

## 江苏盐城滨海湿地系统格局变化及其对丹顶鹤生境的影响

Pattern change of the coastal wetland system and its dynamic impact on the habitat of red-crowned cranes in Yancheng, Jiangsu Province

李景霞;付碧宏

引用本文:

李景霞, 付碧宏. 2021. 江苏盐城滨海湿地系统格局变化及其对丹顶鹤生境的影响. 遥感学报, 25 (12): 2507-2519 DOI: 10.11834/jrs.20210606.

Li J X and Fu B H. 2021. Pattern change of the coastal wetland system and its dynamic impact on the habitat of red-crowned cranes in Yancheng, Jiangsu Province. National Remote Sensing Bulletin, 25 (12): 2507-2519 DOI: 10.11834/jrs.20210606.

在线阅读 View online: <http://www.ygxb.ac.cn/thesisDetails?columnId=19404482>

---

## 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

### 对遥感科学应用的一点看法

Towards more extensive and deeper application of remote sensing

遥感学报. 2019, 23 (4):567-569.

### 无人机遥感: 大众化与拓展应用发展趋势

UAV remote sensing: Popularization and expand application development trend

遥感学报. 2019, 23 (6):1046-1052.

### 中国对地观测20年科技进步和发展

Scientific and technological progress and development prospect of the earth observation in China in the past 20 years

遥感学报. 2021, 25 (1):267-275.

### 中国高分辨率对地观测系统重大专项建设进展

Development of China high-resolution earth observation system

遥感学报. 2016, 20 (5):775-780.

### 斯里兰卡亚洲象栖息地生境质量时空变化及分异特征

Spatio-temporal patterns and differentiations of habitat quality for Asian elephant (*Elephas maximus*) habitat of Sri Lanka

遥感学报. 2021, 25 (12):2472-2487.

# 江苏盐城滨海湿地系统格局变化及其对丹顶鹤生境的影响

李景霞<sup>1,2</sup>, 付碧宏<sup>1</sup>

1. 中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100094;

2. 中国科学院大学, 北京 100049

**摘要:** 世界遗产地江苏盐城滨海湿地是亚洲最重要的丹顶鹤越冬栖息地之一, 近几十年来, 由于农业、工业、水产养殖业及城镇化等人类活动的加强, 湿地系统的格局发生了巨大变化, 丹顶鹤适宜生境出现急剧退化。本研究利用1989年—2019年间的多时相遥感数据对盐城滨海湿地进行分类, 分析湿地系统的格局变化及丹顶鹤生境连接度的动态变化。研究表明, 过去30年盐城滨海湿地中自然湿地呈现快速退化, 其面积减少49.46%; 而人工湿地面积增长69.24%, 其面积增加主要通过占用自然湿地和围垦填海的方式来实现, 围垦重心具有自北向南和从陆到海方向迁移的趋势。其中, 作为丹顶鹤适宜生境的碱蓬盐沼和盐碱地的面积减少了489.10 km<sup>2</sup>, 适宜生境面积占比从1989年19.88%降至2019年4.36%。结构连接度计算结果显示, 适宜生境斑块的连接度指数从1.83下降至1.30, 斑块间距离增大, 破碎化加剧; 而功能连接度的计算结果显示, 2019年整体连接度指数和概率连接度指数均小于0.01, 连接网络总体破碎, 适宜生境连接网络存在于小区域范围, 区域连接网络主要集中在中介度指数高的遗产地核心区和条子泥湿地, 它们是丹顶鹤适宜生境的关键节点。遗产地核心区自2014年实行退耕还湿、退渔还湿等措施以来, 丹顶鹤适宜生境有了很大改善。建议除了加强对现有丹顶鹤适宜生境区域的科学保护外, 应加大对关键节点自然湿地的恢复力度, 提高丹顶鹤适宜生境斑块间的连接度。

**关键词:** 遥感应用, 滨海湿地, 丹顶鹤生境, 世界自然遗产地, 多时相遥感, 景观连接度

**引用格式:** 李景霞, 付碧宏. 2021. 江苏盐城滨海湿地系统格局变化及其对丹顶鹤生境的影响. 遥感学报, 25(12): 2507–2519

Li J X and Fu B H. 2021. Pattern change of the coastal wetland system and its dynamic impact on the habitat of red-crowned cranes in Yancheng, Jiangsu Province. National Remote Sensing Bulletin, 25(12): 2507–2519 [DOI: 10.11834/jrs.20210606]

## 1 引言

滨海湿地处于陆地生态系统和海洋生态系统的过渡带, 是高度动态变化、复杂脆弱的湿地生态系统之一, 也是自然和人类活动相互作用最活跃的区域(恽才兴和蒋兴伟, 2002)。盐城滨海湿地位于江苏省沿海经济开发区, 2019年盐城市人口821.35万人, 近30年城镇人口比例从15.21%上升到64.9%, 城镇化水平显著提高, 此外, 作为中国重要粮食主产区, 粮食总产量增长75.88%, 生产总值从102.5亿元迅速增长为5702.3亿元。人口增长和生产活动使得滨海湿地遭受过度开发, 滩涂围垦规模不断扩大, 自然湿地面积减少, 滨

海湿地景观格局变化剧烈。同时, 盐城滨海湿地是数百万迁徙候鸟的停歇地(MacKinnon等, 2012), 也是中国国家一级保护动物丹顶鹤在全球范围内主要的越冬地(Su和Zou, 2012)。世界自然遗产地盐城滨海湿地在全球濒危候鸟保护方面具有突出普遍价值, 但近几十年来, 人类对湿地资源的过度开发造成丹顶鹤越冬适宜生境迅速萎缩、破碎化严重, 导致盐城越冬丹顶鹤数量明显下降(张亚楠等, 2018)。

滨海湿地类型复杂多样, 其生态景观格局的变化过程需要进行长期而系统的观测和监测评估, 遥感技术可以为湿地生态景观格局变化过程的观

收稿日期: 2021-01-09; 预印本: 2021-09-14

基金项目: 第二次青藏高原综合科学考察研究(编号:2019QZKK0901)

第一作者简介: 李景霞, 1995年生, 女, 硕士研究生, 研究方向为资源与环境遥感。E-mail: lijx@aircas.ac.cn

通信作者简介: 付碧宏, 1966年生, 男, 研究员, 研究方向为资源与环境遥感。E-mail: fubh@aircas.ac.cn

测和监测提供一种快速精准的技术手段。湿地生态系统的格局变化和生态过程是景观生态学的研究重点之一(邬建国, 2007), 随着景观生态学的发展, 湿地景观格局成为探究湿地演变规律、建立变化驱动因素模型的重要途径(索安宁等, 2016), 其主要研究方法包括景观格局指数法和空间叠置分析法等(卢善龙等, 2011; 陈琳等, 2017; Lin等, 2018)。相关研究聚焦盐城滨海湿地的丹顶鹤生境需求与选择偏好, 认为生境类型变化是影响丹顶鹤越冬期活动的主要因素(刘大伟等, 2016; 刘伶等, 2018; Carrasco等, 2018), 生境斑块间的连续性影响了物种的繁殖和栖息(逢谦, 2014; 欧维新和袁薇锦, 2015)。滨海湿地空间结构变化对鸟类栖息地的功能变化至关重要, 需要从长时间和大区域尺度对其适宜生境进行深入研究。目前滨海湿地监测研究大多集中于湿地的土地覆被变化及其驱动因素探究(温庆可等, 2011; 廖华军等, 2014; Zhu等, 2018; 朱金峰等, 2019)。因此, 本研究拟利用1989年—2019年的多源、多时相卫星遥感数据监测和分析盐城滨海湿地生态系统格局变化, 对丹顶鹤适宜生境结构连接度、基于物种扩散能力的功能连接

度进行评价, 探究影响丹顶鹤生境变迁的关键因素, 为盐城世界滨海湿地遗产未来的合理规划和恢复保护提供重要科学数据和技术支撑。

## 2 研究区概况

江苏盐城滨海湿地是亚洲最大的淤泥质潮间带湿地, 由响水、滨海、射阳、亭湖、大丰、东台等6个县市的沿海滩涂组成, 根据县界和河流将研究区划分为响滨段、射阳段、大丰段和东台段(图1)。其地理范围位于 $32^{\circ}34'N$ — $34^{\circ}28'N$ ,  $119^{\circ}27'E$ — $121^{\circ}16'E$ , 北起灌河, 南至新港河, 西以新海堤公路为边界, 向东延伸至潮间带。盐城滨海湿地主要为地势平坦的废黄河三角洲平原和海积平原, 属于暖温带和亚热带的过渡带, 降水充沛, 日照充足, 湿地植被类型主要为互花米草, 碱蓬和芦苇(吴亚茜等, 2018)。盐城滨海湿地独特的生态环境和气候条件使其成为迁徙丹顶鹤种群最重要的越冬地。在2019年的第43届世界遗产大会上, 盐城滨海湿地作为中国黄(渤)海候鸟栖息地(第一期)被列入《世界遗产名录》(UNESCO和World Heritage Committee, 2019), 它成为中国首个滨海湿地类世界自然遗产。

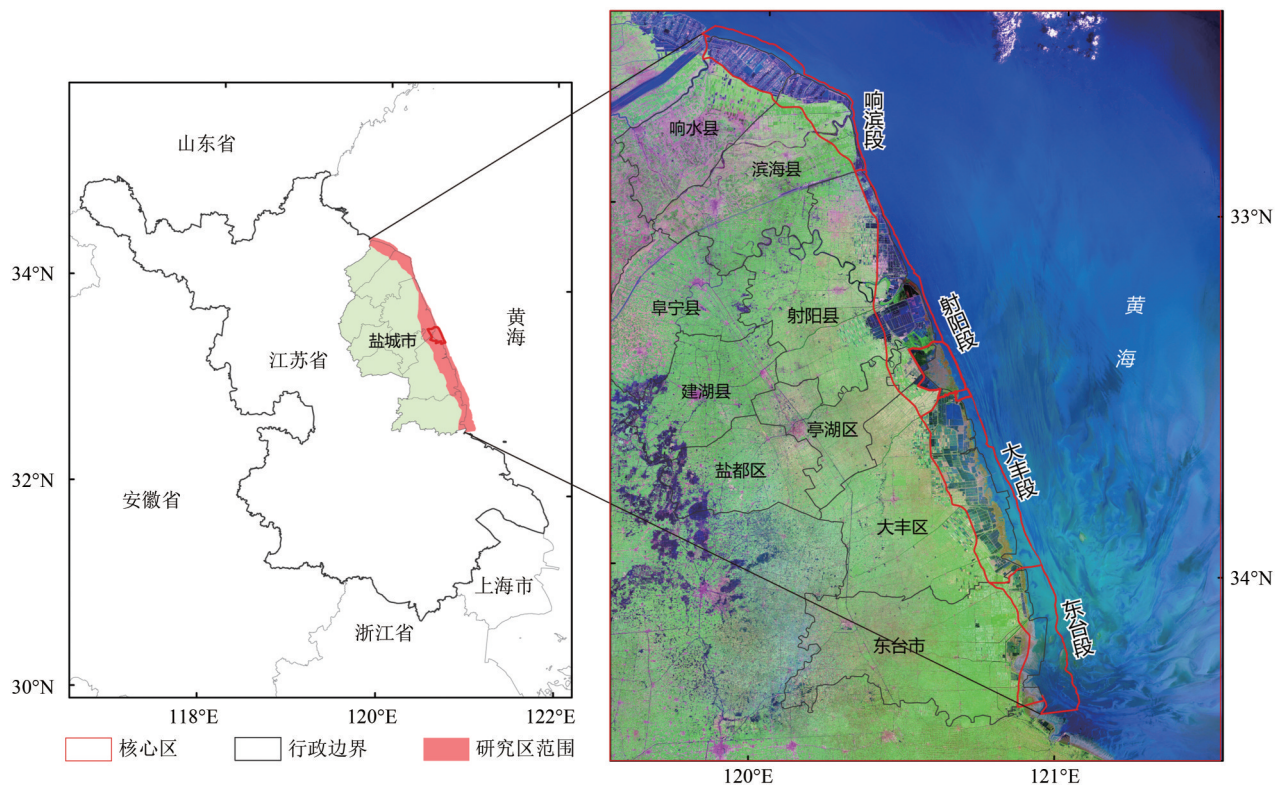


Fig. 1 Location of the Yancheng coastal wetland



3 遥感数据源与研究方法

3.1 遥感数据源

本文以 1989 年、1996 年、2002 年、2009 年、2014 年、2019 年 6 期 Landsat TM、OLI 遥感数据及 2019 年 Sentinel-2 遥感数据作为主要数据源。覆盖研究区的 Landsat 遥感数据共 12 景及典型研究区 Sentinel-2 遥感数据 2 景（表 1），数据质量良好且无云覆盖。遥感数据选择当年 10 月至次年 2 月的丹顶鹤越冬期内，其中行列号为 120/036 的影像只覆盖响水区范围，响水区主要为成片盐田，土地覆被类型和季节变化影响较小，越冬期内没有可用影像时用邻近时相代替。预处理利用 ENVI5.4 进行大气校正、影像镶嵌和裁剪。2019 年两景 Sentinel-2 数据用于分析核心区和条子泥垦区变化。辅助数据包括用于确定研究区范围的中国潮间带模拟数据集（韩倩倩 等，2019）和《江苏盐城湿地珍禽国家级自然保护区总体规划（2008—2020）》，用于土地覆被分类参考验证的国家基础地理信息中心 30 m 全球地表覆盖数据 GlobeLand 30 和 Google Earth 高分辨率遥感数据，以及历年盐城统计年鉴。

表 1 主要遥感数据

Table 1 Main remote sensing data used in this study			
编号	时相	行列号	卫星来源
1	1989-10-21	119/37	Landsat 5 TM
2	1989-08-09	120/36	Landsat 5 TM
3	1996-12-11	119/37	Landsat 5 TM
4	1997-01-19	120/36	Landsat 5 TM
5	2002-10-25	119/37	Landsat 5 TM
6	2002-10-16	120/36	Landsat 5 TM
7	2009-01-13	119/37	Landsat 5 TM
8	2009-12-06	120/36	Landsat 5 TM
9	2014-12-29	119/37	Landsat 8 OLI
10	2014-12-04	120/36	Landsat 8 OLI
11	2019-11-09	119/37	Landsat 8 OLI
12	2019-12-02	120/36	Landsat 8 OLI
13	2019-03-15	T51STT	Sentinel-2B
14	2019-11-15	T51SUS	Sentinel-2A

3.2 研究方法

3.2.1 土地覆被分类

根据盐城地物类型特点建立土地覆被分类体

系（表 2）（李玉凤和刘红玉，2014；刘润红 等，2017），一级分类将研究区分为湿地和非湿地类型。参考《湿地公约》湿地分类标准和滨海湿地分类，将湿地分为人工湿地和自然湿地，自然湿地根据滨海湿地中的优势植被型组划分，由海向陆依次为互花米草盐沼、碱蓬盐沼和芦苇沼泽。高大密集的互花米草盐沼和芦苇沼泽为高覆被区域，生长稳定期植被覆盖度达 70%—100%；碱蓬为中覆被区域，植被覆盖度约为 50%，植株小于 1 m。盐碱地植被覆盖度低于 30%，为低覆被区域（任武阳 等，2019）。自然湿地还包括浅海水域、泥质海滩。人工湿地包括水田、坑塘。运用支持向量机分类法对盐城滨海湿地进行土地覆被分类，结合高分辨率遥感数据和野外地面点分类结果进行验证，共选取验证点 722 个，其中野外地面点 74 个，6 期分类结果总体精度均大于 85%。

表 2 土地覆被分类体系

Table 2 Land cover classification system			
一级	二级	三级	类型说明
湿地	自然湿地	浅海水域	常年淹没，低潮时水位常小于 6 m
		泥质海滩	潮间带淤泥质海滩
		互花米草盐沼	以互花米草为优势群落的滨海盐沼
		碱蓬盐沼	以碱蓬为优势群落的滨海盐沼
	人工湿地	芦苇沼泽	以芦苇为优势群落的草丛沼泽
		盐碱地	植被覆盖度低的耐盐植被区域
		水田	种植水稻等农作物的农业用地
非湿地	建设用地	坑塘	水库、盐田、养殖池和沟渠等
		建设用地	工业和城镇用地等

3.2.2 丹顶鹤生境类型划分

为进一步探讨丹顶鹤生境变迁，将盐城滨海湿地地物类型分为了丹顶鹤适宜生境、补充生境、边缘生境、不适宜生境和非生境（吕士成，2008）（表 3）。丹顶鹤越冬的最主要生境类型是中低覆被区域的碱蓬盐沼和盐碱地；附近有芦苇、稻田等遮蔽物、人类活动较少的坑塘和水田为丹顶鹤补充生境，自然湿地不能完全满足丹顶鹤觅食需求时，直接抽取海水的养殖池和盐田中含有的大量水生生物、收割后水田中的稻穗成为丹顶鹤的食物来源；潮间带泥质海滩和浅海海域为边缘生境，丹顶鹤能在退潮时露出的平坦泥滩上停歇和觅食，但由于没有遮蔽物，丹顶鹤不会长时间停留；芦苇、互花米草高大且密集，覆盖度高，不适宜丹

顶鹤的觅食栖息等活动。

表3 丹顶鹤生境类型划分  
Table 3 Habitat types of red-crowned cranes

生境类型	类型说明
适宜生境	碱蓬盐沼
	盐碱地
补充生境	坑塘
	水田
边缘生境	泥质海滩
	浅海水域
不适宜生境	芦苇沼泽
	互花米草盐沼
非生境	建设用地

### 3.2.3 景观连接度

景观连接度指景观促进或阻碍物种或其生态过程在源斑块间的运动程度，是揭示空间格局与生态过程关系的方法（吴昌广等，2010）。景观连接度分为结构连接度和功能连接度。

结构连接度基于土地覆被类型的空间结构，反映形状大小各异的景观斑块在空间上的排列组合，体现景观的连续性和异质性。本文采用景观格局指数度量丹顶鹤适宜生境斑块的结构连接度，指数选取斑块密度PD（Patch Density）、周长—面积积分维数PAFRAC（Perimeter—Area Fractal Dimension）、连接度指数CONNECT（Connectance Index）、结合度指数COHESION（Patch Cohesion Index）（邬建国，2007）。PD指一定面积内的斑块数量，反映景观的破碎化程度；PAFRAC反映在人类活动干扰下斑块形状的复杂性，取值范围为1—2，取值越接近2说明斑块形状越复杂，取值为1.5左右时斑块的稳定性差；CONNECT反映一定距离阈值下的斑块联系程度；COHESION指示斑块类型自然状态下的连接度，斑块分布聚集时，自然连接度增大。

功能连接度能通过景观的连接情况反映物种在景观中的运动等行为情况，探究湿地斑块间的潜在连接度（张宇等，2016）。研究以丹顶鹤日活动最大距离3 km为景观连接度的距离阈值（钦佩等，2004）。指数选择组分数NC（Number of Components）、整体连接指数IIC（Integral Index of Connectivity）和概率连接指数PC（Probability of Con-

nectivity）。采用Conefor 2.6软件计算指数，软件广泛应用于景观生态规划和生物栖息地保护（谢慧玮，2014）。组分数指在结构或功能上相互连接的景观斑块数部分数，区域内景观连接度越高，组分数越小。研究证实景观变化监测和物种保护中，IIC和PC指数适合应用于大型飞禽生境的连接度研究（Pascual-Hortal和Saura，2006；Saura和Pascual-Hortal，2007）。计算公式如下：

$$IIC = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{a_i \cdot a_j}{1 + nl_{ij}}}{A_L^2} \quad (1)$$

$$P_{ij}^* = e^{-kd_{ij}} \quad (2)$$

$$PC = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_i \cdot a_j \cdot p_{ij}^*}{A_L^2} \quad (3)$$

$$BC = \sum_i \sum_j \frac{g(i, j, k)}{g(i, j)} \quad (4)$$

式中， $n$ 为斑块数量， $a_i$ 和 $a_j$ 为斑块 $i$ 和 $j$ 的面积， $nl_{ij}$ 为斑块 $i$ 和 $j$ 最短路径的链接数， $A_L$ 为研究区域总面积。式（2）中 $p$ 为物种在斑块 $i$ 和 $j$ 直接扩散的可能性， $d_{ij}$ 为斑块间的距离，距离阈值为3 km时 $p$ 取值0.35。

中介度BC（Betweenness Centrality）的计算中， $g(i, j, k)$ 为斑块 $k$ 的最短路径数总和， $g(i, j)$ 为斑块间最短路径总和，其中 $i, j \neq k$ 。指数为通过某斑块的最短路径与通过除了该斑块外的斑块的最短路径数量的比，用于识别生境斑块中的关键节点，取值越高说明该节点位于大多数斑块的最短路径上。

## 4 结果与分析

### 4.1 盐城湿地系统的景观格局变化

#### 4.1.1 盐城滨海湿地面积变化

盐城滨海湿地1989年—2019年分布和面积变化如图2和图3所示。自然湿地中潮间带泥质海滩随海水涨落呈现相互交替的出露、淹没状态，图3中未进行统计。过去30年盐城滨海湿地中人工湿地面积的增加主要通过侵占自然湿地和围垦填海的方式实现。自然湿地呈现快速退化的趋势，面积减少了941.45 km<sup>2</sup>，损失49.46%，其中湿地植被面积减少654.75 km<sup>2</sup>。人工湿地面积增加862.47 km<sup>2</sup>，增长69.24%。

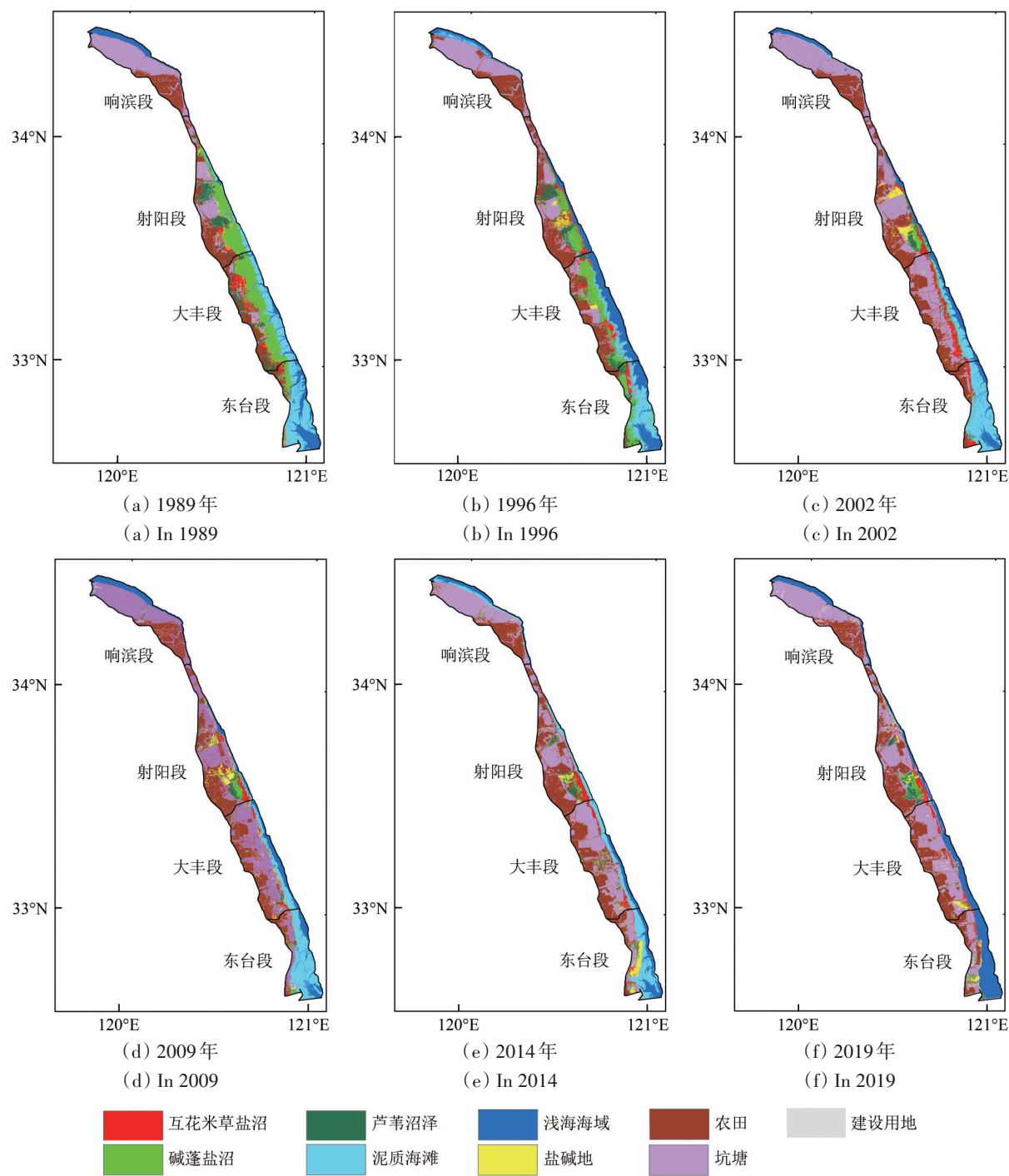


图2 盐城滨海湿地土地覆被分类

Fig. 2 Classification of the typical land cover in the Yancheng coastal wetland

从图2(a)可以看出,1989年优势种群碱蓬连续分布在射阳段至东台段;1989年—2002年碱蓬盐沼和芦苇沼泽大面积消失,碱蓬盐沼面积萎缩超过88%,芦苇沼泽面积消失68.36%,互花米草迅速成为优势种群,沿海呈条带状分布。2002年—2009年,随着人类围垦活动增强,互花米草面积萎缩了54.04%,条带状分布消失。近10年湿地植被面积逐渐稳定。植被类型不明显的盐碱地受人

类开垦活动和潮汐自然活动综合作用明显,面积出现先下降后上升,再下降的过程。在1989年—1996年开发初期受到破坏后盐碱地面积减少,1996年—2009年大面积的围垦造陆后其面积增加,2009年—2019年区域进一步开发成为养殖池和盐田后适宜生境面积下降。人工湿地中水田和坑塘集中成片分布,坑塘包括养殖池、盐田和沟渠,沟渠包括改造过程中保留的自然沟渠和人工沟渠,



用于水田灌溉排水和盐田排输盐卤。近30年来,水田面积占整体湿地面积比例从17.23%上升到28.71%,盐田占比从22.30%上升到38.19%。

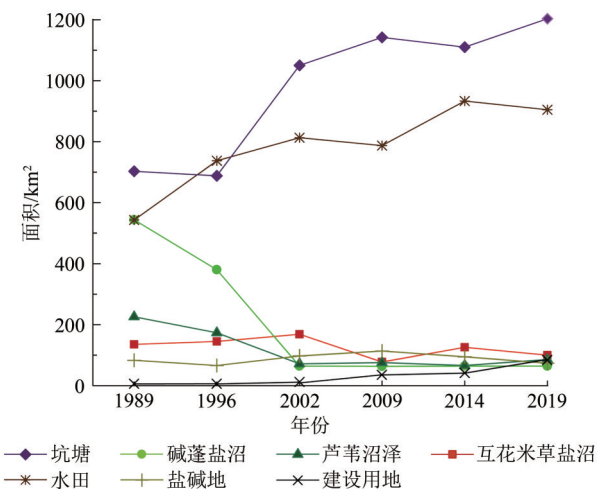


图3 盐城滨海湿地中主要土地覆被类型面积变化  
Fig. 3 Area variation of the typical land cover types in the Yancheng coastal wetland

自然湿地中碱蓬盐沼和盐碱地为丹顶鹤正向选择的越冬栖息地,从图4可以看出1989年—2002年间丹顶鹤适宜生境迅速下降,从19.88%下降到5.10%,2009年后适宜生境面积略微增加后减少。近30年来适宜生境面积共减少489.10 km²,减少到仅为1989年面积的21.93%,而人工湿地作为丹顶鹤的补充生境面积持续增加。虽然补充生境的整体比例不断上升,但适宜生境变化是影响丹顶鹤越冬活动的最主要因素,2000年来盐城越冬丹顶鹤记录数量呈下降趋势。

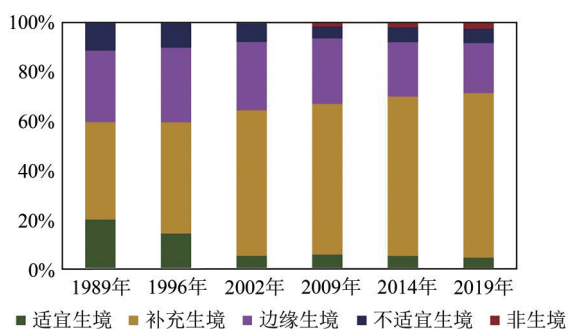


图4 丹顶鹤生境类型的比例变化  
Fig. 4 Proportion variations of habitat types for the red-crowned cranes

#### 4.1.2 盐城滨海湿地类型变化

为了进一步探究自然湿地与人工湿地类型间的转移关系,对1989年—1996年、1996年—2002年、

2002年—2009年、2009年—2019年4个时期进行土地覆被转移分析。不同时期不同区域的滨海湿地土地覆被类型转移差异显著,其中自然湿地大多沿海岸分布,部分分布在河滩,优越的自然条件成为坑塘围垦开发的良好先天条件。1989年—1996年,自然湿地转化为水田的面积最大,为189.40 km²,其次为大丰段的沿海坑塘,其余3个时间段以自然湿地转化成坑塘面积最大,同时存在水田和坑塘间互相转化;1996年—2002年土地类型变化最为剧烈,主要集中在射阳段、大丰段湿地,区域内水田和坑塘规模化开发;2002年—2009年开发区域集中在大丰段沿海滩涂,呈狭长条状;2009年—2019年围垦区域集中在大丰段和东台段,大丰段围垦范围为大丰港口以南的泥质海滩,东台段为条子泥的泥质海滩区域(图5),2014年围垦面积约为97 km²,围垦初期阻隔了潮水,抑制了互花米草的扩张,区域内形成一定的泥质海滩和植被盐沼,有利于吸引丹顶鹤的栖息停留,2019年区域开发为水田和养殖池。围垦改变了海水流向,使得条子泥沙脊形态随之发生变化。

近30年盐城滨海湿地不断围垦自然湿地,改造为大面积的水田、盐田和养殖池等人工湿地类型。人工湿地沿新洋港和大丰港等几个重要港口进行围垦开发,围垦边界由植被沼泽向浅海泥质海滩扩张,整体由北部射阳段向南部东台段围垦。湿地开发的同时,退耕、退渔还湿累积面积达到433.76 km²。

#### 4.2 丹顶鹤适宜生境景观连接度变化

##### 4.2.1 结构连接度分析

为探究丹顶鹤适宜生境结构连接度变化,利用Fragstats 4.2软件计算1989年—2019年丹顶鹤适宜生境的景观格局指数,计算结果反映湿地变化过程的两个特点:适宜生境从大斑块破碎到小斑块消失,从斑块整体连接到只存在小区域连接。

1989年盐城滨海湿地未被大范围开发,丹顶鹤适宜生境成片存在,斑块密度(PD)最小,1996年丹顶鹤适宜生境遭到了严重的破坏,斑块破碎化进一步加剧,PD迅速上升;1996年—2019年适宜生境斑块总面积变化不大,但PD逐渐下降,表明生境高度破碎化形成了大量孤立的湿地斑块,孤立的湿地斑块被异质环境包围,衰退

速度进一步加快，单位面积内的斑块数量减小。周长-面积分维数（PAFRAC）在1989年—1996年呈上升趋势，湿地开发初期斑块形状复杂、不规则。1996年—2019年指数下降，反映出生境斑块在人类围垦活动下边界趋于规则，取值在1.5左右斑块形状稳定性差。PD与PAFRAC出现相同的变化趋势，反映出人类活动下丹顶鹤适宜生境的大斑块破碎、小斑块消失的过程。连接度指数

（CONNECT）表示斑块自然连接情况，而结合度指数（COHESION）表示在丹顶鹤日活动最大距离阈值下的斑块连接度。1989年—2002年丹顶鹤适宜生境面积比例下降且分布分散，COHESION迅速下降，2009年和2019年适宜生境面积稳定且出现小区域集中。指数变化反映了丹顶鹤适宜生境从南北整体连接，到斑块破碎后只存在小区域连接的过程。

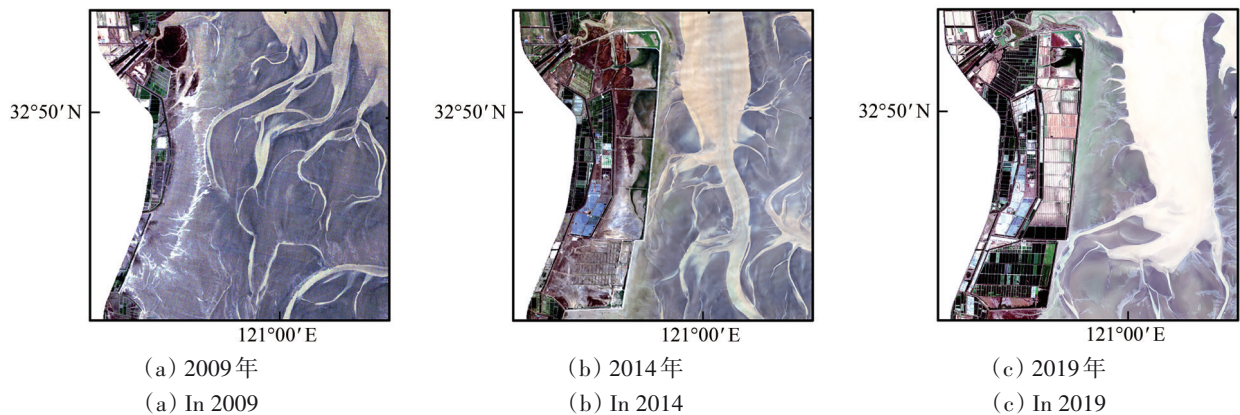


图5 2009年—2019年条子泥垦区变化  
Fig. 5 Variation of Tiaozini reclamation area from 2009 to 2019

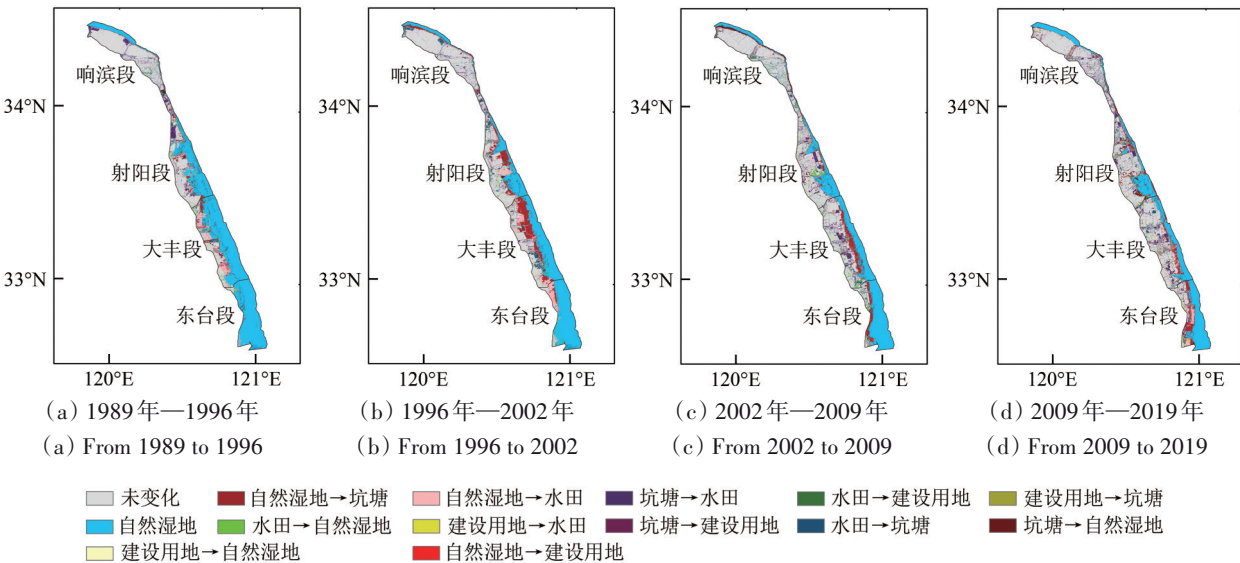


图6 盐城滨海湿地土地覆被转移的分布及方向  
Fig. 6 Land cover transfer distribution and direction of the Yancheng coastal wetland

4.2.2 功能连接度分析

功能连接度反映丹顶鹤适宜生境的潜在连接度。丹顶鹤为具有领域性的大型水禽，在生存繁殖等活动过程中需要一定面积的生境斑块。丹顶鹤生存所需要的斑块半径大于100 m，因此筛选丹

顶鹤栖息面积大于3.14 ha的生境斑块。对于飞禽来说生境中不需要实际的廊道，当生境斑块的距离在种群所能达到的阈值内时则存在生态廊道，指数能预测丹顶鹤在斑块间的活动情况。

1989年—2019年丹顶鹤适宜生境连接线分布



和功能连接度变化如图8和表4所示。相互孤立的斑块划分为一个组分,近30年组分数(NC)逐渐增大,1989年—2002年增长速度最快,景观中相互孤立的组分从2增加到12。1989年丹顶鹤适宜生境整体连接指数(IIC)和概率连接指数(PC)均达到最大值,湿地斑块间存在良好的连接性,从北向南形成良好的连接网络。1989年—2002年,丹顶鹤适宜生境遭到大面积的破坏,IIC和PC指数均快速下降。随着研究区内水田和养殖池等人工湿地占比增加,破碎化加剧。2009年丹顶鹤适宜

生境面积进一步减少,盐城珍禽国家级自然保护区核心区面积锐减,适宜生境斑块间距离变大,大丰段适宜生境斑块仍存在连接。2014年大丰段适宜生境斑块破碎化进一步增强,IIC指数和PC指数低于0.01,射阳段和大丰段的斑块间不连接。2019年自然保护区适宜生境面积增大,但盐城滨海湿地连接网络总体破碎,只存在小区域的连接网络,条子泥适宜生境随着人类生产活动进一步萎缩。适宜生境斑块间距离过大,面积较小,丹顶鹤越冬生存活动受到限制。

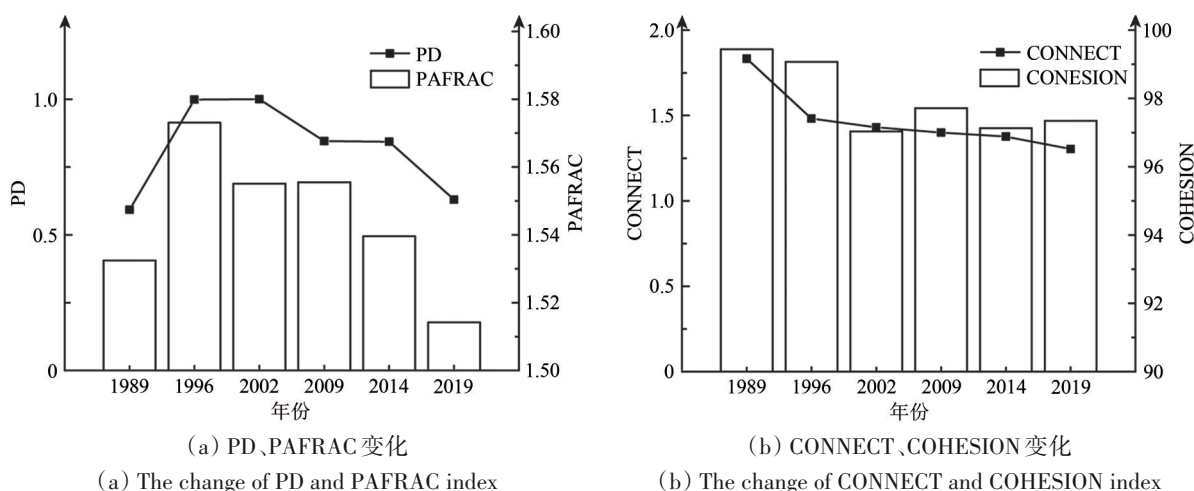


图7 丹顶鹤适宜生境景观格局指数变化

Fig. 7 The change of landscape pattern indices of suitable habitat for red-crowned cranes

结合丹顶鹤适宜生境连接线网络,计算得到每个生境斑块的中介度指数BC。中介度指数常用于识别生境斑块中的关键节点,取值越高说明该斑块对于维持周边破碎斑块的连接起着重要作用(Duan等,2020)。利用自然间断分级法将指数BC分为高、中、低3个等级类型。目前丹顶鹤生境的关键节点为遗产地核心区及条子泥区域(图8),为重点保护和修复区域。

## 5 讨论

### 5.1 盐城滨海湿地系统格局变化的关键因素

上述分析表明,过去30年间世界遗产地盐城滨海湿地系统的格局发生了显著变化,湿地中土地覆被类型发生变化的面积达1819.57 km<sup>2</sup>,占盐城滨海湿地总面积(3150 km<sup>2</sup>)的57.72%。究竟是哪些因素影响湿地类型发生如此剧烈变化呢?

影响其变化的关键驱动因素有两个方面:一

方面,1995年盐城地区开始实施的“海上苏东”发展战略驱动,对沿海滩涂进行围垦造陆、发展养殖业和加工业、建设码头港口等(宫宁等,2016),建设用地从2.02 km<sup>2</sup>增加到81.15 km<sup>2</sup>,分别有21.79 km<sup>2</sup>、20.36 km<sup>2</sup>和27.58 km<sup>2</sup>的滩涂沼泽、水田和坑塘转化为建设用地。其中,1989年—2002年自然湿地通过圈围滩涂和修建养殖池的方式进行改造,丹顶鹤生境类型由自然湿地转变成自然湿地与人工湿地的复合生境,2002年—2019年湿地被进一步改造为工业码头和城镇等建设用地,城镇化使得盐城滨海湿地系统格局发生不可逆的变化,彻底破坏了丹顶鹤越冬生境(图8);另一方面,1982年盐城地区为了促淤造陆引进外来物种互花米草,引种后其面积比例从1989年的13.68%迅速上升到2019年的30.98%。互花米草快速扩张侵占了本地物种碱蓬的生存空间,区域由优势种群碱蓬主导的单一分布的湿地格局演变为多层次湿地植被分布。这改变了沿海滩涂水文、

土壤、底栖生物等湿地要素，具体表现为高大密  
集的互花米草使得鸟类难以栖息停留，同时植被  
促进了泥滩沉积，改变了海水流向。

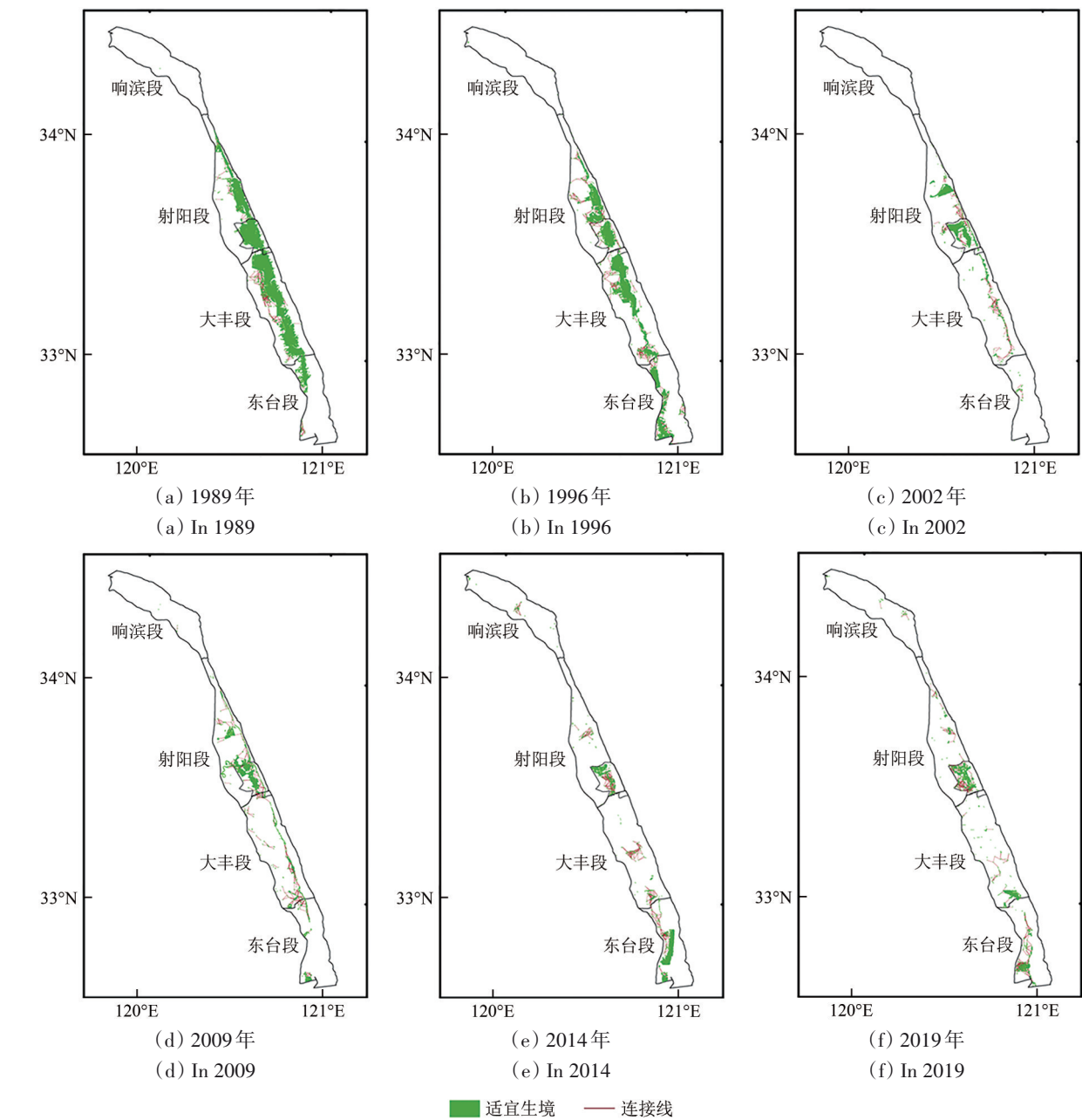


图8 丹顶鹤适宜生境连接线分布及其变化

Fig. 8 The distribution of connection line among the suitable habitats for the red-crowned cranes

表4 丹顶鹤适宜生境功能连接度指数

Table 4 Index of functional connectivity of suitable habitat for the red-crowned cranes

指数类型	年份					
	1989	1996	2002	2009	2014	2019
NC	2	4	12	13	17	20
IIC	0.1045	0.0383	0.0071	0.0034	0.0029	0.0058
PC	0.2430	0.0516	0.0071	0.0050	0.0035	0.0065

5.2 遗产地核心区格局变化与丹顶鹤生境保护

丹顶鹤适宜生境由沿海岸连续分布变成孤立分布，遗产地核心区是目前仅存的完整自然湿地，也是丹顶鹤越冬生境的关键节点（图9），核心区湿地格局变化直接影响到丹顶鹤栖息生境。从图10可知，近30年遗产地核心区湿地格局变化明显：1989年核心区96%面积为自然湿地；2002年

核心区北部碱蓬盐沼变为裸露盐碱地, 芦苇沼泽被开发为水田, 南部自然湿地被开发成养殖池和水田, 互花米草沿东部泥质海滩开始生长, 随后沿海岸连续分布并随着潮水向陆地延伸, 碱蓬生存空间被人工湿地和互花米草侵占, 核心区自然湿地下降至 85.21%; 2014 年开始实施的退耕、退渔还湿等措施, 并采取植物替代的方法治理互花米草, 通过连通水系、恢复碱蓬植被等措施改善丹顶鹤生境。2019 年北部盐碱地和南部的养殖池恢复为天然的芦苇沼泽, 碱蓬生境面积增加为修复前的 2.25 倍, 互花米草面积减少至 64.25%, 核心区自然湿地面积恢复至 89.41%, 生态修复和治理工程取得显著成果。

### 5.3 候鸟栖息地遥感监测应用

候鸟越冬栖息地和中转停歇地大多位于滨海湿地, 而滨海地区人类频繁活动导致栖息地破碎化严重, 物种多样性锐减。在破碎化、孤岛化的生境中恢复关键节点能增强生境景观连接度, 有利于候鸟在生境斑块间的迁移、扩散和种群基因交流。基于多时空尺度的湿地遥感监测是栖息地研究的基础和重点。利用遥感技术能从大范围、长时间序列开展候鸟生境调查, 结合景观生态学掌握景观异质性和连续性的动态变化过程, 获取景观结构与生态过程的关系, 提出具体的保护和

优先恢复生境节点。由于滨海湿地地物边界具有不确定性, 在进一步的研究中, 应结合高分辨率遥感数据对候鸟栖息地开展精细信息提取。本研究基于斑块间的拓扑关系、物种的活动距离和扩散概率对丹顶鹤栖息地景观进行评价, 指标还应考虑区域生境质量, 以及野外实际观测的候鸟活动概率, 使得计算结果在指导栖息地恢复中具有更高应用价值。

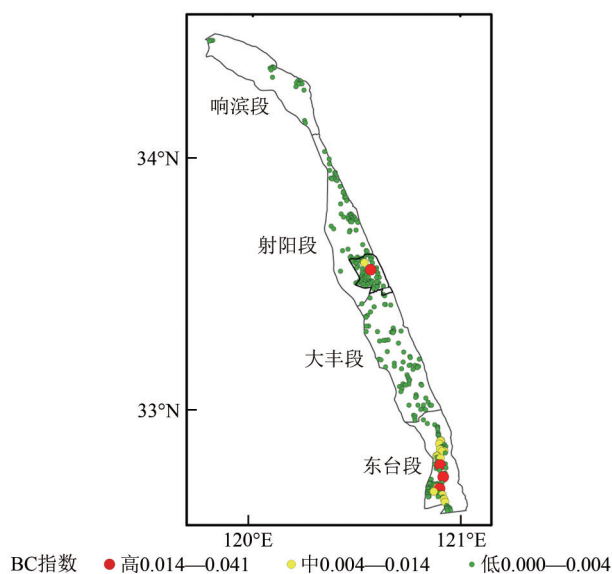


图 9 丹顶鹤适宜生境关键节点分布

Fig. 9 The key nodes distribution of suitable habitat for the red-crowned cranes

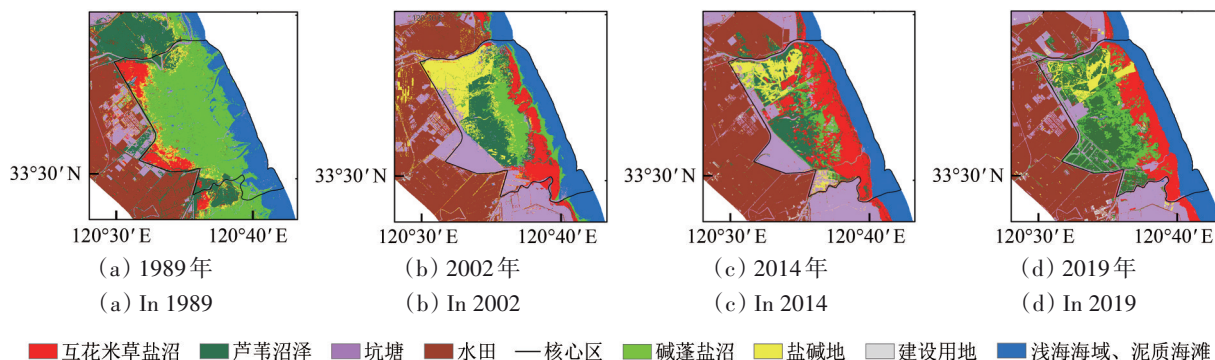


图 10 1989 年—2019 年盐城滨海湿地核心区的土地覆被变化

Fig. 10 Variations of land cover type in core area of the Yancheng coastal wetland from 1989 to 2019

## 6 结论

本研究基于 1989 年—2019 年遥感数据对世界自然遗产盐城滨海湿地进行分类, 探究丹顶鹤的适宜生境变化, 综合分析过去 30 年盐城滨海湿地系统的格局变化及其对丹顶鹤生境变迁的影响, 研究得出的主要认识和建议如下:

(1) 滨海湿地的生态环境呈现出快速退化, 自然湿地面积减少了 941.45 km<sup>2</sup>。碱蓬盐沼和盐碱地作为丹顶鹤适宜生境, 面积萎缩 629.01 km<sup>2</sup>。1989 年—2002 年土地覆被变化最为剧烈, 自然湿地被人工湿地大量侵占, 碱蓬盐沼和芦苇沼泽面积损失分别超过 88% 和 68%; 2002 年—2019 年, 自然湿地面积趋于平稳, 人工湿地面积的增加通



过围垦滩涂来实现, 围垦重心呈现自南向北、由陆到海的迁移趋势。

(2) 丹顶鹤适宜生境结构连接度和功能连接度呈下降趋势, 其适宜生境破碎化严重: 1989年—2002年, 适宜生境面积和连接度呈现快速下降, 整体连接指数和概率连接指数下降为1989年的6.76%和2.91%, 但其存在南北连接网络; 2002年—2019年大面积生境斑块进一步萎缩, 小面积斑块消失, 连接度指数均小于0.01, 生境连接网络破碎。根据连接网络计算中介度指数可得, 目前适宜生境关键节点为遗产地核心区和条子泥湿地。

(3) 对世界遗产地盐城滨海湿地的可持续发展提出如下几点建议。不仅要加大湿地核心区的保护力度, 而且要加快建设条子泥湿地等自然保护区, 为丹顶鹤等候鸟越冬迁飞过程中提供多个停歇栖息地, 恢复生境关键节点, 形成丹顶鹤生境连接网络; 缓冲区人工湿地作为补充生境, 可有序规划和保留养殖池和水田等人工湿地, 协调生态保护和经济开发之间的矛盾; 冬季对高大密集的芦苇和互花米草进行选择收割, 以改善候鸟栖息和觅食生境。

**志 谢** 感谢盐城湿地珍禽国家级自然保护区管理处吕士成高级工程师和高志东主任在野外实地考察期间提供的大力支持和帮助。

## 参考文献 (References)

- Carrasco L, Vera P, Belda E J and Monrós J S. 2018. Combining remote sensing and field mapping methods to study the vegetation dynamics within a coastal wetland and determine the habitat effects of a threatened bird species (*Emberiza schoeniclus witherbyi*). *Journal of Coastal Research*, 34(1): 42-49 [DOI: 10.2112/JCOASTRES-D-16-00194.1]
- Chen L, Ren C Y, Wang C, Yao Y C and Song K S. 2017. Dynamic of coastal wetlands of the Yellow River Delta for 6 Periods. *Wetland Science*, 15(2): 179-186 (陈琳, 任春颖, 王灿, 姚云长, 宋开山. 2017. 6个时期黄河三角洲滨海湿地动态研究. *湿地科学*, 15(2): 179-186) [DOI: 10.13248/j.cnki.wetlandsci.2017.02.003]
- Duan H L, Xia S X, Jackson M V, Zhao N, Liu Y, Teng J K, Meng Z, Yu X B and Shi J B. 2020. Identifying new sites of significance to waterbirds conservation and their habitat modification in the Yellow and Bohai Seas in China. *Global Ecology and Conservation*, 22: e01031 [DOI: 10.1016/j.gecco.2020.e01031]
- Gong N, Niu Z G, Qi W and Zhang H Y. 2016. Driving forces of wetland change in China. *Journal of Remote Sensing*, 20(2): 172-183 (宫宁, 牛振国, 齐伟, 张海英. 2016. 中国湿地变化的驱动力分析. *遥感学报*, 20(2): 172-183) [DOI: 10.11834/jrs.20164210]
- Han Q Q and Niu Z G. 2019. China intertidal zone dataset based on tidal correction. *Journal of Global Change Data and Discovery*, 3(1): 42-47 (韩倩倩, 牛振国. 2019. 基于潮位校正的中国潮间带模拟数据集. *全球变化数据学报*, 3(1): 42-47) [DOI: 10.3974/geodp.2019.01.06]
- Han Q Q, Niu Z G, Wu M Q and Wang J W. 2019. Remote-sensing monitoring and analysis of China intertidal zone changes based on tidal correction. *Chinese Science Bulletin*, 64(4): 456-473 (韩倩倩, 牛振国, 吴孟泉, 王靖雯. 2019. 基于潮位校正的中国潮间带遥感监测及变化. *科学通报*, 64(4): 456-473) [DOI: 10.1360/N972018-00723]
- Li Y F and Liu H Y. 2014. Advance in wetland classification and wetland landscape classification researches. *Wetland Science*, 12(1): 102-108 (李玉凤, 刘红玉. 2014. 湿地分类和湿地景观分类研究进展. *湿地科学*, 12(1): 102-108) [DOI: 10.13248/j.cnki.wetlandsci.2014.01.019]
- Liao H J, Li G S, Wang S H, Cui L L and Ouyang N L. 2014. Evolution and spatial patterns of tidal wetland in North Jiangsu Province in the past 30 Years. *Progress in Geography*, 33(9): 1209-1217 (廖华军, 李国胜, 王少华, 崔林林, 欧阳宁雷. 2014. 近30年苏北滨海滩涂湿地演变特征与空间格局. *地理科学进展*, 33(9): 1209-1217) [DOI: 10.11820/dlkxjz.2014.09.008]
- Lin W P, Cen J W, Xu D, Du S Q and Gao J. 2018. Wetland landscape pattern changes over a period of rapid development (1985-2015) in the Zhoushan Islands of Zhejiang province, China. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 213: 148-159. [DOI: 10.1016/j.ecss.2018.08.024]
- Liu D W, Zhang Y L, Sun Y, Lü S C, Cheng H, Mu S J and Lu C H. 2016. Population dynamics and habitat selection of overwintering red-crowned cranes in coastal wetland of Yancheng, Jiangsu Province. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 32(3): 473-477 (刘大为, 张亚兰, 孙勇, 吕士成, 成海, 穆少杰, 鲁长虎. 2016. 江苏盐城滨海湿地越冬丹顶鹤种群动态变化与生境选择. *生态与农村环境学报*, 32(3): 473-477) [DOI: 10.11934/j.issn.1673-4831.2016.03.021]
- Liu L, Liu H Y, Li Y F, Wang J and Xie F F. 2018. Dynamic changes in population size and habitat distribution of wintering red-crowned crane in northern Jiangsu Province. *Acta Ecologica Sinica*, 38(3): 926-933 (刘伶, 刘红玉, 李玉凤, 王娟, 谢富赋. 2018. 苏北地区丹顶鹤越冬种群数量及栖息地分布动态变化. *生态学报*, 38(3): 926-933) [DOI: 10.5846/stxb201611022231]
- Liu R H, Liang S C, Zhao H Y, Qi G C, Li L X, Jiang Y and Niu Z G. 2017. Progress of Chinese coastal wetland based on remote sensing. *Remote Sensing Technology and Application*, 32(6): 998-1011 (刘润红, 梁士楚, 赵红艳, 漆光超, 李丽香, 姜勇, 牛振国. 2017. 中国滨海湿地遥感研究进展. *遥感技术与应用*, 32(6): 998-1011) [DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2017.6.0998]
- Lu S C. 2008. Current distribution of red crown crane and its development trends in Yancheng Coastal Marshes. *Ecological Science*, 27(3): 154-158 (吕士成. 2008. 盐城沿海滩涂丹顶鹤的分布现状及其趋势分析. *生态科学*, 27(3): 154-158) [DOI: 10.3969/j.issn.

- 1008-8873.2008.03.006]
- Lu S L, Wu B F and Li F P. 2011. Wetland pattern change in Hai Basin. *Journal of Remote Sensing*, 15(2): 349-371 (卢善龙, 吴炳方, 李发鹏. 2011. 海河流域湿地格局变化分析. *遥感学报*, 15(2): 349-371)
- MacKinnon J, Verkuil Y I and Murray N. 2012. IUCN Situation Analysis on East and Southeast Asian Intertidal Habitats, with Particular Reference to the Yellow Sea (Including the Bohai Sea). Occasional Paper of the IUCN Species Survival Commission No. 47. IUCN: 5-8
- Ou W X and Yuan W J. 2015. Priority of red-crowned crane wintering habitat patches using landscape connectivity in the Yancheng coastal wetland. *Resources Science*, 37(4): 823-831 (欧维新, 袁薇锦. 2015. 基于景观连接度的盐城滨海湿地丹顶鹤生境斑块重要性评价. *资源科学*, 37(4): 823-831)
- Pang Q. 2014. Change of Red-Crowned Crane Habitat Connectivity and Recovery Based on Graph Theory in Yancheng Coastal Wetland. Nanjing: Nanjing Agricultural University (逢谦. 2014. 基于图论的盐城滨海湿地丹顶鹤生境连接度变化及恢复研究. 南京: 南京农业大学)
- Pascual-Hortal L and Saura S. 2006. Comparison and development of new graph-based landscape connectivity indices: towards the prioritization of habitat patches and corridors for conservation. *Landscape Ecology*, 21(7): 959-967 [DOI: 10.1007/s10980-006-0013-z]
- Qin P, Zuo P and He Z X. 2004. *Seashore Systems Ecology*. Beijing: Chemical Industry Press: 2-11 (钦佩, 左平, 何祯祥. 2004. *海滨系统生态学*. 北京: 化学工业出版社: 2-11)
- Ren W Y, Wang C, Liu H Y, Li Y F, Zhou Y, Xu J Y and Chen H. 2019. Diversity of vegetation coverage based on birds' habitat demand in the coastal wetland of Yancheng, Jiangsu Province. *Chinese Journal of Ecology*, 38(12): 3870-3877 (任武阳, 王成, 刘红玉, 李玉凤, 周奕, 徐嘉仪, 陈浩. 2019. 基于鸟类生境需求的植被景观覆盖度多样性——以江苏盐城滨海湿地为例. *生态学杂志*, 38(12): 3870-3877) [DOI: 10.13292/j.1000-4890.201912.004]
- Saura S and Pascual-Hortal L. 2007. A new habitat availability index to integrate connectivity in landscape conservation planning: comparison with existing indices and application to a case study. *Landscape and Urban Planning*, 83(2/3): 91-103 [DOI: 10.1016/j.landurbplan.2007.03.005]
- Su L Y and Zou H F. 2012. Status, threats and conservation needs for the continental population of the red-crowned crane. *Chinese Birds*, 3(3): 147-164 [DOI: 10.5122/cbirds.2012.0030]
- Suo A N, Guan D M, Sun Y G, Lin Y and Zhang M H. 2016. Advances in coastal landscape ecology and its role in the construction of marine ecological civilization. *Acta Ecologica Sinica*, 36(11): 3167-3175 (索安宁, 关道明, 孙永光, 林勇, 张明慧. 2016. 景观生态学在海岸带地区的研究进展. *生态学报*, 36(11): 3167-3175) [DOI: 10.5846/stxb201506171227]
- UNESCO and World Heritage Committee. 2019. Decisions adopted during the 43rd session of the World Heritage Committee. Baku, Republic of Azerbaijan[EB/OL]. [2020-12-28]. <http://whc.unesco.org/en/sessions/43COM>
- Wen Q K, Zhang Z X, Xu J Y, Zuo L J, Wang X, Liu B, Zhao X L and Yi L. 2011. Spatial and temporal change of wetlands in Bohai rim during 2000-2008: An analysis based on satellite images. *Journal of Remote Sensing*, 15(1): 183-200 (温庆可, 张增祥, 徐进勇, 左丽君, 汪潇, 刘斌, 赵晓丽, 易玲. 2011. 环渤海滨海湿地时空格局变化遥感监测与分析. *遥感学报*, 15(1): 183-200) [DOI: 10.11834/jrs.20110115]
- Wu C G, Zhou Z X, Wang P C, Xiao W F and Teng M J. 2010. The concept and measurement of landscape connectivity and its applications. *Acta Ecologica Sinica*, 30(7): 1903-1910 (吴昌广, 周志翔, 王鹏程, 肖文发, 滕明君. 2010. 景观连接度的概念、度量及其应用. *生态学报*, 30(7): 1903-1910)
- Wu J G. 2007. *Landscape Ecology: Pattern, Process, Scale and Hierarchy*. 2nd ed. Beijing: Higher Education Press: 102-121 (邬建国. 2007. *景观生态学——格局、过程、尺度与等级*. 2版. 北京: 高等教育出版社: 102-121)
- Wu Y Q, Xiao X M, Chen B Q, Wang X X and Li X P. 2018. Phenological remote sensing monitoring of salt marsh vegetation in Yancheng intertidal wetland in recent thirty years. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 46(16): 264-270 (吴亚茜, 肖向明, 陈帮乾, 王新新, 李香萍. 2018. 近30年来盐城潮间带湿地盐沼植被物候遥感监测. *江苏农业科学*, 46(16): 264-270) [DOI: 10.15889/j.issn.1002-1302.2018.16.063]
- Xie H W. 2014. The Construction of Ecological Networks Based on Natural Heritage Sites in Jiangsu Province. Nanjing: Nanjing Normal University (谢慧玮. 2014. 江苏省自然遗产地生态网络构建. 南京: 南京师范大学)
- Yun C X and Jiang X W. 2002. *Sustainable Development and Comprehensive Management of Coastal Zones*. Beijing: Ocean Press (恽才兴, 蒋兴伟. 2002. *海岸带可持续发展与综合管理*. 北京: 海洋出版社)
- Zhang Y, Li L, Wu G S, Zhou Y, Qin S P and Wang X M. 2016. Analysis of landscape connectivity of the Yunnan snub-nosed monkeys (*Rhinopithecus bieti*) based on habitat patches. *Acta Ecologica Sinica*, 36(1): 51-58 (张宇, 李丽, 吴巩固, 周跃, 覃顺萍, 王小明. 2016. 基于生境斑块的滇金丝猴景观连接度分析. *生态学报*, 36(1): 51-58) [DOI: 10.5846/stxb201408191641]
- Zhang Y N, Zhao Y Q, Chen H, Lv S C and Zuo P. 2018. Analysis on population change of red-crowned cranes in its wintering habitat Yancheng during 1983~2017. *Sichuan Environment*, 37(6): 154-159 (张亚楠, 赵永强, 陈浩, 吕士成, 左平. 2018. 1983~2017年间丹顶鹤在盐城越冬地的种群变化分析. *四川环境*, 37(6): 154-159) [DOI: 10.14034/j.cnki.schj.2018.06.026]
- Zhu C M, Zhang X and Huang Q H. 2018. Four decades of estuarine wetland changes in the yellow river delta based on Landsat observations between 1973 and 2013. *Water*, 10(7): 933 [DOI: 10.3390/w10070933]
- Zhu J F, Zhou Y, Wang S X, Wang L T, Liu W L, Li H T and Mei J J. 2019. Analysis of changes of Baiyangdian wetland from 1975 to 2018 based on remote sensing. *National Remote Sensing Bulletin*, 23(5): 971-986 (朱金峰, 周艺, 王世新, 王丽涛, 刘文亮, 李海涛, 梅建军. 2019. 1975年—2018年白洋淀湿地变化分析. *遥感学报*, 23(5): 971-986) [DOI: 10.11834/jrs.20198379]

# Pattern change of the coastal wetland system and its dynamic impact on the habitat of red-crowned cranes in Yancheng, Jiangsu Province

LI Jingxia<sup>1,2</sup>, FU Bihong<sup>1</sup>

1. Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract:** The Yancheng coastal wetland in Jiangsu province, as a UNESCO (United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization) natural heritage site with an area of 2687 km<sup>2</sup>, is one of the most important habitats for the overwintering of red-crowned cranes in Asia. In recent decades, due to the combined effects of intensive human activities in sectors, such as industry, agriculture, aquaculture, and urbanization, the pattern of coastal wetland system and the suitable habitat for red-crowned cranes have changed dramatically. Therefore, the spatio-temporal variation pattern of coastal wetland system must be identified, and its key impact factors must be explored to protect the coastal wetland and conserve its biodiversity. Currently, research on land cover changes in the Yancheng coastal wetland is insufficient for species habitat monitoring. Thus, further study on the suitable habitat for red-crowned cranes in a long-term and large regional scale is warranted.

In this study, multi-temporal and multi-source remote sensing data, such as Landsat TM/OLI data during 1989 to 2019 and Sentinel-2 data in 2019, were used to analyze the features of spatio-temporal variation in the Yancheng coastal wetland. First, the classification system and image interpretation symbols of the study area were established to draw the maps of classification and transfer distribution in six periods from 1989 to 2019. Then, the structural and functional connectivity of the suitable habitat for red-crowned cranes were evaluated on the basis of the species diffusion ability. Finally, the key ecological nodes for the overwintering of red-crowned cranes were evaluated.

Results show that the eco-environment of natural wetland has degraded rapidly, with an area loss of 49.46%. Contrastingly, the artificial wetland increased by 69.24%, which was mainly realized by occupying the natural wetland and reclaiming the tidal flat. The center of reclamation tended to migrate from north to south and from coastal land to sea. The area of seepweed saltmarsh and alkaline land as suitable habitat decreased by 489.10 km<sup>2</sup>, with a proportion decreased from 19.88% in 1989 to 4.36% in 2019. As for structural connectivity, our results reveal that the connectance index of suitable habitat patches decreased from 1.83 to 1.30, showing a downward trend. The distance between the patches increased and the fragmentation intensified. Concurrently, the estimations of functional connectivity index demonstrate that the integral and probability indexes of connectivity in 2019 are less than 0.01. The functional connectivity decreased, and the connection network was generally broken with only a small part of the connection network with high betweenness centrality index. They exist in the core area of UNESCO natural heritage site and the Tiaozini region. They are also the key ecological nodes for the habitat of red-crowned cranes.

In summary, the connectivity of the suitable habitat for red-crowned cranes has decreased sharply because of land cover changes in the UNESCO natural heritage site—Yancheng coastal wetland in the past 30 years. However, the habitat for red-crowned cranes has been greatly improved since the core area has reverted aquaculture pond and cultivated land to natural wetland in 2014. In addition to enhancing the scientific conservation of the existing suitable habitat, such as the core area of UNESCO natural heritage site and Tiaozini region, the key ecological nodes in the natural wetland should be restored to improve the connectivity among the habitat patches.

**Key words:** remote sensing application, coastal wetland, habitat for red-crowned cranes, UNESCO natural heritage site, multi-temporal remote sensing, landscape connectivity

**Supported by** Second Tibetan Plateau Scientific Expedition and Research Program (STEP) (No.2019QZKK0901)