

黄胤滔,俞鸿杰,许月萍,等. 基于GEE和遥感生态指数的临海市生态环境质量评价及分析[J]. 环境科学与技术, 2024, 47(11): 217-228. Huang Yintao, Yu hongjie, Xu Yueping, et al. Evaluation of ecological environmental quality and analysis in Linhai City based on GEE and remote sensing ecological index[J]. Environmental Science & Technology, 2024, 47(11): 217-228.

基于GEE和遥感生态指数的临海市生态环境质量评价及分析

黄胤滔, 俞鸿杰, 许月萍, 江衍铭*

(浙江大学建筑工程学院, 浙江 杭州 310058)

摘要: 现代快速城市化进程导致生态环境退化问题日益显著, 城市发展与生态环境变化具备相关性, 该文选取较高精度卫星影像普及后快速城市化的临海市作为典型研究区域, 通过谷歌地球引擎云计算平台, 基于2000-2020年Landsat5及Landsat8系列遥感数据构建遥感生态指数, 并采用相关性、空间自相关、地理探测器方法进行分析。结果表明: (1) 临海市研究区RSEI均值由2000年的0.74减小至2020年的0.64, 20年间整体生态环境质量下降, 但研究区生态环境等级仍以优、良为主。(2) 研究区全局莫兰指数均大于0.3并随年份不断上升, 临海市生态环境质量在全域及局部自相关上呈现高聚集度, 具有显著的空间相关性, 20年间“低-低”聚集区呈现不断增加趋势。(3) 临海市生态质量主要影响因素是地形和土地利用, 且在双因子交互作用下人为因素对临海市生态环境质量空间分布存在显著影响。该文综合了长时序、较高精度的遥感数据, 将新兴遥感计算工具谷歌地球引擎云计算平台与ArcGIS、地理探测器工具相结合, 论证了遥感生态指数运用于临海市的合理性, 进行了该区域的时空变化聚类分析, 并归因解释了临海市生态环境变化的主要影响因素。

关键词: 谷歌地球引擎; 遥感生态指数; 地理探测器; 生态环境质量; 临海市

中图分类号: X826 **文献标志码:** A **doi:** 10.19672/j.cnki.1003-6504.0767.24.338 **文章编号:** 1003-6504(2024)11-0217-12

Evaluation of Ecological Environmental Quality and Analysis in Linhai City Based on GEE and Remote Sensing Ecological Index

HUANG Yintao, YU Hongjie, XU Yueping, JIANG Yanming*

(College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: The issue of ecological environment degradation has become increasingly prominent against the backdrop of rapid urbanization. Urban development is increasingly correlated with changes in the ecological environment. Linhai City, which experienced rapid urbanization after the availability of high-resolution satellite imagery, was selected as a typical study area. Through the Google Earth Engine cloud computing platform, and utilizing Landsat5 and Landsat8 remote sensing data from 2000 to 2020, a remote sensing ecological index (RSEI) was constructed and analyzed using correlation, spatial autocorrelation, and geographic detector methods. The results show the average RSEI in the City decreased from 0.74 in 2000 to 0.64 in 2020, indicating a decline in overall ecological quality over 20 years, though the ecological grades remain primarily excellent and good. The global Moran's *I* index values were consistently greater than 0.3 and increased over time, showing high clustering and significant spatial correlation in ecological quality both globally and locally. There is an increasing trend in "low-low" clustering areas over the 20 years. The primary factors influencing the ecological quality in are topography and land use. Human activities significantly affect the spatial distribution of ecological quality through dual-factor interactions. This study integrated long-term, high-resolution remote sensing data, combining emerging remote sensing computation tools such as Google Earth Engine, ArcGIS, and geographic detector tools. It demonstrates the applicability of the RSEI, conducting spatiotemporal change clustering analysis and attributing the primary influencing factors of ecological environment changes in the area.

Key words: Google Earth Engine; remote sensing ecological index; geographical detectors; eco-environmental quality; Linhai City

卫星遥感技术凭借大面积、实时、快速、周期性重复观测的优势被广泛应用于生态环境质量监测研究^[1]。生态环境质量^[2]是指一个区域内生态系统的健康状况和环境的整体状态,它反映了自然环境和人类活动之间的相互作用,以及生态系统在提供生态服务和支持生物多样性方面的能力。评估生态环境质量即衡量一个区域生态系统健康程度,涉及自然资源的可持续性、生态系统的稳定性和生物多样性的丰富程度,不仅关注自然环境的现状,还考虑人类活动对环境的影响。生态环境质量指数是一种基于遥感技术的综合指数,用于评估和监测区域生态环境质量。且徐涵秋^[3]提出了一种完全基于遥感信息、集成多种指标因素的遥感生态指数(remote sensing ecological index, RSEI),认为绿度、湿度、热度、干度是与人类生存发展及直观感受生态条件优劣相关的4个重要指标,常被用于区域生态环境质量快速、客观的评价,通过整合多种生态环境因子,提供了一种定量化的手段来评估生态系统的健康状况和环境质量。对于生态环境质量监测,相关学者提出了各种遥感指数,城市^[4]、植被^[5]、土地^[6]开展了一系列遥感监测与评价。近年来,众多学者利用生态遥感指数对区域生态环境进行了监测。如文献[7]对1997-2017年间固安县、涿州市的生态环境及其空间与时间变化趋势进行评价分析,该研究表明地表覆盖类型的变化对区域生态环境具有显著影响;文献[8]以Landsat数据为基础,使用GIS手段和生态环境状况指数方法对综合治理前后的塔里木河干流生态环境特点进行分析。随着需处理遥感数据的精度、时间长度及范围的扩大,使用影像处理软件进行遥感计算的计算与评价方式较为耗时耗力,且影像利用效率低。而对于Landsat系列卫星,在沿海的研究区域,其卫星遥感数据存在偶见质量不高或扫描不全的问题,如现有的集合数据集Modis等,若仅选取质量较高的图像,用单张或少量图片进行生态质量分析具有难度高、精度不足、分异度低的问题,但通过各研究年份的多个月份进行数据整合,能一定程度解决沿海地区遥感数据目前的问题。近年来,众多学者利用该指数对区域生态环境进行了监测。目前基于遥感生态指数和谷歌地球引擎(Google Earth Engine, GEE)平台^[9]对临海市进行长时间序列的生态环境质量变化的监测评价及其时空分异特征研究尚且较少,同时缺少相关的合理性以及驱动力分析。

本文拟结合GEE云计算平台和多时相Landsat系列遥感数据源,构建和计算临海市遥感生态指数,及

时且客观地评估生态环境质量状况及其时空分布特征,旨在为快速城市化背景下^[10],城市建设与生态环境保护提供一定的科学依据。本研究利用的谷歌地球引擎平台,其与多个遥感影像采集组织进行了合作,且拥有较为迅速的影像处理能力,一定程度上克服了冗长的处理过程和多个数据集合并使用的复杂问题,且解决了长时序同个数据源的生态评级比较问题。该遥感平台已经逐渐开始被学者应用于遥感与生态相关的科学研究中。

1 研究区域概况

临海市位于浙江东部沿海,长三角经济圈的南翼,是台州的副中心城市,也是一个区域和人口规模大的城市,下辖5个街道、14个镇,628个行政村、37个社区及居委会。全市陆域面积为2 251 km²,海域面积为1 590 km²,周围三面环山,一面临海,呈现出“七山一水两分田”的地貌。

临海市研究区及行政区划见图1。临海市地处北纬28°40′~29°04′,东经120°49′~121°41′之间,总面积为3 841 km²,其中陆域面积2 251 km²,海域面积1 590 km²。截至2023年初,临海市户籍人口统计结果为约120万人,常住人口约110万人。临海市近年来发展较为迅速,2022年度,临海市实现地区生产总值约900亿元,人均生产总值达到8万元。

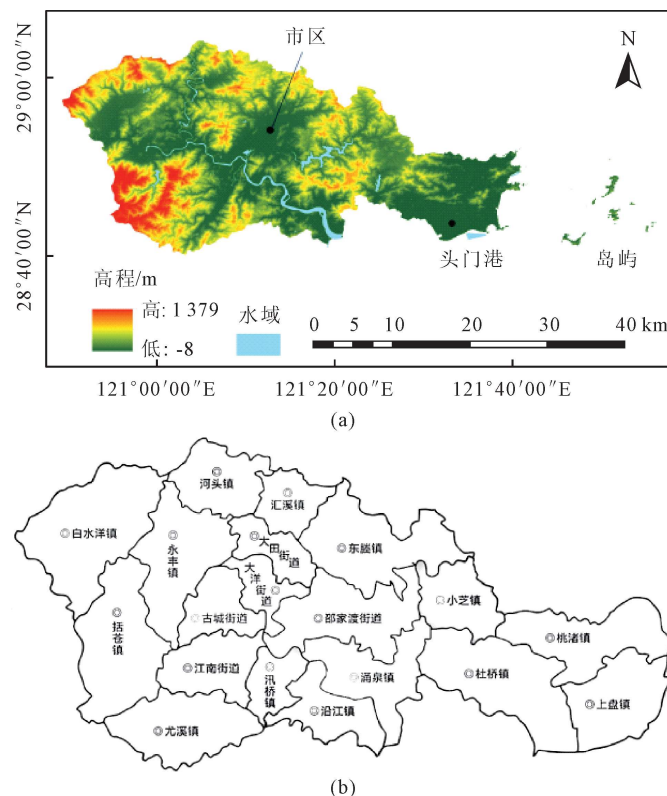


图1 临海市研究区概况及行政区划图
Fig.1 Overview of the study area of Linhai City

自21世纪以来,临海市作为东南沿海快速城镇化的典型城市,先后设立了浙江临海经济开发区和作为

临海市国家级经济技术开发区的浙江头门港经济开发区,在城市及周边进行了快速改造与开发。在 2015 年度,临海市提出了《临海市“十三五”环境保护规划》,以及市政协十三届二次会议《关于加快城市周边区域城市化进程的建议》,其作为同时进行环境保护规划和快速城市化典型城市适合进行长时序的生态环境质量分析验证,对其快速城市化过程对环境的影响进行因子分析。

全球范围内提供较高精度(30 m 及更高精度)图像的卫星影像普及,美国的 Landsat 系列卫星是最早提供较高分辨率遥感影像的项目之一。Landsat 系列为 20 世纪 80 年代发射,于 20 世纪 90 年代时能在临海市区域提供较高质量的图像。临海市于 20 世纪 80 年代撤县设市,并于 1995 年开始城区扩张计划快速城镇化历程;于 2015 年放缓,截至 2015 年,城市建成区面积由 1986 年的 6.9 km² 扩大到 42.75 km²,城镇化率达 59%,之后城镇化率未有较大幅度变化。因此,临海市的城镇化开始时间与较高精度卫星图像全球普及时间相符,适合进行基于卫星图像的生态遥感指数分析,对快速城市化区域的演变历程和影响因子做进一步研究。

2 数据与研究方法

本研究提出了以 GEE 云计算平台为基础^[11],对于临海市的遥感指数计算与生态环境监测提供大尺度、长时间序列的遥感数据筛选与收集、地学数据统计与计算的方法,利用 ArcGIS 软件进行了空间分异特征的处理和可视化,并通过地理探测器对于生态环境质量的驱动力和其相互作用进行了分析。

2.1 数据来源与预处理

本研究所使用的遥感影像数据来源见表 1,选取了较高精度、适宜用作生态环境分析的数据集。在预处理阶段,首先利用去云算法对少量云覆盖的遥感影像进行处理,减弱云像元的影响,并解决去除云图像之间的色差等问题。同时,使用研究区域已校正好的遥感影像作为基准影像,进行大气校正和辐射定标,将图像的亮度灰度值转换为地表反射率,以便进行不同传感器遥感影像之间的对比^[12]。最后,对影像进行合并与融合,并利用研究区的行政边界进行裁剪;根据徐涵秋提出的归一化水体指数^[13]和 JRC(joint research centre)水体面积数据集,对水体进行遮蔽处理。对于地理探测器遥感数据,配合临海市格点数,选取了相应精度的 MODIS 土地利用数据等。

表 1 数据来源统计
Table 1 Statistics of data sources

数据	来源	时间	分辨率
Landsat5TM	美国地质调查局	2000-2020 年 6-10 月	30 m
Landsat8OLI			
行政区划边界	国家基础地理研究中心	-	-
高程	NASA JPL	-	30 m
年平均气温	MODIS	2000-2020	1 km
年平均降水	UCSB-CHG	2000-2020	0.05°
土地利用类型	MODIS	2000-2020	500 m
人口密度	WorldPop	2000-2020	1 km
夜间灯光	DMS-OLS NPP-VIIRS	2000-2020	500 m

2.2 研究方法

2.2.1 分量指标计算

选取 NDVI 来表征绿度,其计算公式如下:

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

式中, ρ_{NIR} 和 ρ_{Red} 分别表示所使用各个遥感影像所对应的近红外波段和红波段的反射率。

利用缨帽变换来进行湿度分量的计算。所用于卫星 Landsat5 和 Landsat8 的遥感影像计算公式有所不同,分别是:

$$WET_{TM} = 0.310 2 \rho_{Red} + 0.202 1 \rho_{Green} + 0.031 5 \rho_{Blue} + 0.159 4 \rho_{NIR} - 0.680 6 \rho_{SWIR1} - 0.610 9 \rho_{SWR2} \quad (2)$$

$$WET_{OLI} = 0.328 3 \rho_{Red} + 0.197 2 \rho_{Green} + 0.151 1 \rho_{Blue} +$$

$$0.340 7 \rho_{NIR} - 0.711 7 \rho_{SWIR1} - 0.455 9 \rho_{SWR2} \quad (3)$$

式中, ρ_{Blue} 、 ρ_{Green} 、 ρ_{Red} 、 ρ_{NIR} 、 ρ_{SWIR1} 、 ρ_{SWR2} 分别表示各遥感影像所对应的蓝波段、绿波段、红波段、近红外波段、短波红外波段 1 和短波红外波段 2 的反射率。

本文将 IBI(建筑指数)和 SI(裸土指数)进行综合考量,利用二者的平均值来表征干度,具体计算公式如下:

$$IBI = [2\rho_{SWIR1} / (\rho_{SWIR1} + \rho_{NIR}) - \rho_{NIR} / (\rho_{Red} + \rho_{NIR}) - \rho_{Green} / (\rho_{Green} + \rho_{SWIR1})] / [2\rho_{SWIR1} / (\rho_{SWIR1} + \rho_{NIR}) + \rho_{NIR} / (\rho_{Red} + \rho_{NIR}) + \rho_{Green} / (\rho_{Green} + \rho_{SWIR1})] \quad (4)$$

$$SI = \frac{(\rho_{SWIR1} + \rho_{Red}) - (\rho_{Blue} + \rho_{NIR})}{(\rho_{SWIR1} + \rho_{Red}) + (\rho_{Blue} + \rho_{NIR})} \quad (5)$$

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

式中, ρ_i 表示 i 波段对应的反射率。

选取 TM 的第 6 波段和 TIRS 的第 10 波段来计算 LST。具体计算公式如下:

$$L = \text{gain} \times \text{DN} + \text{bias} \quad (7)$$

$$T = K_2 / \ln(K_1/L + 1) \quad (8)$$

$$\text{LST} = T/[1 + (\lambda T/\alpha) \ln \varepsilon] \quad (9)$$

式中, L 为热红外波段在的辐射亮度值; DN 为灰度值; gain 和 bias 为热红外波段的增益值和偏置值; T 为传感器处的亮度温度值; K_1 和 K_2 为定标参数, 由谷歌云计算平台提供。 λ 为热红外波段的中心波长, 对于 TM 数据, $\lambda = 11.4 \mu\text{m}$, 对于 TIRS 数据, $\lambda = 10.9 \mu\text{m}$, $\alpha = 1.438 \times 10^{-2} \text{ m/K}$ 。 ε 为地表比辐射率, 通过植被指数混合模型进行估算, 计算过程如下:

$$\text{FVC} = (\text{NDVI} - \text{NDVI}_{\text{soil}}) / (\text{NDVI}_{\text{veg}} - \text{NDVI}_{\text{soil}}) \quad (10)$$

$$d_e = (1 - \varepsilon_s) \times (1 - \text{FVC}) \times F \times \varepsilon_v \quad (11)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_v \times \text{FVC} + (1 - \text{FVC}) \times d_e \quad (12)$$

式中, FVC 为植被覆盖度 (fractional vegetation-cover, FVC); NDVI_{veg} 为全植被覆盖像元的 NDVI , $\text{NDVI}_{\text{soil}}$ 为裸土像元的 NDVI (将 NDVI 小于 0.05 的区域视为裸土像元); d_e 是由卫星倾斜及地形起伏观测引起的误差; ε_s 和 ε_v 分别是裸土像元和全植被像元的比辐射率, 取值分别为 0.960、0.985; F 为地形因子, 通常取值为 0.55。

2.2.2 遥感生态指数评价

从绿度、湿度、热度及干度 4 个分量指标建立临海市的遥感生态质量评估体系, 并采用主成分分析法构建综合遥感生态指数^[14], 即:

$$\text{RSEI} = f(\text{NDVI}, \text{WET}, \text{LST}, \text{NDBSI}) \quad (13)$$

式中, RSEI 为遥感生态指数; NDVI 为植被指数; WET 为湿度; LST 为地表温度; NDBSI 为土壤指数。文中采用的主成分分析是一种采取依次垂直旋转坐标轴的方法, 将多个变量的信息通过线性变换集中到少数几个特征分量的多维数据压缩技术。该方法的优点是集成过程中, 各分量指标的权重主要根据数据本身的性质以及各指标的贡献度客观确定, 避免人为确定进而造成结果偏差。4 个分量指标在进行计算前均需要进行归一化, 以避免进行计算时权重分配失衡^[15]。

2.2.3 水体掩膜处理

临海市研究范围内水体范围较多, 并不能完全忽略, 因此为了减少较大面积水体范围对湿度指标 WET 以及 PCA 分析结果造成影响, 并且使 WET 指标较好反映地表湿度的真实情况, 在进行主成分分析之前, 需要先将临海市研究区域内的水域进行掩膜处理。改进的归一化差异水体指数在识别水域范围的

表现较好, 其计算公式如下:

$$\text{MNDVI} = (\rho_{\text{Green}} - \rho_{\text{MIR}}) / (\rho_{\text{Green}} + \rho_{\text{MIR}}) \quad (14)$$

式中, ρ_{Green} 和 ρ_{MIR} 分别表示各遥感图像所对应的绿波段和中红外波段的反射率。

因临海地处沿海, 且椒江的泥沙含量较高, 仅仅使用单一的归一化水体指数并不能完全去除区域内水体范围, 为了进一步优化归一化水体指数未能良好表现的图像, 引入了 JRC 数据集进行水体掩膜优化。 JRC 数据集是指由欧洲联合研究中心发布的一系列数据集。包含 1984–2021 年地表水的位置和时间分布图, 并提供这些水面的范围和变化的统计数据。将 JRC 数据集和 MNDVI 相结合, 可以得到较好的水体掩膜, 进而一定程度减弱水体对于各个指标的影响。

2.2.4 生态指数的构建

对去除水体范围后的 4 个波段合成遥感影像进行主成分分析来构建生态遥感指数 RSEI , 选择第一主成分 PC1 作为初始遥感生态指数 (RSEI_0), 表达式为:

$$\text{RSEI}_0 = \text{PC1}[f(\text{NDVI}, \text{WET}, \text{LST}, \text{NDBSI})] \quad (15)$$

当生态结果呈现负相关时, 为使得计算结果的高值与生态环境较好的区域相对应, 对于呈现负相关结果, 需要采取转置操作。最后处理得到的结果其数值越大, 表示生态环境质量状况越好; 反之则越差。

2.2.5 全局空间自相关

通过 ArcGIS 软件分析生态指数的空间相关性。全局空间自相关通过计算全局 Moran's I 指数 (Global Moran's I) 反映研究区的空间聚集性^[16]。表达式为:

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})^2} \quad (16)$$

式中, I 为全局 Moran's I 指数统计量; n 为空间单元个数; w_{ij} 为每个空间单元 i 与空间单元 j 的权重矩阵; x_i 、 x_j 分别为 i 和 j 处的 RSEI 值; \bar{x} 为 RSEI 均值。

局部空间自相关局部空间自相关通过计算局部 Moran's I 指数反映研究区网格单元生态环境质量变化之间的相关性^[17, 18], 表达式为:

$$I = \frac{(x_i - \bar{x}) \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (17)$$

式中, I 为局部 Moran's I 指数统计量; 其余变量与全局自相关变量含义相同。

2.2.6 因子探测

地理探测器已被广泛地应用于遥感与生态相关

的研究中^[19]。其中探测影响因子对临海市生态环境质量的解释力^[20,21]表达式为:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \delta_h^2}{N \delta^2} \quad (18)$$

式中, L 为变量的分类数; N 和 N_h 分别为全局与各分类 h 的样本; δ^2 和 δ_h^2 分别为全局与分类 h 的方差; q 为探测因子对生态环境质量的解释程度,取值范围为0~1。 q 值越接近1,说明该因子对生态环境质量的解释力度越强。同时地理探测器可进一步对双因子

交互作用进行分析^[21,22]。

3 分量指标变化特征

为了更充分了解研究区生态环境状况,首先对各期分量指标变化情况进行分析。对临海市行政区内2000–2020年的共21期遥感影像进行信息提取和计算,获取区域内各年份的绿色分量、湿度分量、干度分量、热度分量,并进行归一化处理。21期分量指标及RSEI指标均值如图2所示,取5期遥感影响各项统计结果如表2所示,分量空间分布如图3。

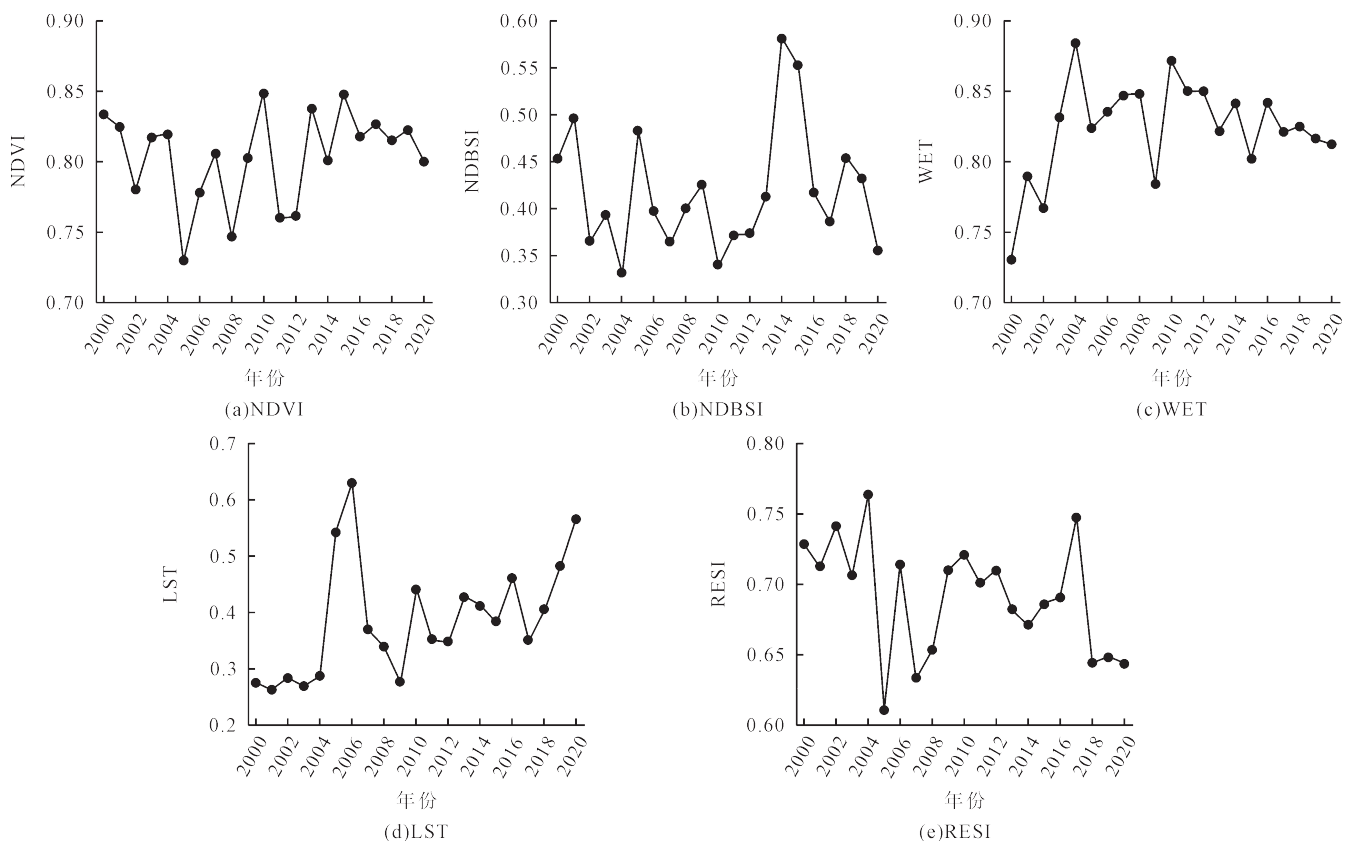


图2 研究区各时期各指标均值折线图
Fig.2 Average of various indicators at different time periods

经过趋势检验,研究时间段内NDVI、WET、NDBSI均值在小范围内波动,但不具有明显上升或下降趋势,LST具有上升趋势而RSEI具有下降趋势。

4 遥感生态指数分析

4.1 主成分分析结果

4.1.1 生态环境质量总体特征与分级评价

将各年份经归一化处理后的绿色、湿度、干度、热度分量进行波段合成,再利用MNDWI及JRC数据集去除合成后的新影像中的大片水域信息,之后进行PCA变换,得到的各期主成分变换结果如表3所示。各时期的主成分分析结果中PC1的特征值贡献率分别为72.00%、74.64%、83.31%、85.31%、81.32%,均超过70%,PC1特征值由4个波段标准化再进行PCA变换

得到,避免了在2015年前后分别使用Landsat5系列和Landsat8系列的遥感数据差异,因此也可进行年际比较。贡献率结果首先表明第一主成分集中了4个分量指标的大部分特征,其次,PC1主成分贡献率随年份增加而有所上升,对比之后的莫兰指数计算,认为快速城市化进程对该地区的聚类分布产生了影响,使得较低值的分布趋向于集中,且4个指标较低值区域分布更趋向于重叠,进而使得更多的生态指标能够被PC1解释,导致PC1的贡献率逐年上升。对比分析Landsat5系列和Landsat8系列的遥感数据,也可知Landsat8系列遥感影像虽然精度未有提升,但是成像效果优于Landsat5系列,也可能造成PCA分析中更少的图像干扰,使得Landsat8系列得到的PCA变换结果更加具有区域的解释力。

表 2 研究区各时期各分量指标统计

Table 2 Statistical analysis of various component indicators in the study area at different time periods

年份	指标	NDVI	WET	NDBSI	LST	RSEI
2000	最小值	0	0	0	0	0
	最大值	1	1	1	1	0.994
	均值	0.846	0.625	0.389	0.340	0.736
	标准差	0.107	0.059	0.106	0.094	0.127
2005	最小值	0	0	0	0	0
	最大值	0.996	1	0.995	1	0.994
	均值	0.714	0.808	0.511	0.506	0.642
	标准差	0.111	0.04	0.096	0.049	0.147
2010	最小值	0	0	0	0	0
	最大值	0.99	0.99	1	1	0.99
	均值	0.839	0.797	0.36	0.463	0.728
	标准差	0.125	0.041	0.112	0.074	0.159
2015	最小值	0	0	0	0.074	0
	最大值	0.999	1	1	1	0.998
	均值	0.84	0.795	0.424	0.379	0.716
	标准差	0.124	0.042	0.14	0.093	0.171
2020	最小值	0	0	0	0	0
	最大值	0.999	1	1	0.998	1
	均值	0.812	0.426	0.345	0.627	0.644
	标准差	0.196	0.174	0.132	0.105	0.204

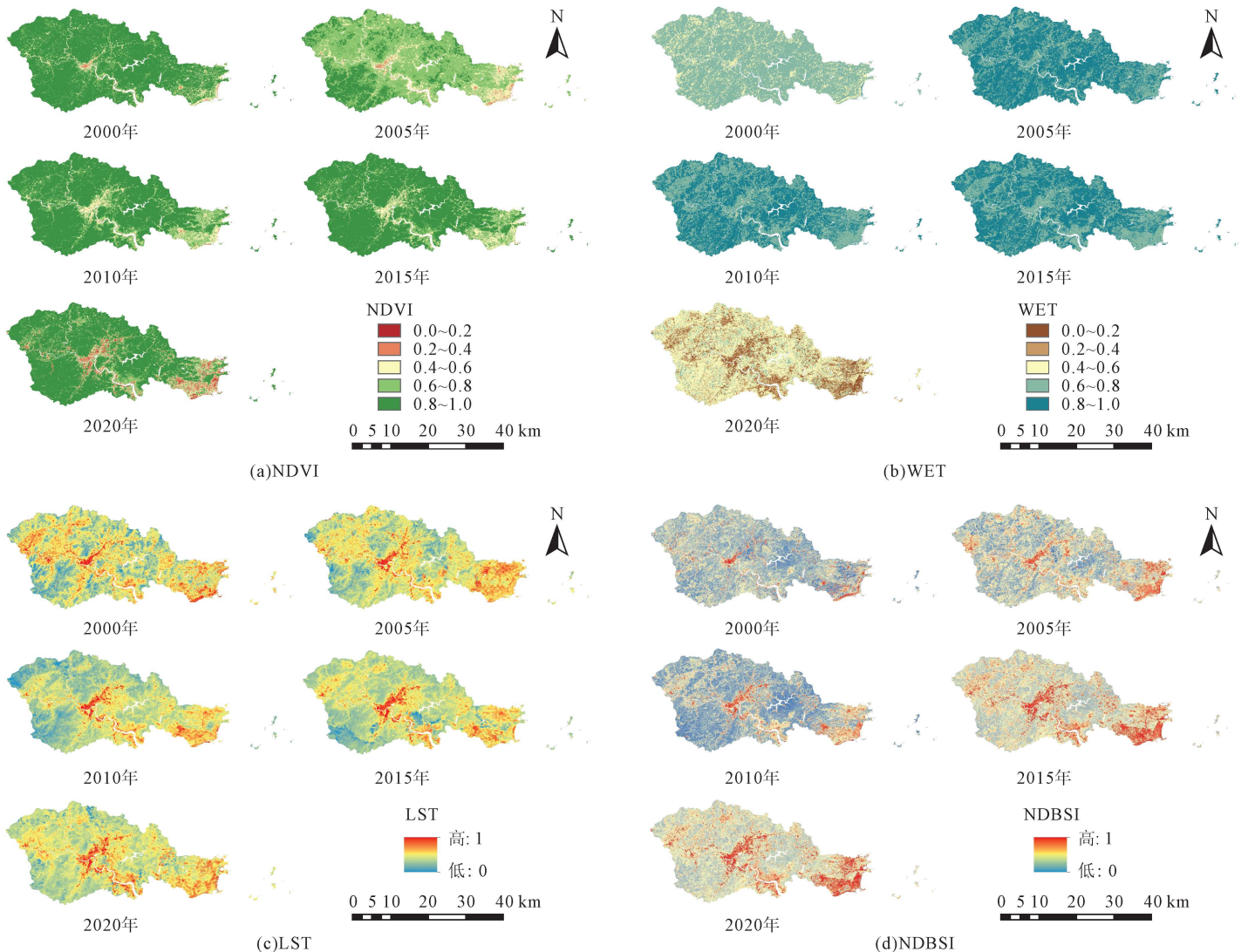


图3 研究区各时期分量空间分布
Fig.3 Spatial distribution of component indicators at different time periods

表 3 RSEI 各指标主成分分析结果

Table 3 Principal component analysis results of RSEI indicators

年份	指标	PC1	PC2	PC3	PC4
2000	NDVI	0.800	0.451	0.312	0.242
	WET	0.059	-0.047	-0.662	0.746
	NDBSI	-0.378	-0.131	0.675	0.620
	LST	-0.462	0.882	-0.095	0.007
	特征值	0.012	0.005	0.002	0.000
	贡献率/%	72.00	15.45	10.66	1.89
2005	NDVI	0.877	0.462	0.060	-0.117
	WET	0.078	-0.360	-0.149	-0.918
	NDBSI	-0.429	0.654	0.498	-0.374
	LST	-0.202	0.478	-0.852	-0.067
	特征值	0.013	0.003	0.001	0.000
	贡献率/%	74.64	16.32	8.02	1.01
2010	NDVI	0.790	0.536	0.252	0.162
	WET	0.088	-0.141	-0.515	0.841
	NDBSI	-0.494	0.267	0.660	0.500
	LST	-0.354	0.789	-0.486	-0.128
	特征值	0.018	0.003	0.001	0.000
	贡献率/%	83.31	11.56	4.67	0.45
2015	NDVI	0.634	0.572	-0.468	-0.229
	WET	0.123	-0.139	0.430	-0.884
	NDBSI	-0.609	-0.043	-0.679	-0.408
	LST	-0.460	0.807	0.369	-0.012
	特征值	0.023	0.003	0.001	0.000
	贡献率/%	85.31	10.2	4.39	0.1
2020	NDVI	-0.689	0.492	0.277	0.455
	WET	-0.280	-0.536	-0.601	0.523
	NDBSI	0.639	0.083	0.256	0.721
	LST	0.200	0.681	-0.704	-0.006
	特征值	0.060	0.009	0.005	0.000
	贡献率/%	81.32	12.2	6.2	0.29

在 PC1 中,4 个分量指标对主成分均有一定的贡献度,其中绿度指标、湿度指标与热度指标、干度指标的载荷符号相反,表明这两组指标对研究区的生态质量有着相反的影响,根据前人的研究结果,NDVI 和 WET 对研究区生态质量具有正向作用,而 LST、NDBSI 对生态质量具有负面影响。在其他主成分中,分量指标载荷的符号与大小均不稳定,对计算结果的解释程度不足,且 PC1 已包含各分量的主要信息,因此本文利用 PC1 来构建 RSEI,对临海市地区生态环境质量进行综合分析。之后为了更好地表明生态环境质量等级,按照归一化之后的数值范围 0~1,每隔 0.2 划分为共 5 级生态环境指数,所得分级结果的空间特征如图 4,并且进行了每年度的面积统计,结果见表 4。

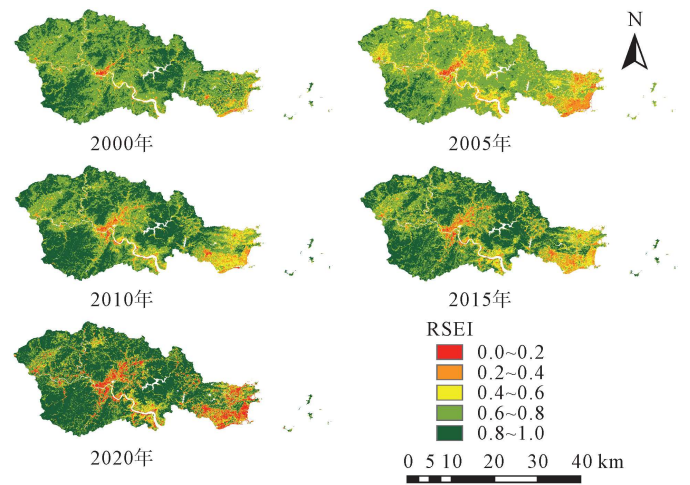


图 4 研究区各时期 RESI 空间分布
Fig.4 Spatial distribution of RESI at different time periods

表 4 RSEI 分级面积及百分比统计表

Table 4 Statistical table of area and percentage of RSEI grades

等级	2000		2005		2010	
	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%
差	8.453	0.405	19.242	0.922	12.794	0.613
较差	68.518	3.282	158.348	7.584	115.811	5.547
中等	147.502	7.064	415.409	19.895	222.967	10.679
良好	1184.731	56.741	1311.730	62.824	796.943	38.169
优秀	678.753	32.508	183.482	8.788	958.872	45.924
等级	2015		2020			
	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%		
差	16.456	0.788	180.303	8.635		
较差	149.458	7.158	152.231	7.291		
中等	258.731	12.392	290.476	13.912		
良好	733.442	35.127	828.310	39.671		
优秀	883.850	42.331	590.113	28.263		

对于各个年份的 RESI 指标,从表 2 可以看出,各年份 RESI 均值均大于 0.6,生态状况整体较好。2000-2005 年,RESI 大幅下降,并在 2010 年回升至 2000 相同水平附近,此后 10 年间,RESI 均值呈现缓慢下降趋势,其均值下降了 0.084。20 年间,临海市地区 RESI 整体呈现下降趋势,但大部分区域 RESI 值仍处于较好的水平。2000-2020 年临海市地区 RESI 空间分布

如图 4 所示,2000、2005 年,RESI 高值区主要分布于括苍山、牛头山水库及白云山附近,低值区主要分布在临海市中心城区及头门港地区,这一时期除括苍山等西南地区外,RESI 均出现了显著下降,中心城区及头门港经济开发区 RESI 值相较其他区域下降幅度最大,0~0.2 级 RESI 值的面积持续扩大。2010 年,RESI 整体趋于上升,但 RESI 高值区分布未出现明显变化,

低值区出现大范围收缩,转向中值区域转移,中心城区及头门港附近的东塍镇、上盘镇出现改善。2015–2020年,植被状况分布较为均匀,总体呈现显著下降变化,局部而言中心城区和头门港地区的RESI低值区域进一步明显增加,并向周围桃渚镇、杜桥镇、永丰镇延伸。总的来说,20年间区域内总体生态状况良好,但随着临海市进行主城区开发与沿海的门头港经济开发区项目等一系列举措的实施,伴随快速城市化进程,局部区域的RESI指数显著下降。

表5 RSEI变化分级面积及百分比统计表
Table 5 Statistical table of RSEI change grades

等级	2000–2005		2005–2010		2010–2015	
	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%
显著改善	0.347	0.017	34.771	1.665	4.084	0.196
改善	25.049	1.200	861.233	41.248	101.381	4.856
基本稳定	1 225.914	58.714	1 122.560	53.764	1 771.62	84.849
退化	734.968	35.200	58.996	2.826	187.688	8.989
显著退化	101.680	4.870	10.399	0.498	23.186	1.110

等级	2015–2020		2000–2020	
	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%
显著改善	16.544	0.792	3.944	0.189
改善	231.598	11.092	64.494	3.089
基本稳定	1 405.978	67.337	1 039.91	49.805
退化	318.093	15.235	593.853	28.442
显著退化	115.745	5.543	385.751	18.475

4.1.2 生态环境质量变化特征

为了更好地分析2000–2020年间临海市地区RSEI的变化情况,本文将相邻两期的RSEI结果做差值运算,并对差值结果进行等级划分,将生态质量变化情况分为显著退化(<-0.3)、退化($-0.3\sim-0.1$)、稳定($-0.1\sim 0.1$)、改善($0.1\sim 0.3$)以及显著改善(>0.3)5个等级。为了体现总体而言20年间临海市生态质量变化情况,本文对2020年与2000年RSEI结果同样进行差值和分级处理。统计结果见表5和图5。

4.2.1 相关性分析

本文通过平均相关系数来检验RSEI的综合性,RSEI与各指标的相关系数的绝对值越大,模型的适宜性越强,其综合程度也就越高。表6为各分量指标之间以及各分量指标与RSEI之间的相关系数统计表。从表中可以看出,RSEI与NDVI、NDBSI的相关性较高,与WET、LST的相关性一般。就分量指标而言,RSEI与4个分量指标相关系数的绝对值均大于0.5。而RSEI与4个分量指标的平均相关度在5个年份的平均值达0.856,并且在各个时期均大于各分量指标间的相关度,因此RSEI较任一分量指标均具有更强的代表性,能够表征4个指标的综合信息,能综合反映临海市地区的生态质量状况。

4.2.2 空间自相关特征分析

使用ArcGIS软件对于各时期RSEI图像进行全局莫兰指数分析(表7),z得分均远大于2.58,P值均低于0.01,因此所得结果的置信度均大于99%。各年份全局莫兰指数均大于0.3,且随年份增加,全局莫兰指数呈现增加趋势,表明生态质量在空间分布上呈现出较强的正向空间自相关,生态质量好的区域及生态环境差的区域在全研究区域呈现明显的聚类分布,生态环境较优的区域和生态环境差的区域较少产生掺杂交错。

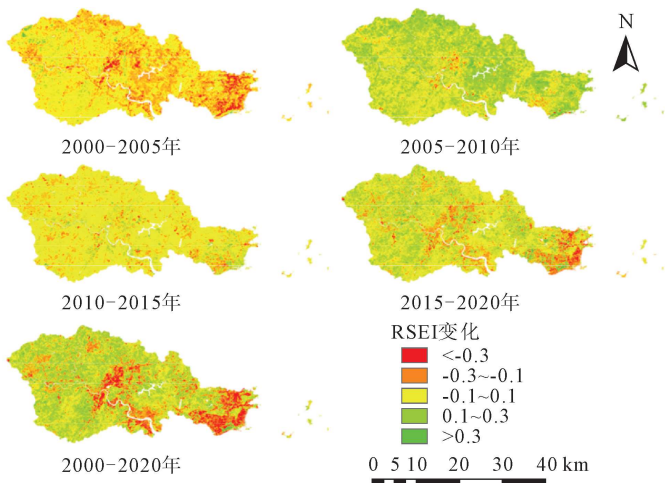


图5 研究区各时期RSEI变化等级空间分布
Fig.5 Spatial distribution of RSEI change grades in the study area at different time periods

从RSEI变化分级统计表(表5)结果可知,2000–2005、2015–2020年退化及显著退化面积相较其他年份较高,处于退化分级的面积分别达到35.200%和15.235%。2010–2015、2015–2020年,临海市生态环境偏向总体处于基本稳定的态势,基本稳定的占比分别达到84.849%及67.337%。同时结合2000–2020年总体分级变化而言,临海市生态环境总体处于退化趋势,基本没有处于改善及显著改善的面积,而退化和显著退化分别占比28.442%及18.475%。

4.2 综合型遥感生态指数综合性检验

表 6 RSEI 及各分量相关性统计

Table 6 Correlation analysis of RSEI and its components

年份	指标	NDVI	WET	NDBSI	LST	RSEI
2000	NDVI	1	0.30	-0.76	-0.51	0.94
	WET	0.30	1	-0.73	-0.40	0.51
	NDBSI	-0.76	-0.73	1	0.44	-0.86
	LST	-0.51	-0.40	0.44	1	-0.72
	RSEI	0.94	0.51	-0.86	-0.72	1
2005	NDVI	1	0.37	-0.69	-0.59	0.97
	WET	0.37	1	-0.82	-0.49	0.57
	NDBSI	-0.69	-0.82	1	0.56	-0.85
	LST	-0.59	-0.49	0.56	1	-0.67
	RSEI	0.97	0.57	-0.85	-0.67	1
2010	NDVI	1.00	0.50	-0.85	-0.75	0.97
	WET	0.50	1.00	-0.81	-0.50	0.65
	NDBSI	-0.85	-0.81	1.00	0.72	-0.94
	LST	-0.75	-0.50	0.72	1.00	-0.83
	RSEI	0.97	0.65	-0.94	-0.83	1.00
2015	NDVI	1	0.68	-0.90	-0.72	0.96
	WET	0.68	1	-0.89	-0.62	0.81
	NDBSI	-0.90	-0.89	1	0.71	-0.97
	LST	-0.72	-0.62	0.71	1	-0.83
	RSEI	0.96	0.81	-0.97	-0.83	1
2020	NDVI	1	0.71	-0.89	-0.68	0.95
	WET	0.71	1	-0.88	-0.58	0.87
	NDBSI	-0.89	-0.88	1	0.64	-0.98
	LST	-0.68	-0.58	0.64	1	-0.71
	RSEI	0.95	0.87	-0.98	-0.71	1

从各年份的 Global Moran's *I* 的变化来看,基本呈现逐渐上升的趋势,2000-2020年,全局莫兰指数增加了 0.28,区域内生态环境质量的空间相关性有所增强。其中 2005 年与 2010 年相比上一年度,全局莫兰指数增长最为明显,分别增加了 0.143 与 0.104。利用局部空间自相关分析以便更直观地了解 RSEI 内部的空间集聚状态,各期生态环境质量在空间上的关联情况如图 6 所示。各年份的局部空间自相关分布情况具有比较明显的相似性,区域内空间相关性为不显著的部分较少,分布在西部与北部区域,而相关程度比较显著的类型主要包括“高-高”、“低-低”两种空间聚集类型,二者具有比较显著的局部空间正相关性。RSEI 的“高-高”集聚区主要分布于尤溪镇。2000 年及 2005 年,除尤溪镇外,“高-高”集聚区还主要出现在小芝镇、汇溪镇,而“低-低”集聚区主要位于中心城区及上盘镇头门港。2010 年,杜桥镇、沿江镇、涌泉镇大部分区域的空间集聚类别转变为“低-低”集聚,研究区内集聚类别为“低-低”集聚的范围明显扩大。2015 年,区域内除尤溪镇、汇溪镇、小芝镇(“高-高”集聚典型区域)外,其余区域的空间聚集板块持续扩大,空间关联性进一步增加,2020 年的情况与 2015 年类似。总体而言,“高-高”集聚区和“低-低”集聚区的空间分布情况同 RSEI 的高值区、低值区的空间分布基本相当,二者呈现出明显的关联。

表 7 RSEI 全局空间自相关分析结果

Table 7 Global spatial autocorrelation analysis of RSEI

年份	全局莫兰指数	z 得分	P 值
2000	0.345	230.923	0.000
2005	0.488	339.572	0.000
2010	0.592	408.163	0.000
2015	0.546	387.351	0.000
2020	0.625	482.474	0.000

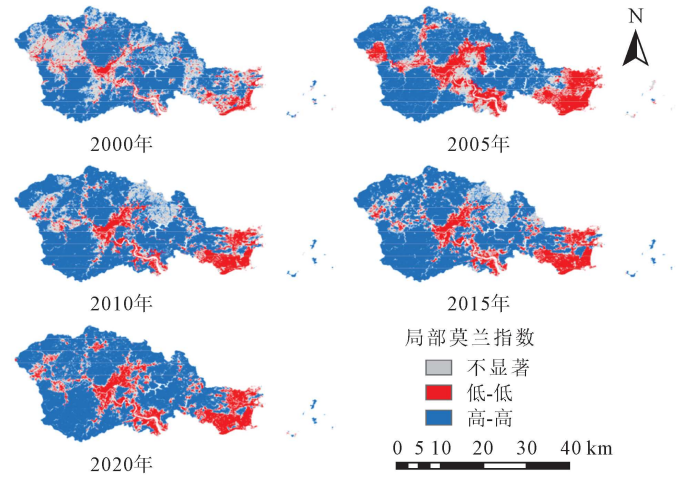


图 6 RSEI 局部空间自相关分布

Fig.6 Distribution of local spatial autocorrelation of RSEI

4.3 生态环境质量影响因素分析

4.3.1 单因子探测分析

选取 2000、2005、2010、2015、2020 共 5 年份,作为临海市生态环境质量因素分析因变量,单因子探测结果见表 8,其中 *q* 值为单个因子对于生态环境的解释力,*p* 值为每个因子对应的显著性。

表 8 单因子探测结果

Table 8 Single factor detection results

年份		X _高	X _坡	X _土	X _水	X _温	X _人	X _灯
2000	<i>q</i>	0.216	0.227	0.291	0.010	0.287	0.101	0.132
	<i>p</i>	0	0	0	0	0	0	0
2005	<i>q</i>	0.271	0.361	0.441	0.113	0.244	0.238	0.198
	<i>p</i>	0	0	0	0	0	0	0
2010	<i>q</i>	0.334	0.453	0.457	0.100	0.321	0.416	0.339
	<i>p</i>	0	0	0	0	0	0	0
2015	<i>q</i>	0.328	0.437	0.445	0.086	0.301	0.386	0.369
	<i>p</i>	0	0	0	0	0	0	0
2020	<i>q</i>	0.327	0.426	0.437	0.144	0.366	0.296	0.334
	<i>p</i>	0	0	0	0	0	0	0
均值		0.295	0.381	0.414	0.091	0.304	0.268	0.275

注: X_土 为土地利用; X_高 为高程; X_人 为人口密度; X_温 为年平均温度; X_水 为年平均降水; X_坡 为坡度; X_灯 为夜间灯光。下同。

分析结果中所有 *p* 值均小于 0.01, 具有显著性, 表明探测因子对临海市的生态环境质量空间分异性解释性较强。各因子对生态环境质量影响程度排序如下: X_土 > X_坡 > X_温 > X_高 > X_灯 > X_人 > X_水, 其中人为因素中的土地利用类型、人口密度、夜间灯光 *q* 均值分别为 0.414、0.268、0.275, 处于较高的水平, 表明人为因素对临海市生态环境质量影响较大, 也即认为临海市在该年份生态环境改变与临海市经济发展和城市扩张密

切相关,其中人口及夜间灯光的 q 值在2010年具有显著性提高,认为该年份为城市化发展较快,人为因素对周边环境造成较为显著的影响。在之后的2015及2020年,人口密度和夜间灯光的 q 值略有所下降,认为与临海市头门港经济开发区相关,由于港口城镇的人口密度与夜间活动随着经济发展和地区开发变化相对不显著,在经济开发区发展过程中,土地利用等环境因素相较于人口与灯光因素改变更为显著。地形因素中高程和坡度 q 均值为0.295和0.381,表明地形因素对于城市的扩张、经济增长、人口增加与迁移具有限制性,临海市的海拔高度从0~1 300 m,存在较多地区因坡度和高度不适宜进行城市开发及发展,因此坡度和高程成了城市发展的重要考量因素和驱动力。最后属于自然因素的年均温度和年均降水的显著性中,年均温度的 q 值为0.304,认为城市发展对下

垫面产生影响,进而引起年均温度的区域性变化,而年均降水的 q 值仅为0.091,认为其对于城市发展并不具有决定性。

4.3.2 因子交互作用分析

交互作用探测和生态探测结果见表9。所有双因子作用结果均比单因子作用结果高,且比较可得土地利用类型与坡度高于其他因子间交互作用结果,5个年份均维持在0.4以上,对临海的生态质量变化具有较高的影响力,表明临海的自然因素中限制了城市化进行的范围,在地形限制下人为因素又显著地改变了土地利用。同时,人类活动相关的人口密度和夜间灯光对其他因子作用均有显著提高。此外,其余自然因素和气候要素的因子相互作用结果相比单因子分析并未有显著提高,表明对生态环境质量空间分布不存在较大影响。

表9 交互作用探测和生态探测结果
Table 9 Interaction detection and ecological detection results

年份		X _高	X _坡	X _土	X _水	X _温	X _人	X _灯
2000	X _高	0.216	N	Y	Y	N	Y	Y
	X _坡	0.307	0.227	N	Y	N	Y	Y
	X _土	0.361	0.413	0.291	Y	N	Y	Y
	X _水	0.257	0.269	0.349	0.010	Y	Y	Y
	X _温	0.341	0.370	0.438	0.320	0.287	Y	Y
	X _人	0.300	0.311	0.357	0.112	0.317	0.101	N
	X _灯	0.267	0.289	0.373	0.161	0.317	0.234	0.132
2005	X _高	0.271	Y	Y	Y	N	N	Y
	X _坡	0.445	0.361	Y	Y	Y	Y	Y
	X _土	0.491	0.540	0.441	Y	Y	Y	Y
	X _水	0.341	0.450	0.512	0.113	Y	Y	Y
	X _温	0.340	0.435	0.513	0.330	0.244	N	N
	X _人	0.348	0.434	0.498	0.287	0.340	0.238	N
	X _灯	0.350	0.441	0.516	0.286	0.347	0.308	0.198
2010	X _高	0.334	Y	Y	Y	N	Y	N
	X _坡	0.543	0.453	N	Y	Y	Y	Y
	X _土	0.523	0.618	0.457	Y	Y	Y	Y
	X _水	0.384	0.523	0.526	0.100	Y	Y	Y
	X _温	0.430	0.535	0.529	0.416	0.321	Y	N
	X _人	0.506	0.600	0.585	0.477	0.512	0.416	Y
	X _灯	0.487	0.575	0.580	0.469	0.473	0.492	0.339
2015	X _高	0.328	Y	Y	Y	N	Y	N
	X _坡	0.521	0.437	N	Y	Y	Y	Y
	X _土	0.509	0.596	0.445	Y	Y	Y	Y
	X _水	0.378	0.491	0.523	0.086	Y	Y	Y
	X _温	0.409	0.508	0.523	0.395	0.301	Y	Y
	X _人	0.479	0.557	0.542	0.442	0.475	0.386	N
	X _灯	0.490	0.537	0.552	0.479	0.452	0.456	0.369
2020	X _高	0.327	Y	Y	Y	N	Y	N
	X _坡	0.520	0.426	N	Y	Y	Y	Y
	X _土	0.485	0.576	0.437	Y	Y	Y	Y
	X _水	0.379	0.483	0.480	0.144	Y	N	Y
	X _温	0.424	0.517	0.513	0.401	0.366	Y	Y
	X _人	0.383	0.480	0.471	0.280	0.398	0.296	Y
	X _灯	0.437	0.504	0.501	0.372	0.436	0.351	0.334

注:Y-显著,N-不显著。

5 讨论与结论

5.1 讨论

经过贡献率分析、相关性比对及全局、局部莫兰指数分析,认为结合GEE的长时序多图像的RSEI指数作为一种快速生态质量分析方法,其应用于沿海城市临海市具有较高的合理性,能够集合大部分生态指标的特征且具有较高空间分异性,对生态环境变化进行长期的快速监测。

研究发现2000–2020年临海市生态环境质量呈现下降趋势,RSEI均值介于0.64~0.74;2020年临海市生态环境质量相较于2000年有所下降。同时,据临海市政府文件,临海市目前设有2个经济开发区,为区域范围涉及大洋、江南、大田、邵家渡、东塍、沿江、涌泉、汛桥“四街四镇”的浙江临海经济开发区和作为临海市国家级经济技术开发区的浙江头门港经济开发区,且2个开发区区域均与RSEI指标低值扩张区域相符,表明此期间临海市的经济开发政策对生态产生了一定的阶段性影响。根据近年发布的《临海市环境质量状况公告》,空气环境及水环境质量稳中向好,且根据本文临海市生态环境质量分析,临海市整体RSEI生态环境质量指数仍旧保持良好,生态环境质量较好的地区分布在西南部及东北部的山地区域及牛头山水库周边,仅主城区和港口及周边县镇生态环境质量较差,主要由于近年来临海市城市化建设规模不断扩大和社会经济的增长,建筑和裸土不断增加,致使其城市行政区及经济开发区生态环境偏向于恶化。对于生态环境和城市发展需要兼顾,合理地划定进一步开发区域,并对现存良好生态保护区域进行必要的保护。

在应用方面,研究结果可以辅助临海市政府在区域规划和政策制定时进行科学决策,以便在经济发展与生态保护中保持平衡。特别是对区划开发区域的管理,以及对具有较高生态价值区域的保护,提供实证支持。通过适当调整政策,可以确保临海市在继续发展的同时,其生态环境质量得以保持甚至改善。

在本研究中,利用长时序Landsat影像在GEE平台上对临海市的生态环境质量进行系统分析虽具有较好效果,但仍有不足之处。首先,数据分辨率的限制可能影响了精细化分析的效果。Landsat数据在城市化细节监测方面可能不及更高分辨率的数据(如高分二号卫星影像),这可能导致本研究在快速变化的城市边缘区域低估了某些细微变化,尤其在人类活动高强度的地区。其次,RSEI指数虽然整合了多个生态指标,但仍未涵盖空气质量、水质、土壤污染等其

他重要环境因素,这在某些方面限制了对生态环境质量的更全面评估。

对于进一步研究方向,城市化发展的区域可以采用相较Landsat更高精度的卫星遥感数据(如高分二号卫星影像)。同时参考国家《生态保护红线划定指南》,城市区域范围内的生态环境评估可以增加对大气环境质量、水域环境质量和土壤污染指标、人类活动指数等的考量,进一步添加适合该地区生态环境评估的指标,以完善和丰富环境监测结果的全面性。

5.2 结论

(1)2000–2020年间临海市RSEI均值在时间上曲折变化,整体呈劣化趋势;空间上,临海市生态环境等级仍旧以优、良为主,港口与主城区以及若干县局部环境指数下降较为显著。

(2)临海市生态环境质量在全局自相关上呈聚类趋势,具有显著的空间正相关性;在局部自相关上2000–2020年聚集特征基本保持一致,“高–高”聚集和“低–低”聚集特征最为明显,“低–低”聚集区先呈现不断增加趋势,表明临海市总体生态环境质量呈现轻微下降趋势,并在局部表现显著。

(3)地理探测器结果表明,临海市生态质量主要影响因素是地形、土地利用,且在双因子交互作用下人为因素对临海市生态环境质量空间分布存在显著影响。

[参考文献]

- [1] 张华,宋金岳,李明,等. 基于GEE的祁连山国家公园生态环境质量评价及成因分析[J]. 生态学杂志, 2021,40(6):1883–1894.
Zhang Hua, Song Jinyue, Li Ming, et al. Eco-environmental quality assessment and cause analysis of Qilian Mountain National Park based on GEE[J]. Chinese Journal of Ecology, 2021,40(6):1883–1894.
- [2] An M, Xie P, He W J, et al. Spatiotemporal change of ecological environment quality and human interaction factors in Three Gorges ecologic economic corridor, based on RSEI [J]. Ecological Indicators, 2022,141:109090.
- [3] 徐涵秋. 城市遥感生态指数的创建及其应用[J]. 生态学报, 2013,33(24):7853–7862.
Xu Hanqiu. A remote sensing urban ecological index and its application[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(24): 7853–7862.
- [4] Gupta K, Kumar P, Pathan S K, et al. Urban neighborhood green index—a measure of green spaces in urban areas[J]. Landscape and Urban Planning, 2012,105(3):325–335.
- [5] Ochoa-Gaona S, Kampichler C, de Jong B H J, et al. A multi-criterion index for the evaluation of local tropical forest conditions in Mexico[J]. Forest Ecology and Manage-

- ment, 2010,260(5):618-627.
- [6] 汤世华,樊凤雷,王云鹏,等. 土地利用变化的遥感监测及其与经济发展关系的研究:以增城市1998-2003土地利用为例[J]. 农业现代化研究, 2005,26(5):378-381.
Tang Shihua, Fan Fenglei, Wang Yunpeng, et al. Change of land-use by remote sensing monitoring and relations with economic development: taking land-use of Zengcheng from 1998 to 2003 as an example[J]. Research of Agricultural Modernization, 2005,26(5):378-381.
- [7] 温小乐,陈旭,徐涵秋. 基于遥感生态指数的京郊南部城市生态评价:以涿州市、固安县为例[J]. 福州大学学报:自然科学版, 2022,50(2):286-292.
Wen Xiaole, Chen Xu, Xu Hanqiu. Ecological evaluation of cities in southern Beijing suburbs based on remote sensing ecological index: taking Zhuozhou City and Gu'an County as examples[J]. Journal of Fuzhou University: Natural Science Edition, 2022,50(2):286-292.
- [8] 张沛,徐海量,杜清,等. 基于RS和GIS的塔里木河干流生态环境状况评价[J]. 干旱区研究, 2017,34(2):416-422.
Zhang Pei, Xu Hailiang, Du Qing, et al. Change of ecological conditions in the mainstream area of the Tarim River based on RS and GIS during the period of 1990-2010[J]. Arid Zone Research, 2017,34(2):416-422.
- [9] Gorelick N, Hancher M, Dixon M, et al. Google Earth Engine: planetary-scale geospatial analysis for everyone[J]. Remote Sensing of Environment, 2017,202:18-27.
- [10] 袁步先,吴楠,程鹏. 2010-2020年巢湖流域生态系统类型的时空变化特征及驱动力分析[J]. 安徽农业科学, 2022,50(7):59-64.
Yuan Buxian, Wu Nan, Cheng Peng. Analysis on spatial temporal variation characteristics and driving forces of ecosystem types in Chaohu Lake Basin from 2010 to 2020[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2022,50(7):59-64.
- [11] Xia Q Q, Chen Y N, Zhang X Q, et al. Spatiotemporal changes in ecological quality and its associated driving factors in central Asia[J]. Remote Sensing, 2022,14(14):3500.
- [12] 黄华兵,陈彦磊,Clinton N,等. 利用谷歌地球引擎中的所有Landsat图像绘制北京主要土地覆盖动态[J]. 遥感环境, 2017,202:166-176.
Huang Huabing, Chen Yanlei, Clinton N, et al. Mapping major land cover dynamics in Beijing using all Landsat images in Google Earth Engine[J]. Remote Sensing of Environment, 2017,202:166-176.
- [13] 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[J]. 遥感学报, 2005,9(5):589-595.
Xu Hanqiu. Study on extracting water information by improved normalized difference water body index (MNDWI) [J]. National Remote Sensing Bulletin, 2005,9(5):589-595.
- [14] 徐涵秋. 区域生态环境变化的遥感评价指数[J]. 中国环境科学, 2013,33(5):889-897.
Xu Hanqiu. A remote sensing index for assessment of regional ecological changes[J]. China Environmental Science, 2013,33(5):889-897.
- [15] 王丽春,焦黎,来风兵,等. 基于遥感生态指数的新疆玛纳斯湖湿地生态变化评价[J]. 生态学报, 2019,39(8):2963-2972.
Wang Lichun, Jiao Li, Lai Fengbing, et al. Evaluation of ecological changes based on a remote sensing ecological index in a Manas Lake Wetland, Xinjiang[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019,39(8):2963-2972.
- [16] 熊源,徐伟恒,陆宁,等. 基于RSEI和GEE的生态环境质量时空变化评估:以中国云南省洱海流域为例[J]. 生态指标, 2021, 125: 107518.
Xiong Yuan, Xu Weiheng, Lu Ning, et al. Assessment of spatial-temporal changes of ecological environment quality based on RSEI and GEE: a case study in Erhai Lake Basin, Yunnan Province, China[J]. Ecological Indicators, 2021, 125: 107518.
- [17] 贾晶晶. 基于SRP模型的石羊河流域生态脆弱性评价[D]. 兰州:西北师范大学, 2020.
- [18] 樊晓霞,侯志华,文智斌,等. 基于RSEI的太原市转型期生态质量变化时空异质性[J]. 天津师范大学学报:自然科学版, 2022,42(5):45-51.
Fan Xiaoxia, Hou Zhihua, Wen Zhibin, et al. Spatial and temporal heterogeneity of ecological changes by RSEI index in Taiyuan City during the transition period[J]. Journal of Tianjin Normal University: Natural Science Edition, 2022,42(5):45-51.
- [19] 王劲峰,徐成东. 地理探测器:原理与展望[J]. 地理学报, 2017,72(1):116-134.
Wang Jinfeng, Xu Chengdong. Geodetector: principle and prospective[J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(1): 116-134.
- [20] 冯荣荣,张凯莉,韩佳宁,等. 泔河流域生态环境质量的遥感评价及影响因子分析[J]. 生态与农村环境学报, 2022,38(7):860-871.
Feng Rongrong, Zhang Kaili, Han Jianing, et al. Remote sensing evaluation and influence factor analysis of ecological environment quality in the Fenghe River Watershed[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2022,38(7):860-871.
- [21] 安敏,李文佳,吴海林,等. 三峡库区生态环境质量的时空格局演变及影响因素[J]. 长江流域资源与环境, 2022,31(12): 2743-2755.
An Min, Li Wenjia, Wu Hailin, et al. Temporal and spatial pattern evolution and influencing factors of ecological environment quality in Three Gorges Reservoir area[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2022, 31(12): 2743-2755.
- [22] 张云霞,汪仕美,李焱,等. 2000-2020年青藏高原生态质量时空变化[J]. 生态学杂志, 2023,42(6):1464-1473.