

DOI: 10.20103/j.stxb.202208162361

朱自强, 刘正霄, 谢郁城, 贺吉立, 李建强, 徐基良, 张正旺. 黄河三角洲自然保护区石油开采对水鸟多样性及分布的影响. 生态学报, 2023, 43(17): 7157-7169.

Zhu Z Q, Liu Z X, Xie Y C, He J L, Li J Q, Xu J L, Zhang Z W. Effects of oil extraction on diversity and distribution of waterbirds in the Yellow River Delta Nature Reserve. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(17): 7157-7169.

黄河三角洲自然保护区石油开采对水鸟多样性及分布的影响

朱自强¹, 刘正霄¹, 谢郁城¹, 贺吉立², 李建强¹, 徐基良^{1,*}, 张正旺²

1 北京林业大学生态与自然保护学院, 北京 100083

2 北京师范大学生命科学院, 北京 100875

摘要:水鸟是湿地生态系统健康的重要指示物种,易受湿地退化和人为干扰的影响。目前我国渤海湾地区石油开采强度较大,占据了一定面积的水鸟栖息地,会对当地水鸟产生影响。以山东黄河三角洲国家级自然保护区为研究区域,在该保护区设置4块5 km×5 km样区,在2021年3月、5月、6月、7月和9月采用样线法调查样区内水鸟群落组成,结合深度学习和目视解译处理遥感影像量化区域内的油井密度和距离,使用广义线性模型分析水鸟多度与油井密度和距离的关系,使用Mantel分析检验水鸟群落组成的差异,采用双因素方差分析检验油井密度和距离对水鸟多样性指数的影响。调查期间共记录到水鸟约38994只,隶属于7目14科77种,其中优势类群为鸕鹚类、雁鸭类、鹭类和鸥类。结果表明:(1)随着油井密度增加,水鸟群落的Shannon-Wiener指数升高,而多度呈现先升高后下降的趋势。鸕鹚类在中低密度和中高密度区的多度显著高于低密度区,其他类群差异不显著。油井密度的差异与水鸟群落β多样性的差异呈显著正相关关系,即密度差异越大,水鸟群落组成越不同。(2)随着油井距离增加,水鸟群落的Shannon-Wiener指数出现下降趋势。雁鸭类距油井越远,多度越高,其他水鸟类群未表现出明显趋势。(3)油井距离和密度的交互作用对水鸟多样性指数影响均不显著。研究表明,在黄河三角洲自然保护区,油井密度影响了水鸟群落的多样性和群落组成,这与石油开采的特征和不同类群水鸟对人类活动的适应能力有关;油井距离也影响着水鸟群落的空间分布,这与不同物种对干扰的适应能力及栖息地偏好有关。

关键词:石油开采;水鸟;空间分布;多样性;群落组成;黄河三角洲

Effects of oil extraction on diversity and distribution of waterbirds in the Yellow River Delta Nature Reserve

ZHU Ziqiang¹, LIU Zhengxiao¹, XIE Yucheng¹, HE Jili², LI Jianqiang¹, XU Jiliang^{1,*}, ZHANG Zhengwang²

1 School of Ecology and Nature Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

2 College of Life Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

Abstract: Waterbirds are often used as the important indicator species to assess the health of the wetland ecosystem, and they are vulnerable to wetland degradation and anthropogenic disturbance. With the rapid development of oil extraction in China's Bohai Bay, some parts of the waterbird habitats in this bay have been occupied, which may have influence on the waterbirds in this area. In this study, we selected the Yellow River Delta Nature Reserve (YRD) in Shandong Province as our study site, and then set 4 sampling areas in YRD for waterbird surveys and further analysis. We used the line transects to survey waterbirds in YRD at different oil well densities in March, May, June, July and September, 2021, and then

基金项目:中国海油海洋环境与生态保护公益基金项目(CF-MEEC/TR/2020-20);国家重点研发计划项目(2022YFF0802400)

收稿日期:2022-08-16; **网络出版日期:**2023-04-28

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xujiliang@bjfu.edu.cn

combined deep learning and visual interpretation to process remote sensing imagery to quantify the density of oil wells. Generalized linear model was used to analyze the relationship between waterbird abundance and well density and the distance from oil wells, Mantel analysis was used to check for differences in waterbird community composition, and two-factor Analysis of Variance (ANOVA) was used to test the effect of well density and distance from oil wells on waterbird diversity indices. A total of 38994 waterbirds were recorded in the sampling areas in YRD, belonging to 77 species, 14 families, and 7 orders. The results revealed that (1) the Shannon-Wiener index of waterbird community increased as oil well density increased, while the abundance tended to increase firstly and then decrease. The abundance of shorebirds was significantly higher in medium-low and medium-high density areas than in low density areas, whereas the abundance of other waterbirds did not show significant differences. The well density were positively related to the β -diversity of the waterfowl community. (2) The Shannon-Wiener index of waterbird community tended to decrease when the distance from oil wells increased. Specially, the abundance of Anseriformes increased when their distance from oil wells increased whereas other waterbird showed no significant trends. (3) The interaction between oil well density and distance from oil wells had no significant effect on the waterbird diversity index. Our study demonstrated that the oil well density has impacts on the waterbird community diversity and community composition in YRD, which may partly be attributed to the characteristics of oil extraction and the adaptability of different waterbird groups to human activities. The distance from oil wells also has effect on the spatial distribution of waterbird communities, and the adaptability of different species to disturbance and their habitat preferences may be responsible for this effect.

Key Words: oil extraction; waterbirds; spatial distribution; diversity; community composition; Yellow River Delta National Nature Reserve

人为干扰造成的栖息地丧失和破碎化是鸟类种群减少的主要原因之一^[1-2],石油开采对野生动物特别是鸟类的影响也受到高度关注^[3-5]。例如,美国科罗拉多平原的石油和天然气开发使森林鸣禽群落的物种丰富度在 15 年内出现了明显的下降^[6]。石油开采的设施建设改变了区域内原有的土地利用方式^[7],会造成适宜栖息地丧失和破碎化^[8],这会改变鸟类原有的分布模式,并且许多鸟类很少利用存在石油设施的栖息地^[9],在油田内部和周围的种群数量也相对较少^[10]。

石油开采的影响对栖息地专性物种以及需要大面积完整栖息地的鸟类更为显著^[3]。水鸟作为依靠湿地生存的鸟类,是典型的栖息地专性物种^[11]。由于围海造地的持续进行,我国沿海湿地面积减少了 50% 以上,在一定程度上导致水鸟多样性下降^[12]。此外,互花米草 (*Sporobolus alterniflorus*) 的入侵^[13],土地利用模式改变^[14],以及风电、石油等能源的开发^[15]等因素也会导致海岸带水鸟栖息地的丧失。石油设施在建设阶段对水鸟的影响较大,易产生石油泄漏和噪音等多种污染,对水鸟生存和繁衍构成严重威胁^[5, 16]。建成的石油开采设施进入生产期后,对水鸟栖息地的影响则主要来源于因油井及附属的基础设施建设引起的栖息地改变。以往的研究主要关注油井对水鸟栖息地的影响^[15-16],例如采油设施和道路建设会产生部分硬化土地,这加剧了水鸟适宜栖息地的丧失,并且单个栖息地丧失带来的不利影响还会由于迁徙的串联而被进一步放大,进而对迁徙水鸟产生更大的影响^[17-18]。但由于石油资源分布和开采策略的不同,石油开采区域内的油井密度也并不完全一致。此外,由于水鸟适应干扰源的能力不同,在油井建成后,水鸟分布模式也会相应改变。然而,很少有研究聚焦于油井密度和油井距离对水鸟的影响。

黄河三角洲位于中国渤海湾地区,是东亚-澳大利西亚候鸟迁飞路线的中转站,是约 5000 万只候鸟迁徙的必经之地^[19]。近 40 年来,该地区建成了大面积的油井^[20]。然而,当地关于石油开采对水鸟影响的研究尚存不足,已有研究不足以为石油开采活动中开展生物多样性保护提供有效指导。因此,本文以黄河三角洲国家级自然保护区为重点研究区域,调查区域内水鸟多样性,从油井密度和距离两个角度评估石油开采对水鸟多样性及分布的影响,以期为基于水鸟生态需求制定的石油开采管理方案提供科学依据,促进能源生产与水

鸟保护和谐发展。

1 研究区域

黄河三角洲国家级自然保护区 (37° 35'—38° 12' N, 118° 33'—119° 20' E) 位于黄河入海口, 总面积 1530 km², 以黄河口新生湿地生态系统和珍稀濒危鸟类为主要保护对象, 拥有多样的湿地景观和独特的地理位置^[21] (图 1)。该保护区内大面积的浅海滩涂和沼泽孕育了丰富的湿地植被和水生生物资源, 为水鸟提供了优质的栖息地^[22]。同时, 黄河三角洲石油储量丰富, 在 20 世纪 60 年代就开始了石油的勘探活动^[23], 拥有我国第二大石油基地——胜利油田^[24]。胜利油田的部分采油设施即位于黄河三角洲自然保护区的实验区内。由于石油开采设施与道路建设, 该自然保护区内的水鸟栖息地存在明显的破碎化^[20]。

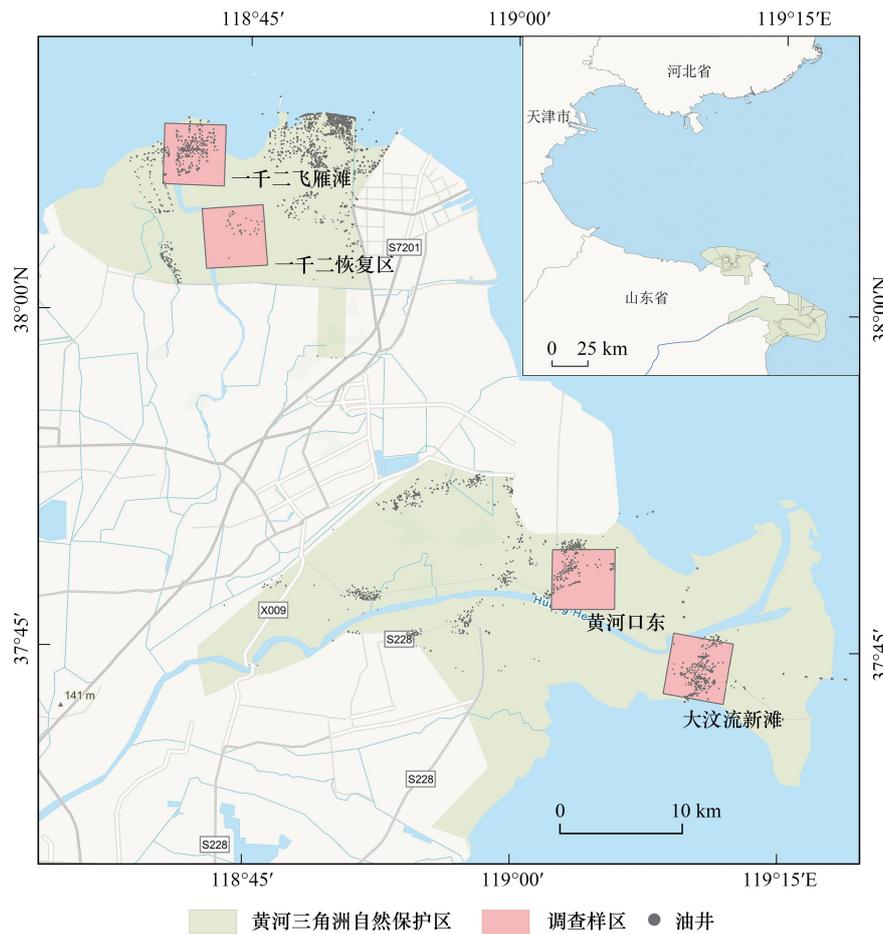


图 1 黄河三角洲油井和调查样区分布图

Fig.1 The distribution of the oil wells and the sampling areas in Yellow River Delta Natural Reserve

2 研究方法

2.1 调查样区设置

根据黄河三角洲自然保护区内水鸟适宜栖息地和油井分布, 在该保护区缓冲区内设置 5 km×5 km 样区 4 块 (图 1, 2)。4 块样区间油井密度存在差异, 但栖息地组成基本一致, 均为滩涂、水面和芦苇地等, 人类活动主要包括油井工人作业和保护区工作人员巡护 (表 1)。根据油井面积来划分不同样区的油井密度, 油井面积按如下方式测算: 从国家地理信息公共服务平台 (<https://www.tianditu.gov.cn/>) 获取了黄河三角洲地区 2020 年的高分辨率遥感影像, 分辨率为 0.47 m, 并按照黄河三角洲自然保护区边界裁剪影像。使用 ArcGIS

pro2.5 中的深度学习功能进行油井识别。油井建设会在其周围开辟一块裸地,改变了原有栖息地,因此将油井及其周边用地作为整体进行标注,标注范围取决于油井周围裸地,面积一般为 2000—5000 m²。标注方法为:(1)采用随机取样的方式在研究区域内创建训练样本。由于油井形状和面积存在一定差异,标注方式选择多边形,元数据格式选择像素分类。(2)使用已保存的训练数据来训练深度学习模型,模型类型选择 U-net 像素分类^[25]。(3)使用训练好的模型对研究区域进行像素分类,得到识别结果。(4)进行分类后处理,将识别结果与实地考察的油井分布情况和原遥感影像进行对比,通过目视修改剔除部分错误识别以提高结果精度^[26]。(5)将输出的栅格转为矢量,在 ArcGIS pro2.5 中利用相交功能,将油井识别结果与样区边界叠加,得到 4 块样区的油井分布图层,利用计算几何功能得到各样区内的油井面积。最终显示不同油井干扰强度的样区设置存在油井面积差异,即一千二恢复区(0.051 km²,低密度区)、黄河口东(0.273 km²,中低密度区)、一千二飞雁滩(0.360 km²,中高密度区)和大汶流新滩(0.513 km²,高密度区)(图 1)。低密度区、中低密度区、中高密度区和高密度区依次命名为 A、B、C、D。

表 1 样区信息表

Table 1 The information of sampling areas in Yellow River Delta Natural Reserve

样区名称 Names of sampling areas	水鸟栖息地面积/km ² Area of waterbird habitat	生境类型 Types of habitat	油井面积/km ² Area of oil wells
A 一千二恢复区	22.69	湿地	0.05
B 黄河口东	21.15	湿地	0.27
C 一千二飞雁滩	19.25	湿地	0.36
D 大汶流新滩	20.07	湿地	0.51

2.2 水鸟调查方法

2021 年 3 月、5 月、6 月、7 月和 9 月,通过样线法在 4 个油井密度不同的样区进行了鸟类调查,样线尽可能覆盖四个调查样区,在低密度区、中低密度区、中高密度区、及高密度区分别为 20 km、20 km、11.6 km 和 16 km(图 2)。调查频率为 3 月、6 月和 7 月每月中旬 1 次,5 月和 9 月因迁徙鸟类较多而每月中旬和月末各 1 次。调查时间为每天 8:00—11:00,14:00—17:00,选择在天气晴朗的退潮期间进行。鸟种识别参考《中国鸟类野外手册》^[27]。利用双筒望远镜(8×42)(Kowa BD 8×42 XD)和 20—60 倍单筒望远镜(Leika APO-TELEVID 65)观察鸟类;利用长焦距相机进行辅助观察;利用手持全球定位系统(GPS)记录观察点位置。采用直接计数法记录水鸟的种类,鸟类的名称和分类参考《中国鸟类分类与分布名录(第三版)》^[28],对于数量和规模较大的水鸟种群则采用集团计数法来计数^[29]。已有研究表明,2000 m 范围内鸟类丰富度均随距基础设施距离的增大而升高^[30];本研究在预调查中,也观测到类似的现象,但是距离过大时在估计目标鸟类到油井的距离及数量上可能存在偏差,且不同样区内的样线之间的观测区域可能重叠。因此,结合其他已有类似研究成果及本研究在预调查中的结果^[31],本研究只记录与油井距离在 200 m 范围内的水鸟种类及数量。在预调查中,以 50 m 为间隔,测量各样区内具有明显特征的油井到样线的距离,并将其作为后期目测鸟类距最近油井距离的参照^[31—32]。在样线调查过程中,只记录从调查前进方向往后飞的数量。对同一块样区的调查通常在一天内完成,如遇到恶劣天气或道路条件影响,则在必要时对调查时间和调查线路进行调整。本研究共有 18 人次调查人员参与调查,相关人员均长期从事水鸟调查工作,并在调查前接受了培训。

2.3 数据分析

基于 4 块样区的 7 次调查数据,绘制了物种累计曲线来判断调查次数的合理性与充分性。为减少偏差,筛选了样区内飞行的水鸟,将剩余调查到的水鸟数量作为水鸟的多度,观察到的物种数表示物种丰富度,并计算了不同密度区的 Shannon-Wiener 多样性指数、Simpson's 多样性指数和均匀度指数等物种多样性指数,公式如下:

$$H' = \sum_{i=1}^n p_i \times \ln(p_i) \quad (1)$$

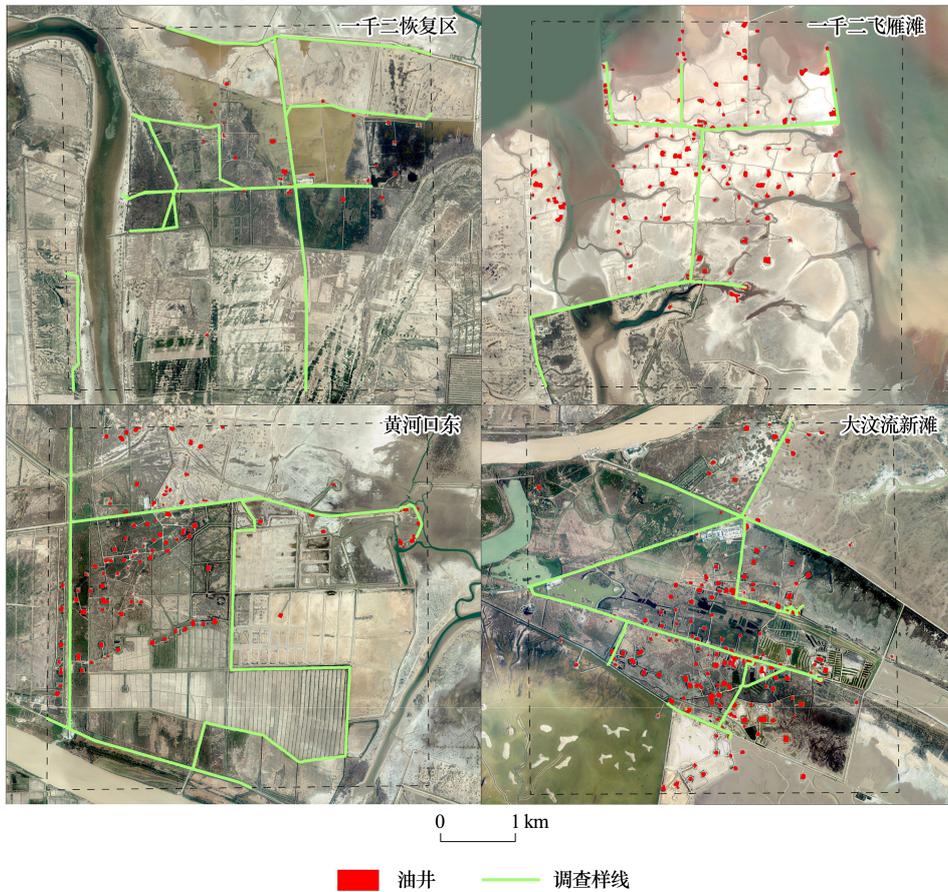


图 2 调查样区内样线设置及油井分布

Fig.2 The distribution of the transect lines and oil wells in the sampling areas

$$D = 1 - \sum_{i=1}^n p_i^2 \tag{2}$$

$$E = H' / \ln(n) \tag{3}$$

式中, n 表示鸟的种类(丰富度); p_i 为鸟类物种 i 的个体数占所有鸟类物种个体总数的比例。

为比较不同油井密度下水鸟多度间的差异, 首先用 Shapiro-Wilk 检验鸟类数据是否符合正态分布, 符合正态分布的使用单因素方差分析来检验组间差异, 不符合的则用 U 检验 (Mann-Whitney U test), 最后对不同密度区间的水鸟多度差异进行了比较。为检验油井密度和距油井距离对水鸟物种多度的影响, 从所有数据中筛选出样区内距油井 200 m 内的水鸟多度及其距油井的距离, 并拟合广义线性模型分析距油井距离与水鸟多度的关系, 对于符合正态分布的数据采用高斯分布拟合线性模型, 不符合正态分布的则采用泊松分布拟合。为进一步了解油井密度和距油井距离对水鸟多样性的影响, 同样检验数据正态性, 符合正态分布的用嵌套双因素方差分析, 不符合正态分布的用非参数双因素方差分析 (Scheirer-Ray-Hare 检验)。

Beta (β) 多样性度量时空尺度上物种组成的变化, 是生物多样性的重要组成部分, 其信息可用于保护区选址和布局规划。Beta 多样性的测度大致有倍性分配方法、加性分配法、相似性法、群落物种组成总方差、排序空间的梯度长度等方法, 群落相似性或相异性法目前是群落 beta 多样性研究中使用最多的方法^[33]。因此, 本研究基于水鸟多度矩阵, 计算了 Bray-Curtis 距离指数 (相异性指数) 来表征研究区水鸟群落的 β -多样性。Bray-Curtis 距离指数 (β_{BC}) 是衡量不同样地 (群落) 间物种组成差异的测度, 在计算时不仅仅考虑样方中物种是否存在, 同时还考虑物种多度, Bray-Curtis 距离指数越大说明水鸟群落之间的差异越大 (最大距离为 1), β -多样性越高。Bray-Curtis 距离指数:

$$\beta BC = (B + C) / (2A + B + C) \quad (4)$$

式中: A 为群落 B 和群落 C 的共有物种个体数量; B 和 C 分别为群落 B 和群落 C 独有的物种个体数。另外计算了不同密度和不同距离之间内的欧式距离, 采用 Mantel 分析来检验油井密度和距离是否对研究地水鸟群落 β -多样性具有显著性影响。

以上分析均在 R4.1.2 软件中进行^[34]。

3 研究结果

3.1 样区内水鸟概况

基于物种累计曲线(图 3), 随着调查次数的增加, 曲线逐渐趋于平缓, 代表群落中的物种基本被全部观测到。4 块样区共记录到水鸟 35182 只次, 隶属于 7 目 14 科 77 种(附表 1), 其中低密度区 51 种 14369 只次, 中低密度区 52 种 5341 只次, 中高密度区 54 种 12806 只次, 高密度区 53 种 2666 只次。选取四种优势水鸟类群作为主要研究对象, 分别为鸕鹚类(鸕鹚科、反嘴鸕鹚科、鸕科、鸕科、燕鸕科)、雁鸭类(鸭科)、鹭类(鹭科、鸕科)和鸥类(鸥科)。鸕鹚类有 5 科 33 种 10950 只次, 分别占总科数、种数以及个体数的 35.7%、42.9% 和 31.1%; 雁鸭类有 1 科 15 种 8329 只次, 分别占 7.1%、19.5% 和 23.7%; 鹭类有 2 科 8 种 1187 只次, 分别占 14.3%、10.4% 和 3.4%; 鸥类有 1 科 11 种 8152 只次, 分别占 7.1%、14.3% 和 23.2%。

3.2 油井密度对水鸟多样性的影响

方差齐性检验发现 Shannon-Wiener 指数符合正态分布, 其余指数均不符合正态分布, 因此分别对其拟合模型。双因素方差分析表明油井密度与 Shannon-Wiener 指数之间存在显著关系, 即随着密度增加, Shannon-Wiener 指数升高(图 4)。广义线性模型表明, 油井密度与多度之间存在显著关系, 即随着密度增加, 多度呈现出先升高后下降的趋势(图 5), 且单因素方差分析表明高密度区的水鸟多度显著低于中低密度区和中高密度区($P < 0.05$, 图 6)。对群落中优势种多度检验发现, 鸕鹚类在中低密度和中高密度区的多度显著高于低密度区($P < 0.05$, 图 7), 其他类群差异不显著。Mantel 检验结果表明, 油井密度的差异与水鸟群落 β 多样性的差异呈显著正相关关系 ($P < 0.001$, $R^2 = 0.09$)(表 2), 即密度差异越大, 水鸟群落组成越不同。

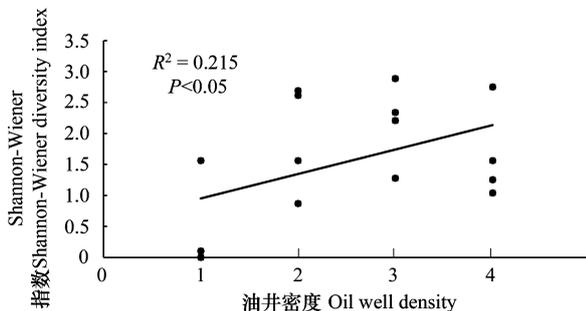


图 4 Shannon-Wiener 指数随油井密度的变化

Fig.4 Variation of Shannon-Wiener diversity index with oil well density

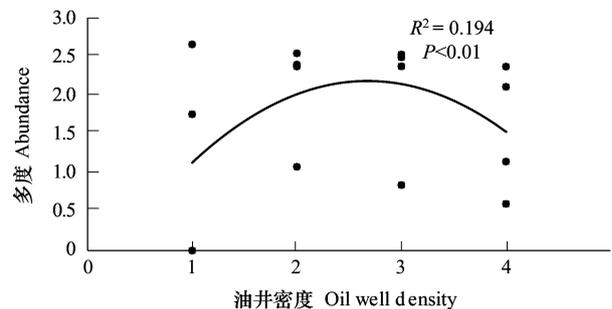


图 5 多度随油井密度的变化

Fig.5 Variation of abundance with oil well density

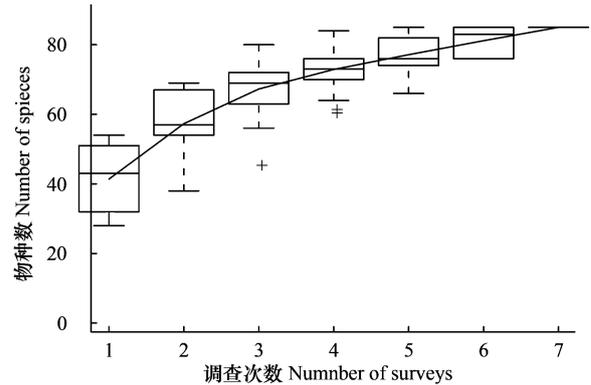


图 3 调查数据的物种累计曲线

Fig.3 Species accumulation curves for the survey data

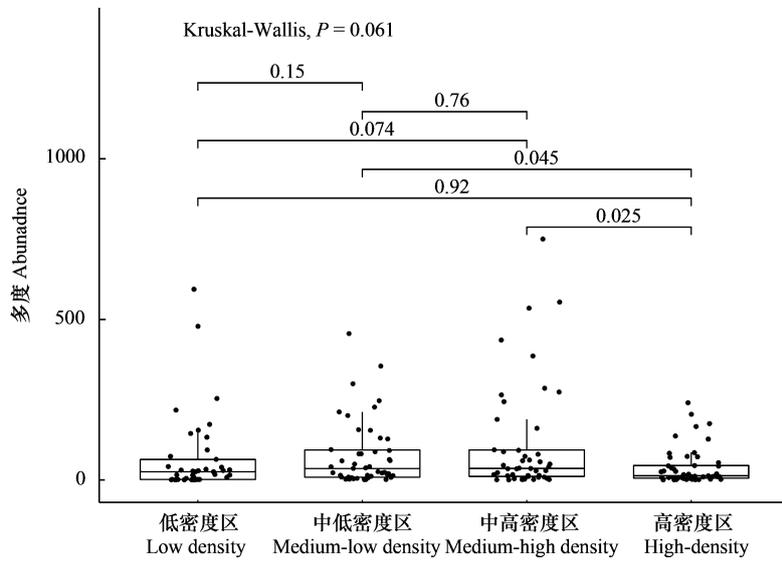


图 6 不同油井密度下总体水鸟的多度差异

Fig.6 Differences of waterbirds abundance at different well densities

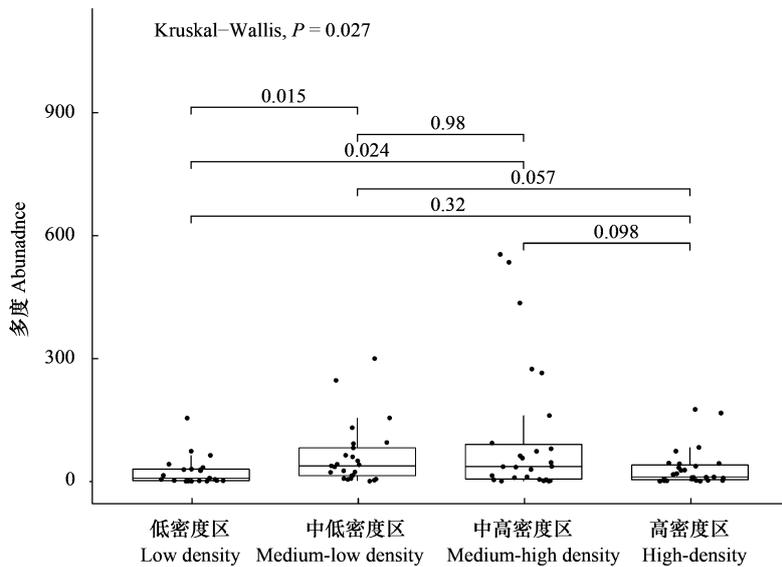


图 7 不同油井密度下鹤鹑类水鸟的多度差异

Fig.7 Differences of Shorebirds abundance at different well densities

表 2 Mantel 检验油井密度和距离与水鸟群落多样性的关系

Table 2 Mantel test of well density and distance in relation to waterbird community diversity

变量 Variables	β -多样性 β -Diversity	
	R^2	P
油井密度 Oil well density	0.09	<0.01
距油井距离 Distance from oil well	0.001	>0.05
油井密度×距油井距离 Oil well density×Distance from oil well	0.001	>0.05

3.3 距油井距离对水鸟多样性的影响

广义线性模型结果显示,随着油井距离增加,Shannon-Wiener 指数降低(图 8),而油井距离多度之间存在

显著关系,表现为随着距离增加,多度呈现出先降低后升高再降低的趋势(图 9)。Mantel 检验发现油井距离的差异与水鸟群落 β 多样性的差异无显著关系 ($P > 0.05, R^2 = 0.01$) (表 2)。

广义线性模型结果发现距油井距离对优势水鸟类群的影响存在一定差异。雁鸭类的多度与距油井的距离之间存在显著正相关关系 ($P < 0.05, R^2 = 0.19$, 图 10), 即与油井距离越远, 多度越高; 而其他三类水鸟类群的多度与油井距离之间无明显相关关系(图 11, 12, 13)。

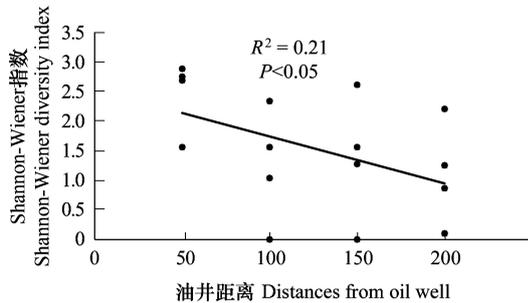


图 8 Shannon-Wiener 指数随距油井距离的变化

Fig.8 Variation of Shannon-Wiener diversity index with distance from oil wells

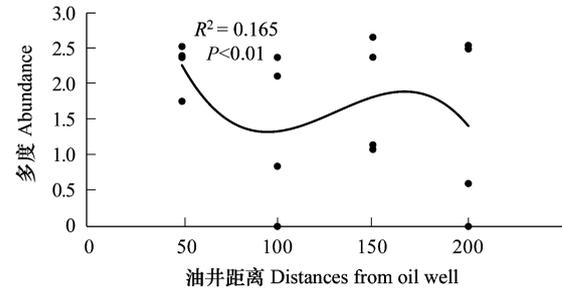


图 9 多度随距油井距离的变化

Fig.9 Variation of abundance with distance from oil wells

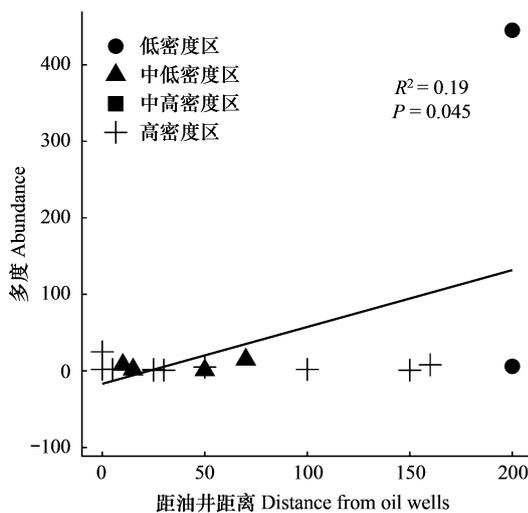


图 10 雁鸭类水鸟多度随距油井距离的变化

Fig.10 Variations in Anseriformes abundance with distance from oil wells

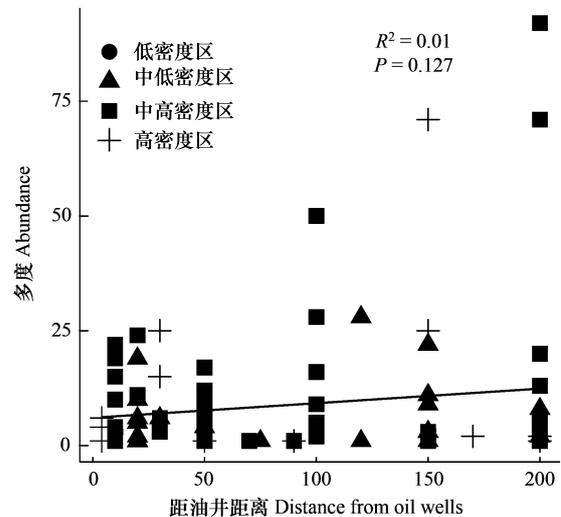


图 11 鸕鹚类水鸟多度随距油井距离的变化

Fig.11 Variations in Shorebirds abundance with distance from oil wells

3.4 油井密度和距离对水鸟多样性的综合影响

油井距离和密度对水鸟多度和 Shannon-Wiener 指数均有较显著的影响; 但与物种丰富度、辛普森指数和均匀度指数之间并无显著关系。嵌套多因素方差分析和非参数多因素方差分析表明, 油井距离和密度的交互作用对水鸟多样性指数影响均不显著(表 3)。Mantel 检验发现油井密度和距离的交互作用对水鸟群落多样性影响不显著(表 2)。

4 讨论

石油生产活动对水鸟的影响主要分为开发阶段的泄漏、噪音等污染, 以及生产期已经建成的设施引起的水鸟栖息地丧失等^[16]。由于黄河三角洲保护区内的油井建设已基本完成, 本研究着重研究了油井密度和距离对水鸟的影响。

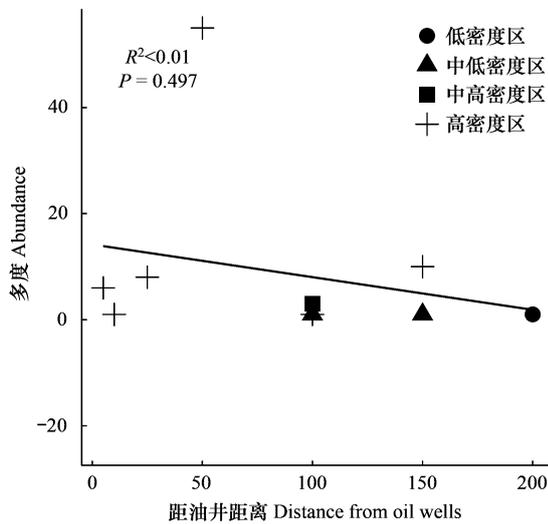


图 12 鹭类水鸟多度随距油井距离的变化

Fig.12 Variations in Herons abundance with distance from oil wells

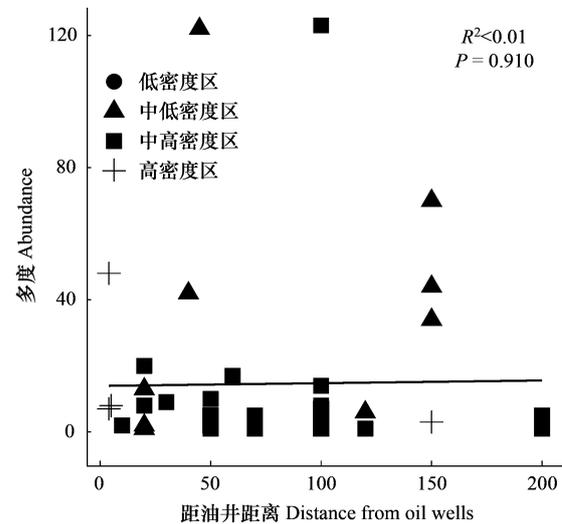


图 13 鸥类水鸟多度随距油井距离的变化

Fig.13 Variations in Gulls abundance with distance from oil wells

表 3 油井距离和密度对水鸟多样性指数的影响分析

Table 3 The effects of oil well distance and density on waterbird diversity index

多样性指数 Diversity index	距离 Distance		密度 Density		距离与密度交互作用 Interaction between distance and density	
	F	P	F	P	F	P
物种丰富度 Specie richness	-0.132	0.90	-0.05	0.95	2.60	0.13
多度 Abundance	-2.60	<0.0001	-2.98	<0.0001	0.95	0.35
Shannon-Wiener 指数 Shannon-Wiener diversity index	-2.23	0.04	2.22	0.04	0.02	0.88
Simpson's 指数 Simpson's diversity index	-0.62	0.54	0.923	0.36	0.96	0.35
均匀度指数 Pielou's evenness index	-0.44	0.66	0.22	0.82	3.42	0.09

油井密度影响了水鸟的多样性和群落组成。水鸟的 Shannon-Wiener 指数随油井密度的升高出现了增大趋势,这与石油开采的特征有关。石油开采设施具有高度自动化的特点,在不产生石油污染的情况下干扰程度相对较低^[16],因此对水鸟多样性影响较小。同时,这也可能与不同类群水鸟对人类活动的适应能力存在差异有关,如黑翅长脚鹬、反嘴鹬、环颈鸪和白鹭等水鸟出现在人工栖息地的频率高于自然栖息地,对人类干扰具有很强适应能力^[35],这也是鸪鹬类在中低密度和中高密度区多度显著高于低密度区的原因。不同干扰程度下的水鸟群落的β多样性差异明显,这也进一步证明不同油井密度下的水鸟群落组成存在差异,适应能力强水鸟可能更偏好干扰程度较强的生境。

本次研究也观察到水鸟群落的 Shannon-Wiener 指数随距油井距离的升高而呈现出降低趋势,这是由于油井开发在侵占水鸟栖息地的同时,也创造了一些供水鸟取食的微生境,而鹭类等对人为干扰的适应能力较强,偏好人为干扰较强的栖息地,能够在油井附近寻找食物资源^[36]。不同水鸟类群对油井距离的响应不同,这可能与不同物种对干扰的适应能力及栖息地偏好有关^[37]。雁鸭类偏好靠近茂密芦苇的开阔水面、处于生长期的隐蔽麦地等环境较好的栖息地^[38],因此雁鸭类的多度与距油井距离间呈现明显的正相关,这一方面表明雁

鸭类对油井距离较为敏感,另一方面也是因为油井的建设占据了部分湿地,导致没有足够的深水区域供雁鸭类觅食。但也要说明,由于数据采集周期没有覆盖一整年,水鸟群落的完整性存在一些缺陷。因此,有待今后收集更完整更精确的数据进行进一步研究。

5 结论

研究表明,黄河三角洲自然保护区内存在一定程度的石油干扰情况,且对水鸟多度、多样性和群落组成造成了一定影响。本研究发现中高密度油井区域内的水鸟物种丰富度和多样性指数都很高,值得密切关注。然而,保护区中存在石油开发的人为干扰,却没有针对水鸟的有效保护措施。因此,针对湿地水鸟的保护提出以下三点建议:(1)新建设的油井选址应尽量远离滩涂、芦苇湿地等水鸟重要栖周边停歇地息地,用多口井集中分布代替单油井散乱分布降低油井密度;(2)对油田周围的雁鸭类进行长期重点监测,因为雁鸭类对人为干扰的响应更为敏感,观测其反应有助于及时监测油井对水鸟的影响。(3)已建成的油井在废弃后不应使用沙土简单封填,而应该尽量修复到自然湿地的状态,尤其要注重油井周围 200 m 范围内的水鸟栖息地的修复,为水鸟提供适宜的栖息地和食物资源。

参考文献(References):

- [1] Jetz W, Wilcove D S, Dobson A P. Projected impacts of climate and land-use change on the global diversity of birds. *PLoS Biology*, 2007, 5(6): e157.
- [2] Ma Z J, Melville D S, Liu J G, Chen Y, Yang H Y, Ren W W, Zhang Z W, Piersma T, Li B. Rethinking China's new great wall. *Science*, 2014, 346(6212): 912-914.
- [3] Brittingham M C, Maloney K O, Farag A M, Harper D D, Bowen Z H. Ecological risks of shale oil and gas development to wildlife, aquatic resources and their habitats. *Environmental Science & Technology*, 2014, 48(19): 11034-11047.
- [4] Moran M D, Taylor N T, Mullins T F, Sardar S S, McClung M R. Land-use and ecosystem services costs of unconventional US oil and gas development. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2017, 15(5): 237-242.
- [5] King M D, Elliott J E, Williams T D. Effects of petroleum exposure on birds: a review. *Science of the Total Environment*, 2021, 755: 142834.
- [6] Maguire K, Papeş M. Oil and gas development and its effect on bird diversity in the high Plains of Colorado (2003-2018). *Biological Conservation*, 2021, 263: 109358.
- [7] Moran M D, Cox A B, Wells R L, Benichou C C, McClung M R. Habitat loss and modification due to gas development in the Fayetteville shale. *Environmental Management*, 2015, 55(6): 1276-1284.
- [8] Drohan P J, Brittingham M, Bishop J, Yoder K. Early trends in landcover change and forest fragmentation due to shale-gas development in Pennsylvania: a potential outcome for the northcentral appalachians. *Environmental Management*, 2012, 49(5): 1061-1075.
- [9] Rostker M. Energy development and wildlife conservation in western north America. *Rangelands*, 2011, 33(5): 55.
- [10] Nenninger H R, Koper N. Effects of conventional oil wells on grassland songbird abundance are caused by presence of infrastructure, not noise. *Biological Conservation*, 2018, 218: 124-133.
- [11] 陈克林. 中国的湿地与水鸟. *生物学通报*, 1998, 33(4): 2-4.
- [12] Wang W, Liu H, Li Y Q, Su J L. Development and management of land reclamation in China. *Ocean & Coastal Management*, 2014, 102: 415-425.
- [13] 王大卫, 沈文星, 汪浩. 互花米草入侵对东部沿海生境的影响. *生物学杂志*, 2020, 37(6): 104-107.
- [14] Wu W T, Zhi C, Gao Y W, Chen C P, Chen Z Q, Su H, Lu W F, Tian B. Increasing fragmentation and squeezing of coastal wetlands: status, drivers, and sustainable protection from the perspective of remote sensing. *Science of the Total Environment*, 2022, 811: 152339.
- [15] Northrup J M, Wittemyer G. Characterising the impacts of emerging energy development on wildlife, with an eye towards mitigation. *Ecology Letters*, 2013, 16(1): 112-125.
- [16] 贾雪峰. 石油开采活动对莫莫格湿地的生态影响研究[D]. 长春: 东北师范大学, 2011.
- [17] Walker B L, Neubaum M A, Goforth S R, Flenner M M. Quantifying habitat loss and modification from recent expansion of energy infrastructure in an isolated, peripheral greater sage-grouse population. *Journal of Environmental Management*, 2020, 255: 109819.
- [18] Iwamura T, Possingham H P, Chadès I, Minton C, Murray N J, Rogers D I, Treml E A, Fuller R A. Migratory connectivity magnifies the consequences of habitat loss from sea-level rise for shorebird populations. *Proceedings Biological Sciences*, 2013, 280(1761): 20130325.

- [19] 张正旺. 中国滨海湿地水鸟栖息地的保护. 中国周刊, 2018(1): 26-27.
- [20] Zhu C M, Zhang X, Huang Q H. Four decades of estuarine wetland changes in the Yellow River Delta based on landsat observations between 1973 and 2013. *Water*, 2018, 10(7): 933.
- [21] 黄桂林, 何平, 侯盟. 中国河口湿地研究现状及展望. 应用生态学报, 2006, 17(9): 1751-1756.
- [22] Larson C. Hostile Shores. *Science*, 2015, 350(6257): 150-152.
- [23] 穆从如, 杨林生, 胡远满, 张玉德. 黄河三角洲湿地保护和油田开发的协调发展. 油气田环境保护, 1998, 8(4): 34-37.
- [24] Li P L. Oil/gas distribution patterns in Dongying Depression, Bohai Bay Basin. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2004, 41(1/2/3): 57-66.
- [25] 许慧敏. 基于深度学习 U-Net 模型的高分辨率遥感影像分类方法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
- [26] 陈超, 江涛, 岳远平. 监督分类和目视修改相结合在高分辨率遥感影像中的应用. 国土资源信息化, 2009(5): 37-40, 48.
- [27] 约翰·马敬能, 卡伦·菲利普斯, 何芬. 中国鸟类野外手册. 中国鸟类野外手册, 2000.
- [28] 郑光美. 中国鸟类分类与分布名录. 3 版. 北京: 科学出版社, 2017.
- [29] 柴子文, 雷维蟠, 莫训强, 阙品甲, 尚成海, 阳积文, 张正旺. 天津市北大港湿地自然保护区的鸟类多样性. 湿地科学, 2020, 18(6): 667-678.
- [30] Benítez-López A, Alkemade R, Verweij P A. The impacts of roads and other infrastructure on mammal and bird populations: a meta-analysis. *Biological Conservation*, 2010, 143(6): 1307-1316.
- [31] Livezey K B, Fernández-Juricic E, Blumstein D T. Database of bird flight initiation distances to assist in estimating effects from human disturbance and delineating buffer areas. *Journal of Fish and Wildlife Management*, 2016, 7(1): 181-191.
- [32] 鲍明霞, 杨森, 杨阳, 周盛, 李春林. 城市常见鸟类对人为干扰的耐受距离研究. 生物学杂志, 2019, 36(1): 55-59.
- [33] 陈圣宾, 欧阳志云, 徐卫华, 肖焱. Beta 多样性研究进展. 生物多样性, 2010, 18(4): 323-335.
- [34] Team R. R: a language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, 2021.
- [35] 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.
- [36] 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.
- [37] Philip Whitfield D, Ruddock M, Bullman R. Expert opinion as a tool for quantifying bird tolerance to human disturbance. *Biological Conservation*, 2008, 141(11): 2708-2717.
- [38] 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.

附表 1 调查样区内水鸟名录

Table 1 The list of waterbirds in sampling areas

目/科/物种名称 Order/Family/ Species name	多度 abundance	保护/濒危等级 Conservation/Endangered status		
		中国 China	IUCN	CITES
雁形目 ANSERIFORMES				
鸭科 Anatidae				
豆雁 <i>Anser fabalis</i>	6		LC	
灰雁 <i>Anser anser</i>	86		LC	
疣鼻天鹅 <i>Cygnus olor</i>	17	二级	LC	
小天鹅 <i>Cygnus columbianus</i>	35	二级	LC	
大天鹅 <i>Cygnus cygnus</i>	8	二级	LC	
翘鼻麻鸭 <i>Tadorna tadorna</i>	61		LC	
赤麻鸭 <i>Tadorna ferruginea</i>	28		LC	
赤膀鸭 <i>Mareca strepera</i>	129		LC	
罗纹鸭 <i>Mareca falcata</i>	12		NT	
绿头鸭 <i>Anas platyrhynchos</i>	364		LC	
斑嘴鸭 <i>Anas zonorhyncha</i>	791		LC	
绿翅鸭 <i>Anas crecca</i>	9		LC	
凤头潜鸭 <i>Aythya fuligula</i>	1		LC	
鹊鸭 <i>Bucephala clangula</i>	50		LC	
斑头秋沙鸭 <i>Mergellus albellus</i>	140	二级	LC	
鸕鷀目 PODICIPEDIFORMES				
鸕鷀科 Podicipedidae				
小鸕鷀 <i>Tachybaptus ruficollis</i>	163		LC	
凤头鸕鷀 <i>Podiceps cristatus</i>	93		LC	
鹤形目 GRUIFORMES				
秧鸡科 Rallidae				
黑水鸡 <i>Gallinula chloropus</i>	1		LC	
白骨顶 <i>Fulica atra</i>	4299		LC	
鹤科 Gruidae				
白鹤 <i>Grus leucogeranus</i>	15	一级	CR	I
丹顶鹤 <i>Grus japonensis</i>	42	一级	EN	I
白头鹤 <i>Grus monacha</i>	6	一级	VU	I
鸻形目 CHARADRIIFORMES				
鸻科 Haematopodidae				
鸻 <i>Haematopus ostralegus</i>	322		NT	
反嘴鸻科 Recurvirostridae				
黑翅长脚鸻 <i>Himantopus himantopus</i>	156		LC	
反嘴鸻 <i>Recurvirostra avosetta</i>	945		LC	
鸻科 Charadriidae				
金鸻 <i>Pluvialis fulva</i>	1		LC	
灰鸻 <i>Pluvialis squatarola</i>	717		LC	
金眶鸻 <i>Charadrius dubius</i>	22		LC	
环颈鸻 <i>Charadrius alexandrinus</i>	1549		LC	
蒙古沙鸻 <i>Charadrius mongolus</i>	25		LC	
鸻科 Scolopacidae				
半蹼鸻 <i>Limnodromus semipalmatus</i>	15	二级	NT	
黑尾塍鸻 <i>Limosa limosa</i>	3515		NT	
斑尾塍鸻 <i>Limosa lapponica</i>	45		NT	
中杓鸻 <i>Numenius phaeopus</i>	89		LC	
白腰杓鸻 <i>Numenius arquata</i>	253	二级	NT	
大杓鸻 <i>Numenius madagascariensis</i>	73	二级	EN	
鹤鸻 <i>Tringa erythropus</i>	232		LC	
红脚鸻 <i>Tringa totanus</i>	101		LC	
泽鸻 <i>Tringa stagnatilis</i>	281		LC	

续表

目/科/物种名称 Order/Family/ Species name	多度 abundance	保护/濒危等级 Conservation/Endangered status		
		中国 China	IUCN	CITES
青脚鹬 <i>Tringa nebularia</i>	155		LC	
白腰草鹬 <i>Tringa ochropus</i>	3		LC	
林鹬 <i>Tringa glareola</i>	84		LC	
灰尾漂鹬 <i>Tringa brevipes</i>	7		NT	
翘嘴鹬 <i>Xenus cinereus</i>	40		LC	
矶鹬 <i>Actitis hypoleucos</i>	31		LC	
翻石鹬 <i>Arenaria interpres</i>	2	二级	LC	
大滨鹬 <i>Calidris tenuirostris</i>	74	二级	EN	
红颈滨鹬 <i>Calidris ruficollis</i>	133		NT	
青脚滨鹬 <i>Calidris temminckii</i>	71		LC	
长趾滨鹬 <i>Calidris subminuta</i>	6		LC	
尖尾滨鹬 <i>Calidris acuminata</i>	142		LC	
阔嘴鹬 <i>Calidris falcinellus</i>	7	二级	LC	
黑腹滨鹬 <i>Calidris alpina</i>	3515		LC	
红颈瓣蹼鹬 <i>Phalaropus lobatus</i>	2		LC	
燕鸥科 Glareolidae				
普通燕鸥 <i>Glareola maldivarum</i>	2		LC	
鸥科 Laridae				
红嘴鸥 <i>Chroicocephalus ridibundus</i>	1873		LC	
黑嘴鸥 <i>Saundersilarus saundersi</i>	2277	一级	VU	
渔鸥 <i>Ichthyaetus ichthyaetus</i>	1		LC	
黑尾鸥 <i>Larus crassirostris</i>	752		LC	
西伯利亚银鸥 <i>Larus smithsonianus</i>	358		LC	
鸥嘴噪鸥 <i>Gelochelidon nilotica</i>	1208		LC	
红嘴巨燕鸥 <i>Hydroprogne caspia</i>	241		LC	
白额燕鸥 <i>Sternula albifrons</i>	231		LC	
普通燕鸥 <i>Sterna hirundo</i>	158		LC	
灰翅浮鸥 <i>Chlidonias hybrida</i>	74		LC	
白翅浮鸥 <i>Chlidonias leucopterus</i>	944		LC	
鹬形目 CICONIIFORMES				
鹬科 Ciconiidae				
黑鹬 <i>Ciconia nigra</i>	4	一级	LC	II
东方白鹬 <i>Ciconia boyciana</i>	456	一级	EN	I
鸕鸟目 SULIFORMES				
鸕鹚科 Phalacrocoracidae				
普通鸕鹚 <i>Phalacrocorax carbo</i>	495		LC	
鹈形目 PELACANIFORMES				
鹈科 Threskiornithidae				
白琵鹭 <i>Platalea leucorodia</i>	14	二级	LC	II
鹭科 Ardeidae				
夜鹭 <i>Nycticorax nycticorax</i>	4		LC	
池鹭 <i>Ardeola bacchus</i>	3		LC	
牛背鹭 <i>Bubulcus ibis</i>	20		LC	
苍鹭 <i>Ardea cinerea</i>	405		LC	
草鹭 <i>Ardea purpurea</i>	11		LC	
大白鹭 <i>Ardea alba</i>	173		LC	
白鹭 <i>Egretta garzetta</i>	557		LC	

一级、二级分别表示该物种为国家一级、国家二级重点保护野生动物;IUCN:世界自然保护联盟受威胁物种红色名录(The International Union for Conservation of Nature Red List of Threatened Species),CR:极危物种 critically endangered、EN:濒危物种 endangered、VU:易危物种 vulnerable、NT:近危物种 near threatened、LC:略需关注 least concern;CITES:濒危野生动植物种国际贸易公约附录 Convention on International Trade in Endangered Species, I、II 分别表示该物种被列入 CITES 公约的附录 I、附录 II