

盐地碱蓬适宜生境分布及其干扰动态

曹晨晨^{1,5} 苏芳莉^{1,2,3,4,*} 宋飞^{1,2,3,4} 闫慧敏⁵ 庞庆庄⁶

(1. 沈阳农业大学水利学院 辽宁 沈阳 110866; 2. 辽宁盘锦湿地生态系统国家野外科学观测研究站 辽宁 沈阳 110866; 3. 辽宁双台河口湿地生态系统国家定位观测研究站 辽宁 盘锦 124112; 4. 辽宁省水土流失与生态修复重点实验室 辽宁 沈阳 110866; 5. 中国科学院地理科学与资源研究所 北京 100101; 6. 海南省水利水电勘测设计研究院 海口 570100)

摘要: 盐地碱蓬 (*Suaeda salsa*) 是滨海湿地由陆向海的最后一道生物屏障, 是实现湿地岸线稳固和土壤改良效果最佳的近自然修复方案之一, 其生境质量决定了湿地生态修复的潜在范围。通过对群落生境适宜性及其干扰状态进行评估, 可有效判定碱蓬生态修复适宜区域, 并根据干扰因素有针对性的提出解决方案, 极大提高碱蓬修复成活率和覆盖面积, 减少不必要的投入和损失, 增强抵御滨海湿地岸线侵蚀退化的能力, 维持滨海湿地生态系统的稳定性和完整性。本研究基于辽河口湿地 180 个样点测定数据认识盐地碱蓬分布的生境适宜性特征, 应用 MaxEnt 模型 (生境适宜性模型) 分析盐地碱蓬群落适宜分布区, 使用 Landsat 遥感影像提取过去 30 年间辽河口湿地盐地碱蓬及围垦活动的年际变化, 分析盐地碱蓬分布与围垦养殖的时空动态关系。研究结果表明: 1) 影响盐地碱蓬群落分布的主导因子是水盐度、土壤重金属 Cd 含量和 Zn 含量, 其影响权重分别为 49.1%、28.9%和 18.0%, 合计 96%。2) 与辽河口湿地现存的 596hm² 盐地碱蓬植被群落的分布相对照, 还有 12306hm² 的高适宜性区域和 12100hm² 的中适宜性区域是盐地碱蓬群落的理论生存区域。3) 围垦养殖用地面积占高适宜性区域的 33.31%, 围垦养殖是造成盐地碱蓬原位环境被侵占和群落破碎化加剧的主要原因。研究结果揭示了滨海围垦与生态环境保护的强烈冲突, 提示滨海湿地保护应从引导当地居民改变产业模式策略着手, 通过降低围垦产业比重, 实现碱蓬群落的修复、重建和可持续管理。本研究为滨海湿地的保护和生态恢复采取基于自然的方案提供了参考。

关键词: 盐地碱蓬群落; 围垦养殖; 滨海湿地; 生境适宜性评价; Maxent 模型

中图分类号:

Distribution and disturbance dynamics of habitats suitable for *Suaeda salsa*

Chenchen Cao^{1,5} Fangli Su^{1,2,3,4,*} Fei Song^{1,2,3,4} Huimin Yan⁵ Qingzhuang Pang⁶

(1.College of Water Conservancy Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China; 2 .Liaoning Panjin Wetland Ecosystem National Observation and Research Station, Shenyang, 110866, China; 3. Liaoning Shuangtai Estuary Wetland Ecosystem Research Station, Panjin, 124112, China; 4 .Liaoning Provincial Key Laboratory of Soil Erosion and Ecological Restoration, Shenyang, 110866, China; 5. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy Sciences, Beijing 100101, China; 6. Hainan Province Water Conservancy & Hydropower Survey, Design & Research Institute, Haikou, Hainan 570100, China)

Abstract: *Suaeda salsa*, as the last biological barrier of coastal wetlands from land to sea, is one of the best nature-based restoration solution for shoreline stabilization and soil improvement in coastal wetlands. The quality of habitat determines the potential scope of wetland ecological restoration. To enlarge the *Suaeda salsa* area and to prevent the erosion and deg

radation of coastal wetland shorelines, we assessed the suitability of habitats for *Suaeda salsa* growth and identified the causes of encroachment into areas suitable for *Suaeda salsa* growth. Assessing the habitat suitability of the community and its disturbance status can not only effectively determine the suitable areas for *Suaeda salsa* ecological restoration, but also can propose targeted solutions according to the interference factors. Moreover, this way can greatly improve the survival rate and coverage area of *Suaeda salsa* restoration, reduce unnecessary input and loss, enhance the ability to resist coastal wetland shoreline erosion and degradation, and maintain the stability and integrity of the coastal wetland ecosystem. In this study, based on the data of 180 sampling points in the Liaohe estuary wetland, habitat suitability was identified, and the MaxEnt model (habitat suitability model) was used to analyze the suitable distribution area. The interannual changes in *Suaeda salsa* and reclamation activities in the Liaohe estuary wetland during the past 30 years were extracted from Landsat remote sensing images, and the temporal and spatial dynamic relationship between the distribution of *Suaeda salsa* and reclamation was analyzed. The dominant factors affecting the distribution of *Suaeda salsa* were water salinity as well as soil Cd and Zn levels, with influence weights of 49.1%, 28.9%, and 18.0%, respectively, and a total weight of 96%. Compared with the existing 596 hm² of *Suaeda salsa* vegetation in the Liaohe estuary wetland, the area highly suitable for growth was 12,306 hm², whereas the area with medium suitability was 12,100 hm². Reclamation and aquaculture areas accounted for 33.31% of the highly suitable area and were the main reasons for habitat fragmentation. The study explained the reasons for the difficulty of ecological restoration of *Suaeda salsa* due to unsuitable habitat quality, and revealed a strong conflict between coastal reclamation and environmental protection, suggesting that the protection of coastal wetlands should consider changes in industrial model strategy. The restoration, reconstruction, and sustainable management of *Suaeda salsa* communities can be achieved by reducing the proportion of reclamation areas. This study improves the ecological restoration theory of degraded wetlands and provides a theoretical basis for coastal wetland protection and nature-based restoration programs.

Key words: *Suaeda salsa* ; reclamation and aquaculture ; coastal wetland ; habitat suitability assessment ; MaxEnt model

1 前言

沿海盐沼植被是分布在潮间带的草本植被区,具有较高的生产力^[1],可以保护海岸免受风暴和侵蚀影响,维持滨海湿地的生态功能和稳定性^[2]。然而,自然因素和人为活动的双重作用致使盐沼生境质量受损、破碎化加剧^[3],限制了植被群落的生存和发展^[4]。在过去 50 年中,全球一半的盐沼已经被破坏,并且每年以 2% 的速度流失^{[5,6][7-9]}。应用本土的先锋物种进行植被修复是滨海湿地恢复的有效手段^[10,11],基于自然的新型修复方案近些年来已经成为世界各国生态修复的主要研究方向,强调了在恢复过程中生态系统的稳定性和完整性^[12,13]。根据再生生态位原理,植物物种仅出现在环境条件允许其补充的栖息地;在理想的情况下,植物可以在理论上的适宜生境区域进行恢复^[14]。生境适宜性评估为识别和定位植被群落的潜在生境提供了有效的方法。例如,通过绘制红树林在中国的恢复潜力图,确定了广东和广西沿海是具有红树林恢复潜力的区域^[15];通过对 *Catalpa bungei* C. A. Mey. 潜在分布区域的预测,确定了该物种在中国东北地区的栖息地边界更大。但针对生境适宜区与植被真实分布之间的差异性研究不够重视,导致生态恢复措施效率较低、生态恢复在理论和实践之间存在差距^[16-19]。例如,由于沿海经济发展的需求,在中国黄河三角洲地区水产养殖、盐田和油井抢占了 55% 的自然湿地^[20],爱尔兰香农河口共有约 6500 公顷的湿地被开垦用

于农业和其他目的^[21], 湿地生态安全受到威胁^[22], 但并不是所有潜在区域都可以进行植被恢复; 胡汤姆^[23]等人通过对中国红树林潜在的适宜区域与当前自然保护区的比较研究中发现中国红树林保护状况存在不平衡现象, 广西作为具有较高红树林分布潜力的省份, 但其现有红树林保护率极低。因此, 通过研究减少植被潜在分布区和真实分布区之间的差异, 可为生态恢复工作提高效率、缩小差距。

盐地碱蓬 (*Suaeda salsa*) 是一种天然盐生草本植物, 盐生植物的数量约占世界植物区系的 1%, 且在盐生植物中只有少数 (小于 500 种) 能够耐受海水盐度^[24]。盐地碱蓬还兼具在缺氧和潮汐淹没的土壤中生存所需的生理适应能力, 广泛分布在欧洲和亚洲的潮间带上, 相较于红树林更少的受到气候限制, 既可以分布在纬度高于 32°N 和 40°S 的区域, 也可以与红树林共同分布在热带和亚热带^[25-27], 是中国北方盐沼湿地修复的典型先锋物种^[28-30], 在固碳、保护海岸线等方面发挥着重要作用, 例如: 盐地碱蓬能够在潮汐泛滥期间高效捕获悬浮质和相关有机碳, 具有较陆地生态系统更大的单位面积碳固存的贡献^[31]; 盐地碱蓬的植物根系可以稳定土壤, 地上生物量通过降低水流速度、抑制风浪, 从而有效阻碍泥沙的再悬浮和侵蚀^[32]。盐地碱蓬也是耐盐基因的潜在来源, 有助于分子生物学家提高传统作物的耐盐性^[24]。然而, 在过去 30 年间, 中国盐地碱蓬面积减少了 63%, 平均每年减少 5.5km², 以辽河口和黄河三角洲湿地区域所分布的盐地碱蓬面积丧失最为严重^[26]。

辽河口盐沼湿地的盐地碱蓬群落所在区域是世界上最大的黑嘴鸥繁殖栖息地和重要的生态旅游目的地 (‘红滩旅游’)。盐地碱蓬是辽河口盐沼湿地的先锋物种, 自 1985 年以来, 起初只零星分布在近海区域, 拦海大堤修建后, 辽河运移的泥沙在此沉积, 经潮汐作用改变了沉积物的理化性质^[33], 得到了适宜盐地碱蓬群落生长的生境, 盐地碱蓬迅速生长、扩张, 并于 1988 年达到近 35 年间的面积最大值。但在自然因素和人为活动的双重影响下, 截至 2019 年, 盐地碱蓬群落面积已从 112hm² 减少到 26hm², 净损失高达 77%^[26], 盐地碱蓬群落的丧失和退化直接威胁到动物的生存和繁殖以及辽河口湿地生态系统的稳定性, 需要采取紧急保护行动, 扼制盐地碱蓬的进一步退化^[34]。目前, 盐地碱蓬相关的研究多集中在盐地碱蓬的耐盐机制和其对沿海湿地土壤的改良^[35]; 盐地碱蓬的时空演变规律和其退化机制分析^[36,37]; 以及针对盐地碱蓬恢复的有效措施的探索^[38,39]。但对盐地碱蓬的可持续生态修复策略尚缺少系统研究, 有必要从生境适宜性的角度划定不同适宜程度的修复区域, 通过“基于自然”的新型生态恢复方案来指导生产实践。

机器学习方法在物种分布模型中的应用研究提高了生境适宜性分布区的准确性, 物种分布模型 (SDMs) 已被广泛用于湿地恢复和重建研究^[40-44]。其中, MaxEnt 模型是最适用的物种分布模型之一, 它可以利用机器学习将物种存在点的环境特征与背景点的环境特征进行对比, 直接生成栖息地适宜性连续图^[45], 显示出比其他模型相更高的预测准确性和稳定性^[46,47]。

本研究结合生态适宜性评价模型 (MaxEnt 模型) 和长时序遥感数据, 基于在辽河口盐沼湿地测定的 180 个样点数据, 分析辽河口湿地盐地碱蓬群落生境适宜性区域和实际分布区的时空差异, 旨在: (1) 探究决定盐地碱蓬群落分布的主导环境因子; (2) 掌握辽河口湿地盐地碱蓬群落分布的适宜性等级区域; (3) 认识人类活动对盐地碱蓬生境的胁迫, 以期为滨海湿地的保护和生态恢复采取基于自然的方案提供借鉴参考。

2 材料与方法

2.1 研究区概况

辽河口湿地属于滨海湿地, 位于中国渤海辽东湾北部顶端, 辽河入海口处 (121°30'~122°00'E, 40°50'~41°20'N)。属温带半湿润季风气候, 年平均降雨量 650mm, 年平均温度 8.5℃。1988 年, 辽河口湿地被

列入国家级自然保护区，盐地碱蓬植被分布于潮间带，呈红紫色的不规则斑块。

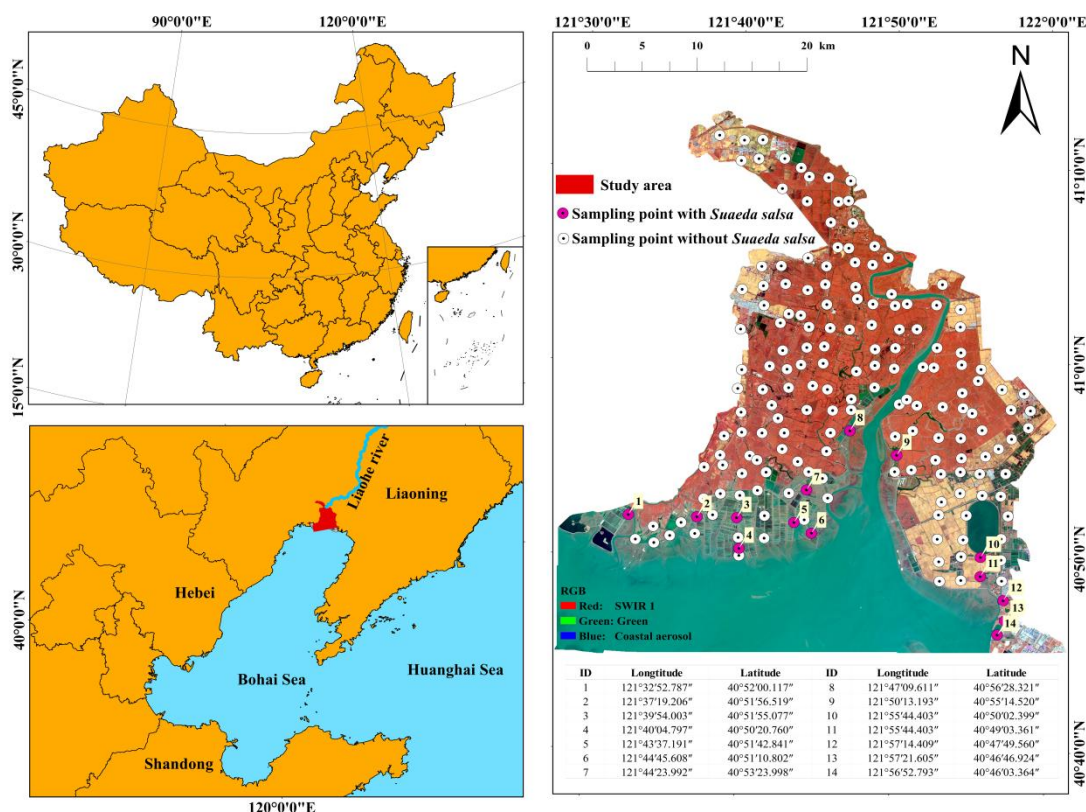


图 1 研究区域的位置和采样点的布局

Fig. 1 Location of the study area and layout of sampling points

2.2 数据获取与处理

2.2.1 盐地碱蓬分布数据的获取与处理 盐地碱蓬分布数据来源于 2019 年 8 月夏季的野外调研记录，该季节为盐地碱蓬植被长势最好的时期。通过 ArcGIS 的渔网工具将辽河口湿地划分为 $2\text{km} \times 2\text{km}$ 的网格样地共 180 个（图 1）。野外实地调研其物种分布及土地利用情况，共得到 14 个有盐地碱蓬分布的点位，记录其经纬度坐标信息作为分布点数据。

2.2.2 环境因子数据的获取与处理 根据本研究的尺度大小、生物学相关性、数据可用性，参考已有研究^[48]，选择了 12 个可能影响盐地碱蓬群落分布的环境因子。数据均来源于 2019 年野外调研，按照千米网格的方法定点采样（图 1）所采集的土壤和水样本。土壤总氮通过重铬酸钾-硫酸消化-蒸馏法测定、有机质通过重铬酸钾-硫酸消化法测定、土壤速效钾通过乙酸铵浸提-火焰光度法测定、土壤重金属（Zn、Cd、Cu、Cr、As、Fe）通过原子吸收法测定、土壤和水的盐度为野外调查现场通过盐度计测定。通过对野外采集样品的盐度、质量因子、污染因子等指标的测定，数据采用 ArcGIS 平台的克里金插值（kriging）工具进行插值，并将环境因子数据转换为 ASCII 格式，空间分辨率为 250m ^[44]。

2.2.3 遥感数据的获取与处理 本研究使用的 Landsat 系列遥感数据来源于美国地质勘探局 USGS 网站（<http://glovis.usgs.gov/app>）。遥感影像在获取过程中，大气对阳光和来自目标的辐射会产生吸收和散射，图像可能存在一定程度的失真。使用 ENVI 软件的 FLASH 模块（大气校正模块）进行大气校正部分的工作。再对所有的 Landsat 图像在同一投影坐标系统中（UTM 投影，WGS84 参考系统）进行了测量和几何校正，使得所有影像的配准误差均在一个像素内（小于 30m ）。目视解译完成后根据 Google Earth 当前和历史影

像资料和实地考察数据,采用混淆矩阵和 Kappa 系数对土地利用分类的精度进行验证,其总体精度为 85.62%, Kappa 系数为 0.84。

2.3 研究方法

2.3.1 环境因子多重共线性检验 由于环境变量之间存在一定的相关性,为了提高模型的运行效果,对环境数据进行了相关性剔除,以防止过度拟合。如果两个变量之间的相关系数大于 0.6,删除对盐地碱蓬生境适宜性贡献率小的指标。

2.3.2 MaxEnt 模型构建 将盐地碱蓬分布数据和环境变量数据导入 MaxEnt,随机选取 75%的样本数据作为训练数据,剩余 25%的样本作为测试数据。通过 Jackknife 检测变量的重要性,Replicates 设置为重复 10 次,Output file type 设为 asc,其他参数保持模型默认值,计算结果由 Logistic 格式输出。在模型运行结束后生成 10 次模拟的最大分布、最小分布和平均分布情况。

2.3.3 MaxEnt 模型精度评价 在模型运行过程中,所有环境变量的受试者工作特征曲线(receiver operating characteristic curve, ROC)均被设置计算,单个变量对分布增益的贡献率也通过软件中 Jackknife 检验被计算。模型性能通过 AUC 值来评估。AUC 值即 ROC 曲线与坐标轴之间的面积,其取值范围 0~1, AUC 值越大,表示模型准确性越好。其中 0.50~0.60 为模型失败;0.60~0.70 为模型较差;0.70~0.80 为模型一般;0.80~0.90 为模型好;0.90~1.0 为模型非常好。一般当 AUC 值 > 0.75 时,可认为模型可用。辽河口湿地盐地碱蓬分布与驱动力因子关系模型的 AUC 值的平均值为 0.818,大于 0.8,模型准确性较好,亦说明该模型适宜用于评估辽河口湿地盐地碱蓬分布的适宜性分区。

2.3.4 适宜性区域划分 MaxEnt 模型运行结果可以得到盐地碱蓬湿地在待预测区域的存在概率,它的取值范围在 0-1 之间,P 值越大表示盐地碱蓬湿地的存在概率越大,即越适宜。将模型运行的概率分布数据 ASC II 文件导入 ArcGIS,利用重分类(Reclassify)工具得到研究区的盐地碱蓬湿地适宜性等级区域,通过自然间断点分级法将盐地碱蓬湿地的分布区域划分为 4 个等级,即非适宜性区域(0≤P≤0.1)、低适宜性区域(0.1≤P≤0.3)、中适宜性区域(0.3≤P≤0.5)和高适宜性区域(0.5≤P≤1)。

2.3.5 主导环境因子选取 根据 Jackknife 分析和各环境因子对模型贡献率的大小,选取物种的主导环境因子。Jackknife 分析是指在模型运行过程中,每次忽略一种环境变量,用其余的变量建模预测,再单独使用该变量建模。单独使用该环境变量建模时的增益值越大,说明该环境变量越重要。一般认为,当环境因子的累计贡献率超过 85%且其后某一因子的贡献率低于 5%时不再累积,这些因子就被认定为主导因子。

2.3.6 景观破碎化指数 本研究选取斑块密度(PD)作为描述景观破碎度的指标,PD 值越大代表景观破碎化程度越高。

$$PD = \frac{N_i}{A}$$

式中, N_i 为景观中第*i*类景观要素的总面积,A 为景观总面积。景观数据来源于对 Landsat 遥感影像的目视解译。具体景观指数分析计算在 FRAGSTATS 4.2 软件中完成。

3 结果

3.1 影响辽河口湿地盐地碱蓬生境适宜性的环境因子

根据贡献率和 Jackknife 分析(表 1、图 2),得到影响盐地碱蓬生境适宜性的主导环境因子为水盐度(49.1%)、土壤重金属 Cd(28.9%)和土壤重金属 Zn(18%),累积贡献 96%的影响效率。

实际上（图 3、4），水盐含量的范围为 3.15-24.56g/kg，均值为 12.98g/kg，盐地碱蓬分布区域的盐度范围为 15.78-24.56 g/kg。重金属 Cd 含量范围为 0.21-12.7mg/kg，均值为 2.8mg/kg，盐地碱蓬分布区域的含量范围为 0-2.22 mg/kg。重金属 Zn 的含量范围为 41.36-866.10mg/kg，194.6mg/kg，盐地碱蓬分布区域的含量范围为 50.17-138.10 mg/kg。

通过分析环境因子与盐地碱蓬存在的概率关系（图 5）可以得出，随着盐分含量的增加，盐地碱蓬的存在概率呈上升趋势，当含量超过 20.00g/kg 时，其存在概率达到最大，之后保持平稳。随着重金属 Cd 和 Zn 含量的增加，盐地碱蓬的存在概率先保持平稳，之后呈下降趋势，当 Cd 含量超过 2.00mg/kg 和 Zn 含量超过 16.20mg/kg 时，盐地碱蓬的存在概率开始下降。

表 1 环境因子对 MaxEnt 模型的贡献率（%）

Tab. 1 Contribution of environmental factors to MaxEnt model (%)

Environmental factors	Contribution rate (%)
Water salinity	49.1
Cd	28.9
Zn	18.0
Organic matter	4.0
Soil salinity	0.0
K	0.0
Fe	0.0
Cr	0.0
TN	0.0

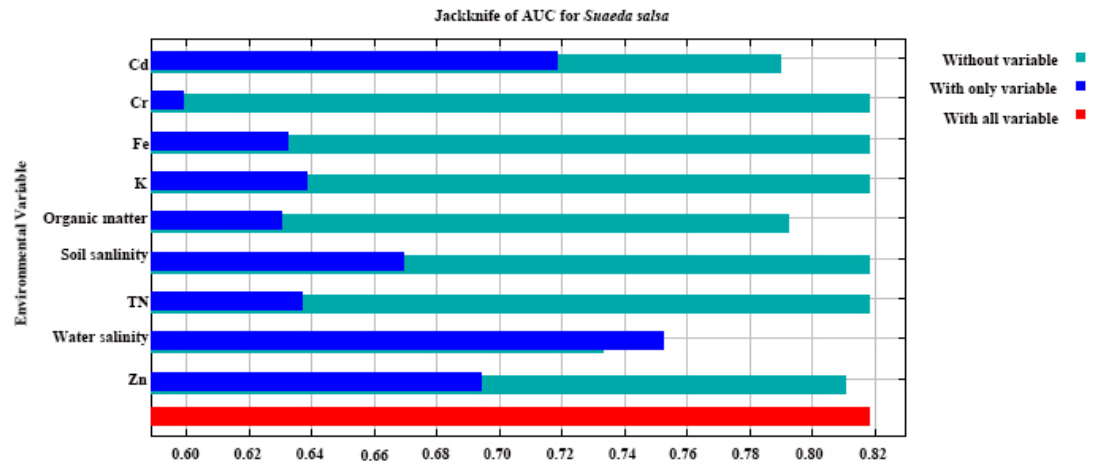


图 2 盐地碱蓬主导环境因子 Jackknife 分析

Fig. 2 Jackknife analysis of dominant environmental factors in saline alkali ponies

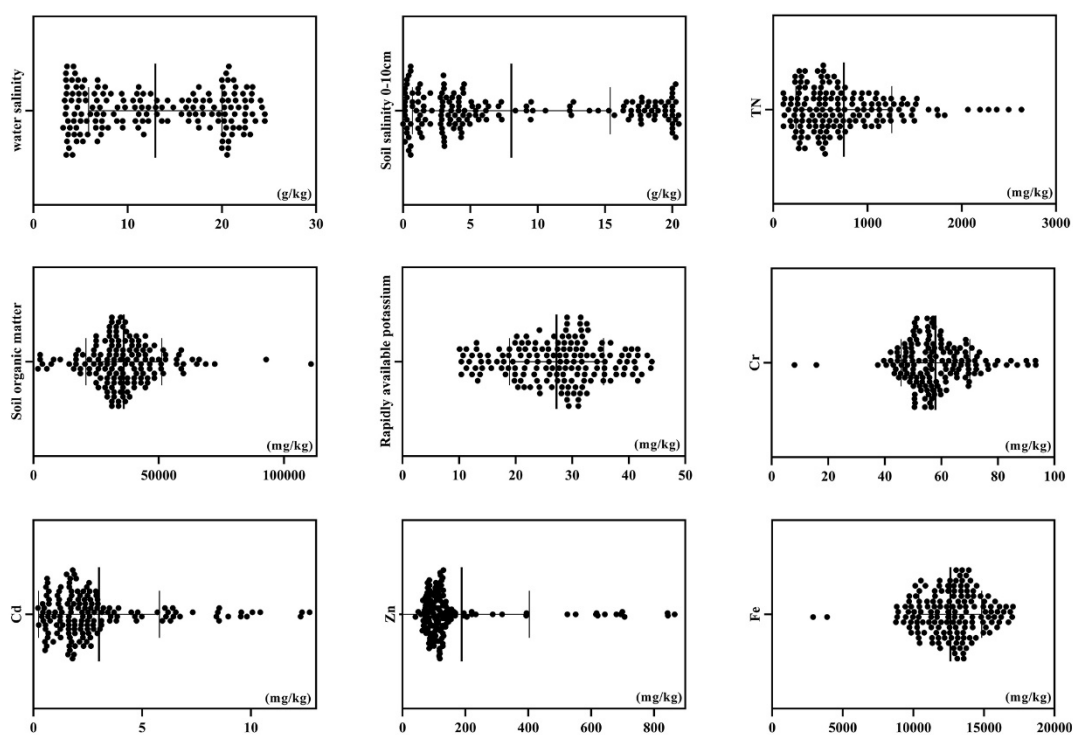


图 3 辽河口湿地环境因子现状

Fig. 3 Status of environmental factors in the Liaohe estuary wetland

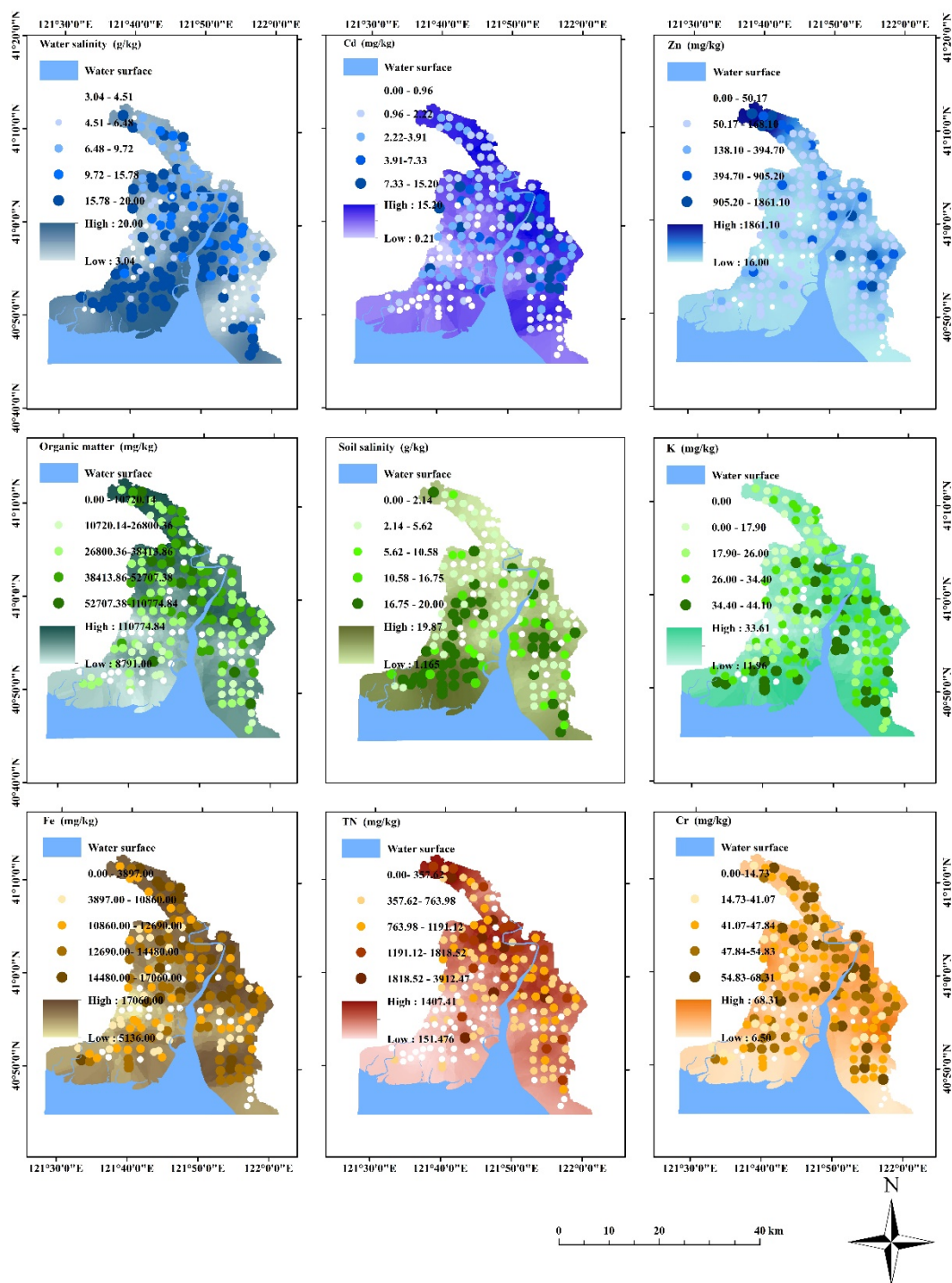


图 4 辽河口湿地环境因子空间分布特征

Fig. 4 Characteristics of spatial distribution of environmental factors in the Liaohe estuary wetlands

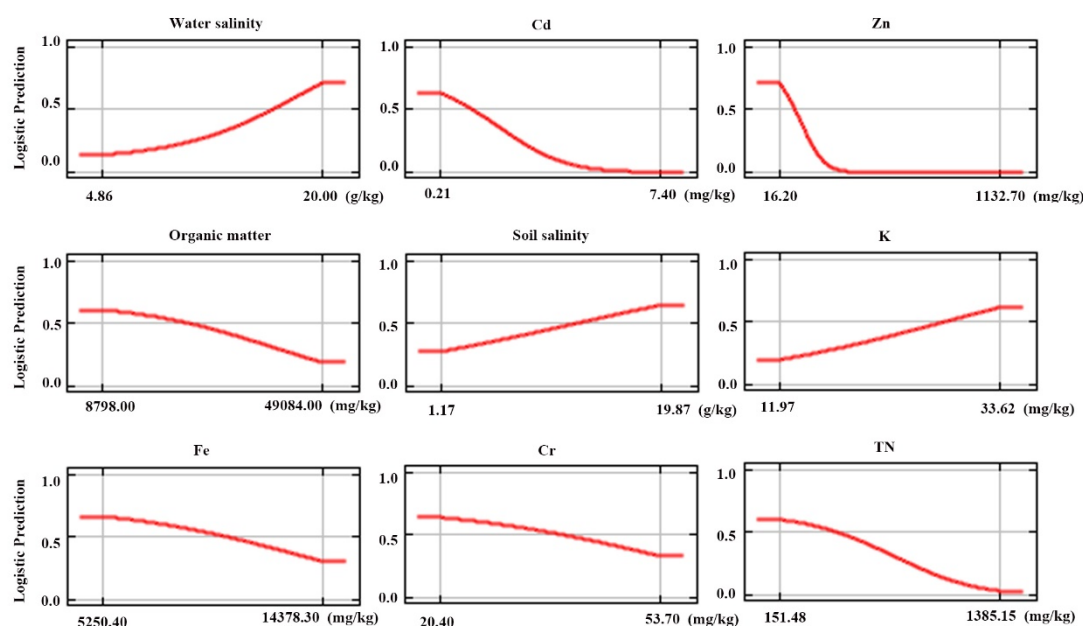


图5 MaxEnt 模型预测的最适宜生境环境因子

Fig. 5 MaxEnt model predicted environmental factors for the most suitable habitats

3.2 辽河口盐地碱蓬群落潜在分布区

根据 MaxEnt 模型预测结果 (图 5), 盐地碱蓬群落的适宜性等级区域分布在北纬 $40^{\circ}45'$ 至北纬 $40^{\circ}55'$ 之间的潮间带, 大面积集中于辽河口湿地入海口的西岸, 以高适宜性区域为核心向外适宜性等级逐渐降低。相较于 1988 年辽河口湿地盐地碱蓬群落的分布情况, 其生境适宜性区域明显向海迁移, 这也与海岸线的扩张方向具有一致性, 位于辽河口湿地辽河入海口东岸的原生生境大面积消失, 自然岸线也被人工岸线所替代。

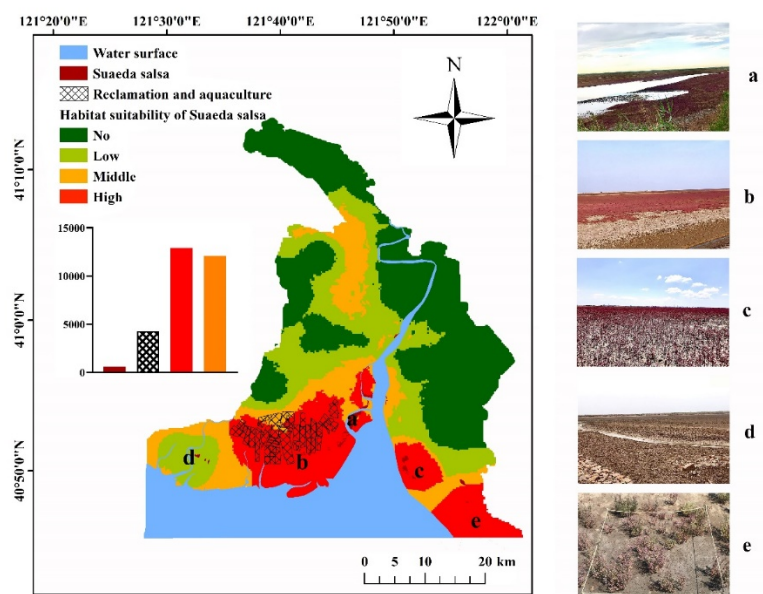


图6 辽河口湿地盐地碱蓬群落适宜性区域划分

Fig. 6 Regional division of the suitability of saline alkali pontic communities in the Liaohekou Wetland

在总面积约为 129146hm^2 的辽河口保护区范围内, 高适宜性区域面积约为 12902hm^2 , 约占评价区总面积的 9.99%, 中适宜性区域面积约为 12100hm^2 , 约占评价区面积的 9.37%。与现存的 596hm^2 盐地碱蓬

湿地的分布相对照,理论上还有约 12306hm² 的高适宜性区域和 12100hm² 的中适宜性区域可以考虑作为盐地碱蓬植被群落的保护及修复区域。在盐地碱蓬的潜在的高适宜性生境区域内,围垦养殖用地面积占比高达 33.31% (图 5),大量的抢占了盐地碱蓬的最适生境区域,造成原位环境被彻底代替,进一步压缩了盐地碱蓬的生存空间。

3.3 盐地碱蓬分布与围垦养殖的时空动态变化

1988-2018 年间,辽河口湿地的盐地碱蓬群落面积逐年减少,由 1988 年的 4158.81 hm² 减少到 2018 年的 807.48 hm²,其中,1989-1998 年间,是盐地碱蓬面积大幅度减少的 10 年,盐地碱蓬面积减少了 3154.32 hm²。在盐地碱蓬群落面积减少的同时,其破碎化程度也在持续加剧,由 1988 年的 1.06 加剧到 2018 年的 7.89,其中,2008-2018 年间,是盐地碱蓬破碎化程度加剧的 10 年,破碎化指数增加了 5.11。辽河口区域内的围垦养殖建设用地面积持续增加,由 1988 年的 126hm² 增加到 2018 年的 10724hm²。群落景观破碎化与围垦养殖面积呈线性正相关($R^2=0.8432$),盐地碱蓬景观破碎化程度随水产养殖面积的增加而加剧。截至 2018 年新增围垦养殖面积的 89.64% 是由盐地碱蓬群落适宜分布的潮间带转变而来。

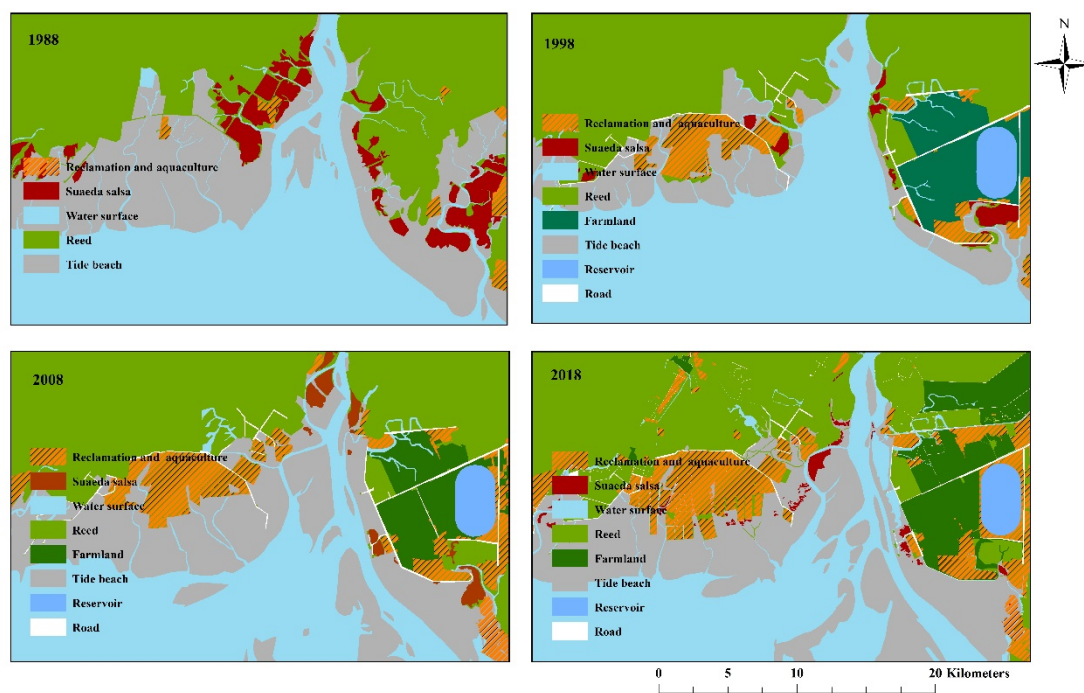


图 7 盐地碱蓬高度适宜生境区域的土地利用变化

Fig. 7 Land use change in areas of highly suitable habitat for saline alkali ponies

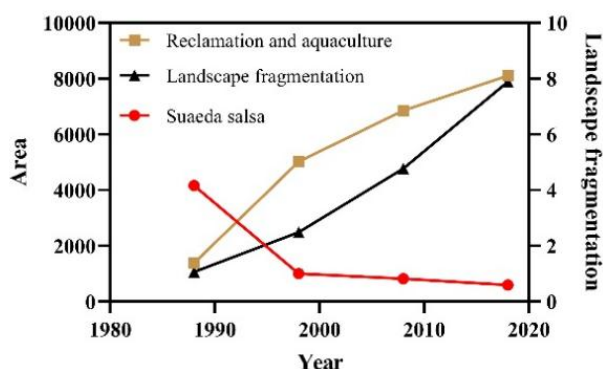


图 8 1985-2018 年水产养殖和盐地碱蓬面积变化及景观破碎化

Fig. 8 Changes in aquaculture and saline alkaline canopy area and landscape fragmentation, 1985-2018

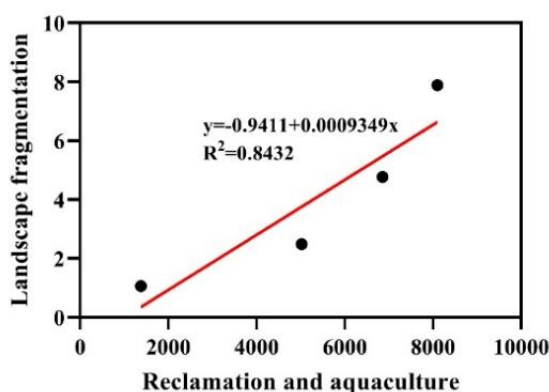


图 9 水产养殖与景观破碎化的关系

Fig. 9 Relationship between aquaculture and landscape fragmentation

4 讨论

4.1 影响盐地碱蓬生境适宜性的环境要素

盐地碱蓬适宜区域的盐分含量为 3.15-24.56g/kg, 说明盐地碱蓬在盐分梯度上有较宽的生态位。MaxEnt 模型的结果也表明, 随着盐分含量的增加, 盐地碱蓬的存在概率呈上升趋势, 反映了该物种对盐胁迫的适应能力较强。已有研究表明, 盐地碱蓬可以通过改变其生理和生长状态来适应不利的土壤环境, 例如, 通过调节离子平衡和自身的抗氧化系统来适应不同水平的盐胁迫^[49,50]; 促进可溶性蛋白、可溶性糖、脯氨酸和过氧化氢酶的产生来克服盐胁迫^[51]; 改变根系形态提高在盐胁迫下的养分获取和利用效率^[52]。随着重金属含量的增加, 盐地碱蓬的存在概率逐渐降低, 说明盐地碱蓬适宜生长在土壤重金属含量较低的区域。但通过辽河口区域土壤重金属含量测定的结果 (图 2-3) 可以看到盐地碱蓬实际分布区的重金属含量高于最适值, 这是因为当盐和重金属复合胁迫时, 盐可以通过降低湿地植物对重金属的吸收和转运, 提高植物对重金属的耐受^[53,54]。此外, 在重金属和盐的联合作用下, 盐地碱蓬具有协同和拮抗的作用^[55]。在本研究中, 以往的实验结果得到进一步验证, 盐地碱蓬是对盐胁迫和重金属胁迫有良好适应性的优势植物。

4.2 生境适宜性评估在生态恢复中的作用

野外调查所记录的盐地碱蓬群落实际分布区与由 MaxEnt 模型预测得到的盐地碱蓬群落理论分布区域存在一定程度上的重叠 (图 5)。(1) A 区域为 2015 年当地政府实施的“退养还湿”工程所在区域, 对区域内的老旧养殖池塘、堤坝、道路和闸门等近岸建筑进行了拆除并对该区域进行封闭管理, 区域生境得到了恢复, 来此栖息停歇的鸟类种类和数量已有所增加, 可以看到集中连片的盐地碱蓬群落分布, 说明“退养还湿”是抑制辽河口区域盐地碱蓬群落进一步退化的有效措施。(2) b 区域, 作为预测所得到的面积最大、适宜性最高的理论分布区域, 该区域的生境是非常适宜盐地碱蓬群落生长的, 但实际上, 盐地碱蓬的生长状况并不好, 盐地碱蓬的生长存在植株矮小、死亡率高、斑块破碎化严重的现象, 围垦养殖对原位生境的抢占和对自然演替的阻隔是造成此现象的主要原因, 且该区域内的部分养殖塘已经停止使用。

在中国长江三角洲湿地的研究中发现, 与全封闭围垦区 (建造封闭水坝阻止潮汐作用) 相比, 开放围垦区 (堆砌石坝, 减缓潮汐但不切断海水交换) 的物种数量和丰度更高^[56]。因此, 我们建议优先将已经废弃的建筑拆除, 其次改变原有的全封闭围垦为半封闭围垦, 解除不透水建筑物对区域内的水文连通性和原生演替的阻隔。(3) c 区域的盐地碱蓬植株粗壮强韧、分布较为集中, 经调查该区域为人工栽植的盐地碱

蓬以供发展生态旅游经济。(4) d 区域为国家级自然保护区黑嘴鸥繁育栖息地所在区域, 且该区域的盐地碱蓬基本上已完全退化为裸滩, 只有零星盐地碱蓬植株的分布, 虽然现处于完全隔绝人为扰动的封育的状态, 但通过对区域生境适宜性的评估, 该区域生境已经非常不适宜盐地碱蓬群落生长。(5) e 区域为辽河口的新兴工业区——辽东湾, 大量工厂已经在此兴建具有较高的经济价值。在调查过程中也只发现了零星分布的盐地碱蓬植被, 植株较为矮小、死亡率较高。辽东湾作为盐地碱蓬的潜在适宜生境分布区, 该区域的盐地碱蓬并没有被视为保护对象。因此, 我们建议优先将现存的盐地碱蓬分布区域保护起来, 再结合潜在生境的分布范围对区域发展的规划进行调整, 在保障经济发展的同时维持良好的生态环境。

通过对区域生境适宜性的评估来指导生态恢复在以往的研究中已被多次使用, 但多应用在区域尺度上。例如, 基于 MaxEnt 模型评估中国南部海草生境适宜性, 首次确定了中国南部海草管理的优先分布点, 为海草的保护和恢复规划提供支持^[43]; 通过自主开发的栖息地适宜性模型检测美国东北部生境, 以提醒管理者潜在栖息地的缺陷^[57]; 确定墨西哥森林景观恢复的优先区域^[58]。本研究证明在局部尺度上, 通过对生境适宜性的评估来指导生态恢复的方法依旧可行, 且能根据不同区域所面对的不同问题进行更有针对性的恢复措施。

4.3 围垦与生态环境之间的冲突和平衡

本研究预测了比现存盐地碱蓬群落更多的潜在适宜性分布区域, 这些尚未被保护的区域, 在沿海经济快速发展的背景下, 被大量的围垦活动所抢占, 导致盐地碱蓬原位环境被彻底代替, 植被群落退化严重。已有研究表明, 围填海活动改变了湿地土地利用类型和潮汐作用, 进而使湿地水文状况、土壤理化性质以及植被演替方向等发生变化, 上述这些变化必定会导致湿地生态系统碳平衡受到影响, 从而引起湿地生态系统碳库以及 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 等源汇功能改变, 最终将影响沿海生态系统的生产力和生态服务功能^[59-62]。围垦活动显著增加了湿地土壤中的 As、Cu、Zn 总量和 Cr、Zn 污染程度^[63]。研究表明^[64], 围垦降低了中国东部沿海 55.34% 的植物生物量、50.60% 的土壤有机碳含量和 49.99% 的总有机氮含量。在对 1990-2015 年间中国碳储存的估计研究中发现, 全国范围内的滨海湿地由于受到围垦的影响, 释放约 20.7Tg 的蓝碳^[65]。海洋和沿海自然资源大多数是可再生的。如果管理得当, 它们应该在不降低生产率的情况下为未来提供持续的回报^[66]。然而, 为了缓解土地资源供需矛盾, 围垦活动已成为世界上许多沿海地区发展海洋经济的主要形式, 在带来巨大社会效益的同时, 这种形式也产生了许多负面的生态影响^[67,68]。

随着围垦活动对生态环境的负面影响逐渐显露, 人们逐渐认识到湿地损失所带来的环境问题以及湿地保护的重要性。中国的国家政策也从鼓励开垦湿地以解决民生问题转变为禁止从国家到地方规模的各种土地开垦项目^[69,70]。研究表明, 中国沿海湿地每增加 1 平方公里, 就会减少风暴潮造成的损失 1268 万美元^[71]。根据《中国辽宁盘锦统计年鉴》, 2019 年第三产业(交通运输、旅游等)占区域生产总值的占比以达到 38.5%, 相较于 1984 年, 提升了 28.4%。辽河口作为重要的生态旅游目的地“红海滩”, 盐地碱蓬群落的恢复和重建不但能满足生态系统的生态需求而且能够满足区域发展的经济需求, 是能够平衡区域民生发展与生态系统保护的有效方法之一。为了使湿地利用的效益最大化, 同时保持生态系统的健康, 湿地管理者必须平衡社会经济发展和生态保护的竞争需求^[72]。

5 结论

研究结果表明, 基于机器学习方法的生境适宜性评估与高分辨率的遥感监测相结合能够科学支撑正确认识沿海湿地生态退化的动态过程和生态修复的有效途径。本研究结果探明了盐和重金属胁迫在辽河口湿地盐地碱蓬群落恢复和重建方面的重要性, 累计贡献率为 96%, 在宏观上主导了盐地碱蓬群落的分布。确

定了盐地碱蓬在辽河口湿地现状生境条件下的理论分布情况,与现存的 596hm² 盐地碱蓬群落的分布相对照,还有约 12306hm² 的高适宜性区域和 12100hm² 的中适宜性区域是盐地碱蓬群落的理论生存区域,其中, 33.31% 的盐地碱蓬的高适宜性区域被占用。掌握了盐地碱蓬与围垦养殖的时空动态变化关系,1988-2018 年间,新增围垦养殖抢占了 89.64% 的原本适宜盐地碱蓬生长的潮间带,盐地碱蓬群落破碎化程度随围垦养殖面积的扩大而加剧 ($R^2=0.8432$),明确了围垦养殖是造成盐地碱蓬原位环境被侵占和群落破碎化加剧的主要原因,揭示了滨海区域围垦与生态恢复之间的冲突。围垦与生态恢复之间的冲突提示我们沿海湿地可持续发展应该从引导当地居民改变产业模式入手,通过完善滨海湿地生态补偿机制降低围垦产业比重,逐步退出盐地碱蓬适宜性区域内的养殖设施,通过碱蓬群落的修复与重建实现沿海湿地的区域生态保护和可持续发展。