

裸岩对南极帝企鹅栖息地遥感信息提取的影响

张 淼, 陈心桐, 李香兰*

北京师范大学全球变化与地球系统科学研究院, 北京
Email: *xianglanlicn@gmail.com

收稿日期: 2020年8月19日; 录用日期: 2020年8月31日; 发布日期: 2020年9月7日

摘 要

南极企鹅被誉为南极气候变化的“生物指示剂”, 基于遥感手段监测企鹅数量及其栖息地变迁不仅能够反映南极气候变化状况, 而且可以为企鹅保护提供科学依据。受卫星资料分辨率的影响, 企鹅栖息地的遥感识别尚存在较大的不确定性, 特别是裸岩与积雪混合像元因相似的光谱特征可能影响企鹅栖息地提取精度。本文采用2018年Landsat-8影像结合目视解译识别了南极帝企鹅(*Aptenodytes forsteri*)栖息地, 并评估了裸岩与积雪混合像元对环南极帝企鹅栖息地识别精度的影响。结果显示, 裸岩与积雪混合形成的混合像元与帝企鹅粪便谱曲线特征高度相似, 二者在绿色波段有一个波谷、近红外波段存在一个波峰以及在可见光和近红外波段趋势相近。以裸岩分布较为密集的罗斯海区域为统计对象, 裸岩与帝企鹅粪便的光谱相关系数高达0.96, 同时波段差值较小。结合帝企鹅栖息地历史分布资料, 环南极42个帝企鹅栖息地中存在6个受裸岩干扰严重区域。裸岩与冰雪混合像元与企鹅粪便光谱特征的相似性是影响帝企鹅栖息地遥感信息提取精度的重要因素。

关键词

南极, 帝企鹅, Landsat-8, 栖息地, 指数阈值, 裸岩

Influence of Bare Rock on Remote Sensing Information Extraction of Antarctic Emperor Penguin Colony

Miao Zhang, Xintong Chen, Xianglan Li*

College of Global Change and Earth System Science, Beijing Normal University, Beijing
Email: *xianglanlicn@gmail.com

Received: Aug. 19th, 2020; accepted: Aug. 31st, 2020; published: Sep. 7th, 2020

*通讯作者。

文章引用: 张淼, 陈心桐, 李香兰. 裸岩对南极帝企鹅栖息地遥感信息提取的影响[J]. 气候变化研究快报, 2020, 9(5): 434-445. DOI: 10.12677/ccrl.2020.95048

Abstract

Antarctic penguins are known as “biological indicators” for climate change in the Antarctica. Monitoring the dynamics of the population of penguins and their colonies can reflect the climate change of the Antarctica and provide a scientific basis for penguin protection. Due to the influence of the resolution of satellite data, the remote sensing identification of penguin colony is still uncertain. In particular, the spectral characteristics of the mixed pixels of bare rocks and snow may affect the extraction accuracy of penguin colony. Choosing Emperor Penguin (*Aptenodytes forsteri*) as the research object, we used Landsat-8 image in 2018 combined with visual interpretation to analyze the feces area of the Emperor penguin. Results showed that the spectral curve of the mixed pixels of bare rock and snow was similar to that of the Emperor penguin feces. Two curves have a trough in the green band and a peak in the near-infrared band, and the trend is similar in the visible and near-infrared bands. This similarity is an important factor affecting the accuracy of the extraction of the Emperor penguin colony. A statistical analysis of six bare rock samples from the Ross Sea area showed that the spectral correlation coefficient between bare rock and Emperor penguin feces could reach 0.96 and the band difference is small. Combined with known emperor penguin colony, this study identified 42 colonies of Emperor penguin and 6 areas with severe interference from bare rock in the Antarctica. The similarity of spectral features between bare rock mixed with the snow is an important factor affecting the accuracy of remote sensing information extraction of Emperor penguins’ colony, which will provide important reference for improving the accuracy of remote sensing mapping of Antarctic penguins.

Keywords

Antarctica, Emperor Penguin, Landsat-8, Colony, Index Threshold, Bare Rock

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

南极地区因其独特的地理位置，受人类活动的影响较小、生态结构简单，是对全球气候变化极为敏感的区域[1]。海鸟对多种陆地和海洋环境因素响应敏感，是可靠的环境变化指标[2]。企鹅作为南极明星物种，被认为是南极气候变化的“生物指示剂”[3] [4] [5] [6]。帝企鹅(*Aptenodytes forsteri*)呈现环南极分布，研究南极帝企鹅种群数量变化及其栖息地变迁，将为揭示南极生态系统对气候变化的反馈机制提供重要理论参考。

随着遥感技术的发展，利用遥感影像资料识别南极企鹅栖息地及数量成为可能。以往研究大都采用中分辨率卫星数据 Landsat 提取南极不同种群的企鹅栖息地[5] [7] [8] [9]。Fretwell 等[5]利用 Landsat-7 ETM+数据绘制了环南极帝企鹅栖息地分布图，共识别出 38 个帝企鹅栖息地。沈校熠等[9]通过构建指数阈值结合影像分割方法，利用 Landsat-7 ETM+数据实现了环南极帝企鹅栖息地的识别。高分辨率卫星数据在识别企鹅栖息地和企鹅数量提供了重要的保障[10]-[15]。Fretwell 等[10]利用高分影像识别帝企鹅栖息地面积，并与帝企鹅数量建立回归关系，首次实现了遥感数据对环南极帝企鹅数量的估计，约为 23.8 万对帝企鹅。近年来无人机的使用为精确灵活观测南极企鹅提供了更多可能性[16] [17] [18] [19] [20]。

Kooyman 等[21]利用航空数据分析了 2000~2012 年间罗斯海区域帝企鹅栖息地与种群数量变化,发现罗斯海区域帝企鹅数量年际波动较大。南极帝企鹅栖息地遥感识别存在较大的不确定性,分析不同地物干扰对栖息地识别的影响,将有利于提高南极企鹅遥感制图的精确度。

裸岩是南极企鹅栖息地附近的典型地物,是影响企鹅栖息地和数量提取精度的重要影响因素。Fretwell 等[5]在利用 LandsatETM+提取帝企鹅栖息地时指出,与帝企鹅粪便区域一样,裸岩红色波段减去蓝色波段同样大于 0,可能影响企鹅粪便的遥感识别。沈校熠等[9]利用指数阈值法结合影像分割对帝企鹅栖息地进行识别时,考虑了 ASTER 标准光谱库中岩石光谱特征,尚未研究裸岩对帝企鹅粪便区的光谱干扰。南极裸岩范围较大,达到 21,745 km²,目前主要是构建裸岩指数阈值对南极裸岩进行遥感识别[22][23]。南极裸岩与帝企鹅栖息地光谱特征的差异及其对企鹅栖息地遥感识别的影响尚需进一步研究。

本研究采用中分辨率遥感卫星 Landsat-8 数据,分析了裸岩-积雪混合像元与帝企鹅栖息地的光谱特征,结合环南极帝企鹅分布的历史资料评估了受裸岩干扰严重的帝企鹅栖息地,识别出 2018 年环南极帝企鹅栖息地位置信息,为提高南极帝企鹅栖息地遥感制图精度提供理论基础。

2. 数据与方法

2.1. 数据来源

卫星数据采用 Landsat-8 中分辨率数据,下载自美国地质调查局(USGS)官网(<https://earthexplorer.usgs.gov/>),产品级别为一级,重访周期为 16 天,分辨率为 30 m × 30 m,数据时间为 2018 年 9~10 月,属于帝企鹅繁殖期。为分析积雪与裸岩混合像元光谱特征,选择影像名称为 LC08_L1GT_061113_20181014_20181030_01_T2 的 Landsat-8 影像,影像覆盖区域为罗斯海区域。由于缺少南极典型地物的光谱信息,为区分帝企鹅粪便与南极其它地物,选择星载热发射和反射辐射计(ASTER)波谱数据库中积雪,水体和岩石光谱数据作为参考。水体、花岗岩、玄武岩、砂岩波谱范围 0.4~2.5008,有 1141 条数据,而积雪波谱范围为 0.4~2.5,有 402 条数据。

2.2. 分析方法

Landsat-8 一级卫星数据产品,已经进行了几何校正和地形校正,数据因获取时间不同而存在成像时的日地距离、太阳高度角等参数不同而造成差异,将像元亮度值(DN)转换为大气表观反射率(TOA),可以有效消除这些因素在数据分析时所引起的误差,使得各数据之间保持较好的可比性。

南极帝企鹅在 3 月或 4 月返回到栖息地,在 11 月或 12 月繁殖结束后离开栖息地,长达数月的繁殖期在栖息地累积大量的企鹅粪便,依据帝企鹅粪便的位置即可以识别对应的帝企鹅栖息地位置。采用指数阈值法[9]进行帝企鹅栖息地的分析,用式(1)的差值指数(EI)可用于区分帝企鹅粪便和积雪,帝企鹅粪便光谱曲线表明,近红外与蓝色差值较大,调整原红色波段为近红外波段;式(2)的比值指数(NDII)用于区分裸岩和帝企鹅粪便。

$$EI = NIR - B \quad (1)$$

$$NDII = \frac{(NIR - SWIR)}{(NIR + SWIR)} \quad (2)$$

其中, R 为红色波段, B 为蓝色波段(波段 2), NIR 为近红外, SWIR 为中红外(波段 6)。

从环南极范围内选取 8 个典型帝企鹅栖息地作为样本,帝企鹅栖息地粪便样本位于帝企鹅栖息地中间区域,以减少边缘积雪和固定冰的影响,获得纯净的粪便像元,统计帝企鹅粪便光谱曲线特征(图 1 和图 2),包括阿斯特里德海岸(Astrid Coast)、罗杰特角(Cape Roget)、华盛顿角(Cape Washington)、库尔曼岛(Coulman Island)、道森(Dawson)、古尔德湾(Gould Bay)、路特波德海岸(Luitpold Coast)和斯迈利岛

(Smyley Island)分别记为 AC、CR、CW、CI、DL、GB、LC、SI(图 2)。华盛顿角和库尔曼岛两个帝企鹅栖息地受山体阴影影响,选择企鹅粪便样本避开山体阴影。

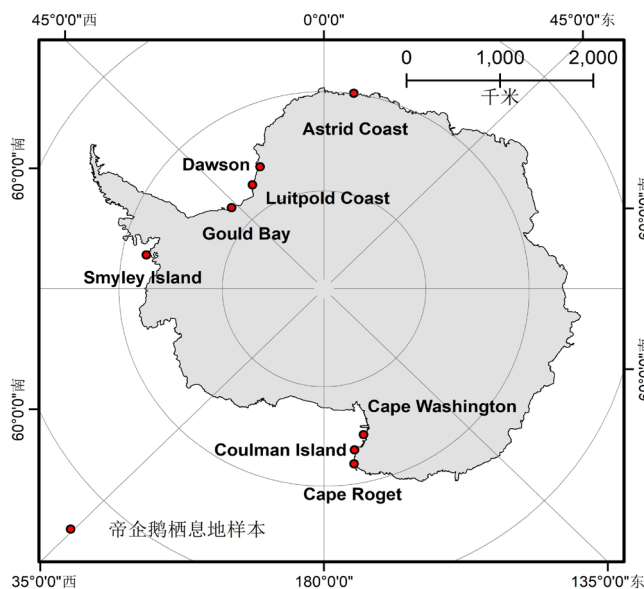


Figure 1. Typical Emperor penguin habitats in Antarctica

图 1. 南极典型帝企鹅栖息地位置

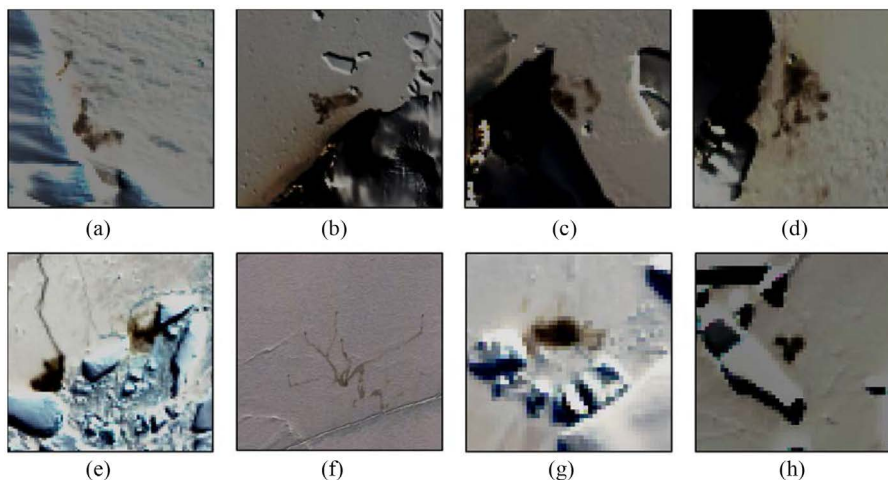


Figure 2. Cropped Landsat-8 image of a typical Antarctic emperor penguin habitat (The image is a true color image, which is synthesized from 2, 3, 4 bands of landsat-8) (a) Astrid Coast, (b) Cape Roget, (c) Cape Washington, (d) Coulman Island, (e) Dawson, (f) Gould Bay, (g) Luitpold Coast and (h) Smyley Island

图 2. 南极典型帝企鹅栖息地的 Landsat-8 影像裁剪图(影像为真彩色影像,由 Landsat-8 的 2, 3, 4 三个波段合成) (a) 阿斯特里德海岸、(b) 罗杰特角、(c) 华盛顿角、(d) 库尔曼岛、(e) 道森、(f) 古尔德湾、(g) 路特波德海岸和(h) 斯迈利岛

为了分析积雪 - 裸岩混合像元对企鹅粪便像元光谱的相似性,从 LC08_L1GT_061113_20181014_20181030_01_T2 影像中选择 6 个不同位置的积雪 - 裸岩样本,样本均位于罗斯海区域,分别记为 R1~R6(图 3)。积雪 - 裸岩样本由积雪与裸岩混合像元构成,混合像元样本光谱特征介于裸岩像元和积雪像元之间(图 4),为进一步说明裸岩和帝企鹅粪便光谱特征的相似性,统计 6

个积雪 - 裸岩样本与企鹅粪便均值对应波段反射率差值, 同时对 6 个积雪 - 裸岩样本和帝企鹅粪便光谱相关性分别进行统计分析。

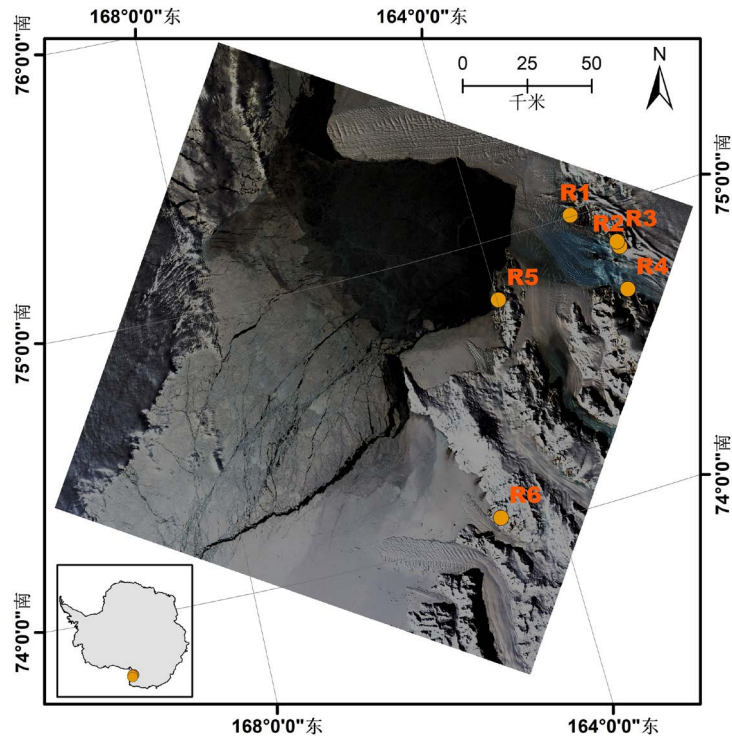


Figure 3. Location of rock samples in Ross sea area in Antarctica such as R1 - R6, the base image is a true color image synthesized from 2, 3, 4 bands of Landsat-8

图 3. 南极罗斯海地区 R1~R6 六个积雪 - 裸岩样本位置, 底图由 Landsat-8 的 2, 3, 4 三个波段合成的真彩色影像

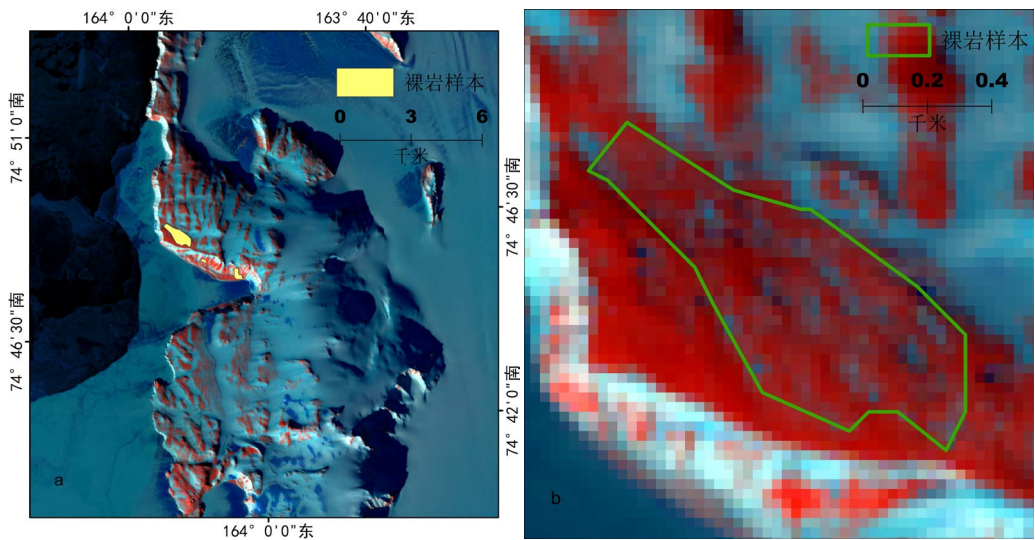


Figure 4. Rock samples covered by snow in the Ross sea region R5 (a) and zoomed-in view of naked rock (b), the images were synthesized from Landsat-8's 2, 5, 6 bands

图 4. 罗斯海区域积雪覆盖的积雪 - 裸岩样本 R5 (a) 和及积雪 - 裸岩样本放大图(b), 影像由 Landsat-8 的 2, 5, 6 三个波段合成

进一步分析环南极范围内，裸岩对帝企鹅栖息地的影响情况，在环南极范围内选择 6 个存在大量裸岩的帝企鹅栖息地，选择的 6 个帝企鹅栖息地分别为克罗泽角(Cape Crozier) (CC) (图 5)、罗杰特角(Cape Roget) (CR)、华盛顿角(Cape Washington) (CW)、库尔曼岛(Coulman Island) (CI)、戴维斯湾(Davis Bay) (DB)、哈斯韦尔岛(Haswell Island) (HI)。选取每个栖息地附近对应裸岩样本记为 A、B、C、D、E、F，这 6 个裸岩区域位于对应帝企鹅栖息地附近。

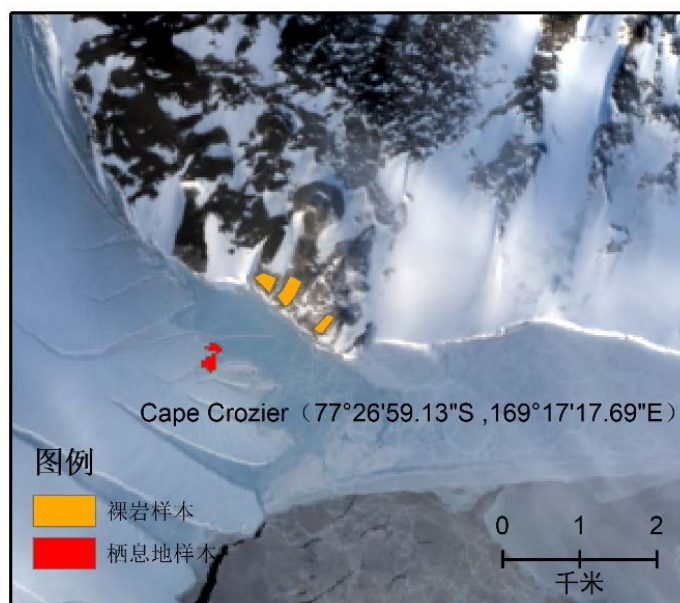


Figure 5. Emperor penguin habitat and nearby rock samples at the Cape Crozier, the base image is a true color image synthesized from 2, 3, 4 bands of Landsat-8

图 5. Cape Crozier 帝企鹅栖息地样本和附近裸岩样本，底图由 Landsat-8 的 2, 3, 4 三个波段合成的真彩色影像

目前最新的环南极帝企鹅栖息地制图结果绘制于 2009 年帝企鹅繁殖期，数据基于高分辨率卫星数据，近年来随着航空数据的使用，一些新的帝企鹅栖息地也陆续被发现，这些帝企鹅栖息地历史点位构成本研究的帝企鹅栖息地参考点位[24]。由于指数阈值难以准确的识别帝企鹅栖息地，本研究基于 Landsat-8 影像，利用真彩色影像上帝企鹅粪便为红褐色，通过目视解译同时结合参考历史点位识别 2018 年帝企鹅栖息地，并绘制 2018 年帝企鹅栖息地分布图。

3. 结果与讨论

3.1. 南极帝企鹅栖息地常见地物光谱曲线特征

南极帝企鹅栖息地常见地物包括花岗岩、砂岩、玄武岩、积雪和水体等(图 6)，粪便光谱曲线来自 Landsat-8 数据波段 1~7，其他地物光谱数据来自 ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection)光谱数据库。水体整体反射率较低，积雪在可见光波段反射率明显高于其他地物，且随波长增加呈整体下降趋势。砂岩反射率波动较大，而花岗岩和玄武岩光谱曲线较为平缓，积雪反射率变化幅度较大。与其他地物相比，帝企鹅粪便具有典型的光谱特征，在绿色波段存在一个明显的波谷，近红外波段存在一个明显的波峰。采用指数阈值法提取帝企鹅栖息地，对原始 Landsat-8 真彩色影像进行目视解译，发现裸岩边缘像元易被误分为帝企鹅栖息地。

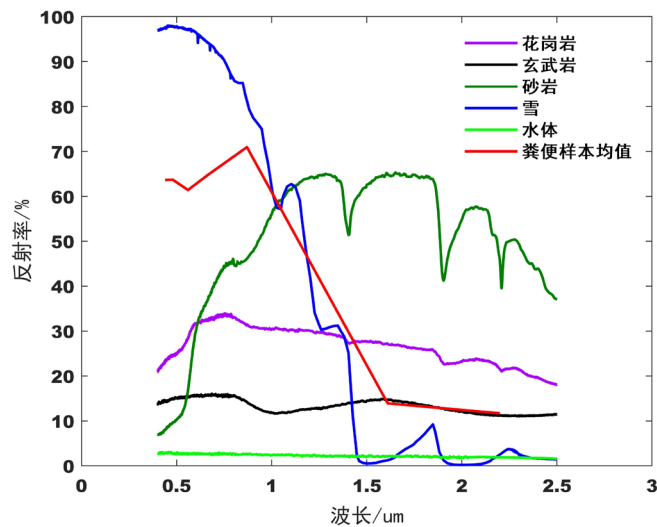


Figure 6. Spectral curves of common features in the habitat of Antarctic Emperor penguins. Among them, the spectral information of Emperor penguin feces comes from Landsat-8 data, and other spectral information comes from ASTER spectral database

图 6. 南极帝企鹅栖息地常见地物光谱曲线。其中，帝企鹅粪便光谱信息来自 Landsat-8 数据，其他光谱信息来自 ASTER 光谱数据库

3.2. 基于 Landsat 提取的裸岩和帝企鹅栖息地光谱特征分析

帝企鹅粪便样本光谱反射率值在各个波段存在较大差异，但总体具有相似的光谱特征(图 7)。绿色波段反射率存在明显的波谷，谷值介于 0.44~0.72，近红外波段反射率存在明显的波峰，峰值介于 0.61~0.77。近红外波段与中红外波段之间反射率差值较大，存在一个陡坡，这是帝企鹅粪便有别于其他地物的典型光谱特征。对每个样本内混合像元反射率求均值最终得到裸岩-积雪混合像元光谱曲线。裸岩样本光谱曲线与帝企鹅粪便光谱曲线存在相似性，在近红外波段存在波峰，绿色波段存在一个波谷，近红外波段和中红外波段之间差值较大。

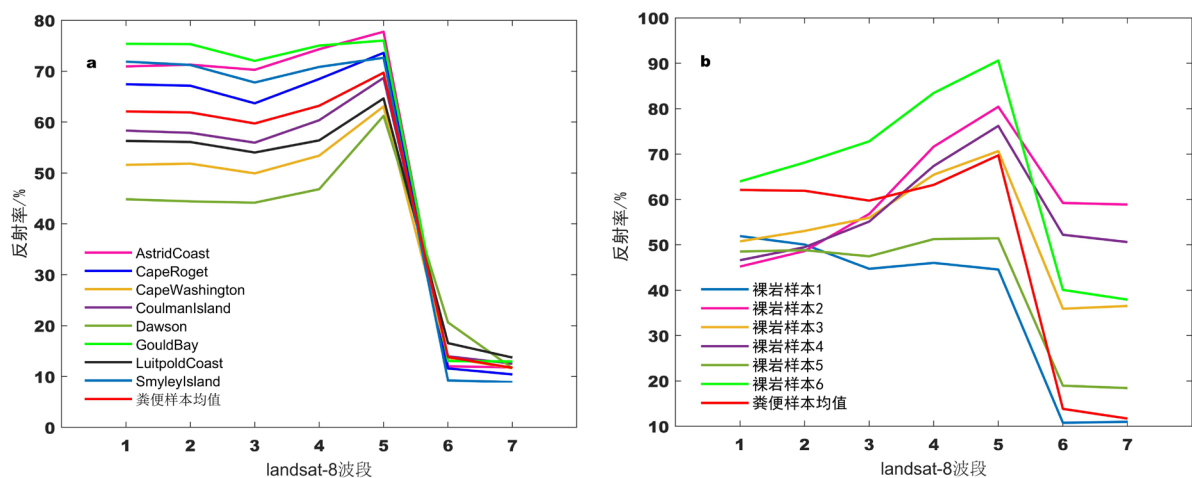


Figure 7. Spectral curves of penguin feces (a) and naked rocks (b) in typical Emperor penguin habitat and naked rocks in the Ross sea area. Among them, the red curve is the mean spectral curve of Emperor penguin feces samples

图 7. 典型帝企鹅栖息地粪便(a)和裸岩(b)光谱曲线图及罗斯海地区裸岩光谱曲线图。其中，红色曲线为帝企鹅粪便样本均值光谱曲线

统计 6 个积雪 - 裸岩样本与企鹅粪便均值对应波段反射率差值, 对于每个裸岩样本, 每个波段至少有一个反射率差值小于 0.1 (表 1)。对 6 个积雪 - 裸岩样本和帝企鹅粪便光谱相关性分别进行统计分析(图 8)。积雪 - 裸岩样本和帝企鹅粪便光谱相关性最高达到 0.96。调整 NDII 值, 当 $EI > 0$ 且 NDII 介于 0.4 和 0.8 之间时, 八个帝企鹅栖息地粪便阈值提取样本占粪便样本数的比例均达到 50%, 六个积雪 - 裸岩样本被误提取为粪便的像元分别占裸岩样本的比例分别为 5%、2%、27%、6%、41%、41% (表 2)。六个积雪 - 裸岩样本均有像元被误提取企鹅粪便, 提取分析帝企鹅栖息地时, 会存在积雪 - 裸岩样本的干扰。

Table 1. The difference between the mean value of penguin feces and six bare rock samples, the table is the value that mean value of penguin feces minus snow and bare rock mixed samples

表 1. 企鹅粪便均值与 6 个积雪 - 裸岩样本对应波段差值, 表中数值为粪便均值减去积雪 - 裸岩样本值

名称	波段 1	波段 2	波段 3	波段 4	波段 5	波段 6	波段 7
R1	0.10	0.12	0.15	0.17	0.25	0.03	0.01
R2	0.17	0.13	0.03	-0.08	-0.11	-0.45	-0.47
R3	0.11	0.09	0.04	-0.02	-0.01	-0.22	-0.25
R4	0.15	0.12	0.05	-0.04	-0.06	-0.38	-0.39
R5	0.14	0.13	0.12	0.12	0.18	-0.05	-0.07
R6	-0.02	-0.06	-0.13	-0.20	-0.21	-0.26	-0.26

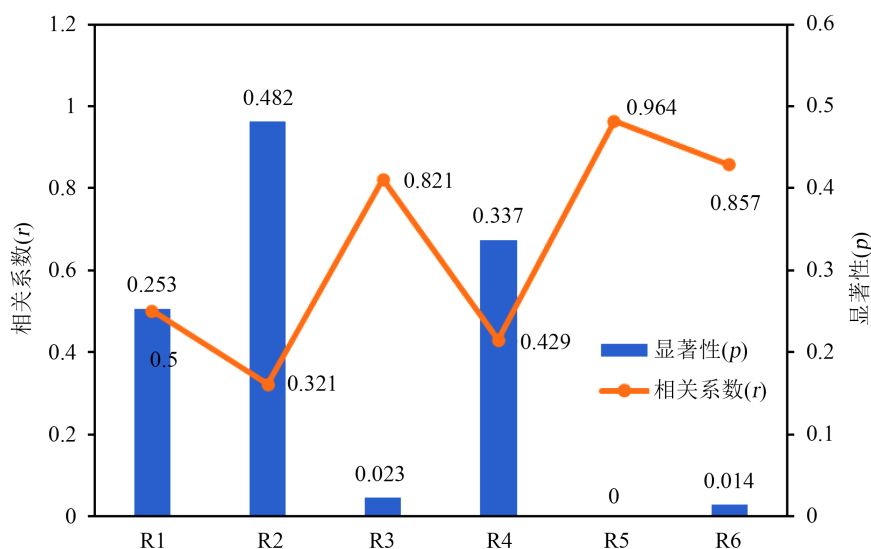


Figure 8. Correlation analysis between naked rock samples and feces spectra of emperor penguins

图 8. 积雪 - 裸岩样本与帝企鹅粪便光谱相关性分析

Table 2. Classification results of habitat samples of emperor penguins and naked rock samples from the Ross sea area

表 2. 罗斯海地区帝企鹅栖息地样本和罗斯海地区裸岩样本分类结果

名称	粪便像元(个)								裸岩像元(个)					
	CI	CW	CR	AC	DL	LC	GB	SI	R1	R2	R3	R4	R5	R6
实际样本数量	58	61	68	41	93	51	39	30	906	606	635	632	707	662
提取样本数量	58	61	64	38	89	50	21	19	49	10	172	38	287	273

裸岩边缘与积雪的混合像元与帝企鹅粪便光谱曲线相似，这些像元容易被误分为帝企鹅粪便像元。为了说明积雪对裸岩光谱的影响，实验调整积雪和裸岩混合比例，拟合混合像元光谱曲线的变化。从 ASTER 光谱库中获取积雪和花岗岩，玄武岩，砂岩的光谱曲线，同时从选取的影像 LC08_L1GT_061113_20181014_20181030_01_T2 中选择相对纯净的积雪像元和裸岩像元样本，绘制裸岩和积雪光谱曲线。假设积雪在混合像元中所占比例以 10%为间隔进行变化。尽管相对纯净的裸岩和积雪光谱曲线与企鹅粪便光谱差异较大，但二者混合后的光谱曲线可能与企鹅粪便的光谱曲线相似(图 9)。同时对标准光谱库中的裸岩和积雪混合光谱曲线，三类岩石和积雪按不同比例混合时光谱曲线存在较大的差异性。以上结果分析表明，当特定裸岩与积雪形成混合像元时，其对于帝企鹅栖息地的精确识别干扰较大，这种干扰存在较大的不确定性。

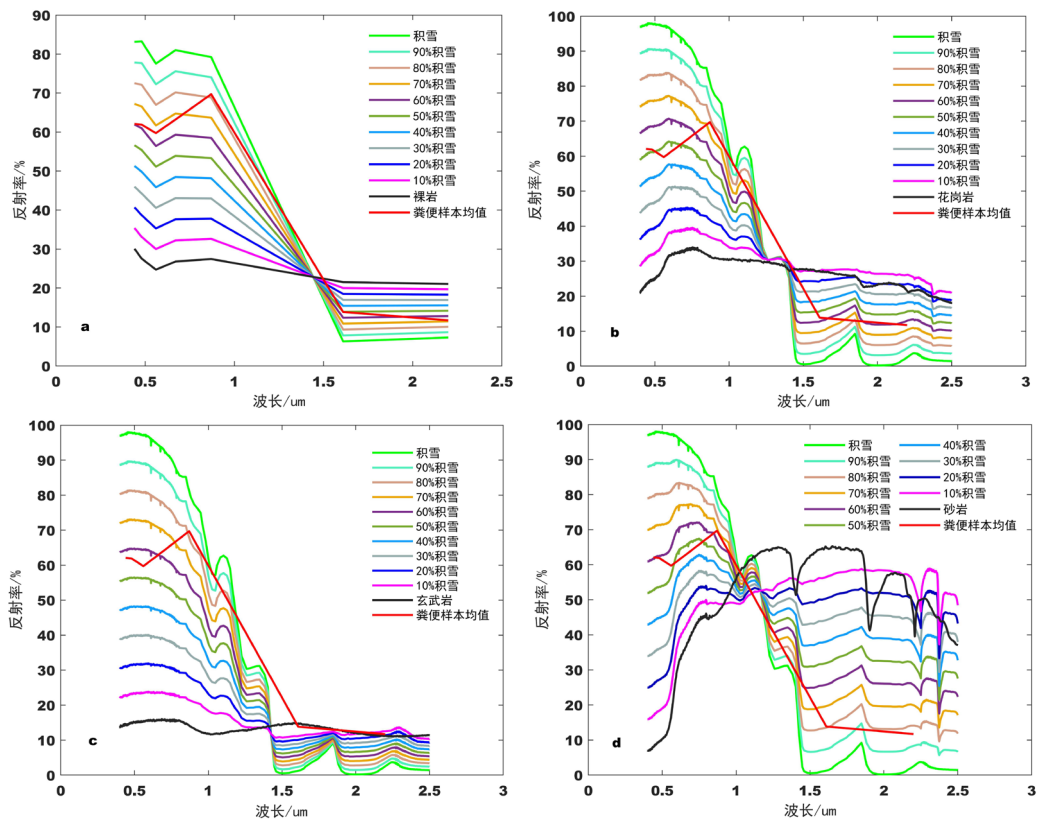


Figure 9. Spectral characteristics analysis of different mixture ratios of snow cover and bare rock based on ASTER database and Landsat-8 image extraction. The red curve is the mean spectral curve of emperor penguin feces samples

图 9. 基于 ASTER 数据库和 Landsat-8 影像提取的不同积雪和裸岩混合比例的光谱特征分析。其中红色曲线为帝企鹅粪便样本均值光谱曲线

3.3. 环南极裸岩对帝企鹅栖息地的影响

利用 $EI > 0$ 和 $0.4 < NDII < 0.8$ 的阈值参数，对环南极六个栖息地粪便和裸岩样本进行分类。Cape Crozier 和 Haswell Island 两个栖息地没有像元被识别为粪便，分析样本发现 EI 值小于 0，粪便像元可能混合有积雪和冰。利用同样的指数阈值对相应的 6 个裸岩样本进行分类，裸岩样本 A、B、C、E、F 均有裸岩样本被提取为粪便，比例分别为 29%，80%，51%，0%，68%，2%，同时注意到裸岩样本 D 被提取为粪便的样本个数为 0 (表 3)。同一指数阈值，不同区域的裸岩样本被提取为粪便的个数存在显著的差异。

Table 3. The classification results of bare rock in 6 randomly selected habitats and adjacent areas**表 3.** 随机选取的 6 个栖息地及邻近区域裸岩分类结果

名称	粪便像元(个)						裸岩像元(个)					
	CC	CR	CW	CI	DB	HI	A	B	C	D	E	F
实际样本数量	33	68	61	58	28	12	163	90	142	82	99	53
提取样本数量	0	64	61	58	10	0	47	72	73	0	67	1

本研究目视解译识别了环南极 42 个帝企鹅栖息地，与历史资料比较有 12 个帝企鹅栖息地未识别，6 个栖息地附近存在大量裸岩(图 10)。利用指数阈值法进行南极帝企鹅栖息地提取存在较大干扰，且考虑到栖息地面积相对较小，自动识别存在较大困难，需结合高分辨遥感数据进一步核实裸岩干扰严重区域的企鹅栖息地分布情况。

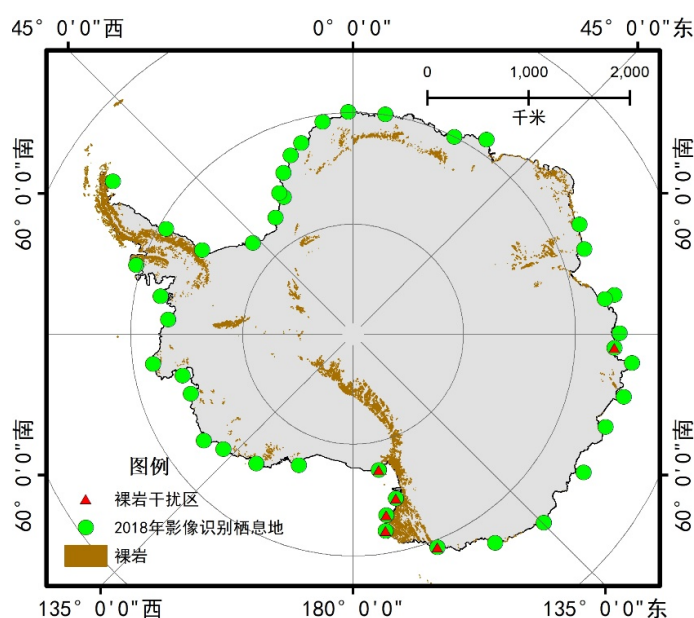


Figure 10. Habitat distribution of Antarctic Emperor penguins. The green dots represent the Emperor penguin habitat, the red triangle represents the region where the selected rock samples are located, and the brown color represents the distribution of the Antarctic rocks

图 10. 环南极帝企鹅栖息地分布图。绿色圆点代表帝企鹅栖息地，红色三角形代表选取的裸岩样本所在区域，棕色代表南极裸岩分布状况

3.4. 裸岩对企鹅栖息地遥感信息提取的不确定性分析

与历史高分数据结果一致，本研究结果也发现部分帝企鹅栖息地位于冰架上，如 Shackleton Ice Shelf [25]，存在一些帝企鹅栖息地由于影像分辨率等问题难以分辨，如 Larsen Ice Shelf。在近期的遥感影像中发现，部分历史资料中提及的帝企鹅栖息地可能消失或无法找到，尽管这些帝企鹅栖息地受裸岩干扰较小，如 Umbeashi Rock。随着全球气候变暖，冰架崩解形成的冰山可能阻碍帝企鹅进海觅食，严重会造成企鹅饿死或迁徙到别处，因而无法从遥感影像上提取这些帝企鹅栖息地。

采用 Landsat-8 数据获取裸岩和帝企鹅粪便样本，积雪的干扰难以避免。帝企鹅粪便的光谱曲线和纯净裸岩的光谱曲线均受积雪影响，存在误差。Cape Crozier 和 Haswell Island 两个栖息地可能由于积雪和

固定冰的影响表现出光谱差异(表 3)。此外与帝企鹅粪便光谱特征相似的裸岩种类存在不确定性。结合罗斯海区域裸岩分类结果[26] [27] [28], 南极裸岩种类多样, 与企鹅粪便的光谱相似性存在差异, 实际裸岩的性质需要进一步分析。下一步工作采用光谱仪实地测量更为精确的帝企鹅粪便光谱曲线[29], 分析基于帝企鹅粪便光谱信息识别帝企鹅栖息地可能存在的问题及需要改进的地方。研究使用数据为 2018 年 9~10 月份, 月份不同, 年份不同, 裸岩的裸露情况不同, 帝企鹅栖息地附近裸岩的干扰情况也会发生改变, 实验选择六个典型的裸岩干扰区域, 实际上存在一些岛屿被积雪覆盖, 特别是一些面积较小的裸岩区域, 当积雪融化时, 岛屿上裸岩对栖息地的影响有待进一步分析。

高分辨率卫星数据、航空数据、无人机数据等均被应用到南极企鹅栖息地面积识别及企鹅数量监测[13] [14] [16] [21]。南极夏季冰雪融化导致裸岩区域扩大, 其对于高分辨率数据识别企鹅栖息地及企鹅数量的影响需要进一步研究。目前国内对南极企鹅开展的相关研究依然较少, 国外已经完成了环南极帝企鹅和阿德利企鹅栖息地制图, 并根据面积回归估算了环南极帝企鹅和阿德利企鹅数量[5] [8] [10] [13]。帝企鹅栖息地识别研究目前集中在已有栖息地位置的更新和新栖息地的识别, 已有栖息地位置的更新依据已经发现的历史栖息地点位信息, 新栖息地的识别主要在南极沿岸固定冰边缘区域进行目视解译, 新发现栖息地可以依据高分辨率数据进行确认。随着我国极地专题卫星的发射, 本研究识别出的 2018 年环南极帝企鹅栖息地位置分布, 将为我国开展南极企鹅相关研究提供参考数据。

4. 结论

本研究基于光谱普数据分析, 发现帝企鹅粪便与裸岩 - 积雪混合像元光谱曲线的相似性。Landsat-8 数据分析结果表明, 八个帝企鹅粪便样本的光谱曲线在绿色波段存在一个波谷, 谷值介于 0.44~0.72, 近红外波段存在一个明显的波峰, 峰值介于 0.61~0.77。裸岩 - 积雪混合像元与帝企鹅粪便光谱特征高度相似, 波段差值较小, 相关系数高达 0.96。利用指数阈值对栖息地样本和裸岩样本进行分类, 结果表明, 裸岩样本会被划分到企鹅粪便, 且不同种类的裸岩与企鹅粪便的光谱特征也存在较大差异。结合 2018 年 Landsat-8 数据和历史资料, 目视解译出 42 个环南极帝企鹅栖息地位置, 确定了环南极范围内 6 个裸岩干扰严重区域。本文着重指出在南极特定条件下, 裸岩 - 积雪混合像元对帝企鹅栖息地识别造成的干扰, 在进行帝企鹅栖息地识别时, 需要特别注意裸岩的可能影响, 研究结果为帝企鹅栖息地精确识别提供理论参考。

参考文献

- [1] 贺红, 李香兰, 程晓, 等. 基于航拍数据的南极维多利亚地企鹅源温室气体排放量估算[J]. 科学通报, 2016, 61(30): 3268-3277.
- [2] Che-Castaldo, C., Jenouvrier, S., Youngflesh, C., *et al.* (2017) Pan-Antarctic Analysis Aggregating Spatial Estimates of Adélie Penguin Abundance Reveals Robust Dynamics Despite Stochastic Noise. *Nature Communication*, **8**, 832. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-00890-0>
- [3] 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.
- [4] Lynch, H.J., Naveen, R., Trathan, P.N., *et al.* (2012) Spatially Integrated Assessment Reveals Widespread Changes in Penguin Populations on the Antarctic Peninsula. *Ecology*, **93**, 1367-1377. <https://doi.org/10.1890/11-1588.1>
- [5] Fretwell, P.T. and Trathan, P.N. (2009) Penguins from Space: Faecal Stains Reveal the Location of Emperor Penguin Colonies. *Biogeography*, **18**, 543-552. <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2009.00467.x>
- [6] 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.
- [7] Fretwell, P., Phillips, R., Brooke, M.D.L., *et al.* (2015) Using the Unique Spectral Signature of Guano to Identify Unknown Seabird Colonies. *Remote Sensing of Environment*, **156**, 448-456. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.10.011>
- [8] Schwaller, M.R., Southwell, C.J. and Emmerson, L.M. (2013) Continental-Scale Mapping of Adélie Penguin Colonies

- from Landsat Imagery. *Remote Sensing of Environment*, **139**, 353-364. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.08.009>
- [9] 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.
- [10] Fretwell, P.T., Larue, M.A., Morin, P., *et al.* (2012) An Emperor Penguin Population Estimate: The First Global, Synoptic Survey of a Species from Space. *PLoS ONE*, **7**, e33751. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0033751>
- [11] Fretwell, P.T. and Trathan, P.N. (2019) Emperors on Thin Ice: Three Years of Breeding Failure at Halley Bay. *Antarctic Science*, **31**, 133-138. <https://doi.org/10.1017/S0954102019000099>
- [12] Larue, M.A., Lynch, H., Lyver, P., *et al.* (2014) A Method for Estimating Colony Sizes of Adélie Penguins Using Remote Sensing Imagery. *Polar Biology*, **37**, 507-517. <https://doi.org/10.1007/s00300-014-1451-8>
- [13] Lynch, H. and Larue, M.A. (2014) First Global Census of the Adélie Penguin. *Auk*, **131**, 457-466. <https://doi.org/10.1642/AUK-14-31.1>
- [14] Lynch, H.J., White, R., Black, A.D., *et al.* (2012) Detection, Differentiation, and Abundance Estimation of Penguin Species by High-Resolution Satellite Imagery. *Polar Biology*, **35**, 963-968. <https://doi.org/10.1007/s00300-011-1138-3>
- [15] Witharana, C. and Lynch, H.J. (2016) An Object-Based Image Analysis Approach for Detecting Penguin Guano in Very High Spatial Resolution Satellite Images. *Remote Sensing*, **8**, 375. <https://doi.org/10.3390/rs8050375>
- [16] Borowicz, A., Mcdowall, P., Youngflesh, C., *et al.* (2018) Multi-Modal Survey of Adélie Penguin Mega-Colonies Reveals the Danger Islands as a Seabird Hotspot. *Scientific Reports*, **8**, Article No. 3926. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-22313-w>
- [17] Goebel, M.E., Perryman, W.L., Hinke, J.T., *et al.* (2015) A Small Unmanned Aerial System for Estimating Abundance and Size of Antarctic Predators. *Polar Biology*, **38**, 619-630. <https://doi.org/10.1007/s00300-014-1625-4>
- [18] Korczak-Abshire, M., Zmarz, A., Rodzewicz, M., *et al.* (2018) Study of Fauna Population Changes on Penguin Island and Turret Point Oasis (King George Island, Antarctica) Using an Unmanned Aerial Vehicle. *Polar Biology*, **42**, 217-224. <https://doi.org/10.1007/s00300-018-2379-1>
- [19] Pfeifer, C., Barbosa, A., Mustafa, O., *et al.* (2019) Using Fixed-Wing UAV for Detecting and Mapping the Distribution and Abundance of Penguins on the South Shetlands Islands, Antarctica. *Drones*, **3**, 39. <https://doi.org/10.3390/drones3020039>
- [20] Zmarz, A., Rodzewicz, M., Dąbski, M., *et al.* (2018) Application of UAV BVLOS Remote Sensing Data for Multi-Faceted Analysis of Antarctic Ecosystem. *Remote Sensing of Environment*, **217**, 375-388. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.08.031>
- [21] Kooyman, G. and Ponganis, P.J. (2017) Rise and Fall of Ross Sea Emperor Penguin Colony Populations: 2000 to 2012. *Antarctic Science*, **29**, 201-208. <https://doi.org/10.1017/S0954102016000559>
- [22] Burton-Johnson, A., Black, M., Fretwell, P., *et al.* (2016) An Automated Methodology for Differentiating Rock from Snow, Clouds and Sea in Antarctica from Landsat 8 Imagery: A New Rock Outcrop Map and Area Estimation for the Entire Antarctic Continent. *The Cryosphere*, **10**, 1665-1677. <https://doi.org/10.5194/tc-10-1665-2016>
- [23] Kang, J., Cheng, X., Hui, F., *et al.* (2017) An Accurate and Automated Method for Identifying and Mapping Exposed Rock Outcrop in Antarctica Using Landsat 8 Images. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, **11**, 57-67. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2017.2755502>
- [24] Ancel, A., Cristofari, R., Trathan, P.N., *et al.* (2017) Looking for New Emperor Penguin Colonies? Filling the Gaps. *Global Ecology and Conservation*, **9**, 171-179. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2017.01.003>
- [25] Fretwell, P.T., Trathan, P.N., Wienecke, *et al.* (2014) Emperor Penguins Breeding on Iceshelves. *PLoS ONE*, **9**, e85285. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0085285>
- [26] Estrada, S., Läufer, A., Eckelmann, K., *et al.* (2016) Continuous Neoproterozoic to Ordovician Sedimentation at the East Gondwana Margin—Implications from Detrital Zircons of the Ross Orogen in Northern Victoria Land, Antarctica. *Gondwana Research*, **37**, 426-448. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2015.10.006>
- [27] Läufer, A., Lisker, F. and Phillips, G.J. (2011) Late Ross-Orogenic Deformation of Basement Rocks in the Northern Deep Freeze Range, Victoria Land, Antarctica: The Lichen Hills Shear Zone. *Polarforschung*, **80**, 60-70.
- [28] Pour, A.B., Park, Y., Park, T.-Y.S., *et al.* (2018) Regional Geology Mapping Using Satellite-Based Remote Sensing Approach in Northern Victoria Land, Antarctica. *Polar Science*, **16**, 23-46. <https://doi.org/10.1016/j.polar.2018.02.004>
- [29] Rees, W., Brown, J., Fretwell, P., *et al.* (2017) What Colour Is Penguin Guano? *Antarctic Science*, **29**, 417-425. <https://doi.org/10.1017/S0954102017000190>