

DOI: 10.20103/j.stxb.202501030009

石舒心, 徐圣源, 孟紫琪. 黄河三角洲国家级自然保护区生态状况的时空动态变化研究. 生态学报, 2025, 45(16): - .
Shi S X, Xu S Y, Meng Z Q. The study of the spatiotemporal dynamic changes in the ecological condition of the Yellow River Delta National Nature Reserve. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(16): - .

黄河三角洲国家级自然保护区生态状况的时空动态变化研究

石舒心¹, 徐圣源², 孟紫琪^{1,*}

1 山东农业大学资源与环境学院, 泰安 271018

2 山东科技大学公共课教学部, 泰安 271000

摘要:黄河三角洲国家级自然保护区位于山东省黄河入海口, 其生态状况与黄河流域生态系统的健康程度息息相关, 探究其生态状况对于推动区域可持续发展以及达成国家生态保护战略目标具有重要意义。采用表征生态状况的生态等级指数(EG_i , 负向指标), 结合 Theil-Sen 趋势分析法和 Mann-Kendall 检验法, 研究了该保护区在 2000—2020 年间生态状况的时空变化; 同时, 结合地理探测器分析了其驱动因素; 基于时空变化信息, 通过 Hurst 指数对未来趋势进行了预测; 并利用 MaxEnt 模型分析了鸟类的适生区。结果表明: (1) 研究区生态状况呈“沿海及河道附近生态状况较好, 内陆生态状况较差”的空间分布格局; (2) 2000—2020 年间, EG_i 呈波动下降趋势, 生态状况呈逐渐变好的趋势, 生态状况变化趋势中呈改善趋势的占主体地位, 面积占比 71.50%, 呈退化趋势和保持稳定的面积较小, 主要分布在南部区域的东侧沿海地带; (3) 驱动因素对生态状况的解释力自高到低的排名依次为: 温度、高程、人口、降水、归一化植被指数、国内生产总值, 其中温度和归一化植被指数的交互作用最为显著; (4) 研究区未来的整体发展趋势为向好发展; (5) 鸟类适生区主要分布在南部区域的中部, 且与生态状况较好的区域具有一致性, 主要分布在黄河河道及沿海的狭长地带, 整体呈条带状分布, 高程、NDVI、土地利用类型是对鸟类适生区空间分布贡献最大的因素, 平均贡献率分别为 35.1%、22.6% 和 15.5%。为切实保护黄河三角洲国家级自然保护区的生态环境, 未来需强化黄河河道及两岸湿地的管理, 严格限制人类活动, 定期开展鸟类监测与生态评估。通过科学规划与严格管理, 全力推动鸟类与生态环境和谐共生, 为黄河三角洲生态保护和高质量发展提供有力支撑。

关键词:保护区; 时空变化; 趋势分析; 驱动力; 适生区

The study of the spatiotemporal dynamic changes in the ecological condition of the Yellow River Delta National Nature Reserve

SHI Shuxin¹, XU Shengyuan², MENG Ziqi^{1,*}

1 School of Resources and Environment, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China

2 Department of Fundamental Courses, Shandong University of Science and Technology, Taian 271000, China

Abstract: The Yellow River Delta National Nature Reserve, located at the estuary of the Yellow River in Shandong Province, was closely linked to the health of the Yellow River basin's ecosystem. Investigating its ecological conditions was of great significance for promoting regional sustainable development and achieving national ecological protection strategy goals. This study employed the Ecological Grade Index (EG_i , a negative indicator), which characterized the ecological condition, in conjunction with the Theil-Sen median method and the Mann-Kendall test, to study the spatial-temporal variations in the ecological condition of the reserve from 2000 to 2020. Additionally, we used the Geographical Detector to

基金项目:山东省自然科学基金资助项目(ZR2024QD177, ZR2024QA205); 山东省泰山学者青年专家项目(NO.tsqz20231205)

收稿日期:2025-01-03; **网络出版日期:**2025-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zqmeng_mzq@163.com

analyze the driving factors and employed the Hurst exponent to predict future trends based on the spatial-temporal variations information. The MaxEnt model was also utilized to analyze the suitable habitat areas for birds. The results indicated: (1) The ecological condition of the study area was spatially distributed with better conditions along the coast and near river channels, and poorer conditions inland. (2) Between 2000 and 2020, the EG_i showed a fluctuating downward trend, while the ecological condition gradually improved. The trend of ecological condition changes was dominated by improvement, with an area proportion of 71.50%. Areas showing degradation trends and stable conditions were relatively small and mainly distributed in the southeastern coastal zone of the southern region. (3) The driving factors, ranked from highest to lowest in terms of their explanatory power for ecological conditions, were: temperature, elevation, population, precipitation, Normalized Difference Vegetation Index, and Gross Domestic Product, with the most significant interaction occurring between temperature and Normalized Difference Vegetation Index. (4) The overall development trend for the future of the study area was positive. (5) The suitable habitats for birds were mainly distributed in the central part of the southern region and were consistent with areas of better ecological conditions. They were primarily located in the narrow zones along the Yellow River and the coastal areas, presenting a belt-like distribution. Elevation, NDVI, and land use types were the factors that contributed the most to the spatial distribution of bird suitable habitats, with average contribution rates of 35.1%, 22.6%, and 15.5%. To effectively protect the ecological environment of the reserve, future efforts must focus on strengthening management of the Yellow River channels and the wetlands on both sides of it, strictly regulating human activities, and implementing regular bird monitoring and ecological assessment. Through scientific planning and rigorous management, efforts will be intensified to promote harmonious coexistence between bird species and their ecological environment, providing strong support for the ecological protection and high-quality development of the Yellow River Delta.

Key Words: nature reserve; spatiotemporal change; trend analysis; driving force; suitable habitat

自然保护区是保护生物多样性的有效手段^[1],对保护生态系统格局具有积极意义^[2],为促进人类社会可持续发展提供了重要支撑。中国的自然保护区自建立以来,经历了从保护珍稀动植物的点状建设阶段,逐步发展到全面建设生态功能的体系化建设阶段。2013年,我国提出建立国家公园体制,逐渐形成了以国家公园为主体、自然保护区为基础、各类自然公园为补充的自然保护地体系^[3-4]。自然保护区作为未来国家公园建设的重要载体^[5],对于生态文明建设具有重要意义。

随着全球气候变化的加剧和人类活动强度的不断提升,自然保护区的生态状况也呈现出相应的变化。目前,学者对保护区的生态状况的研究主要聚焦于从价值评估^[6]、气候变化^[7]、湿地景观过程^[8]、功能分区^[9]等方面。对于黄河三角洲国家级自然保护区的研究,主要从湿地生态、植被、生态修复等方面开展,如周方文等^[10]在生态系统服务和 In VEST 的 Carbon 模块和 Biodiversity 模块平台上,利用土地利用和土壤碳库等数据,模拟评估黄河三角洲滨海湿地生态系统服务;张晗旭等^[11]探究了黄河三角洲修复工程对大型底栖动物的群落影响及关键影响因子;庞博等^[12]评估了黄河三角洲湿地生物多样性保护工程的植被修复效果。研究方法上,对于生态状况评价的方法已趋于多元化,欧阳玲等^[13]利用生态环境状况指数对科尔沁沙地生态环境状况进行了评价;舒远琴等^[14]建立了哈尼梯田湿地生态系统健康评价指标体系对对梯田湿地生态系统的健康状态进行评价;权文婷等^[15]利用遥感生态指数对陕西省东庄水库流域生态环境变化进行了监测与评价;徐国荣等^[16]运用 PSR 数学模型构建了生态系统健康指数对甘南尕斯库勒湿地生态系统进行了评价。

以往对黄河三角洲国家级自然保护区的研究多聚焦于湿地,但研究区的生态系统还包括林地、草地、水体、未利用地等多种土地利用类型。与此同时,人类活动也会对生态系统产生影响,仅从湿地单一角度难以全面揭示生态系统的整体生态状况及其时空变化趋势。

基于上述分析,本研究以黄河三角洲国家级自然保护区为研究对象,基于 RS 和 GIS 等技术,利用表征生态状况的生态等级指数(Ecological Grade Index, EG_i)数据,结合 Theil-Sen 趋势分析法、Mann-Kendall (MK) 检

验、Hurst 指数、地理探测器等方法,对黄河三角洲国家级自然保护区生态状况的时空变化及驱动因素进行分析,并结合 MaxEnt 模型分析鸟类适生区分布,以期为黄河三角洲国家级自然保护区生态和鸟类的保护提供科学支持。

1 研究区域与数据来源

1.1 研究区域概况

黄河三角洲国家级自然保护区成立于 1992 年,位于黄河入海口处,北临渤海湾,东靠莱州湾^[17],属于暖温带季风性气候区,雨热同期^[18]。保护区有“鸟类国际机场”之称,境内鸟类共有 19 目、64 科、367 种^[19]。同时,该保护区位于环渤海经济圈,是山东对接京津冀的门户地区,具有明显区位优势^[19]。黄河三角洲国家级自然保护区分为南北两块,南部位于现行黄河入海口,称为南部区域;北部位于 1976 年改道前的黄河故道入海口,称为北部区域。黄河三角洲国家级自然保护区包括海洋和陆地两部分,由于海洋部分数据缺失,且其与陆地环境存在显著差异,因此,本文将基于陆地部分数据进行研究,以确保评估结果的准确性和可靠性,具体的研究区域如图 1 所示。

1.2 数据来源与预处理

EG_i采用的数据为黄河三角洲国家级自然保护区土地利用数据,包括 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年和 2020 年共 5 期数据。

为探究研究区生态状况的影响因素,基于现有针对生态环境影响因素的相关研究^[20-21],在确保代表性和科学性的前提下,选取了 8 类指标作为影响因子,这些指标涵盖了人类活动、地形、气候、植被等多个方面,具体包括:国内生产总值、人口、高程、坡度、坡向、气温、降水、归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)。其中,NDVI 数据来源于 Google Earth Engine(GEE)云平台,并对其进行了合成、去云和重采样等处理^[22]。

本研究所需的水鸟分布数据,均从 GBIF 中获取。为确保数据精准可靠,在水鸟分布数据的筛选过程中,选择了 2000—2020 年间在保护区出现的物种,并对数据进行空间自相关处理^[23]。最终按照 IUCN 全球红色名录划分的物种保护级,选择了以下物种:极危物种白鹤;濒危物种大杓鹬、东方白鹮;近危物种白眼潜鸭、斑尾塍鹬中部亚种、黑尾塍鹬、罗纹鸭、白腰杓鹬、卷羽鹈鹕;易危物种鸿雁、白枕鹤、红头潜鸭、丹顶鹤、白头鹤。选择的物种包括本研究利用鸟类分布数据和上述 8 类指标以及土地利用状况构建 MaxEnt 模型^[24],分析鸟类分布与生态状况之间的内在联系。各数据来源及其分辨率见表 1。

2 研究方法

2.1 生态等级指数

在分析保护区生态状况时,由于水体的干扰,遥感生态指数(RSEI)等常用指标难以准确反映研究区的真实生态状况,甚至部分区域出现与实际情况相反的结果。以湿地生态系统为例,水体与水生植被是其重要组成部分,但由于二者地表辐射水平较低,对 RESI 指数的贡献度不高,导致评价结果不理想。由于不同的土地利用类型在生态功能方面存在显著差异,生态等级不仅能够明确土地利用类型在生态层面的重要程度,还能通过计算特定区域生态等级的平均值,对该区域的生态状况进行有效评估,为描述其生态现状提供有力依

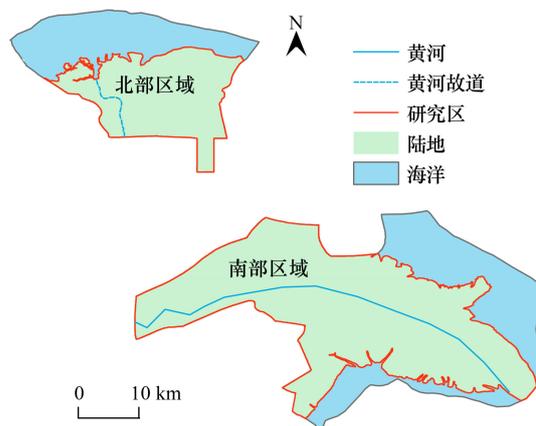


图 1 黄河三角洲国家级自然保护区位置示意图

Fig.1 Schematic map of the location of the Yellow River Delta National Nature Reserve

据^[25], 现已应用在生态状况^[25]、生态质量^[26]等的分析中。因此, EG_i 能够有效解决 RSEI 等指标的局限性, 精准揭示研究区生态状况。其计算公式为:

$$EG_i = \frac{\sum_{j=1}^n EG_{ij} \times A_{ij}}{\sum_{j=1}^n A_{ij}} \quad (1)$$

式中, EG_i 表示某一区域 i 的生态等级指数; EG_{ij} 表示第 i 个区域第 j 种土地利用类型的生态等级指数; A_{ij} 表示 i 区域中第 j 种土地利用类型的面积(km^2)。 EG_i 为负向指标^[25], EG_i 值越低, 表明研究区生态综合功能就越高, 该区域生态状况越好。

表 1 数据来源与空间分辨率信息

Table 1 Data source and spatial resolution information

数据名称 Data name	数据来源 Data source	空间分辨率/m Spatial resolution/m
保护区边界 Reserve boundary	资源环境科学与数据平台 (https://www.resdc.cn/)	-
国内生产总值 Gross domestic product	资源环境科学与数据平台 (https://www.resdc.cn/)	1000
人口 Population	WorldPop (https://hub.worldpop.org/)	1000
土地利用 Land use	资源环境科学与数据平台 (https://www.resdc.cn/)	30
高程 Elevation	资源环境科学与数据平台 (https://www.resdc.cn/)	12.5
气温 Temperature	国家青藏高原科学数据中心 (https://www.resdc.cn/)	1000
降水 Precipitation	时空三极环境大数据平台 (https://www.resdc.cn/)	1000
归一化植被指数 Normalized difference vegetation index	GEE (https://developers.google.cn/earth-engine/datasets)	500
水鸟的分布 Distribution of waterbirds	GBIF (https://www.gbif.org/)	-

不同土地利用类型提供的生态系统服务不同, 对生态系统服务价值的贡献不同, 从而造成生态等级不同。本研究依据邵全琴等^[27]对于各种土地覆被类型的自然禀赋和在转类后生态综合功能的升降的研究, 基于 Li Y R 等^[28]提出的土地利用类型的生态等级, 结合研究区土地利用现状(图 2), 调整得到研究区 8 类土地利用

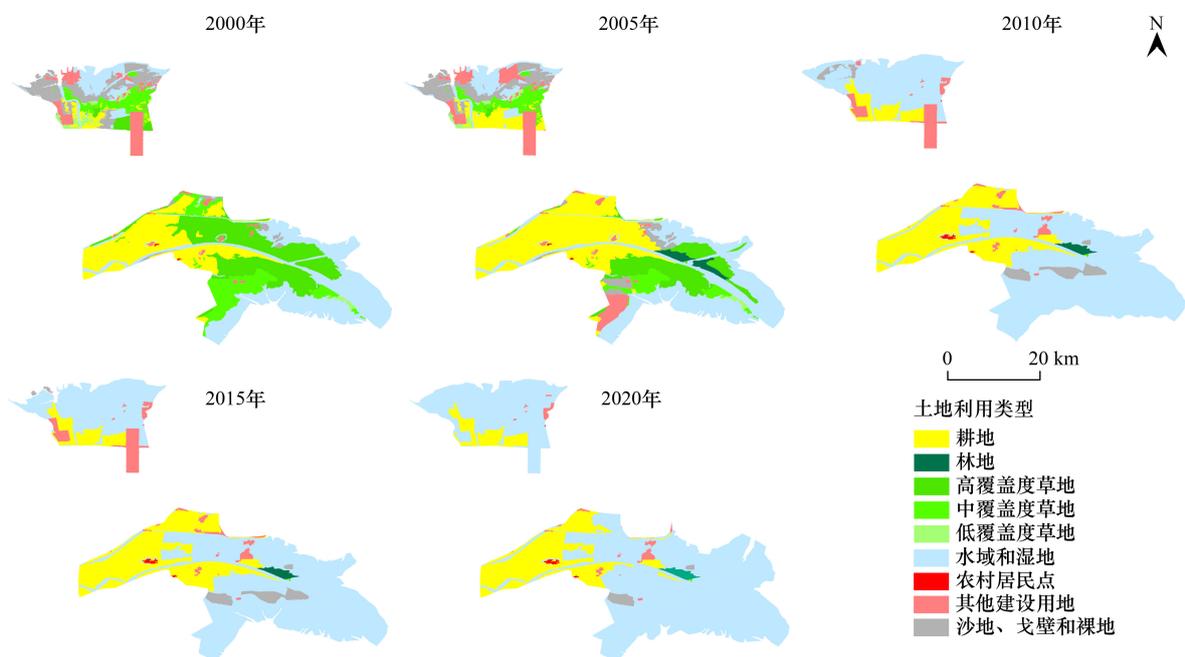


图 2 土地利用空间分布图

Fig.2 Land use spatial distribution map

类型的生态等级,如表 2 所示。即水域与湿地作为“地球之肾”,在气候调节、物种保育及水质净化方面效能最为显著,因此将其生态等级设置为 1;林地凭借碳汇能力、水土保持功能及生物多样性支撑位列其后,其生态等级设置为 2;高、中、低覆盖度草地依植被密度递减,其固土保水与碳固定效能逐级弱化,分别设置为 4、5、6;耕地虽具备一定水土保持作用,但因种植结构单一且高度依赖人工干预,生态功能显著受限,其生态等级设置为 7;农村居民点通过宅基地扩张直接侵占自然生境,生活污染加剧面源污染,设置为 8;其他建设用地通过工业用地、交通网络等高强度开发,造成不可逆的地表硬化与生态系统割裂,其生态等级设置为 10;沙地、戈壁与裸地因极端气候条件或植被完全缺失,生态服务功能近乎丧失,且生态修复成本极高,设置为 11。在针对研究区的生态状况展开分析的过程中,为了最大程度地保障研究结果的精准性,最终选取了 5 期数据共有的陆地部分,作为保护区陆地部分的界定范围。利用渔网法^[29],经过多尺度对比分析,确定分析研究区的最优空间尺度为 1 km×1 km。最终,利用 EG_i 将生态状况划分为 5 个等级^[25]:0—3 为优;3—4.5 为良好;4.5—6 为中等;6—7.5 为较差;7.5—11 为差。

表 2 研究区土地利用类型及其生态等级

Table 2 Land use types and their ecological grade index in the study area

土地利用类型 Land use and land cover type	生态等级 Ecological grade	生态用地 Ecological land
水域和湿地 Water area and wetland	1	是
林地 Forested land	2	是
高覆盖度草地 High coverage rate grassland	4	是
中覆盖度草地 Medium coverage rate grassland	5	是
低覆盖度草地 Low coverage rate grassland	6	是
耕地 Farmland	7	否
农村居民点 Rural settlements	8	否
其他建设用地 Other construction land	10	否
沙地、戈壁和裸地 Sandy, gobi and bare land	11	否

2.2 生态状况空间变化趋势

结合 Theil-Sen Median 趋势分析和 MK 检验的方法,对于测量误差和离群数据不敏感,能够较为科学地判断长时间序列数据的趋势^[30]。其中,Theil-Sen Median 趋势分析是一种稳健的非参数统计的趋势计算方法,适用于检验时间序列的变化趋势^[31]。其计算公式为:

$$\beta = \text{median} \left(\frac{x_j - x_i}{j - i} \right), 1 < i < j < n \quad (2)$$

式中, β 表示衡量指数变化趋势的斜率; $\text{median}()$ 表示取中值; i, j 表示时间序数; x_i 和 x_j 分别表示时间序列第 i 年和第 j 年的指数值。当 $\beta > 0$ 时,表示时间序列的指数值的变化呈上升趋势,即生态状况恶化;当 $\beta < 0$ 时,表示时间序列的指数值的变化呈下降趋势,即生态状况改善;当 $\beta = 0$ 时,表示时间序列的指数值基本不变。

MK 检验是一种非参数的时间序列趋势性检验方法,样本不需要服从正态分布,且不受异常值和缺失值的影响,能够较为准确地检验长时间序列数据的趋势显著性^[32]。

MK 检验中,检验统计量 S 计算公式为:

$$S = \sum_{b=1}^{n-1} \sum_{a=b+1}^n \text{sgn}(x_b - x_a) \quad (3)$$

式中, a, b 表示时间序数; x_a 和 x_b 表示时间序数第 a 年和第 b 年的指数值; $\text{sgn}()$ 表示符号函数,其计算公式为:

$$\text{sgn}(x_b - x_a) = \begin{cases} 1, & x_b - x_a > 0 \\ 0, & x_b - x_a = 0 \\ -1, & x_b - x_a < 0 \end{cases} \quad (4)$$

用 Z 判断趋势的显著性,其计算公式为:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{f(S)}}, & S > 0 \\ 0, & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{f(S)}}, & S < 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中, $f(S)$ 表示 S 的方差,其计算公式为:

$$f(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (6)$$

式中, n 为序列中数据个数。

在给定的显著性水平 α 下,在正态分布表中查得临界值 $Z_{1-\alpha/2}$ 。当 $|Z| \leq Z_{1-\alpha/2}$ 时,趋势不显著变化;当 $|Z| > Z_{1-\alpha/2}$ 时,趋势显著变化。本研究中给定显著性水平 $\alpha = 0.05$,则临界值 $Z_{1-\alpha/2} = \pm 1.96$,当 $|Z|$ 大于 1.96 时,表示趋势通过了信度为 95% 的显著性检验。MK 检验后的趋势特征分类见表 3。

表 3 MK 检验后的趋势特征分类

Table 3 Trend feature classification after MK test

斜率 (β) Slope (β)	标准化统计量 (Z) Standardized statistic (Z)	趋势类别 Trend category	趋势特征 Trend characteristics
斜率 Slope (β) > 0	$ Z \geq 1.96$	-2	显著恶化
	$ Z < 1.96$	-1	不显著恶化
斜率 Slope (β) = 0	$ Z $	0	无变化
斜率 Slope (β) < 0	$ Z < 1.96$	1	不显著改善
	$ Z \geq 1.96$	2	显著改善

2.3 驱动因素分析

地理探测器能够探测空间分异性,揭示其背后驱动因子,本研究采用其中的因子探测和交互探测。因子探测能够探测因变量 Y 的空间分异性,探测某因子 X 多大程度上解释了属性 Y 的空间分异^[33]。交互探测能识别不同解释变量之间的交互作用,并评估这些变量共同作用时对因变量解释力的影响^[33],其计算公式^[34]为:

$$q = 1 - \frac{\sum_{n=1}^m N_n \sigma_n^2}{N \sigma^2} \quad (7)$$

式中, $n = 1, 2, \dots, m$ 表示变量 Y 或因子 X 的分层; N_n 表示层 n 的单元数; N 表示全区的单元数; σ_n^2 表示层 n 的 Y 值的方差; σ^2 表示全区的 Y 值的方差。因子探测中的 q 值能够衡量空间分异性和解释力, q 值越大,说明因变量 Y 的空间分异性越明显, q 值大于 0.5 时,自变量 X 可看作影响因变量 Y 空间分布的一个重要因素。

基于对不同方法、不同分类等级的对比分析,可以采用自然断点法分析解释变量得到最优间隔区间,将等级设置为 9 类。随后利用不同影响因子在 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年以及 2020 年这 5 个时间节点上的平均值,分析其对研究区生态状况的驱动力。

2.4 未来趋势预测

Hurst 指数能够衡量时间序列数据自相似性和长期依赖性^[35],可用于分析和预测时间序列数据的趋势,目前已在环境、地理、水文等领域广泛应用^[36]。当 $0 \leq H < 0.5$ 时,时间序列具有反持续性,即未来的趋势与过去的趋势相反;当 $H = 0.5$ 时,时间序列是随机序列,即未来的趋势不受过去的趋势影响;当 $0.5 < H \leq 1$ 时,时间序列具有持续性,即未来的趋势与过去的趋势相一致,表明时间序列变化具有长程依赖性^[37]。

本研究首先计算了 Hurst 指数,随后将 Hurst 指数和通过了 MK 检验的 Theil-Sen 趋势叠加^[38],得出 EG_t 的

未来发展方向及强度。

2.5 鸟类适宜生境分布模拟

鸟类分布与生态状况的内在联系,对生态时空动态变化研究意义重大。鸟类对生态环境变化敏感,能快速反映生态状况。从时空维度来看,鸟类适生区的分布,能揭示小区域生境之间的分异,助力评估生态修复、构建模型,为生态保护提供科学依据。

MaxEnt 基于最大熵原理,通过结合物种分布数据和环境变量,对物种的潜在分布区域进行预测^[39],现广泛应用于生境适宜性评价^[40]、适生分布预测^[41]等方面。将鸟类分布数据和 9 个环境变量导入 MaxEnt 模型,随机选取 75% 的鸟类分布数据用于模型训练,剩余 25% 的分布数据用于模型验证。选择 Bootstrap 作为重复运行的类别,并将重复次数设定为 10,其他各项参数均采用模型的默认值,最后以 10 次计算后的平均值作为模型最终结果^[40],以确保模型构建与验证过程的科学性与规范性。模型结果的准确性与接受者操作特征曲线(ROC)下的面积(AUC 值)成正比,当 AUC 值大于 0.8 时,认为模型性能良好^[42],模型预测结果可靠。

依据鸟类分布的数量,本研究采取自然间断点分级法将鸟类适生区划分为四个等级:非常适宜、比较适宜、一般适宜和不适宜。将利用 2000—2020 年间 EG_i 的均值生成的生态状况与鸟类适生区分布状况,以双变量地图的形式进行结合展示,具有多方面的重要意义。其一,能够极为直观地呈现两个变量的空间分布特征^[43],展现出鸟类分布与生态状况之间的紧密联系,迅速判断生态状况以及潜在风险;其二,有助于发现生态变化与鸟类适生区的相互影响,避免只关注单一因素而导致决策失误,为生态保护与鸟类保护提供更精准的依据^[43],使保护策略制定能兼顾生态与鸟类需求,促进生态系统的平衡与稳定。

3 结果

3.1 生态状况空间分布格局

逐像元计算 2000—2020 年间 EG_i 的均值,结果如图 3 所示。结果表明,研究区整体生态状况较好,并在空间上呈现“沿海及河道附近生态状况较好,内陆生态状况较差”的分布格局。其中,生态状况表现为优的区域面积最大,占研究区总面积的 57.14%;生态状况表现为差的区域面积最小,占比 5.24%。由于沿海区域主要为湿地生态系统,其较低的生态等级导致 EG_i 值较低,进而生态状况较好;而内陆区域由于农业开发,多为水田、旱地、农村居民点、其他建设用地等非生态用地,对生态状况产生了负面影响。

3.2 2000—2020 年生态状况的时空变化特征

利用均值法求得 2000—2020 年 EG_i 的变化趋势及

分级面积比重,如图 4 所示。结果表明,研究区整体生态状况逐渐变好。研究区 EG_i 整体呈波动下降趋势,从 2000 年生态状况呈良好的 4.64 下降到 2020 年生态状况呈优的 2.16。生态状况呈优的区域面积不断扩张,20 年间面积比例由 30.75% 扩张到 71.82%,而生态状况呈良好、中等、较差和差的区域面积均逐渐缩小。

经过 Theil-Sen 趋势分析法和 MK 检验,得到生态状况空间变化趋势分布图,如图 5 所示。结果表明,分布面积最广的是生态状况不显著改善趋势的区域,面积占比为 66.38%,主要土地利用类型从高覆盖率草地和中覆盖率草地变化为湿地。整体来看,研究区生态状况呈改善趋势的面积占比为 71.50%,在变化趋势中占主体地位,生态状况呈现退化趋势的面积占比为 12.99%。生态状况保持稳定的区域,主要分布在南部区域的东侧沿海地带,同时在西北侧和北部区域的北侧也有小范围的分布,这些区域的主要土地利用类型为水体和湿地。湿地位于海洋和陆地的过渡地带,受人类活动干扰较少,土地利用类型变动少,因此生态状况在这些区域

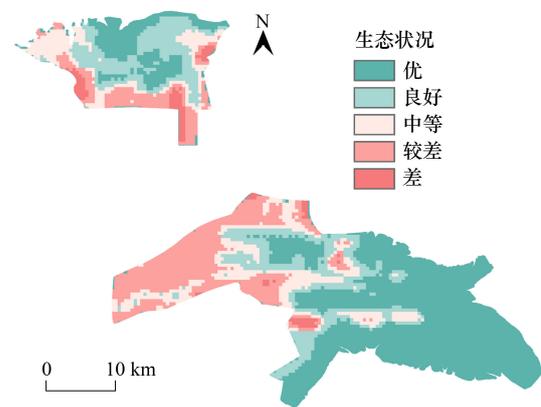


图 3 生态状况空间分布图

Fig.3 Ecological condition spatial distribution map

的变化不明显。

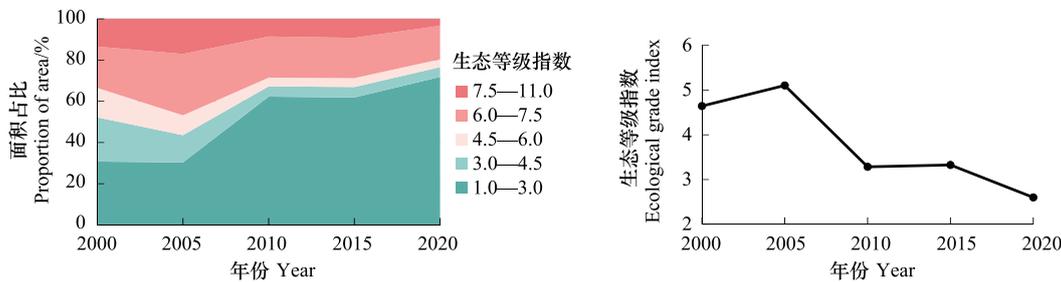


图 4 生态等级指数曲线及分级面积比重图

Fig.4 Ecological grade index curve and graded area proportion chart

3.3 驱动力分析

基于地理探测器的因子探测与交互探测功能,分析影响保护区生态等级的驱动因子,揭示气候、地形、人类活动等因素对研究区生态状况空间异质性的解释力及其交互作用。图 6 为利用地理探测器所得的生态状况空间分异驱动因子的探测结果。

因子探测表明,驱动因素对生态状况的解释力排名依次为温度>高程>人口>降水>NDVI>国内生产总值。温度对 EG_i 的解释力最强, q 值为 0.2239。其次,高程、人口和降水对生态状况的解释力大致相当,均大于 0.2。坡度和坡向对于 EG_i 的解释力较弱,且 P 值大于 0.05,显著性较小,对于研究区生态状况空间分异性的影响力较小。

从交互探测的结果来看,任意两个因子的交互作用大于单一因子对生态状况空间分布的解释力度,两两交互类型(因子∩因子)主要呈现为双因子增强以及非线性增强模式。其中,高程∩NDVI、高程∩人口、高程

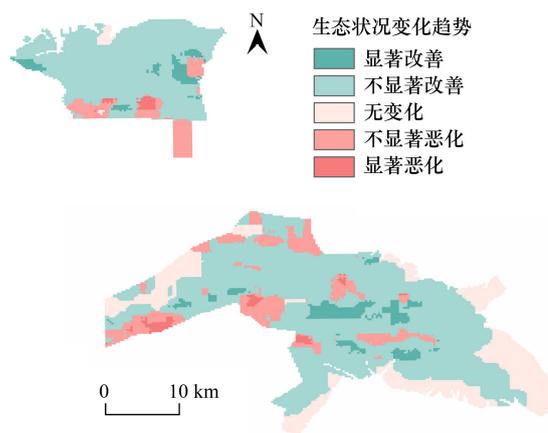


图 5 生态状况空间变化趋势分布图

Fig.5 Spatial trend distribution map of ecological conditions

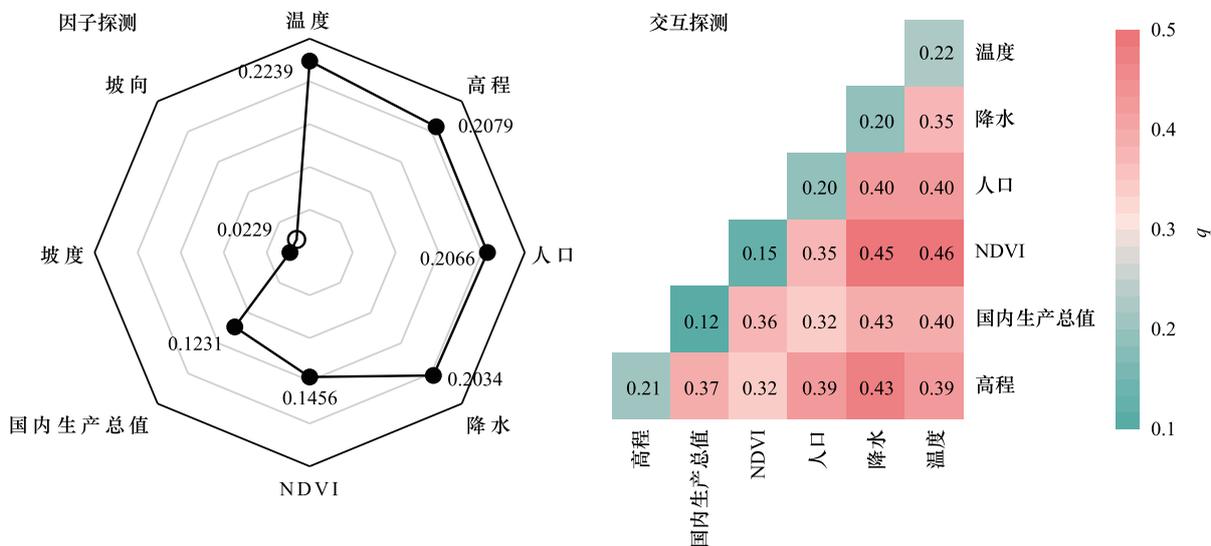


图 6 生态状况驱动因子探测结果

Fig.6 Ecological condition driving factors detection results

\cap 温度、国内生产总值 \cap 人口、NDVI \cap 人口、人口 \cap 降水、人口 \cap 温度、降水 \cap 温度的 q 值均大于二者 q 值,为双因子增强,其他因子两两交互后 q 值大于 q 之和,为非线性增强。这一结果表明,因子在交互过程中并非遵循简单的线性相加规律,而是通过一种更为错综复杂且具有非线性特征的作用机制,共同对生态等级产生影响,从而塑造出更为复杂的生态状况空间分布格局。其中,NDVI \cap 温度的 q 值最大,处于影响生态状况空间分异的主导地位。

3.4 生态状况的未来变化趋势

为更好分析研究区生态状况的未来变化趋势,本研究利用 Hurst 指数得出 EG_i 的未来发展方向及强度,从而对研究区生态状况的未来变化趋势与过去变化趋势的关系进行研究,结果如表 4 和图 7 所示。由表 4 可知,未来研究区的整体发展态势向改善方向发展。未来,生态状况改善区域占整体的 70.11%,其中持续性改善区域面积达 69.87%。这一现象说明,黄河三角洲国家级自然保护区长期实施一系列生态保护与修复工程,通过退耕还湿、退养还滩等措施,增加了湿地面积,改善了植被生长环境,使得生态状况有所改善。但由于研究区生态系统敏感脆弱,以及气候变化等问题,退化的趋势也不可避免。

表 4 生态状况未来变化趋势表

Table 4 Table of future trends in ecological conditions

未来变化趋势 Future development trends	发展方向 Development direction	面积百分比/% Area percentage
持续性退化 Persistent degradation	持续退化	12.79
反持续性改善 Non-persistent improvement	过去改善但未来退化	1.54
反持续性退化 Non-persistent degradation	过去退化但未来改善	0.24
持续性改善 Persistent improvement	持续改善	69.87
基本不变 Essentially unchanged	基本不变	15.56

由图 7 可知,未来生态状况的空间变化趋势在研究区的南部区域和北部区域表现出不同的特征。未来南部区域的生态环境质量整体呈现改善趋势,但在南侧零星分布着一些退化区域;南部区域则显示出更为复杂的变化模式,既存在改善也存在退化的趋势。

3.5 鸟类的适生区与环境影响因素

MaxEnt 模型的分析结果如图 8 所示,其平均 AUC 值在 0.804 到 0.914 之间,模型性能良好,可用于分析鸟类的适生区。

鸟类适生区的分布如图 9 所示。在选定物种的适生区中,非常适宜的区域主要集中在南部区域的东侧沿海地带,以及黄河河道与黄河故道周边;比较适宜鸟类生存的区域,多见于河道两侧的湿地水体附近,以及北部区域的南侧;而南部区域的西侧,北部区域的东侧,多为一般适宜或不适宜鸟类生存的区域。所有选定物种的适宜分布区都包括南部区域的中部,多半物种分布在黄河河道及沿海的狭长地带,这些区域应该作为研究区的重点保护区域。其中,斑尾塍鹬中部亚种虽然在南部区域中部有少量分布,但更适宜分布在北部区域和南部区域的东侧,这些位置也应重点保护。

本研究综合评估了保护区内鸟类适生区以及生态状况,二者叠加分析生成的双变量地图(图 10),突出显示了保护区内生态状况可能对鸟类分布产生最大潜在影响的位置。为了便于分类分析,将生态状况分为两

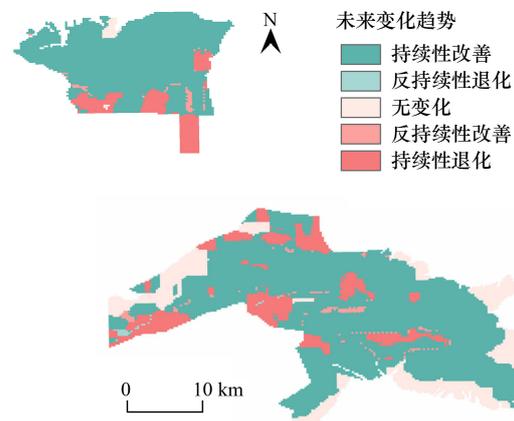


图 7 生态状况未来变化趋势空间分布图

Fig.7 Spatial distribution map of future trends in ecological conditions

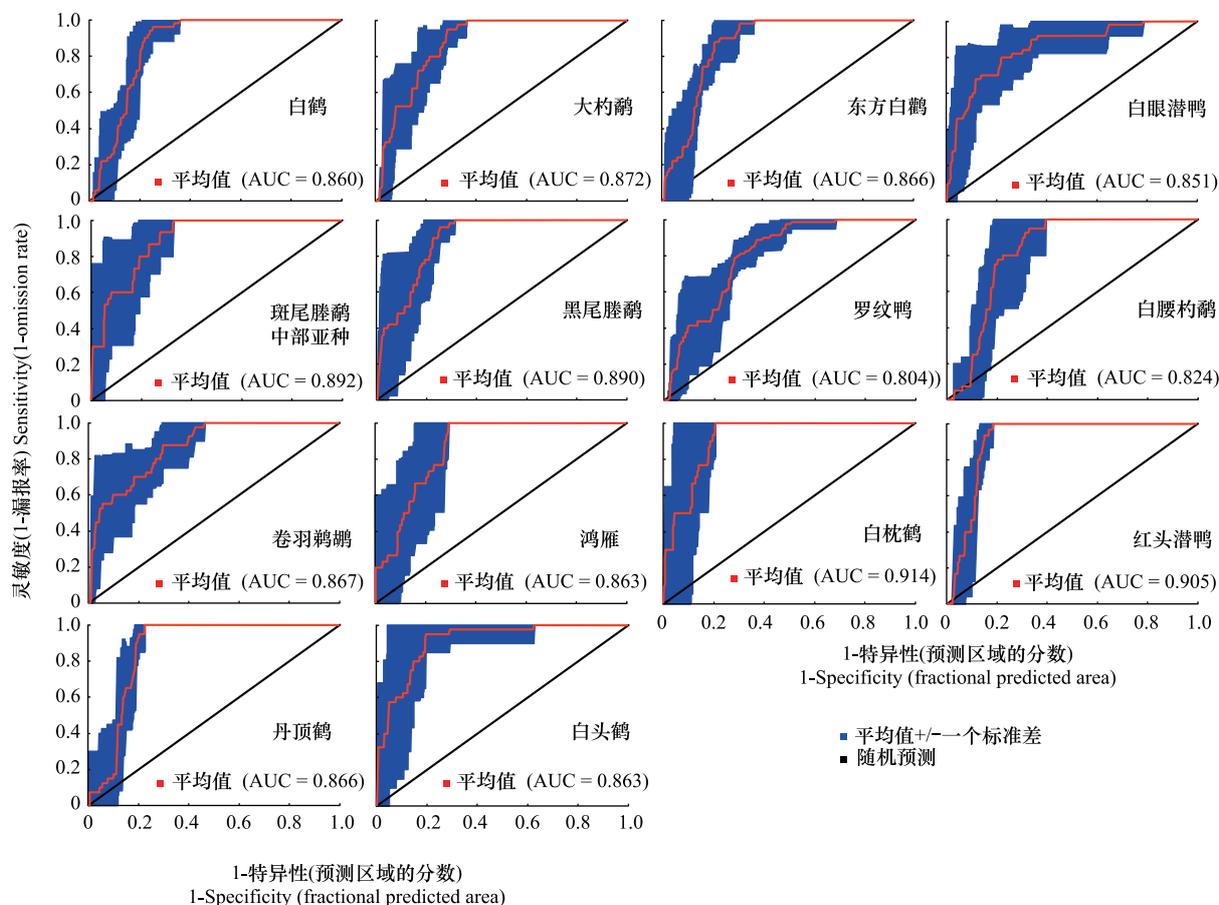


图 8 接受者操作特征曲线 (ROC)

Fig.8 The receiver operating characteristic (ROC) curve

类:第一类包括优和良,第二类为中等、较差和差;将鸟类适生区分为两类:第一类为非常适宜和比较适宜,第二类为一般适宜和不适宜。其中,斑尾塍鹬中部亚种适生区和生态状况均呈现良好的区域主要分布在南部区域的东侧和北部区域的北侧,黑尾塍鹬适生区和生态状况均呈现良好的区域主要分布在南部区域的南侧,罗纹鸭、卷羽鹈鹕主要分布在南部区域南侧和北部区域北侧,其他 10 种物种主要分布在黄河河道及沿海的狭长地带,整体呈条带状分布。

在所有参与构建 MaxEnt 模型的因素中(图 11),高程、NDVI、土地利用类型对选定物种适生区空间分布的贡献最大,平均贡献率分别为 35.1%、22.6%和 15.5%,这意味着,在构建适生区空间分布模型时,这三个因素解释了大部分的空间变异。相比之下,降水与坡度对选定物种适生区空间分布的影响微弱,平均贡献率分别为 0.8%和 0.1%,对整体空间分布格局的塑造作用几乎可以忽略不计。温度、国内生产总值、坡向和人口也对选定物种适生区空间分布也有一定影响,贡献率分别为 11.3%、10.0%、3.5%和 1.1%。其中,对大杓鹬、黑尾塍鹬、罗纹鸭、白腰杓鹬、卷羽鹈鹕、白枕鹤、红头潜鸭、丹顶鹤和白头鹤适生区空间分布贡献最大的是高程,对白鹤、东方白鹤、白眼潜鸭和鸿雁适生区空间分布贡献最大的是归一化植被指数。不同于以上 13 种鸟类,对斑尾塍鹬中部亚种适生区空间分布影响最大的是国内生产总值,其贡献率高达 67.2%。国内生产总值的增长通常伴随着一系列人类活动的变化,而这些变化能够对栖息地范围、质量及连通性产生深刻的影响,进而决定适生区的空间分布格局。

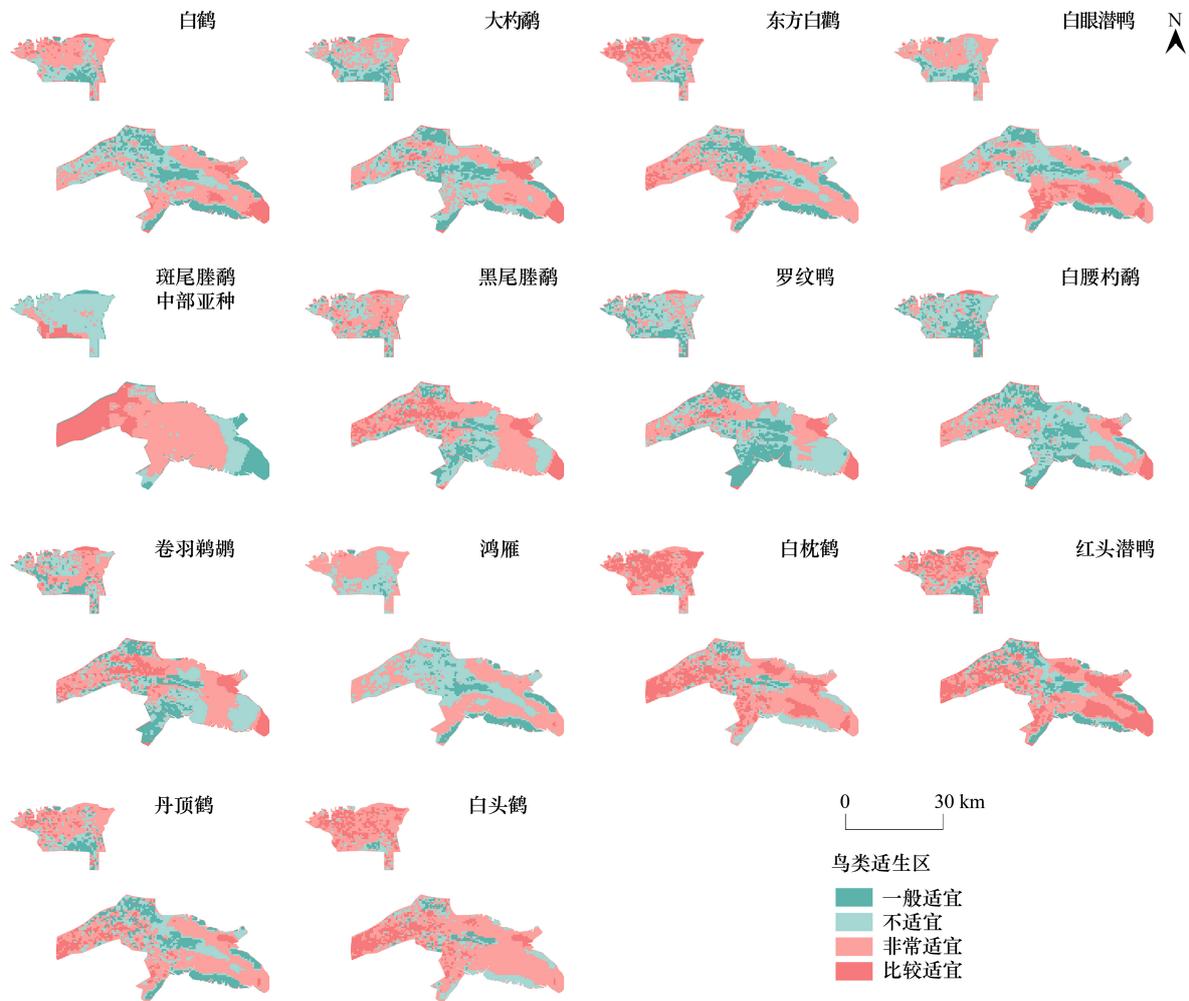


图9 鸟类适生区分布图

Fig.9 Bird habitat suitability distribution map

4 结论与讨论

4.1 讨论

2000—2020年间,研究区的生态状况呈现“V”型的变化曲线。5个时间节点中,2005年的生态状况最差, EG_i 为5.13。2000年到2005年间,生态状况恶化的区域扩张,其中生态等级指数6—11的区域(生态状况为较差和差)面积占比由33.50%增长到46.80%;同时,生态等级指数1—6的区域(生态状况为优、良好和中等)面积均缩小,尤其是生态等级指数3—4.5的区域,面积占比由21.45%缩减至13.22%。通过土地利用转移矩阵分析土地利用的动态变化可知,2000年到2005年间,研究区内的生态用地($EG_i < 7$ 的水域及湿地、林地、高覆盖度草地、中覆盖度草地和地覆盖度草地)呈现出显著的缩减态势,其减少面积占到保护区陆地面积的14.68%。这一变化致使区域的生态状况急剧恶化。

在黄河三角洲区域,尽管高程的变化不如山地显著,但它仍然是影响生态状况的一个重要因素,这主要归因于黄河三角洲独特的地理和生态特征。高程是决定滨海湿地植物存活和分布的最关键环境因子,在滨海湿地中高程的变化会直接影响土壤的水分、盐分和肥力等条件,而一旦水-盐环境超过了植被的耐受阈值,就会直接影响植被的生长^[44],进而影响生态状况。黄河三角洲地区受到石油资源开发、水产养殖、农田开垦等人类活动的干扰,这些活动会影响植被覆盖面积,进而影响地表温度,造成生态状况的空间分异^[45]。

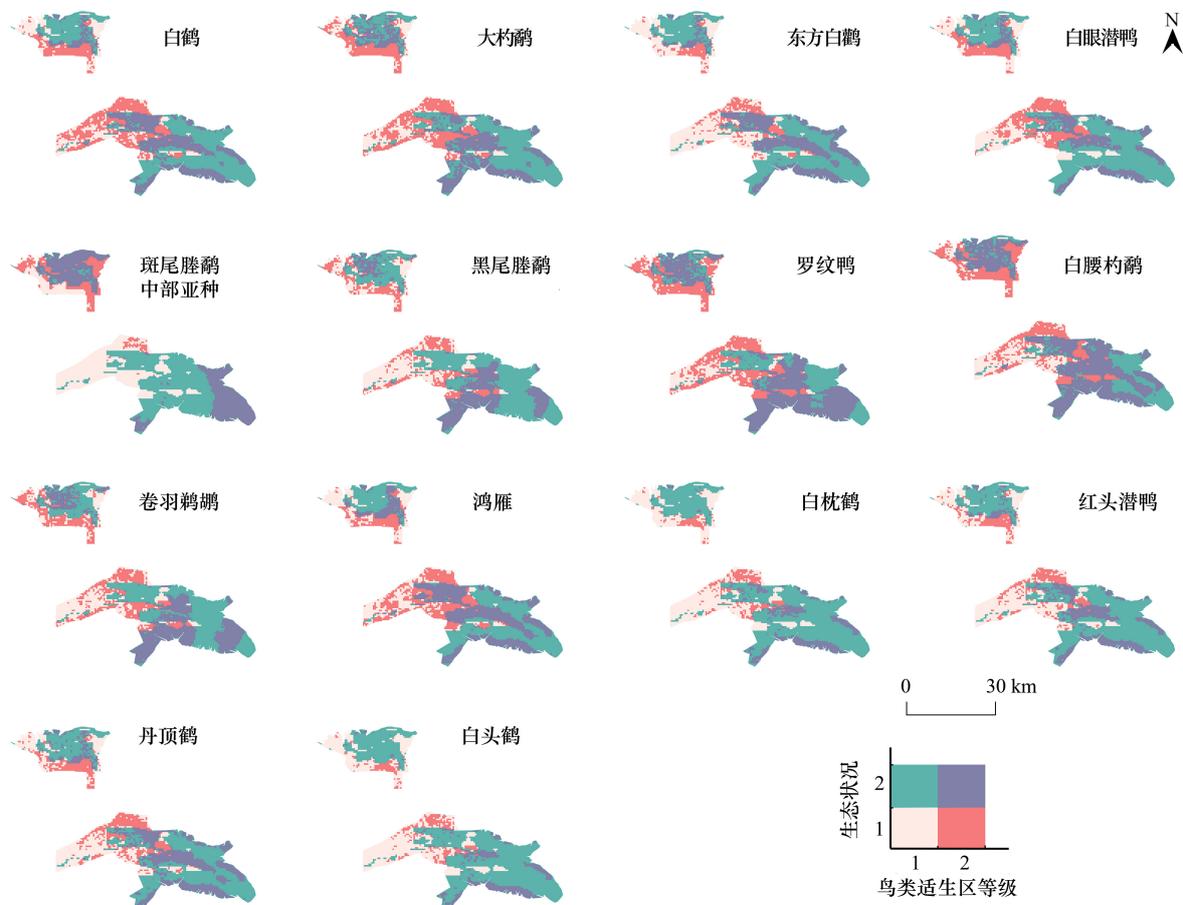


图 10 生态状况与鸟类适生区双变量图

Fig.10 Ecological conditions and bird habitat suitability bivariate map

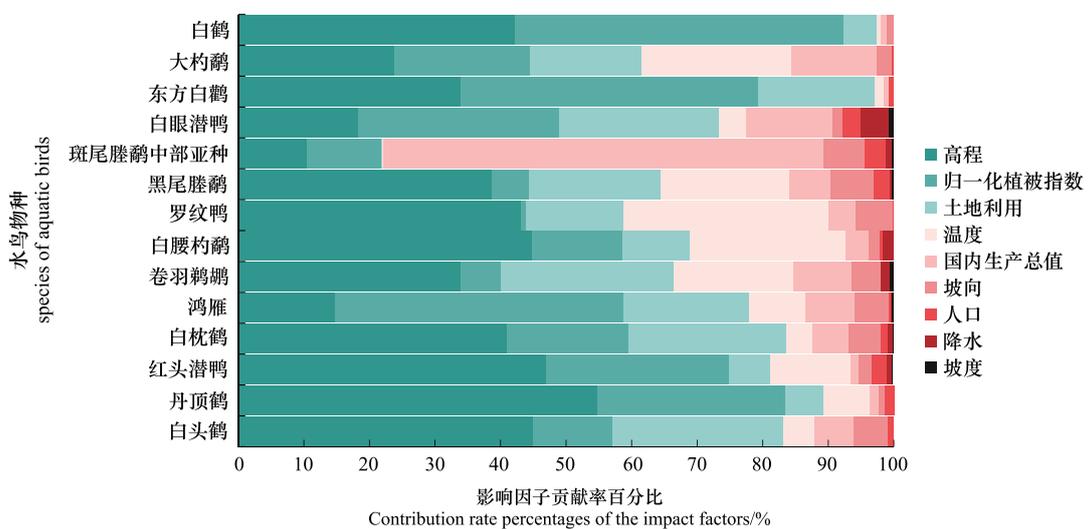


图 11 影响因子贡献分析

Fig.11 Impact factors contribution analysis

研究区未来发展趋势在改善和退化的分布上具有空间分异性,可能是因为黄河三角洲地区自然生态系统相对脆弱,抗干扰能力弱,自我恢复能力弱,一旦遭到破坏,极易退化^[46];并且,由于黄河泥沙的不断堆积,人类活动的干扰,植被群落的结构和演替阶段也容易发生变化^[46],未来发展趋势的不确定性较大。

鸟类适生区分布结果(图 9)、适生区与生态状况叠置分析的结果(图 10)均显示,鸟类主要分布于黄河河道及沿海的狭长地带的湿地及水体。在黄河河道附近,淡水会对浮游动物群落多样性产生影响^[47]。水流携带的大量的泥沙和有机物质为水生生物提供了丰富的营养,促使了浮游生物的大量繁殖。沿海狭长地带作为海洋与陆地生态系统的交界区域,受潮汐影响,汇聚了丰富的海洋生物资源,这些资源成为白鹤、鸿雁等鸟类的重要食物资源,使得这些地区成为鸟类生存和繁衍的理想场所。与黄河河道和沿海地带相比,其他湿地部分可能由于水流相对平缓,泥沙和营养物质的输入较少,导致浮游生物和底栖生物的繁殖速度较慢,鸟类可食用的食物相对较少。内陆的黄河河道附近受人类频繁的农业活动影响较大,化肥、农药的使用极易对鸟类的生存构成威胁^[48]。此外,人类活动导致栖息地破碎化,不仅影响到种群间的交流,还会造成鸟类越冬种群数量下降^[49]。

本文也存在一定的局限性。黄河泥沙的持续堆积作用不断增加陆地面积,而海洋的侵蚀作用则不断地削减陆地边缘,二者此消彼长,致使黄河三角洲的海岸线处于不断推进与后退的动态变化之中,其陆地范围也随之频繁波动。本研究以 5 期数据共有的陆地部分作为保护区陆地部分的界定范围,有效排除了因海岸线频繁变动所导致的陆地面积波动的干扰,使得研究聚焦于相对稳定且具有连贯性的陆地部分,确保研究结果具有可比性。然而,这种界定方式由于仅关注数据共有的陆地部分,那些在不同时期因海岸线变化而被去掉的陆地部分被忽略,可能会使结果产生一定的偏差。

在利用地理探测器分析驱动因子对生态状况的解释力时, q 值均小于 0.5,表明各个分析因素单独对生态状况的解释能力相对有限,可能存在其他未被识别的重要因素,这些因素之间的复杂交互关系可能在一定程度上削弱了单个因素的影响力,从而导致各个因素单独的 q 值处于较低水平。

构建地理探测器模型和 MaxEnt 模型时,所采用的环境变量具有一定的局限性,可能不能全面的反映驱动力。本研究自行计算了多年环境变量的均值。在处理环境变量的过程中,对于缺失数据,采用了反距离权重(IDW)插值,可能与实际数据有出入。

4.2 结论

通过对黄河三角洲国家级自然保护区陆地部分 EG_i 的时空动态变化、驱动力及未来变化趋势进行研究发现,研究区的生态状况逐渐变好,具体结论如下:

(1) 研究区不同区域的生态状况存在差异,呈现“沿海及河道附近生态状况较好,内陆生态状况较差”的空间分布格局,整体生态状况较好。

(2) 2000—2020 年间, EG_i 呈波动下降趋势,生态状况呈现逐渐变好的趋势;生态状况面积呈优的区域面积不断扩张,生态状况呈改善趋势的区域占主体地位,面积占比为 71.50%,生态状况呈现退化趋势的面积相对较小,占比为 12.99%。应加强科学研究,基于遥感和 GIS 等技术,对各项指标的变化进行持续监测,评估生态保护工程和气候变化对生态状况的影响,以便及时调整保护和管理措施。

(3) 通过利用地理探测器进行空间异质性分析,从气候、地形、人类活动、植被等多个方面进行因子探测、交互探测,单个驱动因素对生态状况的解释力排名依次为温度>高程>人口>降水>NDVI>国内生产总值,温度与 NDVI 的交互作用解释力最强。

(4) 未来研究区的发展趋势在改善区域和退化区域的分布上具有空间分异性,整体发展态势向好发展。对于未来趋势为改善的区域,应继续加大生态保护和恢复力度,以确保生态成效的持续和扩大,对于退化区域,应因地制宜,针对不同区域的特点制定相应的保护和管理措施。同时,还应加强生态文明建设,提高公众对生态保护的意识,鼓励社会各界参与到生态保护和恢复工作中来。

(5) 所有选定物种的适宜分布区都包括南部区域的中部,鸟类分布区域和生态状况较好的重叠区域主要

分布在黄河河道及沿海的狭长地带,整体呈条带状分布。高程、NDVI、土地利用类型是对鸟类适生区空间分布贡献最大的因素,平均贡献率分别为 35.1%、22.6%和 15.5%。需加强黄河河道及两侧湿地水体的管控,严格管控人类活动的干扰,定期开展鸟类种群监测与生态评估,促进鸟类与生态和谐共生。

参考文献 (References):

- [1] 张睿,师玮一,周靖宣,方贺,王宇白,徐深,康娟,徐栋. 2001—2019 年中国自然保护区生态环境质量时空变化特征及其驱动力. 生态学报, 2023, 43(5): 2101-2113.
- [2] 张建亮,钱者东,徐网谷,张慧,王智. 国家级自然保护区生态系统格局十年变化(2000—2010 年)评估. 生态学报, 2017, 37(23): 8067-8076.
- [3] 王成武,崔彪,汪宙峰,谢亮,陈雅靓. 四川省自然保护区时空分布与影响因素. 生态学报, 2022, 42(9): 3794-3805.
- [4] 钟林生,肖练练. 中国国家公园体制试点建设路径选择与研究议题. 资源科学, 2017, 39(1): 1-10.
- [5] 赵文飞,宗路平,王梦君. 中国自然保护区空间分布特征. 生态学报, 2024, 44(7): 2786-2799.
- [6] 赵新宇,李红红,程积民,苏纪帅,朱仁斌. 云雾山国家级自然保护区典型草原生态系统价值评估. 草地学报, 2014, 22(2): 217-223.
- [7] 赵卫,沈渭寿,刘海月. 自然保护区气候变化风险及其评估——以达里诺尔国家级自然保护区为例. 应用生态学报, 2016, 27(12): 3831-3837.
- [8] 张华兵,刘红玉,侯明行,李玉凤. 海滨湿地景观过程模型与模拟研究——以江苏盐城保护区核心区为例. 自然资源学报, 2014, 29(7): 1105-1115.
- [9] 呼延佼奇,肖静,于博威,徐卫华. 我国自然保护区功能分区研究进展. 生态学报, 2014, 34(22): 6391-6396.
- [10] 周方文,马田田,李晓文,崔保山. 黄河三角洲滨海湿地生态系统服务模拟及评估. 湿地科学, 2015, 13(6): 667-674.
- [11] 张哈旭,李馨宇,崔保山,王青,于海玲,吴霞,许佳美. 黄河三角洲湿地生态修复工程对底栖动物的影响效果研究. 环境工程, 2023, 41(1): 222-231.
- [12] 庞博,杨文鑫,崔保山,张树岩,谢焱,宁中华,高放,张洪山. 黄河三角洲湿地生物多样性保护工程植被修复效果评估. 环境工程, 2023, 41(1): 213-221.
- [13] 欧阳玲,马会瑶,王宗明,路春燕,王莱林,张永生,于显双. 基于遥感与地理信息数据的科尔沁沙地生态环境状况动态评价. 生态学报, 2022, 42(14): 5906-5921.
- [14] 舒远琴,宋维峰,马建刚. 哈尼梯田湿地生态系统健康评价指标体系构建. 生态学报, 2021, 41(23): 9292-9304.
- [15] 权文婷,张树誉,刘艳,王卫东. 基于遥感生态指数的陕西省东庄水库流域生态环境变化监测与评价. 水土保持通报, 2022, 42(5): 96-104, 113.
- [16] 徐国荣,马维伟,李广,张宏奎. 基于 PSR 模型的甘南尕斯库勒湿地生态系统健康评价. 水土保持通报, 2019, 39(6): 275-280.
- [17] 孔祥伦,李云龙,韩美,田立鑫,牛学锐,朱继前,王敏,黄淑萍. 1990 年以来 3 个时期黄河三角洲天然湿地的分布及其变化的驱动因素研究. 湿地科学, 2020, 18(5): 603-612.
- [18] 宋红丽,刘兴土,王立志,郁万妮,董彬. 不同干扰程度下黄河三角洲植被群落有机碳分布特征. 水土保持学报, 2018, 32(1): 190-196, 203.
- [19] 徐鹤,侯西勇,李东,韩美,刘玉斌,王晓利,樊超. 基于 RS 和 GIS 的黄河三角洲主要人工地物时空特征分析. 遥感技术与应用, 2022, 37(3): 751-762.
- [20] 游惠明,韩建亮,潘德灼,谢会成,乐通潮,马键斌,黄思忠,谭芳林. 泉州湾河口湿地生态系统服务价值的动态评价及驱动力分析. 应用生态学报, 2019, 30(12): 4286-4292.
- [21] 杨帆,张丽雪,石琳. 沿海防护林体系建设工程区生态系统服务权衡/协同及驱动力. 生态学报, 2023, 43(23): 9952-9966.
- [22] 孙锐,陈少辉,苏红波. 2000—2016 年黄土高原不同土地覆盖类型植被 NDVI 时空变化. 地理科学进展, 2019, 38(8): 1248-1258.
- [23] 罗绮琪,胡慧建,徐正春,丁志锋,杨锡涛,陈秋菊,张春霞,李爱英,邹洁建,叶冬梅,王家彬,张志翔,梁健超. 基于 Maxent 模型的粤港澳大湾区水鸟多样性热点研究. 生态学报, 2021, 41(19): 7589-7598.
- [24] 杨萍,杨永峰,杨宜男,程亚文,王立,王原. 基于鸟类栖息地季节性变化的自然保护区动态分区管理——以安徽升金湖国家级自然保护区为例. 生态学报, 2023, 43(22): 9206-9217.
- [25] 孟紫琪,龙凌波,余倩楠,程丹阳,刘敏. 基于土地利用/覆盖变化的中国大陆沿海地区生态状况评价. 应用生态学报, 2018, 29(10): 3337-3346.
- [26] 王福红,赵锐锋,张丽华,李鸿伟. 黑河中游土地利用转型过程及其对区域生态质量的影响. 应用生态学报, 2017, 28(12): 4057-4066.
- [27] 邵全琴,赵志平,刘纪远,樊江文. 近 30 年来三江源地区土地覆被与宏观生态变化特征. 地理研究, 2010, 29(8): 1439-1451.
- [28] Li Y R, Cao Z, Long H L, Liu Y S, Li W J. Dynamic analysis of ecological environment combined with land cover and NDVI changes and

- implications for sustainable urban-rural development: The case of Mu Us Sandy Land, China. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 142: 697-715.
- [29] 王永祥, 徐园园, 杨佳嘉, 陈裕鑫, 魏佳轩, 周娟, 张未来, 程武学. 基于 Landsat 的重庆市生态环境质量动态监测及其时空格局演变分析. *生态学报*, 2023, 43(15): 6278-6292.
- [30] 袁丽华, 蒋卫国, 申文明, 刘颖慧, 王文杰, 陶亮亮, 郑华, 刘孝富. 2000—2010 年黄河流域植被覆盖的时空变化. *生态学报*, 2013, 33(24): 7798-7806.
- [31] 桑国庆, 唐志光, 邓刚, 管庆丹, 陈浩, 李朝奎, 王晓茹. 基于 MODIS NDVI 时序数据的湖南省植被变化研究. *长江流域资源与环境*, 2021, 30(5): 1100-1109.
- [32] 易扬, 胡昕利, 史明昌, 康宏樟, 王彬, 张辰, 刘春江. 基于 MODIS NDVI 的长江中游区域植被动态及与气候因子的关系. *生态学报*, 2021, 41(19): 7796-7807.
- [33] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望. *地理学报*, 2017, 72(1): 116-134.
- [34] 尹小岚, 谭程月, 柯樱海, 周德民. 1973—2020 年黄河三角洲滨海盐沼湿地景观格局演化模式和驱动因素. *生态学报*, 2024, 44(1): 67-80.
- [35] 侯婉, 侯西勇, 董婷. 1999—2020 年中国沿海植被覆盖多时空尺度变化特征. *生态学报*, 2024, 44(16): 7249-7263.
- [36] 冯新灵, 冯自立, 罗隆诚, 邱丽丽, 刘鹏. 青藏高原冷暖气候变化趋势的 R/S 分析及 Hurst 指数试验研究. *干旱区地理*, 2008, 31(2): 175-181.
- [37] 张峰源, 苏远航, 刘滨辉. 东北森林生长季 NDVI 对昼夜不对称增温及降水变化的响应特征. *北京林业大学学报*, 2023, 45(2): 34-48.
- [38] 刘智源, 李继红. 2000—2020 年黑龙江省植被时空变化对气候因子响应. *森林工程*, 2024, 40(1): 85-97.
- [39] 滕佳昆, 陈继龙, 杨慧, 王冉, 夏少霞, 段后浪, 于秀波, 朱玉扣. 长江中下游湖泊植食性水鸟栖息地适宜性变化. *生态学报*, 2024, 44(20): 9233-9241.
- [40] 刘红彩, 赵纳勋, 庄钰琪, 杨梅玲, 赵惠茹, 叶新平. 基于 MaxEnt 模型的秦岭山地斑羚生境适宜性评价. *生态学报*, 2022, 42(10): 4181-4188.
- [41] 叶兴状, 张明珠, 赖文峰, 杨森森, 范辉华, 张国防, 陈世品, 刘宝. 基于 MaxEnt 优化模型的闽楠潜在适宜分布预测. *生态学报*, 2021, 41(20): 8135-8144.
- [42] 刘艳华, 刘磊, 陈红, 刘小慧, 王启蕃, 刘鑫鑫, 张子栋, 张宇, 周绍春. 基于 MaxEnt 模型的北极村国家级自然保护区紫貂栖息地适宜性评价. *生态学报*, 2024, 44(2): 559-569.
- [43] Vijay V, Armsworth P R. Pervasive cropland in protected areas highlight trade-offs between conservation and food security. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2021, 118(4): e2010121118.
- [44] 凡姚申, 窠身堂, 于守兵, 王广州, 吴彦, 谢卫明. 黄河三角洲水文-地貌-生态系统演变与多维调控研究进展. *水科学进展*, 2023, 34(6): 984-998.
- [45] 李政隆, 樊彦国, 王雪怡, 李薇, 张治梅, 管青春. 基于 OWBEI 的黄河三角洲生态环境质量时空评价. *人民黄河*, 2024, 46(1): 97-102.
- [46] 张高生, 李峻, 李岩. 黄河三角洲生态现状及保护对策. *农村生态环境*, 2000(2): 24-27.
- [47] 解成杰, 谢活, 宁中华, 崔保山. 黄河三角洲潮沟浮游生物群落结构特征及其影响因素. *湿地科学*, 2024, 22(5): 769-780.
- [48] Liao J, Zhang T X, He X C, Zhang P, Ran J H. Effects of agricultural intensity and landscape pattern on terrestrial birds in China's agroecosystem differ between temperature zones. *Biological Conservation*, 2024, 300: 110876.
- [49] 李海萍, 李菁. 盐城保护区丹顶鹤越冬栖息地变化及成因分析. *中国人口·资源与环境*, 2011, 21(S2): 212-215.