

基于 GEE 平台的舟山岛生态环境质量动态评价

李思政, 王柳柱, 赵晟, 桂峰

(浙江海洋大学 海洋科学与技术学院, 浙江 舟山 316022)

摘要: [目的] 对舟山岛 2000—2020 年的生态环境变化进行动态监测和评价, 为类似海岛地区的生态环境质量评价提供科学参考。[方法] 以舟山岛为研究对象, 在 GEE(Google Earth Engine)平台选取 2000, 2005, 2010, 2015 和 2020 年 5 期的遥感影像, 提取出湿度(WET)、绿度(NDVI)、热度(LST)、干度(NDBSI) 4 个指标进行耦合, 得到遥感生态指数(remote sensing environmental index, RSEI), 利用主成分分析方法对舟山岛生态环境质量变化进行评价。[结果] ① 在 5 个时间节点上, 舟山岛 RSEI 均值分别为 0.631 2, 0.637 5, 0.611 6, 0.550 3 和 0.502 4。在研究期间内, 舟山岛的 RSEI 共下降了 20.41%; ② 舟山岛生态环境质量呈下降趋势, 岛屿生态质量为优和良的面积分别下降了 12.51% 和 11.87%, 生态质量为差、较差和中的面积分别上升了 7.35%, 12.49% 和 4.55%; ③ 研究期间内舟山岛人类开发活动明显增强, 土地利用类型发生改变, 气候变化和人类活动共同作用于舟山岛, 导致生态环境变差。[结论] 利用遥感生态指数对于海岛生态环境质量同样可进行有效的监测与评价。在研究期间内舟山岛生态环境质量前期较稳定, 后期降幅较明显, 研究期间内总共下降约 20.41%。

关键词: 遥感生态指数(RSEI); 环境评价; 舟山岛

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2023)02-0293-10

中图分类号: X821, X835

文献参数: 李思政, 王柳柱, 赵晟, 等. 基于 GEE 平台的舟山岛生态环境质量动态评价[J]. 水土保持通报, 2023, 43(2): 293-302. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2023.02.034; Li Sizheng, Wang Liuzhu, Zhao Sheng, et al. Dynamic evaluation of ecological environmental quality of Zhoushan Island using Google Earth Engine [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(2): 293-302.

Dynamic Evaluation of Ecological Environmental Quality of Zhoushan Island Using Google Earth Engine

Li Sizheng, Wang Liuzhu, Zhao Sheng, Gui Feng

(Marine Science and Technology College, Zhejiang Ocean University, Zhoushan, Zhejiang 316022, China)

Abstract: [Objective] The ecological environmental changes of Zhoushan Island from 2000 to 2020 were dynamically monitored and evaluated in order to provide a scientific reference for the evaluation of the ecological quality of similar island areas. [Methods] Remote sensing images of Zhoushan Island in 2000, 2005, 2010, 2015, and 2020 were selected on the Google Earth Engine (GEE) platform. Wetness, greenness, heat, and dryness were extracted for coupling, and the remote sensing environmental index (RSEI) was obtained. The principal component analysis method was then used to evaluate changes in the quality of the ecological environment of Zhoushan Island. [Results] ① The mean values of RSEI on Zhoushan Island at the five time points were 0.631 2, 0.637 5, 0.611 6, 0.550 3, and 0.502 4, respectively, with a total decrease of 20.41% over the study period. ② The ecological quality of Zhoushan Island exhibited a downward trend over time, with the area of the island having excellent and good ecological quality decreasing by 24.39%, and the area with poor and poorer quality increasing by 19.82%. ③ During the study period, human development activities on Zhoushan Island have increased significantly, land use types have changed, and climate change and human activities have combined to degrade the ecological environment of Zhoushan Island. [Conclusion] RSEI was effectively used to monitor and evaluate the ecological environmental quality of the island. The ecological

收稿日期: 2022-06-26

修回日期: 2022-08-20

资助项目: “全球变化”国家重点研发计划项目: 海岸带和沿海地区对海平面变化、极端气候事件的响应及脆弱性研究 (2017YFA0604902)

第一作者: 李思政 (1998—), 男 (汉族), 河南省新乡市人, 硕士研究生, 研究方向为海岛生态评价。Email: itslee28@163.com.

通讯作者: 桂峰 (1977—), 女 (汉族), 江苏省泰州市人, 博士, 教授, 主要从事海岛资源环境评价研究。Email: fgui@zjou.edu.cn.

environmental quality of Zhoushan Island was relatively stable during the early part of the study period, but there was an obvious decline in environmental quality during the later part of the study period, with a total decrease of about 20.41% during the study period.

Keywords: remote sensing environmental index (RSEI); environmental assessment; Zhoushan Island

伴随工业化和城市化进程的不断加快,环境变化已经成为人类社会发展的副产品,全球面临着严重的生态破坏^[1]。社会与生态环境之间的矛盾愈加突出,区域的生态健康发展就愈加成为区域核心问题^[2]。为应对全球气候变化和海岛面临的生态破坏,全球范围内多个低海岸国家与小岛屿国家于 1990 年成立小岛屿国家联盟。与陆地相比,海岛土地资源稀缺,其生态系统具有相对独立性和天然脆弱性^[3]。出于发展的需要,人们对海洋不断深入探索,对海岛及滩涂的开发与利用的程度也不断加快^[4-5]。由于海岛面临着气候变化与人类活动扰动的双重压力,其本身具有的海陆复合三元结构特性又要求所有的海岛均以可持续发展为目标^[6],因此,对海岛地区的生态环境进行动态监测,并及时判断其变化,对于维护海岛生态系统健康、促进海岛生态和经济可持续发展具有重要意义。

生态环境质量评价长期以来依赖于统计数据 and 现场调查。但对于海岛来讲,往往受制于数据来源不足、精度不够、数据时长和密度难以保证等问题。GEE (Google Earth Engine)是由谷歌公司推出的卫星图像和数据处理运算云平台,具有能够快速大量处理影像的优势^[7]。它改变了传统的解译影像方式^[8],近几年来已被广泛应用于农业遥感制图^[9-11]、植被识别与监测^[12]、建筑用地提取及城市空间扩展^[13-15]、岛陆土地覆被分类制图等^[16-17]。随着遥感技术的提高,徐涵秋在 2013 年提出了 RSEI(remote sensing based on ecological index)指数的概念^[18]。该指数是完全基于遥感信息,把湿度、绿度、热度和干度 4 个评价指标结合起来所形成的,后又经诸多学者证实 RSEI 可以在时间上和空间上对城市^[19]、城市群^[20]、矿区^[21-22]和河湖流域等^[23-24]生态环境不同的区域进行可视化的表达,同时林中立^[25]、Wen Xiaole^[26]分别采用 RSEI 对厦门岛和平潭岛的生态状况进行监测,取得了良好的效果,证明了 RSEI 同样能够适用于对于区域范围较小的海岛地区的生态环境质量变化进行快速的定量检测。

海洋强国政策的推广,使得人们对于海岛的认识和开发逐渐深入。人类在对海岛进行开发的同时,也不可避免地破坏了海岛的生态系统。舟山市背靠杭州湾和长三角这一广阔的经济腹地,面向太平洋,是发展海洋经济的前沿阵地。2009 年 12 月,舟山跨海

大桥正式通车标志着该区域进入全新的发展时期^[27]。2011 年舟山群岛成为国家级新区后,发展速度再次上升,海岛城镇化水平不断上升,同时生态状况也逐渐发生变化。为了更好地了解舟山岛生态环境的变化和影响因素,本文选取 2000,2005,2010,2015 和 2020 年 5 个时间点,基于 GEE 平台,采用 RSEI 指数对 2000—2020 年生态环境质量变化进行动态分析,并为其他海岛地区的生态环境质量评价提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

舟山市是典型的群岛城市,其区域中心为舟山岛^[28]。舟山岛地处浙江省东北部,是中国第四大岛屿,也是舟山市第一大岛,东西长 44 km,南北宽 18 km,面积为 502 km²。舟山岛地势大致呈现出由东北向西南倾斜的特点,属于亚热带季风性湿润气候,夏季易受台风影响。舟山岛大规模的开发利用活动基本始于 2000 年。大陆连岛的实施,加强了舟山与大陆的密切程度,促进了海岛经济的发展,同时也给海岛生态带来了很大的压力。

1.2 数据来源

(1) Landsat 遥感影像。为展开研究区内 RSEI 指数和土地利用的解译,研究选取 GEE 平台提供的 2000,2005,2010,2015 和 2020 年 5 个时间段的 Landsat TM/OLI 卫星影像。其中,前 3 个为 Landsat 5 TM 数据,后两个为 Landsat 8 OLI 数据,所选影像云量少,空间分辨率为 30 m,时间分辨率为 1 a,且已在 GEE 平台上对所选影像进行归一化处理、去云处理等。考虑到海水对于岛屿的生态环境调节具有重要作用,而且在 2000—2020 年内,人们在围填海的同时,既增加了陆地面积,也对岛屿生态环境也造成了很大影响,故在已有分类系统的基础上增加海洋类型^[29]。研究区土地利用类型分为以下 7 类:建设用地、水体、林地、耕/草地、滩涂、裸土、海洋。在 GEE 平台选取训练样本并采用随机森林法对舟山岛土地利用进行解译,总体精度达 80%。

(2) 其他数据。本文所用的降水量、年均温和社会经济数据均来自舟山市统计年鉴。由于舟山岛的数据难以统计,且舟山岛是舟山市的第一大岛屿,是其最重要的组成部分,因此降水量和年均温采用舟山

市数据。人口数据为舟山岛定海区部分和普陀区部分之和,地区生产总值为定海区和普陀区之和,其他数据为舟山市数据。

1.3 研究方法

GEE 平台在处理数据方面具有很大优势,本文通过 GEE 平台直接筛选出研究区云量最少、质量最佳的遥感影像,并完成 Landsat 5 TM 和 Landsat 8 OLI 影像的辐射校正、去云处理、掩膜等影像处理和各年份的 WET (wetness), NDVI (normalized difference vegetation index), LST (land surface temperature) 和 NDBSI (normalized difference built-up and soil index) 的计算。其中, WET, NDVI, LST 和 NDBSI 分别表示湿度指数、绿度指数、热度指数、

$$\text{TM 数据: } WET = 0.031 51\rho_{\text{blue}} + 0.202 1\rho_{\text{green}} + 0.310 2\rho_{\text{red}} + 0.159 4\rho_{\text{nir}} - 0.680 6\rho_{\text{swir1}} - 0.610 9\rho_{\text{swir2}} \quad (1)$$

$$\text{OLI 数据: } WET = 0.151 1\rho_{\text{blue}} + 0.197 3\rho_{\text{green}} + 0.328 3\rho_{\text{red}} + 0.340 7\rho_{\text{nir}} - 0.711 7\rho_{\text{swir1}} - 0.455 9\rho_{\text{swir2}} \quad (2)$$

式中: WET 为湿度指标; $\rho_{\text{blue}}, \rho_{\text{green}}, \rho_{\text{red}}, \rho_{\text{nir}}, \rho_{\text{swir1}}, \rho_{\text{swir2}}$ 分别表示蓝、绿、红、近红外、短波红外 1 和短波红外 2 的反射率。

(2) 绿度指标(NDVI)。采用归一化差分植被指数(NDVI)。NDVI^[33]能够很好地反映出区域的植物量、绿叶面积和植被覆盖度等情况,值越大,表示其绿色覆盖度程度越高。其计算公式为:

$$NDVI = (\rho_{\text{nir}} - \rho_{\text{red}}) / (\rho_{\text{nir}} + \rho_{\text{red}}) \quad (3)$$

(3) 热度指标(LST)。热度指标即为温度指标。地表温度是地物热红外辐射的定量表达,本文采用地表温度来表示,计算公式为^[23]:

$$L_{\text{tir}} = \text{gain} \times \text{DN} + \text{bias} \quad (4)$$

式中: gain 表示波段增益值; bias 表示波段偏置值。

$$T = K_2 / \ln(K_1 / L_{\text{tir}} + 1) \quad (5)$$

式中: L_{tir} 为热红外波段的辐射定标; K_1, K_2 为定标系数。

$$LST = T / [1 + (\lambda T / \rho) \ln \epsilon] \quad (6)$$

式中: T 为亮度温度; λ 为热红外波段的中心波长; ϵ 为地表比辐射率。

TM 数据:

$$IBI = \left[\frac{2\rho_{\text{swir1}}}{\rho_{\text{swir1}} + \rho_{\text{nir}}} - \frac{\rho_{\text{nir}}}{\rho_{\text{nir}} + \rho_{\text{red}}} - \frac{\rho_{\text{green}}}{\rho_{\text{green}} + \rho_{\text{swir1}}} \right] / \left[\frac{2\rho_{\text{swir1}}}{\rho_{\text{swir1}} + \rho_{\text{nir}}} + \frac{\rho_{\text{nir}}}{\rho_{\text{nir}} + \rho_{\text{red}}} + \frac{\rho_{\text{green}}}{\rho_{\text{green}} + \rho_{\text{swir1}}} \right] \quad (13)$$

式中: $\rho_{\text{blue}}, \rho_{\text{green}}, \rho_{\text{red}}, \rho_{\text{nir}}, \rho_{\text{swir1}}, \rho_{\text{swir2}}$ 分别为蓝波段、绿波段、红波段、近红外波段、短波红外 1, 短波红外 2 反射率。

由于上述 4 个指标的量纲不一致,其维度也不均匀,因此需要先将其进行归一化处理,将其量纲统一到 $[0, 1]$, 经过归一化处理后的 4 个指标叠加成一幅新的图层。再根据本研究所需,运用主成分分析方法

干度指数^[30]。

RSEI 指标的计算。为避免传统 EI 指数的单一指标评价所带来的主观性和片面性,本文采用 RSEI 的方法来对研究区进行评价。RSEI 是完全基于遥感信息,集成多指标因素的遥感综合生态指数,能够更方便快捷地反映区域生态环境质量^[30]。RSEI 由 4 项表示生态质量的自然因素指标构成,其表达式为:

$$RSEI = f(WET, NDVI, LST, NDBSI)$$

(1) 湿度指标(WET)。缨帽变换也叫 $K-T$ 变换,其变换后的湿度分量可用于表达对水体、土壤和植被的状况。缨帽变换早已用于生态检测中。本文采用湿度指标由 $K-T$ 变换后的湿度分量表示,又由于其传感器的不同,计算公式^[31-32]分别为:

$$K_1 = 607.76 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m}), K_2 = 1 260.56 \text{ K} \\ \text{gain} = 0.055, \text{bias} = 1.182 43, \lambda = 11.45 \mu\text{m}, \\ \rho = 1.438 \times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K} \quad (7)$$

OLI 数据:

$$K_1 = 774. 89 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m}), K_2 = 1 321.08 \text{ K} \\ \text{gain} = 3.342, \text{bias} = 0.1, \lambda = 10.90 \mu\text{m}, \\ \rho = 1.438 \times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K} \quad (8)$$

本文用 Sobrino^[23]提出的 NDVI 阈值法来计算地表比辐射率,其计算公式为:

$$\epsilon = 0.004 f + 0.986 \quad (9)$$

$$f = (NDVI - NDVI_{\text{soil}}) / (NDVI_{\text{veg}} - NDVI_{\text{soil}}) \quad (10)$$

式中: f 为植被覆盖度; $NDVI_{\text{soil}}$ 表示裸土区域的 NDVI 值; $NDVI_{\text{veg}}$ 为完全植被覆盖区域的 NDVI 值。

(4) 干度指标(NDBSI)。人为建筑和道路的出现,减少了原本地表的透水性,导致了地表的“干化”。裸土也是导致土壤干燥的主要原因。本文采用的干度指数(NDBSI)由建筑指数(ABI)和裸土指数(SI)两方面组成,计算方法^[34]为:

$$NDBSI = (ABI + SI) / 2 \quad (11)$$

$$SI = \frac{(\rho_{\text{swir1}} + \rho_{\text{red}}) - (\rho_{\text{nir}} + \rho_{\text{blue}})}{(\rho_{\text{swir1}} + \rho_{\text{red}}) + (\rho_{\text{nir}} + \rho_{\text{blue}})} \quad (12)$$

计算 PC_1 , 可进一步用 1 减去 PC_1 , 以此来使 PC_1 大的数值代表好的生态条件,从而获得初始的遥感生态指数 $RSEI_0$ 。

$$RSEI_0 = 1 - \{PC_1 \\ [f(WET, NDVI, LST, NDBSI)]\} \quad (14)$$

为了便于指标的度量,同样对 $RSEI_0$ 做归一化处理:

$$RSEI = \frac{(RSEI_0 - RSEI_{0_min})}{(RSEI_{0_max} - RSEI_{0_min})} \quad (15)$$

式中: RSEI 即为所建的遥感生态指数, 其范围为 [0, 1]。RSEI 值越趋于 1 表示该地区生态越好。反之, 则表示该地区生态越差。

2 结果与分析

2.1 空间主成分分析

在 GEE 平台的影像数据集中, 提取了前文提及的 RSEI 指数的 4 个分指标, 并利用主成分分析对各

指标主要变量进行集成, 通过前文提及的公式, 把 4 个指标进行归一化处理, 并合成新的影像, 进而计算出生态遥感指数。

计算 2000, 2005, 2010, 2015 和 2020 年 5 个年份的遥感指标(表 1), 可得其主成分 1 和主成分 2 的特征值贡献之和均超过了 90%, 分别为 93.6%, 95.9%, 95.8%, 93.2% 和 92.9%, 这就说明主成分 1 和主成分 2 集中了与生态环境质量相关的 4 个指标的大部分信息, 表明在本次研究中, 研究可以采用主成分分析法。

表 1 不同时间 RSEI 主成分分析结果

Tab 1 RSEI principal component analysis results at different times

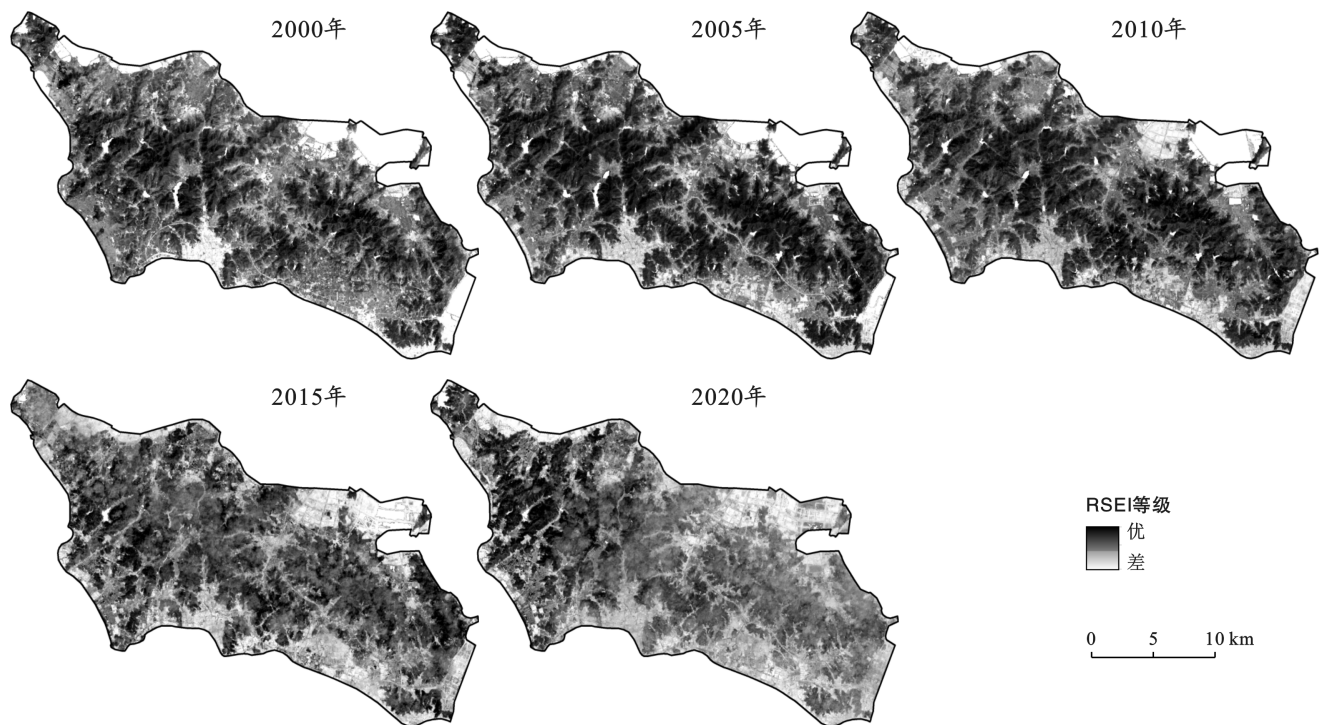
主成分	2000 年		2005 年		2010 年		2015 年		2020 年	
	特征值	累计贡献率/%	特征值	累计贡献率/%	特征值	累计贡献率/%	特征值	累计贡献率/%	特征值	累计贡献率/%
1	0.118 8	67.74	0.175 7	81.24	0.157 0	77.05	0.145 2	75.54	0.147 1	73.95
2	0.045 4	93.66	0.031 8	95.94	0.038 2	95.80	0.034 1	93.27	0.037 7	92.94
3	0.010 1	99.46	0.008 0	99.66	0.007 7	99.58	0.011 9	99.49	0.012 8	99.39
4	0.000 9	100	0.000 7	100	0.000 8	100	0.001 0	100	0.001 1	100

2.2 RSEI 指数的变化分析

在获取到 2000, 2005, 2010, 2015 和 2020 年舟山岛的 RSEI 指数值之后(图 1, 表 2), 从该指数中可以得到舟山岛 2000—2020 年的生态环境质量变化情况。2000—2020 年舟山岛的 RSEI 整体呈下降趋势, 由 2000 年的 0.631 2 下降至 2020 年的 0.502 4

(表 2), 下降了 20.41%。

对于生态环境来讲, 干度指标和热度指标对其起到消极作用, 绿度指标和湿度指标对其起到积极作用。在研究期间内, 绿度均值下降了 29.89%, 湿度均值上升了 4.29%, 干度均值下降了 9.63%, 热度均值上升了 5.29%。



注: 审图号: GS(2016)2556 号。下同。

图 1 舟山岛 RSEI 等级的空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of RSEI degree in Zhoushan Island

表 2 舟山岛 4 因子和 RSEI 均值的变化

Table 2 Changes on mean values of four factors and RSEI in Zhoushan Island

指标	2000 年		2005 年		2010 年		2015 年		2020 年		变化幅度/%
	均值	PC ₁ 荷载值	均值	PC ₁ 荷载值	均值	PC ₁ 荷载值	均值	PC ₁ 荷载值	均值	PC ₁ 荷载值	
NDBSI	0.577 4	0.562 3	0.603 6	0.499 6	0.557 2	0.489 7	0.467 6	-0.571 8	0.521 8	-0.540 3	-9.63
LST	0.395 1	0.258 1	0.378 1	-0.319 9	0.398 5	-0.381 7	0.406 8	-0.085 2	0.416 0	-0.128 9	5.29
Wet	0.522 2	-0.337 3	0.610 3	-0.283 2	0.610 5	-0.181 3	0.575 7	0.396 1	0.545 6	0.334 4	4.48
NDVI	0.624 0	-0.709 4	0.649 1	-0.753 4	0.608 3	0.762 6	0.541 5	0.713 3	0.437 5	-0.761 3	-29.89
RSEI	0.631 2	—	0.637 5	—	0.611 6	—	0.550 3	—	0.502 4	—	-20.41

2.3 生态环境质量指数 RSEI 的分级及评价

为了清楚地了解舟山岛生态等级状况,将 RSEI 值等间划为 5 个级别,分别为差、较差、中、良和优。各级的数值区间分别为 $[0, 0.2]$, $(0.2, 0.4]$, $(0.4, 0.6]$, $(0.6, 0.8]$, $(0.8, 1.0]$ 。

从图 2 和表 3 可以看出,2000 年舟山岛整体生态环境较好,等级为中、良、优的面积分别占比为 26.44%, 36.37%, 23.65%。2010 年也基本如此,此时等级为中、良、优的面积比分别为 22.37%, 29.78% 和 27.35%,三者面积整体上减少了 17.35 km²,差等级面积增加了 19.17 km²。2020 年以中和良两个等级为主,面积比例为 55.48%,差和优所占比例最少,

分别为 12.37% 和 11.14%。研究期间内,前 10 a 间生态环境质量整体变化较为稳定,生态等级为优的区域面积增加 22.49 km²,中、良等级区域面积呈现波动状态,而后 10 a 间环境质量整体呈现明显下降趋势。舟山岛生态环境质量差等级和较差等级区域面积呈现出增长的趋势,在 20 a 间分别增长了 7.34% 和 12.48%。中、良等级整体呈现波动趋势。从整个研究期变化来看,前者在波动中增加了 4.55%,后者在波动中减少了 11.88%。优等级前五年增加明显而后迅速减少到 2000 年以下的水平。整体来看大部分区域生态等级逐期向下一等级递减,舟山岛整体环境质量变差。

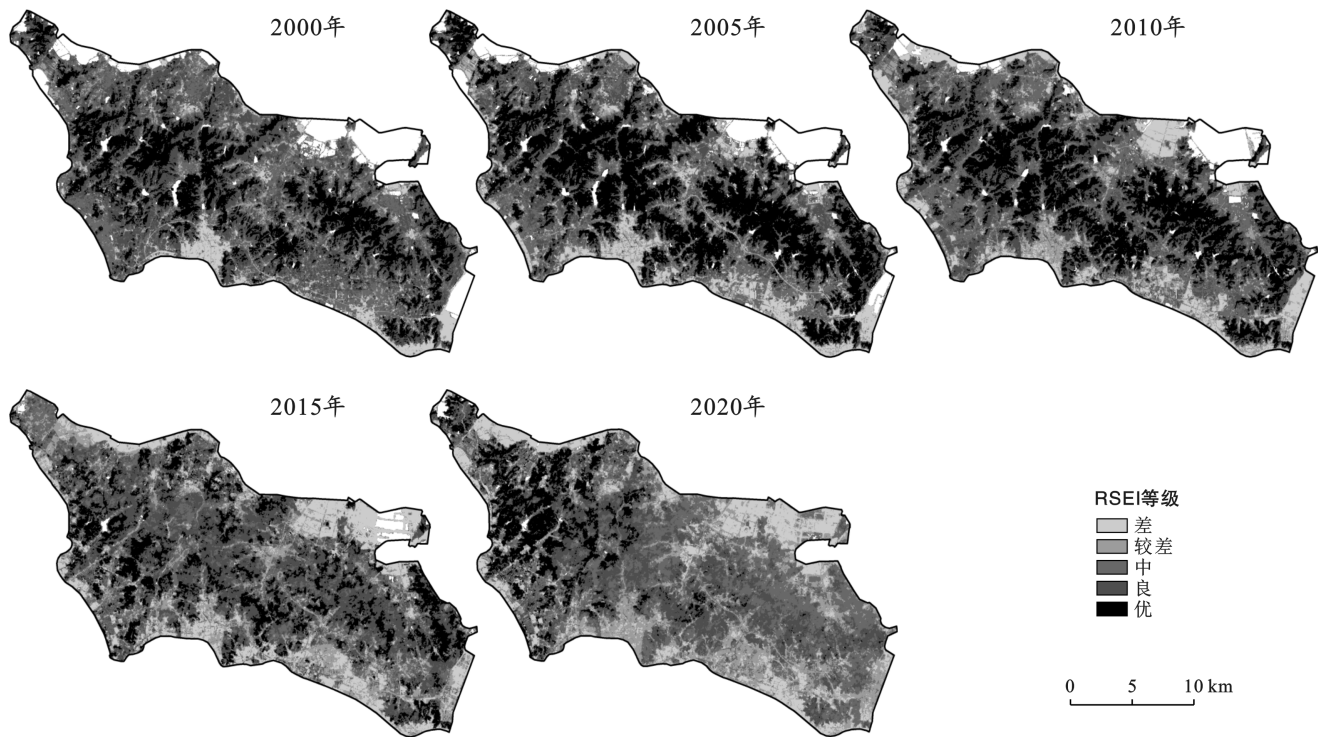


图 2 舟山岛 RSEI 等级分布

Fig.2 Hierarchical distribution of RSEI degree of Zhoushan Island

2.4 舟山岛生态环境质量时空差异分析

为了更加直观了解舟山岛近 20 a 生态质量的时空变化,从 5 个研究时间段选取 2000, 2010 和 2020

年 3 个年份的 RSEI 指数差值进行分析。由图 3 可知,2000—2010 年舟山岛生态环境等级不变的面积极为 274.26 km², 占总面积的 53.80%;生态变好的面积

为 138.90 km², 比例为 27.25%; 生态变差的面积为 96.58 km², 比例为 18.95%。在 2010—2020 年, 舟山岛生态环境质量变好、不变和变差区域面积分别为 85.80, 185.53 和 238.41 km², 三者所占比例分别为 16.83%, 36.40% 和 46.77%。2000—2020 年, 舟山岛生态环境质量变好、不变和变差区域面积分别为 90.67, 166.89 和 252.17 km², 三者所占比例分别为 17.79%, 32.74%, 49.47%。研究期间 10 a 内, 生态环境等级变化面积由大到小分别是不变、变好和变差。后 10 a 内主要是以变差和不变为主。总体来看, 在 2000—2020 年这 20 a 内, 生态环境主要以变差为主,

有 49.47% 的面积发生变差了, 其次是不变, 有 32.74% 的区域生态质量没有发生改变, 有 17.79% 的区域生态质量在变好。在空间分布上, 前 10 a 间舟山岛中部和周围的一些山地的生态质量在逐渐变好, 变差的主要集中在舟山岛的西南侧和东南侧, 而且此时仅有生态环境变差的区域主要是点状分布。后 10 a 间, 生态环境变差的区域主要集中在岛屿东半部分, 同时东北部部分地区人工力量使其由海洋转化为陆地。2000—2020 年, 舟山岛的生态环境质量变差的区域多于生态环境质量变好的区域, 因此总体上看, 研究期间内舟山岛的生态环境质量变差了很多。

表 3 舟山岛各生态等级区域面积和比例

Table 3 Area and percentage of each RSEI level in Zhoushan Island

等级	2000 年		2005 年		2010 年		2015 年		2020 年	
	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%
差	23.48	5.03	37.22	7.92	42.65	8.77	59.96	11.88	62.97	12.37
较差	39.76	8.52	49.98	10.63	57.02	11.73	83.62	16.57	106.88	21.00
中	123.48	26.44	98.60	20.98	108.74	22.37	113.80	22.55	157.72	30.99
良	169.82	36.37	122.25	26.01	144.72	29.78	166.03	32.90	124.64	24.49
优	110.43	23.65	161.94	34.46	132.92	27.35	81.20	16.09	56.70	11.14

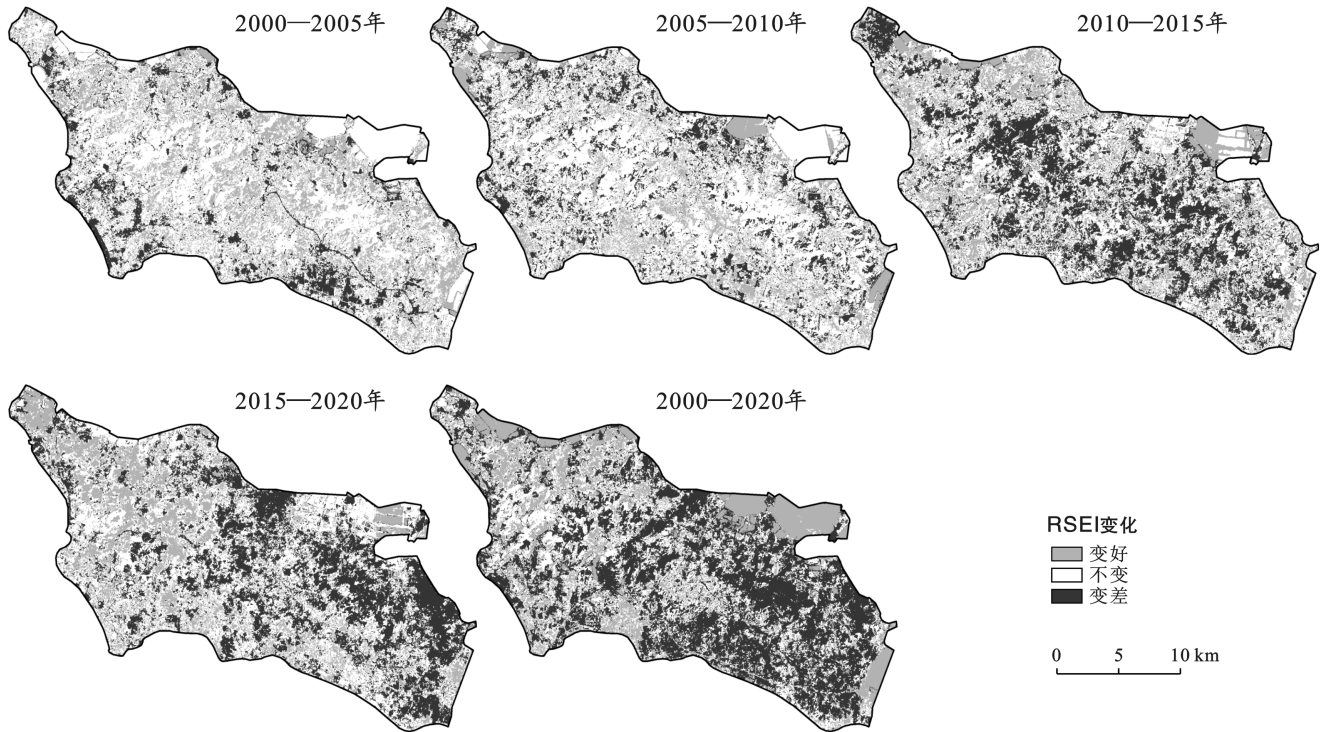


图 3 舟山岛 2000—2020 年 RSEI 等级变化空间分布情况

Fig.3 Spatial distribution of RSEI class changes in Zhoushan Island from 2000 to 2020

3 舟山岛遥感生态指数变化影响因素分析

3.1 土地利用类型转换对舟山岛生态环境的影响

海岛的生态环境质量与其土地利用类型有着紧

密的关系。由于海岛土地资源本就匮乏, 其土地利用类型的转变更能直接影响到其生态质量。在 GEE 平台对遥感影像进行监督分类, 获得舟山岛土地利用分类结果(图 4), 对舟山岛土地利用类型进行分类计算, 结果如图 5 所示。从图 5 可以看出, 研究期间内

建设用地面积在前 10 a 增长了 75.58 km²。但是在 2010—2015 年缓慢下降了 5.92 km²。在 2015—2020 年,建设用地面积又从 100.20 km² 增加至 139.95 km²。滩涂面积在 2000—2010 年和 2010—2020 年分别减少了 9.06 和 8.31 km²,且是在整个研究期间内持续减少的,这是由于许多地方已经转化成城镇建设用地。滩涂及其生态系统对于海岛地区生态起着重要的作用。滩涂区域受外力作用转化为建设用地,会导

致海岛的生态环境质量直接下降。整个研究期间内,除了建设用地和耕/草地之外,变化最多的是海洋。海洋面积减少 29.64 km²,这些海洋面积基本是转化为建设用地,少部分转为其他类型的用地。此外,在 2010—2015 年,建设用地面积缓慢下降,而后迅速增加(图 5),而此阶段耕/草地面积增加了 4.68 km²,此阶段应是废旧工矿复林复垦阶段,部分荒废工矿用地恢复为耕/草地。

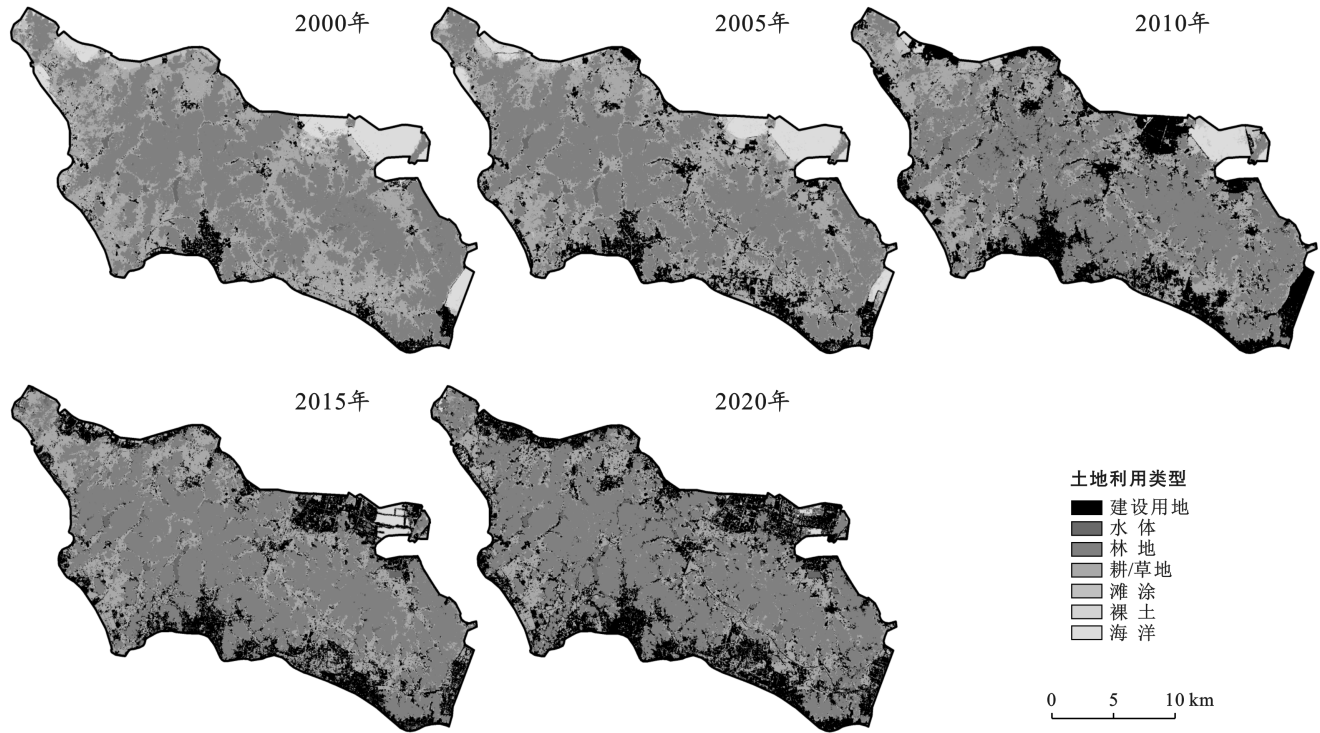


图 4 舟山岛 2000—2020 年土地利用类型

Fig.4 Types of land use on Zhoushan Island from 2000 to 2020

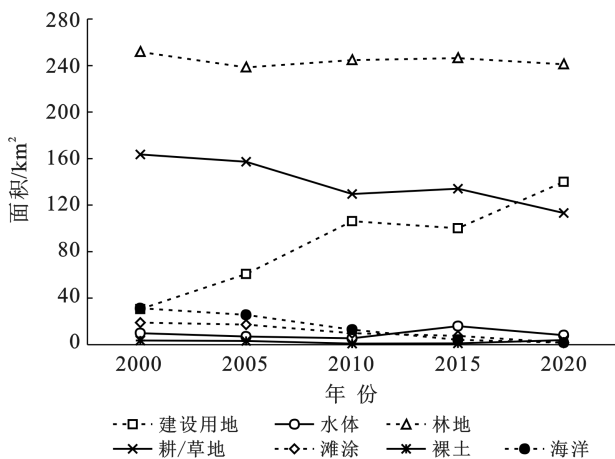


图 5 舟山岛土地利用类型面积变化

Fig.5 Area change in land use types on Zhoushan Island

对其进行叠加分析,可得 2000—2020 年舟山岛土地利用转移矩阵(表 4)。通过分析矩阵可知,在研究期间内,建设用地主要是由耕/草地、海洋、林地和水体转而来。2000—2010 年和 2010—2015 年,舟山岛最东部和东北部的海洋部分直接转化建设用地。这一阶段也是舟山岛生态环境发生改变的时期。此外,由于港口建设和人类活动向海洋一侧的扩展,这也导致建设用地的增加。同时岛屿内部的城镇空间的扩展,进一步减少了岛屿内部水体的面积。对于生态环境指数起负向作用的建设用地面积大幅增加,林地和耕/草地面积的减少,加之舟山岛年均温的增加和热岛效应,这就造成了该岛的生态环境下降。

表 4 舟山岛 2000—2020 年土地利用转移矩阵

Table 4 Land use transfer Matrix of Zhoushan Island from 2000 to 2020

km²

项目	2020 年面积							总计	
	耕地/草地	海洋	建设用地	林地	裸土	水体	滩涂		
2000 年面积	耕地/草地	74.93	0.03	60.27	25.71	0.95	1.21	0.48	163.59
	海洋	4.11	1.35	22.04	0.18	1.91	1.30	0.35	31.24
	建设用地	3.96	0.00	25.95	0.23	0.18	0.04	0.15	30.50
	林地	24.79	0.00	13.52	212.76	0.34	0.06	0.23	251.69
	裸土	1.55	0.00	1.84	0.18	0.04	0.05	0.03	3.68
	水体	1.06	0.08	2.61	1.66	0.09	4.24	0.05	9.79
	滩涂	2.89	0.23	13.48	0.26	0.45	1.28	0.37	18.96
	总计	113.29	1.70	139.72	240.97	3.96	8.17	1.65	509.46

注:矩阵中数字表示各个土地利用类型之间相互转化的面积,行表示 2020 年时各土地类型的转入构成。列表示 2000 年时各土地类型转出的面积。

3.2 自然因素对舟山岛生态环境的影响

气温和降水是影响区域生态质量的两大因素。舟山岛地处中国东海岸,面向太平洋,更容易受全球气候变化的影响。2000—2020 年,舟山岛年降水量和年平均气温在波动中缓慢上升。在整个研究期间内,舟山岛年降水量最低值出现在 2003 年,为 737.9 mm,最大值出现在 2019 年,降水量为 1 822.5 mm,多年平均降水量为 1 308.32 mm,年降水量变化速率为 201.93 mm/10 a,研究期间内年均温的波动范围为 16.3~17.80 °C,多年平均气温为 17.15 °C,年均温增加速率为 0.14 °C mm/10 a。虽然岛屿内部的降水量在增加,但是考虑到舟山岛位于中国东海岸,降水多集在夏季,受台风等因素影响较大,因此其降水量波动也较大,这也是 2007 年年降水量会远低于多年平均降水量的原因。此外,受岛屿地形限制,岛屿内部河流短小,短时间的强降水会形成地表径流迅速流入海洋。

3.3 社会经济因素对于舟山岛生态环境的影响

舟山岛生态系统稳定性差,十分容易受到人为因素的破坏。特别是进入 21 世纪以来,人类活动对于舟山岛的影响更加强烈。为了更深入地分析影响舟山岛生态环境人为因素,本文选取 2000,2005,2010,2015 和 2020 年舟山岛 5 项指标:总人口、地区生产总值、第一产业所占比重、第二产业所占比重和第三产业所占比重进行制表并分析。由表 5 可知,在 2000—2005 年,此时岛屿开发程度低,舟山岛的第一产业比重高达 26.7%,此时舟山岛处于人口流失的阶段,从 71.58 万人减少至 69.11 万人,地区生产总值在 5 a 间仅上升 114.8 亿元。但此时舟山岛生态环境变化小,整体生态环境质量较高。在 2005 年后,由于岛屿内部的城市化和各种工程的实施,特别是 2009 年岛陆

相连,舟山岛对外交通更加便捷,舟山岛的人口开始出现增加的情况。在 2005—2010 年,人口增加了 0.61 万人,而地区生产总值从 2005 年的 201.4 亿元翻番至 2010 年的 456.5 亿元。在 2000—2010 年,舟山岛的三大产业比重也发生了明显的变化,第一产业比重大幅度降低,降低了 16.9%,第二产业比重增长迅速,从 29.6% 增加到 42.2%。2011 年舟山群岛新区被批为国家级新区,人口持续增加。2010 年后,地区生产总值增量明显提升,产业结构发生变化,第一产业比重趋于稳定,第二、三产业比重进入相互转化升级的阶段。到 2020 年,第三产业所占比重已经过半。2010—2020 年,舟山岛人口增加了 1.75 万人,虽然此时人口数量还未恢复到 2000 年水平,但人们的各种工程建设、填海造田、围海造地,驱动了岛屿的建设用地范围的不断扩大。在此阶段定海、临城和沈家门东部的东港围垦区,开始逐渐成为人口集聚区域,形成城镇。岛屿内生态系统往往较为稳定,然而大规模的工程建设和快速的城市化,扩大了人们在岛屿的活动范围,加速了岛屿内部的水资源消耗,耕/草地被无序开垦。同时岛屿内部河流短小,由于台风的影响岛屿降水季节不稳定。各种蓄水项目的实施,也导致非蓄水区域出现季节性干旱的情况。最终导致岛屿部分地区遥感生态指数下降,生态环境变差。

4 结论

(1) 研究期间内,舟山岛 2000,2005,2010,2015 和 2020 年 RSEI 均值分别为 0.631 2,0.637 5,0.611 6,0.550 3 和 0.502 4,前 10 a 内 RSEI 值变化较小,后 10 a 内降幅明显,表明前 10 a 生态环境较为稳定,后 10 a 生态环境质量下降迅速。总体上呈现下降趋势。

表 5 舟山岛 2000—2020 年社会经济因素指标值

Table 5 Socio-economic factor index values of Zhoushan Island from 2000 to 2020

年份	总人口/万人	地区生产总值/亿元	第一产业比重/%	第二产业比重/%	第三产业比重/%
2000	71.58	86.6	26.7	29.6	43.7
2005	69.11	201.4	14.0	40.0	46.0
2010	69.72	456.5	9.8	42.2	48.0
2015	70.96	801.2	10.8	35.2	54.0
2020	71.47	1 010.0	10.1	39.0	50.9

(2) 研究期间内,舟山岛生态等级为优和良的区域分别下降了 53.73 和 45.18 km²,生态等级为差、较差和中的区域面积分别增长了 34.24,67.12 和 39.49 km²。结合研究区实际情况,可知除了部分海域地区经过人工围填海造陆直接转化为建设用地外,大部分区域都是呈现出逐级变化的。

(3) 2000—2020 年,舟山岛生态环境转变与全球气候变化趋势、岛屿土地利用方式、社会经济发展有关。环境质量明显下降的地区,主要与耕/草地面积减少,城镇建设用地增加有关。同时由于岛屿东北部和东部由海向陆的转变,导致舟山岛该地区的干度和热度增加,也会导致舟山岛生态质量下降。

本文在已有的环境质量评价的方法基础上,利用 GEE 平台对 2000—2020 年舟山岛的生态环境质量进行了计算和分析,并从年均温和年降水量、土地利用类型转变和社会经济因素对其成因进行分析。结果表明舟山岛的生态环境质量本底较好,但是随着全球环境的变化和岛屿人类活动加强逐渐变差。岛屿边缘地区的生态环境质量逐渐变差,说明岛屿边缘地区的人类活动逐渐增强,这也是符合人们对海岛的利用的实际情况的。但是由于各种限制,仍存在不足之处。首先,舟山岛作为一个单独的岛屿,其数据不易获取,部分采用了全市的数据。其次,岛屿本身处于亚热带季风性湿润气候区,夏季极易受到台风和降水的影响。因此精确判断出气候因素与生态环境质量的关系尚有难度。在今后的研究中,需要进一步结合实际情况,从该角度对研究区生态环境质量状况进行评估。

[参 考 文 献]

[1] 王孟本.“生态环境”概念的起源与内涵[J].生态学报,2003,23(9):1910-1914.

[2] 李玉强,陈云,曹雯婕,等.全球变化对资源环境及生态系统影响的生态学理论基础[J].应用生态学报,2022,33(3):603-612.

[3] 池源,石洪华,郭振,等.海岛生态脆弱性的内涵、特征及成因探析[J].海洋学报,2015,37(12):93-105.

[4] 王晶,张峰,李佳芮,等.我国海岛县域经济发展特征与问

题分析[J].海洋通报,2019,38(3):250-256.

[5] 杨文凤,林卿.中国海岛循环经济模式及升级路径研究[J].东南学术,2022(1):182-190.

[6] 王柳柱.基于三元结构的典型海岛可持续发展研究[D].江苏南京:南京大学,2020.

[7] 郝斌飞,韩旭军,马明国,等. Google Earth Engine 在地球科学与环境科学中的应用研究进展[J].遥感技术与应用,2018,33(4):600-611.

[8] 王小娜,田金炎,李小娟,等. Google Earth Engine 云平台对遥感发展的改变[J].遥感学报,2022,26(2):299-309.

[9] 郭新,王乃江,张玲玲,等.基于 Google Earth Engine 平台的关中冬小麦面积时空变化监测[J].干旱地区农业研究,2020,38(3):275-280.

[10] Vogels M, Jong S D, Sterk G, et al. Spatio-temporal patterns of smallholder irrigated agriculture in the Horn of Africa using GEOBIA and sentinel-2 imagery [J]. Remote Sensing, 2019,11(2):143.

[11] 徐晗泽宇,刘冲,王军邦,等. Google Earth Engine 平台支持下的赣南柑橘果园遥感提取研究[J].地球信息科学学报,2018,20(3):396-404.

[12] Osvaldo J P, Laerte G, Ferreira F P, et al. Assessing pasture degradation in the Brazilian Cerrado based on the analysis of MODIS NDVI time-series [J]. Remote Sensing, 2018,10(11):1761.

[13] 吴梓奎,刘小平,罗明.基于 GEE 平台的粤港澳大湾区建筑物高度时空演变特征分析[J].地理与地理信息科学,2022,38(2):48-54.

[14] 马帅.基于 Google Earth Engine 的城镇化与生态环境和谐发展动态研究[D].上海:上海师范大学,2021.

[15] 杨妍菲,张晓祥,薛明慧.基于 GEE 平台的山地城市城镇扩展演变研究:以重庆主城区为例[J].测绘地理信息,2022,47(5):78-83.

[16] Lin Lili, Hao Zhenbang, Post Christopher J, et al. Monitoring land cover change on a rapidly urbanizing island using Google Earth Engine [J]. Applied Sciences, 2020,10(20):7336.

[17] Huang Huabing, Chen Yanlei, Nicholas C, 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.

[18] 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.
- [19] Hang Xin, Luo Xiaochun, Cao Yun, et al. Ecological quality assessment and the impact of urbanization based on RSEI model for Nanjing, Jiangsu Province, China [J]. the Journal of Applied Ecology, 2020, 31(1): 219-229.
- [20] Fan Chao, Gui Feng, Wang Liuzhu, et al. Evaluation of environmental quality based on remote sensing data in the coastal lands of Eastern China [J]. Journal of Coastal Research, 2020, 36(6): 1229-1236.
- [21] 李蕊, 陈国清, 李玮贤, 等. 基于遥感生态指数的神东矿区 1995—2020 年生态环境质量的时空变化特征分析 [J]. 水土保持通报, 2021, 41(3): 143-151.
- [22] 胡思汉, 姚玉增, 付建飞, 等. 基于 RSEI 指数的东北矿区生态质量变化评价: 以辽宁弓长岭区为例 [J]. 生态学杂志, 2021, 40(12): 4053-4060.
- [23] 唐燕文. 基于遥感生态指数的东江源流域生态环境质量评价 [D]. 江西 赣州: 江西理工大学, 2021.
- [24] 陈丽红, 刘普幸, 花亚萍. 基于 RSEI 的疏勒河流域生态质量综合评价及其成因分析 [J]. 土壤通报, 2021, 52(1): 25-33.
- [25] 林中立, 徐涵秋. 基于遥感的海岛型城市发展生态效应分析: 以厦门岛为例 [J]. 福州大学学报(自然科学版), 2019, 47(5): 610-616.
- [26] Wen Xiaole, Ming Yanli, Gao Yonggang, et al. Dynamic monitoring and analysis of ecological quality of Pingtan comprehensive experimental zone, a new type of sea island city, based on RSEI [J]. Sustainability, 2019, 12(1): 21.
- [27] 中国海岛志(浙江卷·第二册·舟山群岛南部) [M]. 北京: 海洋出版社, 2014.
- [28] 樊超, 桂峰, 赵晟. 海岛城镇空间扩展及景观生态演变研究: 以舟山为例 [J]. 海洋通报, 2019, 38(4): 447-454.
- [29] 唐常春, 李亚平, 杜也, 等. 1980—2018 年粤港澳大湾区国土空间结构演变 [J]. 地理研究, 2021, 40(4): 928-944.
- [30] 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.
- [31] Crist E P. A TM tasseled cap equivalent transformation for reflectance factor data [J]. Remote Sensing of Environment, 1985, 17(3): 301-306.
- [32] Muhammad Hasan Ali Baig, Zhang Lifu, Shuai Tong, et al. Derivation of a tasseled cap transformation based on Landsat 8 at-satellite reflectance [J]. Remote Sensing Letters, 2014, 5(5): 423-431.
- [33] Bannari A, Morin D, Bonn F, et al. A review of vegetation indices [J]. Remote Sensing Reviews, 1996, 13(1): 95-120.
- [34] Christos P, Manolis G G, Dimitrios D A. Exploring the impact of various spectral indices on land cover change detection using change vector analysis: A case study of Crete Island, Greece [J]. Remote Sensing, 2020, 12(2): 319.
- ~~~~~
- (上接第 284 页)
- [26] Xie Ying, Zhang Jinchi. Forest protecting from a viewpoint of soil and water loss actuality of Huanghe River and Changjiang River Valley [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2002, 45(6): 88-92.
- [27] Chen Chi, Park Taejin, Wang Xuhui, et al. China and India lead in greening of the world through land-use management [J]. Nature Sustainability, 2019, 2(2): 122-129.
- [28] Liao Weihua, Jiang Weiguo. Evaluation of the spatio-temporal variations in the eco-environmental quality in China based on the remote sensing ecological index [J]. Remote Sensing, 2020, 12(15): 2462.
- [29] 叶许春, 杨晓霞, 刘福红, 等. 长江流域陆地植被总初级生产力时空变化特征及其气候驱动因子 [J]. 生态学报, 2021, 41(17): 6949-6959.
- [30] Cao J, Adamowski J F, Deo R C, et al. Grassland Degradation on the Qinghai-Tibetan Plateau: Reevaluation of Causative Factors [J]. Rangeland Ecology & Management, 2019, 72(6): 988-995.
- [31] 孙倩, 张敏, 曾永兵, 等. 艾比湖流域降水和风速对植被 NDVI 时空变化的影响 [J]. 西南农业学报, 2018, 31(11): 2407-2412.
- [32] Yin Lichang, Feng Xiaoming, Fu Bojie, et al. A coupled human-natural system analysis of water yield in the Yellow River basin, China [J]. Science of the Total Environment, 2021, 762: 143141.