

文章编号: 1674-5566(2020)05-0746-11

DOI:10.12024/jsou.20191002841

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

李凤莹¹, 张饮江^{1,2}, 赵志森^{1,2}, 程梦奇¹, 程梦雨¹, 汪祝方¹

(1. 上海海洋大学 海洋生态与环境学院, 上海 201306; 2. 上海海洋大学 水域环境生态上海高校工程研究中心, 上海 201306)

摘要: 海岸带湿地作为海陆系统的交错地带, 生态功能日益凸显。然而, 近年来沿海发达城市为满足经济的高速发展, 大规模围垦开发严重挤压了海岸带区域的生态空间。以上海南汇东滩湿地为研究对象, 取 2000、2006、2012 和 2018 年共 4 期的 Landsat 遥感影像, 借助遥感生态指数 (remote sensing based ecological index, RSEI) 对研究区生态格局进行客观、定量、可视化的监测与评价。结果表明: (1) 2000、2006、2012 和 2018 年 RSEI 指数均值分别为 0.295、0.227、0.405 和 0.489, 进一步分级处理后, 发现研究区生态环境质量主体由“较差”上升为“良好”, “优”与“较优”等级均有所增加, 湿地生态环境质量略向好的方向发展; (2) 对 2000—2018 年间 RSEI 指数进行差值变化检测, 研究区内生态环境状况“变差”、“不变”、“变好”的面积占比分别为 12.41%、53.32% 和 34.27%, 以“不变”为主; (3) RSEI 可以较好地反映 2000—2006 与 2012—2018 年间人类活动造成的海岸带生态频繁变化的现象, 具体表现在 RSEI 指数明显减小与增大, 该结果显示 RSEI 指数对南汇东滩湿地生态分析具有一定适用性。通过生态格局变化的可视化表达, 可以较好揭示城市海岸带湿地生态演化进程, 避免生态风险, 实现城市可持续发展和科学管理。

关键词: 遥感生态指数; 海岸带; 湿地; 生态评价

中图分类号: X 171 **文献标志码:** A

海岸带湿地作为海陆系统的交错地带, 具有调节气候、蓄水保滩、防浪固岸、净化土壤、保护生物多样性等重要作用^[1-2]。然而, 伴随着城镇化和工业化的快速推进, 沿海发达城市的土地利用不断发生变化^[2], 为了满足高速发展的经济, 越来越频繁的围填海工程严重挤压了海岸带区域的生态空间。

上海市作为我国东部沿海发达城市之一, 用地问题亟需解决。其南汇东滩湿地与人类居住、活动区之间无明显的界限, 一定程度上直接与城市经济中心接壤, 并长期缺乏有效地监管和政策保护^[3-4]。自 21 世纪以来, 多次大规模围垦造陆后, 海岸线不断向外扩张近 3 km, 导致其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。平原^[3]对南汇边滩 1990、2003 和 2008 年的影像数据进行了遥感解

译并对其生态系统健康展开评价; 毛义伟^[4]基于生态系统健康及压力模型, 计算了长江口沿海湿地的健康度、压力综合指数和响应综合指数; 俞相成^[5]对南汇滩涂促淤工程方案进行了比较与选取并初步评价其对环境及经济的影响。因此, 加强重视南汇东滩湿地对上海市的生态保护功能, 合理评价其生态格局变化及实现生态环境时空演化进程的可视化表达十分必要。

本文选取 2000、2006、2012 和 2018 年各 2 景的 Landsat 遥感影像, 借助遥感生态指数 (remote sensing based ecological index, RSEI), 利用 MultiSpec、ENVI 和 ArcGIS 为技术平台, 分析各年份绿度指标、湿度指标、热度指标和干度指标与研究区生态指数的相关度, 分级处理后对其生态环境质量主体定量研究。对研究区内沼泽湿地 (以潮滩区域为主, 包括芦苇、互花米草和海三棱

收稿日期: 2019-10-27 修回日期: 2020-03-17

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2012BAC07B03); 中国博士后科学基金(D-8005-18-0068-1/2)

作者简介: 李凤莹(1994—), 女, 硕士研究生, 研究方向为海岸环境生态学。E-mail: 493475584@qq.com

通信作者: 张饮江, E-mail: yjzhang@shou.edu.cn

蔗草群落)进行遥感解译,并对 2016 年实施重建海三棱蔗草带工程是否带来正面效应进行验证。以便探索在城市化发展进程中,沿海发达城市如何既能保证资源有效合理利用,又避免生态风险,为可持续发展战略的制定和城市生态安全管理提供科学依据和先行示范作用。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

上海南汇东滩湿地是位于长江口南槽通道 31°10' N 以南及杭州湾海区 121°50' E 以东 -5 m 等深线以上的边滩区域^[3]。区域整体呈“J”字形,全长约 46.8 km,总面积约 351.02 km²,底坡自西向东略向海倾斜,坡度为 0.001 5~0.002 8。南汇东滩湿地常年以东南季风为主,月平均风速为 5.3~5.6 m/s,平均波高为 0.4~0.9 m^[5]。潮汐表现为正规半日潮,分带性明显。自海向陆发育出以海三棱蔗草-互花米草-芦苇植物带为主的群落结构,是东亚-澳大利亚国际迁徙鸟类的重要栖息地和补给地。

1.2 数据来源与预处理

本文基础数据采自 2000 年 8 月 1 日、2006 年 8 月 26 日、2012 年 8 月 29 日和 2018 年 8 月 24 日各 2 景的 Landsat 遥感影像,轨道号为 118/038 和 118/039,空间分辨率为 30 m × 30 m。利用 MultiSpec、ENVI 和 ArcGIS 为技术平台,结合研究区行政区划图、土地利用现状图等为辅助图件数据。首先对 4 期影像进行几何精校正、辐射校正和大气校正,以减少各年份影像在传感器、地形、光照和大气影响下的差异^[6-8]。几何校正利用卫星自带的地理定位文件进行校正;辐射校正采用 Chavez 模型将影像参数的灰度值转换为传感器处反射率^[8];大气校正采用 FLAASH 命令消除大气和光照等因素对地物反射的影响。

2 研究方法

RSEI 指数是徐涵秋完全基于遥感技术提出,以自然因子为主的定量、客观、快速测评城市生态质量的综合生态评价方法^[9-12]。用归一化植被指数(normalized different vegetation index, NDVI)、湿度分量(Wet)、地表温度(land surface temperature, LST)和建筑-土壤指数(normalized difference built-up-soilindex, NDBSI)来代表 4 个人

类直观判断生态优劣的绿色、湿度、热度和干度指标,规避了单一指标分割评价的片面性和局限性。

2.1 绿度指标

绿度指标以植被指数代表,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,公式为

$$R_{NDVI} = (B_4 - B_3) / (B_4 + B_3) \quad (1)$$

式中: R_{NDVI} 代表绿度指标; B_4 和 B_3 分别代表 Landsat5 遥感数据中第 4、3 波段和 Landsat8 中第 5、4 波段。

2.2 湿度指标

湿度指标由湿度分量代表,通过缨帽变换得到 3 个分量,分别为亮度、绿度和湿度分量,其中湿度分量反映了植被、水体、土壤中的湿度值,是生态研究中体现生境变化的重要指标。不同卫星传感器的表达式不同^[9],本文选用公式为

$$R_{wet(TM)} = 0.0315B_1 + 0.2021B_2 + 0.3102B_3 + 0.1594B_4 - 0.6806B_5 - 0.6109B_7 \quad (2)$$

$$R_{wet(OLI)} = 0.1511B_1 + 0.1973B_2 + 0.3283B_3 + 0.3407B_4 - 0.7117B_5 - 0.4559B_7 \quad (3)$$

式中: $R_{wet(TM)}$ 代表 Landsat5 遥感卫星的湿度指标; $R_{wet(OLI)}$ 代表 Landsat8 遥感卫星的湿度指标; B_1 、 B_2 、 B_3 、 B_4 、 B_5 、 B_7 分别代表 Landsat5 中第 1、2、3、4、5、7 波段和 Landsat8 中第 2、3、4、5、6、7 波段。

2.3 热度指标

热度指标以地表温度代表,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,得到表达式为

$$R_{LST} = T / [1 + (\lambda T / \rho) \ln \varepsilon] \quad (4)$$

其中:

$$T = K_2 / \ln(K_1 / L_6 + 1) \quad (5)$$

$$L_6 = L_g \times L_{DN} + L_b \quad (6)$$

式中: R_{LST} 代表热度指标; T 为传感器的温度值; λ 为热红外波段的中心波长; ρ 为 1.438×10^{-2} mK; ε 为地表比辐射率; K_1 、 K_2 为定标参数; L_6 为热红外波段的辐射值; L_g 、 L_{DN} 和 L_b 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

干度指标由建筑指数和土壤指数代表,由于研究区中相当一部分滩涂裸地会造成地表干化,

因此需要将两个指数合成,表达式为

$$R_{\text{NDBSI}} = (R_{\text{IBI}} + R_{\text{SI}}) / 2 \quad (7)$$

其中:

$$R_{\text{IBI}} = \{ 2B_5 / (B_5 + B_4) - [B_4 / (B_4 + B_3) + B_2 / (B_2 + B_5)] \} / \{ 2B_5 / (B_5 + B_4) + [B_4 / (B_4 + B_3) + B_2 / (B_2 + B_5)] \} \quad (8)$$

$$R_{\text{SI}} = [(B_5 + B_3) - (B_4 + B_1)] / [(B_5 + B_3) + (B_4 + B_1)] \quad (9)$$

式中: R_{NDBSI} 为干度指标; R_{IBI} 为建筑指数; R_{SI} 为土壤指数; B_1 、 B_2 、 B_3 、 B_4 、 B_5 分别为 Landsa5 中第 1、2、3、4、5 波段的反射率和 Landsat8 中第 2、3、4、5、6 波段的反射率。

2.5 遥感生态指数

RSEI 指数的构建引用了统计学中的主成分分析^[5]。依次通过对特征光谱空间坐标轴的垂直旋转,实现多维数据压缩,变换后的统计数据根据对各主成分的贡献度自动确定,将 4 个指标信息集中于前 1 到 2 个主成分中,得到第一主成分的特征向量 PC1。为避免因量纲不同造成各指标计算时的权重失衡,RSEI 构建过程中对 4 个指标进行数据归一化处理,将各指标值统一到 0~1 之间^[6]。

将 4 个归一化处理后的指标合成新的图像,通过 ENVI 将研究区内的水体信息掩膜掉,以避免大量水体对结果产生干扰。为使 PC1 的数值代表正面的生态条件,用 1 减去 PC1,再一次进行归一化处理。表达式为:

$$R_0 = 1 - \{ \text{PC1} [f(R_{\text{NDVI}}, R_{\text{wet}}, R_{\text{LST}}, R_{\text{NDBSI}})] \} \quad (11)$$

$$R = (R_0 - R_{0\text{min}}) / (R_{0\text{max}} - R_{0\text{min}}) \quad (12)$$

式中: R_0 为初始生态指数;PC1 为第一主成分; R 为遥感生态指数; $R_{0\text{max}}$ 和 $R_{0\text{min}}$ 分别为初始生态指数的最大值和最小值。 R 越接近 1,表明研究区生态越好;反之,生态越差。

3 结果与分析

3.1 各年份植被分布时空变化分析

3.1.1 各年份归一化植被指数变化分析

表 1 为各年份归一化植被指数最大值、最小值、均值和标准差的统计值,图 1 为其直方分布图。由图表结合可知,2000—2018 年间,植被指数均值上升了 56.27%,标准差下降了 40.94%。其中,2000—2006 年间,均值下降了 31.53%;

2006—2012 年间,均值上升了 86.63%;2012—2018 年间,均值上升了 22.28%。

图 2 为各年份归一化植被指数分布图。由图可知,2000—2006 年间人为扩大了研究区面积,造成研究区内植被指数较高的蓝色区域断裂,呈现出片段化和破碎化,研究区整体充满黄色区域;2006—2012 年间,黄色区域和深蓝色区域均明显减少,浅蓝色和绿色区域占主体;2012—2018 年间,沿岸区域基本由黄色转变为植被指数较高的绿色,向陆侧出现较多黄色和橙黄色区域,向海侧植被指数分布伴有斑驳化趋势。

表 1 各年份归一化植被指数的统计值

Tab.1 Statistical value of NDVI of each year

参数 Parameters	2000	2006	2012	2018
最小值 Minimum	-0.931	-0.847	-0.862	-0.628
最大值 Maximum	0.792	0.719	0.751	0.756
均值 Mean	0.295	0.202	0.377	0.461
标准差 Stdev.	0.171	0.197	0.126	0.101

3.1.2 各年份沿岸植被群落分布变化分析

图 3 为 2000—2018 年间潮滩区域的植被群落分布图。由图可知,2000—2006 年间芦苇和互花米草群落由带状分布转变为点状分布,海三棱藨草群落基本消失,植物带完全断裂,光滩面积增大;2006—2012 年间,芦苇和互花米草群落逐渐恢复,均呈带状分布,出现极少数海三棱藨草群落,呈点状分布;2012—2018 年间,互花米草群落和光滩显著减少,芦苇和海三棱藨草群落均得到有效恢复,呈明显的带状分布。

结果表明:(1)南汇东滩湿地植被结构与分布频繁变化;(2)芦苇和互花米草群落相较于海三棱藨草群落具有较强的适应力和自我修复能力,可在较短时间内通过自然演替进行修复;(3)互花米草与海三棱藨草出现一定的种群竞争关系,两者分布呈现此消彼长态势。

3.2 各年份生态指数分析

3.2.1 各年份生态指数主成分分析

表 2 和表 3 分别为各年份 4 个指标的主成分分析结果。统计结果表明:(1)4 期数据的第一主成分(PC1)和第二主成分(PC2)特征值所占比例合计超过 90%,PC1 的比例均超过 70%,基本集中了 4 个指标的大部分特征,2000、2006、2012 和 2018 年分别为 77.86%、83.46%、70.63%、

74.18%;(2)通过分析4个指标对PC1的荷载,绿度指标和湿度指标呈正值,代表与生态环境改善呈正相关,热度指标和干度指标呈负值,代表与生态环境改善呈负相关,基本符合实际情况;

(3)分析其他主成分(PC2-PC4)的载荷,发现各指标特征值忽大忽小,与现实的相关性较小,因此舍弃,选用集成信息较好的PC1作为构建遥感生态指数的基础。

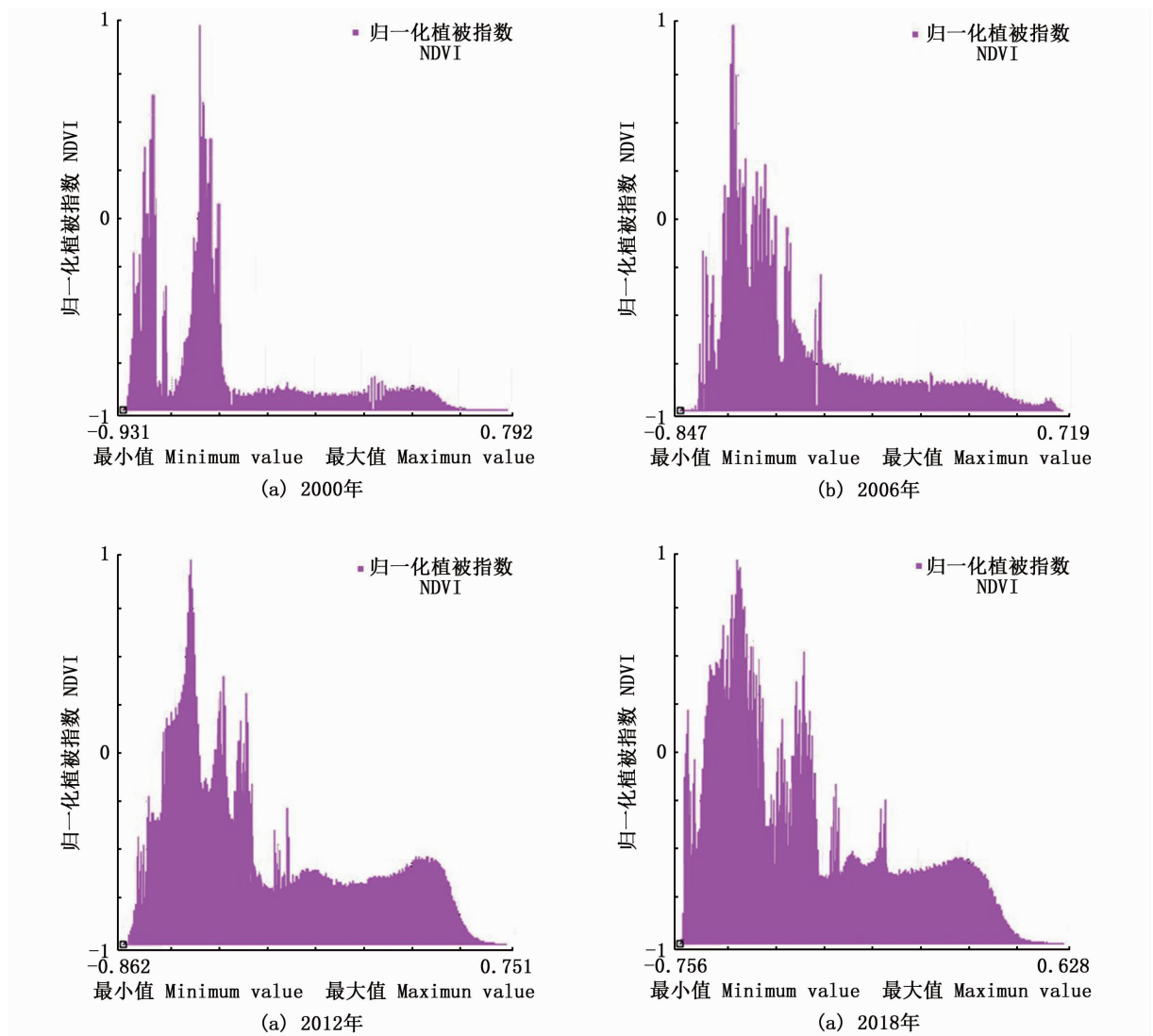


图1 各年份归一化植被指数直方分布图
Fig.1 Histogram of NDVI of each year

3.2.2 遥感生态指数变化分析

表4和表5统计了各年份4个指标和RSEI指数的最大值、最小值、均值、标准差、与RSEI的相关度。由表可知,2000—2018年间,RSEI指数均值从0.295上升到0.489,上升了65.76%。其中,2000—2006年间下降了23.05%;2006—2012年间上升了78.41%,2012—2018年间上升了20.74%。从各指标与RSEI的相关度来看,绿度指标与RSEI的正相关度最高,均为95%以上;干

度指标与RSEI的负相关度最高,均为85%以上。结果表明:(1)2000—2018年间,绿度和湿度对南汇东滩湿地生态环境的优化作用大于温度和干度的破坏作用,整体生态有一定改善;(2)绿度指标在南汇东滩湿地生态改善的正面效应中贡献度最大,干度指标在负面效应中贡献度最大;(3)湿度指标对湿地正面影响的贡献率始终大于温度指标对湿地负面影响的贡献率。

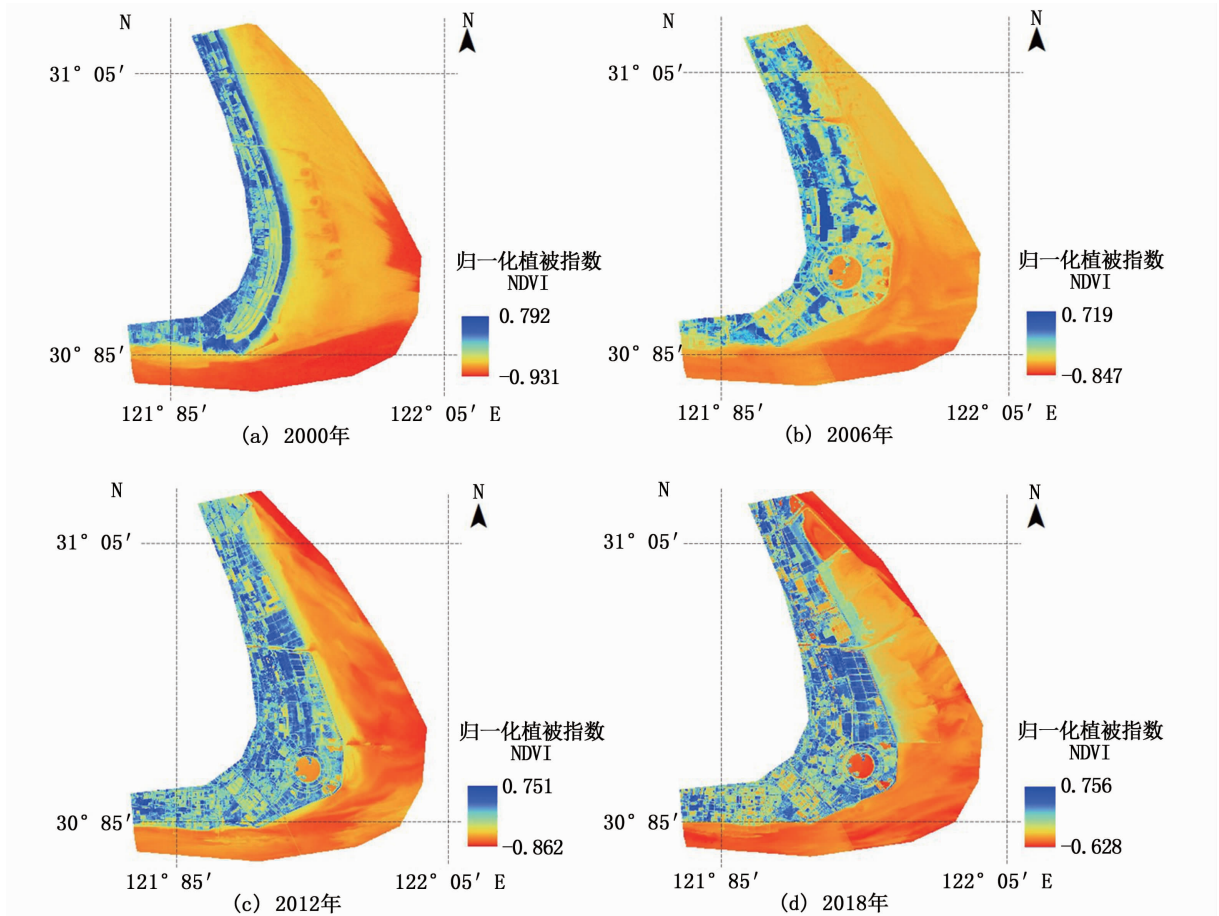


图 2 各年份归一化植被指数 (NDVI) 分布图
 Fig. 2 Distribution diagram of NDVI of each year

表 2 2000 年和 2006 年各指标主成分分析
 Tab. 2 Principal component analysis in 2000 and 2006

参数 Parameters	2000				2006			
	PC1	PC2	PC3	PC4	PC1	PC2	PC3	PC4
绿度指标 NDVI	0.725	0.472	0.424	-0.267	0.321	-0.589	-0.547	0.501
湿度指标 Wet	0.623	-0.277	-0.353	0.641	0.414	-0.375	-0.466	-0.688
热度指标 LST	-0.293	-0.314	-0.564	-0.713	-0.757	-0.367	0.337	0.423
干度指标 NDBSI	-0.108	-0.775	-0.614	-0.103	-0.394	0.615	-0.607	0.312
特征值 Eigenvalue	0.2465	0.0468	0.0154	0.0079	0.1691	0.0172	0.0092	0.0071
特征值贡献率 Percent eigenvalue/%	77.86	14.78	4.87	2.49	83.46	8.49	4.54	3.51

表 3 2012 年和 2018 年各指标主成分分析
 Tab. 3 Principal component analysis in 2012 and 2018

参数 Parameters	2012				2018			
	PC1	PC2	PC3	PC4	PC1	PC2	PC3	PC4
绿度指标 NDVI	0.639	-0.495	-0.495	-0.319	0.668	0.494	0.459	0.314
湿度指标 Wet	0.128	-0.253	-0.187	0.941	0.018	-0.288	-0.319	0.903
热度指标 LST	-0.756	0.407	0.502	0.106	-0.743	-0.405	-0.445	-0.293
干度指标 NDBSI	-0.057	0.725	-0.685	0.052	-0.038	0.713	-0.699	-0.019
特征值 Eigenvalue	0.1818	0.0529	0.0163	0.0064	0.2218	0.0509	0.0198	0.0065
特征值贡献率 Percent eigenvalue/%	70.63	20.56	6.33	2.48	74.18	17.02	6.62	2.17

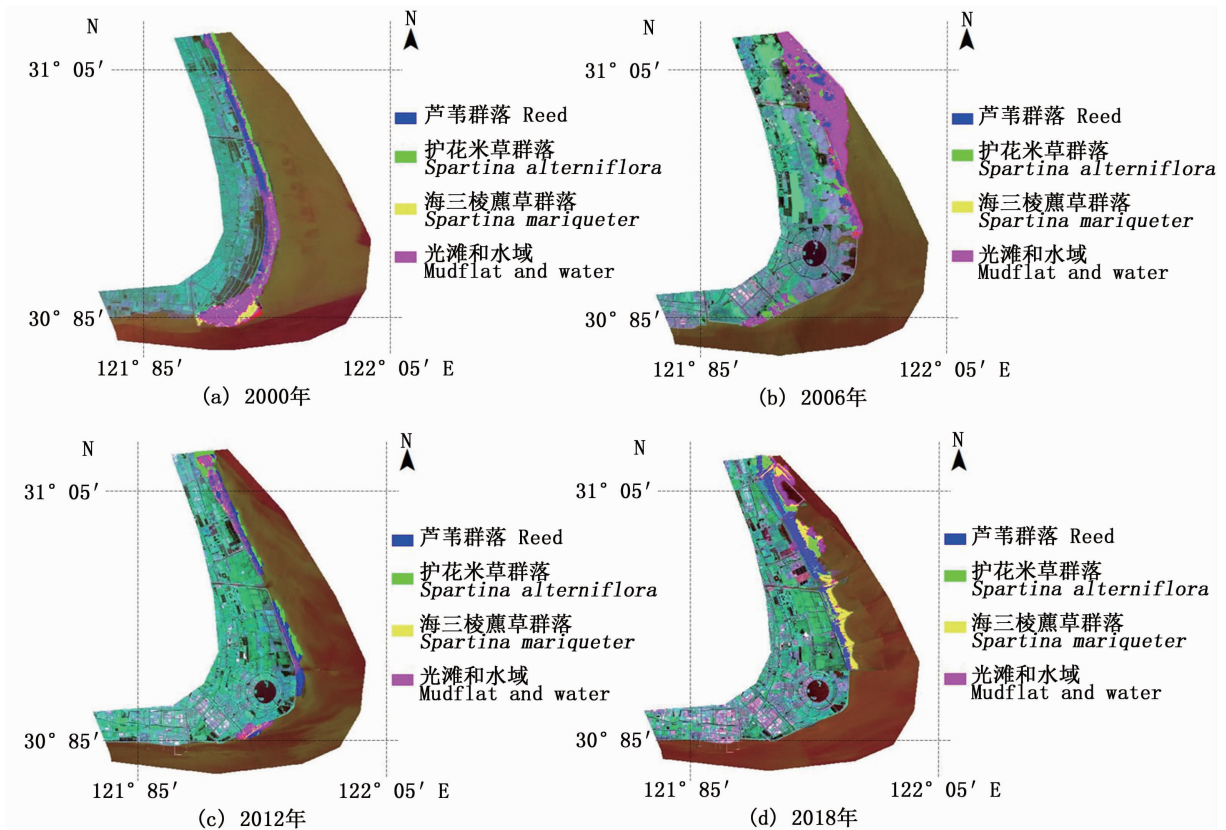


图3 各年份潮滩区域植物群落分布图

Fig. 3 Distribution diagram of plant community of each year in tidal flat area

表4 2000年和2006年各指标和RSEI指数的统计值

Tab.4 Statistical value of 4 indicators and remote sensing ecological index in 2000 and 2006

参数 Parameters	2000					2006				
	NDVI	Wet	LST	NDBSI	RSEI	NDVI	Wet	LST	NDBSI	RSEI
最小值 Minimum	-0.931	-0.591	-0.433	-0.412	0	-0.847	-0.386	-0.402	-0.435	0
最大值 Maximum	0.792	0.857	0.648	0.611	0.591	0.719	0.667	0.528	0.513	0.696
均值 Mean	0.295	0.647	-0.247	0.322	0.295	0.202	0.249	-0.268	0.388	0.227
标准差 Stdev.	0.171	0.216	0.124	0.289	0.199	0.197	0.131	0.096	0.084	0.211
与 RSEI 相关度 Correlation	0.996	0.731	-0.587	-0.871	1	0.976	0.803	-0.607	-0.952	1

表5 2012年和2018年各指标和RSEI指数的统计值

Tab.5 Statistical value of 4 indicators and remote sensing ecological index in 2012 and 2018

参数 Parameters	2012					2018				
	NDVI	Wet	LST	NDBSI	RSEI	NDVI	Wet	LST	NDBSI	RSEI
最小值 Minimum	-0.862	-0.481	-0.738	-0.358	0	-0.628	-0.388	-0.512	-0.371	0
最大值 Maximum	0.751	0.801	0.882	0.674	0.711	0.756	0.821	0.653	0.681	0.691
均值 Mean	0.377	0.35	0.261	0.369	0.405	0.461	0.378	0.154	0.271	0.489
标准差 Stdev.	0.126	0.231	0.128	0.081	0.162	0.101	0.226	0.097	0.181	0.157
与 RSEI 相关度 Correlation	0.978	0.798	-0.551	-0.919	1	0.971	0.775	-0.506	-0.934	1

3.2.3 遥感生态指数分级

为实现 RSEI 指数的可视化分析,将其主成分变换得到的结果以约 0.167 为间隔,划分为 6

个等级。如图 4 所示,红、橘黄、黄、绿、浅蓝和深蓝分别代表差、较差、一般、良好、较优和优的生态指数等级。由图可知,2000—2006 年间,研究

区内极大部分充满了红色和橘黄色,红色呈减少趋势,橘黄色和黄色呈显著增加趋势;2006—2012年间,红色和橙黄色明显减少,黄色区域占主体;

2012—2018年间,蓝色和深蓝色明显增多,红色和橙黄色基本消失,绿色区域占主体。

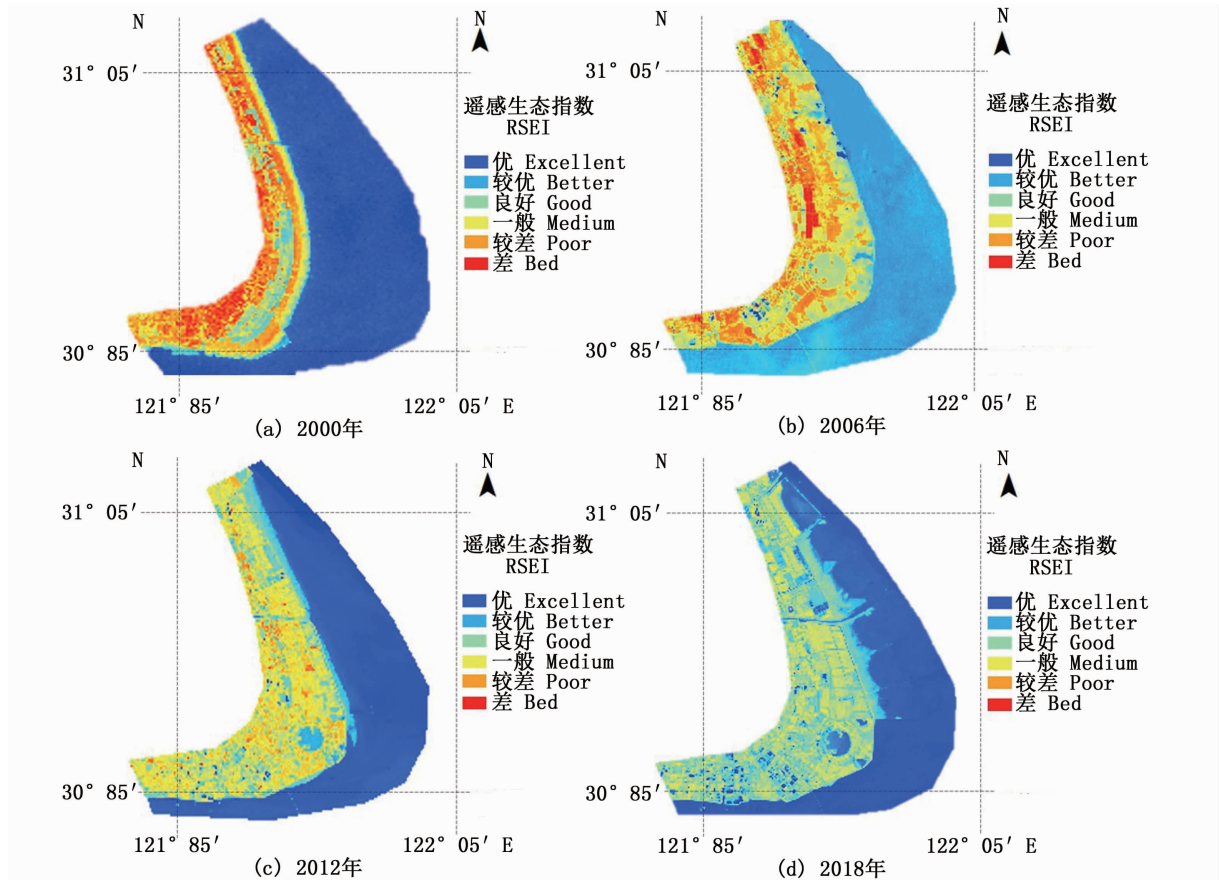


图4 各年份 RSEI 遥感生态指数分布图

Fig. 4 Distribution diagram of RSEI of each year

表6对各年份生态指数等级面积进行了统计和差值变化检测,由于计算时将海域面积掩膜处理^[12],以及海岸线逐年变化,导致各年份面积不同。由表可知:(1)2000年研究区总体生态状况以较差为主,面积占比超过40%;(2)2006年生态状况以较差为主,面积占比超过55%,相比

上一年面积增加了75.17 km²,其次为良好等级;(3)2012年生态状况以一般等级为主,面积占比为42.38%,差等级面积基本消失;(4)2018年生态状况以良好等级为主,良好及以上面积占比为66.8%,差与较差基本消失。2012—2018年间 RSEI 增加的幅度大于2000—2006年间减小的幅

表6 各年份生态等级面积和占比的统计值

Tab. 6 Statistical value of ecological grade area and percentage of every year

RSEI 等级 RSEI grade	2000		2006		2012		2018	
	面积 Are/km ²	比例 Percentage/%	面积 Are/km ²	比例 Percentage/%	面积 Are/km ²	比例 Percentage/%	面积 Are/km ²	比例 Percentage/%
优 Excellent	0	0	6.362	2.13	9.963	2.95	31.767	9.05
较优 Good	14.536	7.18	8.572	2.87	47.486	14.06	60.937	17.36
良好 Better	31.825	15.72	53.286	17.84	97.438	28.85	141.777	40.39
一般 Medium	29.618	14.63	24.97	8.36	143.134	42.38	116.539	33.20
较差 Poor	88.511	43.72	165.385	55.37	39.718	11.76	0	0
差 Bad	37.959	18.75	40.114	13.43	0	0	0	0
合计 Total	202.49	100.00	298.69	100.00	337.739	100.00	351.020	100.00

度,其中,2000、2006、2012 和 2018 年较优和优的面积占比分别为 7.18%、5%、17.01%、26.41%。综上情况得出,南汇东滩湿地近 20 年来生态质量有所改善,尤其是近 10 年来,生态质量明显改善。

3.3 南汇东滩湿地生态质量变化分析

为了解南汇东滩湿地近 20 年来生态质量时空变化,基于 RSEI 对 2000 和 2018 年的结果进行差值变化检测,如图 5。图中红、浅绿和绿分别代表生态环境质量变差、不变和变好。生态质量变差的区域集中于人类活动较密集的向陆带,尤其是人工湖附近区域;变好区域分布在向海的外围潮滩带。表 7 是南汇东滩湿地 2000—2018 年 RSEI 检测的统计值,由表可知,面积占比由大到小为:不变、变好和变差。其中,生态质量略变或不变面积为 187.164 km²,占比 53.32%;生态

质量变好的面积为 120.295 km²,占比 34.27%;生态质量变差的面积为 43.562 km²,占比 12.41%。

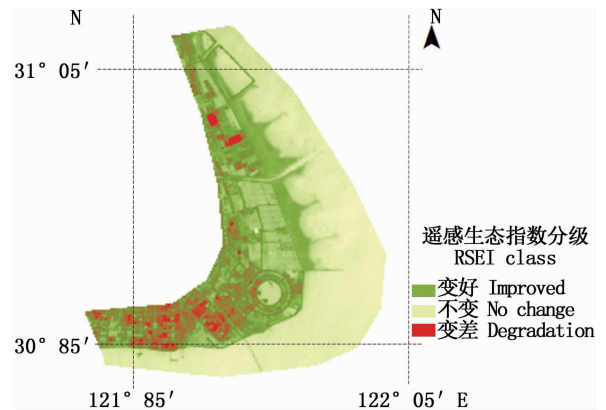


图 5 南汇东滩湿地 2000—2018 年 RSEI 变化检测图
Fig. 5 Detection diagram of RSEI change of wetland from 2000 to 2018

表 7 南汇东滩湿地 2000—2018 年 RSEI 检测

Tab. 7 Statistical value of detection of RSEI from 2000 to 2018

类别 Class	2000—2018			
	极差 Range	类面积 Class area/km ²	级面积 Grade area/km ²	比例 Percentage/%
变差 Degradation	-4	21.959	43.562	12.41
	-3	2.872		
	-2	8.712		
	-1	10.019		
不变 No change	0	187.164	187.164	53.32
	1	84.207	120.295	34.27
变好 Improved	2	18.044		
	3	15.032		
	4	3.012		

4 讨论

4.1 南汇东滩湿地植被状况或出现不平衡

表 1、图 1 和图 2 表明近 20 年间植被覆盖度及生长活力明显好转。然而,2012—2018 年间植被指数分布图呈现出斑驳化趋势,尤其是研究区北部沿岸,出现一处或多处低植被覆盖率区域,表明近 5 年间植被覆盖度和健康水平有所下降,生态状况或出现不平衡和轻微恶化。经分析,该区域靠近长江口南槽通道,是污染物排放的主要流通方向,同时靠近工农业集中地带,或由于河口污染物质(如石油类、重金属及富营养盐等)的增加造成植被退化^[13];另一方面,该区域渔业活动频繁,较多的人工鱼塘、渔场侵占了原有的鸟

类栖息地^[14],使生物多样性下降,从而影响植被分布。

4.2 RSEI 指数评价方法具适用性

由图 2、图 4 和图 5 可知:2000—2006 年间植被带及生境出现片段化,生态变差的区域主要集中在向陆带。这与向陆带人类活动频繁,开发强度大,受损后难以修复;而向海带人类活动较弱,以自然生态为主,破坏后易于修复有关。

20 世纪末以来,研究区内多次大范围围垦外扩,导致沿岸生境严重破坏。基于 RS 与 GIS 影像数据,1983—1995 年间南汇东滩年均围垦增速约 1.23 km²;1995—2000 年间年均增速约 7.95 km²;2002—2005 年间年均增速高达 35.27 km²^[15]。自 1994 年起,上海市引入互花米草用于

人工促淤^[16],基于2003年影像数据,上海市互花米草总面积约4 553.37 hm²,其中南汇边滩分布最多,其次为崇明东滩和九段沙^[17]。由于互花米草对本土物种造成冲击,引起生态系统的连锁反应^[18-20],导致生态质量每况愈下,2016年起,上海市政府实施重建海三棱藨草植物带工程,对沿岸生境进行重构和修复,并取得一定成效^[21-23]。以上情况直接或间接地反映在4个生态指标和RSEI统计值上,并与本研究得出的生态环境检测结果基本一致。因此,RSEI指数可以较好地评价研究区内生态状况和格局变化,具有一定适用性。

4.3 人工修复为南汇东滩湿地带来正面效应

由图3可以看出,2012—2018年间,黄色部分明显增多,且由北向南基本连续,呈带状分布;绿色部分明显减少,呈块状分布,原本区域被黄色取代并扩大。由此表明,海三棱藨草植株扩散迅速,覆盖率较高,群落重构效果良好。这与2016年南汇东滩大面积移植海三棱藨草植株,并取得一定修复效果的结论基本吻合^[24-26]。因此,人工修复对南汇东滩湿地生态优化起到了正面作用。

5 结论

(1)近20年来,南汇东滩湿地生态环境整体上较脆弱,易受人类活动影响;(2)2018年归一化植被指数反映出近期或已出现生态破坏现象,接下来的工作是加强相关方面的监测与研究;(3)南汇东滩湿地是上海市重要的环境资源,在城市化背景下,要不断优化对策,严格规范生态保护红线,对已受损的区域尽快实施有效修复,重构优良的海岸带湿地生态;(4)该评价方法完全基于遥感影像,一定程度上较为客观,但会受前期图像预处理的影响,因此不断规范和标准化该评价方法是今后研究的方向。

参考文献:

[1] 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]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2006, 42(4): 527-533.

[2] 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]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(12): 4214-4225.

[3] 平原. 南汇边滩湿地景观格局分析和生态系统健康评价[D]. 上海: 华东师范大学, 2010.
PING Y. The Landscape pattern analysis and assessment of Wetland ecosystem health for Nanhui Biantan, Shanghai [D]. Shanghai: East China Normal University, 2010.

[4] 毛义伟. 长江口沿海湿地生态系统健康评价[D]. 上海: 华东师范大学, 2008.
MAO Y W. Health assessment on coastline wetland ecosystem around the Yangtze River Delta [D]. Shanghai: East China Normal University, 2008.

[5] 俞相成. 上海市南汇东滩滩涂促淤围垦工程研究[D]. 南京: 河海大学, 2005.
YU X C. Research on the reclaiming project in the east tidal flat of Nanhui in Shanghai [D]. Nanjing: Hohai University, 2005.

[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] CHANDER G, MARKHAMB 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.

[8] REZA M I H, ABDULLAHS A. Regional index of ecological integrity: a need for sustainable management of natural resources [J]. Ecological Indicators, 2011, 11(2): 220-229.

[9] 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.

[10] 张浩,杜培军,罗洁琼,等. 基于遥感生态指数的南京市生态变化分析[J]. 地理空间信息, 2017, 15(2): 58-62.
ZHANG H, DU P J, LUO J Q, et al. Ecological change analysis of Nanjing city based on remote sensing ecological index [J]. Geospatial Information, 2017, 15(2): 58-62.

[11] 刘智才,徐涵秋,李乐,等. 基于遥感生态指数的杭州市城市生态变化[J]. 应用基础与工程科学学报, 2015, 23(4): 728-739.
LIU Z C, XU H Q, LI L, et al. Ecological change in the

- Hangzhou area using the remote sensing based ecological index[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2015, 23(4): 728-739.
- [12] 徐涵秋. 区域生态环境变化的遥感评价指数[J]. *中国环境科学*, 2013, 33(5): 889-897.
- XU H Q. A remote sensing index for assessment of regional ecological changes[J]. *China Environmental Science*, 2013, 33(5): 889-897.
- [13] 汤驰, 叶芝祥, 李再波, 等. 机场周边环境大气 PM₁₀ 中重金属的污染特征及健康风险评估[J]. *环境与健康杂志*, 2012, 29(1): 77-79.
- TANG C, YE Z X, LI Z B, et al. Pollution characteristics and health risk assessment of heavy metals in PM₁₀ in air around the airport[J]. *Journal of Environment and Health*, 2012, 29(1): 77-79.
- [14] 谭娟, 黄沈发, 王卿, 等. 上海市滩涂湿地生态系统健康评价及成因分析[J]. *长江流域资源与环境*, 2014, 23(12): 1705-1713.
- TAN J, HUANG S F, WANG Q, et al. Ecosystem health assessment and causes analysis of tidal marshes in Shanghai [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2014, 23(12): 1705-1713.
- [15] 徐俊杰, 陈勇. 基于 RS 与 GIS 的南汇东滩围垦研究[J]. *上海国土资源*, 2011, 32(3): 18-22.
- XU J J, CHEN Y. Study of tidal flat reclamation at Eastern Nanhui based on RS and GIS [J]. *Shanghai Land & Resource*, 2011, 32(3): 18-22.
- [16] 刘瑜, 韩震. 基于遥感的长江口南汇潮滩植被群落时空动态变化[J]. *上海海洋大学学报*, 2009, 18(5): 579-585.
- LIU Y, HAN Z. The study of spatial and temporal variations on vegetation communities in Nanhui tidal flat of Changjiang Estuary by using remote sensing [J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2009, 18(5): 579-585.
- [17] 李贺鹏, 张利权, 王东辉. 上海地区外来种互花米草的分布现状[J]. *生物多样性*, 2006, 14(2): 114-120.
- LI H P, ZHANG L Q, WANG D H. Distribution of an exotic plant *Spartina alterniflora* in Shanghai [J]. *Biodiversity Science*, 2006, 14(2): 114-120.
- [18] 陈中义. 长江口海三棱藨草的生态价值及利用与保护[J]. *河南科技大学学报(自然科学版)*, 2005, 26(2): 64-67.
- CHEN Z Y. Ecological value of *Scirpus mariqueter* grassland and its utilization strategy in Yangtze River Estuary [J]. *Journal of Henan University of Science and Technology (Natural Science)*, 2005, 26(2): 64-67.
- [19] MA Z J, LI B, ZHAO B, et al. Are artificial wetlands good alternatives to natural wetlands for waterbirds? A case study on Chongming Island, China [J]. *Biodiversity & Conservation*, 2004, 13(2): 333-350.
- [20] CHEN Z Y, LI B, ZHONG Y, et al. Local competitive effects of introduced *Spartina alterniflora* on *Scirpus mariqueter* at Dongtan of Chongming Island, the Yangtze River estuary and their potential ecological consequences [J]. *Hydrobiologia*, 2004, 528(1): 99-106.
- [21] 陶燕东, 钟胜财, 厉成伟, 等. 南汇东滩湿地海三棱藨草的生态修复效果研究[J]. *海洋湖沼通报*, 2018(5): 40-49.
- TAO Y D, ZHONG S C, LI C W, et al. A study on the effect of ecological restoration and reconstruction of *Scirpus mariqueter* community: A case of Nanhui coasts [J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2018(5): 40-49.
- [22] 陶燕东, 于克锋, 何培民, 等. 围垦后南汇东滩海三棱藨草的空间分布及其影响因子研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2017, 26(7): 1032-1041.
- TAO Y D, YU K F, HE P M, et al. Distribution of *Scirpus mariqueter* on Nanhui coasts after reclamation and the associated affecting factors [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2017, 26(7): 1032-1041.
- [23] 胡忠健, 马强, 曹浩冰, 等. 长江口滨海湿地原生海三棱藨草种群恢复的实验研究[J]. *生态科学*, 2016, 35(5): 1-7.
- HU Z J, MA Q, CAO H B, et al. A trial study on revegetation of the native *Scirpus mariqueter* population in the coastal wetland of the Yangtze Estuary [J]. *Ecological Science*, 2016, 35(5): 1-7.
- [24] 张雪薇, 韩震, 刘美君, 等. 长江口南汇湿地植被的光谱吸收特征研究[J]. *海洋学研究*, 2018, 36(2): 50-54.
- ZHANG X W, HAN Z, LIU M J, et al. Study on spectral absorption characteristics of vegetation in Nanhui Wetland of Yangtze River Estuary [J]. *Journal of Marine Sciences*, 2018, 36(2): 50-54.
- [25] 张雪薇, 韩震, 王文柳, 等. 夏秋季节潮滩植被光谱特征的差异性研究[J]. *海洋湖沼通报*, 2018(5): 32-39.
- ZHANG X W, HAN Z, WANG W L, et al. Study on the spectral characteristics difference of tidal flat vegetation in summer and autumn [J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2018(5): 32-39.
- [26] 艾金泉. 基于时间序列多源遥感数据的长江河口湿地生态系统长期演变过程与机制研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2018.
- AI J Q. Long-term evolution process and mechanisms of wetland ecosystem in the Yangtze River estuary using time-series multi-sensor remote sensing data [D]. Shanghai: East China Normal University, 2018.

Evaluation of ecological pattern change of Nanhui Dongtan wetland in Shanghai based on remote sensing ecological index

LI Fengying¹, ZHANG Yinjiang^{1,2}, ZHAO Zhimiao^{1,2}, CHENG Mengqi¹, CHENG Mengyu¹, WANG Zhufang¹

(1. *Marine Ecology and Environment, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China*; 2. *Engineering Research Centre of Shanghai University, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China*)

Abstract: As a staggered zone of land and sea system, the ecological function of coastal wetland is increasingly significant. However, in recent years, in order to maintain the rapid economic development, developed coastal cities have carried out large-scale reclamation and development, which has seriously compressed the ecological space of coastal zone. Taking the Dongtan wetland in Nanhui, Shanghai as the research object, Landsat remote sensing images were taken from 4 issues in 2000, 2006, 2012 and 2018, and based on the remote sensing ecological index (RSEI) to monitor and evaluate the ecological pattern of the research area in an objective, quantitative and visual way. Results show: (1) The mean of RSEI in 2000, 2006, 2012 and 2018 is 0.295, 0.227, 0.405 and 0.489. After the classification treatment, it was found that the ecological environment quality in the study area rose from “poor” to “good”, and both “excellent” and “better” increased, which shows the ecological environment quality of the Dongtan wetland was slightly improved. (2) According to the image differencing method of RSEI between 2000 and 2018, the area proportion of the eco-environmental status in the study area of “degradation”, “no change” and “improved” is 12.41%, 53.32% and 34.27%, and main body is “nochange”. (3) The RSEI has suitability to Dongtan wetland. Through the visual expression of the change of ecological pattern, the ecological evolution process of urban coastal wetland can be better revealed, and avoid some ecological risks, to achieve sustainable development of cities and scientific management.

Key words: remote sensing ecological index; coastal zone; wetland; ecological evaluation