

doi: 10.6046/zrzyyg.2022398

引用格式: 王静,王佳,徐江琪,等.改进遥感生态指数的典型海岸带城市生态环境质量评价——以湛江市为例[J].自然资源遥感,2023,35(3):43-52.(Wang J,Wang J,Xu J Q,et al.Exploring ecological environment quality of typical coastal cities based on an improved remote sensing ecological index:A case study of Zhanjiang City[J].Remote Sensing for Natural Resources,2023,35(3):43-52.)

改进遥感生态指数的典型海岸带城市生态环境质量评价 ——以湛江市为例

王静^{1,2},王佳^{1,2},徐江琪^{1,2},黄邵东^{1,2},刘东云³

(1.北京林业大学精准林业北京市重点实验室,北京 100091;2.北京林业大学林学院,北京 100091;3.北京林业大学园林学院,北京 100091)

摘要:随着湛江市城镇化的发展,湛江市生态用地面积减少,生态环境恶化。因此,快速、全面及准确地定量监测湛江市生态环境质量变化具有重要意义。选用2000年、2005年、2009年、2015年、2020年Landsat系列卫星影像,选取绿度、湿度、干度、热度、土地利用与人口分布6项指标,构建改进遥感生态指数(improved remote sensing ecological index,IRSEI),定量分析湛江市2000—2020年间生态环境质量变化。研究表明:2000年、2005年、2009年、2015年与2020年IRSEI指数均值分别为0.18,0.18,0.35,0.42和0.38,呈先升后降的变化趋势;对2000—2020年间IRSEI进行差值处理,研究区生态环境变化“明显变好”、“轻度变好”、“基本不变”、“轻度变差”、“明显变差”的面积占比分别为78.95%,8.70%,8.01%,1.35%和2.99%,以“明显变好”为主;IRSEI指数可以较好地反映出2000—2020年间海岸带城区环境较差的现象,具体表现为海岸带区域的建筑用地IRSEI指数较低,研究结果将为湛江市生态环境保护提供理论基础和科学依据。

关键词:生态环境质量;海岸带;改进遥感生态指数

中图分类号: TP 79 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-034X(2023)03-0043-10

0 引言

湛江市作为海岸带城市,受淡、咸水及陆地和海洋交互作用,因此,湛江市具有生物多样性丰富以及湿地类型复杂多样的特点,如红树林湿地和滩涂湿地等^[1-3]。然而,伴随着社会经济与城镇化进程的发展,越来越频繁的填海工程对沿海区域的生态环境造成了一定的破坏,导致部分沿海区域成为典型的生态脆弱区和敏感区,造成了生境破坏、资源减少和景观退化等问题。因此,对湛江市生态环境质量的时空变化进行监测,为后续海岸带城市生态发展策略制定具有一定重要作用。

目前,监测生态环境质量的研究方法主要有生态环境状况指数(eco-environment index,EI)与遥感生态指数(remote sensing environment index,RSEI)。前者统计数据较难获取,生态指标权重的

赋予较为主观^[4],后者计算较为简单,数据源获取更为容易,能够客观反映研究区域生态环境质量^[5]。因此,RSEI在多种场景中得到了广泛的应用^[6-10]。学者们根据研究区域的地理环境变化,如:城市、乡村、森林、湿地、海岛、沙漠、黄土地、矿区等,提出修正的遥感生态指数(modified remote sensing ecological index,MRSEI)、改进遥感生态指数(improved remote sensing ecological index,IRSEI)及增强遥感生态指数(enhanced remote sensing ecological index,ERSEI)等适应不同地理环境的改进版RSEI模型^[11-17]。但是,目前国内外鲜有针对海岸带区域的IRSEI模型。由于不同地理环境的生态特性具有明显差异,海岸带位于海陆系统交界处,具有其自身的独特性^[18]。因此,本研究根据自身的生态特性,构建IRSEI。从而准确、全面地评估湛江市生态环境质量。

收稿日期:2022-10-18;修订日期:2023-02-27

基金项目:国家自然科学基金项目“融合多源数据的京津冀地区植被NPP对气候变化和人类活动的响应与多情景模拟”(编号:42171329)和“基于夜间灯光遥感数据的京津冀地区人口PM2.5暴露时空分异及风险评价”(编号:42071342)共同资助。

第一作者:王静(1998-),女,硕士研究生,主要从事遥感大数据在城市生态环境监测中的应用研究。Email:wj15023631023@163.com。

通信作者:刘东云(1976-),男,博士,副教授,主要从事生态规划设计与可持续环境技术研究。Email:987557055@qq.com。

利用谷歌地球云平台(Google Earth Engine, GEE),获取2000年、2005年、2009年、2015年和2020年的Landsat遥感影像。根据湛江市地理环境,构建适宜湛江市生态格局评估的IRSEI,即在绿度、湿度、干度和热度4个经典指标的基础上,引入土地利用指标(land use index, LUI)、人口分布(population, POP)指标。利用ENVI 5.3和ArcGIS 10.8平台对湛江市生态环境质量进行定量分析与监测。

1 研究区概况与数据源

1.1 研究区概况

以湛江市为研究区,其地理坐标为 $N20^{\circ}13' \sim 21^{\circ}57'$, $E109^{\circ}40' \sim 110^{\circ}58'$ 之间,区域整体呈狭长型,陆地大部分由半岛和岛屿组成,其中东海岛为中国第五大岛屿。海岸线长达1 556 km,市区所辖面积约13 225 km^2 。西临北部湾,东与茂名市相连,南滨邻南海。其位于广西、广东与海南三省区交汇处。共辖4个区、3个县级市和2个县(图1)。该地区为热带北缘季风气候,主要受海洋气候的调节,年平均气温在 $22.7 \sim 23.5^{\circ}C$,10月—次年3月为干季,4—9月为湿季。湛江市地形主要为平原,较少部分滨海区域为台地。地势大致为东西两侧低而南北高,坡度为 $1^{\circ} \sim 4^{\circ}$,较为平缓。湛江市存在大面积的滩涂湿地,同时拥有中国红树林分布最集中、种类最多、面积最大的红树林湿地自然保护区,总面积约20 278.8 km^2 ^[19]。

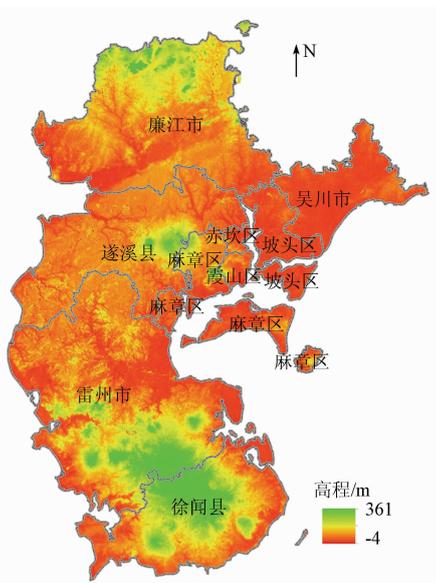


图1 研究区地理位置

Fig.1 Location of study area

1.2 数据源及其预处理

湛江市遥感影像由于云层影响质量较差,因此,

需要将多景影像进行去云/云影之后再行拼接以获取完整覆盖研究区的无云影像。本文基于GEE平台,获取湛江市范围2000年5月—2009年9月的Landsat5和2015年5月—2020年9月的Landsat8地表反射率数据集。并进行最小云量影像合成,去除有云/云影像元,以无云像元合成目标年份影像。具体数据来源如表1所示。

表1 数据来源

Tab.1 Data sources

数据类型	空间分辨率/m	数据来源
Landsat5 SR	30	GEE
Landsat8 SR	30	GEE
土地利用类型	30	武汉大学黄昕团队研究的产品数据(earth system science data) ^[20]
人口分布	100	南安普大学Worldpop研究小组的产品数据(open data for spatial demography) ^[21]
行政区矢量边界	30	地理国情监测平台(http://www.dsac.cn)

2 研究方法

根据研究区海岸带的地理环境特点,在经典RSEI的4个指标基础上,增加了LUI和POP。构建基于6个指标的IRSEI模型对湛江市生态环境质量进行评估与分析。技术路线如图2所示。

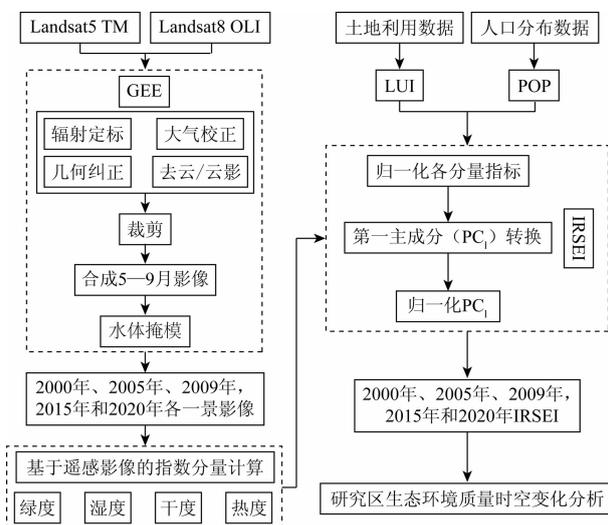


图2 研究技术路线

Fig.2 Flow chart of research technology

2.1 绿度指标

选取归一化差异植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)作为绿度指标,用于定量地反映植被生长状况、植被覆盖度及生物量等信息^[22],是生态环境质量变化研究中的重要指标。其计算公式为:

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

式中: Landsat5 遥感数据中 ρ_{NIR} 和 ρ_{Red} 分别为第4和第3波段反射率; Landsat8 遥感数据中 ρ_{NIR} 和 ρ_{Red} 分别为第5和第4波段反射率。

2.2 湿度指标

所用湿度指标为通过缨帽变换获取的 WET 分量。WET 分量与环境水体、土壤、植被中的湿度相关,能够很好地反映生态环境质量状况^[23],不同卫星传感器的表达方式不同^[24],本研究选用的计算公式分别为:

$$WET_{TM} = 0.0315\rho_{Blue} + 0.2021\rho_{Green} + 0.3102\rho_{Red} + 0.1594\rho_{NIR} - 0.6806\rho_{SWIR1} - 0.6109\rho_{SWIR2}, \quad (2)$$

$$WET_{OLI} = 0.1511\rho_{Blue} + 0.1973\rho_{Green} + 0.3283\rho_{Red} + 0.3407\rho_{NIR} - 0.7117\rho_{SWIR1} - 0.4559\rho_{SWIR2}, \quad (3)$$

式中: WET_{TM} 为 Landsat5 遥感卫星的湿度指标; WET_{OLI} 为 Landsat8 遥感卫星的湿度指标; ρ_{Blue} , ρ_{Green} , ρ_{SWIR1} , ρ_{SWIR2} 分别为 Landsat5 中第1,2,5,7波段反射率和 Landsat8 中第2,3,6,7波段反射率。

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

$$SI = [(\rho_{SWIR1} + \rho_{Red}) - (\rho_{NIR} + \rho_{Blue})] / [(\rho_{SWIR1} + \rho_{Red}) + (\rho_{NIR} + \rho_{Blue})]. \quad (9)$$

2.5 LUI

土地利用能够反映人类经济社会活动对陆地表层资源与自然环境的影响,是人与自然相互作用的结果^[27]。本研究引入土地利用/覆被类型的建设用地当量系数 (conversion index of construction land equivalent, CI), 来定量反映人类活动对陆地表层的作用,参照徐勇等^[28]引入各地类当量系数。

2.6 POP

POP(人/km² × 100)反映人类活动对生态环境质量变化的影响。POP 指在一定时间内人口数量在该区域的空间分布状况。其计算公式为:

$$POP = Q / (100 \times 100), \quad (10)$$

式中 Q 为 0.01 km² 内的人口数量。湛江市近 20 a 间人口数量增长迅速,人口空间分布数量从某种程度上反映出人类活动对生态环境质量的影响。因此,本研究将 POP 作为 IRSEI 评价中的一个因子。

2.7 IRSEI

本研究采用主成分分析 (principal component analysis, PCA) 法构建 IRSEI。此方法将 6 项单一指

2.3 热度指标

选取地表温度 (land surface temperature, LST) 代表热度指标,通过 Landsat 遥感数据的热红外波段的辐射值和最新修订的定标参数^[25],本研究选用的计算公式为:

$$LST = T / [1 + (R T/p) \ln H], \quad (4)$$

$$T = K2 / \ln(K1/L6 + 1), \quad (5)$$

$$L6 = gain DN + bias, \quad (6)$$

式中: T 为传感器的温度值; R 为热红外波段的中心波长 ($R_{TM} = 11.435 \mu\text{m}$, $R_{OLI} = 10.9 \mu\text{m}$); p 为 $1.438 \times 10^{-2} \text{ mK}$; H 为地表比辐射率; $K1$ 和 $K2$ 分别为定标参数; $L6$ 为热红外波段的辐射值; $gain$, DN 和 $bias$ 分别为热红外波段的增益值、像元灰度值和偏置值,可从遥感影像头文件中获得。

2.4 干度指标

选用土壤指数 (soil index, SI) 和建筑物指数 (index-based built-up index, IBI) 组合代表干度指标 $NDBSI$ ^[26],由于研究区域存在的部分滩涂裸地会造成地表干化,因此需要将 2 个指数组合,其计算公式为:

$$NDBSI = (IBI + SI) / 2, \quad (7)$$

标耦合成一项综合指数,把主要信息集中到第一主成分分量 (PC_1) 上,使得 IRSEI 能够综合 6 项指标信息。采用 PCA 法的优点就是指标权重较为客观,避免因因人而异、因方法而异的权重设定造成的结果偏差。

由于 6 个指标的量纲不统一,因此,在 PCA 之前,必须对 6 个指标分别进行归一化处理^[29],计算公式为:

$$P_N = (P - P_{min}) / (P_{max} - P_{min}), \quad (11)$$

式中: P_N 为归一化后的指标值; P 为归一化前指标的数值; P_{min} 和 P_{max} 分别为归一化前指标的最小值和最大值。

对指标进行 PCA 之前,采用改进的归一化水体指数 (modified normalized difference water index, MNDWI) 对湛江市水体进行掩模处理^[22],避免因水体对 WET 分量权重造成影响,进而影响 PCA 的载荷值分布。将 6 个指标叠加合成为一幅新图层,然后对新图层进行 PCA,得到 PC_1 值。

为使生态环境越好 PC_1 值越大,用 1 减去

$PC_1^{[30]}$, 获得初始生态指数 $IRSEI_0$, 即

$$IRSEI_0 = 1 - \{PC_1[f(NDVI, WET, LST, NDBSI, LUI, POP)]\} \quad (12)$$

为了便于指标间的比较和度量, 同样对 $IRSEI_0$ 进行归一化处理, 即

$$IRSEI = (IRSEI_0 - IRSEI_{0min}) / (IRSEI_{0max} - IRSEI_{0min}) \quad (13)$$

式中 $IRSEI_{0max}$ 和 $IRSEI_{0min}$ 分别为归一化前指标的最大值和最小值。 $IRSEI$ 值介于 $[0, 1]$ 之间, 其值越

接近 1, 表明生态环境的质量越好, 反之, 表明生态环境的质量越差。

参照相关技术规定^[22], 将归一化处理后的 5 期 $IRSEI$ 进行分级处理与差值分析。

3 结果与分析

3.1 各年份生态指数分析

3.1.1 各年份生态指数 PCA

各年份各指标 PCA 结果如表 2 所示。

表 2 各年份各指标 PCA 结果

Tab. 2 Results of PCA of each index in each year

年份	主成分分量	NDVI	WET	NDBSI	LST	LUI	POP	特征值	特征值贡献率
2000 年	PC_1	0.530	0.229	-0.204	-0.777	-0.002	-0.149	0.517 2	0.887
	PC_2	-0.472	-0.096	0.131	-0.224	0.007	-0.837	0.049 0	0.084
	PC_3	-0.544	-0.137	-0.729	-0.274	-0.006	0.281	0.010 2	0.017
2005 年	PC_1	0.495	0.232	-0.225	-0.795	-0.001	-0.136	0.571 6	0.895
	PC_2	-0.573	-0.109	0.127	-0.297	0.005	-0.745	0.049 1	0.077
	PC_3	-0.520	-0.118	-0.723	-0.219	-0.006	0.381	0.010 8	0.017
2009 年	PC_1	0.517	0.241	-0.074	-0.171	-0.580	-0.551	0.551 4	0.868
	PC_2	0.463	0.130	0.387	0.113	0.298	0.719	0.061 6	0.097
	PC_3	0.528	0.217	-0.536	-0.255	-0.540	0.173	0.011 0	0.017
2015 年	PC_1	0.444	0.327	-0.250	-0.790	-0.091	-0.002	0.244 6	0.744
	PC_2	0.327	-0.214	-0.053	-0.151	-0.906	0.027	0.052 8	0.161
	PC_3	0.619	-0.398	-0.217	-0.492	0.412	-0.013	0.021 4	0.065
2020 年	PC_1	0.444	0.310	-0.738	-0.231	-0.330	-0.012	0.241 3	0.753
	PC_2	0.206	0.170	-0.221	-0.018	0.939	0.001	0.052 5	0.164
	PC_3	0.516	-0.041	0.291	-0.953	0.046	-0.002	0.021 7	0.068

表 2 展示了 2000—2020 年 6 项生态指标在不同主成分中的载荷以及各指标的特征贡献率。从表 2 中可以看出: 各年份 PC_1 特征值贡献率均超过 70%, 说明 6 项指标的特征信息基本集中于 PC_1 。在 PC_1 中, 6 项指数对 PC_1 的载荷大小规律性明显, $NDVI$ 与 WET 在 PC_1 中的载荷值为正, 对生态环境质量产生积极影响; 而 $NDBSI, LST, LUI$ 及 POP 在 PC_1 中的载荷值为负, 对生态环境质量产生负面影响。这一结果基本符合实际情况。因此, 本研究使用 PC_1 作为构建 $IRSEI$ 的基础。

3.1.2 遥感生态指数变化分析

表 3 展示了各年份 6 个指标与 $IRSEI$ 的平均相关度及 $IRSEI$ 平均值。由表 3 可知, 2000—2020 年间, $IRSEI$ 值从 0.18 上升到 0.38, 上升了 111%。其中, 2000—2005 年间, $IRSEI$ 指数未发生变化, 2005—2009 年间, $IRSEI$ 指数上升 94%, 2009—2015 年间, $IRSEI$ 指数上升了 20%, 2015—2020 年间, $IRSEI$ 指数下降了 9%。从 6 个生态指标中看, WET 与 $IRSEI$ 的平均相关度最高, 为 0.68; POP 指标与

$IRSEI$ 的平均相关度较低, 为 0.19。

表 3 不同年份 $IRSEI$ 均值及 $IRSEI$ 与各指标的平均相关度

Tab. 3 Mean value of $IRSEI$ and mean correlation between $IRSEI$ and each index in different years

年份	NDVI	WET	NDBSI	LST	LUI	POP	$IRSEI$ 均值
2000 年	0.72	0.75	0.73	0.75	0.53	0.20	0.18
2005 年	0.71	0.75	0.73	0.74	0.53	0.21	0.18
2009 年	0.74	0.75	0.75	0.74	0.57	0.21	0.35
2015 年	0.55	0.57	0.55	0.16	0.42	0.17	0.42
2020 年	0.59	0.56	0.54	0.15	0.43	0.17	0.38
均值	0.66	0.68	0.66	0.51	0.50	0.19	0.30

2000—2020 年湛江市 $IRSEI$ 时空分布如图 3 所示。由图 3 可知, 2000—2020 年 5 期湛江市 $IRSEI$ 值空间分布较为相似, 生态环境较差的区域主要分布在湛江市北部地区、西南沿海区域与中部偏东区域, 生态环境较好的区域主要分布在湛江市中部与东南地区。总体而言, 湛江市中部地区的生态环境质量高于西南与西北地区。

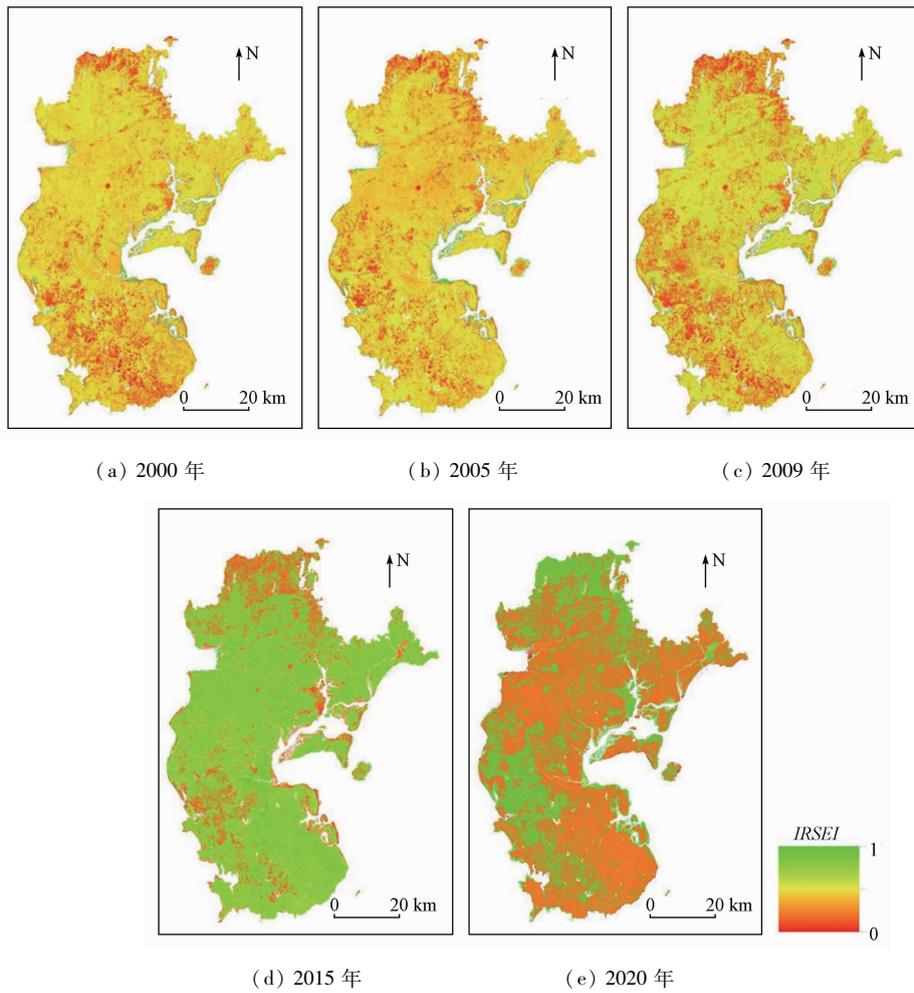


图3 2000—2020年IRSEI时空分布

Fig. 3 Spatial and temporal distribution of IRSEI from 2000 to 2020

3.1.3 IRSEI 分级

表4展示了湛江市5期生态环境质量等级的面积与比例。2000年与2005年,湛江市的生态环境质量级别分布情况较为相似,等级为差和较差的生态环境面积占比最高。2000年湛江市等级为较差与差的生态环境占比与分别为49.95%与48.28%,后续依次是等级为中、优和良的生态环境面积占比,分别为1.04%,0.52%和0.21%。2005年湛江市等级为差的生态环境面积占比最高,约为65.48%,

其次是等级为差的生态环境占比约32.72%。2009年和2015年的生态环境质量等级分布较为相似,等级为中的生态环境占比超过65%,等级为优和良的占比最小,在1%左右。2020年湛江市等级为中的生态环境占比最高,为68.69%,其次是等级为差,为30.79%,其余占比均小于1%。综上所述,湛江市2009年和2015年生态面积整体较好,等级为中、良和优的生态环境面积占比较大。

表4 各年份不同等级IRSEI的面积与比例

Tab. 4 Area and proportion of IRSEI of each grade in each year

等级	2000年		2005年		2009年		2015年		2020年	
	面积/km ²	比例/%								
差[0,0.2)	6 385.38	48.28	8 659.39	65.48	0.01	0.00	1 043.53	7.89	4 072.28	30.79
较差[0.02,0.35)	6 605.60	49.95	4 326.90	32.72	4 478.66	33.87	2 529.22	19.12	0.00	0.00
中[0.35,0.55)	137.20	1.04	79.37	0.60	8 674.53	65.59	9 495.07	71.80	9 083.81	68.69
良[0.55,0.75)	27.78	0.21	0.03	0.00	37.34	0.28	142.90	1.08	63.43	0.48
优[0.75,1]	69.04	0.52	159.31	1.20	34.46	0.26	14.27	0.11	5.42	0.04

从空间上看(图4),2000年,湛江市生态环境等级为差的区域主要分布在南部、北部与中部沿海,

等级为较差的区域集中分布在湛江市中部。2005年,生态环境等级为较差的分布在湛江市南半部临

海区域。2009 年,生态环境质量等级为较差的区域主要为湛江市北部邻桂地区、西南地区与中部偏东的沿海地区。2015 年,生态环境质量等级为较差的区域主要为湛江市西北、中部偏东与西南沿海地区,等级为中的区域主要分布在东北、中部与南部中心。

2020 年,生态环境质量等级为差的区域主要分布在湛江市北部与西南部,等级为中的主要分布在东南部与中部。综上所述,湛江市中部地区的生态环境质量高于西南与西北地区。

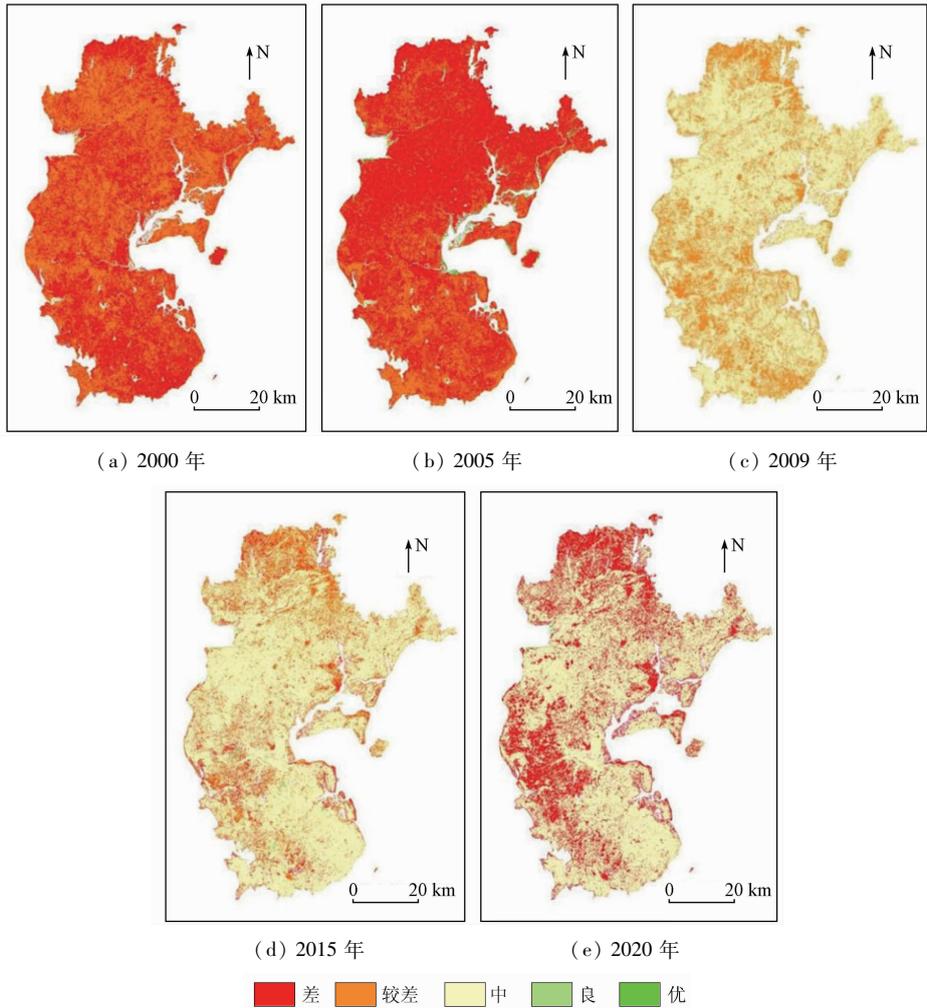


图 4 2000—2020 年生态环境质量分级

Fig. 4 Classification of ecological environment quality from 2000 to 2020

3.2 湛江市生态环境质量变化分析

为了进一步分析湛江市 2000—2020 年生态环境质量时空变化,对 5 期 IRSEI 值进行差值处理,并对结果进行分级。表 5 为 20 a 间湛江市生态环境质量变化面积及其占比情况。从 4 个阶段来看,2000—2005 年,湛江市生态环境质量有 73.93% 的面积为基本不变,轻度变好和明显变好的比例为 2.64% 与 7.25%,轻度变差与明显变差的占比分别为 9.97% 与 6.21%,基本不变的占比最高,说明湛江市生态环境质量在此期间基本保持不变;2005—2009 年,湛江市生态环境明显变好比例最高,为 89.03%,轻度变差与明显变差面积比例最低,分别为 0.02% 与 1.27%,湛江市生态环境质量在此期间明显提升;2009—2015 年间,湛江市明显

变好与轻度变好的比例分别为 50.84% 与 20.09%,明显变差与轻度变差比例分别为 9.25% 与 7.63%,明显变好比例较大明显变差比例,说明湛江市生态环境质量在此期间略有提升;2015—2020 年间,湛江市轻度变差与明显变差面积占比分别为 20.46% 与 10.84%,明显变好与轻度变好比例分别为 4.24% 与 0.54%,湛江市生态环境变差的比例高于变好的比例,但比例相差微小,湛江市生态环境质量在此期间略微下降。2000—2020 年间,湛江市生态环境大范围变好,变好总面积占比为 87.65%,轻度变差与明显变差比例分别为 1.35% 与 2.99%,变好比例远高于变差比例,说明湛江市 20 a 来的生态环境质量得到显著提升。

表5 不同程度生态环境质量变化
Tab.5 Changes of ecological environment quality to different degrees

变化程度	2000—2005年		2005—2009年		2009—2015年		2015—2020年		2000—2020年	
	面积/km ²	比例/%								
明显变差 [-1, -0.1)	821.62	6.21	167.38	1.27	1 223.97	9.25	1 433.22	10.84	395.50	2.99
轻度变差 [-0.1, 0.02)	1 318.17	9.97	2.63	0.02	1 008.76	7.63	2 706.29	20.46	178.73	1.35
基本不变 [0.02, 0.05)	9 777.17	73.93	400.89	3.03	1 612.28	12.19	8 453.99	63.92	1 059.36	8.01
轻度变好 [0.05, 0.1)	348.94	2.64	879.65	6.65	2 656.56	20.09	70.91	0.54	1 149.94	8.70
明显变好 [0.1, 1]	959.11	7.25	11 774.46	89.03	6 723.43	50.84	560.58	4.24	10 441.48	78.95

从空间上看(图5),2000—2005年,约2/3的地区生态环境质量发生变化;湛江市生态环境质量恶化主要发生在北部以及少部分沿海中部地区,生态环境好转主要分布在南部以及中部东侧沿海区域。2005—2009年,湛江市生态环境质量大范围明显变好,少量轻度变好分布于西南地区。2009—2015年,湛江市大部分生态环境质量得到提升,分布于最南端、东北以及中部区域,部分区域生态环境发生恶

化,主要分布于北部与西南沿海区域。2015—2020年,湛江市整体生态环境质量基本不变,有少部分区域生态环境质量变差,主要分布于西南沿海区域,少量分布于北部地区。变好区域少量分布于中部地区。2000—2020年间,湛江市生态环境质量整体得到提升,生态系统较为稳定,生态环境恶化地区主要分布于北部与西南沿海区域,该区域主要受人类活动影响。

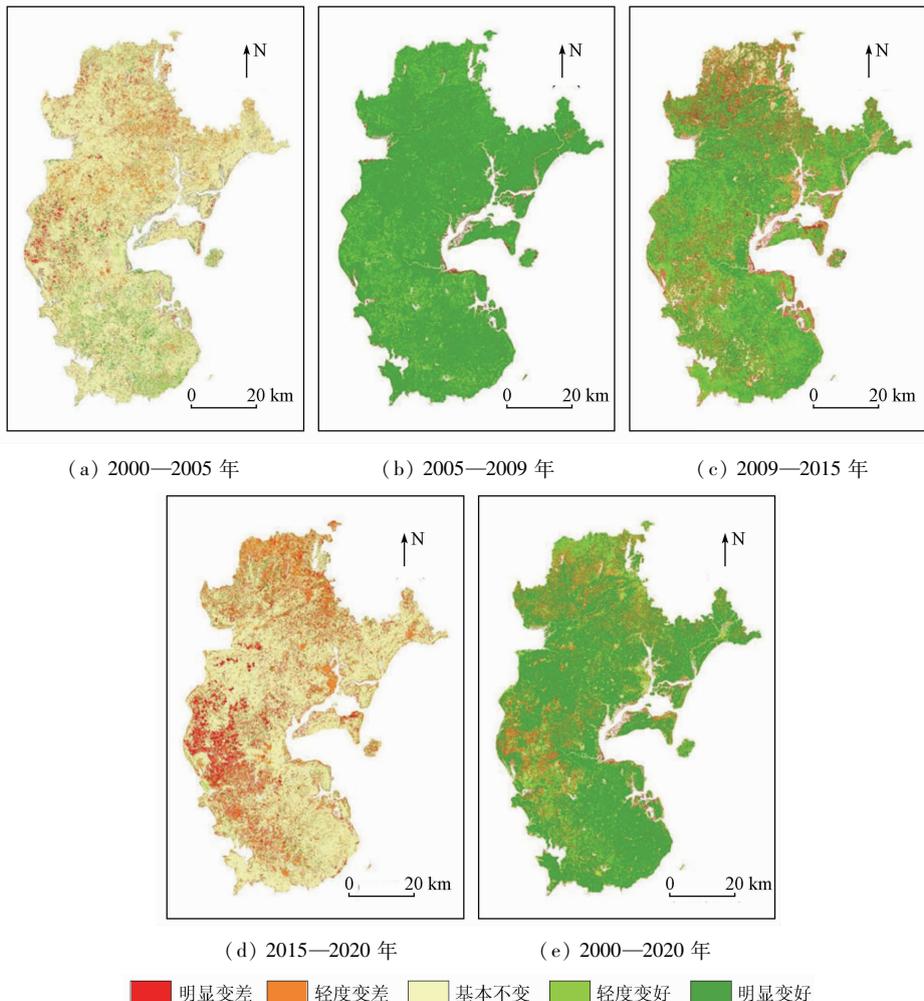


图5 2000—2020年湛江市生态环境空间变化

Fig.5 Space change of ecological environment in Zhanjiang City from 2000 to 2020

4 讨论与结论

1) 本研究构建的 IRSEI 第一主成分贡献率都超过 74%, 与 RSEI 指数相比, IRSEI 也能较好地集成各项指标有效特征信息。在 PC_1 中, 绿度指标与湿度指标的特征值符号为正, 在生态环境质量评估中作用为正, 干度指标、热度指标、土地利用指标与人口分布指标的特征值符号为负, 在生态环境质量评估中作用为负。IRSEI 指数能够准确、全面地评估湛江市生态环境质量。

2) 2000 年、2005 年、2009 年、2015 年和 2020 年 IRSEI 分别为 0.18, 0.18, 0.35, 0.42, 0.38。呈现“下降—上升”趋势, 20 a 间, 湛江市生态环境质量明显变好面积比例为 78.95%, 说明湛江市生态环境质量总体变好。湛江市环境质量变好区域主要分布在中部与南部中心区域, 这些地区土地利用类型主要为农田与森林, 生态环境恶化区域主要分布在北部、中部偏东与西南部区域。这些地区土地利用类型主要为建设用地。

3) 尽管本研究提出 IRSEI, 可以相对客观地分析湛江市生态环境质量变化, 但研究中也存在不足, 如大气、水系、气温和种群多样性等也是导致生态环境质量发生变化的原因, 上述因素对生态环境质量变化的驱动机制还有待研究, 若未来研究能综合考量其他生态指标, 更能全面地评价湛江市生态环境质量。

参考文献 (References):

- [1] 李加林, 汪海峰, 田鹏. 海岸带开发利用研究进展[J]. 海洋经济, 2022, 12(2): 21-31.
Li J L, Wang H F, Tian P. Research progress of coastal zone development[J]. Marine Economy, 2022, 12(2): 21-31.
- [2] 许学工, 彭慧芳, 徐勤政. 海岸带快速城市化的土地资源冲突与协调——以山东半岛为例[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2006, 42(4): 527-533.
Xu X G, Peng H F, Xu Q Z. Land resource conflicts and coordination in fast urbanized coastal zone: A case study of the Shandong Peninsula[J]. Journal of Peking University (Natural Science Edition), 2006, 42(4): 527-533.
- [3] 陈晔倩, 李杨帆, 祁新华, 等. 基于栖息地风险评价模型的海岸带滩涂湿地风险评价——以闽三角为例[J]. 生态学报, 2018, 38(12): 4214-4225.
Chen Y Q, Li Y F, Qi X H, et al. Assessing ecosystem risk in coastal wetland of the South Fujian Golden Delta using a habitat risk assessment model based on the land-use effect on tidal flat wetland[J]. Ecological Journal, 2018, 38(12): 4214-4225.
- [4] 环境保护部. HJ 192—2015 生态环境状况评价技术规范[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2015.

- Ministry of Environmental Protection. HJ 192—2015 Technical specifications for ecological environment assessment[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2015.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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, 2022, 8: 125534-125548.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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 the Gurbantunggut Desert based on remote sensing ecological index[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(3): 877-883.

- ronmental 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.
- [15] 张伟, 杜培军, 郭山川, 等. 改进型遥感生态指数及干旱区生态环境评价[J]. 遥感学报, 2022, 26(7): 1-19.
Zhang W, Du P J, Guo S C, et al. Enhanced remote sensing ecological index and ecological environment evaluation in arid area[J]. National Remote Sensing Bulletin, 2022, 26(7): 1-19.
- [16] 李洋. 基于多要素的海岛城市生态状况评价[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] 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.
- [18] 许妍, 曹可, 李冕, 等. 海岸带生态风险评估研究进展[J]. 地球科学进展, 2016, 31(2): 137-146.
Xu Y, Cao K, Li M, et al. Coastal ecological risk assessment: Its research progress and prospect[J]. Advances in Earth Science, 2016, 31(2): 137-146.
- [19] 湛江红树林国家级自然保护区[J]. 环境, 2021, 44(10): 51.
Zhanjiang mangrove national nature reserve[J]. Environment, 2021, 44(10): 51.
- [20] Yang J, Huang X. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019[J]. Earth System Science Data, 2021, 13(8): 3907-3925.
- [21] 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.
- [22] 李凤莹, 张饮江, 赵志森, 等. 基于遥感生态指数的上海南汇东滩海岸带湿地生态格局变化评价[J]. 上海海洋大学学报, 2020, 29(5): 746-756.
Li F Y, Zhang Y J, Zhao Z M, et al. Evaluation of ecological pattern change of Nanhui Dongtan wetland in Shanghai based on remote sensing ecological index[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2020, 29(5): 746-756.
- [23] 农兰萍, 王金亮, 玉院和. 基于改进型遥感生态指数(MRSEI)模型的滇中地区生态环境质量研究[J]. 生态与农村环境学报, 2021, 37(8): 972-982.
Nong L P, Wang J L, Yu Y H. Research on ecological environment quality in central Yunnan based on MRSEI model[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2021, 37(8): 972-982.
- [24] 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 L C, Jiao L, Lai F B, 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.
- [25] Chander G, Markham B L, Helder D L. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors[J]. Remote Sensing of Environment, 2009, 113(5): 893-903.
- [26] Rikimaru A, Roy P S, Miyatake S. Tropical forest cover density mapping[J]. Tropical Ecology, 2002, 43(1): 39-47.
- [27] 吴传钧, 郭焕成. 中国土地利用[M]. 北京: 科学出版社, 1994: 35-36.
Wu C J, Guo H C. Land utilization in China[M]. Beijing: Science Press, 1994: 35-36.
- [28] 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]. Journal of Geography, 2015, 70(7): 1068-1079.
- [29] 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.
- [30] 徐涵秋, 邓文慧. MRSEI指数的合理性分析及其与RSEI指数的区别[J]. 遥感技术与应用, 2022, 37(1): 1-7.
Xu H Q, Deng W H. Rationality analysis of MRSEI and its difference with RSEI[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2022, 37(1): 1-7.

Exploring ecological environment quality of typical coastal cities based on an improved remote sensing ecological index: A case study of Zhanjiang City

WANG Jing^{1,2}, WANG Jia^{1,2}, XU Jiangqi^{1,2}, HUANG Shaodong^{1,2}, LIU Dongyun³

(1. Beijing Key Laboratory of Precision Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100091, China; 2. College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100091, China; 3. School of Landscape Architecture, Beijing Forestry University, Beijing 100091, China)

Abstract: Urbanization has decreased the area of ecological land and deteriorated ecological environment in Zhanjiang City. Therefore, it is significant to quickly, comprehensively, and accurately monitor the changes the

ecological environment quality in this city. Based on the Landsat images in 2000, 2005, 2009, 2015, and 2020, this study constructed the improved remote sensing ecological index (IRSEI) using six indicators, namely greenness (NDVI), humidity (WET), dryness (NDBSI), heatiness (LST), land use (LUI), and population distribution (POP). Using IRSEI, this study quantitatively analyzed the changes in the ecological environment quality in Zhanjiang during 2000—2020. The results are as follows: ① The mean IRSEI values of 2000, 2005, 2009, 2015, and 2020 are 0.18, 0.18, 0.35, 0.42, and 0.38, respectively, showing a first increasing and then decreasing trend. ② According to the difference processing on IRSEIs during 2000—2020, the proportions of ecological environment areas with significant improvement (dominant), improvement, no change, deterioration, and significant deterioration in the study area are 78.95%, 8.70%, 8.01%, 1.35%, and 2.99%, respectively. ③ The IRSEI can effectively reflect the poor urban environment along the coastal zone during 2000—2020, specifically manifested as a low IRSEI value of building land along the coastal zone. The results of this study can provide a theoretical and scientific basis for Zhanjiang's ecological environment protection.

Keywords: ecological environment quality; coastal zone; improved remote sensing ecological index

(责任编辑: 陈 理)