

DOI: 10.5846/stxb202107272035

耿静, 徐栋, 吴御豪, 耿佳, 任丙南, 杨锋. 海南岛生态环境质量时空变化及其对气候变化与人类活动的响应. 生态学报, 2022, 42(12): 4795-4806.  
Geng J, Xu D, Wu Y G, Geng J, Ren B N, Yang F. Spatio-temporal evolution of eco-environment quality and the response to climate change and human activities in Hainan Island. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(12): 4795-4806.

# 海南岛生态环境质量时空变化及其对气候变化与人类活动的响应

耿 静<sup>1,\*</sup>, 徐 栋<sup>2</sup>, 吴御豪<sup>3</sup>, 耿 佳<sup>4</sup>, 任丙南<sup>1</sup>, 杨 锋<sup>2</sup>

1 三亚学院翟明国院士工作站, 三亚 572022

2 北京师范大学遥感科学国家重点实验室, 北京 100091

3 山东大学(威海)空间科学与物理学院, 威海 264209

4 三亚学院国际酒店管理学院, 三亚 572022

**摘要:**海南岛是气候变化敏感区以及生态环境脆弱区。近几十年气候变化和人类活动深刻地影响着海南岛的生态环境质量。然而, 针对海南生态环境质量时空演变及其对气候变化与人类活动响应的规律还不清晰, 理解这些规律对实现海南岛可持续发展目标具有重要意义。基于多源遥感数据, 利用改进的遥感生态环境指数(MRSEI)探究了海南岛 1992—2015 年生态环境质量时空变化特征以及其对气候变化以及人类活动的响应, 并利用像元尺度的多元回归法对比了气候变化与人类活动对生态环境质量变化的贡献。结果表明: (1) MRSEI 指数适用于大区域, 可用于本研究中的海南岛生态环境质量评价; (2) 近 24 年, 海南岛生态环境质量呈现波动上升的趋势, 且在所有土地利用类型中, 林地的 MRSEI 最高, 多年平均值达到 0.812; (3) MRSEI 与气温、降雨呈现出显著正相关关系, 与以夜间灯光表征的人类活动在沿海以及各市县的主城区呈现显著负相关关系; (4) 气候变化在 MRSEI 演变中的贡献整体要高于人类活动影响。为海南中国特色自由贸易港建设中生态环境与经济社会协同发展研判提供科学的定量支撑, 并为制定相应的政策提供依据。

**关键词:**生态环境质量; 气候变化; 人类活动; 海南岛

## Spatio-temporal evolution of eco-environment quality and the response to climate change and human activities in Hainan Island

GENG Jing<sup>1,\*</sup>, XU Dong<sup>2</sup>, WU Yuhao<sup>3</sup>, GENG Jia<sup>4</sup>, REN Bingnan<sup>1</sup>, YANG Feng<sup>2</sup>

1 Academician Workstation of Zhai Mingguo, University of Sanya, Sanya 572022, China

2 State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Beijing Normal University, Beijing 100091, China

3 School of Space Science and Physics, Shandong University (Weihai), Weihai 264209, China

4 International Hospitality Management School, University of Sanya, Sanya 572022, China

**Abstract:** Hainan Island is a climate change sensitive area and a fragile eco-environmental area. In recent decades, climate change and human activities have profoundly affected the eco-environmental quality of Hainan Island. However, the temporal and spatial evolution of eco-environmental quality and its response to climate change and human activities in Hainan Island in recent decades are not clear. Understanding these issues is of great significance to achieve the goal of sustainable development of Hainan Island. Based on multi-source remote sensing data, this study used Modified Remote Sensing Ecological Index (MRSEI) to explore the temporal and spatial variation characteristics of eco-environmental quality

基金项目: 海南省自然科学基金项目(420RC673)

收稿日期: 2021-07-27; 网络出版日期: 2022-02-11

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

of Hainan Island from 1992 to 2015, and analyzed the response of eco-environmental quality of Hainan Island to climate change and human activities in recent 24 years. The relative importance of climate change and human activities to the eco-environmental quality was compared based on the multiple regression method of pixel scale. The results showed that: (1) the MRSEI index is applicable to large area and can be used in the evaluation of Hainan Island's eco-environmental quality in this study; (2) In the past 24 years, the eco-environmental quality of Hainan Island was a fluctuating upward trend. And in all land-use patterns, the eco-environmental quality of forest land was the highest, with the multi-year average MRSEI reaching 0.812; (3) MRSEI had a significantly positive correlation with temperature and rainfall, and a significant negative correlation with human activities, which is characterized by the nighttime light, in the coastal areas and the main urban areas of cities and counties; 4) In the past 24 years, the contribution of climate change including air temperature and precipitation variables in the evolution of MRSEI was overall higher than the impact of human activities. This work is expected to provide the quantified information on the coordination between ecological conservation and economic development in the construction process of Hainan Free Trade Port, and give scientific knowledge to formulate corresponding policies.

**Key Words:** eco-environmental quality; climate change; human activities; Hainan Island

生态环境是人类生存与发展的重要基础,是社会经济可持续发展的重要保障。自工业革命以来,人类活动和气候变化对地球系统产生了前所未有的冲击<sup>[1]</sup>。特别是随着社会经济的快速发展,人类活动改造自然的力度和规模不断增强<sup>[2-3]</sup>,带来了一系列的生态环境问题,例如土地退化、生物多样性锐减、干旱和洪涝频发、生态系统服务受损等<sup>[4-8]</sup>。随着联合国于 2015 年通过了 17 项可持续发展目标(SDGs),气候变化与人类活动对生态环境的协同影响正成为越来越多学者们的关注点<sup>[9-10]</sup>。

海南作为气候变化的敏感区和生态环境的脆弱区,研究显示近 50 年(1961—2011 年)海岛气候变暖趋势明显,年平均最高气温和年平均最低气温均呈上升趋势,且降水存在多时间尺度的周期变化特征<sup>[11]</sup>。特别是近 10 年,城市扩张加速,土地利用类型变化剧烈,建筑用地增加迅猛,这些深刻影响着全岛的生态环境质量<sup>[12-13]</sup>。海南岛四面环海,生态系统抗干扰能力较弱,尽管受益于生态省建设战略的较先启动和国家重点生态功能区的政策,采取了较为严格的生态保护措施,但天然林的面积和自然湿地的面积均呈现了下降趋势,减弱了生态保护的有效性<sup>[14-16]</sup>。因此,揭示海南岛生态环境演变特征,分析其对气候变化与人类活动的响应,对于海南省未来的生态保护以及可持续发展目标的实现具有重要的现实意义。

目前,遥感技术的快速发展以及多源遥感数据的开放获取极大地推动了区域尺度的对地观测研究,这也为区域生态环境质量监测与评估提供了新的方法<sup>[17-18]</sup>。2013 年,徐涵秋提出了一种基于遥感的生态质量评估模型(Remote Sensing Based Ecological Index, RSEI)<sup>[19]</sup>,该模型使用主成分分析法避免了多指标评价中人为确定权重的主观性,并且以其快速、客观、结果可视化等优点被广泛应用于区域生态环境监测和质量评价中。但在应用于不同研究区域时,RSEI 指标选取未考虑特定区域的主导生态系统服务功能。因此,在研究特定区域时,一些学者对 RSEI 进行了改进和完善<sup>[20-22]</sup>。例如,王杰等<sup>[21]</sup>针对干旱区生态环境的特点构建了干旱区遥感生态指数(Arid Remote Sensing Ecological Index, ARSEI),该指数耦合了绿度、湿度、盐度、热度以及土地退化度信息,结果表明 ARSEI 比 RSEI 对于干旱区生态环境质量的评价具有更好的适用性;吴映瞳等<sup>[22]</sup>通过加入空气质量指标改进了 RSEI 模型,利用改进后的模型分析了伊敏矿区生态环境质量的时空演变特征。通过对现有研究的梳理,已证实 RSEI 模型对于区域生态环境质量分析有独特的优势,但由于不同区域生态系统的独特性和治理任务的不同,可以根据研究区域的特点在指标构建时进行调整与改进。

本文对海南岛生态环境质量进行评价时,参考 Xu 等的研究<sup>[23]</sup>,在 RSEI 模型的基础上,引入了生境质量指标(Habitat Quality Index, HQI),构建了能反映该区域主导生态系统服务功能的生态环境质量指数(Modified Remote Sensing Ecological Index, MRSEI),并探究了海南岛 1992—2015 年的生态环境质量对气候变化以及人

为活动的响应。其次,本研究基于像元尺度的多元回归方法对比了气候指标与人类活动对海南岛生态环境质量变化的贡献度。该研究在弥补了现有研究不足的同时,可以为快速掌握海南岛经济社会发展下生态环境质量的变化趋势和生态建设的效果提供新的方法,为制定相应的政策提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

海南岛(108.37°—111.03°E, 18.80°—20.10°N)位于中国大陆的南端(图1),陆地面积约为3.4万km<sup>2</sup>,是中国第二大岛。海南岛平均海拔120m,岛内地貌类型多样,中部高耸,四周低平,由中部到四周依次为山地、丘陵、台地、平原,构成层状垂直分布和环状水平分布带,河流大多发源于中部山区,呈放射状分布。海南岛属典型的热带季风气候和热带海洋气候,雨水充足,长夏无冬,全年温暖,干湿季节较明显,年降水量为1000—2500mm,年平均气温在22—27℃之间<sup>[24]</sup>。社会发展方面,海南省常住人口达到1008.12万人,其中城镇人口比重约为60.27%,处于全国平均水平,2020年地区生产总值为5532.39亿元<sup>[25]</sup>。

### 1.2 数据源及处理

如表1所示,本研究使用的数据包括行政区划数据、Landsat 5/7/8 影像数据(反射率数据)、全国县域生态环境指数(Eco-environmental index, EI)<sup>[26]</sup>、连续一致性夜间灯光数据(Nighttime light, NTL)<sup>[27]</sup>、土地覆盖与土地类型数据(Land use and land cover, LULC)数据<sup>[28]</sup>。本研究中数据处理过程包括全年Landsat影像数据的云掩膜处理、拼接、裁剪、年数据合成,月度平均气温合成年气温数据(求平均),月度降雨量合成年降雨量数据(求和)等处理。其中,Landsat影像数据的处理过程是在谷歌地球引擎(Google Earth Engine, GEE)平台进行<sup>[29]</sup>。

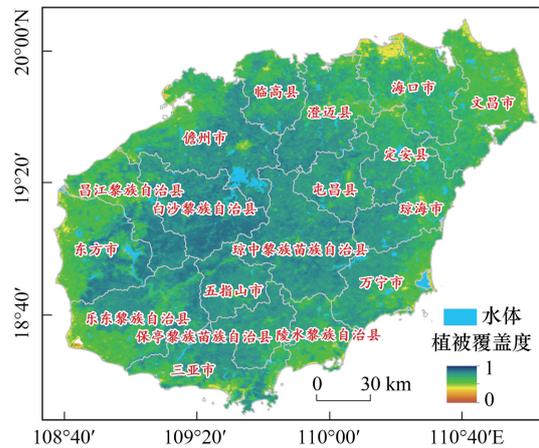


图1 研究区示意图

Fig.1 Sketch map of research area

表1 数据源详细说明

Table 1 Detailed description of data

数据名 Data name	空间分辨率 Spatial resolution	时间分辨率 Time resolution	时间范围 Time range	来源 Source
行政区划 Administrative division	1:1000000	—	2013年	国家地球系统科学数据中心
陆地资源卫星 5、7、8 Landsat5、7、8	30 m	16d	1992—2015年	美国航空航天局
生态指数 Ecological index	县域尺度	—	2015年	中华人民共和国生态环境部 <sup>[26]</sup>
夜间灯光 Nighttime light	1000 m	年	1992—2015年	论文 <sup>[27]</sup>
土地利用与土地覆盖 Land use and land cover	1000 m	年	1992—2015年	论文 <sup>[28]</sup>
气温 Temperature	1000 m	月	1992—2015年	国家地球系统科学数据中心 <sup>[30]</sup>
降雨 Precipitation	1000 m	月	1992—2015年	国家地球系统科学数据中心 <sup>[30]</sup>

## 2 研究方法

### 2.1 生态环境质量评价

本研究在原有的RSEI模型<sup>[19]</sup>基础上构建的MRSEI模型计算公式如下:

$$\text{MRSEI} = \frac{\text{PC1} - \text{PC1}_{\min}}{\text{PC1}_{\max} - \text{PC1}_{\min}} \quad (1)$$

$$\text{PC1} = \text{PCA}(\text{HQI}, \text{NDVI}, \text{NDBSI}, \text{LST}, \text{WET}) \quad (2)$$

式中, MRSEI 为改进的生态环境质量指数, PC1 为主成分变换的第一主成分,  $\text{PC1}_{\min}$  为第一主成分的最小值,  $\text{PC1}_{\max}$  为第一主成分的最大值, HQI 为生境质量指数, NDVI 为植被覆盖度指数, NDBSI 为地表干燥度指数, LST 为地表温度指数, WET 为地表湿度指数。其中所有评价指标均在国家尺度上进行标准化处理。

HQI 指数公式参考文献<sup>[26]</sup>, 计算公式如下:

$$\text{HQI} = A_{\text{HQI}} \times (0.35 \times \text{Forest} + 0.21 \times \text{Grassland} + 0.28 \times \text{Water} + 0.11 \times \text{Cropland} + 0.04 \times \text{Built} + 0.01 \times \text{Unused}) / \text{Area} \quad (3)$$

式中, HQI 为生境质量指数,  $A_{\text{HQI}}$  为归一化系数, Forest、Grassland、Water、Cropland、Built、Unused 分别为林地、草地、水体、耕地、建设用地、未利用地的面积, Area 为海南岛陆地总面积。

NDVI、NDBSI、WET 指数参考文献<sup>[19-20]</sup>中的方法进行计算; LST 指数是利用 Ermida 等<sup>[31]</sup>提供的开源代码(SMW 算法)计算得到的, 计算平台为 GEE<sup>[29]</sup>。

## 2.2 人类活动评价

美国国防气象卫星搭载的可见红外成像线性扫描业务系统(Defense Meteorological Satellite Program/Operational Linescan System, DMSP/OLS)和美国新一代国家极轨卫星搭载的可见光近红外成像辐射传感器(Visible Infrared Imaging Radiometer Suite, VIIRS)提供的夜间灯光数据为表征全球和区域范围的人类活动强度提供了机会。因此, 文章选用夜间灯光数据来表征 1992—2015 年海南岛人类活动。但为了获得长时间序列稳定的夜间灯光数据, 需要对 DMSP/OLS 影像数据和 VIIRS 数据进行校正和拟合。参考文献<sup>[27]</sup>对两种数据进行校正和拟合, 生成了反映海南岛人类活动的长时间序列连续夜间灯光数据。

## 2.3 趋势分析法

本文利用一元线性回归分析法分析像元尺度上海南岛 1992—2015 年生态环境质量、气温、降雨、夜间灯光的空间变化趋势。计算公式如下:

$$\theta_{\text{slope}} = \frac{n \times \sum_{i=1}^n i \times x_i - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n x_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \quad (4)$$

式中,  $\theta_{\text{slope}}$  为  $x$  指标在 1992—2015 年的变化趋势,  $n$  为 24,  $i$  为年份,  $x_i$  为  $x$  指标在第  $i$  年的值。

## 2.4 相关性分析

本研究利用偏相关分析法来探究海南岛的生态环境质量变化对气候变化(气温、降雨)与人类活动(夜间灯光)的相应关系。首先, 计算每个指标与 MRSEI 的相关系数, 计算公式如下:

$$R_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (5)$$

式中,  $R_{xy}$  为  $x$  变量、 $y$  变量之间的相关系数,  $x_i$  为第  $i$  年的生态环境质量指数,  $\bar{x}$  为 1992—2015 年生态环境质量平均值,  $y_i$  为气候因子(气温、降雨)或人类活动因子(夜间灯光)  $\bar{y}$  则为 1992—2015 年相应指标的平均值,  $i$  为年份,  $n$  为总年份; 本文中  $n$  为 24。

偏相关分析表示两个要素同时与第 3、4 个要素存在相关性时, 剔除其余要素考虑另外两个要素的相关性, 可以用偏相关系数表示。计算公式为:

$$R_{xy,z} = \frac{R_{xy} - R_{xz} R_{yz}}{\sqrt{(1 - R_{xz}^2)(1 - R_{yz}^2)}} \quad (6)$$

$$R_{xy,zw} = \frac{R_{xy,z} - R_{xw,z} R_{yw,z}}{\sqrt{(1 - R_{xw,z}^2)(1 - R_{yw,z}^2)}} \quad (7)$$

式中,  $R_{xy,z}$  为  $x$  变量、 $y$  变量之间的偏相关系数,  $R_{xy}$ 、 $R_{xz}$ 、 $R_{yz}$  分别为  $x$  与  $y$ 、 $x$  与  $z$ 、 $y$  与  $z$  之间的相关系数,  $R_{xy,zw}$  为剔除  $z$  变量和  $w$  变量后的  $x$  变量与  $y$  变量之间的偏相关系数。

## 2.5 指标贡献度分析

探究气温、降雨、夜间灯光对海南岛生态环境质量变化的贡献度对深刻理解海南岛生态环境质量演变及其对气候变化与人类活动的响应具有重要意义。本研究基于像元尺度的多元回归方法<sup>[32]</sup>, 利用标准化回归系数的绝对值来量化气温、降雨与夜间灯光对生态环境质量变化的贡献度。具体公式如下:

$$Y = b_0 + b_1 \times X_1 + b_2 \times X_2 + b_3 \times X_3 \quad (8)$$

$$Z_j = b_j \times (S_{X_j} / S_Y) \quad (9)$$

式中,  $Y$  为生态环境质量, 参数  $b_j$  由最小二乘法计算得到,  $X_j$  为各指标(气温、降雨、夜间灯光) 24 年的样本值,  $Z_j$  为各指标的标准化回归系数,  $S_{X_j}$  为各指标的标准差,  $S_Y$  为  $Y$  的标准差。

## 3 结果与分析

### 3.1 MRSEI 精度评价

中华人民共和国生态环境部于 2015 年颁发的《生态环境状况评价技术规范》中提出了一种基于遥感技术的  $EI$  指数<sup>[26]</sup>,  $EI$  指数能够有效评估县级及以上尺度的城市生态环境状况。本文将全国县域的  $EI$  指数作为生态环境质量的真值, 然后将按照文献<sup>[19]</sup> 计算的全国县域  $RSEI$  指数和本研究计算的  $MRSEI$  指数与  $EI$  指数进行散点拟合。如图 2 所示, 改进后的  $MRSEI$  指数与  $EI$  指数拟合效果优于  $RSEI$  指数,  $MRSEI$  与  $EI$  的拟合度  $R^2$  达到了 0.72, 均方根误差为 0.11, 偏差为 -0.05, 三项指标较  $RSEI$  指数有明显的提升。这表明  $MRSEI$  模型适用于大尺度的生态环境质量评价, 可用于表征本研究中海南岛的生态环境质量。

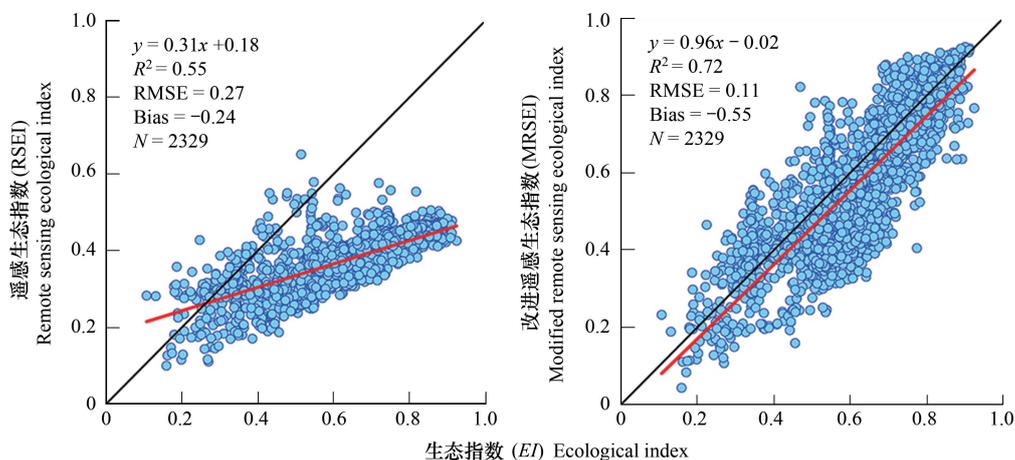


图 2 RSEI、MRSEI 与标准化  $EI$  指数的散点拟合图<sup>[23]</sup>

Fig.2 Scatter fitting curves of RSEI, MRSEI converted  $EI$

### 3.2 MRSEI 时空变化分析

海南岛 24 年来的年平均  $MRSEI$  由 1992 年的 0.711 上升到 2015 年 0.745(图 3)。具体到各年份数值可以发现, 数值变化呈现出 3 个不同变化阶段。1992—1997 年,  $MRSEI$  值呈现出上升趋势, 而在 1997—2011 年,  $MRSEI$  呈现出震荡下降趋势, 但下降区间并不大, 2012—2015 年,  $MRSEI$  又呈现上升趋势。通过拟合得到 1992—2015 年  $MRSEI$  的年际变化趋势线, 由拟合曲线的斜率发现 1992—2015 年海南岛的年均  $MRSEI$  呈现整体缓慢上升趋势, 这表明近 24 年海南岛的生态环境质量在不断提高。

林地的增减对 MRSEI 的变化影响较大。20 世纪 80 年代中期到 90 年代中期,海南岛林地增加明显,这使得 MRSEI 上升明显;但从 20 世纪 90 年中后期开始,大面积的林地、草地、耕地被转化为城镇建设用地,下垫面的改造也使得 MRSEI 出现下降的趋势。尤其是 2010 年海南国际旅游岛政策实施后,对建设用地的需求进一步增加,城镇规模不断扩大,导致对林地和耕地的占用增多,而林地资源对自然生态环境的自我修复起着重要作用,因此林地的减少是造成这一时期海南岛 MRSEI 呈现下降的主要原因。总体来看,近 24 年海南岛的 MRSEI 指数始终保持在比较稳定的水平,变化强度较低,生态环境质量与经济社会发展保持了双赢。

其次,本研究利用趋势分析法分析了海南岛 24 年内的 MRSEI 时空变化趋势(图 4),结果表明海南岛大部分区域 MRSEI 呈增长趋势,较为明显的增长主要集中在海南岛西北部沿海地区以及中西部林区;但在海南岛东部和西南部沿海地区,MRSEI 呈现出了显著降低趋势,其中紫色区域如海口市、定安县、三亚市、万宁市和东方市的城市建成区 MRSEI 降低趋势较为显著,这表明城市建成区的扩张对海南岛的生态环境质量具有显著的负面作用。

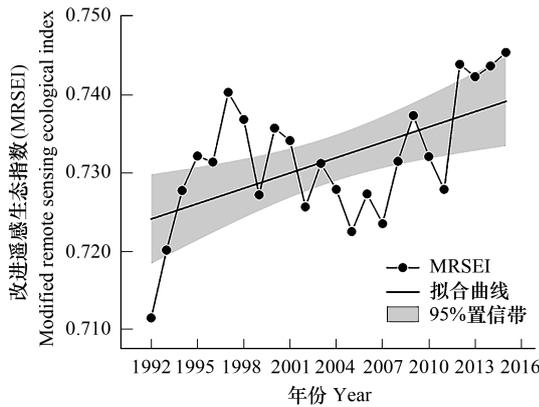


图 3 1992—2015 年海南岛 MRSEI 年际变化趋势  
Fig.3 Interannual change trend of MRSEI in Hainan Island from 1992 to 2015

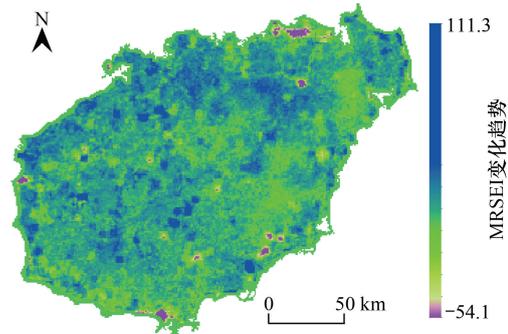


图 4 1992—2015 年海南岛 MRSEI 空间变化趋势  
Fig.4 Spatial change trend of MRSEI in Hainan Island from 1992 to 2015

为进一步探究各行政区划市县内 MRSEI 时空变化差异,本研究统计了 1992—2015 年海南岛各市县的年均 MRSEI 变化情况。如图 5 所示,纵轴方向上代表了各市县的年均 MRSEI 值,横轴代表了各市县的名称。图 6 展示的则为各市县 24 年内 MRSEI 平均值与标准差。结果表明,各区县的 MRSEI 在时间上的变化趋势不明显,而在空间上却存在着显著的差异。海南省中部山区的四个市县琼中黎族苗族自治县(琼中县)、五指山市、保亭黎族苗族自治县(保亭县)和白沙黎族自治县(白沙县)多年平均 MRSEI 值最高。其中琼中县多年平均 MRSEI 值达到 0.878,琼中县的 MRSEI 标准差也是最小,仅为 0.040,五指山市为 0.870(标准差为 0.054)、保亭县为 0.861(标准差为 0.058)、白沙县为 0.846(标准差为 0.071)。考虑到中部山区 4 个市县是国家重点生态功能区也是海南生态文明建设重要示范区和试验区,该区域受人类活动的影响较小,从多年 MRSEI 平均值及其年际变化可以反映出这四个地区的生态环境保持在较优的水平。在所有的市县中,临高县的多年 MRSEI 平均值最低,为 0.589,其次是文昌市(0.592)。另一方面,MRSEI 值时间分布差异最为明显的是陵水县,标准差值达到了 0.175,其次是万宁市(标准差为 0.172)、昌江县(标准差为 0.171)以及东方市(标准差为 0.169),这表明这些市县生态环境质量波动相对较大,需要引起重视。

### 3.3 不同土地利用类型下的 MRSEI

本研究参照《土地利用现状分类标准》(GB/T 21010—2017)将土地覆盖类型分为 6 大类别,分别是草地、林地、耕地、水体、建设用地和未利用地。随后,统计了各年每种地类所对应的 MRESI 平均值(图 7)。结果表明林地的 MRESI 值最高,其 24 年的 MRSEI 平均值为 0.812,其次是草地和水体,其平均值分别为 0.665 和

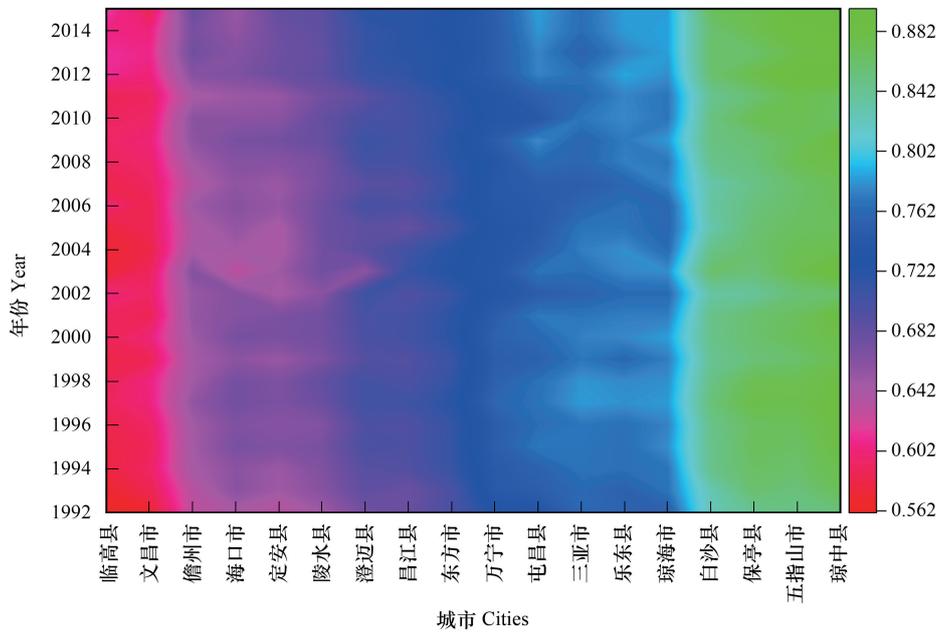


图 5 1992—2015 年海南岛各市县的 MRSEI 热力图

Fig.5 MRSEI thermal maps of cities and counties in Hainan Island from 1992 to 2015

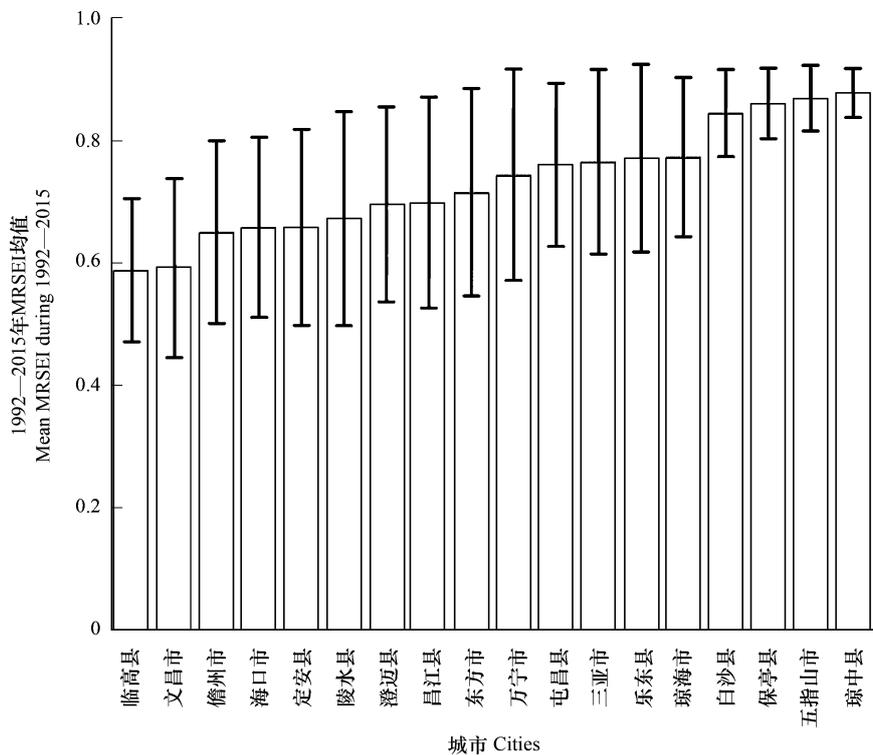


图 6 海南岛各市县 1992—2015 年的 MRSEI 平均值

Fig.6 Average of MRSEI of cities and counties in Hainan Island from 1992 to 2015

0.658;耕地、未利用地和建设用地的 MRESI 较小,其平均值分别为 0.561、0.519 和 0.493,这说明各用地类别对 MRESI 贡献率由大到小排列分别是林地、草地、水体、耕地、未利用地和建设用地,这与况婷的研究<sup>[33]</sup>结果一致;此外,浅绿色部分为各用地类型的 MRSEI 值同时出现明显波段的时间段,这与图 3 中出现波峰的时间一致。

### 3.4 MRESI 对气候和人类活动的响应

#### 3.4.1 气候和人类活动的时空变化特征

图 8—图 10 分别是 1992—2015 年海南岛的气温、降水和夜间灯光数据时空变化趋势图。从图 8 可以看出,海南岛多年气温变化呈现出北部沿海地区和东南部显著升高的趋势,而西南部沿海地区和中部分地区的气温呈现下降的趋势。从图 9 可以看出,海南岛 1992—2015 年的降水变化趋势呈现出明显的南北差异,由北向南呈现出逐渐递减的趋势。图 10 显示,海口市和三亚市的夜间灯光呈现出大面积的显著增加趋势,儋州市、东方市、陵水县、万宁市、琼海市、文昌市、定安县、澄迈县、昌江县等市县的主城区(中心城区)以及以儋州洋浦经济开发区(产业园区)、陵水清水湾岸线区域(旅游度假功能区)、东方八所港(港口基础设施功能区)为代表的经济活跃度较高的区域也呈现出明显增加趋势。

此外,本研究统计了 1992—2015 年海南岛全年总降雨量、全年平均气温(图 11)以及夜间灯光的年际变化趋势(图 12)。结果表明,过去 24 年:(1)海南岛的年总降雨量和年平均气温都呈现出波动变化特征,年总降雨量最少为 2004 年(899.808 mm),最多为 2012 年(1664.687 mm),24 年平均年总降雨量为 1353.891 mm;(2)年平均气温在 23—25℃之间波动,年平均气温最低为 2011 年(23.171℃),最高为 2015 年(24.722℃),24 年平均年均气温为 23.967℃;3)海南岛人类活动强度呈现出波动上升趋势,由 1992 年的 0.015 增长到 2015 年的 0.125。

#### 3.4.2 MRESI 与气候和人类活动的相关性

利用公式 5—7,本研究从像元尺度分析了 MRESI 与气温、降雨和人类活动之间偏相关性。从图 13 可以看出,MRESI 与气温呈显著相关地区( $P<0.05$ )以正相关为主(正显著相关占显著地区面积 98.5%),相关度最高的区域在海南岛北部的儋州市和澄迈县( $P<0.05$ );MRESI 与降雨呈显著相关( $P<0.05$ )区域面积要高于气温因素,显著相关区域同样基本为正相关(图 13,正显著相关占显著地区面积 98.7%),且主要集中在海南岛中北部以及东北部区域,其中海口市和定安县正相关性最为明显;而从图 13 可以看出,MRESI 与夜间灯光在海南岛的沿海地区存在明显的显著相关性( $P<0.05$ ),其中在一些重要城市和县市主城区,如海口市、三亚市、定安县和东方市,MRESI 与人类活动存在着显著负相关的关系,而在海南岛的西北部、东南部少部分区域,MRESI 与人类活动呈显著正相关关系。海南自 2011 年开展绿化宝岛大行动<sup>[34]</sup>,草地和耕地等宜林地大面积转为林地,这在一定程度上保障了全岛林地资源的平衡,使得大多数地区人类活动与 MRESI 指数出现协同发展。

### 3.5 贡献度分析

图 14 展示了海南岛 1992—2015 年气温、降水、夜间灯光对生态环境质量变化的贡献度空间分布图。从图 14 可以看出,气温、降水、夜间灯光的贡献度在空间分布上存在显著差异。其中,夜间灯光影响更为重要

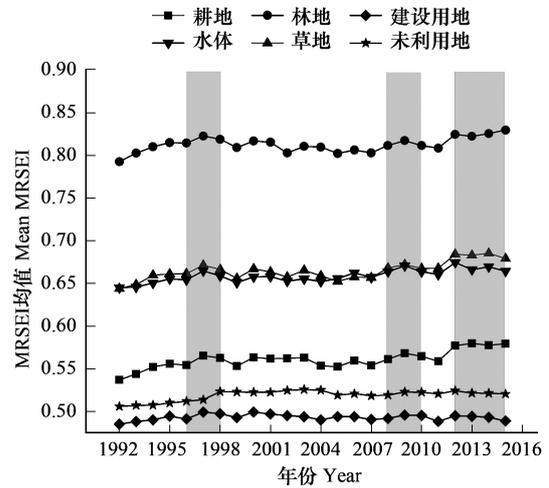


图 7 1992—2015 年海南岛不同用地类型的 MRESI  
Fig.7 MRESI of different land use types in Hainan Island from 1992 to 2015

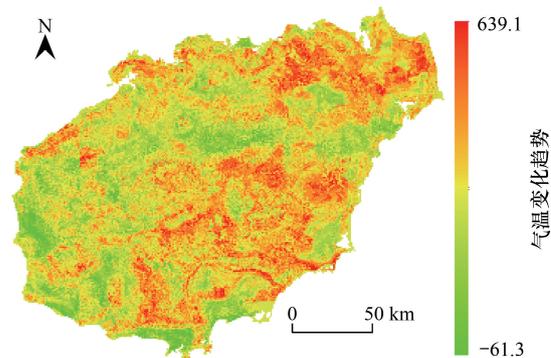


图 8 1992—2015 年海南岛气温空间变化趋势  
Fig.8 Spatial change trend of temperature in Hainan Island from 1992 to 2015

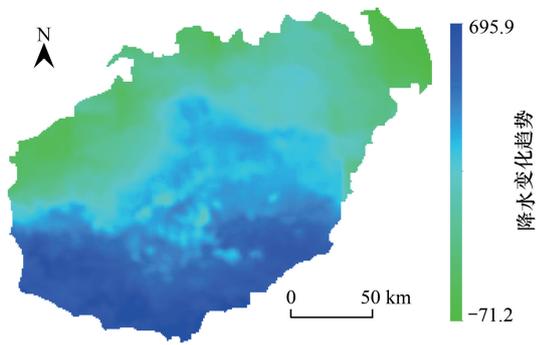


图 9 1992—2015 年海南岛降水空间变化趋势  
Fig.9 Spatial change trend of precipitation in Hainan Island from 1992 to 2015

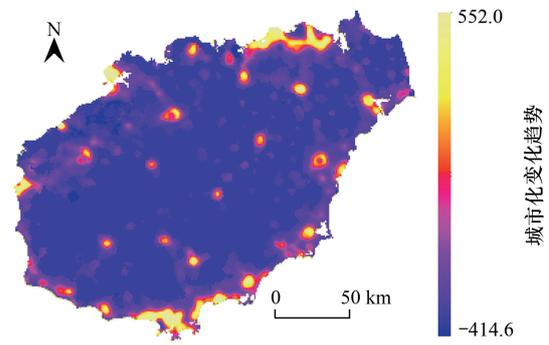


图 10 1992—2015 年海南岛人类活动强度空间变化趋势  
Fig.10 Spatial change trend of human activities in Hainan Island from 1992 to 2015

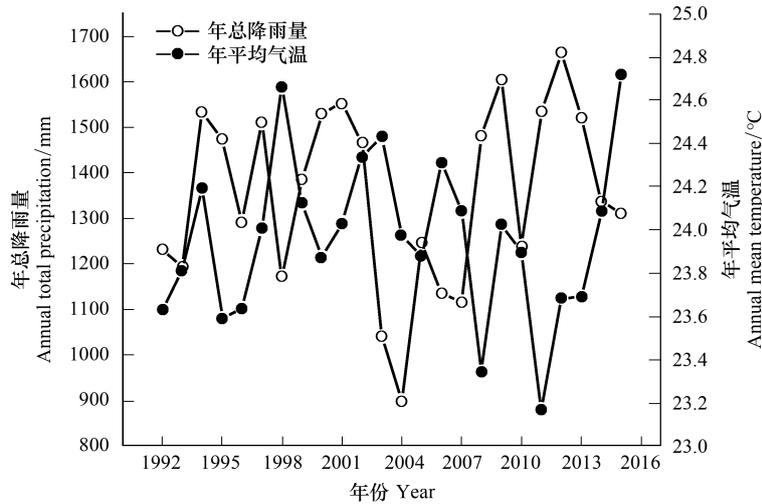


图 11 1992—2015 年海南岛年总降雨量和年平均气温变化  
Fig.11 Interannual change trend of annual total precipitation and annual mean temperature in Hainan Island from 1992 to 2015

的区域主要集中在海南岛沿海地区,例如海口市、三亚市、东方市等,这与 3.4.2 节中得出的结论一致;气温和降水影响更重要的区域则集中在海南岛中北部地区,主要原因是该区域分布着岛内丰富的森林资源,而森林对气温和降水的敏感性较大,且该区域受人类活动影响较少。其次,三个指标中受降水指标主导的面积最大,达到了 0.880 万  $\text{km}^2$ ,约占全岛面积的 25.287%,而对气温响应面积最少,仅为 0.506 万  $\text{km}^2$ ,约占全岛面积的 14.540%。作为两个重要的气候指标,气温和降雨共同主导了影响全岛 39.827% 面积的生态环境质量的演变。作为表征人类活动的夜间灯光指标则主导影响的面积为 0.726 万  $\text{km}^2$ ,约占全岛面积的 20.862%。这表明,作为气候变化的敏感区,近 24 年海南岛生态环境质量变化对气候变化的响应更为突出,而只有沿海等地区主要

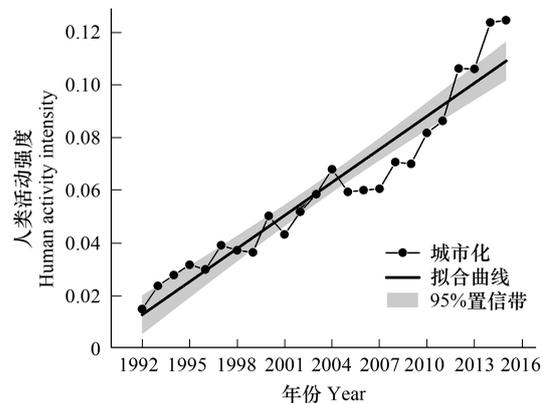


图 12 1992—2015 年海南岛人类活动强度年际变化趋势  
Fig.12 Interannual change trend of urbanization in Hainan Island from 1992 to 2015

受到人类活动的影响。

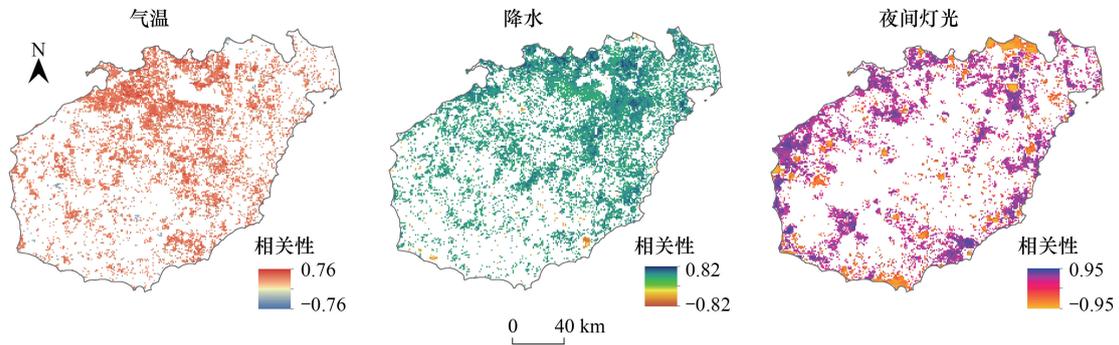


图 13 MRSEI 与气温、降水、夜间灯光的偏相关分布图

Fig.13 Partial correlation between MRESI and temperature, precipitation and nighttime-light

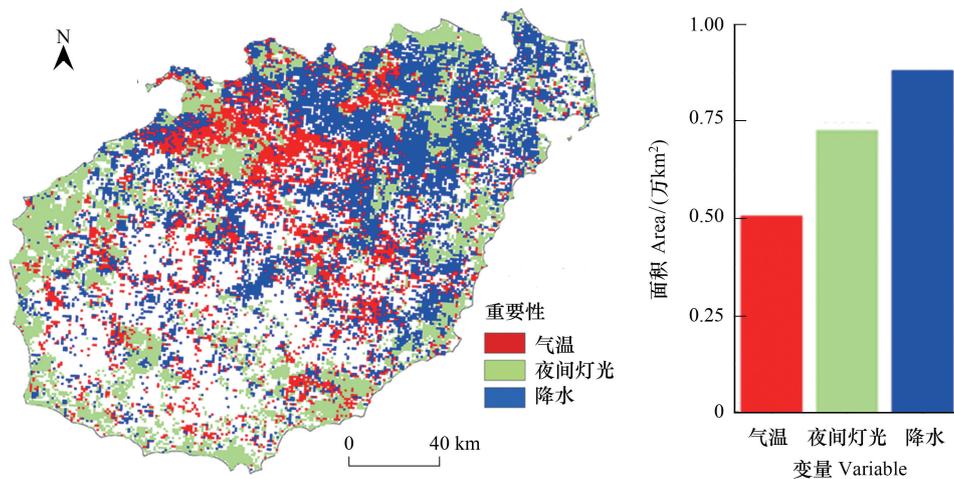


图 14 气温、降水、夜间灯光对 MRSEI 的影响贡献度空间分布图

Fig.14 Spatial distribution of influence contribution of temperature, precipitation and nighttime light on MRSEI

#### 4 结论

本研究在 RSEI 模型的基础上,引入生境质量指数,构建了能反映该区域主导生态系统服务功能的生态环境质量指数 MRSEI。基于 MRSEI,本研究探究了 1992—2015 年海南岛的生态环境质量的时空动态变化特征以及其对气候变化与人类活动的响应,并基于像元尺度的多元回归方法对比了气候指标与人类活动对海南岛生态环境质量的相对重要性,主要结论如下:

(1) 较 RSEI 指数,MRSEI 在精度上有提升,可以较好地评价地区生态环境质量变化,实现了地区生态环境质量动态快速评价,评价结果可以为地区生态安全评价、生态保护与修复提供数据支撑。特别是海南中国自由贸易港建设下,为整体生态质量不降低、可持续发展提供科学依据。

(2) 1992—2015 年,海南岛的 MRSEI 指数呈现阶段波动特征,但总体呈小幅增长趋势,增长主要集中在海南岛西北部沿海地区以及中西部林区。各县市间的生态环境质量差异明显,海南省中部山区四个市县多年平均 MRSEI 值保持最高。不同用地类型的 MRSEI 差异较大,由大到小排列分别是林地、草地、水体、耕地、未利用地和建设用地。

(3) 1992—2015 年,海南岛气温与降水量变化趋势存在较大的空间差异。海口市和三亚市人类活动强度

呈现显著增加趋势。海南岛的气温和降水与生态环境质量主要表现为正相关的关系,且降水与生态环境质量存在显著相关性的区域面积要大于气温。人类活动对生态环境在海南岛沿海地区 and 市县的主城区表现出显著的负相关的关系。

(4)近 24 年,在海南岛约 40%的区域,气候变化对生态环境质量的影响大于人类活动产生的影响,而只有沿海等地区受人类活动的影响更为突出。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] Steffen W, Broadgate W, Deutsch L, Gaffney O, Ludwig C. The trajectory of the Anthropocene: the great acceleration. *The Anthropocene Review*, 2015, 2(1): 81-98.
- [ 2 ] Ellis E C, Ramankutty N. Putting people in the map: anthropogenic biomes of the world. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2008, 6(8): 439-447.
- [ 3 ] 刘世梁, 刘芦萌, 武雪, 侯笑云, 赵爽, 刘国华. 区域生态效应研究中人类活动强度定量化评价. *生态学报*, 2018, 38(19): 6797-6809.
- [ 4 ] 沈建国, 白美兰, 李云鹏. 气候变化和人类活动对内蒙古生态环境的影响. *自然灾害学报*, 2006, 15(6): 84-91.
- [ 5 ] 秦大河, 丁一汇, 苏纪兰, 任贾文, 王绍武, 伍荣生, 杨修群, 王苏民, 刘时银, 董光荣, 卢琦, 黄镇国, 杜碧兰, 罗勇. 中国气候与环境演变评估(1): 中国气候与环境变化及未来趋势. *气候变化研究进展*, 2005, 1(1): 4-9.
- [ 6 ] 欧阳志云, 郑华. *生态安全战略*. 北京: 学习出版社, 2014.
- [ 7 ] Wang S, Fu B J, Piao S, Lü Y H, Ciais P, Feng X M, Wang Y F. Reduced sediment transport in the Yellow River due to anthropogenic changes. *Nature Geoscience*, 2016, 9(1): 38-41.
- [ 8 ] Wang H, Zhou S L, Li X B, Liu H H, Chi D K, Xu K K. The influence of climate change and human activities on ecosystem service value. *Ecological Engineering*, 2016, 87: 224-239.
- [ 9 ] 邓晨晖, 白红英, 高山, 刘荣娟, 马新萍, 黄晓月, 孟清. 秦岭植被覆盖时空变化及其对气候变化与人类活动的双重响应. *自然资源学报*, 2018, 33(3): 425-438.
- [ 10 ] Lu Y L, Yang Y F, Sun B, Yuan J J, Yu M Z, Stenseth N C, Bullock J M, Obersteiner M. Spatial variation in biodiversity loss across China under multiple environmental stressors. *Science Advances*, 2020, 6(47): eabd0952.
- [ 11 ] 张明洁, 张京红, 刘少军, 车秀芬, 李文韬. 海南岛 1961—2011 年气候变化特征分析. *热带作物学报*, 2014, 35(12): 2488-2495.
- [ 12 ] 雷金睿, 陈宗铸, 陈小花, 李苑菱, 吴庭天. 1980—2018 年海南岛土地利用与生态系统服务价值时空变化. *生态学报*, 2020, 40(14): 4760-4773.
- [ 13 ] 刘采, 张海燕, 李迁. 1980-2018 年海南岛人类活动强度时空变化特征及其驱动机制. *地理科学进展*, 2020, 39(4): 567-576.
- [ 14 ] Zhai D L, Xu J C, Dai Z C, Cannon C H, Grumbine R E. Increasing tree cover while losing diverse natural forests in tropical Hainan, China. *Regional Environmental Change*, 2014, 14(2): 611-621.
- [ 15 ] Yu B W, Chao X L, Zhang J D, Xu W H, Ouyang Z Y. Effectiveness of nature reserves for natural forests protection in tropical Hainan: a 20 year analysis. *Chinese Geographical Science*, 2016, 26(2): 208-215.
- [ 16 ] 雷金睿, 陈宗铸, 陈毅青, 陈小花, 李苑菱, 吴庭天. 1990—2018 年海南岛湿地景观生态安全格局演变. *生态环境学报*, 2020, 29(2): 293-302.
- [ 17 ] 刘纪远, 邵全琴, 于秀波, 黄河清. *中国陆地生态系统综合监测与评估*. 北京: 科学出版社, 2016.
- [ 18 ] 欧阳志云, 王桥, 郑华, 张峰, 侯鹏. 全国生态环境十年变化(2000—2010 年)遥感调查评估. *中国科学院院刊*, 2014, 29(4): 462-466.
- [ 19 ] 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.
- [ 20 ] 张亚球, 姜放, 纪梦达, 姜海山, 王子彦. 基于遥感指数的区县级生态环境评价. *干旱区研究*, 2020, 37(6): 1598-1605.
- [ 21 ] 王杰, 马佳丽, 解斐斐, 徐锡杰. 干旱地区遥感生态指数的改进——以乌兰布和沙漠为例. *应用生态学报*, 2020, 31(11): 3795-3804.
- [ 22 ] 吴映瞳, 刘春晖, 赵婷婷. 习近平生态文明视阈下基于 RSEI 技术的伊敏矿区生态环境质量研究. *北方园艺*, 2020, (13): 91-98.
- [ 23 ] Xu D, Yang F, Yu L, Zhou Y Y, Li H X, Ma J J, Huang J C, Wei J, Xu Y, Zhang C, Cheng J. Quantization of the coupling mechanism between eco-environmental quality and urbanization from multisource remote sensing data. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 321: 128948.
- [ 24 ] 海南省统计局, 国家统计局海南调查总队. *海南统计年鉴 2020*. 北京: 中国统计出版社, 2020.

- [25] 宁吉喆. 第七次全国人口普查主要数据情况. 中国统计, 2021, 5: 4-5.
- [26] 环境保护部. 生态环境状况评价技术规范 (HJ 192—2015). (2015-03-13). [http://www.mee.gov.cn/ywgz/fgbz/bz/bzwb/stzl/201503/t20150324\\_298011.shtml](http://www.mee.gov.cn/ywgz/fgbz/bz/bzwb/stzl/201503/t20150324_298011.shtml).
- [27] Li X C, Zhou Y Y, Zhao M, Zhao X. A harmonized global nighttime light dataset 1992-2018. *Scientific Data*, 2020, 7(1): 168.
- [28] Xu Y D, Yu L, Peng D L, Zhao J Y, Cheng Y Q, Liu X X, Li W, Meng R, Xu X L, Gong P. Annual 30-m land use/land cover maps of China for 1980-2015 from the integration of AVHRR, MODIS and Landsat data using the BFAST algorithm. *Science China Earth Sciences*, 2020, 63(9): 1390-1407.
- [29] 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.
- [30] Peng S Z, Ding Y X, Liu W Z, Li Z. 1 km monthly temperature and precipitation dataset for China from 1901 to 2017. *Earth System Science Data*, 2019, 11(4): 1931-1946.
- [31] Ermida S L, Soares P, Mantas V, Göttsche F M, Trigo I F. Google earth engine open-source code for land surface temperature estimation from the Landsat Series. *Remote Sensing*, 2020, 12(9): 1471.
- [32] Baldocchi D, Dralle D, Jiang C, et al. How much water is evaporated across California? A multiyear assessment using a biophysical model forced with satellite remote sensing data. *Water Resources Research*, 2019, 55(4): 2722-2741.
- [33] 况婷. 基于遥感生态指数的万载县土地利用生态环境评价研究[D]. 南昌: 江西师范大学, 2020.
- [34] 张蓓, 刘金山, 洪加凤, 周湘红, 魏甫, 刘治昆. 海南省 2011—2015 年绿化宝岛工程人工林碳储量及碳汇估算. *中南林业调查规划*, 2017, 36(3): 26-29.