

利用小型无人机监测西洞庭湖水鸟的可行性探讨

高大中 林海 林乐乐 崔国发*

北京林业大学生态与自然保护学院 北京 100083

摘要: 传统鸟类监测方法具有调查时间长、人力物力消耗大、调查结果不准确的局限。近年来, 无人机遥感技术在生态学领域的应用日益广泛, 但在鸟类调查上仍缺乏成熟的技术方法。本研究于 2019 年 11 月 19 至 25 日期间, 使用搭载可见光相机的小型多旋翼无人机大疆 Mavic 2 行业变焦版, 在湖南西洞庭湖国家级自然保护区内的四个水鸟集群分布区域划定监测样区, 规划航线, 设定合适的飞行和拍摄参数后采集遥感数据。根据水鸟对无人机的反应程度划分不同的惊扰等级, 记录拍摄过程中鸟类受惊扰情况。利用图像拼接软件 PTGui Pro 11.0, 对采集到的影像进行拼接、匀色等解译预处理操作。对合成后的遥感影像建立水鸟分类标注表, 进行人工解译, 并对调查过程中的水鸟惊扰情况进行统计分析。本研究共进行 11 次飞行调查, 获取 10 个样区数据, 最大样区面积约为 18 hm², 75 m 飞行高度下影像分辨率为 0.012 m/像素, 对样区内 6 种体型较大的水鸟——苍鹭 (*Ardea cinerea*)、大白鹭 (*A. alba*)、小天鹅 (*Cygnus columbianus*)、凤头麦鸡 (*Vanellus vanellus*)、绿翅鸭 (*Anas crecca*) 和罗纹鸭 (*Mareca falcata*) 进行了分类和计数。绿翅鸭和罗纹鸭二者依靠遥感图像无法区分, 其余 4 种拍摄到的水鸟均成功解译和计数。惊扰等级记录显示, 本次无人机调查对水鸟的惊扰程度较弱。结果表明, 基于搭载可见光相机的小型无人机对湿地大型和中型水鸟进行快速遥感调查监测具有一定的可行性, 在湖泊湿地类型的鸟类调查中具有应用潜力; 通过选择合适的飞行平台, 设定适当的飞行高度、飞行速度和图像重叠度等参数, 能够在保证解译结果准确性的同时, 避免对水鸟的过度干扰。

关键词: 无人机; 湿地; 水鸟; 监测; 越冬地

中图分类号: Q958 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3263 (2021) 01-100-11

The Feasibility of Wetland Waterfowl Monitoring Method Based on UAV Remote Sensing

GAO Da-Zhong LIN Hai LIN Le-Le CUI Guo-Fa*

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

Abstract: Traditional bird monitoring methods have the limitations of long investigation time, large consumption of manpower and material resources, as well as inaccurate identifications. In recent years,

基金项目 国家级大学生创新创业训练计划项目 (No. G201910022068);

* 通讯作者, E-mail: fa6716@163.com;

第一作者介绍 高大中, 男, 本科生; 研究方向: 无人机生态学遥感, 自然保护区学; E-mail: gaodazhong@bjfu.edu.cn。

收稿日期: 2020-03-30, 修回日期: 2020-11-23 DOI: 10.13859/j.cjz.202101012

unmanned aerial vehicle (UAV) remote sensing technology has been widely used in the field of ecology, however, it is still a lack of developed methods for its application in bird survey. In this study, a micro-UAV (DJI Mavic 2) equipped with a visible light camera was used to conduct a waterfowl survey in the West Dongting Lake National Nature Reserve in Hunan Province. Four survey areas were selected inside the reserve where the target species were concentrated. With flight routes in each area planned and the flight and shooting parameters set appropriately, remote sensing data were collected (Fig. 1). Meanwhile, the birds' response to the disturbance caused by the shooting process was ranked and recorded (Table 1). Subsequently, the image splicing software PTGui Pro 11.0 was employed to splice the collected images and adjusted their color balance. Finally, based on the synthesized remote sensing image, the classification and annotation table of waterfowl was established and the waterfowl in the image were manually interpreted. Also, the disturbance ranks of the investigation to the waterfowl was analyzed statistically. We conducted 11 flights in this study, of which the largest flight sites had an area of 18 hm² and the resolution of 0.012 m/pixel at the flight altitude of 75 m. We successfully obtained data from ten survey flights. We tried to identify and count, in our obtained images, six main waterfowl species with relatively large body size: *Ardea alba*, *A. cinerea*, *Anas crecca*, *Mareca falcata*, *Cygnus columbianus* and *Vanellus vanellus* (Table 2, Fig. 2). The results showed that the four target species can be identified and counted accurately with the remote sensing images, however, the *A. crecca* and *M. falcata* could not be distinguished from each other. Alarm rating records show that the drone investigation had a minor impact on waterfowl. In conclusion, it is feasible to conduct rapid remote sensing monitoring of large and medium sized waterfowl in wetland based on micro-UAV equipped with visible light cameras. In order to achieve relatively higher accuracy of interpretation and prevent excessive interference to waterfowl at the same time, parameters such as flight altitude, flight speed and image overlap need to be set appropriately.

Key words: Unmanned aerial vehicle; Wetland; Waterfowl; Monitoring; Wintering grounds

将生物多样性的监测工作尽快推进到多尺度、量化的新时期，提高生物多样性保护和科学合理利用的效率，切实提高我国的生态文明水平和可持续发展能力，是全体生态保护工作者的责任与使命（郭庆华等 2016）。传统鸟类监测多依赖于人为定点观测和样线调查等人工调查手段，局限性较大且耗时耗力，定种和计数均容易产生偏差。遥感技术具有数据来源多样、信息量丰富、观测范围广、信息时效性强等优点，正更加广泛地运用于鸟类动态及其栖息地监测研究（雷倩等 2018）。

使用航空遥感技术进行鸟类调查的尝试早在 20 世纪便已开始（赵忠琴 1982，赵忠琴等 1985，纪伟涛等 1999）。无人机遥感作为一种新兴的遥感方式，可以进入地面调查可能无法

到达的湿地等关键地区进行快速调查和监测，在生物多样性监测中具有极大潜力（Kingsford et al. 1999，雷倩等 2018）。其在亚洲象（*Elephas maximus*）、野牦牛（*Bos mutus*）、藏野驴（*Equus kiang*）等大型野生动物的监测中应用较多（宋清洁 2018，郭兴健等 2019，胡健波等 2019，王方等 2019，王俊丽等 2019，吴方明等 2019），而对水鸟的监测研究和应用仍处于起步阶段。李杰等（2019）尝试使用多旋翼无人机对纳帕海 3 种不同大小的集群水鸟进行监测，对比不同监测方式下，各水禽集群特征识别的差异及特点，提出了一些可供水禽监测参考的原则；翟昊等（2019）利用无人机监测与定点观察相结合的方法，考察遗鸥（*Larus relictus*）的新繁殖群和繁殖地；Díaz-Delgado 等（2017）

将其用于西班牙西南部细嘴鸥(*Chroicocephalus genei*)的栖息地制图中; Chabot (2009) 尝试对加拿大地区的雪雁(*Anser caerulescens*)和加拿大黑雁(*Branta canadensis*)进行调查; 此外, 还有使用无人机进行鸟类的无线电遥测信号收集、与录音设备结合进行鸣鸟调查等多种尝试(Wilson et al. 2017, Shafer et al. 2019)。以上研究为无人机水鸟监测技术提供了可贵的借鉴, 但这些研究主要为对特定物种的小范围观察拍摄或栖息地调查。如果能在之前研究的基础上找到更为系统规范、操作便捷、覆盖范围广的水鸟定种和计数方法, 将能极大提高湿地水鸟监测的精度和效率。因此, 本研究以湖南西洞庭湖自然保护区内水鸟为例, 探索基于搭载可见光相机无人机的湿地水鸟大范围快速监测方法, 为湿地鸟类监测工作提供技术参考。

1 研究区域及监测对象

1.1 研究地点概况

研究地点位于湖南西洞庭湖国家级自然保护区内。西洞庭湖地区是江湖复合湿地生态系统的典型代表, 以水禽、水禽栖息地及湿地生态系统为主要保护对象, 被列入《国际重要湿地名录》。保护区现已记录到水鸟 8 目 90 种, 占全国水鸟种类的 33.1%, 其中包含国家 I、II 级重点保护野生动物 25 种(华南濒危动物研究所等 2011)。

1.2 监测对象

由于在鸟类遥感识别中, 对地面分辨率要求高且不允许存在遮挡, 因此本研究优先选择具有以下特征的物种进行识别测试: 体型较大, 数量分布较多且集群特征明显, 常分布于开阔水域或浅滩、沼泽地带。依据李杰等(2019)对湿地鸟类体积大小的划分, 大型鸟, 一般体长在 80 ~ 120 cm 之间; 中型鸟, 一般体长在 40 ~ 80 cm 之间; 小型鸟, 一般体长小于 40 cm, 选择苍鹭(*Ardea cinerea*)、大白鹭(*A. alba*)、小天鹅(*Cygnus columbianus*)、凤头麦鸡(*Vanellus vanellus*)、绿翅鸭(*Anas crecca*)和

罗纹鸭(*Mareca falcata*) 6 种西洞庭湖常见大型或中型水鸟作为监测对象。

2 材料与方法

2.1 飞行器概况

湿地鸟类遥感调查对飞行平台和拍摄设备体积、成像质量和稳定性的要求较高, 自行组装的飞行器可能因体积和噪音过大对鸟类造成惊吓, 航线偏差或成像质量低导致无法进行图像拼接和遥感解译, 甚至飞行器坠毁在水中无法取回(Iv et al. 2006), 因此在进行鸟类遥感数据采集时应当选用质量可靠、技术成熟的行业级小型飞行器。本次研究选用大疆 Mavic2 行业变焦版无人机。其主要参数为: 对角线轴距 354 mm, 续航时间 31 min, 传感器尺寸 1/2.3 in CMOS, 图像分辨率 4 000 像素 × 3 000 像素, 镜头焦距 4.386 ~ 8.6 mm。

2.2 数据采集

2.2.1 调查点选择及预实验 通过前期踏查和无人机高空勘查, 选择监测对象的四个长期集中分布区作为固定调查点, 分别位于西洞庭湖国家级自然保护区内的半边湖、龙王湖、青山湖和安乐湖地区(图 1a)。

地点选取原则: 必须是监测对象的主要栖息地, 监测对象在此长期集群分布; 地貌以水域或滩涂为主, 地势平坦; 人为干扰相对较弱, 不易出现其他因素导致的鸟类惊飞; 人员可到达, 便于观察和飞行器起降。

拍摄时间及天气选取原则: 尽量选择晴朗、能见度较大的天气拍摄, 避免在阴雨、雾霾天气拍摄。在西洞庭湖地区的冬季, 拍摄应尽量在 10 ~ 16 时期间(即太阳高度角大于 40°的时间)进行, 此时光线充足, 鸟体受太阳光照射, 在水面投射一定长度的阴影, 与鸟体共同组成识别特征, 便于后期解译。尤其是可区分长腿和短腿水鸟。在这段时间拍摄还能够避开水鸟活动高峰, 避免水鸟在样区内频繁飞行造成解译结果偏差。

选取 5 个水鸟分布区进行预实验, 使用无

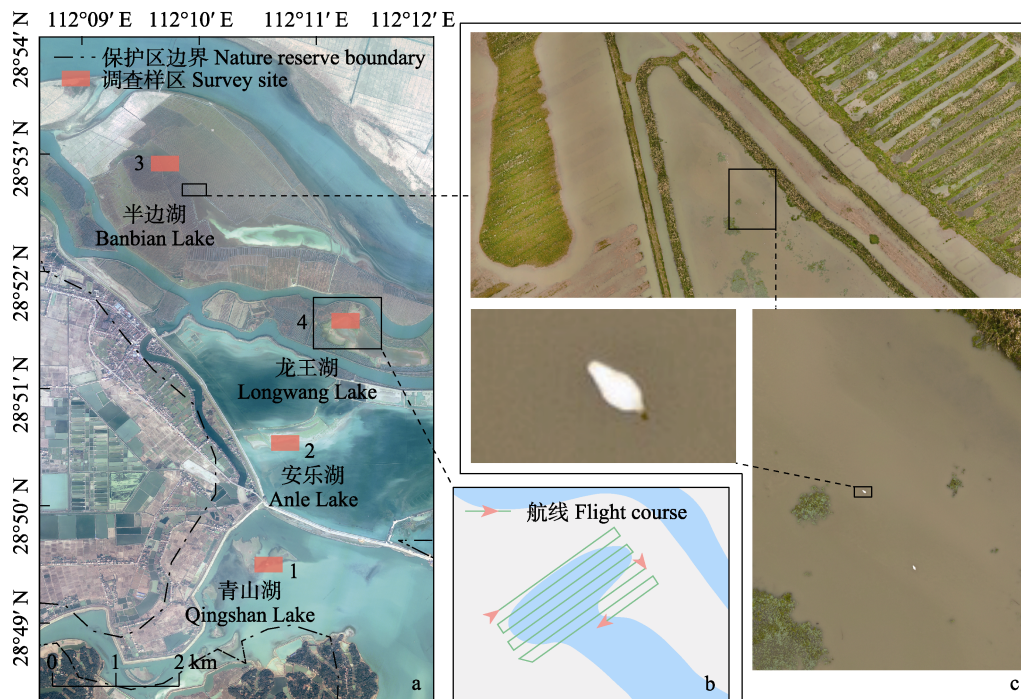


图1 样地位置、航线规划、图片合成效果示意图

Fig. 1 Sample site location, route planning, picture synthesis effect diagram

a. 西洞庭湖保护区及样区位置示意图; b. 数据采集航线规划示意图; c. 合成影像、原始图片、图像内小天鹅个体。

a. Location diagram of West Dongting Lake Reserve and sample area; b. Data acquisition route planning diagram; c. Composite image, original image and *Cygnus columbianus* individual in the image.

无人机在不同的高度飞临水鸟聚集的水面上空，飞行高度在 50 m 以下时，水鸟警戒行为明显，主要表现为游离无人机下方水面或惊飞。在 75 m 及以上高度时，水鸟的警戒行为不明显。

2.2.2 数据获取 本研究选用内置于遥控器内的 DJI pilot 软件，此软件与无人机为同一厂家开发，兼容性较好。软件内置的二维地图拍摄功能，可以较为方便地进行航测参数的设定。航测方法主要参照《低空数字航空摄影规范》(CH/Z 3005-2010) (国家测绘局 2010)，并根据鸟类遥感识别的特殊性作出适当调整。

在前期大致选定样区位置后，需要确定样区具体位置，并将样区边界四角坐标输入软件。在样区规划过程中，需要注意样区面积及边长的规划，即应在单块电池飞行时间内完成样区拍摄。在样区面积过小或边长过短时，取样不足，结果不具研究价值；样区面积过大或边长

过长时，无人机易因电量不足无法一次完成样区拍摄，或耗费时间过长，水鸟变换位置而导致结果误差。使用本研究的设备，根据上述规划原则，样区大小在 3 ~ 20 hm² 之间。

地面分辨率用地面采样间隔 (ground sample distance, GSD) 表示。地面采样间隔是指影像能够详细区分的最小单元所代表的地面实际尺寸的大小，是解译效果的决定因素，地面采样间隔数值越大，图像的分辨率越低，其关系式为 $H = fGSD/a$ ，式中， H 为摄影航高 (单位 m)， f 为镜头焦距 (单位 mm)， GSD 为地面采样间隔 (单位 m/像素)， a 为像元尺寸 (mm/像素)。由关系式可得，影响地面分辨率的航测参数为摄影航高。镜头焦距、像元尺寸则由无人机所挂载的相机决定。

在航高的设定中，需要综合考虑地面分辨率与鸟类惊扰程度的关系。航高越低，地面分

分辨率越高,但鸟类越容易受到惊扰;航高越高,地面分辨率越低,鸟类越不容易受到影响。为平衡水鸟惊扰程度与地面分辨率,结合前人关于无人机高度与水鸟惊扰程度的研究 (Bech-Hansen et al. 2020) 及预实验情况,本研究摄影航高设定为 75 m,在 8.6 mm 焦距下对应地面采样间隔为 0.012 m/像素。

像片重叠度是航向重叠度和旁向重叠度的总称。航空摄影技术规范中为保证成片精度,通常要求航向重叠度和旁向重叠度在 60% 以上,但不适用于时效性要求较高的领域;像片重叠度过低可能造成图片无法拼接 (韩峰等 2017)。为保证拍摄时效,避免因拍摄时间过长,水鸟位置变动导致结果误差,同时保证成片精度符合解译的基本需要,本研究将航向重叠度和旁向重叠度设定为 40% 左右。

飞行速度的快慢通常不会对成片质量造成直接影响,但对拍摄时间和鸟类惊扰程度影响较大。飞行速度较快时,成片效率高,可避免在长时间拍摄中水鸟移动而导致结果误差,但可能加剧对水鸟的惊扰程度。本研究将飞行速度设定为 10 m/s。

其他航测参数主要有相机倾角、航线数等。本次实验相机倾角设定为 90°,航线数由 DJI pilot 软件根据样地面积、航高、重叠度自动规划。样区规划与航线示例见图 1b。

感光度、快门速度、白平衡、焦距等拍摄参数主要通过无人机搭载的相机自动控制,根据实际情况配合手动调整,保证成像清晰;飞行前必须锁定曝光参数,以防后续拼接错误。本研究将无人机搭载的变焦镜头设定在长焦端,以便在相同的地面分辨率下保持较高的航高拍摄,减轻对水鸟的干扰。

无人机应在水鸟栖息范围 1 km 外起飞,升至预定高度后,缓慢靠近拍摄样区后,按规划航线自动采集数据。

2.2.3 鸟类惊扰情况调查 在采集飞行数据的同时,通过单筒望远镜观察并记录样区内包含的水鸟物种、鸟群动态和个体行为反应。通

过鸟类对无人机反应程度的不同,结合 McEvoy 等 (2016) 对水鸟警戒行为的分级标准,量化鸟类受惊扰程度为 4 个等级 (表 1),以样区为单位记录。

表 1 惊扰等级划分表

Table 1 Alarm rating table

等级 Alarm rating	行为 Behavior
0	无任何反应 No discernible response
1	注视飞行器,但不影响正常进食、理羽等行为 Gaze at the aircraft, but it does not affect the normal feeding, grooming and other behaviors
2	注视飞行器,停止正常进食行为或躲避游离 Observe the aircraft, stop normal feeding behavior or avoid dissociation
3	惊飞 Flight response

2.3 数据预处理

2.3.1 预处理实验平台 本次数据预处理使用一台惠普 Z8 高性能工作站, CPU Intel Xeon Silver 4116 *2, 显卡 Quadro P2200, 内存 64 GB 2666 MHz DDR4 ECC, 硬盘 1 TB PCIe NVMe SSD, 操作系统 Windows 10 Professional。

2.3.2 图像拼接 无人机在航拍过程中获取的图片像幅小,单张图片难以覆盖整个样区,因此需将获取的多张遥感影像拼接融合成一幅影像 (许志宏 2017)。本研究使用全景摄影照片拼接软件 PTGui Pro11.0 对拍摄的影像进行拼接。图片拼接的核心工作在于图像控制点的选取。每张图片与其相邻图片之间至少选取 4 个控制点,控制点尽量选取石块之类的固定物体,避免选择水草、水鸟等可移动物体,以免目标移动造成图片拼接误差。对水面等特征较少的地段,软件难以自动生成,可人工放大观察,寻找特征添加控制点。完成控制点选取后,对图片进行自动校准、畸变矫正、匀色操作并导出合成的原始尺寸 TIF 格式图片,以便后期解译。

2.3.3 其他预处理步骤 使用上述软件合成的遥感影像不具有地理信息,因此使用 ArcGIS 10.6 软件中的地理配准工具进行地理配准。在合成遥感图上寻找合适的位置作为控制点,使

用 Google Earth Pro 7.3 获得控制点经纬度坐标并输入 ArcGIS 10.6 软件中，每张图片控制点数不少于 3 个。

2.4 数据解译

目视解译是最直接的遥感信息解读方法，其简单方便且精度高，适用于水鸟监测的初步

研究工作（黄娟琴 2005）。本研究依据识别对象大小、色彩、纹理、阴影及分布特征，结合鸟类生境和活动规律，将获取的鸟类图像分类整理，建立分类标注表（表 2）和分类标签图（图 2）。由于绿翅鸭和罗纹鸭在遥感图片上特征区别很小，难以区分，将其归为一类。通过

表 2 鸟类图像分类标注表
Table 2 Classification labeling table of bird images

物种 Species	大小 Size (cm)±15 cm	类别 Classification	色彩及纹理特征 Color and texture features	分布特征 Distribution characteristics
苍鹭 <i>Ardea cinerea</i>	90	大型鸟 Big-sized	体灰色，脖颈部白色，喙淡黄色，成体及脖颈部细长，长宽比约 3：1，航片内个体长度约 75 像素 The body is grey, the neck is white, the beak is yellowish, the adult and the neck are long and slender, the aspect ratio is about 3：1, the individual length in the plane is about 75 pixels	独立，不集群 Independently distributed, not clustered
大白鹭 <i>A. alba</i>	90	大型鸟 Big-sized	体纯白色，喙淡黄色，脖颈细长，长宽比约 2：1，航片内个体长度约 75 像素 The body is pure white, the beak is light yellow, the neck is long and slender, the length-width ratio is about 2：1, the individual length in the plane is about 75 pixels	集小群或独立 Set small group distribution or independent distribution
小天鹅 <i>Cygnus columbianus</i>	110	大型鸟 Big-sized	体纯白或浅灰色，较粗壮，喙深黄色或黑色，长宽比约 3：2，航片内个体长度约 130 像素 The body is pure white or light gray, thicker, the beak is deep yellow or black, the aspect ratio is about 3：2, the individual length in the plane is about 130 pixels	集小群 Set small group distribution
凤头麦鸡 <i>Vanellus vanellus</i>	32	小型鸟 Small-sized	体绿色，有金属光泽，头部发白，长宽比约 2：1，航片内个体长度约 30 像素 The body is green, with metallic luster, the head is white, the aspect ratio is about 2：1, and the individual length in the film is about 30 pixels	较为疏松的小群 Relatively loose distribution of small groups
绿翅鸭或罗纹鸭 <i>Anas crecca</i> or <i>Mareca falcata</i>	40	中型鸟 Medium-sized	体棕黑色，嘴部黑色，颈短，体呈粗纺锤形，长宽比约 3：2，航片内个体长度约 35 像素 The body is dark brown, the mouth is black, the neck is short, the body is thick and fusiform, the aspect ratio is about 3：2, the individual length in the plane is about 35 pixels	集大群分布 Set large group distribution



图 2 人工解译分类标签图
Fig. 2 Manual interpretation of classification label diagram

分类标注表对合成图片内水鸟个体进行标注分类,统计其数量。

3 结果

3.1 遥感数据获取

本次研究共飞行 11 次,获取 10 个样区共计 40 GB 数据(表 3)。11 月 24 日在青山湖对一群白鹭准备进行实验飞行时鸟群惊飞,未获取样区数据,记录惊扰等级为 3。另外 10 次飞行记录到惊扰等级为 0 和 1 的调查各 3 次,惊扰等级为 2 的调查 4 次。

惊扰等级不超过 1 时,可认为对鸟类基本没有影响;惊扰等级为 2 时,可认为调查对鸟类存在轻微惊扰,但不影响调查结果。本次调查在绝大多数情况下未对水鸟造成严重惊扰。

3.2 图片合成结果

以 3 号样地为例。在 75 m 高度下拍摄的单张图片相幅为 1 728 m²,共拍摄 237 张图片,合成后影像覆盖面积为 94 669 m²,效果见图 1c。

3.3 解译结果

抽取 3、4、5 号样区拍摄结果进行人工解译,结果见表 4。

4 讨论

4.1 无人机监测引起的鸟类惊扰

无人机在采集大面积样区数据时,受飞行速度和像幅大小影响,不同地块存在采样的时间差,因此要求样区内目标水鸟在拍摄过程中不可出现大范围移动,否则会造成严重的重复计数或漏记问题。

由于可能对鸟类产生惊扰,基于无人机的鸟类研究一直存在较大的争议(奚水 2016)。国家林业和草原局(2019)召开的 2019 年全国春季候鸟保护工作电视电话会议强调,“除科学研究等特殊用途外,严禁使用无人机拍鸟,更不得以拍鸟为名捕捉野生鸟类进行‘棚拍’,干扰其正常栖息活动。”

方小斌等(2017)将影响鸟类惊飞距离的因素分为 3 类,栖息地因素(距隐蔽处的距离和生境开阔度等)、鸟类自身因素(生活史、体型和群体大小等)以及与捕食者相关的因素(捕食者的接近方向和速度等);此外,习惯化也可能使鸟类惊飞距离缩短。McEvoy 等(2016)研究了不同类型的无人机、不同飞行方式对水

表 3 样区数据及惊扰等级统计表

Table 3 Sample area data and alarm level statistics table

样区号 Sample plot	拍摄日期 (年-月-日) Date (Year-month-date)	拍摄地点 Site	样区面积 Sample plot area (m ²)	主要物种 The main species	惊扰等级 Alarm rating
1	2019-11-20	半边湖 Banbian Lake	179 243	大白鹭、小天鹅 <i>Ardea alba</i> and <i>Cygnus columbianus</i>	2
2	2019-11-21	半边湖 Banbian Lake	63 954	绿翅鸭、罗纹鸭 <i>Anas crecca</i> and <i>Mareca falcata</i>	1
3	2019-11-21	半边湖 Banbian Lake	94 669	小天鹅 <i>Cygnus columbianus</i>	0
4	2019-11-21	半边湖 Banbian Lake	179 242	绿翅鸭、罗纹鸭 <i>Anas crecca</i> and <i>Mareca falcata</i>	1
5	2019-11-22	龙王湖 Longwang Lake	39 606	绿翅鸭、罗纹鸭、苍鹭、凤头麦鸡 <i>Anas crecca</i> , <i>Mareca falcata</i> , <i>Ardea cinerea</i> and <i>Vanellus vanellus</i>	1
6	2019-11-22	半边湖 Banbian Lake	182 975	绿翅鸭、罗纹鸭 <i>Anas crecca</i> , <i>Mareca falcata</i>	0
7	2019-11-22	龙王湖 Longwang Lake	127 345	绿翅鸭、罗纹鸭、苍鹭、凤头麦鸡 <i>Anas crecca</i> , <i>Mareca falcata</i> , <i>Ardea cinerea</i> and <i>Vanellus vanellus</i>	0
8	2019-11-22	青山湖 Qingshan Lake	65 940	大白鹭 <i>Ardea alba</i>	2
9	2019-11-23	安乐湖 Anle Lake	83 452	白琵鹭 <i>Platalea leucorodia</i>	2
10	2019-11-24	青山湖 Qingshan Lake	N/A	大白鹭 <i>Ardea alba</i>	3
11	2019-11-26	青山湖 Qingshan Lake	78 714	小天鹅 <i>Cygnus columbianus</i>	2

表 4 3、4、5 号样区经过人工解译，识别出的
样区内水鸟种类及数量（单位：只）

Table 4 The species and number of waterbirds
in sample area 3, 4 and 5 were identified
through manual interpretation (ind)

样区号 Sample plot	绿翅鸭/罗纹鸭 <i>Anas crecca</i> or <i>Mareca falcata</i>	苍鹭 <i>Ardea</i> <i>cinerea</i>	大白鹭 <i>A. alba</i>	小天鹅 <i>Cygnus</i> <i>columbianus</i>	凤头麦鸡 <i>Vanellus</i> <i>vanellus</i>
3	29	1	0	14	0
4	8 264	0	0	0	0
5	1 565	6	1	0	127

鸟惊扰程度的影响，结果显示，固定翼无人机尤其是后掠翼机型，由于和猛禽的飞行形态相似，干扰最大；六旋翼机型干扰最小；干扰强度与机体大小无直接关联。Bech-Hansen 等（2020）使用大疆精灵 4 pro 在 50 ~ 100 m 的高度探究无人机对雁鸭类水鸟的干扰情况，水鸟在无人机接近时产生越来越高的警戒行为，位于陆上的水鸟比水面上的警惕性更强，警惕行为的强弱也因物种而异。Mulero-Pazmany 等（2017）通过文献分析认为，更大的无人机和更大的噪音（燃油动力）更容易造成干扰，非繁殖期和更大群体中的动物对无人机的反应更加激烈。

本研究在调查过程中发现，无人机飞行高度、飞行速度、飞行噪音以及水鸟所处的栖息地位置、集群情况等因素均在一定程度上影响了水鸟的警戒行为。但本次调查样本量相对较小，未对此专门设计实验，相关问题有待进一步调查研究。

鉴于以上原因，在利用无人机对水鸟进行调查过程中，有必要严格控制飞行高度等可能造成干扰的影响因子，并在水鸟视线之外起降无人机，在调查区域避免飞机倾斜和飞行高度变化，以避免对水鸟的过度干扰。

4.2 遥感影像分辨率与识别精度

为了保证一定识别精度的同时，避免对鸟类产生过度惊扰，本研究选择了小型无人机中焦距最长、分辨率相对较高的机型。但在

75 m 航高、0.012 m/像素的地面采样间隔下，仍需结合地面观测确定样区内包含的水鸟物种，才能进行准确解译。对于在影像中体型和纹理特征相似的中型水鸟，如绿翅鸭和罗纹鸭，难以区分，只能在分类时归为一类；对于体型较小（体长小于 20 cm）的水鸟，例如很多具有重要保护价值的鸕鹚类水鸟，则难以解译。因此，目前的低成本小型无人机在水鸟监测上应用前景主要体现在，有地面观测数据辅助的前提下对大中型水鸟进行定种和计数工作；对于部分体型、体色等特征均相近的水鸟如绿翅鸭和罗纹鸭、苍鹭和灰鹤（*Grus grus*）以及大白鹭、中白鹭（*Ardea intermedia*）和小白鹭（*Egretta garzetta*）等水鸟难以定种，但能作为地面调查的辅助工具，完成计数工作。

McEvoy 等（2016）使用搭载中画幅相机的六旋翼大型无人机进行调查，分辨率达到 0.55 cm/像素，实现了较好的拍摄效果，但同时也存在成本高、电池续航较短、噪音较大引起水鸟警戒行为加重的问题。李杰等（2019）使用与本研究类似的小型无人机大疆 Mavic2 Pro 对几种特定水鸟进行拍摄，通过将飞行高度降低至 30 m 甚至 15 m，使分辨率最高达到 0.4 m/像素。但在本研究预实验中，上述高度随时可能造成水鸟惊飞，同时由于单张照片的像幅缩小，样区飞行所需航线数量大幅提升，飞行时间和所需电量均大幅增加，无法采集大范围样区数据。

如何兼顾提高分辨率和减少飞行过程中对鸟类的惊扰，是未来无人机水鸟监测需要解决的重要问题。搭载更高传感器分辨率、更长焦距的相机，同时控制无人机的外形和尺寸，降低飞行噪音，提高监测的精度和环境友好度，是未来研究和产品开发的方向。

4.3 本研究存在的不足之处

本研究在航线设定的参数如航高、重叠度上，根据现场情况进行了简单实验并确定大致范围，相关参数仍有待进一步分析和优化。对于无人机对鸟类的惊扰，未对无人机不同飞行

高度、飞行速度、飞行姿态、飞行噪音,以及鸟类集群情况、栖息地位置等因素对鸟类造成的影响进行控制实验,尚待深入研究。另外,本研究仅选择了西洞庭湖地区 6 种常见水鸟进行调查,有必要在未来进一步扩大监测物种种类、样区样本量,并在更多区域开展比较研究。

由于缺乏可适用于水鸟监测影像解译的相关工具,本研究中针对遥感图片的解译以目视解译的方法进行,这种方法在实际应用中存在工作量大、效率低的缺点。开发针对此类遥感图像的机器解译技术,从而进一步降低人力成本,提高识别效率和准确度,实现湿地水鸟的快速监测,是未来需要解决的重要问题。

本研究在湖泊湿地环境中开展,这类环境作为极为重要的鸟类栖息地,有地形平坦、遮蔽物少的特点,适合使用无人机进行大范围调查,但对于山地林区的鸟类,由于遮蔽物多,地形复杂,无人机调查则难以发挥优势。

4.4 研究意义及展望

利用无人机近地面遥感技术开展野生动物调查和监测工作能够解决地面调查耗费人力大、存在危险性、卫星遥感对小型野生动物难以分辨的问题,具有十分重要的意义(刘宁 1998, 罗巍等 2017)。本研究以湖南西洞庭湖自然保护区作为研究地点进行无人机水鸟监测尝试,为湖泊湿地及草地、滩涂等开阔景观保护地的水鸟调查提供了参考。

当前使用无人机进行鸟类调查正在成为野生动物调查领域一个新的热点问题,但目前的相关研究中,调查多以单幅照片形式进行,或虽设计航线进行较大范围的拍摄,却未将图片进行拼接合成,无法在较大区域上进行解译。这类图片合成对陆地野生动物调查来说已不存在技术困难,但在湿地水鸟调查时,由于水面缺少特征点,仍无适用软件能够自动合成解译所需的正射影像,使调查工作面临极大困难。本研究通过 PTGui Pro11.0 软件,在自动生成大部分控制点的基础上对缺少特征的水面手动添加控制点,提供了解决这一问题的有效途径。

鸟类同步调查是国家陆生野生动物资源调查的重要组成部分,调查过程需要确保全国各地同步进行,组织数千人力,调查近千块水鸟主要停歇地点和栖息地情况,向来存在技术难度大、涉及人员多等困难(国家林业局调查规划设计院 2017)。传统调查依靠调查人员使用望远镜,逐一对各观察点的水鸟进行定种、计数等工作。在面对数量极大或经常集群飞行的水鸟,计数只能估算,无法进行准确计数(涂文姬等 2017)。而无人机监测能够解决地面调查时水面上的监测对象相互重叠、信息错位以致调查结果不准确的问题(Anderson et al. 2013)。可以在短时间内大范围、多维度地监测湿地水鸟状态,提取水鸟包括数量、种类、位置、行为等在内的一系列详实信息,解决水鸟监测和水鸟同步调查过程中的主要问题。在拍摄水鸟的同时,也一并获得周边地物的高分辨率可见光影像,可用于栖息地监测,例如滩涂和水位变化的监测。在数据整理的过程中发现,无人机遥感对雁鸭类水鸟的主要食物——水生植物的分布有较好的拍摄效果(图 3)。由于近年来西洞庭湖的沉水植物出现明显衰退现象(郭凯迪等 2020),将无人机用于沉水植物调查,对水鸟的栖息地食物资源监测工作具有重要意义。

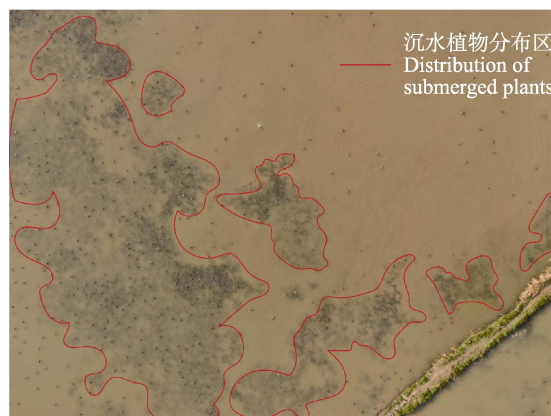


图 3 遥感图像可见沉水植物刺苦草分布

Fig. 3 Remote sensing images showed the distribution of *Vallisneria spirulosa*

此外, 无人机技术在海鸟的调查中同样前景广阔。由于海鸟栖息地多位于人类难以到达的礁石、岛屿, 监测数据的长期匮乏限制了对许多海鸟种群保护状况的评估, 无人机技术的应用能够在很大程度上缓解这一问题。许多科研工作者已经在热带和极地岛屿开始相关尝试 (Hodgson et al. 2016, Oosthuizen et al. 2020)。

总的来看, 无人机在水鸟调查工作中的应用仍有许多问题有待进一步研究和解决。如何在提升地面分辨率的同时最大限度地减轻对水鸟的干扰、如何利用机器学习等技术实现图像机器解译、提升调查的效率与精度, 是两个亟待解决的核心问题。

致谢 感谢北京林业大学生态与自然保护学院丁长青教授、李红丽教授、王玉玉副教授、吕偲博士对本研究的指导, 以及方雨璇、沈心怡、阿依古丽、杨跃金、黄敏、王心蕊、张童等同学对实验过程的协助! 感谢《动物学杂志》编委会和审稿专家们宝贵的指导意见!

参 考 文 献

- Anderson K, Gaston K J. 2013. Lightweight unmanned aerial vehicles will revolutionize spatial ecology. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 11(3): 138–146.
- Bech-Hansen M, Kallehauge R M, Lauritzen J M S, et al. 2020. Evaluation of disturbance effect on geese caused by an approaching unmanned aerial vehicle. *Bird Conservation International*, Cambridge University Press, 30(2): 169–175.
- Chabot D. 2009. Systematic Evaluation of a Stock Unmanned Aerial Vehicle (UAV) System for Small-Scale Wildlife Survey Applications. McGill University, 40–54.
- Díaz-Delgado R, Mañez M, Martínez A, et al. 2017. Using UAVs to map aquatic bird colonies // Díaz-Delgado R, Lucas R, Hurford C. *The Roles of Remote Sensing in Nature Conservation*. 277–291.
- Hodgson J C, Baylis S M, Mott R, et al. 2016. Precision wildlife monitoring using unmanned aerial vehicles. *Scientific Reports*, Nature Publishing Group, 6(1): 22574.
- Iv G, Pearlstone L, Percival H. 2006. An assessment of small unmanned aerial vehicles for wildlife research. *Wildlife Society Bulletin*, 34(3): 750–758.
- Kingsford R T, Curtin A L, Porter J. 1999. Water flows on Cooper Creek in arid Australia determine ‘boom’ and ‘bust’ periods for waterbirds. *Biological Conservation*, 88(2): 231–248.
- McEvoy J F, Hall G P, McDonald P G. 2016. Evaluation of unmanned aerial vehicle shape, flight path and camera type for waterfowl surveys: disturbance effects and species recognition. *PeerJ*, 4: e1831.
- Mulero-Pazmany M, Jenni-Eiermann S, Strebel N, et al. 2017. Unmanned aircraft systems as a new source of disturbance for wildlife: A systematic review. *PLoS One*, 12(6): e0178448.
- Oosthuizen W C, Kruger L, Jouanneau W, et al. 2020. Unmanned aerial vehicle (UAV) survey of the Antarctic shag (*Leucocarbo bransfieldensis*) breeding colony at Harmony Point, Nelson Island, South Shetland Islands. *Polar Biology*, 43(2): 187–191.
- Shafer M W, Vega G, Rothfus K, et al. 2019. UAV wildlife radiotelemetry: System and methods of localization. *Methods in Ecology and Evolution*, 10(10): 1783–1795.
- Wilson A M, Barr J, Zagorski M, et al. 2017. The feasibility of counting songbirds using unmanned aerial vehicles. *The Auk*, 134(2): 350–362.
- 翟昊, 于洪贤, 马国东, 等. 2019. 宁夏鸟类新纪录遗鸥繁殖群及其生境初探. *野生动物学报*, 40(1): 196–199.
- 方小斌, 邹瑀琦, 丁长青. 2017. 鸟类惊飞距离及其影响因素. *动物学杂志*, 52(5): 897–910.
- 郭凯迪, 张晓波, 刘培中, 等. 2020. 西洞庭湖沉水植物分布格局对环境因子及水文情势差异的响应. *湖泊科学*, 32(6): 1736–1748.
- 郭庆华, 刘瑾, 李玉美, 等. 2016. 生物多样性近地面遥感监测: 应用现状与前景展望. *生物多样性*, 24(11): 1249–1266.
- 郭兴健, 邵全琴, 杨帆, 等. 2019. 无人机遥感调查黄河源玛多县岩羊数量及分布. *自然资源学报*, 34(5): 1054–1065.
- 国家测绘局. 2010. 低空数字航空摄影规范. CH-Z 3005-2010. [S/OL]. [2020-11-21]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?dbcode=SCSD&dbname=SCSD&filename=SCSD000006154240&v=Op4xQC%25mmd2BwrX9qv%25mmd2B%25mmd2Fqe4PPCBg%25mmd2B1c6t5wImtWYvz4fKCSjrpCzPrzdLpPiUiEy8hSzVrJc4SoFhDA%3d>.
- 国家林业和草原局. 2019. 国家林业和草原局召开电视电话会议部署加强春季候鸟保护工作. [EB/OL]. (2019-03-14) [2020-08-15].

- <http://www.forestry.gov.cn/main/5904/20200115/105237032972504.html>.
- 国家林业局调查规划设计院. 2017. 全国秋季迁徙水鸟同步调查 // 国家林业局. 中国林业年鉴 2017. 北京: 中国林业出版社, 551.
- 韩峰, 刘昭, 刘伟, 等. 2017. 重叠度对无人机图像拼接效率的影响. 江苏农业科学, 45(12): 182–187.
- 胡健波, 彭士涛, 林宇. 2019. 一种开阔地区大群野生动物无人机调查方法. CN109902596A, 2019-06-18. [P/OL]. [2020-11-21]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?dbcode=SCPD&dbn=SCPD2019&filename=CN109902596A&v=M5AJmqQDBwHZJg%25mmd2B%25mmd2FjaFeIetjzGsNN7Yyln0iVgs1fhg4YuaawdhqSrPy3d6PzhLW>.
- 华南濒危动物研究所, 北京林业大学. 2011. 西洞庭湖自然保护区综合科学考察报告. 湖南.
- 黄娟琴. 2005. 杭州市区湿地资源遥感调查与监测研究. 杭州: 浙江大学硕士学位论文, 41–46.
- 纪伟涛, 曾南京, 易武生, 等. 1999. 鄱阳湖鹤类和大型水禽航空调查报告. 江西林业科技, (6): 23–28.
- 雷倩, 李金亚, 马克明. 2018. 遥感技术在鸟类生态学研究中的应用. 生物多样性, 26(8): 862–877.
- 李杰, 刘强. 2019. 无人机水禽监测模式的设立原则探讨. 热带地理, 39(4): 546–552.
- 刘宁. 1998. 野生动物数量调查方法综述. 云南林业科技, (2): 59–61.
- 罗巍, 邵全琴, 王东亮, 等. 2017. 基于面向对象分类的大型野生食草动物识别方法——以青海三江源地区为例. 野生动物学报, 38(4): 561–564.
- 宋清洁. 2018. 基于无人机的大型食草动物调查研究. 兰州: 兰州大学硕士学位论文, 1–11.
- 涂文姬, 杨启鸿, 刘波, 等. 2017. 滇池越冬水鸟同步调查研究. 林业调查规划, 42(6): 52–57.
- 王方, 郑璇, 马杰, 等. 2019. 无人机技术在中国野生亚洲象调查研究及监测中的应用. 林业建设, (6): 38–44.
- 王俊丽, 任世奇, 张忠华, 等. 2019. 基于文献计量评价的无人机生态遥感监测研究进展. 热带地理, 39(4): 616–624.
- 吴方明, 朱伟伟, 吴炳方, 等. 2019. 三江源大型食草动物数量无人自动监测方法. 兽类学报, 39(4): 450–457.
- 奚水. 2016. 无人机低空拍鸟之类行为应当禁止. 中国摄影报, (3): 1.
- 许志宏. 2017. 基于航拍图像的拼接算法研究及其实现. 北京: 华北电力大学硕士学位论文, 1–5.
- 赵忠琴. 1982. 珍贵水禽的航空调查. 野生动物, (1): 55.
- 赵忠琴, 李金录, 冯科民. 1985. 大型水禽航空调查方法. 野生动物, (4): 25–27.