

DOI: 10.5846/stxb202105271387

黄翀, 王淑璇, 李贺. 2010—2019 年不同海湾迁徙水鸟栖息地适宜性变化对比研究. 生态学报, 2023, 43(13): 5453-5465.

Huang C, Wang S X, Li H. Comparison of habitat suitability variation of migrating waterbirds in different bays from 2010 to 2019. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(13): 5453-5465.

2010—2019 年不同海湾迁徙水鸟栖息地适宜性变化对比研究

黄 翀^{1,*}, 王淑璇^{1,2}, 李 贺^{1,2}

1 中国科学院地理科学与资源研究所, 资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101

2 中国科学院大学, 北京 100049

摘要:滨海湿地是迁徙水鸟的重要迁飞通道和主要栖息地, 评估沿海迁徙水鸟栖息地适宜性及变化态势能为栖息地的合理规划与管理提供科学参考, 对迁徙水鸟的保护有重要意义。选择紧邻城市和乡村的深圳湾和雷州湾为研究区, 在水鸟栖息地生态系统类型分类的基础上, 通过层次分析法确定水鸟栖息地适宜性评价因子, 设计栖息地、食物、水分、人类干扰条件及其子类的权重, 对栖息地适宜性进行等级划分, 分析比较 2010—2019 年迁徙水鸟栖息地适宜性的时空分布差异, 探索适宜性变化差异的原因并给出合理化建议。结果表明: (1) 2010—2019 年深圳湾有 193.4 hm² 强干扰区域转变为中等及弱干扰; 雷州湾有 16.36 hm² 的中等干扰转化为弱、无干扰; (2) 深圳湾栖息地适宜性以中等适宜类型为主, 2010 年和 2019 年面积占比分别为 83.74% 和 88.71%; 雷州湾栖息地适宜性主要以较适宜和中等适宜类型为主, 2010 年面积占比为 86.72%, 2010—2019 年面积占比基本不变, 总体适宜性高于深圳湾。 (3) 2010—2019 年, 深圳湾不适宜和较适宜面积分别减少 245.54 hm² 和 26.37 hm², 均转化为中等适宜类型; 雷州湾有 24.31 hm² 的中等和较适宜栖息地转化为适宜类型。

关键词: 迁徙水鸟; 栖息地; 层次分析; 干扰强度; 适宜性

Comparison of habitat suitability variation of migrating waterbirds in different bays from 2010 to 2019

HUANG Chong^{1,*}, WANG Shuxuan^{1,2}, LI He^{1,2}

1 State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China

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

Abstract: Coastal wetlands are of great importance for biodiversity conservation as wintering, stop-over, and breeding sites for migratory waterbirds. Assessment on habitat suitability provides a scientific basis for the rational planning and management of waterbirds habitats. In this paper, urban wetlands in Shenzhen Bay and rural wetlands in Leizhou Bay were selected as the study areas. High-resolution remote sensing images were used to extract the habitat types of waterbirds. The assessment factors and their weights were determined by analytic hierarchy process (AHP). According to the main ecological factors such as food, moisture, and human disturbances, the suitability of each habitat was graded. The study compared the differences in the spatio-temporal distribution of habitat suitability of migratory waterbirds from 2010 to 2019. Based on the analysis of the driving forces, recommendations for migratory waterbird habitat conservation were proposed. The results show that: (1) from 2010 to 2019, 193.4 hm² strong disturbance areas were transformed into medium and weak

基金项目: 科技基础资源调查专项(2021FY101000); 国家自然科学基金重大项目(41890854)

收稿日期: 2021-05-27; 网络出版日期: 2023-03-07

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: huangch@reis.ac.cn

disturbance areas in Shenzhen Bay, while 16.36 hm² medium disturbance areas were transformed into weak and no disturbance areas in Leizhou Bay. (2) The Shenzhen Bay was dominated by medium suitable habitats, with 83.74% and 88.71% of the total area in 2010 and 2019; while the Leizhou Bay was mainly dominated by sub-suitable and medium suitable habitats, with 86.72% of the total area in 2010 and less variation in 2019. The overall suitability of Leizhou Bay was higher than that of Shenzhen Bay. (3) The unsuitable and sub-suitable habitats in Shenzhen Bay decreased by 245.54 hm² and 26.37 hm² from 2010 to 2019, which were transformed into moderate suitable habitats; while 24.31 hm² moderate and sub-suitable areas were transformed into suitable habitats in Leizhou Bay.

Key Words: migratory waterbirds; habitat; analytic hierarchy process; disturbance intensity; habitat suitability

滨海湿地是水鸟的重要栖息地类型之一,栖息地变化是影响滨海水鸟种群数量的主要原因^[1-3]。然而,近几十年来,受气候变化与人类活动干扰的影响,水鸟栖息地不断退化甚至丧失已成为不争事实^[4-5]。尽管当前已经通过多种途径开展栖息地保护,但在社会经济快速发展的前提背景下,海岸带围垦、海岸工程开发建设、资源过度利用、环境污染等原因,造成滨海湿地面积迅速减少,生态服务功能不断降低,水鸟栖息地空间持续萎缩、破碎化程度加大,给水鸟栖息地保护带来巨大压力^[5-6]。评估水鸟栖息地适宜性变化过程,对于了解区域内水鸟栖息地现状,识别栖息地风险,提高栖息地保护水平具有重要意义。

栖息地适宜性评估多以栖息地变化、适宜性或物种丰富度等作为评价指标。杨李等^[7]通过 1986—2011 年安徽升金湖自然保护区栖息地变化,结合层次分析法确定水鸟生境影响因子权重,计算分析了升金湖建立保护区后水鸟生境适宜性变化过程;邹丽丽等^[8]使用土地利用、NDVI、纹理等 9 个因子构建的 Logistic 回归模型进行快速聚类,对栖息地进行适宜性分级;Herniman S 等^[9]利用利用机载激光雷达数据提取森林结构信息,构造植被指数,结合景观、地物、地形等指标模拟鸟类的丰富度与多样性。在栖息地适宜性评估中,各种干扰因子对栖息地适宜性具有重要影响。蒋俊明等^[10]选取多个干扰参数,将栖息地划分为不同干扰分区,针对不同分区提出对应的保护措施,加强了栖息地现状的认知。综合考虑栖息地所受自然与人类干扰影响,杨道德等^[11]通过层次分析法制定评估指标体系,对指标进行赋分,提高了栖息地适宜性和保护成效评估的科学性和可操作性;王成等^[12-13]通过选取了 13 个环境变量指标,应用随机森林和阈值分析,开展了水鸟适宜生境识别及环境响应研究,提出了维护水鸟种群多样性和恢复栖息地景观结构的方案。然而,上述研究多针对单一的湿地类型或典型保护区开展适宜性评估。针对不同地理环境和社会经济发展水平的栖息地,如城市环境和乡村环境,开展水鸟栖息地适宜性变化的差异性研究尚不多见。

有鉴于此,本文以迁徙水鸟栖息地为研究对象,综合利用遥感栖息地信息获取与 GIS 空间分析技术,考虑栖息地条件、食物、水分等影响因素,对广东省深圳湾城市湿地类型与雷州湾乡村湿地类型的水鸟栖息地适宜性进行分析,结合两地地理特征评估 2010—2019 年两不同海湾迁徙水鸟栖息地适宜性变化差异,为水鸟栖息地的保护与管理规划提供科学依据。

1 研究区概况

广东省沿海位于我国南部,属于亚热带季风气候,年平均气温 22.3℃,年平均降雨量 1927.5 mm,拥有漫长的海岸线和大面积的滨海滩涂湿地,涉及包括东亚-澳大利西亚迁徙路线、西太平洋迁徙路线和中亚迁徙路线在内的三大候鸟迁徙路线。沿海分布的红树林、珊瑚礁、河口、滩涂等生态系统是迁徙水鸟的重要栖息地^[14-15],对水鸟保护具有重要意义。研究区分别位于广东省的深圳湾与雷州湾(图 1)。

深圳湾(22°29'N, 113°56'E)属于亚热带季风气候,夏季湿热,冬季干燥,年均温约 21℃,介于香港与深圳间,呈带状分布。深圳湾拥有丰富的红树林资源,是迁徙水鸟越冬的主要区域,与毗邻的大面积潮间带滩涂,池塘、湖泊、基围水洼等海岸沼泽湿地景观^[16-17],共同组成了深圳湾的水鸟栖息地。深圳湾区域地理位置优越,经济高度发达。为更好的保护深圳湾水鸟栖息地,自 20 世纪 80 年代以来,深圳和香港分别在深圳湾两侧

设立了深圳红树林自然保护区和香港米埔自然保护区,划定了湿地保护红线;同时开展河道清淤还湖、排污口整治、堤防巩固、红树林湿地修复、鸟类保护等一系列生态修复和保护措施,稳定湿地生态系统功能,使其更好服务于鸟类栖息和城市可持续发展。

雷州湾(22°32'N, 114°05'E)位于雷州半岛东侧,属于亚热带季风气候,雨量充沛,干湿明显,年均温 22.5℃,海域生物资源丰富,拥有连续的大面积天然滨海滩涂与红树林群落^[18],同时也是鸕鹚类水鸟勺嘴鹬的中国最大种群越冬地,每年平均有近 70 种水鸟来此停歇越冬。雷州湾地理位置较为偏僻,临近乡村,区域经济发展水平较低。为更好的保护雷州湾水鸟栖息地,自 20 世纪 90 年代起,在雷州半岛建立了湛江红树林自然保护区,逐步开展红树林的保护及修复工作,作为其重要组成部分的雷州湾滨海湿地,也成为近年来最值得关注的滨海湿地之一。

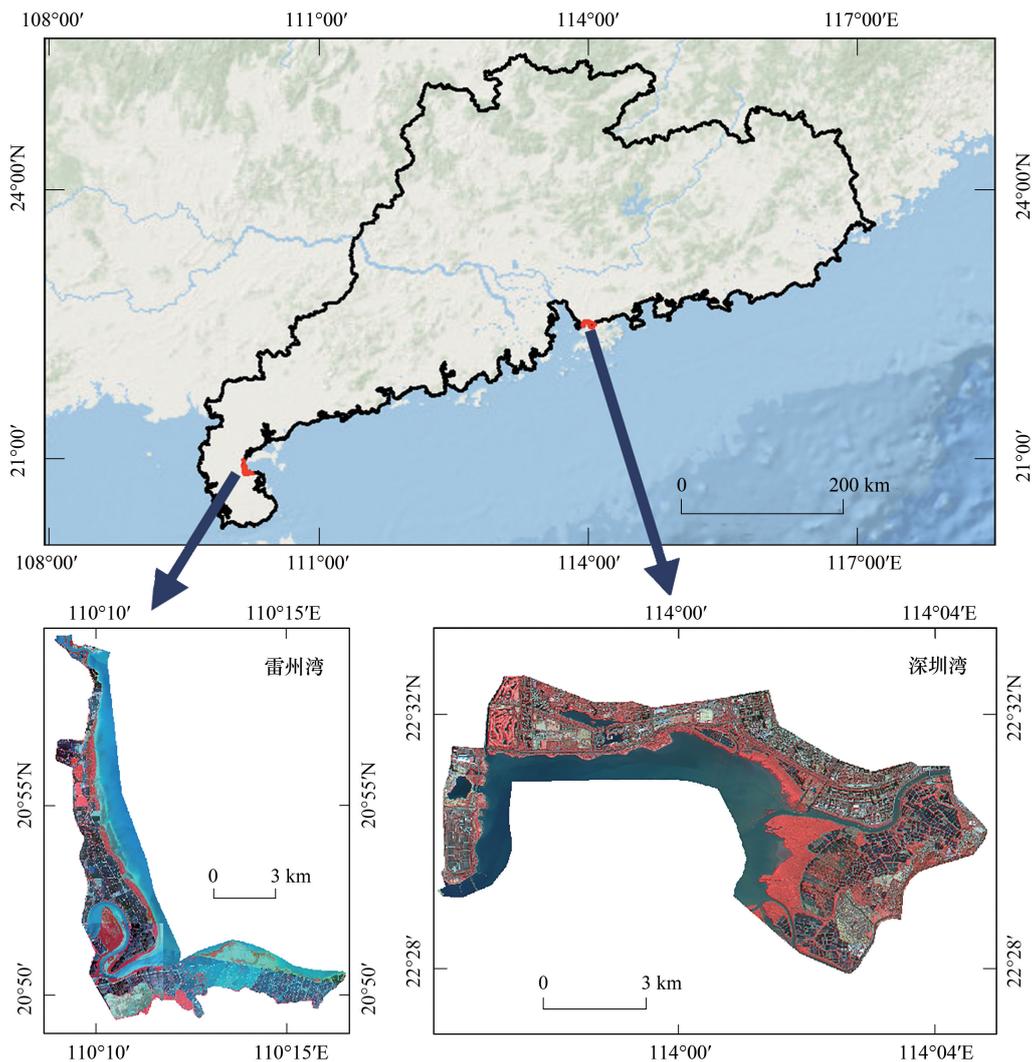


图 1 广东省水鸟栖息地研究区位图

Fig.1 Waterbird Habitat Research Area in Guangdong Province

2 数据与研究方法

2.1 遥感数据与预处理

本文获取的遥感数据包括 2010 年资源二号卫星数据和 2019 年 GF-1、GF-2 高分遥感影像,主要用于研究

区栖息地生态系统类型提取。资源二号卫星获取的全色波谱影像具有较高的分辨率和丰富的纹理信息^[19]。相比常用的 Landsat 系列和 SPOT 卫星,米级分辨率的高分影像对于斑块水平或小尺度的局地栖息地环境,如水分状况、植被状况以及小范围的人类活动干扰等信息提取更为适用^[20]。

遥感影像的预处理主要运用 ENVI 5.4 软件对获取的卫星数据进行辐射定标、大气校正、正射校正和图像融合等遥感数据预处理操作。

2.2 栖息地类型提取

基于研究区滨海湿地类型,结合野外实地验证、问卷调查和访谈,建立本研究的水鸟栖息地生态系统分类体系(表 1)。通过对处理后的遥感影像进行人机交互目视解译,得到研究区水鸟栖息地一、二级类型提取结果。利用 2019 年 7 月野外调查获取的 461 个野外调查样点对分类结果进行验证和精度评估,总体精度达到 92% 以上,满足本研究的栖息地适宜性评估需求。

2.3 指示物种选取

指示物种是对某一环境特征具有某种指示特性的生物,选取合适的指示物种是栖息地适宜性评估的基础^[20]。通常选用对栖息地变化敏感,能指示环境变化特点的生物作为指示物种。

鸕鹚类水鸟主要以底栖动物为食,其数量变化和分布规律与生态系统的稳定性密切相关,常作为滨海湿地管理与衡量环境质量的重要指示物种^[10]。鸕鹚类水鸟是广东沿海海域水鸟迁徙路线上最常见的水鸟类型,在滨海滩涂、红树林及部分养殖、水田等人工湿地区域均有分布^[21-23]。因此,参考指示物种的选取标准^[20],本研究以鸕鹚类水鸟作为栖息地适宜性评估的指示物种。

表 1 生态系统一级和二级类型分类体系

Table 1 Primary and secondary classification of ecosystem types

一级类型 Type 1	二级类型 Type 2
自然湿地 Natural wetland	河流、河漫滩、岩石性海岸、砂质海滩、砾石海滩、泥质海滩、红树林沼泽、浅海域
人工湿地 Artificial wetland	养殖、人工湖泊、水库坑塘、沟渠、水田
非湿地 Non-wetland	旱地、天然林、人工林、灌草地、裸地、工矿用地、道路、码头、建设用地

2.4 栖息地适宜性评价

层次分析法具有系统性、适用性和简洁性等优点,在适宜性评价模型的构建中应用最为广泛^[7,24]。因此,本研究采用层次分析法开展指示物种栖息地适宜性评价。

2.4.1 评价因子分级

研究将评价因子分为目标层、准则层与指标层^[25]。根据研究区的水鸟栖息地状况与前人研究、结合专家咨询,以水鸟栖息地适宜性评价作为目标层,选取自然环境条件和人类干扰因素作为准则层。由于水鸟分布主要受食物、水分和栖息地条件影响,因此把这三类作为自然环境条件的指标层;对于人类干扰因素,选择农牧渔业开发和建设开发两个因素作为指标层,根据影响程度不同再进一步细分为建设用地、港口码头、养殖等 10 个干扰因子,结合自然环境条件和人类干扰指标,对水鸟栖息地适宜性进行评价。评价因子详细分级如下。

(1) 自然环境因子

不同生态类群的水鸟对不同栖息地类型有着不同的偏好,因此不同物种对同一栖息地的适宜性也有所差异^[26]。通过实地调查、文献调研与专家咨询,得出各栖息地类型的适宜性分级标准(表 2):鸕鹚类水鸟多在滨海滩涂、养殖塘、草本沼泽、水田、河漫滩等栖息地类型区域活动,对栖息地条件要求高。

食物是影响水鸟栖息地的重要因素,研究表明迁徙水鸟的密度与食物的多样性存在极显著的正相关关系^[27],食物越多,分布越集中,越利于水鸟的生存^[13,28]。鸕鹚类水鸟主要以潮间带双壳类、甲壳类等底栖生物为食,这些生物主要分布在滨海滩涂区域。通过实地调查、文献调研与专家咨询,在综合考虑食物的种类、丰富度以及获取难易度等因素基础上,得到食物条件对水鸟栖息地适宜性的分级标准(表 3)。

表 2 栖息地类型条件对水鸟栖息地适宜性影响的分级标准及分级

Table 2 Classification criteria of habitat type conditions on waterbird habitat suitability

序号 Number	栖息地类型 Habitat types	分级标准 Classification criteria
1	砂质海滩、泥质海滩	适宜
2	红树林沼泽	适宜
3	砾石海滩	不适宜
4	养殖	较适宜
5	草木沼泽、河漫滩、水田	较适宜
6	旱地、林地、灌丛、裸地、河流、人工湖泊、水库坑塘、沟渠、工矿用地、码头、建设用地、浅海海域	不适宜

表 3 食物条件对水鸟栖息地适宜性影响的分级标准及分级

Table 3 Classification criteria of habitat type conditions on waterbird habitat suitability

分级标准 Classification criteria	适宜 Suitable	较适宜 Fairly suitable	中等 Moderate	不适宜 Not suitable
栖息地类型 Habitat types	泥质海滩、红树林沼泽、砂质海滩、砾石海滩	河漫滩	养殖、水田	水库坑塘、天然林、裸地、工矿用地、河流、人工湖泊、旱地、灌草地、人工林、草本沼泽、沟渠、浅海海域、建设用地

水是水鸟不可缺少的重要环境要素之一,水文条件直接关系到水鸟的栖息和觅食^[20,29]。以距离水源地的远近可以作为水分条件的分级指标。研究区域内的主要水体类型包括浅海海域、养殖、水库、坑塘以及河流等区域。参考专家咨询意见,得到水分条件对水鸟栖息地适宜性影响的分级标准(表 4)。

表 4 水分条件对水鸟栖息地适宜性影响的分级标准

Table 4 Classification criteria of water conditions on habitat waterbirds suitability

分级 Classification criteria	适宜 Suitable	较适宜 Fairly suitable	中等 Moderate	不适宜 Not suitable
距离水源地远近 Distance from water source/m	< 200	200—500	500—1000	> 1000

(2) 人类干扰条件因子

人类干扰是影响栖息地适宜性的负面因子,开发建设活动越多,干扰度越高,栖息地适宜性就越低^[30—31]。人类的捕捞、养殖、围垦、道路建设等活动使湿地生态系统发生改变,导致栖息地破碎化^[32—33],对水鸟栖息造成不利影响。通过实地调查、文献调研与专家咨询,得到各类干扰因子分级标准(表 5)。

表 5 人类干扰条件对水鸟栖息地适宜性与干扰强度影响的分级标准

Table 5 Classification criteria of human disturbance conditions on habitat waterbirds suitability

干扰因子 Interference factors	分级 Classification criteria	适宜(无) Suitable (None)	较适宜(弱) Fairly suitable (Weak)	中等(中) Moderate (Moderate)	不适宜(强) Not suitable (Strong)
建设开发 Construction and development	建设用地开发、矿产资源开发/工矿用地	>1000	300—1000	100—300	<100
	港口码头开发	>1000	600—1000	300—600	<300
	道路、桥梁开发建设	>1000	500—1000	200—500	<200
农牧渔业开发 Agriculture and fisheries development	养殖、水库坑塘、沟渠	>500	200—500	50—200	<50
	水田	>600	300—600	100—300	<100
	旱地、人工林	>500	250—500	100—250	<100

把以上细化的自然环境因子和人类干扰条件因子进行归一化处理,消除量纲差异影响^[34]。根据自然断点法,将适宜(无)、较适宜(弱)、中等(中)、不适宜(强)分别以 100、75、50、25 为界,利用 ArcGIS 重分类功能,将其值统一在 0—100 范围内^[35],量化得到研究区内各个评价因子的赋值结果。

2.4.2 评价因子权重

根据数值计算与专家知识打分,对比各个指标的重要性^[36],运用层次分析法分析评价因子关系,构造判断矩阵确定其权重^[7,24](表6)。

表6 水鸟保护状况栖息地适宜性评价因子及权重赋值

Table 6 Habitat suitability evaluation factor and weight assignment of waterbird protection status

目标层 Target	准则层 Criterion	指标层 1 Indicator layer 1	指标层 2 Indicator layer 2	权重 Weight	
水鸟栖息地适宜性评价 Habitat suitability evaluation of migrating waterbirds	自然环境因子	栖息地条件		0.135	
		食物条件		0.2025	
		水分条件		0.1125	
	人类干扰条件	建设开发	建设用地开发、港口码头开发、 道路桥梁开发建设		0.12375
			矿产资源开发(含采石、挖沙 等)/工矿用地		0.04125
		农牧渔业开发	养殖、水田 水库坑塘、沟渠 旱地、人工林		0.048125 0.01375 0.006875

2.4.3 栖息地适宜性评价指数

干扰因素是影响栖息地适宜性的重要因素,栖息地干扰影响强度反映了建设开发与农牧渔业生产的人类干扰活动对水鸟栖息地造成的不利影响,通过干扰强度评价指数计算得到,具体计算公式如下:

$$HDII = \sum_{i=1}^n W_i F_i \quad (1)$$

式中,HDII 为研究区水鸟栖息地干扰强度指数, n 为干扰因子个数, W_i 为第 i 个干扰因子的权重, F_i 为第 i 个干扰因子的干扰强度指数。干扰影响强度的无、弱、中、强以 25、50、75 为界限进行划分,最终得到水鸟栖息地干扰强度结果。

在干扰强度计算的基础上,由各评价因子的分级和权重赋值进行栖息地适宜性评价指数计算^[37],具体计算公式如下:

$$HSI = \sum_{j=1}^N w_j f_j \quad (1)$$

式中,HSI 为研究区水鸟栖息地适宜性评价指数, N 为栖息地因子个数, w_j 为第 j 个栖息地因子的权重, f_j 为第 j 个栖息地因子的适宜性指数。

在上述各评价因子适宜程度分布的基础上,建立栖息地适宜性评价指数模型,利用 ArcGIS 空间分析功能进行图层叠加,实现对研究区迁徙水鸟栖息地适宜性的评价。具体步骤如下:(1)首先,把所有评价因子统一到相同的空间分辨率和投影系统下;(2)依据不同因子的权重,进行加权叠置分析;(3)应用重分类对不同栖息地适宜性等级进行赋值^[38]。HSI 值大于 75 为适宜,50—75 为较适宜,25—50 为中等,小于 25 则为不适宜;(4)最终计算生成研究区水鸟栖息地适宜性的空间分布图。

3 结果与分析

3.1 水鸟栖息地生态系统类型时空变化

深圳湾城市高度发达,建设用地面积最大,浅海海域次之,其后是养殖、灌草地等,其中建设用地与浅海海域占深圳湾总面积近 50%(图 2);雷州湾区域经济发展水平较低,生态系统类型中养殖面积占比最大,泥质海滩与红树林次之(图 3),三者组成雷州湾水鸟栖息地的主要生态系统类型。从分布上看(图 2 和图 3),深圳湾各栖息地类型基本成片分布,陆地区域以非湿地为主,沿海分布自然湿地和人工湿地,其中人工湿地主要分布在东部沿海;雷州湾各栖息地类型也基本呈片状分布,其中泥质海滩多分布在近海区域,红树林大多紧邻泥

质海滩呈带状分布,养殖沿滩涂边缘、红树林沼泽与南渡河两岸呈大面积连续分布;与深圳湾不同,雷州湾人工湿地除养殖外,还存在大量分布于研究区中部和南部的的水田类型。

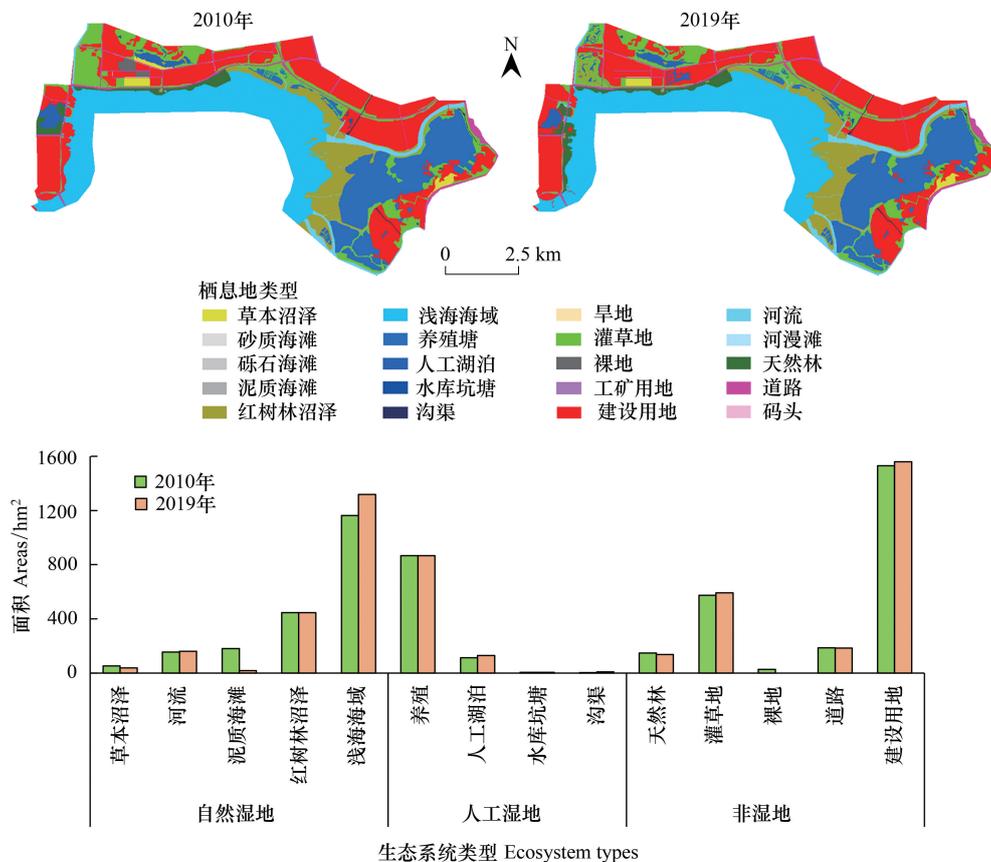


图2 2010—2019年广东深圳湾水鸟栖息地生态系统类型时空变化及面积统计直方图

Fig.2 Spatio-temporal variation in ecosystem types and area statistics histogram of waterbird habitat from 2010 to 2019 in Shenzhen Bay, Guangdong

2010年以来,深圳湾的保护区和非保护区呈现显著的变化差异,随着城市高速发展,非保护区域人类建设活动增多,部分裸地与待建土地逐步被开发,建设用地面积增加 30.25 hm^2 ;随着福田和米埔自然保护区的严格规范化管理,区域内建设用地有所缩减,自然湿地保护状况良好,周边人工湖泊与河流面积也略有增加;同时,深圳湾西部滨海公园自2011年开园来,开展人工绿化,植被覆盖面积进一步增大,北部华侨城湿地公园灌草地增加 18.88 hm^2 。与之相比,雷州湾自2010年以来,红树林沼泽变化最大,增加 155.6 hm^2 ,沿海岸线和沿河流入海口均有增加;此外,在雷州湾南渡河弯2曲内侧陆地由草本沼泽地也转变为红树林沼泽;其他土地类型变化相对较小,养殖、泥质海滩仅减少 13.7 hm^2 、 23.2 hm^2 ,灌草地面积增加 19 hm^2 。

整体而言,近10年间深圳湾保护区内生态系统类型变化较小,非保护区城镇化进程较快,建设用地占比增大;雷州湾近10年间人类干扰较小,主要以红树林沼泽增加为主,其余地类变化较小。

3.2 干扰强度时空变化

深圳湾主要受到中等干扰强度影响,弱干扰次之,强干扰影响较小,三者分别占比为 82.1% 、 12.3% 、 5.7% (图4);雷州湾主要受中等干扰影响,弱干扰次之,面积分别超过 3200 hm^2 和 2600 hm^2 ,无干扰与强干扰占比极小(图5)。从分布上看(图4和图5),深圳湾中等干扰广泛分布在保护区及其毗邻潮间带滩涂等地区,强干扰集中在深圳湾湿地公园、福田红树林保护区与华侨湿地公园的周边灌草地区域,弱干扰分布在米埔自然保护区东部红树林沼泽与相邻的深圳湾南部浅海海域;雷州湾干扰强度整体由海岸向陆地逐渐增大,中等干

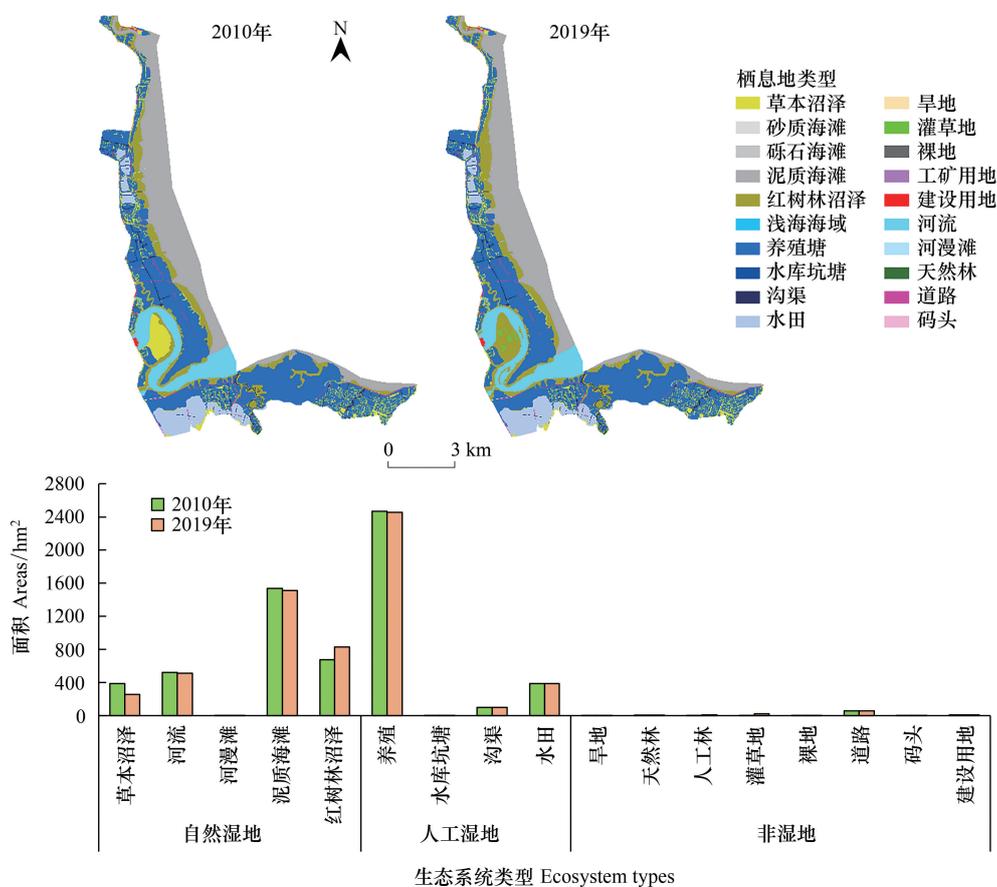


图3 2010—2019年雷州湾水鸟栖息地生态系统类型变化及面积统计直方图

Fig.3 Spatio-temporal variation in ecosystem types and area statistics histogram of waterbird habitat from 2010 to 2019 in Leizhou Bay, Guangdong

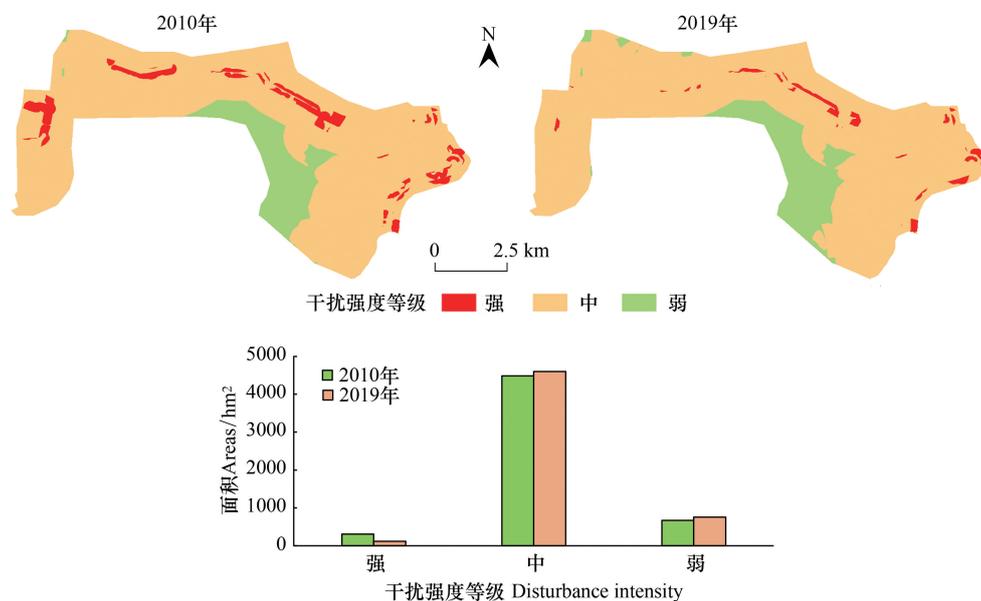


图4 2010年、2019年深圳湾水鸟栖息地干扰强度时空分布及面积统计直方图

Fig.4 Spatio-temporal distribution of disturbance intensity and area statistics histogram of waterbird habitat from 2010 to 2019 in Shenzhen Bay

扰的生态系统类型主要是养殖与水田,弱干扰度生态系统类型主要是红树林沼泽、泥质海滩、养殖和河流等。

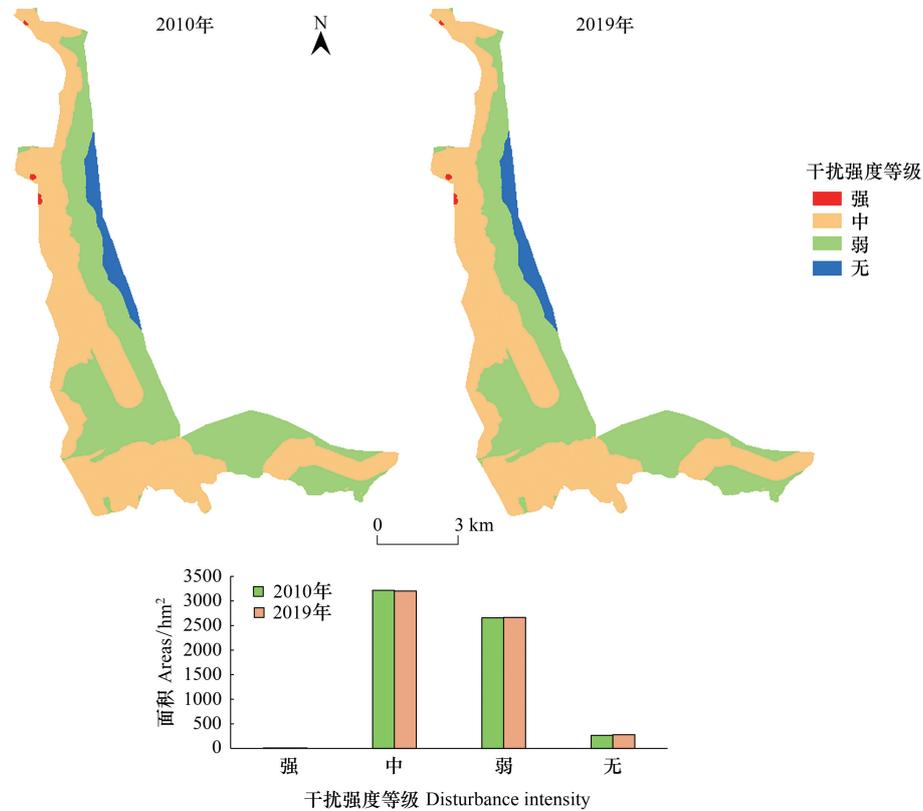


图 5 2010 年、2019 年雷州湾水鸟栖息地干扰强度时空分布及面积统计直方图

Fig.5 Spatio-temporal distribution of disturbance intensity and area statistics histogram of waterbird habitat from 2010 to 2019 in Leizhou Bay

2010 年以来,深圳湾干扰强度总体呈降低趋势,强干扰面积从 310.0 hm²减少至 116.6 hm²,中和弱干扰面积分别增加 109.8 hm²和 83.6 hm²;与之类似,雷州湾干扰强度也呈轻微降低趋势,仅有 16.36 hm²的中干扰区域降低为弱、无干扰。

结合非湿地生态系统面积变化发现,近 10 年来深圳湾在非保护区范围建设开发面积增加约 30 hm²,裸地减少约 28 hm²,同时养殖面积略有增加,说明深圳湾非保护区同时受建设开发与农牧渔业开发影响;对于保护区,深圳湾滨海公园、华侨湿地公园自 2015、2010 年建成后,人类干扰活动减少,福田和米埔红树林保护区的干扰强度也逐步降低,部分区域由强干扰转为中等干扰。对于雷州湾,由于地理位置较偏远,没有大规模的滨海开发建设,农牧渔业开发是该区域干扰强度变化的主要因素,近 10 年间人工林增加 3.6 hm²,养殖减少 13.7 hm²,使得部分中等干扰转变为弱干扰区域。

总体而言,2010—2019 年,深圳湾和雷州湾干扰强度都呈下降趋势,其中深圳湾的干扰强度下降主要源于人为的湿地公园建立和保护区管理带来的建设用地减少;雷州湾主要源于部分养殖塘废弃。

3.3 水鸟栖息地适宜性变化

深圳湾鹤鹑类水鸟主要以中等适宜性类型为主,广泛分布于整个研究区,较适宜区域分布于福田与米埔红树林自然保护区的红树林滩涂湿地;部分养殖也属于较适宜区域;不适宜区域分布于深圳湾的内陆区域,灌草地与建设用地是主要的不适宜生态系统类型(图 6)。雷州湾鹤鹑类水鸟主要以中等和较适宜栖息地为主,两者占比超过 70%。其中,中等适宜度的栖息地类型主要是养殖、水田和面积破碎的红树林沼泽;较适宜类型主要是连续的大面积红树林沼泽、靠近陆地的泥质海滩、养殖与河流区域;适宜栖息地主要是潮间带的泥质海滩(图 7),与干扰度空间分布相似,越靠近海岸潮间带,适宜性越好。

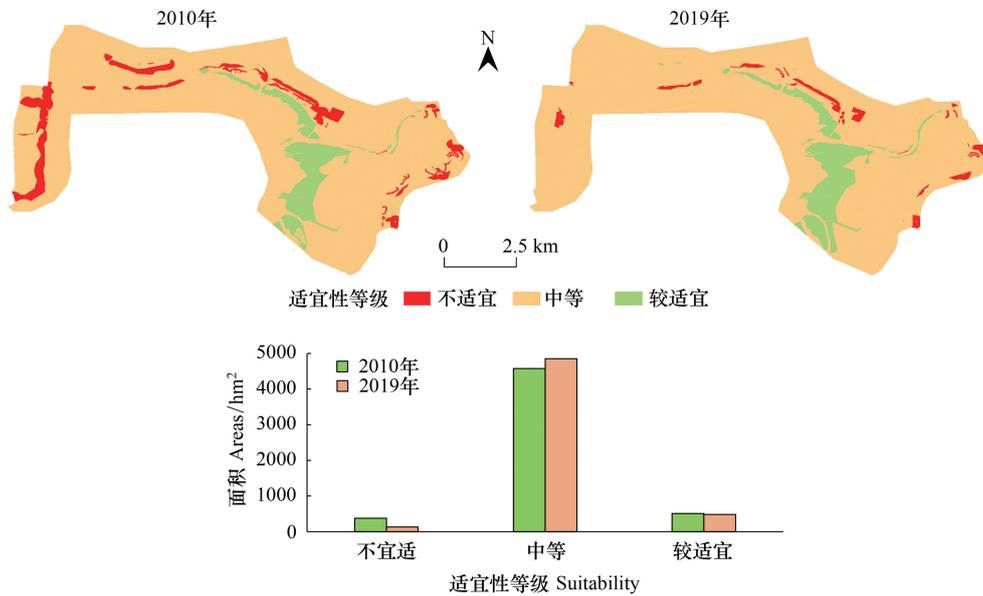


图6 2010年、2019年深圳湾水鸟栖息地适宜性时空分布及面积统计直方图

Fig.6 Spatio-temporal distribution of habitat Suitability and area statistics histogram of waterbird habitat from 2010 to 2019 in Shenzhen Bay

2010—2019年,深圳湾鹤鹑类水鸟栖息地适宜性得到改善(图6),不适宜栖息地面积显著减小,由376.79 hm^2 减少至131.3 hm^2 ;中等适宜面积从4578.2 hm^2 增加至4850.2 hm^2 ;此外,随着养殖的减少,较适宜栖息地也有部分减少,由512.23 hm^2 减至485.86 hm^2 。与之相比,雷州湾鹤鹑类水鸟栖息地适宜性变化很小,呈现略微改善,中等适宜面积从2381.92 hm^2 减少至2357.74 hm^2 ,适宜类型面积相应增加24.3 hm^2 。

综上,2010—2019年深圳湾鹤鹑类水鸟栖息地适宜性得到提高,其中保护区范围栖息地适宜性明显改善,非保护区变化相对较小;雷州湾鹤鹑类水鸟栖息地适宜性变化很小,呈现略微改善。

4 讨论

4.1 不同海湾水鸟栖息地适宜性变化驱动因素分析

水鸟栖息地适宜性变化差异与人类活动强度密切相关^[39-40]。从自然条件看,深圳湾和雷州湾都具有鹤鹑类水鸟理想的栖息地类型,但因干扰强度不同,两研究区栖息地适宜性变化存在明显差异。

深圳湾属于城市湿地,经济发展程度高,人类活动干扰强度大,以中等适宜性栖息地为主。将深圳湾分为保护区域(涉及湿地公园与红树林自然保护区)和非保护区域分开进行分析讨论:(1)2010—2019年保护区域栖息地适宜性提高显著,一方面是由西部滨海公园和北部华侨城湿地公园的建成,部分建设用地转变为林地、灌草地等人工绿地,栖息地由不适宜转变为中等适宜;另一方面,福田红树林保护区和米埔自然保护区管理规范化,增加了适宜水鸟栖息地面积,提高了水鸟栖息地适宜性。总体上,2010—2019年深圳湾保护区域水鸟栖息地适宜性得到提高,迁徙水鸟栖息地保护较好。(2)对于非保护区域,生态系统类型以建设用地为主,2010—2019年间建设用地的增加多是由未开发建设用地与裸地转变而来,未涉及水鸟适宜生存的类型,使得该区域适宜性基本未发生改变;对于占比较少的农牧渔业开发,在10年间临近保护区的周边地域存在少量退养还滩,水鸟栖息地都得到改善,非保护区域水鸟栖息地适宜性有少量提升。综上,对于人类活动干扰剧烈的深圳湾城市湿地区域,水鸟栖息地通过建立严格的湿地保护区及湿地公园,可以显著增加栖息地适宜性,提高迁徙水鸟栖息地保护水平。

与之相比,雷州湾临近村庄,属于乡村湿地,经济发展相对较慢,人类活动干扰强度小,水鸟栖息地适宜性更高。雷州湾区域多滩涂和养殖,适宜水鸟栖息觅食,较适宜与适宜栖息地面积占比达60%以上;其中养殖

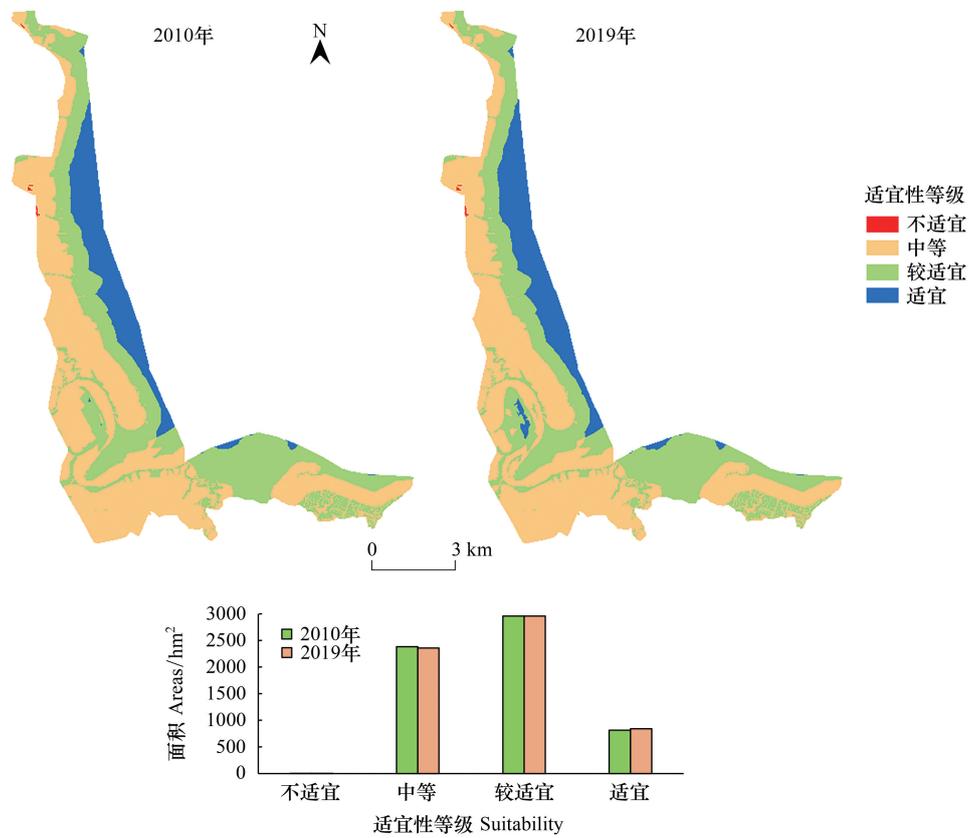


图7 2010年、2019年雷州湾水鸟栖息地适宜性时空分布及面积统计直方图

Fig.7 Spatio-temporal distribution of habitat Suitability and area statistics histogram of waterbird habitat from 2010 to 2019 in Leizhou Bay

用地占比最大,农牧渔业开发是影响雷州湾水鸟栖息地干扰强度变化的主要因素,但近10年来该区域养殖用地变化较小,仅有13.7 hm²转变为红树林湿地,干扰强度下降,适宜性少量提升。总体上,人类活动干扰较小的雷州湾乡村湿地区域,通过减少人类干扰强度,维持原生湿地类型,可以增加或保持迁徙水鸟栖息地适宜性。

4.2 迁徙水鸟栖息地保护建议

深圳湾和雷州湾沿海迁徙水鸟栖息地适宜区域多集中于红树林沼泽与泥质海滩,地势平坦、水源充足,为鹤鹑类水鸟提供了良好的栖息地。近年来随着生态保护意识的增强,这些区域人类活动干扰较低^[41],栖息地适宜性较高。养殖与河流浅滩为水鸟提供了较为良好的水分条件与食物条件,但由于人类活动的干扰,水鸟栖息地适宜性相对低于红树林沼泽和泥质滩涂;此外,一些废弃的养殖塘、休耕的水稻田也是迁徙水鸟的良好栖息地,应该给予重视。

5 结论

(1) 不同湾区栖息地适宜性变化有明显差异。2010—2019年,深圳湾生态系统类型在保护区变化较大,干扰强度下降,栖息地适宜性提高显著,非保护区栖息地类型、干扰和适宜性变化较小;雷州湾栖息地类型以红树林沼泽增加为主,栖息地适宜性提高较小。

(2) 湿地区位与人类干扰是影响水鸟栖息地适宜性的重要因素。深圳湾湿地紧邻城市,主要干扰因素为建设开发因子,人类干扰强度大,栖息地适宜性以中等为主;雷州湾乡村湿地远离城镇,主要受农牧渔业开发因子的影响,人类干扰影响小,栖息地适宜性相对高于城市湿地。

(3)城市湿地通过建立湿地保护区及湿地公园,乡村湿地通过减少人类干扰,维持原生湿地类型,均可以提高或保持水鸟栖息地适宜性。

参考文献(References):

- [1] 孙锐, 崔国发, 雷霆, 郑姚闽. 湿地自然保护区保护价值评价方法. 生态学报, 2013, 33(6): 1952-1963.
- [2] Mu S J, Yang G S, Xu X B, Wan R R, Li B. Assessing the inundation dynamics and its impacts on habitat suitability in Poyang Lake based on integrating Landsat and MODIS observations. *The Science of the Total Environment*, 2022, 834: 154936.
- [3] Blake-Bradshaw A G, Lancaster J D, O'Connell J R, Matthews J W, Eichholz M W, Hagy H M. Suitability of wetlands for migrating and breeding waterbirds in Illinois. *Wetlands*, 2020, 40(6): 1993-2010.
- [4] Ikhumhen H O, Li T X, Lu S L, Matomela N. Assessment of a novel data driven habitat suitability ranking approach for *Larus relictus* specie using remote sensing and GIS. *Ecological Modelling*, 2020, 432: 109221.
- [5] Clausen K K, Bregnballe T. Mapping important roost sites for waders to alleviate human-waterbird conflicts in the Danish Wadden Sea. *Ocean & Coastal Management*, 2022, 223: 106147.
- [6] Hepinstall J, Sader S. Using Bayesian statistics, Thematic Mapper satellite imagery, and breeding bird survey data to model bird species probability of occurrence in Maine. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1997, 63: 1231-1237.
- [7] 杨李, 董斌, 汪庆, 盛书薇, 韩文妍, 赵俊, 程明伟, 杨少文. 安徽升金湖国家级自然保护区水鸟生境适宜性变化. 湖泊科学, 2015, 27(6): 1027-1034.
- [8] 邹丽丽, 陈晓翔, 何莹, 黎夏, 何执兼. 基于逻辑斯蒂回归模型的鹭科水鸟栖息地适宜性评价. 生态学报, 2012, 32(12): 3722-3728.
- [9] Herniman S, Coops N C, Martin K, Thomas P, Luther J E, van Lier O R. Modelling avian habitat suitability in boreal forest using structural and spectral remote sensing data. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 2020, 19: 100344.
- [10] 蒋俊明, 唐光, 庞德炳, 陈佑平, 蒋仕伟, 费世民. 平武大熊猫栖息地干扰强度分区. 西南林学院学报, 2006, 26(1): 52-55, 58.
- [11] 杨道德, 邓娇, 周先雁, 张志强, 晏玉莹, 张鸿, 何玉邦, 王伟, 李俊生. 候鸟类型国家级自然保护区保护成效评估指标体系构建与案例研究. 生态学报, 2015, 35(6): 1891-1898.
- [12] 王成, 刘红玉, 李玉凤, 王刚, 董斌, 陈浩, 张亚楠, 赵永强. 盐城滨海湿地水鸟类群生境适宜性及生态阈值研究:对栖息地景观结构恢复的启示. 生态与农村环境学报, 2022, 38(7): 897-908.
- [13] Wang C, Liu H Y, Li Y F, Dong B, Qiu C Q, Yang J L, Zong Y, Chen H, Zhao Y Q, Zhang Y A. Study on habitat suitability and environmental variable thresholds of rare waterbirds. *The Science of the total environment*, 2021, 785: 147316.
- [14] 马维, 王瑁, 王文卿, 刘毅, 罗柳青, 唐朝艺. 海南岛西海岸红树林软体动物多样性. 生物多样性, 2018, 26(7): 707-716.
- [15] Piersma T, Lindström Å. Migrating shorebirds as integrative sentinels of global environmental change. *Ibis*, 2004, 146: 61-69.
- [16] 王勇军, 管启杰. 深圳湾湿地两栖爬行动物及其保护. 生态科学, 1998, 17(1): 90.
- [17] 王勇军, 张炯尧. 深圳福田红树林湿地水鸟调查. 中国生物圈保护区, 1995(4): 19-23.
- [18] 张敏, 车先丽, 彭逸生, 邹发生. 广东雷州湾和汕头沿海湿地越冬水鸟多样性. 生态与农村环境学报, 2020, 36(5): 553-559.
- [19] 董张玉, 赵萍, 胡文亮. ASTER 多光谱影像与资源二号全色影像融合研究. 遥感技术与应用, 2010, 25(1): 143-148.
- [20] 侯传莹, 张尚弘, 易雨君. 栖息地模拟中指示物种的选取方法研究. 水利水电技术, 2019, 50(5): 97-103.
- [21] 彭鹤博, 蔡志扬, 章麟, 干晓静, 刘文亮, 李静, 蒋忠祐, 王松林, 马志军. 勺嘴鹬在中国的分布状况和面临的主要威胁. 动物学杂志, 2017, 52(1): 158-166.
- [22] 王强, 吕宪国. 鸟类在湿地生态系统监测与评价中的应用. 湿地科学, 2007, 5(3): 274-281.
- [23] 李晓文, 肖笃宁, 胡远满. 辽河三角洲滨海湿地景观规划各预案对指示物种生态承载力的影响. 生态学报, 2001, 21(5): 709-715.
- [24] 陈凌娜, 董斌, 彭文娟, 高祥, 黄慧, 王成, 叶小康, 朱鸣, 吕典, 赵抗抗, 张双双, 倪燕华. 升金湖自然湿地越冬鹤类生境适宜性变化研究. 长江流域资源与环境, 2018, 27(3): 556-563.
- [25] 陈庆. 水鸟栖息地影响因素及修复技术研究综述. 湿地科学与管理, 2018, 14(4): 59-63.
- [26] 李晨韵. 内蒙古新巴尔虎草原黄羊生境适宜性评价[D]. 北京: 北京林业大学, 2014.
- [27] 周姗姗. 福清兴化湾湿地不同生境类型越冬水鸟分布与典型生境恢复研究[D]. 福建省福州市: 福建农林大学, 2016.
- [28] Dong Z Y, Wang Z M, Liu D W, Li L, Ren C Y, Tang X G, Jia M M, Liu C Y. Assessment of habitat suitability for waterbirds in the West Songnen Plain, China, using remote sensing and GIS. *Ecological Engineering*, 2013, 55: 94-100.
- [29] 陈水华, 丁平, 郑光美, 诸葛阳. 城市化对杭州市湿地水鸟群落的影响研究. 动物学研究, 2000, 21(4): 279-285.

- [30] 姚斯洋, 李昕禹, 刘成林, 柳波, 张静, 况卫明. 不同水位下拟建鄱阳湖水利枢纽对食块茎鸟类栖息地适宜性的影响研究. 生态学报, 2021, 41(10): 3998-4009.
- [31] 任璘婧, 李秀珍, 李希之, 闫中正, 孙永光. 长江口滩涂湿地景观变化对典型水鸟生境适宜性的影响. 长江流域资源与环境, 2014, 23(10): 1367-1374.
- [32] 陈庆. 水鸟栖息地影响因素及修复技术研究综述. 湿地科学与管理, 2018, 14(4): 59-63.
- [33] 王筠, 那晓东, 臧淑英. 人类活动干扰下 4 个时期松嫩平原丹顶鹤栖息地适宜性研究. 湿地科学, 2018, 16(3): 438-444.
- [34] 曹铭昌, 孙孝平, 乐志芳, 崔鹏, 龚溪, 徐海根. 基于 MAXENT 模型的丹顶鹤越冬生境变化分析: 以盐城保护区为例. 生态与农村环境学报, 2016, 32(6): 964-970.
- [35] 张强, 马克明, 李金亚, 张育新. 不同尺度下停歇点湿地对迁徙水鸟的影响研究综述. 生态学报, 2017, 37(8): 2520-2529.
- [36] 王晓媛, 江波, 田志福, 蔡金洲, 林国俊. 冬季安徽菜子湖水位变化对主要湿地类型及冬候鸟生境的影响. 湖泊科学, 2018, 30(6): 1636-1645.
- [37] 朱明畅, 曹铭昌, 汪正祥, 徐海根, 雷军成, 吴翼, 赵军. 黄河三角洲自然保护区水禽生境适宜性模糊综合评价. 华中师范大学学报: 自然科学版, 2015, 49(2): 287-294, 301.
- [38] 魏文丽. 基于遥感与 GIS 的野生东北虎豹生境适宜性研究[D]. 长春: 吉林大学, 2019.
- [39] Zhou J, Song J J, Bai Q L, Liu C Y, Zhang Z P, Tang H T. Habitat suitability of *Scapharca subcrenata* (Lischke) in the shallow water of the Xiaoheshan Island. *Acta Oceanologica Sinica*, 2016, 35(12): 51-57.
- [40] 张敏, 车先丽, 彭逸生, 邹发生. 广东雷州湾和汕头沿海湿地越冬水鸟多样性. 生态与农村环境学报, 2020, 36(5): 553-559.
- [41] 马维, 王瑁, 王文卿, 刘毅, 罗柳青, 唐朝艺. 海南岛西海岸红树林软体动物多样性. 生物多样性, 2018, 26(7): 707-716.