

红外无人机在斑海豹种群动态及行为监测中的应用研究

曲翊¹, 刘子成¹, 施巍¹, 毕恒涛², 李元宜¹, 张悦³, 张显威²

1. 辽宁省大连生态环境监测中心, 辽宁 大连 116023

2. 大连斑海豹国家级自然保护区管理局, 辽宁 大连 116011

3. 国家海洋环境监测中心, 辽宁 大连 116023

摘要:斑海豹 (*Phoca largha*) 作为国家一级重点保护野生动物, 观测其夜间活动规律 (如育幼、休憩、上岸、离岸) 是理解其生态习性和评估种群状态的关键环节, 但传统监测手段存在监测盲区, 制约了保护管理的精准性。在大连斑海豹国家级自然保护区选定典型区域及时段, 采用搭载高灵敏度红外热像仪的多旋翼无人机开展系统化夜间巡航监测, 成功实现了对保护区夜间环境下斑海豹个体的清晰识别, 获取了关键育幼期休憩时段的种群分布、数量及行为模式数据。与传统日间观测相比, 夜间观测的个体发现率显著提升, 证实红外无人机在斑海豹种群动态及行为监测中具有巨大应用潜力。智能机巢实验证实了构建 24 h 远程操控监测体系具有可行性。

关键词: 红外无人机; 夜间监测; 斑海豹种群动态; 数智化监测

中图分类号: X835; X859 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-6002(2025)S1-0115-06

DOI: 10.19316/j.issn.1002-6002.2025.S1.14

Research on the Application of Infrared UAVs in Monitoring Population Dynamics and Behavior of Spotted Seal (*Phoca largha*)

QU Yi¹, LIU Zicheng¹, SHI Wei¹, BI Hengtao², LI Yuanyi¹, ZHANG Yue³, ZHANG Xianwei²

1. Dalian Ecology and Environment Monitoring Center of Liaoning Province, Dalian 116023, China

2. Management Bureau of Dalian Spotted Seal National Nature Reserve, Dalian 116011, China

3. National Marine Environmental Monitoring Center, Dalian 116023, China

Abstract: The spotted seal (*Phoca largha*) is a Class I nationally protected wildlife species in China, its nocturnal activities, including pup-rearing, resting, hauling out, and entering the water, are essential for understanding its ecological requirements and evaluating population health. However, conventional approaches often suffer from substantial observational gaps at night, limiting the precision of conservation management. In this study, systematic nighttime aerial surveys were conducted within selected typical areas and periods at the Dalian Spotted Seal National Nature Reserve using a multi-rotor UAV equipped with a high spatiotemporal-resolution infrared thermal imaging systems. The approach successfully enabled clear identification of individual spotted seals under low-light conditions, and yielded data on population distribution, abundance, and behavioral patterns. Compared with traditional daytime observation, the detection rate of individual spotted seals at night was significantly improved, demonstrating the considerable potential of infrared UAVs technology in monitoring the population dynamics and behaviors of spotted seals. Additionally, experiments with an intelligent infrared drones nest verified the feasibility of constructing a 24-hour remote-controlled monitoring system.

Keywords: infrared UAVs; night monitoring; spotted seal (*Phoca largha*) population dynamics; digital and intelligent monitoring

海洋生态系统是地球生命支持系统不可或缺的组成部分, 不仅为人类社会提供了丰富的生态服务功能, 更是全球生物多样性的关键宝库^[1]。在这一复杂而精密的生态网络中, 斑海豹 (*Phoca largha*) 等海洋珍稀濒危物种作为生态系统健康状况的指示物种和旗舰物种, 其种群动态与栖息

地质量直接反映了海洋生态系统的稳定性和完整性。然而, 受全球气候变化、人类活动干扰等多重压力影响, 全球许多海洋珍稀物种正面临严峻的生存威胁, 种群数量持续下降, 进一步加剧了生物多样性丧失^[2-4]。加强对斑海豹等海洋珍稀濒危物种的保护, 不仅是履行《生物多样性公约》等国

收稿日期: 2025-10-07; 修订日期: 2025-11-07

第一作者简介: 曲翊 (1978-), 女, 辽宁大连人, 博士, 高级工程师。

通讯作者: 施巍

际公约义务的体现,也是维护国家生态安全、践行可持续发展战略的必然要求^[5]。开展对斑海豹的长期、连续、精准监测,对于理解海洋生态系统演变规律、预警生态风险、制定科学保护策略具有深远的科学意义与迫切的现实必要性。

针对陆地及淡水生态系统,常见的野生动物观测方法包括野外直接观察、痕迹识别(如足迹、粪便)、陷阱相机(红外触发相机)监测、无线电遥测、卫星追踪等。这些方法已在特定场景下取得了显著成效,特别是红外触发相机,由于其具有隐蔽和能够持续工作的特点,现已广泛应用于大熊猫、东北虎等陆生珍稀动物的行为研究和种群评估,充分显示了其在调查兽类和地栖性鸟类本底资源中的优势^[6-7]。海洋环境相较于陆地环境而言,具有广阔性、动态性和不可接近性,这使得对海洋珍稀动物的观测面临更大挑战。传统的海洋动物观测,如对斑海豹的监测,长期依赖于船舶巡航调查、岸基定点观测及有限的捕获标记重捕^[8-12]。研究人员基于这些方法虽然积累了宝贵的基础数据,但其固有局限性也十分突出:①实时性差。船舶巡航调查和人工巡查受天气、海况制约大,周期长,难以实现高频次、实时动态监测。②覆盖范围有限。现有方法的观测范围通常局限于部分区域或航线,难以覆盖物种的整个活动范围,特别是远海、冰区等难以抵达的生境。③数据采集效率低。人工观测耗时费力,得到的数据量有限,且易受观测者经验和主观因素影响。④存在监测盲区。对于具有显著夜间或晨昏活动习性的物种(如斑海豹的关键育幼、休憩、上岸、离岸行为多发生在夜间),依赖可见光的传统观测手段几乎完全失效,形成了严重的“监测暗区”,导致对种群真实规模、活动节律和栖息地利用模式的理解存在巨大偏差。

为了突破这些局限,近年来,卫星信标、声学遥测标志等技术已开始应用于海洋哺乳动物研究。韩家波等^[11]利用卫星标记跟踪方法对斑海豹的野外释放效果进行了研究,研究结果显示,2011年释放的6头斑海豹的信标信号最长可持续100 d;ANDERSON等^[13]也提出,在鲸、海龟、鲨鱼等大型动物研究中,可使用声学遥测标志进行追踪,通过标志放流和数据回收来获取其活动信息和洄游路线。以上研究结果为海洋珍稀濒危动物监测提供了重要参考。然而,卫星信标法存在极容易脱标的问题,且不足以精细刻画个体行

为;声学监测所使用的声波衰减很快,响应范围较小,一般需要监听站或调查船跟进,在大洋等难以跟踪的水域对标志动物的追踪效果不佳。因此,发展一种能够克服光照限制,实现高效、精准、非侵入式监测的新技术,已成为海洋珍稀濒危动物保护领域的迫切需求。

近年来,无人机技术凭借其灵活性高、成本相对较低、可抵达危险或偏远区域等优势,在生态学与保护生物学领域引发了技术革命^[14]。有研究在重庆金佛山、大巴山等国家级自然保护区开展了红外无人机监测,清晰捕捉到林麝等野生动物的行为姿态,不仅获得了精确的监测数据,还有效节省了人力成本^[15-16],证实红外无人机有望为解决夜间或恶劣光照条件下的野生动物监测难题提供革命性的工具。但是,在海洋珍稀濒危动物种群观测方面,国内外目前还鲜有使用红外无人机进行监测的报道。本研究通过开展实地观测实验,验证该技术在不同环境条件下对斑海豹的探测率与识别准确性,旨在系统评估红外热成像无人机技术在斑海豹夜间监测中的适用性与观测效能,探索红外无人机在提升保护区日常巡护、执法监管和栖息地管理数智化水平中的应用价值,为构建融合卫星遥感、无人机、岸基监测站、水下声学设备等多种技术手段的“天空地海”一体化智能监测网络提供关键的技术模块与示范案例,推动我国海洋珍稀濒危物种保护监测技术体系的现代化转型升级。

1 材料与方法

1.1 热成像技术原理

热成像技术是利用红外探测器和光学成像物镜接收被测目标的红外辐射能量分布,并将其反映到红外探测器的光敏元件上,从而获得红外热像图。热成像仪即使用热成像技术,通过非接触的形式探测红外能量(热量),将其转换为电信号,进而在显示器上生成热图像和温度值,并对温度值进行计算、显示^[17-18]。其技术原理如图1所示。

1.2 研究区域

本研究的研究区域为斑海豹国家级自然保护区,位于大连市西部,覆盖大连市渤海沿岸的大部分海域,包含旅顺口区、甘井子区、金普新区、长兴岛经济区和瓦房店市所辖海域,主要保护对象为斑海豹及其生态环境,是我国最大的国家级海洋

自然保护区。根据斑海豹自然保护区具体生境、地形地貌、历史数据等情况,选取 A 岛、B 岛 2 个上岸点观测斑海豹种群数量。斑海豹栖息地环境及具体生境特征见表 1、图 2。

1.3 红外无人机系统及智能机巢

红外观测实验使用 DJI Matrice 4 T 四轴飞行器,其搭载有广角相机、长焦相机、集成热成像相机与激光测距模块,具备 0.4~200 m 环境探测能力,可满足夜间海上作业需求。智能机巢实验使用大疆无人机场,其工作环境温度为 $-25\sim 45\text{ }^{\circ}\text{C}$,配备风速传感器、雨量传感器、环境温度传感器、水浸传感器(图 3、表 2)。

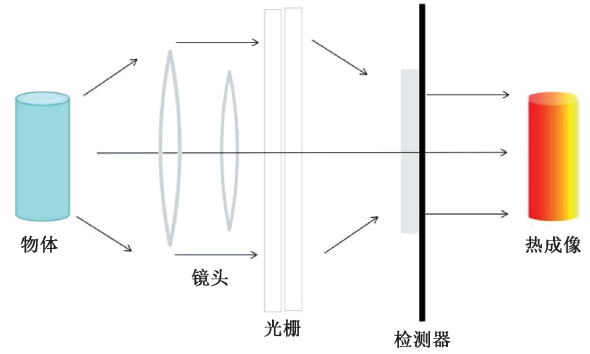


图 1 热成像技术原理

Fig. 1 The principle of thermal imaging technology

表 1 栖息岛屿生境特征

Table 1 Habitat characteristics of habit island

特征指标	A 岛	B 岛
海域位置	渤海辽东湾	渤海辽东湾
岛屿基质情况	基岩岛,主要由大理石构成。岛体四周岩壁陡峭,顶部平坦,海岸以基岩为主,发育有沙滩,低潮时周边海域有岩礁裸露	基岩岛,主要由石灰岩构成。岛体细长,地势北高南低、窄处低平,海岸陡峭,周边多暗礁,东西部发育有沙滩
植被覆盖情况	海岛地表发育有薄层土壤,主要生长有草本植物,乔木和灌木较少,乔木以人工林为主	海岛地表土壤层较厚,植被茂密

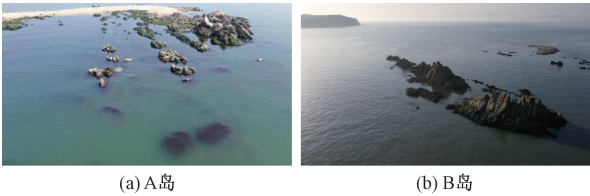


图 2 斑海豹保护区空间分布及栖息地环境

Fig. 2 Reserve spatial distribution of the spotted seal (*Phoca largha*) and their habitat environments



图 3 红外无人机及智能机巢

Fig. 3 Infrared unmanned aerial vehicle and intelligent drone nest

表 2 光学相机及热成像相机参数

Table 2 Optical camera and thermal imaging camera parameters

指标	广角相机	长焦相机	热成像相机
传感器类型	1/1.3 英寸 CMOS	1/1.5 英寸 CMOS	非制冷氧化钒,支持超分模式
视角和光圈	82° , f/1.7	15° , f/2.8	45° , f/1.0
等效焦距/mm	24	168	53
分辨率	4 800 万有效像素	4 800 万有效像素	640×512,超分模式可达 1 280×1 024
其他参数	感光度(ISO)范围: 100~25 600(普通模式), 100~409 600(夜景模式)	ISO 范围: 100~25 600(普通模式), 100~819 200(夜景模式)	测温方式: 点测温、区域测温; 测温范围: $-20\sim 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ (高增益模式), $0\sim 550\text{ }^{\circ}\text{C}$ (低增益模式); 红外波长: $8\sim 14\text{ }\mu\text{m}$; 红外测温精度: $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 或 $\pm 2\%$ (高增益模式), $\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 或 $\pm 3\%$ (低增益模式)

1.4 实验方案设计

红外观测实验在 A、B 两岛均开展,时间为 2025 年 4 月 1—11 日。重点监测时段为黄昏后至黎明前的夜间时段,设定安全飞行高度不低于 30 m,航线覆盖核心栖息地和周边礁石区,实时获取 1080p 红外视频流及同步的经纬度、高度、姿态

等元数据。智能机巢应用实验在 B 岛开展,以验证自动化设备调度精度、多维度环境数据(温湿度、设备运行电压、负载状态)实时回传率和远程操控指令响应延迟情况。该岛屿涵盖建筑遮挡区、开阔空旷区及信号薄弱区,可用于模拟智能机巢实际应用中的复杂环境。每次实验前均对设备

进行初始化校准(包括传感器归零、通信模块信号预检测),确保实验起点的一致性。

1.5 数据处理与分析

此次观测实验的开展时间为4月,海水温度在 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下,不会产生热信号与背景干扰现象,且斑海豹在休憩时通常不会出现个体重叠遮挡现象,故此次观测可采用人工计数法直接进行种群数量统计。每张图片由3名实验人员分别计数,最终结果取平均值。

2 结果与讨论

2.1 红外无人机夜间观测结果

在2025年4月1—11日进行的共11次夜间监测中,红外无人机系统在多种海况(微风、轻浪)和月相条件下均表现出优异的适应性,得到的红外图像可清晰显示滩涂、礁石上休憩的斑海豹个体及幼崽,以及水中游动的斑海豹的热信号。对比无人机常规可见光镜头和夜视镜头图像,直接使用可见光镜头在夜间无法辨别个体和礁石[图4(a)];使用可见光镜头的夜视模式虽然可以辨识出个体,但易受海浪干扰,无法清晰辨认在水中游泳的斑海豹个体[图4(b)]。

使用热成像镜头获得的红外图像清晰揭示了斑海豹的夜间生态信息:①核心夜间栖息地情况。A岛斑海豹白天下水活动频繁。往年使用可见光镜头仅可获得日间下水活动监测数据,其数值远低于本次夜间热成像镜头监测结果[图4(c)、图4(d)]。此次观测结果证实,A岛是重要的夜间休憩聚集区。②育幼行为精细化观察。本研究使用热成像镜头成功记录到多次幼崽在夜间的游泳、依偎等行为。对幼崽活动频次和持续时间统计结果表明,夜间是斑海豹育幼活动的关键窗口期。③上岸离岸节律。本次调查利用红外图像准确捕捉到斑海豹群体在夜晚集中上岸休憩,以及在日出之后(05:00—07:00)陆续离岸入水的规律性行为。以往研究资料的观测时间多起始于日出(05:00左右),终止于日落(19:00左右),无法监测到夜间种群变化的具体数值。马志强等^[9]基于日间观测数据分析发现,日间不同时段的斑海豹观测数量变化较大,上午观察到的斑海豹数量较多,峰值出现在05:00—07:00。这一现象在本次实验中得到了进一步证实。

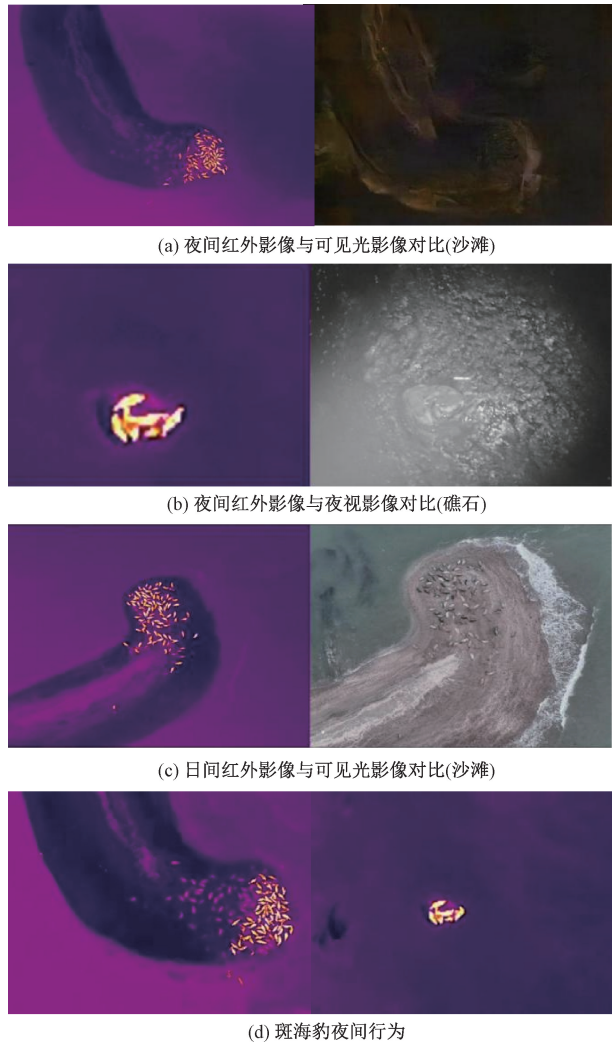


图4 影像对比

Fig. 4 Image comparison

2.2 斑海豹种群数量时序变化

本文对斑海豹在A岛和B岛的种群数量变化情况,开展了一次性多时段观测。结果表明,两岛斑海豹种群数量随时间的变化存在明显差异:A岛种群数量在02:00—05:00出现显著增长,而B岛在傍晚至夜间前期(16:00—22:00)呈现增长趋势。这种动态变化的差异可能与斑海豹的活动节律、栖息地选择等生态习性相关。时间序列分析表明,时间因素会对两处岛种群行为产生显著影响。A岛种群数量在夜间显著提升(增长率较白天高42%),可能与斑海豹夜间上岸休憩的生活习惯有关;B岛种群数量虽然也在夜间出现增长,但在晨昏时段(16:00、04:00)出现双峰波动,可能与潮汐时间影响种群行为有关。

2.3 斑海豹种群数量极值情况

对比近3年(2023—2025年)观测结果,A岛

与 B 岛斑海豹种群数量最低值的时空动态差异显著, B 岛在最低值水平和稳定性上均优于 A 岛。两岛最低值的出现时段从分化向集中转变, 可能受观测天气、栖息地质量、环境因子及人为干扰的共同驱动。两岛最高值呈岛间分化趋势, 且峰值时段在 2025 年再次达到一致(表 3)。2025 年, A 岛最高值大幅增长, 较 2024 年增长 104.9%, 出现

在 05:00; B 岛最高值较 2024 年增长 62.7%, 同样提前至 05:00。近 3 年来, B 岛种群稳定性更优, 最低值始终高于 A 岛; A 岛在 2025 年呈爆发式增长, 且最高值首次超越 B 岛, 显示出良好的保护态势。两岛极值出现时段呈现出“午间/凌晨集中”特征, 核心驱动因子为栖息地质量与人为干扰。3 年观测结果对比见表 3~表 5。

表 3 2025 年种群数量极值情况
Table 3 Extreme values of population size in 2025

岛屿	种群最低值出现时段	种群最高值出现时段	种群发现数量提升率/%
A 岛	12:00	05:00	6.15
B 岛	14:00	05:00	2.70

表 4 2023—2025 年种群数量最低值出现时段对比

Table 4 Comparison of the periods of the lowest population size occurred from 2023 to 2025

岛屿	2023 年	2024 年	2025 年
A 岛	17:00	11:00	12:00
B 岛	08:00	06:00	14:00

表 5 2023—2025 年种群数量最高值出现时段对比

Table 5 Comparison of the periods of the highest population size occurred from 2023 to 2025

岛屿	2023 年	2024 年	2025 年
A 岛	15:00	10:00	05:00
B 岛	06:00	10:00	05:00

2.4 智能机巢应用实验结果

10 次实验中, 智能机巢仅实现 2 次完整成功运行, 成功率为 20%。失败案例全部是因网络通信中断导致设备调度停滞, 初步推测网络为核心制约因素。尽管本次实验受网络条件限制, 整体成功率较低, 但 2 次成功运行已充分验证智能机巢在技术层面的可行性与优势: 其自动化、远程化特征可有效解决传统人工值守模式中的响应慢、精度低、人力成本高问题, 有望实现 24 h 远程操控监测体系的建立。

3 讨论

本次研究成功观测到斑海豹在主要栖息地的夜间生态信息, 记录到多次夜间幼崽活动。实验结果证实, 红外成像技术可以彻底打破夜间监测壁垒, 且监测数据客观、连续; 无人机可以以非侵入方式进行野外观测, 减少人为干扰, 数据覆盖范围广、效率高; 数智化集成可提升响应速度与决策水平, 为“天空地海”一体化监测提供有效的空基节点; 红外无人机可直接应用于珍稀濒危生物监

测场景, 具有广阔的应用前景。智能机巢实验证实, 构建远程 24 h 监测体系具有可行性, 但也暴露出网络因素对体系构建的成功与否具有决定性影响。针对此问题, 可通过以下方案解决: ①部署 5G 专网或工业级 Wi-Fi 设备, 提升信号覆盖强度与稳定性; ②增设边缘计算网关, 实现本地数据预处理与指令缓存, 减少对远端网络的依赖; ③优化通信协议, 降低丢包率与带宽需求。随着这些技术方案的落地, 智能机巢的运行稳定性将显著提升, 使其未来在多领域的规模化应用具备明确的现实基础与技术支持。

4 结论与展望

本研究充分验证了红外无人机技术在斑海豹自然保护区夜间监测中的卓越效能, 以及数智化集成在该领域的巨大应用潜力。该技术成功解决了长期存在的夜间监测盲区问题, 首次系统性获取了保护区斑海豹夜间分布、数量和行为关键数据, 刷新了对该物种生态习性的认知。利用搭载高性能红外热像仪的无人机在斑海豹自然保护区进行夜间航拍, 有望系统性地获取其在关键时段(夜间至凌晨)的精确位置分布、个体数量、聚集状态, 乃至特定行为(如哺乳、换毛)的第一手数据。通过深度融合智能感知(红外成像)、边缘计算(实时目标检测)、云端智能(数据分析与可视化)等数智化技术, 构建了高效、自动化的“监测-分析-决策”闭环, 为保护区精准化、智能化管理提供了强有力的技术赋能。其技术框架和应用经验对于推进我国珍稀濒危物种保护监测现代化, 构建国家生态环境智能感知网络, 具有重要的示范和推广价值。

参考文献 (References):

- [1] WORM B, BARBIER E B, BEAUMONT N, et al. Impacts of Biodiversity Loss on Ocean Ecosystem Services[J]. *Science*, 2006, 314(5 800): 787-790.
- [2] MOORE S E. Marine Mammals as Ecosystem Sentinels[J]. *Journal of Mammalogy*, 2008, 89(3): 534-540.
- [3] MCCAULEY D J, PINSKY M L, PALUMBI S R, et al. Marine Defaunation: Animal Loss in the Global Ocean[J]. *Science*, 2015, 347(6 219): 1255-1256.
- [4] ESTES J A, TERBORGH J, BRASHARES J S, et al. Trophic Downgrading of Planet Earth [J]. *Science*, 2011, 333(6 040): 301-306.
- [5] 环境保护部. 中国生物多样性保护战略与行动计划(2011—2030年)[Z]. 2010-09-17.
- [6] KAYS R, CROFOOT M C, JETZ W, et al. ECOLOGY. Terrestrial Animal Tracking as an Eye on Life and Planet [J]. *Science*, 2015, 348(6 240): aaa2478.
- [7] 李晟, 王大军, 肖治术, 等. 红外相机技术在我国野生动物研究与保护中的应用与前景[J]. *生物多样性*, 2014, 22(6): 685-695.
LI Sheng, WANG Dajun, XIAO Zhishu, et al. Camera-Trapping in Wildlife Research and Conservation in China: Review and Outlook [J]. *Biodiversity Science*, 2014, 22(6): 685-695.
- [8] 郝玉江, 王克雄, 韩家波, 等. 中国海兽研究概述[J]. *兽类学报*, 2011, 31(1): 20-36.
HAO Yujiang, WANG Kexiong, HAN Jiabo, et al. Marine Mammal Researches in China [J]. *Acta Theriologica Sinica*, 2011, 31(1): 20-36.
- [9] 马志强, 韩家波, 鹿志创, 等. 渤海金州湾石线岛海域斑海豹种群动态初步调查[J]. *水产科学*, 2018, 37(5): 684-688.
MA Zhiqiang, HAN Jiabo, LU Zhichuang, et al. Quantitative Statistics and Behavioral Observation of Spotted Seal in Waters Around Shixian Island of Jinzhou Bay in Bohai Sea [J]. *Fisheries Science*, 2018, 37(5): 684-688.
- [10] 王丕烈, 韩家波, 马志强. 黄渤海斑海豹种群现状调查[J]. *野生动物*, 2008, 29(1): 29-31, 39.
WANG Pilie, HAN Jiabo, MA Zhiqiang. Status Survey of Spotted Seal (*Phoca largha*) in Bohai and Yellow Sea [J]. *Chinese Journal of Wildlife*, 2008, 29(1): 29-31, 39.
- [11] 韩家波, 鹿志创, 田甲申, 等. 基于卫星信标跟踪的斑海豹放流效果研究[J]. *兽类学报*, 2013, 33(4): 300-307.
HAN Jiabo, LU Zhichuang, TIAN Jiashen, et al. Release Studies on Spotted Seals (*Phoca largha*) Using Satellite Telemetry Tracking Technique [J]. *Acta Theriologica Sinica*, 2013, 33(4): 300-307.
- [12] 田甲申, 鹿志创, 罗耀明, 等. 应用碳氮稳定同位素研究斑海豹(*Phoca largha*)的食性[J]. *生态学杂志*, 2015, 34(12): 3 453-3 458.
TIAN Jiashen, LU Zhichuang, LUO Yaoming, et al. Feeding Habits of the Spotted Seal *Phoca largha* by Stable Carbon and Nitrogen Isotopes Analysis [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2015, 34(12): 3 453-3 458.
- [13] ANDERSON K, GASTON K J. Lightweight Unmanned Aerial Vehicles Will Revolutionize Spatial Ecology [J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2013, 11(3): 138-146.
- [14] ARNOLD G, DEWAR H. Electronic Tags in Marine Fisheries Research: A 30-Year Perspective [M]// SIBERT J R., NIELSEN J L. *Electronic Tagging and Tracking in Marine Fisheries*. Dordrecht, Netherlands: Springer, 2001: 7-64.
- [15] 李娟, 林海晏, 张涛, 等. 自然保护区珍稀野生动物智能化监测关键技术的研究[J]. *科技与创新*, 2025(14): 85-87.
LI Xian, LIN Haiyan, ZHANG Tao, et al. Research on Key Technologies for Intelligent Monitoring of Rare Wild Animals in Nature Reserves [J]. *Science and Technology & Innovation*, 2025(14): 85-87.
- [16] 杨拂晓, 费龙, 闫泰辰. 基于深度学习的野生动物图像识别研究综述[J]. *北京测绘*, 2024, 38(9): 1 237-1 242.
YANG Fuxiao, FEI Long, YAN Taichen. Review of Deep Learning-Based Wildlife Image Recognition Studies [J]. *Beijing Surveying and Mapping*, 2024, 38(9): 1 237-1 242.
- [17] 张志强, 王萍, 于旭东, 等. 高精度红外热成像测温技术研究[J]. *仪器仪表学报*, 2020, 41(5): 10-18.
ZHANG Zhiqiang, WANG Ping, YU Xudong, et al. Study on High Accuracy Temperature Measurement Technology of Infrared Thermal Imager [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2020, 41(5): 10-18.
- [18] 王馨尉. 红外热像仪精准测温技术模型研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2016.