

黄河三角洲湿地生态环境质量评价与景观格局分析

陶洁^{1,2}, 李莎拉¹, 张李婷¹, 左其亭^{1,2}

(1. 郑州大学 水利与交通学院, 河南 郑州 450001; 2. 河南省水循环模拟与水环境保护
国际联合实验室, 河南 郑州 450001)

摘要:【目的】科学评价黄河三角洲湿地的生态环境质量, 系统分析其景观格局, 为该地区制定有效的保护与修复策略提供科学支撑。【方法】以黄河三角洲湿地保护区为研究区, 基于 Google Earth Engine (GEE) 平台, 利用遥感生态指数 (RSEI) 评价 2001—2020 年湿地生态环境质量; 选取斑块密度、景观形状指标、香浓多样性和蔓延度开展景观格局分析, 并探讨 RSEI 与景观格局之间的相关性。【结果】①RSEI 总体上升, 林草地恢复和人类活动的有效约束使 RSEI 由“较差”提升至“中等”水平; 一千二保护区及黄河口东部入海口的生态环境质量因排污口整治得到显著改善; 西部和中部地区受人类活动与城市扩张影响, 生态环境不容乐观。②2001—2019 年, 斑块密度和景观形状指标上升, 景观多样性增加, 但蔓延度下降, 导致景观连通性减弱。2020 年, 部分区域连通性恢复, 蔓延度显著上升, 形成较连续的优势斑块。③景观格局指标与 RSEI 的时间变化趋势一致, 蔓延度与 RSEI 呈负相关 ($r = -0.72$), 表明过度连通会降低生态系统的多样性和稳定性; 斑块密度、景观形状、香浓多样性与 RSEI 均呈正相关 (r 分别为 0.75、0.76、0.72), 说明景观异质性和多样性有助于生态环境质量提升。【结论】黄河三角洲湿地生态环境质量呈现总体改善、局部波动、空间分异的显著特征, 景观格局的时间变化趋势与 RSEI 的一致。本研究可为研究区生态保护与治理提供科学依据。

关键词: 遥感生态指数 (RSEI); 景观格局; 生态环境质量; 相关性分析; 黄河三角洲湿地

中图分类号: TV213.4

文献标识码: A

文章编号: 2096-6792(2025)06-0001-09

湿地是在陆地与水生态交错地带发展起来的一种生态系统, 具有涵养水源、净化水土、维护物种多样性、改善生态环境等不可替代的作用^[1-3]。面向全球范围内湿地的破碎化和功能衰退, 国内外众多学者开展了湿地生态监测与评价研究。例如, 利用归一化植被指数 (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI) 分析黄河三角洲湿地环境变化, 通过其季节性和年际变化反映植被的健康状况^[4]; 利用地表温度 (Land Surface Temperature, LST) 评估湿地地区的热岛效应和水资源状况^[5]。近年来, 集成了植被指数 (绿色)、水分信息 (湿度)、城市建设用地 (干度) 和地表温度 (热度) 四类要素的遥感生态指数 (Remote Sensing Ecological Index, RSEI) 成为研究热点^[6]。由于 RSEI 完全基于遥感信息且计

算过程避免了人工干预, 已广泛应用于全球湿地生态质量的动态监测和评价中。

湿地生态质量不仅可以利用上述 NDVI、LST 等单一指标进行评价, 还可以通过 RSEI 等综合指标反映生态系统的健康状态。此外, 景观格局的变化也为湿地生态质量的表征提供了重要的补充视角。例如通过斑块数量、面积等的变化, 探究黄河三角洲湿地景观的破碎化趋势^[7]; 通过分析斑块面积与数量的变化及与输沙量的相关性, 探讨水沙变化对黄河三角洲湿地景观格局的影响^[8]。然而, 现有研究较少从 RSEI 与景观格局指标相结合的角度, 综合开展湿地生态质量评价。RSEI 能够有效考虑影响区域生态环境质量的关键因素, 包括植被覆盖、水分状况、城市建设用地分布及地表温度等;

收稿日期/Received: 2024-06-19

修回日期/Revised: 2024-11-12

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2021YFC3200201); 国家自然科学基金项目 (51709238); 河南省 2024 年水利科技攻关项目 (GG202404, GG202405)。

第一作者: 陶洁 (1986—), 女, 副教授, 博导, 博士, 从事水文学与水环境方面的研究。E-mail: taojie2015@zzu.edu.cn。

通信作者: 左其亭 (1967—), 男, 教授, 博导, 博士, 从事水文学及水资源方面的研究。E-mail: zuoqt@zzu.edu.cn。

而景观格局指标则通过空间斑块的类型、形状、大小、数量和空间组合表征景观结构与功能,从而反映生态环境质量。两者的结合是快速、客观、动态评估区域生态状况的有效方法,但该方法不适用于只有大量水域的区域,如湖泊、海洋等。

山东黄河三角洲国家级自然保护区于 1992 年 10 月经国务院批准建立,是我国暖温带地区保存最完整、最广阔、最年轻的湿地生态系统^[9],也是黄河流域生态系统健康的“晴雨表”。2002 年起小浪底调水调沙工程的实施增加了黄河入海水沙量,补充了湿地淡水资源,缓解了由于黄河断流造成的三角洲湿地生态环境恶化^[10]。近些年来,湿地油田开发、导流堤和道路建设、耕地盐田开发等大规模人类活动极大地改变了湿地景观格局,影响了湿地的结构和功能^[11-12]。2021 年中共中央 国务院印发的《黄河流域生态保护和高质量发展规划纲要》

中明确提出,要加强黄河三角洲湿地的保护修复。

本文以黄河三角洲湿地保护区为研究区,基于 Google Earth Engine (GEE) 平台编写代码调取数据,利用 RSEI 联合景观格局指标的方式开展黄河三角洲湿地生态环境质量的评价分析。研究对快速诊断湿地生态环境问题、保障湿地生态系统良性循环、推动黄河下游流域高质量发展具有重要意义。

1 研究区概况及数据预处理

1.1 研究区概况

黄河三角洲国家级自然保护区位于 117°31'E ~ 119°18'E、36°55'N ~ 38°16'N,在山东省东营市境内^[13],北临渤海,东靠莱州湾。保护区分为南北两块不相连的区域,分别为东部入海口处的黄河口自然保护区、北部的一千二自然保护区(图 1)。

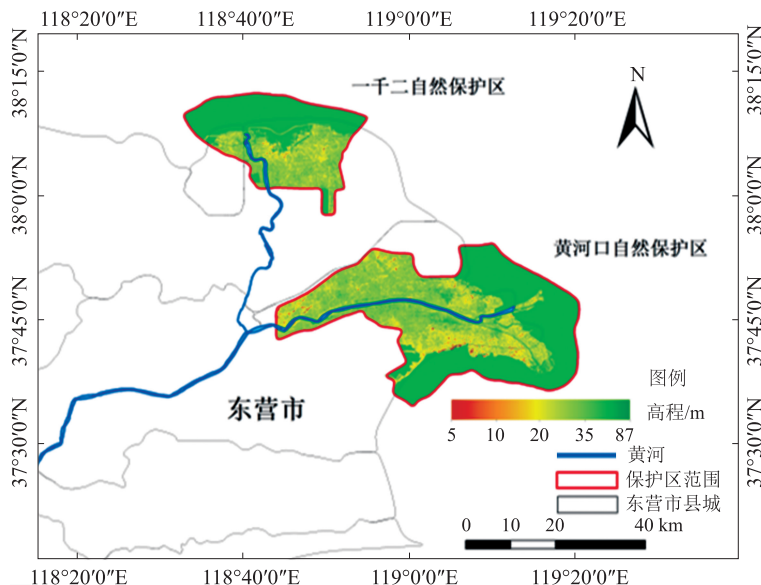


图 1 黄河三角洲湿地研究区位置

Fig. 1 Location of research area of Yellow River Delta Wetlands

保护区总面积 15.3 万 hm^2 ,属于暖温带季风大陆性气候,年均降水量约为 551.6 mm。保护区内野生动物众多、植被种类繁多,是众多国家级重点、濒危鸟类等野生动物的中转站、越冬栖息地和繁殖地,也是中国沿海最大的新生湿地自然植被区。这些物种共同构成了三角洲保护区湿地独特的生态系统。

1.2 数据及预处理

以 30 m 空间分辨率为基准,利用 GEE 分别获取 2001—2020 年日尺度的经过大气校正后的地表反射率产品 MODIS 和 Landsat 数据集,以及湿地土地利用数据(《中国 1980—2020 年土地利用覆被数

据集(CNLUCC)》)。由于 Landsat 数据集无法使用同一传感器获取整个时间序列,为了保证数据连续性,2001—2012 年使用 Landsat5 (TM) 影像,2013—2020 年使用 Landsat8 (OLI) 影像,虽然传感器不同,但其波段带宽相近,因此影像可以满足本文的研究需求。

在上述数据集中,MODIS 提供了每日更新的地表反射率,尤其适合捕捉温度的短期变化,故用于获取 LST 指数。虽然 Landsat 数据的时间分辨率为 16 d,但其波段设置更丰富,光谱分辨率更高,尤其是红光、近红外和短波红外波段对于计算绿度、干度和湿度等生态指数非常有优势,故选择 Land-

sat 数据来计算这 3 个指数。为提高数据质量,影像处理时通过 QA-pixel 波段去除了云和阴影的干扰。

2 研究方法

2.1 RSEI

RSEI 通过耦合绿色、湿度、热度和干度 4 个方面衡量生态环境质量^[14],分别选用归一化植被指数(NDVI)代表绿色,水分蒸发蒸腾指数(Water Evaporation Transpiration, WET)代表湿度,地表温度(LST)代表热度,归一化差分土壤指数(Normalized Difference Bare Soil Index, NDBSI)代表干度,定义式为:

$$RSEI = f(NDVI, WET, LST, NDBSI)。(1)$$

NDVI 反映植被的生长及覆盖情况,计算式为^[15]:

$$NDVI = \frac{\rho_{nir} - \rho_{red}}{\rho_{nir} + \rho_{red}}。(2)$$

式中 ρ_{nir} 和 ρ_{red} 分别为植被反射的近红外波段和可见光红波段的反射率。NDVI 值范围为 $[-1, 1]$,其中负值表示相应区域没有植被。计算后将没在区间范围内的异常值剔除。

WET 反映湿地中土壤植物等所含水分的信息,计算式为^[16]:

$$WET_{TM} = 0.031 5\rho_{blue} + 0.202 1\rho_{green} + 0.310 2\rho_{red} + 0.159 4\rho_{nir} - 0.680 6\rho_{swirl} - 0.610 9\rho_{swir2},(3)$$

$$WET_{OLI} = 0.151 1\rho_{blue} + 0.197 3\rho_{green} + 0.328 3\rho_{red} + 0.340 7\rho_{nir} - 0.711 7\rho_{swirl} - 0.455 9\rho_{swir2}。(4)$$

式中: ρ_{green} 、 ρ_{blue} 分别表示可见光绿波段、蓝波段的反射率; ρ_{swirl} 、 ρ_{swir2} 分别表示短波红外 1、2 波段反射率。对于不同传感器,提取湿度分量公式的转换系数不同。

LST 反映地表热度分布情况,计算式为^[17]:

$$LST = \frac{T}{1 + \left(\frac{\lambda T}{\rho}\right) \ln \varepsilon} - 273, (5)$$

$$T = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L} + 1\right)}。(6)$$

式中: T 为热辐射强度转化的亮度温度; λ 为热红外波段中心波长; ρ 为常数,取 1.438×10^{-2} mK;

ε 为地表比辐射率; K_1 、 K_2 代表热转换常数, $K_1 = 774.89$ W/($m^2 \cdot \mu m \cdot sr$), $K_2 = 1321.08 K_1$; L 为热红外辐射亮度值。

NDBSI 反映不透水面造成的地表干化情况,能在一定程度上表示人类活动对生态环境的影响,计算式为^[18]:

$$NDBSI = \frac{(\rho_{swirl} + \rho_{red}) - (\rho_{nir} + \rho_{blue})}{(\rho_{swirl} + \rho_{red}) + (\rho_{nir} + \rho_{blue})}。(7)$$

由于各指数量纲不统一,还需要对各指数进行归一化处理:

$$NI = \frac{I - I_{min}}{I_{max} - I_{min}}。(8)$$

式中: NI 为经过归一化后的指标; I 为指标对应的像元值; I_{min} 为该指标最小值; I_{max} 为该指标最大值。

将处理后的 4 个指数进行主成分分析(Principal Component Analysis, PCA),提取第一主成分(PC1)进行计算,得到 RSEI 的初始值 $RSEI_0$:

$$RSEI_0 = 1 - PC1(NDVI, WET, LST, NDBSI)。(9)$$

为便于比较不同年份间的生态环境质量,同样需对 $RSEI_0$ 进行归一化处理,得到取值范围为 $[0, 1]$ 的 $RSEI$ 。 $RSEI$ 越接近 1,表明生态质量越好,反之则越差。采用等间距分级法将 $RSEI$ 分为 5 个等级^[19]:差($0.0 \leq RSEI < 0.2$)、较差($0.2 \leq RSEI < 0.4$)、中等($0.4 \leq RSEI < 0.6$)、良好($0.6 \leq RSEI < 0.8$)、优秀($0.8 \leq RSEI \leq 1.0$)。

需要注意的是,NDVI、WET 对生态起正面影响,计算后应为正值;LST、NDBSI 对生态起负面影响,计算后应为负值^[20]。

2.2 景观格局指标

景观主要由形态不同的斑块构成,斑块的面积、形状、空间组合等既是各种因素相互作用的结果,又影响着区域生态过程。考虑从空间异质性、多样性、延展性等角度评估研究区的景观结构和功能,因而选取了斑块密度、景观形状指标、香浓多样性指标、蔓延度指标,并利用 Fragstats 4.2 展开计算。各指标生态学含义和计算公式详见表 1。

2.3 Pearson 相关性分析

利用 Pearson 相关系数(r)评估保护区 RSEI 和景观格局指标的线性关系强度。 r 取值 $[0.0, 0.3]$ 、 $[0.3, 0.5]$ 、 $[0.5, 0.7]$ 、 $[0.7, 1.0]$ 分别代表几乎无相关、低至中等相关、中等至较强相关、较强至极强相关。

表 1 景观格局指标计算公式及含义

Tab. 1 Calculation formulas and meanings of landscape pattern indices

指标名称	计算公式	生态意义
斑块密度/(个/km ²)	$PD = \frac{n}{A}$	表示某种斑块在景观中的密度,可反映出景观整体的异质性以及破碎化程度。
景观形状指标	$LSI = \frac{0.25E}{\sqrt{A}}$	描述景观的形状特征,能够综合反映景观内部复杂性与异质程度。
香浓多样性指标	$SHDI = - \sum_{i=1}^m (p_i \ln p_i)$	反映景观多样性,特别对景观中各斑块类型非均衡分布状况较为敏感,即强调稀有斑块类型对信息的贡献。值越高,景观多样性越丰富。
蔓延度指标/%	$CONTAG = 1 + \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^m p_i \frac{g_{ik}}{\sum_{k=1}^m g_{ik}} \ln p_i - \frac{g_{ik}}{\sum_{k=1}^m g_{ik}}}{2 \ln m}$	描述景观里不同斑块类型的团聚程度或延展趋势。高蔓延度值说明景观中的某种优势斑块类型形成了良好的连接性;反之则表明景观具有多种要素密集的格局,景观的破碎化程度较高。

注: n 为湿地整个景观中斑块的数量; A 为斑块总面积; E 为所有斑块边界的总长度; m 为斑块类型的总数; p_i 为斑块类型 i 占湿地整个景观的面积比; g_{ik} 为 i 类型斑块和 k 类型斑块毗邻的数目。

3 结果与分析

3.1 RSEI 主成分分析结果

黄河三角洲湿地 2001—2020 年 RSEI 主成分分析结果见表 2。20 年间,RSEI 的第一主成分贡献率为 48.37%~82.48%,平均 63.92%,表明 PC1 包含了各指标的大部分信息。NDVI 和 WET 均为正值,NDBSI 和 LST 均为负值,符合实际情况,表明

RSEI 的构建与计算具有合理性,能够反映保护区生态环境质量状况。其中:20 年间,NDVI 总体呈增加趋势,植被覆盖度在逐步提高;WET 总体呈下降趋势,后 10 年偏平稳;受城市扩张影响,不透水表面面积增加,LST 和 NDBSI 整体呈上升趋势。

3.2 生态质量时间变化

利用 Python 提取 2001—2020 年日 RSEI 图,得到每年的 RSEI 值(表 2),绘制小提琴图(图 2)。

表 2 RSEI 及 4 个指标在第 1 主成分上的荷载和贡献率

Tab. 2 RSEI and loadings and contribution rates of four indicators on first principal component

年份	各指标对 PC1 的荷载值				贡献率/%	RSEI 均值		年份	各指标对 PC1 的荷载值				贡献率/%	RSEI 均值
	NDVI	LST	WET	NDBSI					NDVI	LST	WET	NDBSI		
2001	0.636	-0.240	0.112	-0.011	69.83	0.332		2011	0.690	-0.243	0.054	-0.013	82.48	0.432
2002	0.672	-0.245	0.073	-0.011	67.49	0.294		2012	0.729	-0.204	0.059	-0.008	77.28	0.401
2003	0.650	-0.276	0.063	-0.011	68.83	0.392		2013	0.726	-0.217	0.052	-0.005	48.37	0.374
2004	0.652	-0.269	0.066	-0.012	61.43	0.334		2014	0.676	-0.269	0.045	-0.009	57.63	0.537
2005	0.635	-0.307	0.049	-0.009	68.78	0.384		2015	0.689	-0.232	0.075	-0.003	65.40	0.525
2006	0.693	-0.256	0.039	-0.011	61.52	0.331		2016	0.716	-0.209	0.072	-0.003	61.27	0.445
2007	0.689	-0.245	0.056	-0.010	72.73	0.325		2017	0.739	-0.198	0.059	-0.003	55.13	0.539
2008	0.709	-0.201	0.081	-0.008	58.16	0.542		2018	0.718	-0.211	0.064	-0.007	60.87	0.493
2009	0.772	-0.188	0.037	-0.003	67.10	0.384		2019	0.724	-0.209	0.061	-0.005	55.74	0.569
2010	0.779	-0.185	0.026	-0.009	69.58	0.325		2020	0.739	-0.201	0.054	-0.006	48.71	0.384

由表 2 和图 2 可知:20 年来 RSEI 区间为 0.294~0.569,生态质量整体处于“较差”和“中等”水平,其中最高值 0.569 出现在 2019 年,最低值 0.294 出现在 2002 年。2008 年之前 RSEI 波动上升且均处于“较差”水平,直至 2008 年达“中等”水平。2008—2010 年,由于东营市建设用地的迅速扩张和石油化工产业的快速发展,林草地面积明显下降,导致该时期生态质量水平显著下降,RSEI 在

2009—2010 年回落至“较差”水平。2010—2019 年,随着人类活动的约束和生态恢复的投入,林草地面积逐步恢复,RSEI 整体略有上升,大部分年份保持在“中等”水平。然而,2020 年 RSEI 再次下降至 0.384。进一步分析发现,这一年 WET 指数下降,LST 指数升高,表明研究区内水体面积减少或水位降低,地表温度升高。这种变化通常与干旱、降水不足或水资源过度开采有关,对生态环境质量

产生了不利影响。

总体而言,2001—2020 年,黄河三角洲湿地的 RSEI 呈上升趋势,反映出三角洲建设和治理政策颇有成效。

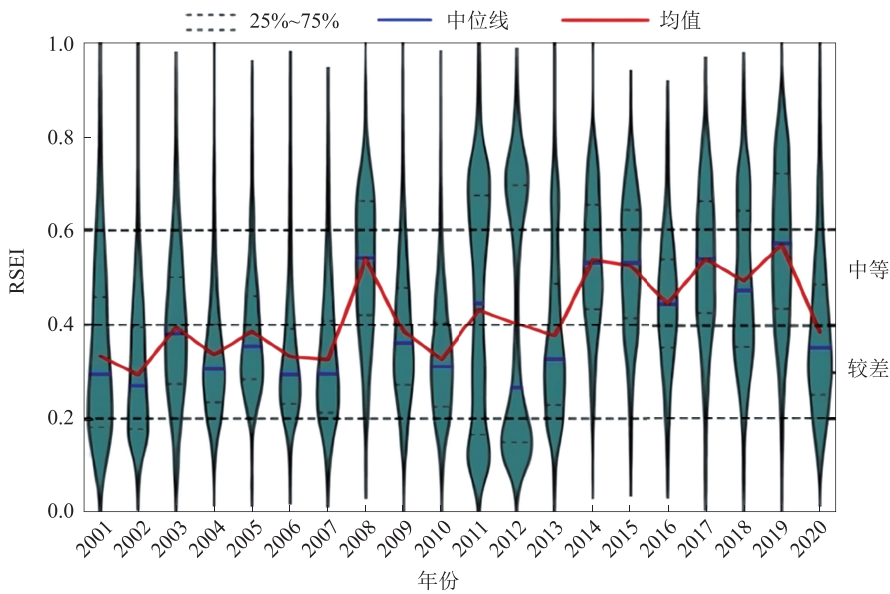


图 2 2001—2020 年 RSEI 小提琴分布图

Fig. 2 RSEI violin plot (2001—2020)

3.3 生态质量空间变化

图 3 为 2001 年、2005 年、2010 年、2015 年、2020 年的 RSEI 空间分布图。由图 3 可知:2010 年前,保护区整体生态环境质量处于“差”与“较差”水平,其中一千二保护区生态环境质量不断恶化,2010 年最为严重;黄河口保护区 2005 年“较差”区域较 2001 年和 2010 年明显减少,究其原因,2004 年黄河经历过 3 次调水调沙试验,下游河道淤积的

大量泥沙被冲刷入海,入海口潮间带湿地扩大,生态环境质量得以修复。在黄河口保护区中,东部入海口区域(图 3 中蓝色椭圆圈)生态环境呈现逐渐恶化趋势,等级由 2001 年的“良好”到 2010 年的“差”;西部地区(图 3 中红色三角形线框)生态环境明显好转;而中间段黄河干流及周边区域(图 3 中黑色矩形线框)受人类活动和城市扩张的影响,生态环境则变差。

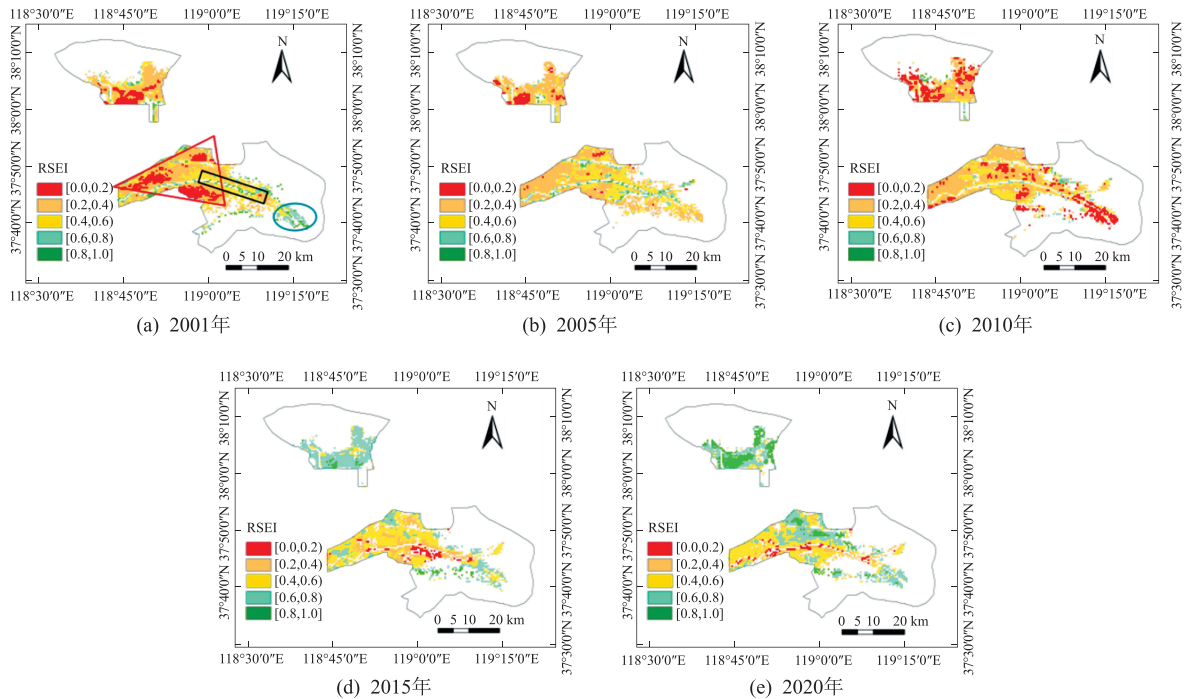


图 3 2001—2020 典型年保护区的 RSEI 等级分布图

Fig. 3 RSEI level distribution map of protected areas in typical years (2001—2020)

2010 年后,保护区整体生态环境质量有所好转。其中,一千二保护区生态环境明显变好,维持“良好”以上水平;黄河口东部入海口区域生态环境质量改善显著,达“良好”水平;西部地区生态环境质量有所改善,达“中等”水平;但中间段黄河干流及周边区域生态环境质量仍然不容乐观,干流区域生态环境质量变差尤为明显。整体可见:2010 年后,黄河口东部入海口区域环境治理成效显著,这与东营市近些年来率先在全省完成入河排污口整治工作密切相关。

3.4 景观格局指标变化

黄河三角洲湿地 2001—2020 年景观格局指标

表 3 黄河三角洲湿地 2001—2020 年景观格局指标变化表

Tab. 3 Changes in landscape pattern indicators of Yellow River Delta Wetlands (2001—2020)

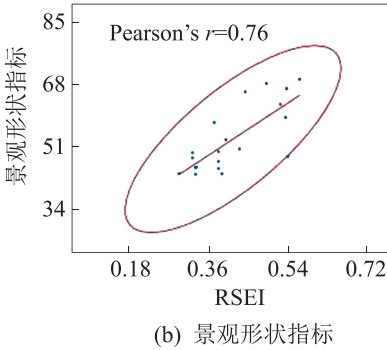
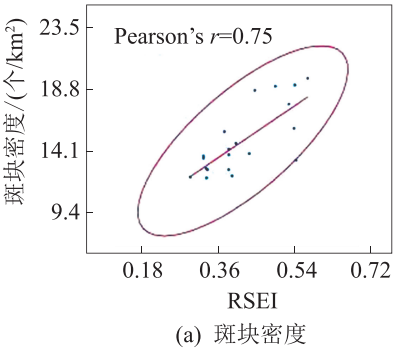
年份	斑块密度	景观形状指标	香浓多样性指标	蔓延度指标	年份	斑块密度	景观形状指标	香浓多样性指标	蔓延度指标
2001	12.082	43.916	1.160	53.655	2011	13.928	50.750	1.164	52.056
2002	12.147	44.138	1.147	54.038	2012	14.710	53.256	1.167	51.459
2003	12.225	44.065	1.128	54.669	2013	15.607	57.930	1.174	50.322
2004	12.705	45.850	1.135	54.099	2014	15.841	59.254	1.202	49.134
2005	12.715	45.495	1.131	54.271	2015	17.699	62.821	1.231	47.468
2006	12.801	45.806	1.125	54.384	2016	18.741	66.199	1.270	45.496
2007	13.576	48.345	1.132	53.600	2017	19.148	67.077	1.286	44.802
2008	13.420	48.733	1.147	53.023	2018	19.053	68.442	1.285	44.593
2009	13.850	50.041	1.165	52.155	2019	19.659	69.602	1.289	44.296
2010	13.743	49.762	1.161	52.321	2020	14.273	47.410	1.179	57.349

3.5 RSEI 与景观格局指标相关性分析

RSEI 与景观格局指标的相关性如图 4 所示。斑块密度、景观形状指标、香浓多样性指标与 RSEI 均呈正向的强相关, r 分别为 0.75、0.76、0.72。可见,针对黄河三角洲湿地景观,一定程度上较高的景观斑块异质性、较复杂的斑块几何形状有利于生态系统的健康和稳定;香浓多样性指标越高,在生态学中一般意味着物种多样性越高,往往也表明生态环境质量越好。然而蔓延度指标与 RSEI 却呈现

计算结果见表 3。结果表明:斑块密度、景观形状指标、香浓多样性指标在 2019 年前波动上升,在 2020 年明显下降,说明 2001—2019 年期间湿地景观破碎化程度加重,斑块形状进一步趋向复杂和不规则,不同景观类型的数量增加,景观多样性更丰富,2020 年景观破碎化程度有所缓解。蔓延度指标在 2019 年前波动下降,2020 年明显上升,说明 2019 年之前湿地景观的团聚性与延展性减弱,破碎化程度较高,2020 年景观中的某种优势斑块类型具有良好的连续性,景观连通性升高,破碎化程度有所缓解。

负向的强相关($r=-0.72$)。一般情况下,蔓延度高意味着景观内某种优势斑块形成了良好的连接性,这有利于物种迁移和生态过程的正常进行,对生态系统的健康和稳定有积极的影响;但蔓延度过高反映某种优势斑块的连通性增强,导致多样性降低,从而不利于生态系统的稳定性和健康性。在黄河三角洲湿地区域,RSEI 与蔓延度指标之间存在逆向关系。



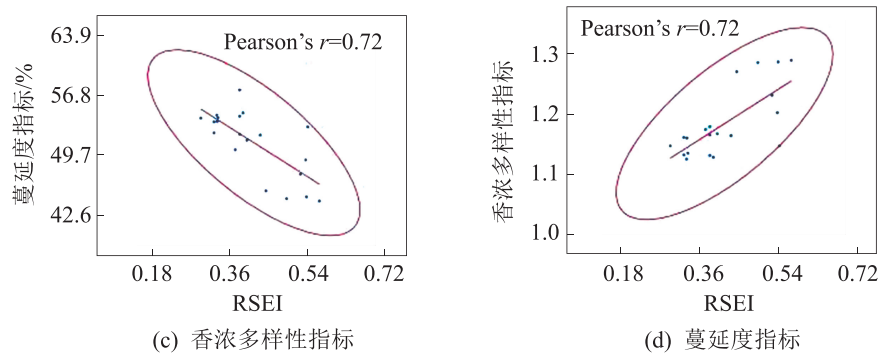


图 4 遥感生态指数与景观格局指标相关性

Fig. 4 Correlation between remote sensing ecological index and landscape pattern indicators

结合表 2、表 3 可见,在时间变化趋势上 RSEI 与景观格局指标也呈现一致性。RSEI 和斑块密度、景观形状指标、香浓多样性指标呈同向性(2001—2019 年整体上升,2020 年下降),和蔓延度指标呈反向性(2001—2019 年整体下降,2020 年上升),这与图 4 相关性结果吻合。可见,相关性分析只能揭示二者之间的线性关系,并不能完全解释湿地生态环境质量与景观格局之间的因果关系。遥感生态指数与景观格局指标虽然分别从影响生态环境的重要因素、景观斑块特征的角度表征生态环境质量,但二者紧密相关。

4 结论及展望

基于 GEE 平台采用 RSEI 和景观格局指标对 2001—2020 年黄河三角洲湿地保护区进行生态环境质量评价分析。结果表明:

- 1)在时间维度上,黄河三角洲湿地保护区的 RSEI 总体呈上升趋势,从“较差”逐步提升至“中等”水平,尤其在 2010—2019 年期间维持在“中等”水平。但 2020 年出现 WET 指数下降和 LST 指数升高的情况,研究区内水体面积减少和地表温度升高,对生态环境质量产生了不利影响,导致 RSEI 出现下降趋势。在空间分布方面,一千二保护区和黄河口东部入海口区域的入河排污口整治措施效果显著,生态环境明显改善,而黄河口西部及中间段的生态环境质量依然不容乐观。
- 2)RSEI 与斑块密度、景观形状和香浓多样性指标之间存在显著正相关关系(r 分别为 0.75、0.76、0.72),较高的景观异质性和复杂的斑块几何形状有助于生态系统的健康与稳定;与此同时,RSEI 与蔓延度指标呈显著负相关关系($r = -0.72$),过高的蔓延度会增强生态连通性,导致多

样性降低,从而不利于生态系统的稳定。总体来看,景观格局的时间变化趋势与 RSEI 变化一致,为黄河三角洲湿地的保护与管理提供了科学依据。

遥感生态指数与景观格局指标二者紧密相关,且受变化环境影响较大。然而目前遥感生态指数中绿度、湿度、热度和干度 4 个指数与景观格局各个指标之间的内在相互作用及其演变机制仍不清晰,相关问题仍需深入探讨,例如蔓延度数值高低与 RSEI 数值高低表征的生态环境质量优劣之间的关系尚不明确,人类活动和气候变化等因素下二者指标之间的耦合影响机制也有待进一步阐明。后续有必要深入开展上述研究,为区域生态环境质量评估和保护决策提供更有力的支撑。

参 考 文 献

[1] 邓伟,潘响亮,栾兆擎. 湿地水文学研究进展[J]. 水科学进展,2003(4):421-427. [DENG W, PAN X L, LUAN Z Q. Advances in wetland hydrology [J]. Advances in Water Science, 2003(4):421-427.]

[2] 严登华,王浩,杨舒媛,等. 面向生态的水资源合理配置与湿地优先保护[J]. 水利学报,2008(10):1241-1247. [YAN D H, WANG H, YANG S Y, et al. Ecology-oriented reasonable deployment of water resources and giving priority to protection of wetland [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008(10):1241-1247.]

[3] 章光新,武瑶,吴燕锋,等. 湿地生态水文学研究综述[J]. 水科学进展,2018,29(5):737-749. [ZHANG G X, WU Y, WU Y F, et al. A review of research on wetland ecohydrology [J]. Advances in Water Science, 2018,29(5):737-749.]

[4] YU K N, YANG C J, WU T, et al. Analysis of vegetation coverage changes and driving forces in the source region of the Yellow River [J]. Scientific Reports, 2025, 15(1):22569.

[5] WAN Z M, DOZIER J. A generalized split-window algorithm

- for retrieving land-surface temperature from space[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2018, 34(4): 892-905.
- [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] 卢晓宁, 黄玥, 洪佳, 等. 基于 Landsat 的黄河三角洲湿地景观时空格局演变[J]. 中国环境科学, 2018, 38(11): 4314-4324. [LU X N, HUANG Y, HONG J, et al. Spatial and temporal variations in wetland landscape patterns in the Yellow River Delta based on Landsat images[J]. China Environmental Science, 2018, 38(11): 4314-4324.]
- [8] 郭宇, 孙美琪, 王富强, 等. 水沙对黄河三角洲湿地景观格局演变的影响分析[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2018, 39(4): 36-41. [GUO Y, SUN M Q, WANG F Q, et al. Influence Analysis of runoff and sediment on the landscape pattern change in the Yellow River Delta Wetland[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2018, 39(4): 36-41.]
- [9] 丁洪安. 山东黄河三角洲国家级自然保护区[J]. 湿地科学与管理, 2013, 9(3): 2-3. [DING H A. Shandong Yellow River Delta national nature reserve[J]. Wetland Science and Management, 2013, 9(3): 2-3.]
- [10] FAN X F, WANG L, LI X P, et al. Increased discharge across the Yellow River Basin in the 21st century was dominated by precipitation in the headwater region[J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2022, 44: 101230.
- [11] ONDIEK R A, HAYES D S, KINYUA D N, et al. Influence of land-use change and season on soil greenhouse gas emissions from a tropical wetland: a stepwise explorative assessment[J]. Science of The Total Environment, 2021, 787: 147701.
- [12] 王子豪, 徐鑫溢, 陈庆锋, 等. 人类活动对黄河三角洲湿地碳排放的影响研究进展[J]. 湿地科学, 2024, 22(2): 310-326. [WANG Z H, XU X Y, CHEN Q F, et al. Research progress on impacts of human activities on carbon emissions in the Yellow River Delta Wetlands[J]. Wetland Science, 2024, 22(2): 310-326.]
- [13] 芦康乐, 杨萌尧, 武海涛, 等. 黄河三角洲芦苇湿地底栖无脊椎动物与环境因子的关系研究: 以石油开采区与淡水补给区为例[J]. 生态学报, 2020, 40(5): 1637-1649. [LU K L, YANG M Y, WU H T, et al. Composition of benthic invertebrate communities in reed (Phragmites australis) wetlands of the Yellow River Delta: comparisons between oil exploitation and freshwater recharge areas[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(5): 1637-1649.]
- [14] 张浩斌, 王婉, 宋妤婧, 等. 基于改进遥感生态指数的干旱内流区生态质量评价: 以阴山北麓塔布河流域为例[J]. 生态学报, 2024(2): 1-21. [ZHANG H B, WANG W, SONG Y J, et al. Ecological index evaluation of arid inflow area based on the modified remote sensing ecological index: a case study of Tabu River Basin at the northern foot of the Yin Mountains[J]. Acta Ecologica Sinica, 2024(2): 1-21.]
- [15] GOWARD S N, XUE Y K, CZAJKOWSKI K P. Evaluating land surface moisture conditions from the remotely sensed temperature/vegetation index measurements: an exploration with the simplified simple biosphere model[J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 79(2/3): 225-242.
- [16] 陈超, 何新月, 傅姣琪, 等. 基于缨帽变换的农田洪水淹没范围遥感信息提取[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(10): 1560-1566. [CHEN C, HE X Y, FU J Q, et al. A method of flood submerging area extraction for farmland based on tasseled cap transformation from remote sensing images[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2019, 44(10): 1560-1566.]
- [17] 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.
- [18] 曹雷, 丁建丽, 玉米提·哈力克, 等. 基于国产高分一号卫星数据的区域土壤盐渍化信息提取与建模[J]. 土壤学报, 2016, 53(6): 1399-1409. [CAO L, DING J L, UMUT H, et al. Extraction and modeling of regional soil salinization based on data from GF-1 satellite[J]. Acta Pedologica Sinica, 2016, 53(6): 1399-1409.]
- [19] 温小乐, 陈旭, 徐涵秋. 基于遥感生态指数的京郊南部城市生态评价: 以涿州市、固安县为例[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2022, 50(2): 286-292. [WEN X L, CHEN X, XU H Q. Ecological evaluation of cities in southern Beijing suburbs based on remote sensing ecological index: taking Zhuozhou City and Gu'an County as examples[J]. Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition), 2022, 50(2): 286-292.]
- [20] 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.]

Ecological Evaluation and Landscape Pattern Analysis of Yellow River Delta Wetlands

TAO Jie^{1,2}, LI Shala¹, ZHANG Liting¹, ZUO Qiting^{1,2}

(1. School of Water Conservancy and Transportation, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Henan International Joint Laboratory of Water Cycle Simulation and Water Environmental Protection, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: **[Objective]** Scientifically evaluate the ecological environment quality of the Yellow River Delta Wetlands, systematically analyze its landscape patterns, and provide scientific support for formulating effective protection and restoration strategies in the region. **[Methods]** Taking the Yellow River Delta Wetland Reserve as the study area, the remote sensing ecological index (RSEI) was used to evaluate the ecological environment quality of the wetland from 2001 to 2020 based on the platform of Google Earth Engine (GEE). The patch density, landscape shape index, Shannon diversity index, and contagion index were selected for the analysis of the landscape pattern, and the correlation between the RSEI and the landscape pattern was explored. **[Results]** (1) RSEI increased in general, forest and grassland restoration and effective constraints of human activities improved the RSEI from "poor" to "medium" level. The ecological quality of the Yi-Qian-Er protected areas and the eastern estuary of the Yellow River improved significantly due to the remediation of sewage outfalls. The western and central regions were affected by human activities and urban expansion, and the ecological environment was not optimistic. (2) From 2001 to 2019, the patch density and landscape shape index increased, and landscape diversity increased, but the contagion index declined, resulting in weakened landscape connectivity. In 2020, connectivity was restored in part of the area, and the contagion index increased significantly, resulting in the formation of more continuous dominant patches. (3) The temporal trends of landscape pattern indicators and RSEI were consistent, and the contagion index was negatively correlated with RSEI ($r = -0.72$), suggesting that excessive connectivity reduced ecosystem diversity and stability. Patch density, landscape shape index, and Shannon diversity index were positively correlated with RSEI ($r = 0.75, 0.76$, and 0.72), suggesting that landscape heterogeneity and diversity contributed to the enhancement of ecological quality. **[Conclusion]** The ecological environment quality of the Yellow River Delta Wetlands shows significant characteristics of overall improvement, local fluctuations, and spatial differentiation. The temporal change trend of the landscape pattern is consistent with the changes in RSEI. This study can provide a scientific basis for ecological protection and management in the study area.

Keywords: remote sensing ecological index (RSEI); landscape pattern; ecological environment quality; correlation analysis; Yellow River Delta Wetlands

(编辑:陈海涛)