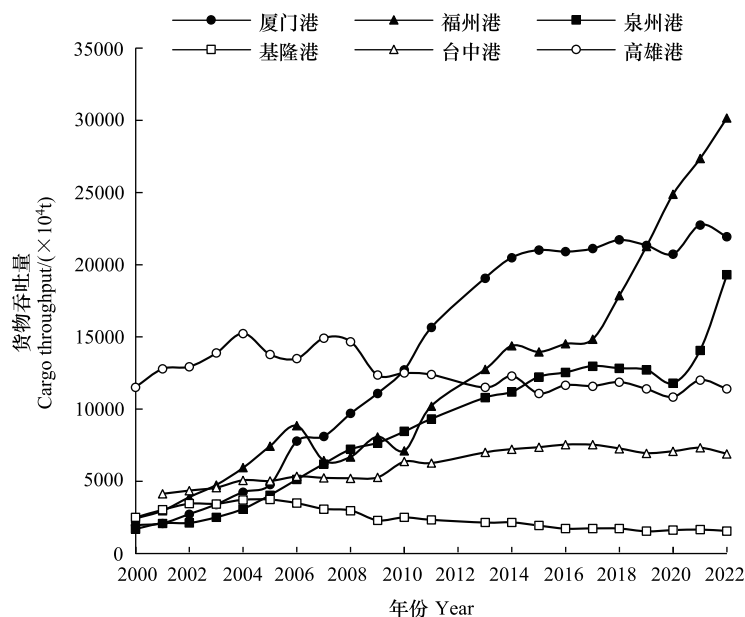


图 13 2000—2022 年海峡两岸港口货物吞吐量

Fig.13 The cargo handling capacity of the Cross-Strait ports from 2000 to 2022

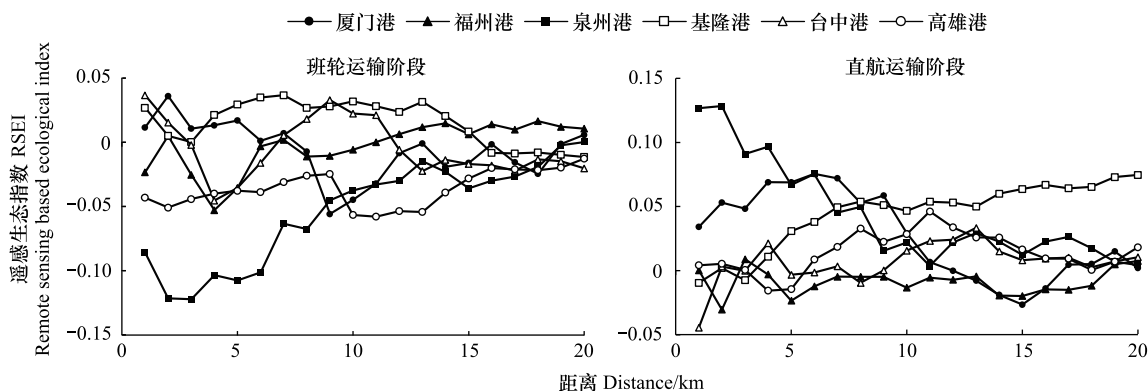


图 14 海峡两岸港口在不同运输阶段多环缓冲区 RSEI 变化

Fig.14 Changes of RSEI at different stages of shipping in the multi-ring buffer zones of the main Cross-Strait ports

州、泉州等都市区的海岸区域;东岸生态环境质量退化的区域为生态质量较好的阿里山脉、玉山山脉、中央山脉等丘陵山地地区。

(2) 海峡两岸生态环境质量具有较强的空间聚集性,海峡两岸都市区一直为低值聚集区,西岸石狮市、晋江市、台江区、湖里区等区域常年较低,西岸东北部及两岸的山地丘陵区域为生态环境质量高值聚集区,生态环境质量最优的区域为新竹县。

(3) 海峡两岸主要港口周边生态环境质量变化的总体特征为距离港口中心越远,建设用地开发程度越弱,生态环境质量越好;21 世纪以来,东岸港口周边城市建设和港口规模变化均不显著,西岸港口城市建设和港口规模均逐年提升;港口规模对港口的影响范围具有一定的影响,高雄港口规模总体较高,其影响范围也最大,影响的平均距离为 5km,泉州港口规模总体较低,其影响范围也最小,影响的平均距离为 2km,厦门港、福州港、基隆港、台中港影响的平均距离为 3km;在影响范围内港口规模对生态环境质量的影响具有一定的阶段性差异,班轮运输阶段港口规模越大,生态环境质量越低,高雄港生态环境质量较低;直航运输阶段西岸港口

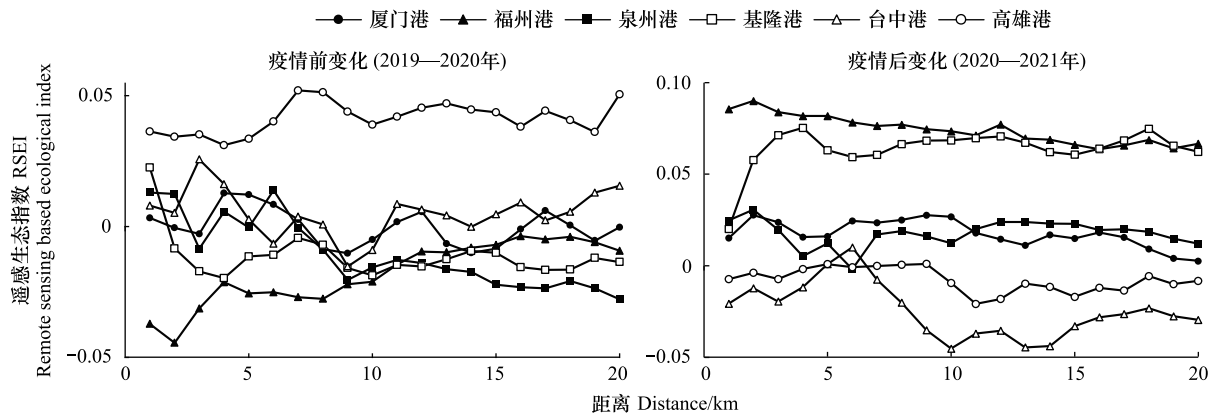


图 15 海峡两岸港口疫情前后多环缓冲区 RSEI 变化

Fig.15 Changes of RSEI in the multi-ring buffer zones of the main Cross-Strait ports before and after the outbreak

的生态建设效果较为显著,港口规模越大,生态环境质量改善越显著,而东岸生态建设情况一般,港口周边生态环境质量未大幅改善。

(4) 新冠疫情对海峡两岸港口发展和生态环境质量影响较大,除福州港外,港口货物吞吐量均下降,生态环境质量略有提升。

综上所述,21 世纪以来,东岸已进入到社会经济发展稳定阶段,针对都市区的开发活动减少,但对自然生态系统的侵占小幅提升,且对生态环境质量提升关注度偏低,生态环境质量改善不显著,应限制人类活动对自然生态系统的干扰,加强对自然生态系统的保护力度,并加大与西岸交流与联系,加强港口周边的生态建设;西岸处于社会经济高速发展阶段,在发展初期主要是针对都市区的开发建设,对都市区生态环境破坏较大,生态环境质量下降较显著,随着生态文明的不断的推进,西岸在城市开发过程中不断加强生态建设和生态保护,生态环境质量不断提升,自然生态系统未遭到显著破坏,但生态建设的力度还不足,港口周边生态建设仍未全面展开,泉州港的生态建设力度低于福州港和厦门港,应在提升港口规模和港口建设的同时加强生态建设。西岸应持续推进生态文明建设,加大生态环境保护与城市发展的协调程度,推动城市的高质量发展。

5.2 讨论

5.2.1 RSEI 模型的构建

为了减小季节差异,确保植被具有相近生长状态,遥感生态指数构建通常采用单一月份并挑选质量完好的影像^[5,32,43],但难以代表全年生态环境质量状况。海峡两岸位于亚热带地区,植被生长季遥感影像云层覆盖多易导致数据空缺,需进行数据填补。本文基于全年影像数据使用 MODIS 数据对 Landsat 数据进行补充,能确保反演中等尺度指标的稳定性。主成分分析方法是耦合 RSEI 4 个指标的关键,采用该方法得出指标的特征向量方向将影响 RSEI 的最终结果。从表 1 的结果看,仅 2007 年、2008 年两个年份的特征向量方向相反,导致徐涵秋的 RSEI 公式^[31]不满足“RSEI 值越大生态越好”的要求,需要采用 Li 等^[51]的公式进行计算才能获得正确的结果。

5.2.2 不足与展望

由于海峡两岸气候差异较小,城市发展较快,自然因素对两岸生态环境差异性影响作用较弱,社会经济成为影响两岸生态环境质量差异性的主要因素之一。本文采用 RSEI 分析港口城市建设及规模对两岸生态环境的影响,为研究生态港口提供了一定的思路。但港口污染物排放等因素对其周边生态环境质量影响也较大^[4,12],仅使用 RSEI 分析生态环境是不充分的。以绿度、湿度、干度和热度 4 个指标构建遥感生态指数的方法已成熟,具有综合、客观、高效等特点,对于类似海峡两岸这种大尺度、长时序的研究具有一定的优势,能有效进行动态监测、时空演变分析、生态评估等^[9,24—25,27]。然而生态系统具有复杂性及多样性,4 个指标仅代表

地表状况,缺失空气质量状况如 CO₂、臭氧、气溶胶等信息,水质状况如水重金属等以及三维结构信息如三维绿量等,是否能全面多维度表征特定的区域生态环境质量这一问题值得思考,且在改进模型时,需注意模型机制的研究。该文尚未利用 Landsat7 使其保持较高分辨率,改进模型并分析驱动力有待深入研究。

参考文献 (References):

- [1] 国家统计局,生态环境部. 中国环境统计年鉴-2021. 北京: 中国统计出版社, 2021.
- [2] Crossland C J, Baird D, Ducrotoy J P, Lindeboom H, Buddemeier R W, Dennison W C, Maxwell B A, Smith S V, Swaney D P. The coastal zone-a domain of global interactions // Crossland C J, Kremer H H, Lindeboom H J, Marshall Crossland J I, Le Tissier M D A. Coastal Fluxes in the Anthropocene. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2005: 1-37.
- [3] Population Division. World population prospects. United Nations: Department of Economic and Social Affairs, 2019.
- [4] Chen J W, Zhang H, Xue J Z, Yuan L, Yao W, Wu H X. Study on spatial distribution, potential sources and ecological risk of heavy metals in the surface water and sediments at Shanghai Port, China. Marine Pollution Bulletin, 2022, 181: 113923.
- [5] Pan W H, Wang S Y, Wang Y, Yu Y J, Luo Y Y. Dynamical changes of land use/land cover and their impacts on ecological quality during China's reform periods: a case study of Quanzhou city, China. PLoS One, 2022, 17(12): e0278667.
- [6] Yang J, Luo X, Jin C, Xiao X M, Xia J H. Spatiotemporal patterns of vegetation phenology along the urban-rural gradient in Coastal Dalian, China. Urban Forestry & Urban Greening, 2020, 54: 126784.
- [7] Huang J M, Chen L C. A numerical study on mitigation strategies of urban heat islands in a tropical megacity: a case study in Kaohsiung city, Taiwan. Sustainability, 2020, 12(10): 3952.
- [8] Halpern B S, Frazier M, Afflerbach J, Lowndes J S, Micheli F, O'Hara C, Scarborough C, Selkoe K A. Recent pace of change in human impact on the world's ocean. Scientific Reports, 2019, 9: 11609.
- [9] Zheng Z H, Wu Z F, Chen Y B, Yang Z W, Marinello F. Exploration of eco-environment and urbanization changes in coastal zones: a case study in China over the past 20 years. Ecological Indicators, 2020, 119: 106847.
- [10] Bao R, Zhang A C. Does lockdown reduce air pollution? Evidence from 44 cities in Northern China. Science of the Total Environment, 2020, 731: 139052.
- [11] Monios J, Wilmsmeier G. Maritime governance after COVID-19: how responses to market developments and environmental challenges lead towards degrowth. Maritime Economics & Logistics, 2022, 24(4): 699-722.
- [12] Hua C Y, Chen J H, Wan Z, Xu L, Bai Y, Zheng T X, Fei Y J. Evaluation and governance of green development practice of port: a sea port case of China. Journal of Cleaner Production, 2020, 249: 119434.
- [13] 习近平. 为实现中华民族伟大复兴推进祖国和平统一而共同奋斗——在《告台湾同胞书》发表 40 周年纪念会上的讲话. 台声, 2019(1): 6-9.
- [14] 苏美祥. 近 40 年来两岸经贸关系发展: 多维观察与前景展望. 现代台湾研究, 2018(4): 16-24.
- [15] 王列辉, 洪彦. 直航背景下海峡两岸集装箱港口体系空间结构——基于复杂网络的视角. 地理学报, 2016, 71(4): 605-620.
- [16] 张宇. 闽台经济综合竞争力比较研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2019.
- [17] Abdulmana S, Garcia-Constantino M, Lim A. The influence of elevation, land cover and vegetation index on LST increase in Taiwan from 2000 to 2021. Sustainability, 2023, 15(4): 3262.
- [18] Wu W T, Zhi C, Chen C P, Tian B, Chen Z Q, Su H. Detecting annual anthropogenic encroachment on intertidal vegetation using full Landsat time-series in Fujian, China. GIScience & Remote Sensing, 2022, 59(1): 2266-2282.
- [19] 伍博炜, 王远, 王强, 伍世代, 詹智成, 蒋培培. 福建省生态环境与高质量发展耦合关系及驱动机制. 生态学报, 2022, 42(20): 8238-8253.
- [20] 赵其国, 黄国勤, 马艳芹. 中国生态环境状况与生态文明建设. 生态学报, 2016, 36(19): 6328-6335.
- [21] 张文忠, 许婧雪, 马仁锋, 马诗萍. 中国城市高质量发展内涵、现状及发展导向——基于居民调查视角. 城市规划, 2019, 43(11): 13-19.
- [22] 邵超峰, 鞠美庭, 楚春礼, 胡翠娟. 我国生态港口的建设思路与发展对策. 生态学报, 2008, 28(11): 5601-5609.
- [23] 蔡文博, 韩宝龙, 逯非, 冼超凡, 欧阳志云. 全球四大湾区生态环境综合评价研究. 生态学报, 2020, 40(23): 8392-8402.
- [24] 苏嘉亮, 晏晨然, 雷雨, 王芸, 赵鹏祥. 陕西省生态环境质量长时序动态监测. 生态学报, 2023, 43(2): 554-568.
- [25] 李光哲, 王浩, 曹银璇, 张晓宇, 宁晓刚. 长株潭城市群生态环境质量时空演变及影响因素分析. 自然资源遥感, 2023: 1-12.
- [26] Shan W, Jin X B, Ren J, Wang Y C, Xu Z G, Fan Y T, Gu Z M, Hong C Q, Lin J H, Zhou Y K. Ecological environment quality assessment based on remote sensing data for land consolidation. Journal of Cleaner Production, 2019, 239: 118126.
- [27] Zhou J B, Liu W Q. Monitoring and evaluation of eco-environment quality based on remote sensing-based ecological index (RSEI) in Taihu Lake basin, China. Sustainability, 2022, 14(9): 5642.

- [28] Xiong C S, Tian Y, Liu X, Tan R, Luan Q L. The different impacts of airports on the ecological environment under distinct institutional contexts. *Land*, 2022, 11(2): 291.
- [29] Yu H D, Zhao J J. The impact of environmental conditions on urban eco-sustainable total factor productivity: a case study of 21 cities in Guangdong Province, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020, 17(4): 1329.
- [30] 雍凯婷, 陈增文, 李师炜, 陈文惠, 胡清华. 基于 CEI 的城市生态环境状况评价——以福建省为例. *亚热带资源与环境学报*, 2022, 17(1): 87-94.
- [31] 徐涵秋. 城市遥感生态指数的创建及其应用. *生态学报*, 2013, 33(24): 7853-7862.
- [32] Liu C, Yang M H, Hou Y T, Zhao Y N, Xue X Z. Spatiotemporal evolution of island ecological quality under different urban densities: a comparative analysis of Xiamen and Kinmen Islands, southeast China. *Ecological Indicators*, 2021, 124: 107438.
- [33] Wen X L, Ming Y L, Gao Y G, Hu X Y. Dynamic monitoring and analysis of ecological quality of Pingtan comprehensive experimental zone, a new type of sea island city, based on RSEI. *Sustainability*, 2019, 12(1): 21.
- [34] Karra K, Kontgis C, Statman-Weil Z, Mazzariello J C, Mathis M, Brumby S P. Global land use/land cover with Sentinel 2 and deep learning//// 2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS. July 11-16, 2021. Brussels, Belgium. IEEE, 2021: 4704-4707.
- [35] 程伟, 钱晓明, 李世卫, 马海波, 刘东升, 刘富乾, 梁军龙, 胡举. 时空遥感云计算平台 PIE-Engine Studio 的研究与应用. *遥感学报*, 2022, 26(2): 335-347.
- [36] Gorelick N, Hancher M, Dixon M, Ilyushchenko S, Thau D, Moore R. Google earth engine: planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 202: 18-27.
- [37] 杨坤士, 卢远, 翁月梅, 韦丽珍. Google Earth Engine 平台支持下的南流江流域生态环境质量动态监测. *农业资源与环境学报*, 2021, 38(6): 1112-1121.
- [38] Huang H P, Chen W, Zhang Y, Qiao L, Du Y Y. Analysis of ecological quality in Lhasa Metropolitan Area during 1990-2017 based on remote sensing and Google Earth Engine platform. *Journal of Geographical Sciences*, 2021, 31(2): 265-280.
- [39] Lin L L, Hao Z B, Post C J, Mikhailova E A. Monitoring ecological changes on a rapidly urbanizing island using a remote sensing-based ecological index produced time series. *Remote Sensing*, 2022, 14(22): 5773.
- [40] 王渊, 赵宇豪, 吴健生. 基于 Google Earth Engine 云计算的城市群生态质量长时序动态监测——以粤港澳大湾区为例. *生态学报*, 2020, 40(23): 8461-8473.
- [41] 杨泽康, 田佳, 李万源, 苏文瑞, 郭睿妍, 刘文娟. 黄河流域生态环境质量时空格局与演变趋势. *生态学报*, 2021, 41(19): 7627-7636.
- [42] 杨永健. 基于遥感生态指数的生态质量变化分析——以福建为例[D]. 西安: 长安大学, 2019.
- [43] Wang Y B. Estimation of urban environment in Taipei living circle based on remote sensing ecological index. *Forest Ecosystems under Climate Change: Biological Productivity and Remote Monitoring*, 2020, 6: 135-146.
- [44] 刘翠莲, 刘健美, 刘南南, 王思婷. DPSIR 模型在生态港口群评价中的应用. *上海海事大学学报*, 2012, 33(2): 61-64, 93.
- [45] 赵宇哲, 刘芳. 生态港口评价指标体系的构建——基于 R 聚类、变异系数与专家经验的分析. *科研管理*, 2015, 36(2): 124-132.
- [46] 中华人民共和国交通运输部. 全国港口货物、集装箱吞吐量. [2023-08-01]. <https://www.mot.gov.cn/tongjishuju/gangkouhuowulvketl/>.
- [47] 徐涵秋. 利用改进的归一化差异水体指数(MNDWI)提取水体信息的研究. *遥感学报*, 2005, 9(5): 589-595.
- [48] Yang J, Huang X. The 30m annual land cover datasets and its dynamics in China from 1985 to 2022 [Data set]. *Earth System Science Data*, 2023, 13(1): 3907-3925.
- [49] Liu W, Yang Y B, Luo Q Y, Zeng X F, Chen C X, Zhu J F, Lin W S, Chen H B, Huo W W, He M X, Jin Y P, Xu J Y. Study on the contribution of seaport to urban economy: an empirical and quantitative analysis of Xiamen Port. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2022, 10(11): 1753.
- [50] 邓焕彬, 朱善庆. 全国沿海主要港口吞吐量与地区经济发展关系研究. *中国港口*, 2009(2): 43-45, 48.
- [51] Li N, Wang J Y, Qin F. The improvement of ecological environment index model RSEI. *Arabian Journal of Geosciences*, 2020, 13(11): 403.
- [52] 万存灵. 2019 年度福建省县域经济实力"十强"县(市)30 日公布. 中央广播电视总台央广网, (2019-11-30) [2023-05-03]. http://www.cnr.cn/fj/yg/20191130/t20191130_524879163.shtml.
- [53] Anselin L. Local indicators of spatial association-LISA. *Geographical Analysis*, 2010, 27(2): 93-115.
- [54] 台当局称两岸海运客运直航 2 月 10 日起暂停. 中华航运网, (2020-02-10) [2023-05-03]. https://info.chineseshipping.com.cn/cninfo/News/202002/t20200210_1332240.shtml.