基于 AI 识别技术评估海上风电对鸟类的影响

侯法垒[1]，吴韬[1]，邢家栋[1]，冀昊[2]，周鑫[3]，于跃[3]，程嘉熠[3]，王晓萌[3]

（1. 山东能源集团电力集团有限公司　济南　250014；2. 水电水利规划设计总院　北京　100120；
3. 国家海洋环境监测中心　大连　116023）

摘要：在“双碳”目标背景下，大力发展海上风电是推进能源转型的关键环节。然而，伴随海上风电集群化、集约化快速发展，其背后隐藏的环境问题逐渐显现，但海上风电对鸟类生境及其行为习性的影响尚存争议。通过基于 AI 识别技术的海上风电场鸟类在线监测系统，深入探究运营期海上风电场周边鸟类的物种和行为变化。结果表明，目标风电场的运营并未对周边鸟类的季节性迁徙和每日活动规律造成显著影响。风电场内穿梭的鸟类以鸥类为主，飞行速度显著降低，并可主动规避风机叶片。多数雀形目小型鸟类以及部分猛禽以升压站作为临时栖息地和避敌场所。研究结果可为未来海上风电场的生态友好性评估提供参考，丰富海上风电场鸟类智慧化监管的技术手段。

关键词：鸟类；海上风电场；在线监测；AI 识别技术；海洋生态保护

中图分类号：X826；X84；P7　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1005-9857（2025）09-0047-11

Assessing the Impact of Offshore Wind on Birds Using AI Recognition Techniques

HOU Falei[1]，WU Tao[1]，XING Jiadong[1]，JI Hao[2]，ZHOU Xin[3]，YU Yue[3]，CHENG Jiayi[3]，WANG Xiaomeng[3]

（1. Shandong Energy Group Electric Power Group Co.，Ltd.，Jinan 250014，China；
2. China Renewable Energy Engineering Institute，Beijing 100120，China；
3. National Marine Environment Monitoring Center，Dalian 116023，China）

Abstract：Under the background of “dual-carbon” targets，the vigorous development of offshore wind power is a key link to promote energy transformation．However，with the rapid shift toward large-scale and intensive offshore wind clusters，the underlying environmental concerns have gradually emerged，particularly regarding the ongoing controversy over the impact of offshore wind farms（OWFs）on bird habitats and behavior．Through an online bird monitoring system for offshore wind farms based on AI recognition technology，in-depth exploration of bird species

收稿日期：2025-01-07；**修订日期：**2025-08-12

基金项目：国家海洋环境监测中心近岸海域生态环境重点实验室项目（20240101）.

作者简介：侯法垒，工程师，硕士，研究方向为电力生产、供应及新能源管理等方面

通信作者：周鑫，工程师，硕士，研究方向为涉海工程生态环境监管等方面

and behavioral changes around offshore wind farms during the operation period. The results showed that the operation of the target wind farm did not significantly affect the seasonal migration and daily activity patterns of birds in the surrounding area. Gulls were the dominant *Passeriformes* at the wind farm, with significantly reduced flight speeds and active avoidance of the turbine blades. Notably, most small *Passeriformes* and certain raptors utilized the offshore substation as a temporary roosting and refuge site. The results of this study can provide a reference for the ecological friendliness assessment of future offshore wind farms and enrich the technical means for intelligent supervision of birds in offshore wind farms.

Keywords: Birds, Offshore wind farms, Online monitoring, AI recognition technology, Marine environmental protection

可再生能源发展已成为世界各国保障能源安全、加强环境保护、应对气候变化的重要措施。风电作为目前技术最成熟、基本实现商业化且最具发展潜力的新兴可再生能源技术，在全球能源发电总量中的份额逐年攀升。与陆地相比，海上风力资源更为丰富，发电效率更高[1-2]，海上风电因此正逐渐成为我国可再生能源发展的重点领域，也是助力实现“双碳”目标的重要战略支撑[3]。全球风能理事会发布的《2024 全球海上风电报告》中指出，2023 年中国已连续 6 年在海上风电发展方面处于全球领先地位，海上风电装机容量约占全球的 50.3%[4]。据统计，截至 2024 年 9 月底，我国风电累计并网容量达到 4.8 亿 kW，同比增长 19.8%，其中陆上风电 4.4 亿 kW，海上风电 3 910 万 kW[5-6]。风电场的选址需综合考虑风力资源、海底地质结构、海域利用、环境因素、交通和电网接入、地震和构造风险、特殊用海情况等各种因素的限制[7-8]，同时按规定在各种海洋自然保护区、海洋特别保护区、自然历史遗迹保护区、重要渔业水域、河口、海湾、滨海湿地、鸟类迁徙通道和栖息地等重要、敏感和脆弱生态区域，以及划定的生态红线区等不得规划布局海上风电场[9]。

毋庸置疑，在全球范围内利用海上风电能源可以起到脱碳的作用，但随着海上风电的快速发展，也可能会对海洋生态环境造成潜在影响[10-12]。在建设阶段，海底工程作业会产生废弃物和污染物，风机安装过程中产生的强噪声引起鱼类的应激反应，同时影响鸟类停歇、觅食，海底电缆的铺设可能会改变海底原有地形地貌，导致底栖生物栖息环境丧失或退化[13-14]；在运营阶段，风机机组产生的低频噪声和电磁辐射等对海洋生物造成慢性影响，而风机叶片转动及夜间光照可能会导致鸟类发生碰撞，影响鸟类迁徙等[15-17]。整体来看，当前国内外关于海上风电场生态环境效应的评估研究已逐渐聚焦其对鸟类的影响，但多采用类比分析方法，且相关结果多停留在定性评价层面。我国已利用视觉图像识别技术对湿地、湖泊区域的鸟类种群进行调查[18-19]，但该技术尚未在海上得以应用，基于实际海上风电项目鸟类种群的现场长期调查开展的环境评估研究几乎空白。

基于上述背景，为深入探究海上风电场运营对鸟类迁徙、栖息等行为特征的影响，同时科学评判鸟类在风电场内的碰撞风险，本文以山东能源渤中海上风电 A 场址为研究对象，综合利用人工智能（AI）识别技术评估海上风电运营期对邻近海域鸟类生态环境的影响，更加科学合理地揭示海上风电场及其邻近海域的鸟类数量、飞行方向等参数变化情况，结合海上风电海洋生态环境监督管理要求，优化海上风电场生态环境保护体系。

1 鸟类在线监测技术研究进展

为解决传统鸟类调查人工识别、耗时费力的弊端，深入持续研究海上风电场运营对鸟类的影响，目前国外已研究建立多种鸟类在线监测及防碰撞技术。按监测技术的类型划分，可分为单一监测技术和多技术集成监测系统[20-21]。

1.1 单一监测技术

目前，国外针对海上风电场鸟类的在线监测技

术主要有 4 种，即雷达监测、图像监测、声学监测和生物跟踪记录监测。其中，雷达监测通过雷达系统发射无线电波并接收反射回来的信号来监测鸟类，根据追踪范围的不同，可细分为多普勒雷达、跟踪雷达和监视雷达 3 种；图像监测主要是通过普通光学摄像机自动记录鸟类白天的活动，同时利用热成像技术监测鸟类夜晚的活动；声学监测通过安装在涡轮机叶片上的传感器来接收振动信号，以此判别和记录鸟类与风机叶片的碰撞事件，目前暂无单独应用的案例；生物跟踪记录监测通常将全球定位系统（GPS）记录器或发射器安装在特定的鸟类身上，深入了解个体的运动和行为，并且可以提供鸟类栖息地使用情况的数据。然而，不同的单一监测技术在进行鸟类监测时会受到环境、气象条件和噪声干扰等条件的限制，具体对比情况如表 1 所示。

表 1　单一监测技术对比

Table 1　Comparison of single monitoring technologies

监测技术	优点	缺点	海上应用国家
雷达监测	探测范围广；鸟类监测精准度高；受时间、空间尺度影响较小等	鸟类碰撞识别难度大；分辨率较低等	荷兰、英国、芬兰、比利时等
图像监测	精准识别效率高；全天监测等	受天气因素影响严重等	德国、丹麦、日本等
声学监测	全天监测；记录鸟类碰撞事件；记录鸟类叫声等	不适合涡轮机周围鸟类监测，误差较大等	—
生物跟踪记录监测	精准监测鸟类个体；监测飞行高度等	仪器易脱落；可能对部分鸟类产生负面影响等	英国等

1.2　多技术集成监测系统

为弥补单一监测技术的应用短板，目前国外相关研究机构已构建多技术集成的鸟类在线监测系统，主要包括：MUSE 监测系统、WT-Bird 监测系统、DT-Bird 监测系统和 ATOM 监测系统等。不同的监测系统在原理层面存在区别，对应的优缺点不仅存在明显差异，且在实际应用中的适配性与局限性也各有不同，具体对比情况如表 2 所示。

表 2　多技术集成监测系统的构成对比

Table 2　Comparison of the components of multi technology integrated monitoring systems

监测系统	系统构成	优点	缺点	海上应用地区
MUSE 监测系统	雷达、日光摄像机、热成像摄像机	AI 智能识别鸟类，包括高度和速度；夜间持续收集；监测识别范围广	每台摄像机一次只能跟踪记录一种鸟类	美国、欧洲、亚洲等
WT-Bird 监测系统	近红外摄像机、传感器、麦克风	碰撞误识别概率低	传感器受限导致小型鸟类碰撞识别难度大	荷兰等
DT-Bird 监测系统	日光和热成像摄像头、扬声器	监测有碰撞风险的鸟类，触发防碰撞风险措施包括关闭风机或发出阻止信号	需人工识别鸟类碰撞情况且鸟类物种确定难度大	美国、挪威、瑞士、英国等
ATOM 监测系统	热成像仪、日光摄像机、高频接收器、声学和超声波麦克风	自动识别鸟类的高度和方向；监测识别范围广；捕获鸟类声学数据	监测数据处理要求高	美国等

综合现有海上风电场各类鸟类在线监测技术的优缺点，并结合研究区域周边环境条件不利于雷达与声学监测应用的实际情况，同时兼顾经济性与可操作性，最终选用基于 AI 识别技术的视觉图像监测方法。

2 研究区域概况与方法

2.1 研究区域概况

鸟类在线监测调查的渤中海上风电 A 场址工程区域位于山东省东营市北部海域，风电场场区水深 10 ～ 20 m，场址中心离岸距离 20 km 左右，场址总面积约 49 km²。工程项目主要建设内容包括 60 台海上风机、1 座海上升压站，本项目风机轮毂高度为 126 m，风机叶轮直径 220 m。本次研究依托风电场升压站三楼西北角 1 个广角摄像头获取视频流并进行鸟类识别分析，根据摄像头性能估算，监测范围可覆盖周边 3 km。风电场布局、摄像头监测方向及范围如图 1 所示。

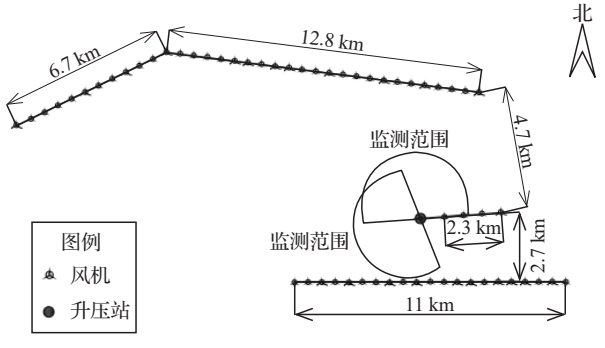

图 1 海上风电场

Fig.1 Offshore wind farm

2.2 研究方法

本次调查研究通过构建鸟类 AI 识别系统，实施在线实时监测。结合风电场实际情况，依托目标风电场升压站三楼西北角已有摄像头（400 万像素，25 倍变焦）获取视频流并进行鸟类识别分析。海上升压站位于风电场南部中间，海面上部结构总高约 31 m。监测时间为 2024 年 5 月 20 日至 10 月 21 日。期间，监测方向受天气影响导致监控视角发生变化，具体变化情况如表 3 所示。监测期间每日对各摄像头角度、拍摄范围、鸟类识别信息等状况进行查验，确保摄像头正常运行，避免数据缺失。

表 3 升压站摄像头监测方向变化情况

Table 3 Changes in the direction of camera monitoring at the booster station

日期	监测方向
5 月 20 日至 9 月 6 日	正北方向
9 月 7 日至 9 月 11 日	升压站内部走廊
9 月 12 日至 10 月 21 日	西南方向

2.2.1 鸟类 AI 识别原理

AI 自动识别原理首先将摄像头捕捉到的每一帧图像进行预处理，以增强图像质量并去除噪声。然后，通过卷积神经网络（CNN）对图像中的目标进行特征提取，识别出鸟类的边界框，并利用跨平台计算机视觉库（OpenCV）提供的 cv2.rectangle() 函数在图像上绘制矩形框。通过此函数，可以手动或自动地在图像上标记出鸟类的运动轨迹，并得到矩形框的坐标。通过将拍摄的鸟类视频逐帧与样本库进行匹配，最终识别出鸟类物种。

鸟类识别的矩形框坐标可以直接存储到数据库中，用于后续的轨迹匹配与判断。同时，为了解决多目标跟踪问题（多只鸟同时出现），可使用数据关联算法（如匈牙利算法）将检测到的目标与之前的轨迹进行关联，确保每只鸟类的轨迹是独立且连续的。最终，利用多层神经网络对识别结果进行优化和验证，确保识别的准确性和实时性，为后续的轨迹跟踪提供基础数据。

2.2.2 鸟类 AI 识别系统样本库构建

本次鸟类 AI 识别在线监测系统样本库中的鸟类图像信息主要来源于现场拍摄积累以及《黄河口观鸟指南》《黄河口野鸟识别》《美丽家乡——黄河口》《中国鸟类分类与分布名录（第四版）》等相关论著，可覆盖黄河口常见鸟类。

2.2.3 鸟类 AI 识别监测视频流组网

如图 2 所示，在风电场集控中心提取监控视频并保存至原硬盘录像机内，提取实时流协议（RTSP）的视频流，并通过防火墙接入 SD-WAN 网络设备内

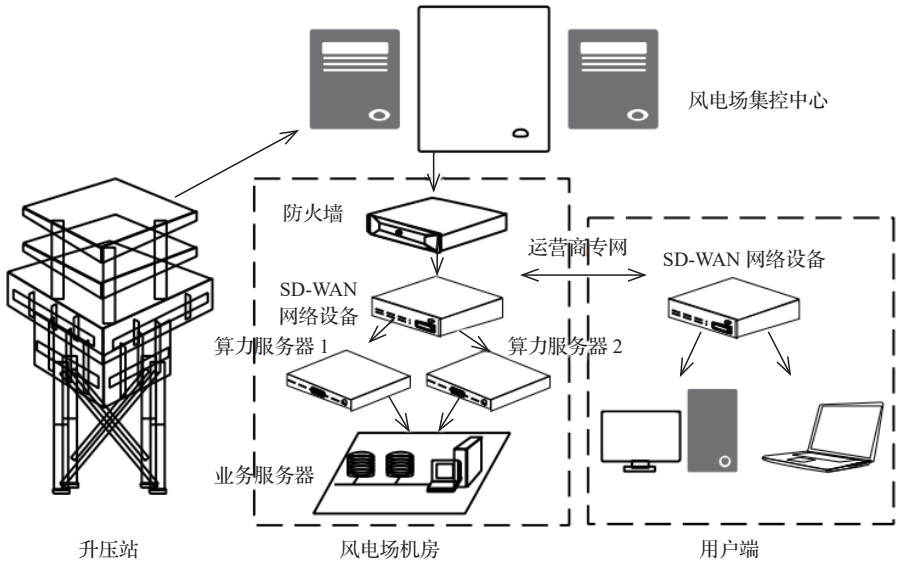

图 2　监测系统视频流组网方案

Fig. 2　Monitoring system video streaming networking scheme

的多个算法服务器进行识别，通过网闸后，视频数据可进行存储或转发，可满足对摄像头数据进行反复倒查的需求。最后，识别结果在业务服务器上进行汇总展示，用户通过 SD-WAN 网络设备查看识别数据。

2.2.4　鸟类 AI 识别系统的组成

本次搭建的鸟类在线监测系统主要模块由数据总览、识别排行、物种活动节律、鸟类基础信息、AI 识别、优秀数据、报表中心等组成（图 3 和表 4），可以实时监测并汇总相关鸟类监测数据。

（a）监测信息总览模块　　（b）鸟类视频数据管理模块

（c）鸟类基础信息查询模块　　（d）鸟类监测年报汇总模块

图 3　AI 识别在线监测系统的模块展示

Fig.3　Module display of AI recognition online monitoring system

表 4 AI 识别在线监测系统的模块组成及功能介绍

Table 4 Module composition and function introduction of AI recognition online monitoring system

展示模块	功能介绍
数据总览	首页包含环境数据、监测点位数据、监测数量汇总等功能模块
识别排行	将识别的鸟类物种及数量情况进行汇总
物种活动节律	对已识别到的鸟类数据，按照其活动时间及季度情况进行统计
鸟类基础信息	对识别出种类的鸟类提供基础信息展示
AI 识别	实时上传调查点位识别到的鸟类数据情况，包括误识别数据
优秀数据	人工将误识别数据删除，将识别的鸟类添加至优秀数据中
报表中心	对识别到的鸟类进行统计，同时展示鸟类活动节律

3 海上风电场 AI 识别鸟类监测结果与讨论

3.1 鸟类物种组成

在恶劣环境条件下，监测图像质量差，AI 识别可能存在误差。因此，针对视频中受天气和光线影响较大的鸟类，在 AI 识别结果的基础上，采用人工校准方式进行核验。AI 识别及人工校准结果显示，本次调查区域共鉴别出鸟类 19 种（表 5），分别隶属于 9 目 14 科，部分鸟类因飞行速度过快或距摄像头较远无法判断出区系种类。将已鉴别的鸟类按目统计，其中雀形目种类最多（7 种），占整个调查区域鸟类总数的 36.84%，雁形目（3 种）和鸻形目（3 种）次之，各占 15.89%，鹈形目（1 种）、鲣鸟目（1 种）、鸽形目（1 种）、雨燕目（1 种）、隼形目（1 种）、鹤形目（1 种）各占 5.26%。本次调查升压站部分鸟类物种图片，如图 4 所示。对比区域历史数据，本次调查的风电场距黄河三角洲较近，相关研究表明，该区域鸟类物种以鸻形目、雁形目、雀形目居多[22]。此外，风电场附近有大面积滩涂生境，底栖生物资源丰富，可以为鸻形目、雁形目等途经的候鸟提供充足的食物来源[23]。因此，调查结果与历史数据较为一致。

表 5 本次调查鸟类物种名录

Table 5 Bird species checklist for this survey

目	科	中文学名	拉丁学名	保护级别及世界自然保护联盟（IUCN）受胁等级
雁形目	鸭科	白额雁	*Anser albifrons*	国二 /LC
		灰雁	*Anser anser*	三有 /LC
		赤膀鸭	*Mareca strepera*	三有 /LC
鹈形目	鹮科	白琵鹭	*Platalea leucorodia*	国二 /LC
鲣鸟目	鸬鹚科	普通鸬鹚	*Phalacrocorax carbo*	三有 /LC
鸻形目	鸥科	黑尾鸥	*Larus crassirostris*	三有 /LC
		西伯利亚银鸥	*Larus vegae*	三有 /LC
		红嘴鸥	*Chroicocephalus ridibundus*	三有 /LC
鸽形目	鸠鸽科	家鸽	*Columba*	三有 /LC
雨燕目	雨燕科	白腰雨燕	*Apus pacificus*	三有 /LC
隼形目	隼科	红隼	*Falco tinnunculus*	国二 /LC
鹤形目	秧鸡科	骨顶鸡	*Fulica atra*	三有 /LC
雀形目	伯劳科	红尾伯劳	*Lanius cristatus*	三有 /LC
		牛头伯劳	*Lanius bucephalus*	三有 /LC

续表 5

目	科	中文学名	拉丁学名	保护级别及世界自然保护联盟（IUCN）受胁等级
	燕科	家燕	*Hirundo rustica*	三有 /LC
	柳莺科	黄腰柳莺	*Phylloscopus proregulus*	三有 /LC
雀形目	绣眼鸟科	红胁绣眼鸟	*Zosterops erythropleurus*	国二 /LC
	鸫科	斑鸫	*Turdus eunomus*	三有 /LC
	鹡鸰科	白鹡鸰	*Motacilla alba*	三有 /LC

注：“国二”表示国家二级保护动物；“三有”表示国家保护的有重要生态、科学、社会价值的陆生野生动物；受胁等级：“LC”表示无危。

（a）红尾伯劳　（b）白腰雨燕

（c）黑尾鸥　（d）斑鸫

图 4　升压站部分鸟类

Fig.4　Selected bird identification images of the booster station

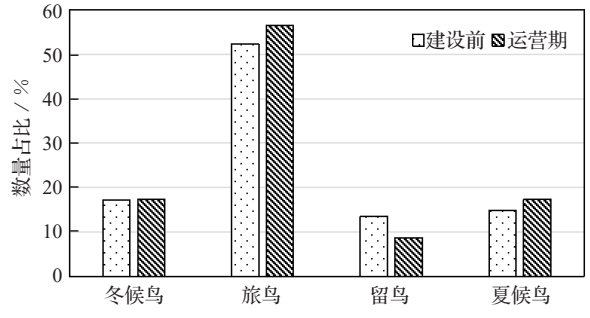

图 5　风电场不同生命周期居留型鸟类比例

Fig.5　Proportion of resident birds in different life cycle stages of wind farms

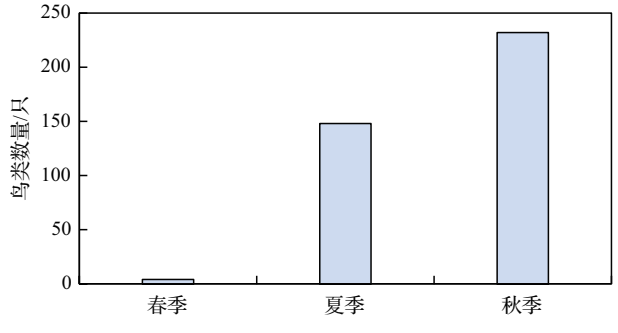

图 6　升压站附近鸟类数量随季节的变化

Fig.6　Changes in bird count near the booster station with season

按居留型划分，在风电场运营期项目区域共监测到冬候鸟 6 种，占 31.6%、夏候鸟 3 种，占 15.8%、旅鸟 7 种，占 36.8%、留鸟 3 种，占 15.8%。相比之下，结合风电场建设前项目区域及陆地、河道等区域的鸟类调查结果表明，冬候鸟占比 17.2%、夏候鸟占比 14.9%、旅鸟占比 52.3%、留鸟占比 15.6%。整体来看，风电场运营前后夏候鸟与留鸟的比例保持相对稳定，波动幅度较小。风电场运营后，项目区内候鸟总体比例上升，尤其是冬候鸟占比增加较为突出，而旅鸟比例明显下降，这可能反映出风电场运营对鸟类迁徙停留行为产生了一定影响，具体原因需结合生境变化、食物资源等因素进一步分析。

3.2　鸟类数量的时间分布特征

本次研究区域的升压站附近的鸟类数量随季节变化显著，如图 6 所示。具体来看，本次调查共监测到鸟类 383 只，其中秋季（9—10 月）共监测到 231 只鸟类，显著高于春、夏两季，占比 60.3%；夏季（6—8 月）共监测到 148 只鸟类，占比 38.6%；春季（5 月）仅监测到鸟类 4 只，占比 1.1%。研究表明，调查区域临近黄河三角洲国家级自然保护区，鸟类种群数量随季节波动明显，主要与鸟类迁徙行为、繁殖季节以及食物资源的季节性变化有关[24]。迁徙鸟类多以夏候鸟为主，且以雁形目和鸻形目鸟类居

多[23]。其中，雁鸭类春季北迁开始于 3 月，4 月基本到达繁殖地[25]，未在本次调查时间内；至 5 月、6 月多数候鸟已经完成迁徙，同时 AI 识别系统的算法应用与样本库调试需要一定时间积累，因此，本次调查春季鸟类监测数据相对较少。此外，鉴于秋季升压站摄像头拍摄视角发生变化，由正北变为西南，一定程度上增加了捕捉东西方向飞行鸟类的概率，因此相应的鸟类监测数量增多，同时从鸟类的季节性迁徙来看，风电场建设未对其造成显著影响。

根据风电场项目所在海域日出及日落时间，将鸟类监测数据分为 4 个时段，聚焦每日不同时间段鸟类数量的变化，结果如图 7 所示。9:00—12:00 时间段监测到的鸟类最多，达到了 120 只，占整体的 31.4 %；6:00—9:00 和 12:00—16:00 这两个时间段的鸟类数量相差不大，分别为 99 只和 90 只，占整体的 25.8%和 23.5%；16:00—19:00 监测到鸟类 74 只，占整体的 19.3%。

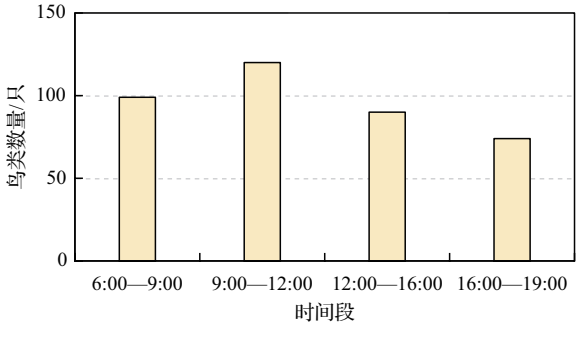

图 7 各时间段升压站附近鸟类数量变化

Fig.7 Changes in bird count near the booster station during different time periods

研究显示，鸟类在日出后 1 h 左右最为活跃，随后逐渐减少，直到日落。这表明鸟类在一天中的早晨时段具有较高的能量和活动水平[26]。此外，一些鸟类的活动模式与风向、潮汐等环境因素有关。上午风速较低且相对湿度较高时，鸟类的活动量会增加。这种环境条件可能有利于鸟类的飞行和觅食活动。另外，研究还发现，上午柔暖的光线和较低的温度可能更适合鸟类的活动[27]，与本次监测中鸟类每日活动规律基本一致。

3.3 鸟类行为特征

对升压站附近识别到的鸟类进行行为特征分类，通过人工判断共分为围绕升压站盘旋、南北飞行、东西飞行和休息 4 种情景，如图 8 所示。其中，围绕升压站盘旋的鸟类最多，达到了 254 只，占升压站监测总数的 66.3%；少数鸟类在升压站做短暂停留。相比之下，南北飞行和东西飞行的鸟类数量相差不大，分别为 55 只和 65 只，占升压站监测总数的 14.4%和 17.0%。休息的鸟类数量为 9 只，占总数的 2.3%。从物种类别来看，在围绕升压站盘旋和休息的鸟类以雀形目为主，如黄腰柳莺、红尾伯劳等；穿越风电场的鸟类则以鸻形目鸥科为主，如西伯利亚银鸥和红嘴鸥等冬候鸟，此外，还有部分黄河口繁殖的普通鸬鹚和无人海岛上繁殖的黑尾鸥。

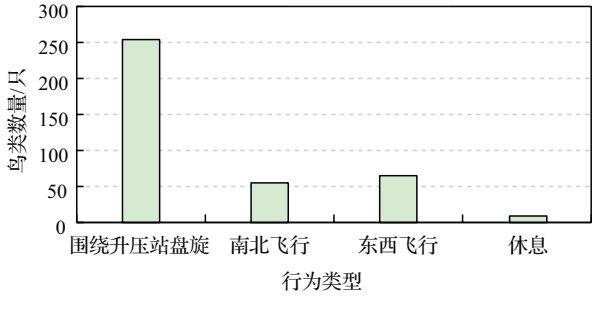

图 8 升压站附近鸟类行为特征统计

Fig.8 Bird behavioral characteristics statistics near the booster station

为深入分析鸥类在风电场内部的飞行速度，选取代表性视频数据，探讨其在风电场内的行为变化。图 9 显示，风电场内东西飞行的鸟类及其飞行高度一般无显著变化，飞行速度一般在 15 ～ 30 km/h[28]，鸥类的飞行速度通常在 30 ～ 80 km/h。例如，红嘴鸥的飞行速度大约为 30 km/h[29]。由此可见，鸟类在风电场内部会减慢飞行速度。初步分析，一方面，风力发电机的运行声音和振动会影响鸟类的听觉和平衡感，对其飞行活动与觅食行为造成干扰，这种干扰使鸟类在飞行过程中更加谨慎，从而减慢飞行速度；另一方面，风电场所在区域大风、雨天、雾天频发，面对这类天气状况，鸟类的飞行速度通常会随之减慢。

（a）2024 年 10 月 7 日星期一 18:17:01　　（b）2024 年 10 月 21 日星期一 16:40:20

图 9　升压站附近部分鸟类的飞行轨迹

Fig.9　Map of the flight paths of selected birds near the booster station

4　结论与建议

本次开展的海上风电场周边鸟类在线监测研究工作已取得初步成效，监测期间共鉴定鸟类 19 种，分别隶属于 9 目 14 科，与历史调查种类组成相似，结果可信度较高。通过对鸟类数量随时间变化的规律和行为特征的分析，初步发现风电场运营并未对周边区域鸟类的季节性迁徙和每日活动规律造成显著影响。每日活跃高峰期在清晨和上午，均与鸟类自然活动习性较为接近。从鸟类行为特征来看，鸟类进入风电场后会降低飞行速度以适应周边环境。升压站上部组块对多数雀形目、鸻形目等小型鸟类以及部分猛禽具有吸引效应，并成为这些鸟类的落脚地和栖息场所。同时，在海况较差的情况下，升压站也可作为部分鸟类的庇护场所，供鸟类躲避。为进一步提高监测数据的准确性和多样性，建议未来重点关注或开展以下几方面工作。

（1）在条件允许的情况下，可以围绕目标风电场持续开展鸟类在线监测工作，通过改变视频流传输路径、更新鸟类识别样本库等方法，建立多模态的鸟类识别模型，提高海上风电场鸟类动态识别精准度。

（2）尝试搭载激光雷达、热成像等技术，以更加精准地分析鸟类的飞行高度和速度，同时使用高分辨率的航拍图像和无人机图像对系统进行补充优化，构建适用于海上风电场的多维度鸟类自动识别系统。

（3）未来鸟类自动识别系统逐步完善后，可集成更多自动监测站和水上、水下视频监控设备，并尝试利用无人机和卫星遥感技术建立环境立体感知监测网络，对水动力、水质、电磁辐射、噪声以及海洋生物等多参数进行同步在线监测，不断提升海上风电场生态环境智慧监管的科技含量和智能化水平，协助管理部门制定科学合理的环保政策和措施，提高海上风电场环境管理的精细化水平。

参考文献（References）：

[1] 李铮，郭小江，申旭辉，等．我国海上风电发展关键技术综述[J]．发电技术，2022，43(2)：186-197.
LI Zheng，GUO Xiaojiang，SHEN Xuhui，et al．Summary of technologies for the development of offshore wind power[J]．Power Generation Technology，2022，43(2)：186-197.

[2] 林玉鑫，张京业．海上风电的发展现状与前景展望[J]．分布式能源，2023，8(2)：1-10.
LIN Yuxin，ZHANG Jingye．Developminet status and prospect of offshore wind power[J]．Distributed Energy，2023，8(2)：1-10.

[3] 中华人民共和国国家发展和改革委员会，中华人民共和国工业和信息化部，中华人民共和国住房和城乡建设部，等.《关于大力实施可再生能源替代行动的指导意见：发改能源〔2024〕1537 号》[EB/OL]．(2024-10-31)[2024-11-25]．https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202410/t20241030_1394119.html.
National Development and Reform Commission，Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China，Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China，et al．Guiding Opinions on Vigorously

Implementing Renewable Energy Substitution Action: NDRC NEA〔2024〕No. 1537[EB/OL]. (2024-10-31)[2024-11-25]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202410/t20241030_1394119.html.

[4] GWEC. Global offshore wind report 2024[EB/OL]. (2024-06-17)[2024-11-25]. https://gwec.net/wp-content/uploads/2024/06/GOWR-2024_digital_final_v2.pdf.

[5] 国家能源局. 2024 年 1—9 月份全国电力工业统计数据[EB/OL]. (2024-10-21)[2024-11-25]. https://www.nea.gov.cn/2024-10/21/c_1212405574.htm.
National Energy Administration. Statistical data of the national power industry from January to September 2024[EB/OL]. (2024-10-21)[2024-11-25]. https://www.nea.gov.cn/2024-10/21/c_1212405574.htm.

[6] 国家能源局. 介绍前三季度可再生能源并网运行情况并解读《关于大力实施可再生能源替代行动的指导意见》[EB/OL]. (2024-10-31)[2024-11-25]. http://www.nea.gov.cn/2024-10/31/c_1212406333.htm.
National Energy Administration. Introduce the operation of renewable energy grid connection in the first three quarters and interpret the Guiding Opinions on Vigorously Implementing Renewable Energy Substitution Action[EB/OL]. (2024-10-31)[2024-11-25]. http://www.nea.gov.cn/2024-10/31/c_1212406333.htm.

[7] 赵辉，刘翼飞，谢磊. 海上风电场选址影响因素探讨[J]. 中国水运，2022，22(12)：44-46.
ZHAO Hui，LIU Yifei，XIE Lei. Discussion on the influencing factors of offshore wind farm siting[J]. China Water Transport，2022，22(12)：44-46.

[8] 朱哲蕾，韩斌，赵文超. 海上风电场选址技术发展现状及趋势[J]. 船舶工程，2023，45(S1)：7-11.
ZHU Zhelei，HAN Bin，ZHAO Wenchao. Development status and trend of siting technology for offshore wind farms[J]. Ship Engineering，2023，45(S1)：7-11.

[9] 国家能源局. 风电场工程场址选择技术规范：NB/T 10639—2021[M]. 北京：中国水利水电出版社，2021.
National Energy Administration. Technical code for site selection of wind power progects：NB/T 10639—2021[M]. Beijing：China Water&Power Press，2021.

[10] ZUPAN M，RUMES B，VANAVERBEKE J，et al. Long-term succession on offshore wind farms and the role of species interactions[J]. Diversity，2023，15(2)：288.

[11] DANNHEIM J，BERGSTROM L，BIRCHENOUGH S N R，et al. Benthic effects of offshore renewables：identification of knowledge gaps and urgently needed research[J]. ICES Journal of Marine Science，2020，77(3)：1092-1108.

[12] WATSON S C L，SOMERFIELD P J，LEMASSON A J，et al. The global impact of offshore wind farms on ecosystem services[J]. Ocean & Coastal Management，2024(249)：107023.

[13] 胡剑. 海上风电项目对海洋生态环境的影响及防治措施[J]. 科技创新与应用，2016(34)：147.
HU Jian. Impacts of offshore wind power projects on the marine ecosystem and preventive measures[J]. Technology Innovation and Application，2016(34)：147.

[14] 王婷，茹小尚，张立斌. 海上风电对海洋生态环境与海洋生物资源的综合影响研究进展[J]. 海洋科学，2022，46(7)：95-104.
WANG Ting，RU Xiaoshang，ZHANG Libin. Research progress on the comprehensive impact of offshore wind farms on the marine ecological environment and biological resources[J]. Marine Sciences，2022，46(7)：95-104.

[15] 陈斯婷，李智，马丽. 海上风电场对鸟类生态影响研究[J]. 环境影响评价，2022，44(3)：31-34.
CHEN Siting，LI Zhi，MA Li. Study on the ecological impacts of offshore wind farms on birds[J]. Environmental Impact Assessment，2022，44(3)：31-34.

[16] 陆忠民，张志宏，徐凌云，等. 海上风电场对鸟类行为的影响分析[J]. 水利规划与设计，2014(1)：5-8.
LU Zhongmin，ZHANG Zhihong，XU Lingyun，et al. Analysis of the impact of offshore wind farms on bird behaviour[J]. Water Resources Planning and Design，2014(1)：5-8.

[17] 许燕华，钱谊，陈雁，等. 东沙沙洲离岸潮间带风电场建设对鸟类的影响[J]. 环境监测管理与技术，2010，22(2)：19-23.
XU Yanhua，QIAN Yi，CHEN Yan，et al. Effect of construction of offshore wind farm in intertidal zones on birds in Dongsha sandbank[J]. The Administration and Technique of Environmental Monitoring，2010，22(2)：19-23.

[18] 李征浩，陈国远，赵永强，等. 鸟类自动识别技术在盐城珍禽自然保护区鸟类调查中的应用[J]. 江苏林业科技，2022，49(2)：39-42.
LI Zhenghao，CHEN Guoyuan，ZHAO Yongqiang，et al. Application of automatic bird identification technology in the bird

survey of yancheng rare bird nature reserve[J]. Journal of Jiangsu Forestry Science&Technology，2022，49(2)：39-42.

[19] 张明明，梁宇祥. 简析鸟类的野外调查和监测技术[J]. 林业科技，2023，48(6)：41-44.
ZHANG Mingming，LIANG Yuxiang. A brief analysis of field survey and monitoring techniques for bird species[J]. Forestry Science&Technology，2023，48(6)：41-44.

[20] Offshore Renewables Joint Industry Programme(ORJIP)for Offshore Wind. ORJIP Offshore Wind：Review of seabird monitoring technologies for offshore wind farms[R]. 2022.

[21] 王建勋. 候鸟迁徙路径研究方法探讨[J]. 农业灾害研究，2023，13(7)：32-34.
WANG Jianxun. Study on the method of migratory bird migration path[J]. Journal of Agricultural Catastrophology，2023，13(7)：32-34.

[22] 连海燕，吴立新，曹爱兰，等. 山东黄河三角洲国家级自然保护区鸟类多样性[J]. 山东林业科技，2018，48(4)：44-46.
LIAN Haiyan，WU Lixin，CAO Ailan，et al. Bird diversity in the yellow river delta national nature reserve Shandong China[J]. Shandong Forestry Science and Technology，2018，48(4)：44-46.

[23] 侯继灵，黄帅，龚大洁，等. 东营海上风电建设对鸟类多样性的影响及保护措施[J]. 林业科技，2024，49(4)：43-48.
HOU Jiling，HUANG Shuai，GONG Dajie，et al. Influence of offshore wind power construction in dongying on bird diversity and its protection measures[J]. Forestry Science & Technology，2024，49(4)：43-48.

[24] LAMB J，GULKA J，ADAMS E，et al. A synthetic analysis of post-construction displacement and attraction of marine birds at offshore wind energy installations[J]. Environmental Impact Assessment Review，2024，108：107611.

[25] 卞兴忠，蒋志学. 风力发电场对鸟类迁徙的影响分析与对策[J]. 环境科学导刊，2010，29(4)：80-82.
BIAN Xingzhong，JIANG Zhixue. Analysis of the impacts of wind farms on bird migration and countermeasures[J]. Environmental Science Survey，2010，29(4)：80-82.

[26] LANGSTON R，PULLAN J D. Wind farms and birds：an analysis of the effects of wind farms on birds，and guidance on environmental assessment criteria and site selection issues[R]. London：Royal Society for the Protection of Birds and Cambridge：BirdLife International，2003.

[27] DILL L M，HOUTMAN R. The influence of distance to refuge on flight initiation distance in gray squirrels(Sciurus carolinensis)[J]. Canadian Journal of Zoology，1989，67(1)：233-235.

[28] CORBEAU A，PRUDOR A，KATO A，et al. Development of flight and foraging behaviour in a juvenile seabird with extreme soaring capacities[J]. Journal of Animal Ecology. 2019，89(1)：20-28.

[29] KEYS D Z，PISTORIUS P A，TREMBLAY Y，et al. Both wind and flying with conspecifics influence the flight dynamics of a seabird[J]. Marine Ecology Progress Series，2023，723：135-149.