



**基于改进遥感生态指数的海南岛生态环境质量动态变化**

付杰, 王萍, 张清, 李兴荣, 田燕芹

引用本文:

付杰, 王萍, 张清, 等. 基于改进遥感生态指数的海南岛生态环境质量动态变化[J]. *农业资源与环境学报*, 2021, 38(6): 1102–1111.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2021.0482>

---

**您可能感兴趣的其他文章**

Articles you may be interested in

**Google Earth Engine平台支持下的南流江流域生态环境质量动态监测**

杨坤士, 卢远, 翁月梅, 韦丽珍

*农业资源与环境学报*. 2021, 38(6): 1112–1121 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0536>

**基于MCE-CA耦合模型的嘉兴市土地利用预测情景下生态敏感性评价**

荣月静, 张慧, 赵显富

*农业资源与环境学报*. 2015(4): 343–353 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2014.0359>

**西部绿洲城市土地利用转型的生态环境效应——以乌鲁木齐市为例**

阿依吐尔逊·沙木西, 刘新平, 祖丽菲娅·买买提, 陈前利, 冯彤

*农业资源与环境学报*. 2019, 36(2): 149–159 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0113>

**晋北大型露天矿区生态系统弹性研究**

杨庚, 曹银贵, 庄亦宁, 张振佳, 白中科

*农业资源与环境学报*. 2020, 37(4): 562–573 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0408>

**典型喀斯特槽谷区石漠化时空演变及未来情景模拟**

陈飞, 周德全, 白晓永, 肖建勇, 钱庆欢

*农业资源与环境学报*. 2018, 35(2): 174–180 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2017.0291>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

付杰, 王萍, 张清, 等. 基于改进遥感生态指数的海南岛生态环境质量动态变化[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(6): 1102-1111.  
FU J, WANG P, ZHANG Q, et al. Dynamic monitoring of ecological environment quality of Hainan Island based on improved remote sensing ecological index[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2021, 38(6): 1102-1111.



开放科学 OSID

# 基于改进遥感生态指数的海南岛生态环境质量动态变化

付杰<sup>1,2</sup>, 王萍<sup>1\*</sup>, 张清<sup>2</sup>, 李兴荣<sup>1</sup>, 田燕芹<sup>3</sup>

(1. 山东科技大学测绘与空间信息学院, 山东 青岛 266590; 2. 中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100094; 3. 江苏海洋大学测绘与海洋信息学院, 江苏 连云港 222005)

**摘要:**为定量分析海南岛生态环境质量,基于耦合绿度、湿度、干度、热度4项指标的遥感生态指数(Remote sensing ecological index, RSEI),考虑土地利用强度、人口聚集度与坡度对海岛生态系统的影响,增加土地利用、人口分布、地形3项指标,利用主成分分析法构建了改进遥感生态指数(Improved remote sensing ecological index, IRSEI)模型。利用RSEI与IRSEI分别对海南岛2000—2020年的生态环境质量进行动态监测,分析IRSEI的合理性以及两者与生态环境状况指数(Ecological index, EI)的相似性。结果表明:与RSEI相比,IRSEI与EI指数更接近,且具有很好的合理性,IRSEI突出土地利用、人口分布与地形地貌对生态环境质量的影响,可以对海南岛生态环境质量进行准确、客观的评价。2000—2020年间海南岛生态环境质量呈现“下降-上升-下降”的变化趋势,但整体来说,IRSEI均值从0.721上升至0.766,其生态环境质量得到提升。生态环境质量等级为优、良的土地各年份占比均超过89%,等级为差、较差的土地占比极少,二者之和在各年份所占比例均低于1.48%;海南岛中南部地区的生态环境质量高于东部、北部以及环岛地区,生态环境质量总体处于优良水平。生态环境质量提升的区域覆盖面积为12 278.00 km<sup>2</sup>,占比47.5%,生态环境质量有所下降的区域覆盖面积为3 124.07 km<sup>2</sup>,占比12.1%;改善地区主要分布在北部和东部,退化地区主要分布在人口密集的环岛沿海城市带。研究构建了适用于海南岛的生态质量评估体系,为海南省生态环境的治理保护和相关政策法规的制定提供科学依据。

**关键词:**海南岛;改进遥感生态指数(IRSEI);主成分分析;生态环境质量;时空变化

中图分类号:X826;X821 文献标志码:A 文章编号:2095-6819(2021)06-1102-10 doi: 10.13254/j.jare.2021.0482

## Dynamic monitoring of ecological environment quality of Hainan Island based on improved remote sensing ecological index

FU Jie<sup>1</sup>, WANG Ping<sup>1\*</sup>, ZHANG Qing<sup>2</sup>, LI Xingrong<sup>1</sup>, TIAN Yanqin<sup>3</sup>

(1. School of Geomatics and Spatial Information, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China; 2. Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China; 3. School of Surveying and Mapping and Marine Information, Jiangsu Ocean University, Lianyungang 222005, China)

**Abstract:** In order to quantitatively analyze the quality of Hainan Island's ecological environment, besides the remote sensing ecological index (RSEI) that coupled with four indicators of greenness, humidity, dryness, and heat, we should consider the impact of land use intensity, population concentration and slope on the island's ecosystem. Therefore, three other indicators of land use, population distribution, and topography were added, and the improved remote sensing ecological index (IRSEI) was constructed using principal component analysis. This study used RSEI and IRSEI to dynamically monitor the ecological environment quality of Hainan Island from 2000 to 2020 and analyzed the rationality of IRSEI and the similarity between RSEI/IRSEI and the ecological index (EI). The results showed that compared with RSEI, IRSEI was closer to the EI index and had good rationality. It can highlight the impact of land use,

收稿日期: 2021-06-23 录用日期: 2021-09-29

作者简介: 付杰(1998—),男,硕士研究生,从事生态评估研究。E-mail: Jeff101@sdust.edu.cn

\*通信作者: 王萍 E-mail: skd990058@sdust.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划课题(2020YFD1100204); 海南省重大科技计划项目(ZDKJ2019006)

**Project supported:** The National Key Research and Development Program of China (2020YFD1100204); Major Science and Technology Project of Hainan Province, China (ZDKJ2019006)

population distribution and topography on the quality of the ecological environment. Therefore, it can accurately and objectively evaluate the quality of Hainan Island's ecological environment. From 2000 to 2020, the quality of Hainan Island's ecological environment showed a trend of "decrease-rise-decline". The average value of IRSEI rose from 0.721 to 0.766, which shows that the quality of the ecological environment of Hainan Island has been improved. The proportion of land with excellent and good ecological environment quality levels in each year was more than 89%, and the proportion of land with worse and worst ecological environmental quality levels was so small that the sum of the two accounts for the proportion of each year were below 1.48%. The quality of the ecological environment in the central and southern parts of Hainan Island was higher than that of the eastern, northern and around island areas. The quality of the ecological environment was good in generally. The area covered by the improved ecological environment quality was 12 278.00 km<sup>2</sup> that accounting for 47.5%, and the area covered by the reduced ecological environment quality was 3 124.07 km<sup>2</sup> that accounting for 12.1%. The improved area was mainly distributed in the northern and eastern parts of Hainan Island, and the degraded region was mainly distributed in densely populated coastal cities around the island. The results can provide references for the future plan to improve ecological environment in Hainan Island.

**Keywords:** Hainan Island; improved remote sensing ecological index (IRSEI); principal component analysis; ecological environment quality; temporal and spatial changes

随着全球气候变化以及人类活动的不断加剧,生态环境问题逐渐成为威胁区域生态安全和社会可持续发展的主要因素之一<sup>[1]</sup>。海南是我国“一带一路”重要战略支点,摸清经济发展背景下全岛生态资源现状与变化趋势,对其落实“五位一体”的战略布局具有重要意义。新形势下加强生态环境保护、遏制生态环境破坏,对于维护生态环境安全、保障国民经济和社会可持续发展意义重大<sup>[2-3]</sup>。随着人口规模的不断扩大、城市化的加速推进和以房地产为代表的资源消耗性产业的快速发展,经济发展与资源环境的结构性矛盾日益显现,人类扰动下的生态环境问题就显得尤为突出,有必要对海南岛的区域生态环境质量进行评价。因此,亟需建立生态评价模型和定量表达方法,并在此基础上提出生态综合评价的技术标准和规范。

为了定量评价区域生态环境质量,2015年环境保护部开发并发布了生态环境质量指数(EI)模型<sup>[4]</sup>,但该模型需要收集大量统计数据,数据收集工作较为困难,且在不同区域进行评价时对各个生态指标权重的确定存在较大主观性,所得结果为一个数值,数据无法可视化分析<sup>[5]</sup>。为了解决这些问题,徐涵秋<sup>[6]</sup>和HU等<sup>[7]</sup>提出遥感生态指数(RSEI)法进行福州市生态质量评价,对绿度、湿度、干度、温度4个基于遥感影像获取的指标采用主成分分析法进行集成分析,用来快速评估区域生态环境质量。此方法计算简单,既可以定量表示生态质量高低,又可以进行可视化分析,在多个地区得到广泛应用<sup>[8-12]</sup>。缪鑫辉等<sup>[12]</sup>基于遥感生态指数法对甬江流域生态环境变化进行分析,得知甬江流域生态质量整体下降,绿度指标对生态质量影响最大。由于研究地区的不同,许多学者对RSEI进

行改进,来适应不同区域的实际情况<sup>[3,13-15]</sup>。如王杰等<sup>[15]</sup>基于乌兰布和沙漠干旱区的实际情况,利用盐度指标代替干度指标并增加土地退化指标改进RSEI指数,以此反映干旱区的生态质量状况。本研究以海南岛作为研究区,考虑到RSEI是基于城市尺度建立的,其中干度指标考虑的是人类干预的建筑指数,对于海南岛来说,城市和乡村建筑仅占人类活动对生态环境质量影响的小部分,而地形地貌在海岛生态系统中发挥着重要作用,对植被、土壤的分布具有重要影响<sup>[16]</sup>,因此需要改进遥感生态指数来使其更适用于海南岛的特殊地理环境,并对其应用于大型海岛类生态系统的合理性和准确性进行论证。

目前国内鲜有针对大型海岛地区的遥感生态指数评估方法,因此为了填补大型海岛地区生态环境质量评估的空缺,本研究在现有遥感生态指数的基础上增加了土地利用指数、人口分布指数以及地形指数,构建了改进遥感生态指数(IRSEI)模型,并以海南岛为例,探索IRSEI的合理性和代表性,对海南岛的生态环境质量进行时空演变分析,以期对海南岛生态环境的治理与保护及相关政策法规的制定提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

海南岛(18°09'~20°10'N, 108°37'~111°03'E,图1)位于中国南部,全岛面积约为33 920 km<sup>2</sup><sup>[17]</sup>。岛上气候为热带季风气候,夏季受到来自西太平洋的东南季风、冬季受到来自印度洋的西南季风影响,5月至10月为湿季,11月至次年4月为干季<sup>[18]</sup>。海南岛的地形复杂,中部地区以丘陵山区为主,沿海地区以平原

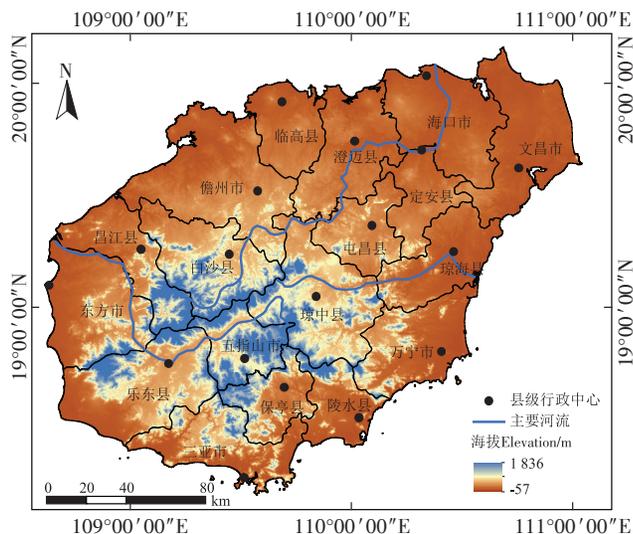


图1 研究区概况

Figure 1 Overview of the study area

为主。其植被分布与地形高度相关,岛上的森林位于海南岛中部和南部,该地区的地形主要是中低山和丘陵;人工林主要分布在山脉周围的平原上;农作物主要种植在沿海的平原地区<sup>[19]</sup>。由于海南省人口急剧增加(从1974年的488万增加到2020年的934万),当地政府建立了总面积为27 023 km<sup>2</sup>的保护区,以保护自然环境免受人类活动的剧烈干扰。

## 1.2 数据来源

由于海南岛地处热带、云量较多、范围较大,研究区无云影像获取需要多幅 Landsat 影像拼接,故选取海南5—10月的湿季 Landsat 影像数据,结合 Google earth engine 平台,基于 GEEAPI 编程,筛选成像区间为当年5月1日—10月31日且云量小于10%的 Landsat SR 影像进行无云影像拼接,获得2000、2005、2010年 Landsat TM 影像和2015、2020年 Landsat OLI 影像的五期无云影像,空间分辨率为30 m。水体会对主成分分析结果造成较大影响,为了能真实反映研究区生态环境质量,借助改进的归一化差异水体指数(Modified NDWI, MNDWI)<sup>[20]</sup>将水体掩膜,得到研究区影像。数字高程模型(Digital elevation model, DEM)数据为地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn>)所提供 ASTER GDEM 30 m 分辨率数据。五期空间分辨率为30 m 的海南岛土地利用数据来源于资源环境科学与卫星中心(<http://www.resdc.cn>),分类精度超过85%。人口空间分布数据集来源于资源环境科学与卫星中心(<http://www.resdc.cn>),该数据综合考量了土地利用类型、夜间灯光亮度、居民点密度。涉及海南省各市(县)

行政边界的矢量数据,来源于地理国情监测云平台(<http://www.dsac.cn>),主要用于研究区遥感影像裁剪。

## 1.3 改进遥感生态指数模型构建

本研究以海南岛为研究区域,考虑土地利用的改变与人口聚集程度对生态质量的影响,以及坡度对海岛生态系统内的植被、土壤分布的重要作用,构建包含绿度指标、湿度指标、干度指标、热度指标、土地利用指标、人口分布指标以及地形指标的改进遥感生态指数(IRSEI)模型。

### 1.3.1 生态指标计算

归一化植被指数(Normalized vegetation index, NDVI)与植物生物量、叶面积指数和植被盖度密切相关,因此本研究采用NDVI来表示绿度指标<sup>[21]</sup>。缨帽变换(K-T变换)湿度分量可较好地反映植物、土壤的水分状态,因此湿度指标(Land surface moisture, LSM)通过K-T变换可得,基于Landsat系列不同卫星数据反演的湿度分量具有不同的经验公式<sup>[22]</sup>。干度指标以土壤指数(Soil index, SI)和建筑指数(Impervious building index, IBI)综合得到的干度指数(NDBSI)表示<sup>[23]</sup>。以陆地表面温度(Land surface temperature, LST)来表示热度指标<sup>[24-25]</sup>。土地利用类型反映了生态系统的状态,是人类活动对自然界的反映,因此土地利用指标以土地利用强度(Land use intensity, LUI)来表示<sup>[26-27]</sup>。海南岛人口数量增长迅速,对生态质量影响较大,因此以人口空间分布数据来表示人口分布指标(POP)。地形地貌对海岛生态系统影响较大。坡度(Slope)表示地表单元的陡缓程度,可以改变土壤稳定性与渗透能力,对土壤侵蚀和植被长势有较大影响,因此以Slope来表示地形指标<sup>[16]</sup>。各指标计算公式均参考相关文献。

### 1.3.2 IRSEI指数

本研究采用主成分分析法(Principal component analysis, PCA),根据各个因子对主成分的贡献率自动客观分配权重,可以减少主观经验赋权造成的偏差,将7项单一指标耦合成一项综合指数。由于各指标维度不同,量纲不统一,为了减小不同指标的数值的影响,所有指标都应该进行归一化处理<sup>[28]</sup>,公式如下:

$$I_N = (I - I_{\min}) / (I_{\max} - I_{\min}) \quad (1)$$

式中: $I_N$ 是标准化后的指标值; $I$ 是该指标的数值; $I_{\max}$ 和 $I_{\min}$ 分别是指标的最大值和最小值。

在进行主成分分析前需要利用MNDWI对水体进行掩膜处理,避免影响PCA的载荷分布。

指标标准化后,通过主成分分析可以得到初始生

态指数,由表1可见,主成分分析后的前两个主成分包含了影像大部分信息,且各个指标在前两个主成分的载荷正负与大小基本一致,故本研究选取第一、第二主成分构建IRSEI模型,其公式为<sup>[13]</sup>:

$$I_{IRSEI} = \sum_{i=1}^2 \omega_i \times P_{Ci} \quad (2)$$

式中: $I_{IRSEI}$ 为IRSEI的值; $\omega_i$ 为第*i*主成分的贡献率; $P_{Ci}$ 为第*i*主成分。

为了便于不同研究时期之间的比较,所得IRSEI值再次进行归一化处理。IRSEI的值越高,代表研究区的生态状况越好,反之说明生态状况越差。

为了定量、直观地分析生态环境质量及其变化情况,考虑到IRSEI结果与EI结果极为相近(表2),本研究依据《生态环境状况评价技术规范》,将归一化后的IRSEI分为差(0~0.2)、较差(0.2~0.35)、中(0.35~0.55)、良(0.55~0.75)、优(0.75~1)共5个生态环境质量等级<sup>[4]</sup>;并对各时间段的IRSEI值进行差值处理,将变化类型分为明显变差(-1,-0.1]、轻度变差(-0.1,-0.05]、基本不变(-0.05,0.05)、轻度变好[0.05,0.1)、明显变好[0.1,1)5个等级。

## 2 结果与讨论

### 2.1 主成分分析结果

表1展示了不同年份7个生态指标在不同主成分中的载荷以及各指标的特征值贡献率。从表1中可以看出,第一主成分特征值贡献率在50%左右,两个主成分的特征值贡献率之和均超过70%,说明前两个主成分集成了7个指数的绝大部分特征。而且各个指数对PC1与PC2的载荷大小规律性明显,两个主成分的载荷值正负基本一致,而PC3~PC7中的载荷大

小与正负均无规律性,因此使用前两个主成分依据其特征值比例构建IRSEI模型,能够对生态环境质量做出合理反映。

并且绿度指标(NDVI)、湿度指标(LSM)以及地形指标(Slope)在PC1与PC2中的特征向量均为正数,干度指标(NDBSI)、热度指标(LST)、土地利用指标(LUI)、人口分布指标(POP)在PC1与PC2中的特征向量均为负数,只有LST在PC2中的特征向量为正数,但依照特征值比例所构建的IRSEI模型中LST的特征向量仍为负数,说明绿度指标、湿度指标以及地形指标对生态质量具有正面影响,干度指标、热度指标、土地利用指标以及人口分布指标对生态质量具有负面影响,符合生态学客观规律。

### 2.2 IRSEI指数的科学性

#### 2.2.1 合理性分析

为了证明IRSEI的合理性,将2010—2015年的RSEI与IRSEI归到与EI一致的0~100,使用三项指数对海南岛的生态环境进行对比。

图2展示了RSEI与IRSEI 2000—2020年的均值变化。从图2中可以看出,在2000—2020年,海南岛的RSEI与IRSEI的变化趋势一致,呈现先下降后上升再下降的变化趋势,总体呈上升趋势;海南岛整体IRSEI在各年份均大于0.71,说明海南岛整体生态环

表2 海南岛生态环境状况指数(EI)、遥感生态指数(RSEI)、改进遥感生态指数(IRSEI)的对比

年份Year	RSEI	IRSEI	EI
2010	67.15	72.26	73.62
2015	70.30	77.84	78.49

表1 不同年份7个生态指标的主成分分析结果

Table 1 Principal component analysis results of 7 ecological indicators in different years

年份Year	生态指标Ecological indicators	NDVI	LSM	NDBSI	LST	LUI	POP	Slope	特征值Eigenvalues	特征值贡献率Percent eigenvalue/%
2000	PC1	0.575	0.447	-0.192	-0.502	-0.232	-0.280	0.223	0.048	52.6
	PC2	0.456	0.086	-0.076	0.841	-0.173	-0.194	0.055	0.022	24.4
2005	PC1	0.598	0.465	-0.144	-0.486	-0.232	-0.262	0.218	0.052	55.2
	PC2	0.445	0.065	-0.054	0.844	-0.209	-0.192	0.035	0.021	22.5
2010	PC1	0.484	0.314	-0.136	-0.455	-0.286	-0.554	0.230	0.052	49.7
	PC2	0.519	0.095	-0.156	0.791	-0.171	-0.226	0.048	0.025	23.9
2015	PC1	0.533	0.484	-0.169	-0.335	-0.364	-0.407	0.205	0.051	46.9
	PC2	0.483	0.074	-0.122	0.788	-0.233	-0.247	0.070	0.027	24.7
2020	PC1	0.480	0.431	-0.160	-0.491	-0.357	-0.385	0.203	0.060	52.4
	PC2	0.445	0.087	-0.044	0.836	-0.285	-0.387	0.011	0.026	23.1

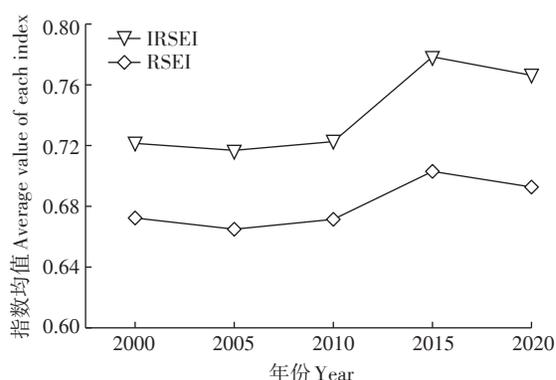


图2 2000—2020年RSEI与IRSEI均值变化  
Figure 2 The mean value changes of RSEI and IRSEI from 2000 to 2020

境质量较好;IRSEI在2005年最小,为0.717,在2015年达到最大,为0.778;RSEI从2000年的0.721上升至2020年的0.766,增加了6.24%。由表2可知,IRSEI比RSEI高,IRSEI更接近EI,表明IRSEI在海南岛应用具有准确性和优越性。

选择2005年的海南岛IRSEI与RSEI数据进行差异性分析,由图3可以看出,大部分区域IRSEI数据略高于RSEI数据,这些地区一般是土地利用强度较低的园地、林地、草地、湿地等生态系统,人口分布比较稀疏,环境质量较高,生态较稳定;IRSEI数据低于RSEI数据的区域多为城市带及其周边地区,一般分布在土地利用强度高的建设用地,还包括中部山区部分区域,这些地区坡度非常高,导致土壤稳定性与渗透能力减弱,进而影响植被生长,这符合人类活动降低生态质量的一般规律。综上,相较于RSEI,IRSEI提高了土地利用、人口分布与地形在海南岛生态环境质量评估中的表达能力。

### 2.2.2 代表性分析

表3展示了不同年份IRSEI与7项生态指标的平均

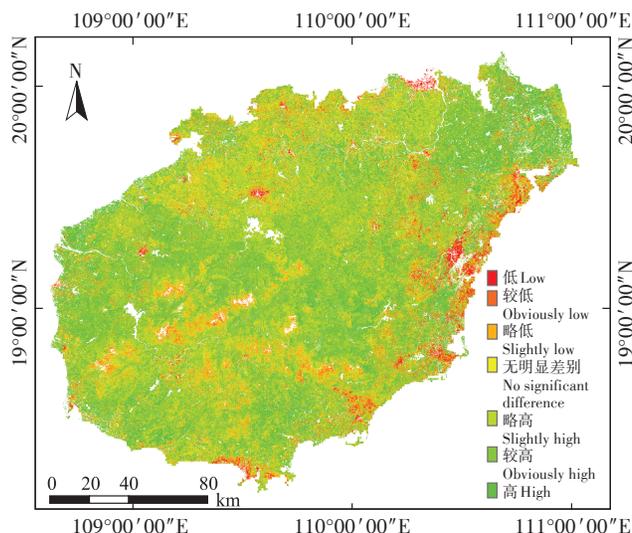


图3 2005年海南岛IRSEI和RSEI的空间差异分布  
Figure 3 Distribution of spatial differences between IRSEI and RSEI of Hainan Island in 2005

均相关度。可以看出,在各个生态指标中,NDVI的平均相关度在各个年份均最大,最大值出现在2000年,为0.68,5年平均相关度均值为0.66;IRSEI与各个生态指标在各年的平均相关度均在0.67以上,5年平均相关度均值为0.69,比单项指标中最大的NDVI高出3%,比各项指标合起来的5年平均相关度均值0.577高出11.3%。由此可见,IRSEI不仅集成了各项指数的信息,而且比每项单个指标的代表性都强,可以更加综合、准确、客观地反映海南岛生态环境质量状况。

### 2.3 生态环境质量时空变化

表4为海南岛不同时期生态环境质量等级的面积与比例,由于生成IRSEI时对水体进行掩膜处理,所以各期面积略有差异。

从表4中可以看出,在各个年份海南岛生态环境质量为良、优级别的总面积占比均超过89%,生态环境质量为差与较差的总面积占比均低于1.48%,海南

表3 不同年份IRSEI与各生态指标的平均相关度

Table 3 Average correlation between IRSEI and various ecological indicators in different years

年份 Year	NDVI	LSM	NDBSI	LST	LUI	POP	Slope	IRSEI
2000	0.68	0.56	0.65	0.62	0.57	0.56	0.42	0.7
2005	0.67	0.58	0.66	0.62	0.59	0.58	0.42	0.71
2010	0.65	0.56	0.61	0.55	0.60	0.60	0.40	0.67
2015	0.65	0.60	0.64	0.53	0.61	0.55	0.41	0.68
2020	0.65	0.60	0.64	0.58	0.63	0.57	0.42	0.69
均值 Mean	0.66	0.58	0.64	0.58	0.60	0.57	0.41	0.69

岛生态环境质量很好。2000、2005年与2010年,海南岛的生态环境质量级别分布情况大致相同,等级为优的土地占比最多,约为47%,其次是等级为良的土地,约为44%,等级为中的土地约占8%,等级为较差和差的土地占比极少,约为1%。2000—2010年,等级为优的面积先减少后增加,等级为中和较差的面积先增加后减少,等级为良和差的面积一直增加,各个等级变化较少,证明海南岛生态环境质量较为稳定。2010—2015年,海南岛生态环境质量级别发生变化,等级为优的面积大幅上升,升幅约50%,等级为良的面积大幅下降,降幅约50%,其他等级的土地面积变化较小,可见海南岛生态保护举措颇见成效,大量等级为良的土地生态环境质量得到提升。2015年与2020年的生态环境质量级别分布相似,等级为优的土地占据绝大部分比例,平均约占68%,其次为等级为良的土地,平均约占25%,等级为中的土地约占5%,等级为较差和差的面积占比约为1.3%。2015—2020年,等级为优、

中与较差的面积减少,等级为良和差的面积增加,其中等级为优、中、较差的土地减少面积与等级为良的土地增加面积相近,说明2015—2020年间海南岛IRSEI下降的原因是部分优等级的土地生态环境质量下降至良等级。综上所述,海南岛20年间生态环境质量有所提升,尤其是近10年间,等级为优的土地面积明显增加,但是近5年来海南岛生态环境质量有所降低,需要制定更科学的生态保护策略,更好地维护生态质量。

从空间上看(图4),海南岛中南部地区的生态环境质量高于东部、北部以及环岛地区。中南部地区生态环境质量等级主要为优,少部分等级为良和中,这些地区的土地利用以森林、灌木、园地、草地为主,生态环境质量很好;而在海南岛东部、北部地区生态环境质量等级主要为良与中,这些地区的土地利用以农田、园地、草地为主,生态环境质量较好;在海南岛环岛地区生态环境质量等级主要为良与中,还存在一些

表4 不同年份海南岛各等级IRSEI的面积与比例

Table 4 Areas and proportions of various grades of IRSEI in Hainan Island in different years

IRSEI等级 IRSEI level	2000		2005		2010		2015		2020	
	面积 Area/km <sup>2</sup>	比例 Proportion/%								
差	30.67	0.11	33.68	0.12	48.42	0.18	76.43	0.28	84.35	0.31
较差	230.47	0.85	270.26	1.00	230.99	0.86	322.55	1.20	230.65	0.86
中	2 154.00	7.95	2 457.44	9.06	2 001.60	7.42	1 575.84	5.85	1 320.74	4.91
良	11 688.02	43.14	11 777.74	43.44	12 041.12	44.61	5 995.84	22.28	7 793.24	28.98
优	12 990.53	47.95	12 577.22	46.38	12 667.03	46.93	18 946.69	70.39	17 464.10	64.94

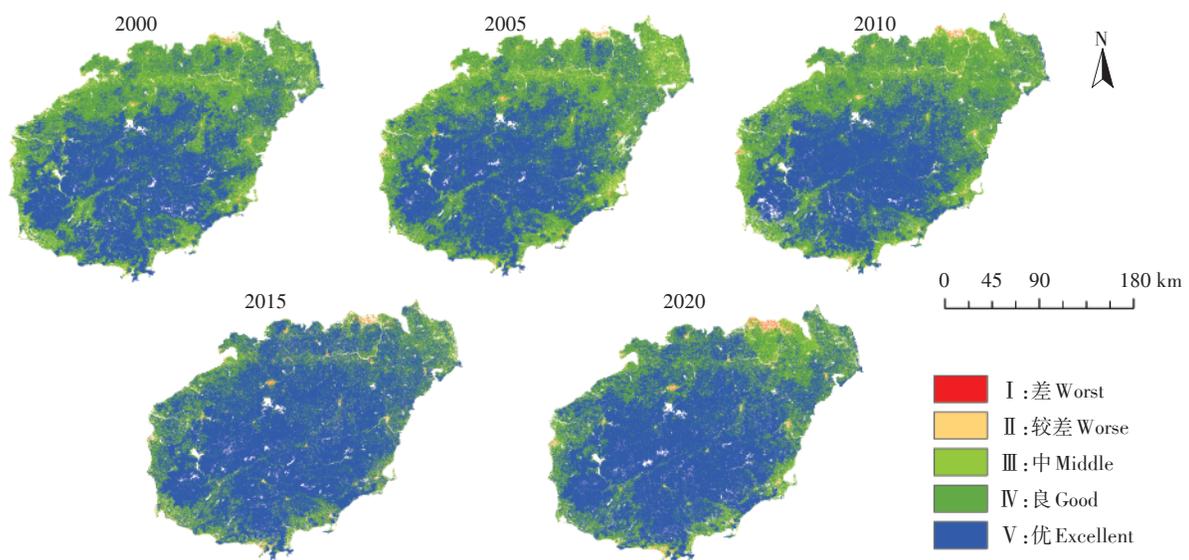


图4 2000—2020年海南岛生态环境质量分级

Figure 4 Hainan Island's ecological environment quality classification from 2000 to 2020

等级为较差与差的地区,这些地区的土地利用以农田、建设用地为主,生态环境质量相对较低,等级为较差与差的地区主要分布在城区周边。

#### 2.4 生态环境质量时空差异

为了分析2000—2020年间海南岛生态环境质量的变化情况,对各年份海南岛IRSEI值进行差值处理,并对处理结果进行分级统计。表5为20年间海南岛生态环境质量面积变化,分阶段来看,2000—2005年,海南岛生态环境质量有61.5%的面积基本不变,轻度变好和明显变好的比例为11.2%和6.4%,轻度变差和明显变差的比例为11.8%和9.1%,变差的比例高于变好的比例,但差距较小,说明海南岛生态环境质量在此期间略有下降;2005—2010年,有60.9%的面积基本不变,轻度变好和明显变好的比例为12.6%和9.4%,轻度变差和明显变差的比例为10.3%和6.8%,变差的面积小于变好的面积,两者差距也较小,说明海南岛生态环境质量在此期间略有上升;2000—2010年间海南岛生态环境质量先下降后上升,但变幅较小,生态系统稳定;2010—2015年间,海南岛生态环境质量以变好为主,达到56.9%,轻度变好和明显变好的比例分别为28.2%和28.7%,只有33.8%的面积基本不变,轻度变差和明显变差的比例为4.0%和5.3%,变好的面积远大于变差的面积,说明海南岛生态环境质量在此期间得到显著提升;2015—2020年间,有55.5%的面积基本不变,轻度变好和明显变好的比例为8.4%和7.9%,轻度变差和明显变差的比例为16.8%和11.4%,变差的比例高于变好的比例,但差距较小,说明海南岛生态环境质量在此期间略有下降。总体来说,在2000—2020年间,海南岛生态环境质量以变好为主,面积占比为47.5%,轻度变好和明显变好的比例为25.3%和22.2%,基本不变的比例为40.4%,轻度变差和明显变差的比例为5.4%和6.7%,说明海南岛20年来的生态环境质量得到显著提升。

从空间上来看(图5),2000—2005年,大部分地区生态环境质量未发生变化;海南岛生态环境质量恶化主要发生在东北部地区以及环岛城市带,变差区域集中分布在文昌市、琼海县、万宁市,在海南岛中部地区也有零星分布;生态环境质量好转主要发生在海南岛的北部、西南地区,变好区域集中分布在琼中县、白沙县、保亭县,在中部地区也有一些聚集分布。2005—2010年间,大部分地区生态环境质量未发生变化;海南岛生态环境质量恶化主要发生在北部地区以及西南环岛城市带,变差区域集中分布在海口市、三亚市、东方市;生态环境质量好转主要发生在海南岛的东北部、北部地区,变好区域集中分布文昌市、澄迈县、屯昌县。2010—2015年,大部分地区生态环境质量得到提升,主要分布在东部、北部地区;海南岛生态环境质量不变的区域主要在中部地区;生态环境质量变差的区域零星分布在东北部、西南沿海等建设用地地区。2015—2020年,大部分地区生态环境质量未发生变化;海南岛生态环境质量恶化主要发生在北部地区以及东部环岛城市带,变差区域集中分布在海口市、琼海县;生态环境质量好转主要发生在海南岛的东北部、西南部地区,变好区域集中分布在文昌市、乐东县。总的来看,2000—2020年间大部分地区生态环境质量发生好转,生态环境质量不变的区域主要分布在中部山区,生态系统较为稳定,生态环境质量恶化的区域主要分布在以建设用地和耕地为主的环岛沿海城市带,受人类活动影响较大的区域生态环境质量降低的概率更大。

#### 2.5 IRSEI变化成因

为了分析各年份IRSEI的变化原因,利用回归分析方法<sup>[14]</sup>,对研究区进行随机采样,在研究区生成30 000个随机点,并根据水体掩膜剔除无效采样点,提取每个采样点的7项指标与IRSEI值,以IRSEI为因变量,7项指标为自变量构建回归模型如下:

$$I_{IRSEI} = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3 + a_4 x_4 + a_5 x_5 + a_6 x_6 + a_7 x_7 \quad (3)$$

表5 2000—2020年海南岛生态环境质量面积变化

Table 5 Changes in the quality of Hainan Island's ecological environment from 2000 to 2020

变化级别 Change level	2000—2005		2005—2010		2010—2015		2015—2020		2000—2020	
	面积 Area/km <sup>2</sup>	比例 Proportion/%								
明显变差	2 380.98	9.1	1 785.09	6.8	1 383.44	5.3	2 961.26	11.4	1 740.35	6.7
轻度变差	3 101.07	11.8	2 696.58	10.3	1 050.67	4.0	4 378.70	16.8	1 383.72	5.4
基本不变	1 6141.7	61.5	15 951.25	60.9	8 789.93	33.8	14 448.71	55.5	10 447.57	40.4
轻度变好	2 940.18	11.2	3 292.98	12.6	7 336.47	28.2	2 186.37	8.4	6 537.44	25.3
明显变好	1 665.02	6.4	2 457.19	9.4	7 458.72	28.7	2 061.80	7.9	5 740.56	22.2

式中: $x_1$ 、 $x_2$ 、 $x_3$ 、 $x_4$ 、 $x_5$ 、 $x_6$ 、 $x_7$ 分别代表NDVI、LSM、NDBSI、LST、LUI、POP、Slope的值;表6展示了各年份回归模型系数值和决定系数值。

从表6可知,各个方程的 $R^2$ 均为1,表现出极好的拟合性。NDVI、LSM、Slope为正向指标,NDBSI、LST、LUI、POP为负向指标。在正向指标中,各个年份NDVI的贡献度均最高,说明海南岛植被覆盖对生态环境质量的提升至关重要,LSM相对较弱,Slope贡献度最低,NDVI与LSM对生态质量升高起主导作用;在负向指标中,各指标贡献度的绝对值大小排序依次为POP>LUI>NDBSI>LST,其中POP和LUI的贡献度最高,远高于NDBSI和LST,说明土地利用与人类活动限制了生态环境质量的提升,POP与LUI对生态质量降低起主导作用。由于本次评估的对象是整个海南岛的生态环境质量,大部分地区不属于城市区域,所以NDBSI与LST的贡献度较低。

近年来,NDVI、LSM的贡献度有所降低,LUI、

POP的贡献度绝对值明显升高,说明土地利用与人类活动对生态环境质量的干扰程度越来越大。

图6展示了海南省各生态指数20年来的归一化值,由回归模型可以看出,在2000—2020年间,NDVI、LSM、LUI与POP均呈现升趋势,NDVI和LSM对IRSEI的正向贡献率高于LUI和POP的负向贡献率,因此虽然NDVI和LSM的升幅略小于LUI和POP,但是海南岛整体IRSEI得到提升。从表6中可以看出,在2015—2020年间,由于人类活动对自然环境影响作用越来越大,LUI和POP的负向贡献率急速升高,NDVI与LSM的正向贡献率急速降低,且LSM和NDVI呈现下降趋势,LUI和POP绝对值持续升高,说明2015—2020年间生态环境质量降低。因此,要稳定优化海南岛生态环境质量,应实施严格有效的政策来控制建设用地扩张,继续推进植树造林活动,持续改善海南岛植被覆盖状况;减少城市不透水层材料的使用;开发新型灌溉技术,增加土壤湿度。

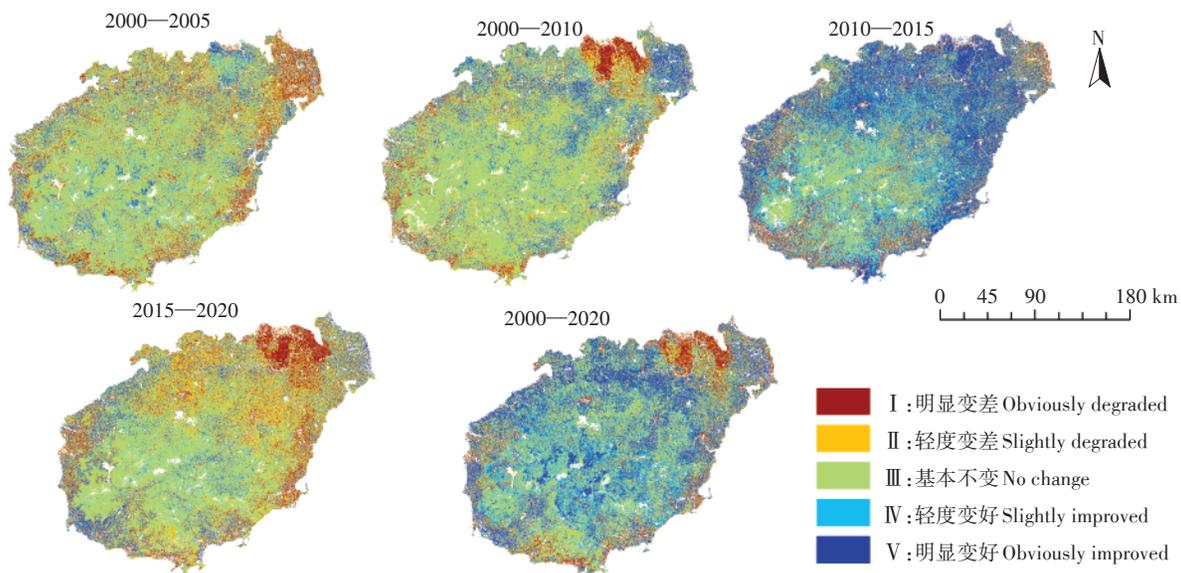


图5 2000—2020年海南岛生态环境质量空间变化

Figure 5 Spatial changes of Hainan Island's ecological environment quality from 2000 to 2020

表6 各年份回归模型系数

Table 6 Regression model coefficients in different years

年份Year	$a_0$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	$a_6$	$a_7$	$R^2$
2000	0.403	0.341	0.211	-0.099	-0.049	-0.136	-0.161	0.108	1
2005	0.386	0.344	0.217	-0.073	-0.063	-0.14	-0.15	0.103	1
2010	0.420	0.311	0.234	-0.089	-0.073	-0.136	-0.168	0.099	1
2015	0.314	0.346	0.333	-0.110	-0.013	-0.164	-0.086	0.079	1
2020	0.539	0.251	0.200	-0.077	-0.052	-0.206	-0.237	0.085	1

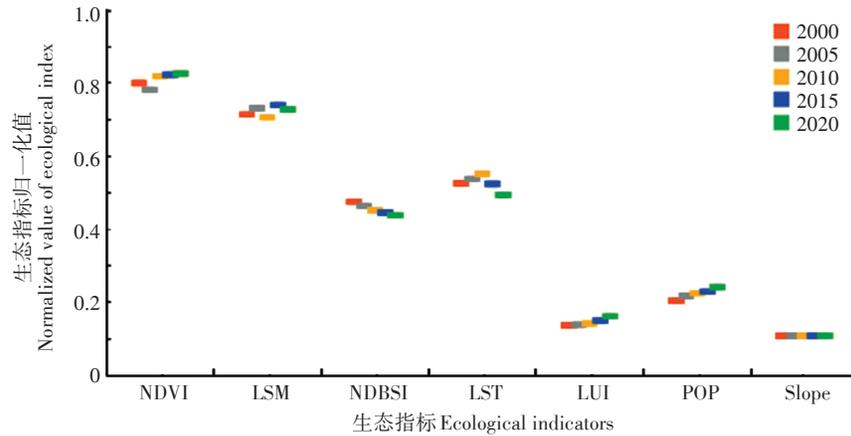


图6 2000—2020年海南岛生态指数归一化值

Figure 6 The normalized value of Hainan Island's ecological index from 2000 to 2020

### 3 结论

本研究以海南岛为研究区,提出改进遥感生态指数(IRSEI),融合绿度、干度、湿度、热度、土地利用、人口分布与地形地貌指标,构建了适用于海南岛的生态环境质量评估体系,改善了遥感生态指数(RSEI)在大型海岛的应用。研究结论如下:

(1)IRSEI前两个主成分的贡献率约为70%,集成了绝大部分有效信息。绿度指标、湿度指标、地形指标对生态环境质量起积极的促进作用,干度指标、热度指标、土地利用指标、人口分布指标对生态环境质量具有消极的负面作用。相较于RSEI,IRSEI指数综合考虑人类活动与自然生态的影响,更能准确反映大型海岛地区的生态环境质量。

(2)海南岛在2000—2020年间的生态环境质量呈现“下降—上升—下降”的波段趋势,整体呈上升趋势;总体来看,海南岛生态环境质量较高,等级为优的土地占比最高,在2015年之后整体生态环境质量提升为优等级。由于海南省大部分地区主要分布有土地利用强度较低的森林、草地等生态系统,这些区域生态环境质量更易得到提升;生态环境质量恶化的区域主要分布在土地利用强度较高、以建设用地和耕地为主的环岛沿海城市带。

(3)植被覆盖度和湿度的提高是海南岛20年来整体生态环境质量提升的主要原因,土地利用强度和人口聚集程度的提升是海南岛局部生态环境质量下降的主要原因。

#### 参考文献:

[1] LIAO W, JIANG W. Evaluation of the spatiotemporal variations in the

eco-environmental quality in China based on the remote sensing ecological index[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(15):2462.

[2] XU H, WANG Y, GUAN H, et al. Detecting ecological changes with a remote sensing based ecological index (RSEI) produced time series and change vector analysis[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(20):2345.

[3] 蒋超亮, 吴玲, 刘丹, 等. 干旱荒漠区生态环境质量遥感动态监测——以古尔班通古特沙漠为例[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(3): 877-883. JIANG C L, WU L, LIU D, et al. Dynamic monitoring of eco-environmental quality in arid desert area by remote sensing: Taking the Gurbantunggut Desert China as an example[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(3): 877-883.

[4] 环境保护部. 生态环境状况评价技术规范: HJ 192—2015[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2015. Ministry of Environmental Protection. Technical specifications for ecological environment assessment: HJ 192—2015[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2015.

[5] 刘盼, 任春颖, 王宗明, 等. 南瓮河自然保护区生态环境质量遥感评价[J]. *应用生态学报*, 2018, 29(10): 3347-3356. LIU P, REN C Y, WANG Z M, et al. Assessment of the eco-environmental quality in the Nanweng River nature reserve, northeast China by remote sensing[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(10): 3347-3356.

[6] 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 H Q. A remote sensing urban ecological index and its application[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(24): 7853-7862.

[7] HU X, XU H Q. A new remote sensing index based on the pressure-state-response framework to assess regional ecological change[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, 26(6): 5381-5393.

[8] 农兰萍, 王金亮. 基于RSEI模型的昆明市生态环境质量动态监测[J]. *生态学杂志*, 2020, 39(6): 2042-2050. NONG L P, WANG J L. Dynamic monitoring of ecological environment quality in Kunming based on RSEI model[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2020, 39(6): 2042-2050.

[9] 吴可人, 高祺, 王让会, 等. 基于RSEI模型的石家庄生态环境质量评价[J]. *地球物理学进展*, 2021, 36(3): 968-976. WU K R, GAO Q, WANG R H, et al. Evaluation of ecological environment quality in

- Shijiazhuang based on RSEI model[J]. *Progress in Geophysics*, 2021, 36(3):968-976.
- [10] GAO P, KASIMU A, ZHAO Y, et al. Evaluation of the temporal and spatial changes of ecological quality in the Hami oasis based on RSEI[J]. *Sustainability*, 2020, 12(18):7716.
- [11] JI J, WANG S, ZHOU Y, et al. Spatiotemporal change and landscape pattern variation of eco-environmental quality in Jing-Jin-Ji urban agglomeration from 2001 to 2015[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 125534-125548.
- [12] 缪鑫辉, 梁勤欧. 基于遥感生态指数的甬江流域生态环境变化分析[J]. *长江流域资源与环境*, 2021, 30(2):427-438. MIAO X H, LIANG Q O. Analysis of ecological environment changes in Yongjiang River basin based on remote sensing ecological index[J]. *Resources and Environment in the Yangtze River Basin*, 2021, 30(2):427-438.
- [13] 宋美杰, 罗艳云, 段利民. 基于改进遥感生态指数模型的锡林郭勒草原生态环境评价[J]. *干旱区研究*, 2019, 36(6):1521-1527. SONG M J, LUO Y Y, DUAN L M. Evaluation of ecological environment in the Xilin Gol steppe based on modified remote sensing ecological index model[J]. *Arid Zone Research*, 2019, 36(6):1521-1527.
- [14] 程琳琳, 王振威, 田素锋, 等. 基于改进的遥感生态指数的北京市门头沟区生态环境质量评价[J]. *生态学杂志*, 2021, 40(4):1177-1185. CHENG L L, WANG Z W, TIAN S F, et al. Evaluation of eco-environmental quality in Mentougou District of Beijing based on improved remote sensing ecological index[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2021, 40(4):1177-1185.
- [15] 王杰, 马佳丽, 解斐斐, 等. 干旱地区遥感生态指数的改进——以乌兰布和沙漠为例[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(11):3795-3804. WANG J, MA J L, XIE F F, et al. Improvement of remote sensing ecological index in arid regions: Taking Ulan Buh Desert as an example. [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(11):3795-3804.
- [16] 李洋. 基于多要素的海岛型城市生态状况评价——以平潭综合实验区为例[D]. 福州: 福州大学, 2017. LI Y. Evaluation of island city's ecological status based on multiple elements: A case study of Pingtan comprehensive experimentation zone, Fujian Province[D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2017.
- [17] SUN R, WU Z, CHEN B, et al. Effects of land-use change on eco-environmental quality in Hainan Island, China[J]. *Ecological Indicators*, 2020, 109:105777.
- [18] 孙瑞, 吴志祥, 陈帮乾, 等. 1959—2013年海南岛降水事件变化特征[J]. *热带作物学报*, 2017, 38(11):2176-2182. SUN R, WU Z X, CHEN B Q, et al. Change features of precipitation events in Hainan Island from 1959 to 2013[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2017, 38(11):2176-2182.
- [19] 王树东, 张立福, 陈小平, 等. 基于Landsat TM的热带精细地物信息提取的模型与方法——以海南岛为例[J]. *生态学报*, 2012, 32(22):7036-7044. WANG S D, ZHANG L F, CHEN X P, et al. Models and methods for information extraction of complex ground objects based on Landsat TM images of Hainan Island, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(22):7036-7044.
- [20] 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(5):589-595. XU H Q. A study on information extraction of water body with the modified normalized difference water index (MNDWI)[J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2005(5):589-595.
- [21] YUE H, LIU Y, LI Y, et al. Eco-environmental quality assessment in China's 35 major cities based on remote sensing ecological index[J]. *IEEE Access*, 2019, 7:51295-51311.
- [22] SHAN W, JIN X, REN J, et al. Ecological environment quality assessment based on remote sensing data for land consolidation[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 239:118126.
- [23] 刘宇, 齐建伟, 卢宏钟, 等. 青岛市生态环境变化遥感监测与分析[J]. *测绘通报*, 2020(9):60-65. LIU Y, QI J W, LU H Z, et al. Monitoring and analysis of the change of ecological environment in Qingdao based on remote sensing technologies[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2020(9):60-65.
- [24] 钟欣呈, 许泉立. 基于RSEI模型的玉溪市生态环境变化监测与评价[J]. *水土保持研究*, 2021, 28(4):350-357. ZHONG X C, XU Q L. Monitoring and evaluation of ecological environment changes in Yuxi City based on RSEI model[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2021, 28(4):350-357.
- [25] 单薇, 金晓斌, 孟宪素, 等. 基于多源遥感数据的土地整治生态环境质量动态监测[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(1):234-242. SHAN W, JIN X B, MENG X S, et al. Dynamical monitoring of ecological environment quality of land consolidation based on multi-source remote sensing data[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(1):234-242.
- [26] 刘睿, 周李磊, 彭瑶, 等. 三峡库区重庆段人类活动时空分布及其类型演变特征[J]. *重庆师范大学学报(自然科学版)*, 2016, 33(4):47-56, 230. LIU R, ZHOU L L, PENG Y, et al. Spatio-temporal variations and type evolution of human activity in Three Gorges Reservoir area of Chongqing[J]. *Journal of Chongqing Normal University (Natural Science Edition)*, 2016, 33(4):47-56, 230.
- [27] 徐勇, 孙晓一, 汤青. 陆地表层人类活动强度:概念、方法及应用[J]. *地理学报*, 2015, 70(7):1068-1079. XU Y, SUN X Y, TANG Q. Human activity intensity of land surface: Concept, method and application in China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(7):1068-1079.
- [28] 杭鑫, 罗晓春, 曹云, 等. 基于RSEI模型的生态质量评估及城镇化影响——以南京市为例[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(1):219-229. HANG X, LUO X C, CAO Y, et al. Ecological quality assessment and the impact of urbanization based on RSEI model for Nanjing, Jiangsu Province, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(1):219-229.