



武汉大学学报(信息科学版)

Geomatics and Information Science of Wuhan University

ISSN 1671-8860, CN 42-1676/TN

《武汉大学学报(信息科学版)》网络首发论文

题目: 面向对象分类的企鹅种群无人机影像识别方法研究
作者: 彭楚粤, 程晓, 夏林元
DOI: 10.13203/j.whugis20200557
收稿日期: 2020-10-17
网络首发日期: 2021-04-25
引用格式: 彭楚粤, 程晓, 夏林元. 面向对象分类的企鹅种群无人机影像识别方法研究. 武汉大学学报(信息科学版). <https://doi.org/10.13203/j.whugis20200557>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI:10.13203/j.whugis20200557

面向对象分类的企鹅种群无人机影像识别方法研究

彭楚粤¹ 程晓¹ 夏林元²

1 中山大学测绘科学与技术学院, 广东 珠海, 519082

2 中山大学地理科学与规划学院, 广东 广州, 510275

摘要: 企鹅是南极的代表性生物, 监测企鹅的数量及分布对研究南极环境变化有重大意义。以往研究大多基于中高分辨率影像进行企鹅识别, 识别精度难以进一步提高, 且已有的企鹅种群的时间序列分析都是基于间接识别方法, 因此发展基于高分辨率遥感影像的企鹅数量精确识别就显得尤为重要。本研究选取东南极企鹅岛为研究对象, 中国南极科学考察队利用遥感无人机分别于2017年1月、2018年1月和2019年12月对该区域进行航拍观测, 获得了厘米级的高分辨率影像。基于面向对象分类法, 分别提取了三幅影像的企鹅阴影像元, 计算得到企鹅数量, 并标记了企鹅栖息地。总体精度达到91%。实验结果显示了企鹅种群动态变化, 其中企鹅栖息地分布较固定, 但数量出现波动, 三幅影像中分别为1068对、1003对和1081对。

关键词: 企鹅; 无人机; 高分辨率影像; 面向对象; 南极

中图分类号: P237 文献标志码: A

阿德利企鹅的栖息地遍布整个南极大陆海岸线, 是分布最广、数量最多的企鹅, 被认为是南极的象征, 其生存和繁衍状况与南极环境变化密切相关, 充当着“生物指示剂”的作用^[1, 2]。过去30年来, 南极和南大洋的海洋生态系统一直在发生变化^[3, 4], 包括海洋温度的升高、海洋锋的极移以及海冰范围和季节性的区域对比变化^[5-7]。与此同时, 在全球变暖的大背景下, Turner等^[8]通过统计分析南极17个站点的气象数据, 发现阿蒙森海低气压通过改变风的经向分量使得南极半岛显著变暖。以上现象表明南极生态系统可能迎来剧变, 因此监测企鹅(种群数量占南极地区鸟类生物量的90%以上^[9])的种群动态具有重要意义, 有利于及时发现南极重大生态系统环境响应事件, 为制定应对措施提供基础数据和理论依据^[10]。

研究表明, 南极半岛北部岛屿上的阿德利企鹅数量正迅速减少, 而南极半岛南部^[11-13]和罗斯海地区^[14-16]的企鹅数量却在增加。阿德利企鹅种群数量和分布的快速变化特性对监测的准确性和实时性提出了更高的要求。然而, 受限于环境、气候和人力物力及时间成本等, 难以直接对企鹅重复多次普查以监测种群的连续变化。20世纪80年代, 通过建立粪便像元数与阿德利企鹅数量之间的线性关系^[17-19], 陆地卫星第一次被运用于对企鹅种群的遥感监测。此后, 国内外学者基于这一关系使用监督分类和面向对象等方法提取企鹅粪便区进行栖息地迁移分析^[20], 或依据企鹅数量和企鹅粪便区域面积之间的相关关系进行数量分析^[21, 22], 如LaRue等^[17]建立了一个具有泊松误差的广义线性混合模型来预测企鹅数量。多种遥感数据如Landsat、SPOT、QuickBird-2和航拍像片等, 都被用来确定企鹅种群数量及其分布的变化。中分辨率的Landsat-7数据通常被用于绘制阿德利企鹅在大陆尺度上的数量和分布^[23, 24], 高分辨率卫星图像(IKONOS、Quickbird和Worldview等)可以用于单种或多种企鹅类型的遥感监测^[1, 13, 17, 25, 26]。Witharana等^[27]使用了7种常见的融合算法对一系列高分影像的分辨率做了进一步增强, 为提供更多特定类型的南极野生动物调查的标准化产品铺平了道路。

然而, 即使在同一幅图像中也存在不同区域企鹅密度相差较大的问题, 用上述方法间接

收稿日期: 2020-10-17

项目资助: 国家自然科学基金(41925027)。

第一作者: 彭楚粤, 硕士, 主要从事极地遥感方面的研究。pengchy5@mail2.sysu.edu.cn

通讯作者: 程晓, 博士, 教授。chengxiao9@mail.sysu.edu.cn

得到的企鹅分布及数量具有不确定性。随着遥感图像分辨率的不断提高和航拍遥感技术的不断发展,企鹅数量识别技术进入到直接提取企鹅像元的时代。其中无人机遥感以操作简便,图像分辨率高,可到达人类难以涉足的复杂地形区等优点,解决了以往企鹅研究中人工调查难、影像资料分辨率不高等数据获取方面的困难,为准确识别企鹅像元及后续分析提供了重要保证^[28, 29]。在复杂地形区域,利用无人机航拍影像的企鹅数量识别精确度高于地面实测^[30, 31]。Clara等^[32]通过融合无人机系统获取的多光谱和热影像,开发了一种半自动化计数企鹅个体的工作流程,并对比人工解译结果,证明在多数情况下该方法有效,但在种群规模大的情况下可能产生误差。

传统遥感图像信息提取方法包括监督分类和非监督分类,影像的语义信息没有被充分利用,导致了一定程度的错分、漏分现象^[33]。面向对象的分类方法以对象作为基本处理单元,对象既包含了光谱特征和几何特征等信息,也包含了拓扑信息,同时在光谱域和空间域上实现了统一^[34],能够有效减少“椒盐”和“同谱异质”及“同质异谱”现象,适用于中、高分辨率影像,尤其可以很好地提高高分辨率遥感影像的分类性能^[35]。冀明等^[36]基于无人机航拍的高分辨率影像,以南极典型地区为研究对象,采用了面向对象法提取了企鹅数量与分布状况,平均精度达到91%。He等^[37]使用面向对象分类法识别了难言岛企鹅数量,结果表明面向对象法对于彩色影像的识别精度高于黑白影像。

目前,大多数企鹅种群变化监测是基于单次实验结果和历史文献公开数据的结合,如Korcak-Abshire等^[38]用无人机进行了阿德利企鹅和帽带企鹅的种群调查,并对比1966年起的歷史数据探究企鹅种群数量变化。但是直接引用历史数据难以保证研究区域的完全吻合,不同的实验方法也可能带来一定的误差。还有少量的时空变化分析基于Landsat等中高分辨率影像间接确定企鹅种群分布及规模的变化趋势^[20],更侧重于定性分析而难以准确进行定量分析。

本文将面向对象分类法应用在无人机航拍影像中,基于中国南极科学考察队在2017年1月至2019年12月的近三年内获取了三幅厘米级东南极企鹅岛的高分辨率影像,通过直接提取企鹅阴影像元,得到了较高精度的分类结果。对该地区的重复观测数据精确揭示了企鹅种群分布及数量的年际动态变化。

1 研究区域与数据

1.1 研究区域

东南极中山站附近企鹅岛的范围为76°33'50"E~76°34'40"E, 69°20'05"S~69°20'25"S。据MAPPPD网站(<http://www.penguinmap.com/mapppd>)的企鹅种群统计资料显示,该区域仅有阿德利企鹅这一种企鹅类型。除了沿海的小部分地区外,东南极被冰原覆盖,仅有的陆生植物为附着在岩石上的地衣、苔藓和藻类,无脊椎动物的种类也很有限,包括线虫、螨虫和蠓等。沿海地区是海鸟、企鹅和海豹的栖息地,它们在周围的海洋中觅食,其中海鸟和企鹅在海岸上繁殖。企鹅岛位于埃默里冰架的东南方向(图1),埃默里冰架的融化量变化可能造成企鹅岛附近海域淡水通量变化,影响海洋生态环境,进而影响企鹅的捕食和生存。

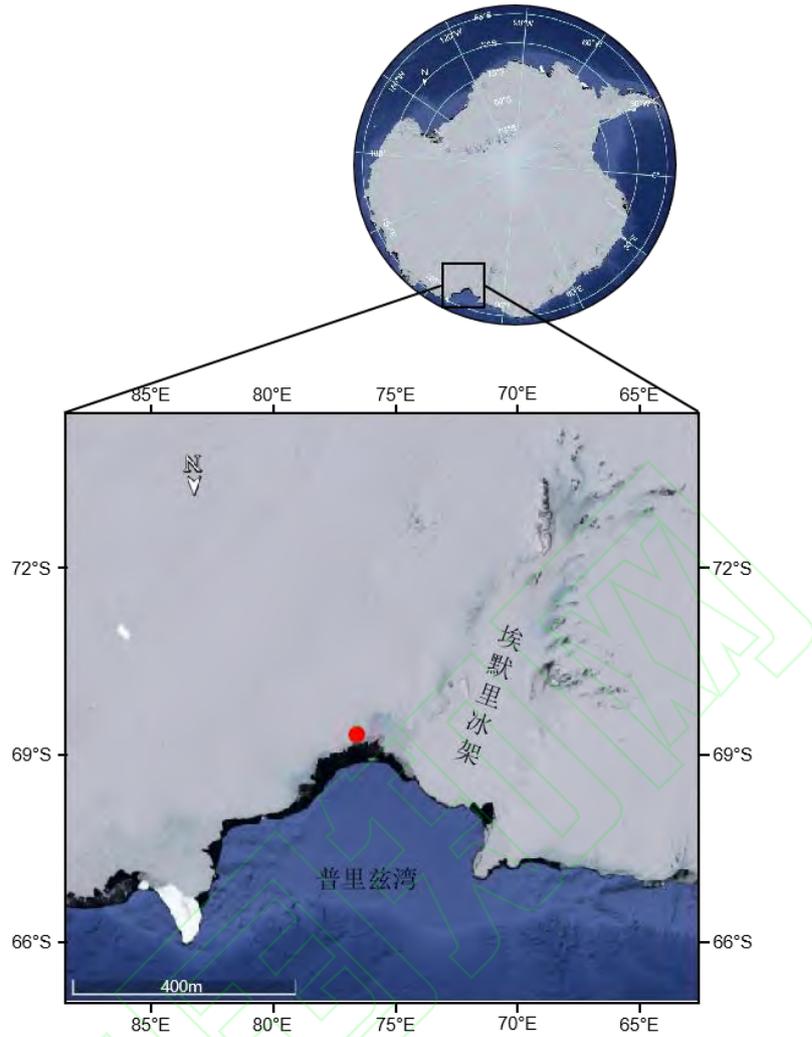


图 1 研究区位置(红色点)图

Fig.1 Locations of the Study Area (RedPoint)

1.2 数据来源

本文所用数据均为北京师范大学极地遥感团队使用固定翼无人机航空在阿德利企鹅繁殖季（当年11月至次年2月，南极夏季）拍摄，并经过镶嵌拼接和正射校正等预处理获得，包括了2017年、2018年和2019年三幅不同时相的高分辨率企鹅岛影像，如图2所示。第一幅影像拍摄于2017年1月19日20:32，图像分辨率为7cm；第二幅影像拍摄于2018年1月24日15:00，图像分辨率为5cm；第三幅影像拍摄于2019年12月15日14:31，图像分辨率为10cm。在影像中可以看到，阿德利企鹅多分布在裸露的岩石上，与周围地物反差明显，易于区分。

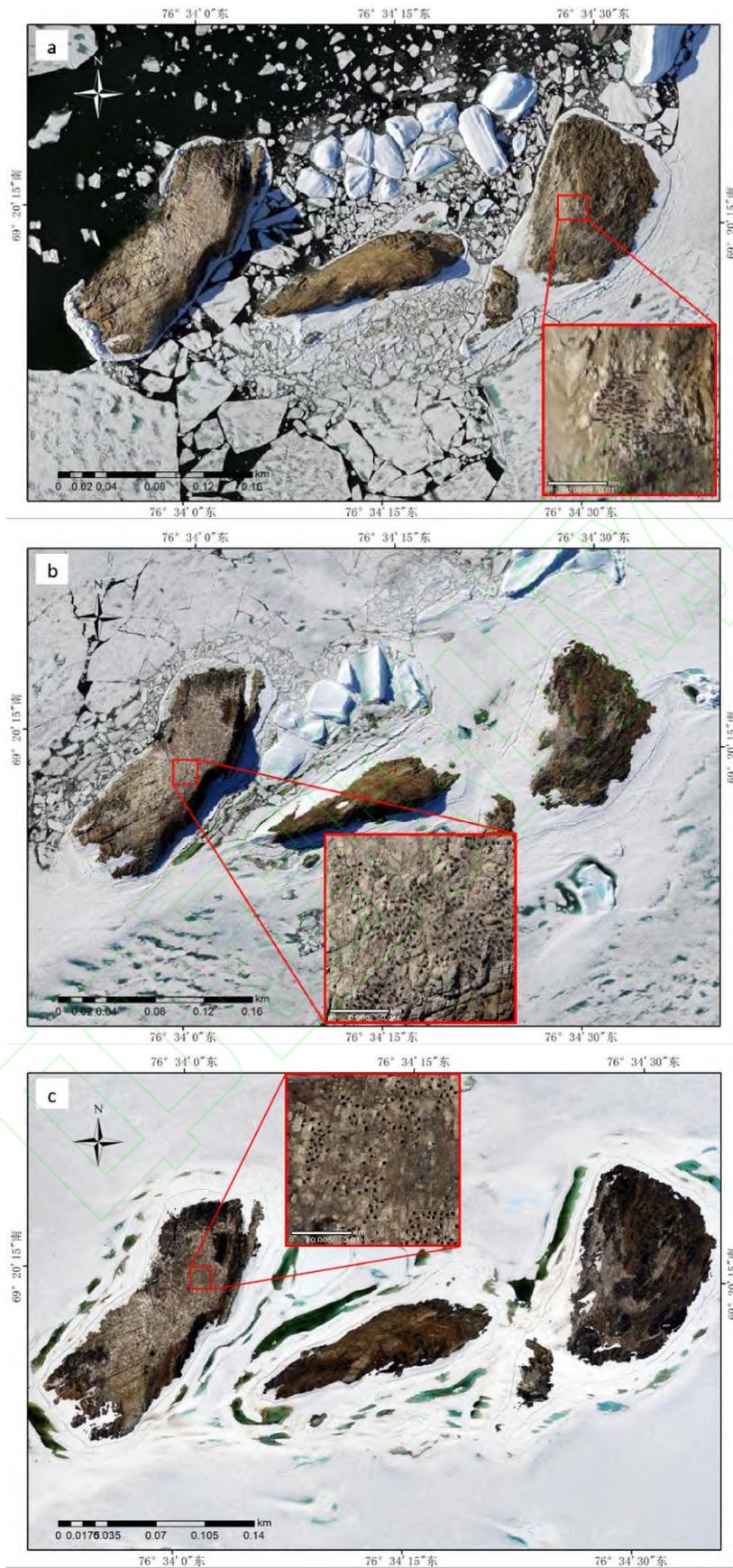


图2 南极企鹅岛无人机航拍影像 (a)2017年1月19日; (b)2018年1月24日; (c)2019年12月15日
 Fig.2 Uav Aerial Image of Penguin Island. (a) January 19th, 2017; (b) January 24th, 2018; (c) December 15th, 2019

2 研究方法

2.1 数据预处理

如图 3 所示, 本文实验流程分为数据预处理、影像分割、企鹅阴影像元提取、精度评定和结果分析五大部分。首先, 用 Arcgis 软件对影像数据做预处理, 通过目视解译的方法将企鹅密集区提取出来。由于企鹅有聚集分布的特性, 且直观上易于将企鹅阴影像元区别于与其他地物类型, 所以预先提取企鹅密集区既可以大幅提高企鹅阴影像元的识别精度。

2.2 企鹅阴影像元识别

2.2.1 融合边缘检测的多尺度分割

在多尺度分割前, 先对三幅影像用 Canny 算法做边缘检测。Canny 算法先用高斯滤波去除高斯噪声, 并根据灰度值变化计算梯度值和梯度方向, 保留梯度变化最大值使边缘的宽度尽可能为一个像素点, 再用双阈值法检测和连接边缘。使用 eCognition 软件实现影像数据的 Canny 边缘检测, 重复实验, 得到最佳的上阈值为 0.3, 下阈值为 0.12, 将 Canny 边缘提取的结果输出为第四图层。

多尺度影像分割以某一像元为起点, 自下而上的在不同尺度条件下采用区域合并的方法对同一幅影像进行分割, 产生不同层次的分割层, 在相邻对象层之间, 较小尺度层对较大尺度层存在继承关系^[39]。区域合并算法最后要达到使分割后影像中所有对象的平均异质性最小的目的, 包括光谱异质性和空间异质性。影像对象的异质性 f 依据光谱信息权重 W_{color} 、形状信息权重 W_{shape} 、光谱异质性值 h_{color} 和形状异质性值 h_{shape} 进行计算:

$$f = W_{color} \cdot h_{color} + W_{shape} \cdot h_{shape} (1)$$

$$h_{color} = \sum_c w_c [n_{Merge} \cdot \sigma_c^{Merge} - (n_{obj1} \cdot \sigma_c^{obj1} + n_{obj2} \cdot \sigma_c^{obj2})] (2)$$

$$h_{shape} = w_{cmpct} \cdot h_{cmpct} + (1 - w_{cmpct}) \cdot h_{smooth} (3)$$

$$h_{smooth} = n_{Merge} \cdot \frac{l_{Merge}}{b_{Merge}} - (n_{obj1} \cdot \frac{l_{obj1}}{b_{obj1}} + n_{obj2} \cdot \frac{l_{obj2}}{b_{obj2}}) (4)$$

$$h_{cmpct} = n_{Merge} \cdot \frac{l_{Merge}}{\sqrt{n_{Merge}}} - (n_{obj1} \cdot \frac{l_{obj1}}{\sqrt{n_{obj1}}} + n_{obj2} \cdot \frac{l_{obj2}}{\sqrt{n_{obj2}}}) (5)$$

其中, w_c 是分割合并波段的权重, n 是对象包含的像元数目, σ_c 是对象内部像元值的标准差; w_{cmpct} 是紧密度权重, h_{cmpct} 和 h_{smooth} 是紧密度因子和光滑度因子; l 是多边形边长, b 是同面积多边形的最小边长。各权重取值范围为 0~1, 且 $W_{color} + W_{shape} = 1$ 。

使用 eCognition 软件将 Canny 边缘检测结果融合到多尺度影像分割中, 边缘波段权重与无人机航拍影像的三个波段权重均设为 1。重复多次实验, 不断调试并优化参数。最终确定 17 年和 18 年的影像数据的尺度参数、形状因子权重和紧致度因子权重分别为 15、0.1、0.5; 19 年的影像数据的尺度参数、形状因子权重和紧致度因子权重分别为 12、0.1、0.7。

2.2.2 面向对象分类

目前面向对象影像分析方法还没有广泛应用在企鹅阴影像元的提取上, 尚未形成一套公认且成熟的特征空间选择。本文在构建最优特征空间时, 基于目标地物的特性, 兼顾光谱特征和几何特征, 主要探究企鹅阴影与岩石阴影的区分方法。经多次重复实验后为本文所用的三幅无人机航拍影像数据选定了以下特征用于构建特征空间: 17 年和 18 年的影像选取了均值(Mean)、亮度(Brightness)、标准差(StdDev)、对于邻域的平均差分(Mean Diff. to Neighbors)和形状指数(Shape Index)作为分类依据; 19 年的影像中, 企鹅阴影更加规则, 故将边界指数(Border Index)加入分类考量。将上述特征应用到各类地物上, 在影像中尽可能均匀的采集训练样本, 创建训练样本集, 完成特征空间的构建。在 eCognition 软件中执行分类, 分类完成

后将结果输出为矢量格式，同时输出类别名称信息作为对象属性，然后在 Arcgis 软件中按属性提取企鹅阴影像元。

2.3 精度评定

以准确率(Precision)、召回率(Recall)和综合评价指数 F_β 作为评价标准，在三幅影像中各随机选取三个企鹅聚集区作为精度评价样区，共计九个样区，如图 5 所示，使其在包含充足企鹅阴影像元提取信息的前提下尽量可能均匀分布在影像中。在本文中，分类结果为面向对象法提取的企鹅阴影像元，参考样本为通过目视解译选中的企鹅阴影像元。TP 表示实际为企鹅阴影像元同时被正确识别的像元；FN 表示实际为企鹅阴影像元但没有被提取的像元；FP 表示实际不是企鹅阴影像元但被错误提取的像元；TN 表示实际不是企鹅阴影像元且没有被提取的像元。综合评价指数 F_β 是召回率和准确率的加权调和平均：

$$F_\beta = \frac{(1+\beta^2) \cdot R_p \cdot R_r}{\beta^2 \cdot R_p + R_r} \quad (6)$$

$$R_p = \frac{N_{TP}}{N_{TP} + N_{FP}} \quad (7)$$

$$R_r = \frac{N_{TP}}{N_{TP} + N_{FN}} \quad (8)$$

式中， R_p 是准确率， R_r 是召回率，N 表示数量； β 为权重因子。本文中准确率和召回率具有同样的重要性，故设 β 值为 1。

2.4 企鹅数量计算

对于得到的企鹅阴影像元提取结果，通过计算每只企鹅平均阴影像元数的方法，根据企鹅阴影像元总数求得企鹅数目：

$$P = \frac{H \cdot W}{D^2 \tan \alpha} \quad (9)$$

式中， H 为阿德利企鹅的平均高度， W 为阿德利企鹅的平均胸围， D 为影像分辨率。历史资料表明，阿德利企鹅的平均高度为 53.5cm，平均胸围为 20cm。 α 为太阳高度角：

$$\alpha = 90 - Z \quad (10)$$

$$\cos Z = \sin \theta \sin \delta + \cos \theta \cos \delta \cos \omega \quad (11)$$

$$\omega = l_d - l \quad (12)$$

式中， Z 为太阳天顶角， θ 为当地纬度； ω 为太阳时角， l_d 为太阳直射点经度， l 为当地经度； δ 为当日太阳赤纬角：

$$\delta = 0.006981 - 0.399912 \cdot \cos b + 0.070257 \cdot \sin b - 0.006758 \cdot \cos(2b) + 0.000907 \cdot \sin(2b) - 0.002697 \cdot \cos(3b) + 0.00148 \cdot \sin(3b) \quad (13)$$

$$b = \frac{2\pi \cdot (N_d - 1)}{365} \quad (14)$$

式中， N_d 为年积日。

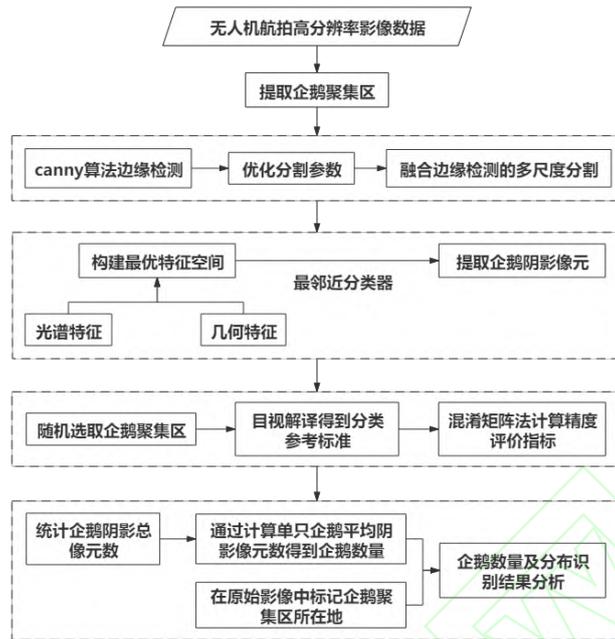


图 3 数据处理流程图

Fig.3 Data Processing Flow Chart

3 结果与分析

3.1 边缘检测对多尺度分割的优化效果

以往的研究中，通常以单纯的多尺度影像分割结果作为后续面向对象分类的依据，然而本文所用的无人机航拍影像数据的分辨率远高于常见的中高分辨率影像数据，其中包含的大量信息使得多尺度影像分割实验出现了过度分割的现象。绝大多数岩石阴影本身具有比企鹅阴影面积更大的特性，但是被分割的过于细碎的岩石阴影对象反而失去了这一几何特征，增加了其区别于企鹅阴影对象的难度。此外，过度分割还导致企鹅阴影对象的像元数少于企鹅阴影像元的真实数目，影响企鹅数量识别精度。因此，本文在影像分割时融合了边缘检测技术，对比融合前后的分割结果，如图4所示。红框①、②表明，加入Canny边缘检测算法后原本被过度分割的同类地物更倾向于被分入同一对象中，使得单个对象内部更加完整平滑，具有更均一的性质；红框③、④表明，原本没有被完整分入企鹅阴影对象的像元也被包含进去了，有效减小了企鹅阴影像元被遗漏的概率；红框⑤表明，融合算法的分割更规则，更贴合同类地物的形状，突出了对象的几何特征。多尺度分割的性能有较大提升。

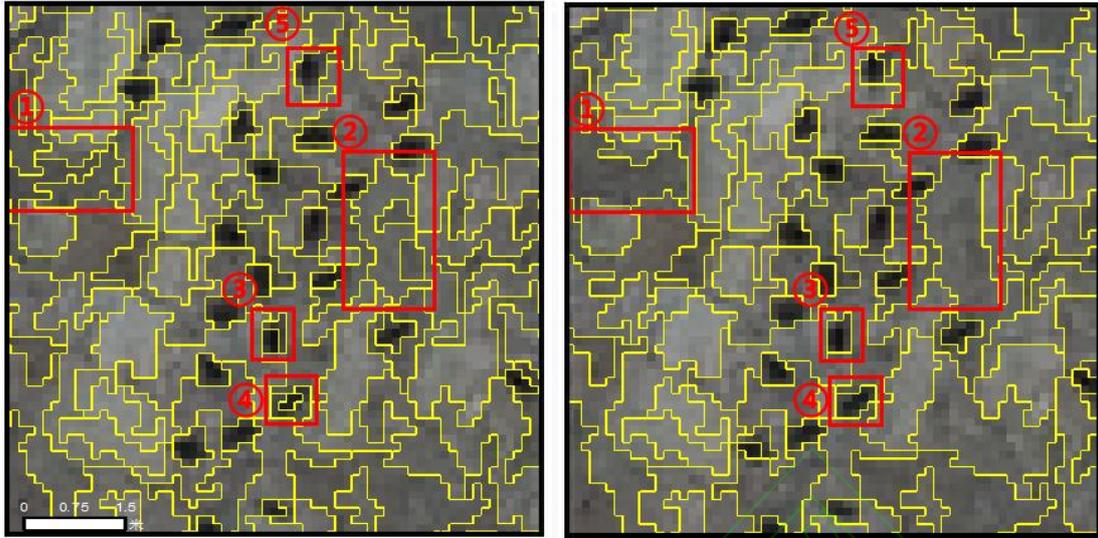


图 4 融合 Canny 检测算法前后的多尺度分割结果对比

Fig.4 Comparison of Multi-scale Segmentation Results Before and After Fusion of Canny Detection Algorithm

3.2 企鹅阴影像元识别结果

经计算得到企鹅数量分别为 1068 对、1003 对和 1081 对，其中 17 年 1 月和 19 年 12 月的企鹅数量相差不大，但 18 年 1 月测得的企鹅数量出现明显下降。MAPPPD 网站基于贝叶斯模型模拟了研究区 1982 年至 2014 年的阿德利企鹅数量趋势曲线（图 5），该模型显示阿德利企鹅数量呈波动上升趋势，与本文实验结果基本吻合。有研究也表明，阿德利企鹅的数量不是稳定不变的，而是波动的，一年时间内出现异常值的情况是常见现象，且异常的增减趋势可能持续多年^[40]。

从企鹅阴影的提取结果（图 6）中可以看到，近三年间企鹅密集区域的分布情况十分相近，只在极小范围内有变动。说明阿德利企鹅在每年的繁殖地选择上有很强的延续性，并且在这一时间段内企鹅岛没有受到如重大自然灾害等的影响，为阿德利企鹅的繁衍提供了较为稳定的环境。可以看到，阿德利企鹅更倾向于聚集在地形较为平坦，靠近冰面的裸露的岩体上，以便于它们的产卵、孵化和附近海域冰面融化后的觅食。其中地势因素更为重要，在地势高低起伏的岩石区难以发现企鹅的踪迹。

影响阿德利企鹅数量的因素有很多，包括气候变化、磷虾数量、浮游生物量、海冰范围和人类活动等。阿德利企鹅种群数量的增长率与冬季海冰峰值呈明显的正相关关系，与夏季海冰峰值呈弱相关^[40]。人类活动的增加带来的一个影响是更频繁大量的捕食鱼类，其中一些鱼类和阿德利企鹅存在竞争关系，这些鱼类数量的减少会让磷虾资源更为丰富，使得阿德利企鹅数量增加。

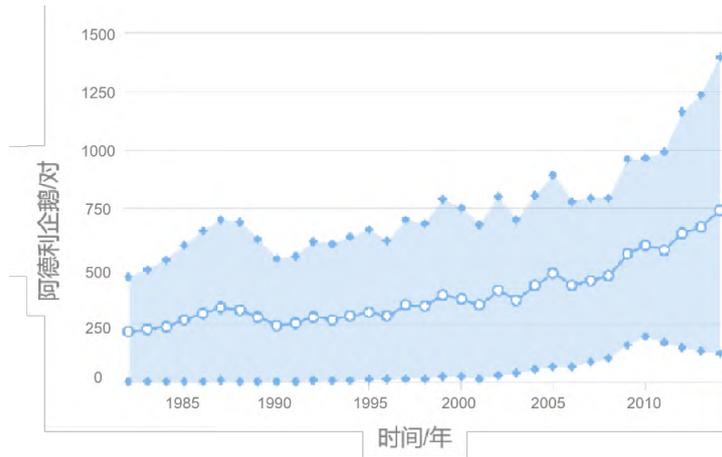
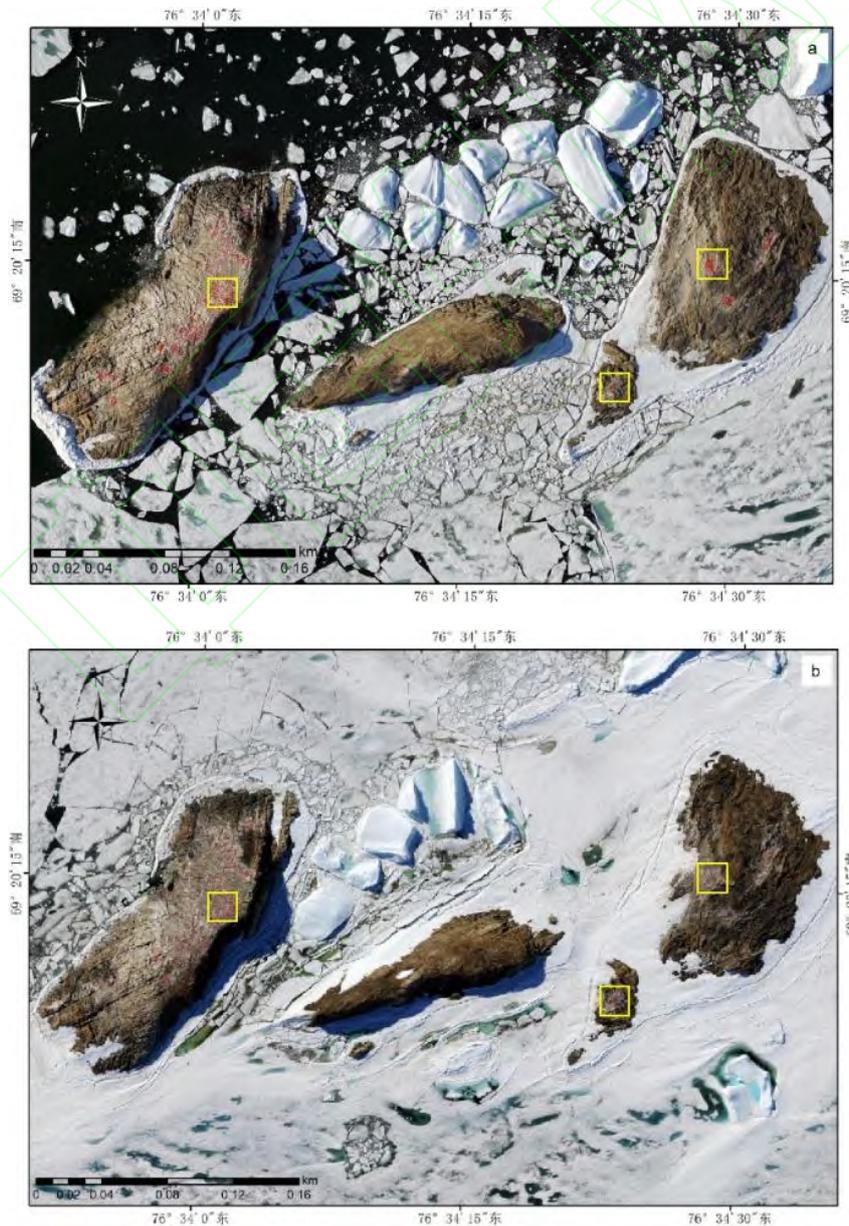


图 5 MAPPPD 网站贝叶斯模型模拟的研究区企鹅种群数量年际变化图.图源自

<http://www.penguinmap.com/mapppd>

Fig.5 MAPPPD's Bayesian Model Simulates a Yearly Variation of Penguin Populations in the Study Area. This

Chart comes from <http://www.penguinmap.com/mapppd>



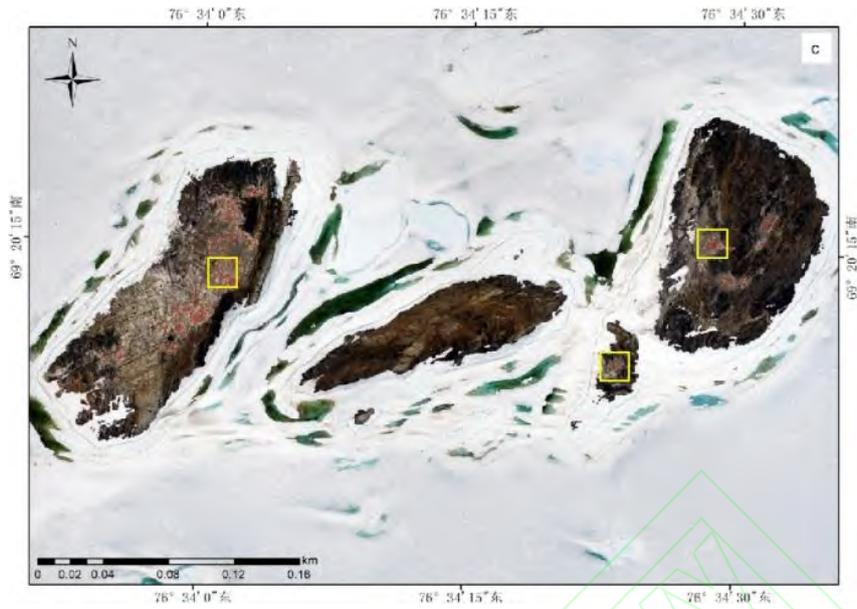
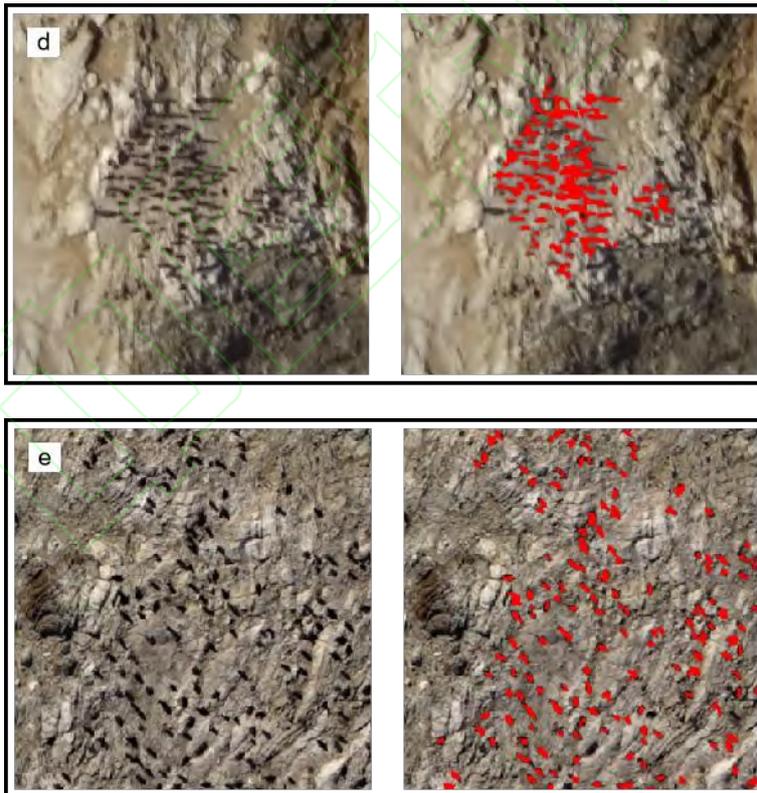


图6 企鹅阴影像元提取结果(红色像元) a)2017年1月19日; b)2018年1月24日; c)2019年12月15日. 黄色方框内为精度评价样区

Fig.6 The Extraction Results of Penguin Shadow Pixels (Red Pixels). a) January 19th, 2017; b) January 24th, 2018; c) December 15th, 2019. The Yellow Box is the Sample Area for Accuracy Evaluation



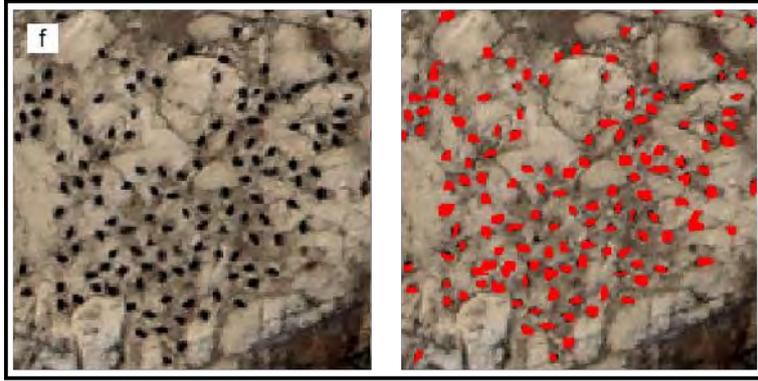


图 7 局部企鹅阴影像元提取结果. d)2017 年 1 月 19 日; e)2018 年 1 月 24 日; f)2019 年 12 月 15 日

Fig.7 Results of Local Penguin Shadow Pixel Extraction. d) January 19th, 2017; e) January 24th, 2018; f) December 15th, 2019

3.3 识别精度评价

精度评定结果表明,面向对象分类法提取的企鹅阴影像元精度可达 91%,其中,19 年的分类精度明显高于 17 年和 18 年,达到 94%,如表 1 所示。造成这一差异的原因分析为 19 年影像数据的拍摄时间更佳,12 月份较 1 月份太阳赤纬角更大,且拍摄时间更接近 12:00,从图 7 中可以直观看到,太阳高度角与企鹅阴影像元的光谱和几何特征密切相关。太阳高度角越大,每对企鹅所占阴影像元面积越小,同时辐射能量也越强,使得阴影像元和其他地物像元对比更强烈,突出所需信息。小太阳高度角下,企鹅阴影拖尾长,一是增加了与常呈现细长条状的岩石阴影混淆的概率,召回率远高于准确率即表明在面向对象分类过程中将岩石阴影像元误分为企鹅阴影像元的现象比漏分企鹅像元的现象更为常见,成为误差主要来源;二是增加了两对企鹅间相互遮挡的概率,在 18 年和 19 年的提取结果中,极少出现企鹅阴影像元重叠的情况,而在 17 年的提取结果中则较为常见,可能导致企鹅数量被低估。

表 1 精度评定结果

Tab. 1 Result of Accuracy Evaluation

样区	分类提取结果	目视解译结果	N_{TP}	N_{FP}	N_{FN}	准确率/%	召回率/%	F_{β} /%	
17	1	21239	19043	1907	336	1165	85	94	89
				8	1				
	2	1453	1302	1257	196	45	86	96	91
	3	3864	3560	3236	528	324	84	91	87
平均						85	94	89	
18	1	15675	14174	1372	195	451	87	97	92
				3	2				
	2	1244	1102	1046	198	56	84	95	89
	3	3552	3384	3078	474	216	86	93	89
平均						86	95	90	
19	1	14309	13207	1298	132	222	91	98	94
				5	4				
	2	1172	1094	1059	113	35	90	97	93
	3	3585	3281	3281	257	0	93	100	96
平均						91	98	94	

4 结 语

本文基于无人机航拍的高分辨率影像,采用面向对象分类方法,分别提取了2017-2019三个时相影像的企鹅阴影像元,识别了企鹅聚集区,并在计算单只企鹅所占阴影像元后,求得了企鹅数量,获得了企鹅种群的动态变化趋势。该方法可以为南极地区生态环境监测提供科学依据。本文主要研究结论如下:

1) 相较于卫星遥感影像,厘米级分辨率的无人机航拍影像,在多尺度分割中容易出现过度分割,造成企鹅对象无法完整包含企鹅阴影像元和其他地物类型被分割地过于细碎的现象。将 Canny 边缘检测算法加入多尺度分割可有效减少过度分割的现象,减少冗余并提升后续的分类速度和分类精度。

2) 分类实验取得了很高的精度,总体精度达 91%,表明无人机航拍技术有利于企鹅阴影像元的准确提取。加上无人机还有机动性强、操作简便的特点,适用于南极地区复杂的气候和地形特征,使用遥感无人机进行企鹅数量和分布的动态监测具有很好的前景。

3) 企鹅聚集地分布较为稳定,且企鹅倾向于选择平坦裸露的岩石进行繁衍。这种繁殖地选择上的延续性有利于长时间的企鹅数量检测,为预处理过程中的目视提取企鹅密集区节省了时间,并且很大程度上保证了结果的准确性。17年1月和19年12月的企鹅数量相当且略有上升,而18年1月的企鹅数量则出现明显下降。

4) 结合提取结果图和精度评定结果发现,由于缺少既定的特征空间构建方法,即使经过多次调试后,仍然有较多岩石阴影像元被误分为企鹅阴影像元。在接下来的研究中,可以继续从光谱、几何、纹理特征中排列组合做分类实验,还可以研究两种地物在不同波段间的特征的变化规律,以构建更加高效准确的特征空间。

参考文献

- [1] Lynch H J, LaRue M A. First Global Census of the Adélie Penguin [J]. *The Auk*, 2014, 131(4): 457-466
- [2] Taylor R, Wilson P. Recent Increase and Southern Expansion of Adélie Penguin Populations in the Ross Sea, Antarctica, Related to Climatic Warming [J]. *New Zealand Journal of Ecology*, 1990, 14:25-29
- [3] Turner J, Barrand N E, Bracegirdle T J, et al. Antarctic Climate Change and the Environment: an Update [J]. *Polar Record*, 2014, 50(3): 237-259
- [4] Turner J, Bindschadler R, Convey P, et al. Antarctic Climate Change and the Environment: A contribution to the International Polar Year 2007-2008 [J]. *Scientific Committee on Antarctic Research Scott Polar Research Institute*, 2009, 83(11): 49-50
- [5] Böning C W, Disper A, Visbeck M, et al. The Response of the Antarctic Circumpolar Current to Recent Climate Change [J]. *Nature Geoscience*, 2008, 1(12): 864-869
- [6] Bracegirdle T J, Connolley W M, Turner J. Antarctic Climate Change over the Twenty First Century [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2008, 113(D3): D03103
- [7] Stammerjohn S, Massom R, Rind D, et al. Regions of Rapid Sea Ice Change: an Inter-hemispheric Seasonal Comparison [J]. *Geophysical Research Letters*, 2012, 39(6): L06501
- [8] Turner J, Marshall G J, Clem K, et al. Antarctic temperature variability and change from station data [J]. *International Journal of Climatology*, 2020, 40(6): 2986-3007.
- [9] Sun Weiping, Cai Minghong, Wang Haiyan, et al. Distribution and Reproductive Behavior of Penguins on

- Ardley Island and Their Environmental Impact Factors [J]. *Chinese Journal of Polar Research*, 2010,22(1): 33-41(孙维萍,蔡明红,王海燕,等.阿德雷岛企鹅种群分布、繁殖行为及其环境影响因子分析 [J].*极地研究*,2010,22(1): 33-41)
- [10] Dias M P, Warwick-evans V, Carneiro A P B, et al. Using habitat models to identify marine important bird and biodiversity areas for Chinstrap Penguins *Pygoscelis antarcticus* in the South Orkney Islands [J]. *Polar Biology*, 2019, 42(1): 17-25.
- [11] Trivelpiece W Z, Hinke J T, Miller A K, et al. Variability in Krill Biomass Links Harvesting and Climate Warming to Penguin Population Changes in Antarctica [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2011, 108(18): 7625-7628
- [12] Sailley S F, Ducklow H W, Moeller H V, et al. Carbon Fluxes and Pelagic Ecosystem Dynamics near two Western Antarctic Peninsula Adélie Penguin Colonies: an Inverse Model Approach [J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2013, 492: 253-272
- [13] Lynch H, Naveen R, Trathan P, et al. Spatially Integrated Assessment Reveals Widespread Changes in Penguin Populations on the Antarctic Peninsula [J]. *Ecology*, 2012, 93: 1367-1377
- [14] Ainley D G, Clarke E D, Arrigo K, et al. Decadal-scale Changes in the Climate and Biota of the Pacific Sector of the Southern Ocean, 1950s to the 1990s [J]. *Antarctic Science*, 2005, 17(2): 171-182
- [15] Ainley D, Russell J, Jenouvrier S, et al. Antarctic Penguin Response to Habitat Change as Earth's Troposphere Reaches 2°C Above Preindustrial Levels [J]. *Ecological Monographs*, 2010, 80(1): 49-66
- [16] Chen X, Cheng X, Zhang B, et al. Lagged response of Adélie penguin (*Pygoscelis adeliae*) abundance to environmental variability in the Ross Sea, Antarctica [J]. *Polar Biology*, 2020, 43(11): 1769-81.
- [17] LaRue M A, Lynch H J, Lyver P O B, et al. A Method for Estimating Colony Sizes of Adélie Penguins Using Remote Sensing Imagery [J]. *Polar Biol*, 2014, 37(4): 507-517
- [18] Schwaller M R, Benninghoff W S, Olson C E. Prospects for Satellite Remote Sensing of Adélie Penguin Rookeries [J]. *Remote Sensing Letters*, 1984, 5(5): 849-853
- [19] Schwaller M R, Olson C E, Ma Z Q, et al. A Remote Sensing Analysis of Adélie Penguin Rookeries [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1989, 28(2): 199-206
- [20] Shen Xiaoyi, Ke Changqing, Zhang Jie. Analysis of Antarctic Emperor Penguins Colonies Changes Based on Remote Sensing [J]. *Journal of Geo-information Science*, 2017, 19(8): 1132-1140(沈校熠, 柯长青, 张杰. 南极帝企鹅种群栖息地动态变化遥感分析 [J]. *地球信息科学学报*,2017, 19(8): 1132-1140)
- [21] Fretwell P T, LaRue M A, Morin P, et al. An Emperor Penguin Population Estimate: The First Global, Synoptic Survey of a Species from Space [J]. *PLOS ONE*, 2012, 7(4): e33751
- [22] Woehler E J, Riddle M J. Spatial Relationships of Adélie Penguin Colonies: Implications for Assessing Population Changes from Remote Imagery [J]. *Antarctic Science*, 1998, 10(04): 449-454
- [23] Heather J, Lynch H, Mathew R, et al. Mapping the Abundance and Distribution of Adélie Penguins Using Landsat-7: First Steps Towards an Integrated Multi-sensor Pipeline for Tracking Populations at the Continental Scale [J]. *PLOS ONE*, 2014, 9(11): e113301
- [24] Schwaller M R, Southwell C J, Emmerson L M. Continental-scale Mapping of Adélie Penguin Colonies from Landsat Imagery [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2013, 139: 353-364
- [25] Mustafa O, Pfeifer C, Peter H U, et al. *Pilot Study on Monitoring Climate-induced Changes in Penguin Colonies in the Antarctic Using Satellite Images* [M]. 2012
- [26] LaRue M A, Ainley D G, Swanson M, et al. Climate Change Winners: Receding Ice Fields Facilitate Colony Expansion and Altered Dynamics in an Adélie Penguin Metapopulation [J]. *PLOS ONE*, 2013, 8(4): e60568
- [27] Witharana C, LaRue M A, Lynch H J, et al. Benchmarking of Data Fusion Algorithms in Support of Earth Observation Based Antarctic Wildlife Monitoring [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*,

- 2016, 113: 124-143
- [28] Korczak-abshire M, Zmarz A, Rodzewicz M, et al. Study of fauna population changes on Penguin Island and Turret Point Oasis (King George Island, Antarctica) using an unmanned aerial vehicle [J]. *Polar Biology*, 2019, 42(1): 217-24.
- [29] Oosthuizen W C, KrügerL, Jouanneau W, et al. Unmanned aerial vehicle (UAV) survey of the Antarctic shag (*Leucocarbobransfieldensis*) breeding colony at Harmony Point, Nelson Island, South Shetland Islands [J]. *Polar Biology*, 2020, 43(2): 187-91.
- [30] Norton-Griffiths M. Reducing counting Bias in Aerial Censuses by Photography* [J]. *African Journal of Ecology*, 2010, 12(3): 245-248
- [31] Lowry M. Counts of California Sea Lion (*Zalophus Californianus*) Pups from Aerial Color Photographs and from the Ground: aComparison of Two Methods [J]. *Marine Mammal Science*, 2010, 15(1): 143-158
- [32] Bird C N, Dawn A H, Dale J, et al. A Semi-Automated Method for Estimating Adélie Penguin Colony Abundance from a Fusion of Multispectral and Thermal Imagery Collected with Unoccupied Aircraft Systems [J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(22): 3692.
- [33] Xiong Dengliang, Chen Fangyi. One Method of Using UAV Image to Generate High Resolution DEM in Mountain Plateau [J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2014(1): 127-128(熊登亮, 陈舫益. 采用无人机影像生成高原山区高精度 DEM 的一种方法 [J].*测绘与空间地理信息*,2014(1): 127-128)
- [34] Chen Yunhao, Feng Tong, Shi Peijun, et al. Classification of Remote Sensing Image Based on Object Oriented and Class Rules [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2006, 31(4): 316-320(陈云浩, 冯通, 史培军, 等. 基于面向对象和规则的遥感影像分类研究 [J].*武汉大学学报(信息科学版)*,2006, 31(4): 316-320)
- [35] Han Shanshan, Li Haitao, Gu Haiyan. The Study on Land Use Change Detection Based on Object-oriented Analysis [J]. *Remote Sensing Information*, 2009(3): 24-30(韩闪闪, 李海涛, 顾海燕. 面向对象的土地利用变化检测方法研究 [J].*遥感信息*,2009(3): 24-30)
- [36] Ji Ming, Zhang Baogang, Zhang Yuanyuan, et al. Sizing and Trend Analysis of Penguin Numbers in Antarctic from High Resolution Photography by Unmanned Aerial Vehicles [J]. *Journal of Beijing Normal University(Natural Science)*, 2019, 55(1): 25-35(冀明, 张宝钢, 张媛媛, 等. 南极企鹅数量识别及变化趋势分析——基于无人机航拍的高分辨率影像 [J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*,2019, 55(1): 25-35)
- [37] He H, Cheng X, Li X, et al. Aerial Photography Based Census of Adélie Penguin and its Application in CH4 and N2O Budget Estimation in Victoria Land, Antarctic [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 12942
- [38] Małgorzata K A, Anna Z, Mirosław R, et al. Study of Fauna Population Changes on Penguin Island and Turret Point Oasis (King George Island, Antarctica) Using an Unmanned Aerial Vehicle [J]. *Polar Biology*, 2019, 42: 217–224
- [39] Wang Qiulai. Study on Object-oriented Remote Sensing Image Classification and its Application- Taking Urban Vegetation Extraction in Futian, Shenzhen City for Example [D]. Nanjing Forestry University, 2018(汪求来. 面向对象遥感影像分类方法及其应用研究——以深圳市福田区去植被提取为例 [D].南京林业大学, 2018)
- [40] Che-Castaldo C, Jenouvrier S, Youngflesh C, et al. Pan-Antarctic Analysis Aggregating Spatial Estimates of AdéliePenguin Abundance Reveals Robust Dynamics Despite Stochastic Noise [J]. *Nature Communication*, 2017, 8(1): 832

Study on Recognizing the Penguin Population in UAV Image Based on Object Otiented Classification

PENG Chuyue¹ CHENG Xiao¹ XIA Linyuan²

1 School of Geospatial Engineering and Science, Sun Yat-Sen University, Zhuhai 519082, China

2 School of Geography and Planning, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, China

Abstract: Penguins are representative organisms in Antarctica. Monitoring the population and distribution of penguins is of great significance to the study of environmental changes in Antarctica. In the past studies, due to the limitation of medium-high resolution images, the accuracy of penguin recognition is difficult to be further improved and the existing time series analysis of penguin distribution and population is based on indirect identification method. The Penguin Island in East Antarctica was selected as the study area where the Chinese Antarctic Scientific Research Team used remote sensing UAV to make aerial observations in January 2017, January 2018 and December 2019, and obtained centimeter-level resolution images. Based on object-oriented classification, the shadow pixels of penguins in 3 images were extracted, the penguin habitats were marked, and the penguin population was calculated. The overall accuracy is 91%. The experimental results showed the dynamic changes of penguin population of which the distribution of penguin habitat was relatively fixed, but the number of penguins fluctuated with 1,068 pairs, 1,003 pairs and 1,081 pairs in 3 images respectively.

Keywords: penguin; unmanned aerial vehicle (UAV); high resolution image; object oriented; Antarctica

First Author: PENG Chuyue, master, specializes in polar remote sensing. E-mail: pengchy5@mail2.sysu.edu.cn

Corresponding Author: CHENG Xiao, PhD, professor. E-mail: chengxiao9@mail.sysu.edu.cn

Foundation Support: The National Natural Science Foundation of China (41925027).