

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

贺红^①, 李香兰^{①*}, 程晓^{①*}, 朱仁斌^②, 唐剑武^③, 惠凤鸣^①, 吴文会^④, 赵天成^①, 刘岩^①, 康婧^①

① 北京师范大学全球变化与地球系统科学研究院, 北京 100875;

② 中国科学技术大学地球和空间科学学院极地环境研究室, 合肥 230026;

③ The Ecosystems Center, Marine Biological Laboratory, Woods Hole, MA 02543, USA;

④ 黑龙江测绘地理信息局极地测绘工程中心, 哈尔滨 150081

* 联系人, E-mail: xianglan_li@163.com; polecx@163.com

2016-06-08 收稿, 2016-08-04 修回, 2016-08-07 接受, 2016-09-28 网络版发表

国家海洋局南北极环境综合考察与评估专项(CHINARE2014-02-04)、国家自然科学基金(41106157, 41176163, 41406211)和国家海洋局海洋公益性行业科研专项(201205007-03)资助

摘要 海洋动物是南极气候变化的“生物指示剂”, 其排泄物中丰富的碳(C)和氮(N)等营养物质为土壤中温室气体的产生与排放提供了有利条件, 企鹅作为一种重要的海洋动物, 因此其聚居区成为甲烷(CH_4)和氧化亚氮(N_2O)等温室气体排放的潜在“热点”区域. 然而, 受企鹅数量遥感资料的限制, 区域尺度上企鹅源温室气体排放总量尚缺乏精确估算. 以南极维多利亚地难言岛企鹅聚集区为研究对象, 基于0.1 m分辨率航拍照片发展了面向像元的RGB颜色模型法(pixel-oriented RGB color model)识别企鹅数量, 通过企鹅粪便 CH_4 和 N_2O 排放通量、企鹅排便量等数据建立了企鹅源温室气体估算模型. 结果显示, 航拍照片中企鹅像元在RGB彩色空间模型中的R值(17~104)与其他背景像元(>110)存在显著差异, 该差异可以作为将企鹅与背景像元有效分离的理论依据; 南极维多利亚地难言岛企鹅总数为19150只, 企鹅源 CH_4 和 N_2O 排放总量分别约为275和2.99 kg.

关键词 南极, 企鹅, 温室气体估算, 面向像元法, RGB 颜色模型法, 航拍照片

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. 南极海洋动物是全球气候变化影响南大洋环境变化的“生物指示剂”, 其粪便排泄物对南极陆地生态系统乃至全球物质循环与气候变化都发挥着重要意义. 南极和亚南极海鸟数量约690亿对, 以企鹅和贼鸥数量居多, 主要分布在南极半岛、维多利亚地、西福尔丘陵和阿曼达湾等海岸带和苔原区^[1,2]. 每年夏季大量企鹅排泄物为聚居地土壤提供了丰富的碳(C)、氮(N)养分, 从而为土壤中甲烷(CH_4)和氧化亚氮(N_2O)等温室气体的产生与排放创造了有利条

件^[3~5]. 因此, 研究南极企鹅源 CH_4 和 N_2O 等温室气体的排放量将为南极气候变化研究提供确凿有效的证据.

全球变暖导致南极冰川融化退缩, 南极沿海无冰区面积日益扩大, 同时南极海岸带作为重要的企鹅聚居地, 其温室气体排放潜势更加值得关注. 中国第15次南极科学考察期间, Sun等人^[3,6]首次开拓了静态箱法观测西南极法尔兹半岛夏季 CH_4 和 N_2O 的排放通量, 发现法尔兹半岛企鹅聚集区是温室气体的“源”, 而普通植被土壤主要是大气甲烷的“汇”和氧化亚氮的“弱源”. 企鹅聚集区是大气 CH_4 和 N_2O 排放的

引用格式: 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. 科学通报, 2016, 61: 3268–3277

He H, Li X L, Cheng X, et al. Aerial photography based estimation of greenhouse gas emissions from penguins in Victoria Land, Antarctica (in Chinese). Chin Sci Bull, 2016, 61: 3268–3277, doi: 10.1360/N972016-00546

“hotspots”, 企鹅活动显著提高南极苔原 CH_4 和 N_2O 排放量^[7,8]。野外站点观测数据显示, 受海洋动物聚集区土壤养分含量影响, 西南极法尔兹半岛企鹅、贼鸥和海豹聚集区 CH_4 平均排放通量分别为231, 143和94 $\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$, N_2O 平均排放通量为856, 132和189 $\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$, 全氮(TN)和有机碳(TOC)是影响 CH_4 和 N_2O 空间格局的重要因子^[7~9]。随后, 对西南极法尔兹半岛不同生态区(普通苔原、企鹅聚居地、海豹聚居地和贼鸥聚居地等)和东南极米洛半岛不同生态区(卧龙湿地和团结湿地, 富藻湖泊莫愁湖、团结湖和大明湖)温室气体的排放通量进行了大量点位观测, 并针对这些点位的观测数据研究了南极不同生态区温室气体排放通量的时空变化特征及其影响因素^[3,4,7,8,10~12]。基于点位观测的温室气体排放通量以及苔原面积, 采用面积扩展的方法估算了南极法尔兹半岛和阿德雷岛 CH_4 和 N_2O 排放总量^[9,12], 同时根据采集的包含企鹅粪土的苔原土壤粗略估算了企鹅粪便的温室气体排放潜力^[12]。目前, 关于南极地区温室气体排放的研究主要集中于典型区域的点位观测, 受企鹅数量与分布资料的限制, 区域尺度上企鹅源温室气体排放总量尚缺乏精确估算。

卫星遥感资料为监测南极企鹅数量与分布提供了重要手段^[13~16], 以往研究对南极局部地区阿德利企鹅(*Pygoscelis adeliae*)^[17,18]、帝企鹅(*Aptenodytes forsteri*)^[19~21]、帽带企鹅(*P. antarcticus*)、巴布亚企鹅(*P. papua*)和麦克罗尼企鹅(*Eudyptes chrysolophus*)^[22]进行了遥感识别。早期研究显示, 南极大陆阿德利成年企鹅的数量预计达260万对^[23], 然而受遥感资料、识别方法与地面实测难度等因素的影响, 仅10%~15%的阿德利企鹅可通过遥感手段识别出来^[24]。以往研究大多通过建立企鹅粪便区面积与企鹅数量的关系间接获取企鹅数量^[17,25]。近年来, 随着遥感监测技术的发展, 高精度卫星遥感资料和航拍照片为南极企鹅遥感监测提供更大可能。发展高分辨率遥感数据的企鹅识别方法, 针对南极典型区域企鹅数量进行遥感监测, 将为进一步完善南极企鹅识别与企鹅源温室气体排放估算提供重要数据基础。

三原色光模式(RGB color model)将红(Red)、绿(Green)、蓝(Blue)三原色的色光以不同的比例相加, 以产生多种色光的颜色空间模型, 适用于航拍彩色图像的处理与分割。目前基于RGB空间颜色的图像识别方法已受到广大学者关注。杨璟和朱雷^[26]通过

分析RGB颜色空间的特点, 提出基于RGB颜色空间的阈值分割算法, 直接对彩色图像进行准确的分割。章超斌等人^[27]以大量荒漠草地实地拍摄的数码照片作为数据输入, 分析其RGB颜色模式特征, 构造了RGB颜色判别决策树, 区分植被与非植被像元来计算草地植被的覆盖度, 方便了草原实地调查工作。针对南极企鹅航拍数据, RGB模型法能否准确识别企鹅数量值得探究。作为一种面向像元的图像分类方法, RGB模型法在南极企鹅数量识别中尚未开展。

综上, 海洋动物源温室气体排放在南极地区典型生态系统温室气体源汇中扮演着重要的角色, 探究南极企鹅数量及其温室气体估算对于南极陆地生态系统碳氮循环与全球变化的研究具有重要科学意义。本文的研究目标是: (1) 基于航拍数据和RGB模型识别南极维多利亚地难言岛企鹅数量; (2) 构建海洋动物源温室气体排放量估算模型, 定量估算难言岛夏季企鹅源 CH_4 和 N_2O 排放量。

1 数据和方法

1.1 研究区域

研究区域为南极维多利亚地难言岛(Inexpressible Island)企鹅聚居区(74°54'N, 163°39'E), 位于罗斯海岸边维多利亚地特拉诺瓦湾, 南森冰架外缘北山麓丘陵以南, 占地70 km^2 (图1)。英国南极探险队北方分队于1910~1913年首次勘测此地, 并将其命名为“南山麓”(Southern Foothills)与“北山麓”(Northern Foothills)。在勘测期间, 该分队由于补给不足在岛屿的雪堆洞穴中度过了一个艰难的冬季, 因此将其名称改为“难言岛”。难言岛面朝大海, 背靠雪山, 岛上终年有较大的风, 瞬时风力可高达8级以上。夏季的难言岛冰雪消融很快, 岛上除了雪山外, 仅有岸边覆盖着冰雪。中国第31次南极考察队在难言岛上进行了详细的地质勘察, 初步发现了8种地衣。难言岛上布满了冰川运动产生的碎石, 其中有一处企鹅聚集地, 夏季数万只企鹅在这里繁殖。

1.2 研究数据

研究数据是中国第29次南极科学考察队拍摄的南极维多利亚地难言岛企鹅聚居区及其附近区域的航拍照片(图2(a)与(b)), 两幅航拍图已经做过正射校正, 其中包含了难言岛企鹅聚居区的所有信息, 具有

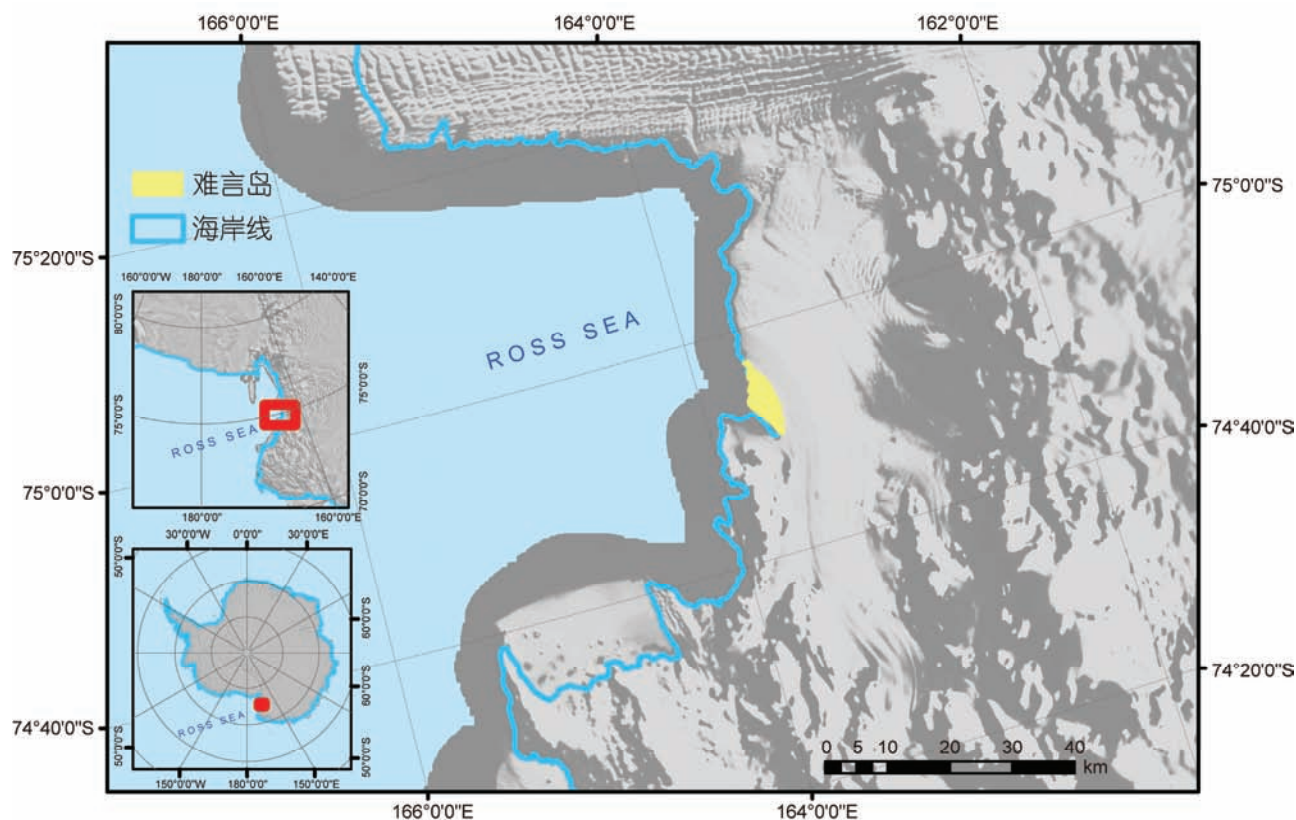


图1 南极维多利亚地难言岛位置示意图

Figure 1 The location of Inexpressible Island in Victoria Land, Antarctic

部分重叠, 需在数据预处理过程将其配准镶嵌. 航拍照片的拍摄时间是2012年12月31日上午11点4分, 拍摄地点的经纬度分别为 $163^{\circ}44'E$, $74^{\circ}54'S$. 分辨率为0.1 m, 既可以目视分辨出红棕色的企鹅粪便区, 也可以较清楚地分辨出企鹅像元群. 根据太阳的直射原理, 南极地区不可能出现太阳直射情况, 航拍照片中的黑色像元并非真正的企鹅像元, 而是企鹅的阴影像元. 图2(c)和(d)分别为不同程度的局部放大图, 图2(d)中黑色斑点即为企鹅阴影像元. 因此, 采用面向像元法的RGB颜色模型法, 直接针对像元进行研究.

1.3 研究方法

通过南极维多利亚地难言岛航拍照片建立面向像元的RGB颜色模型, 基于RGB颜色模型获取难言岛航拍照片企鹅二值图, 结合阴影分析计算难言岛企鹅数量(图3). 为验证RGB颜色模型法识别企鹅数量的准确性, 随机选取样本分别进行RGB颜色模型

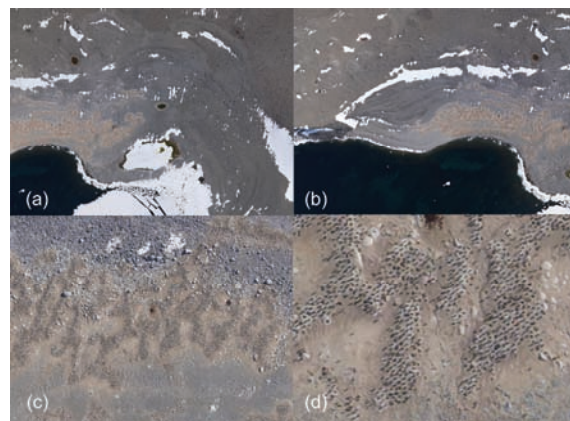


图2 南极维多利亚地企鹅聚集区航拍图. (a), (b) 原始航拍图; (c), (d) 原始航拍图的局部放大图

Figure 2 Aerial photographs of penguin colony in Victoria Land, Antarctic. (a), (b) The original aerial photographs; (c), (d) the partial enlarged detail of the original aerial photographs

法和目视识别, 将两组结果对比分析和计算相对偏差, 并进行偏差原因分析. 综合分析关于企鹅粪便温室气体排放的相关研究, 建立南极企鹅源温室气体

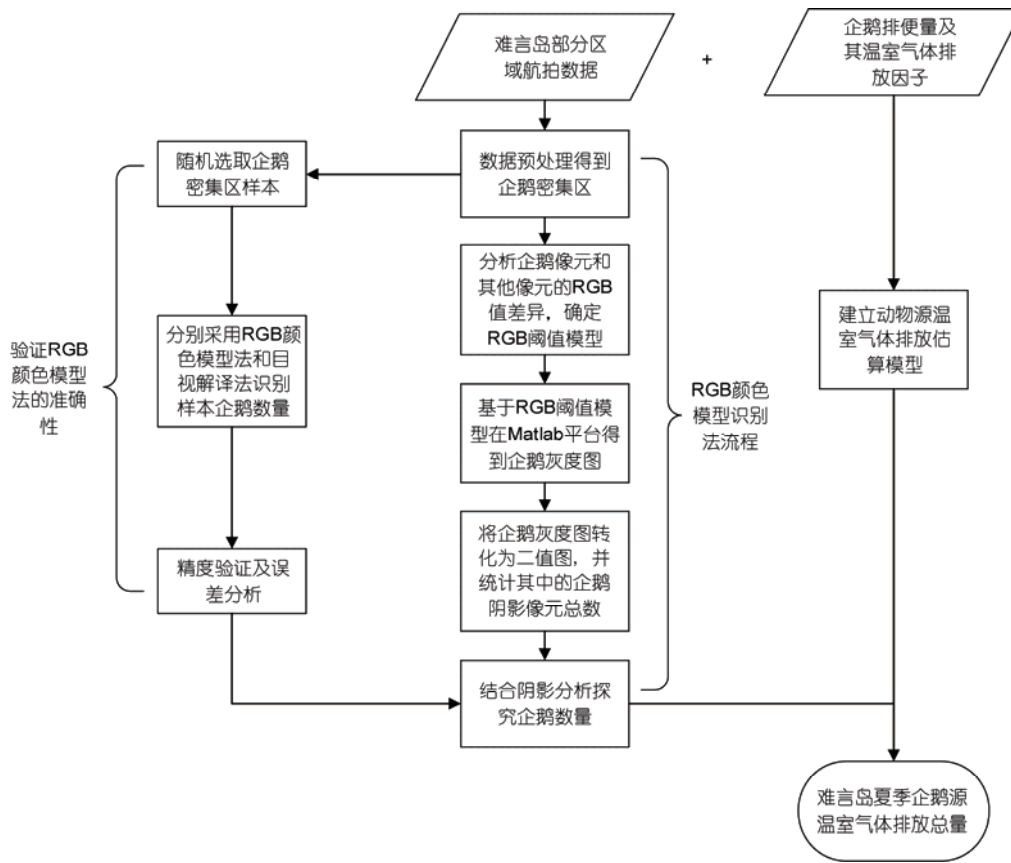


图3 企鹅数量识别与温室气体排放量估算流程图

Figure 3 Flowchart of penguin population identification and greenhouse gas emission estimation

排放总量估算模型, 对难言岛夏季企鹅源 CH_4 和 N_2O 排放总量进行估算。

(i) 基于面向像元法识别企鹅数量。航拍照片的预处理过程包括前期的数据镶嵌和后期的企鹅密集区提取(图4)。数据镶嵌是通过Google Earth设定控制点来实现的。航拍照片中企鹅密集区具有明显的特征, 红棕色的企鹅粪土上均匀分布着黑色企鹅斑块, 通过ArcGIS平台将企鹅密集区目视解译出来。基于Matlab平台探究企鹅像元与其他像元的 R , G , B 值差异, 设定合适的阈值模型提取企鹅阴影像元, 得到企鹅灰度图; 将企鹅灰度图在ArcGIS中重分类得到企鹅二值图, 统计二值图中的企鹅阴影像元总数。放大所得企鹅二值图发现在不同的企鹅阴影像元群四周存在很多像元个数为1的边界像元, 通过计算可知最小的企鹅阴影所占像元数为4, 而且企鹅不可能如此规则的分布在每个聚居区的边缘, 所以这些边界像元并非企鹅阴影像元。因此我们采用图像连通域算法将这些个数为1的边界像元去除, 得到最终的

企鹅阴影像元数。

通过阴影分析可以确定1只阿德利企鹅在影像中的平均阴影像元数, 结合航拍照片中的阿德利企鹅阴影像元总数可以计算出航拍照片中阿德利企鹅的总数量。式(1)为计算1只企鹅的平均阴影像元数的公式, 企鹅平均阴影像元数取决于当地太阳高度角、企鹅的高度、宽度以及航拍照片的分辨率。式(2)和(3)表示通过拍摄地点的纬度、太阳赤纬角以及太阳时角先求得太阳天顶角, 进而得到太阳高度角。式(4)为通过太阳直射点经度以及当地经度计算太阳时角的公式。

$$p = (H/\tan \alpha) \times W/D^2, \quad (1)$$

$$\alpha = 90^\circ - Z, \quad (2)$$

$$\cos z = \sin \theta \sin \delta + \cos \theta \cos \delta \cos \omega, \quad (3)$$

$$\omega = l_d - l, \quad (4)$$

式中, p 表示1只企鹅的平均阴影像元数, H 表示阿德利企鹅的平均高度, W 表示阿德利企鹅的平均胸围, D 表示航拍照片的分辨率。 α 表示太阳高度角, Z 表示太

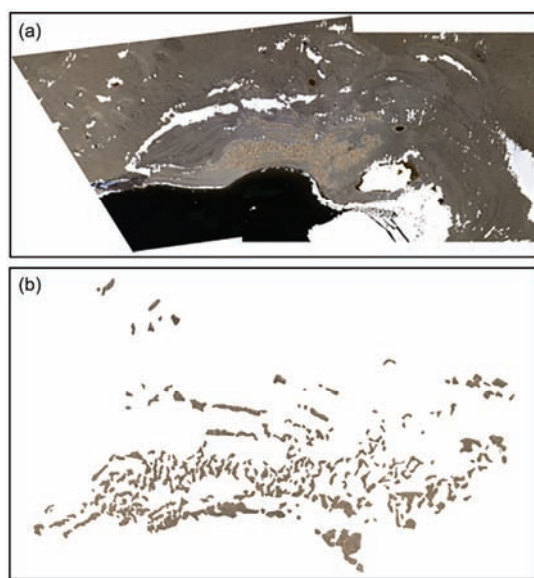


图4 南极维多利亚地企鹅聚集区航拍照片镶嵌预处理(a)及企鹅密集区提取(b)

Figure 4 Fusion pretreatment of the aerial photographs (a) and penguin dense areas (b)

阳天顶角, θ 表示当地纬度; δ 表示太阳赤纬角, 可由太阳赤纬表(<http://www.starpath.com>)得到, 对应表中的日期可知当时太阳赤纬角为 $23^{\circ}08'$; ω 表示太阳时角; l_d 表示太阳直射点经度, l 表示当地经度。

为了验证面向像元的RGB颜色模型识别企鹅数量的准确性, 在研究区域中随机选取6个样本, 分别采用RGB颜色模型法和目视解译法识别样本中的企鹅。将6组结果对比分析, 运用相对偏差的计算公式(https://en.wikipedia.org/wiki/Relative_change_and_difference)计算RGB颜色模型法识别结果与目视解译识别结果的相对偏差, 并分析原因。对于样本的选择, 原则上尽量使样本均匀分布于研究区域, 同时样本中的企鹅阴影像元特征能代表整个研究区域中的企鹅阴影像元。

$$\gamma = |C - E| / \frac{1}{2}(C + E), \quad (5)$$

式中, γ 为相对偏差, C 为RGB颜色模型法识别结果, E 为目视解译识别结果。

(ii) 企鹅源温室气体排放量估算方法。温室气体排放通量可以采用现场观测和室内模拟两种方法获得。南极野外苔原系统温室气体排放通量的现场观测采用的是国际上通用的静态密闭箱法^[5,28]; 基于室内模拟获取温室气体通量, 刘雅淑^[5]、Zhu等人^[8,9,11]、孙立广和刘晓东^[29]做了大量研究。借鉴Zhu

等人^[11]在第22次南极科学考察中带回的阿德利企鹅粪便样本的实验室培养研究, 将两个阿德利企鹅粪便样本在 4°C 培养条件且有氧环境下的 CH_4 和 N_2O 排放通量结果取平均得到阿德利企鹅粪便的 CH_4 和 N_2O 排放通量。基于企鹅粪便 CH_4 和 N_2O 排放通量, 加入企鹅数量、企鹅每天的排便鲜重、 CH_4 和 N_2O 排放时间等因子, 构建如下模型式(6)和(7)来估算企鹅源 CH_4 和 N_2O 排放总量。其中企鹅每天的排便鲜重是由干重和水分含量(干重基础计算)计算得到; 阿德利企鹅只有在繁殖期才会在难言岛上聚居, 所以繁殖期可以代表其排便时间及温室气体排放时间。

$$F_{(\text{CH}_4/\text{N}_2\text{O})} = N \times G \times B \times f_{(\text{CH}_4/\text{N}_2\text{O})} \times 24 \times B, \quad (6)$$

$$M_c = \frac{G - D}{D} \times 100\%, \quad (7)$$

式中, N 为遥感图像识别的企鹅总数量(只); G 为单只企鹅每天产生粪便的平均鲜重(g); D 为单只企鹅每天产生粪便的平均干重(g), 参考文献数据 84.5 g/d ^[30]; B 为企鹅的繁殖期(d), 参考文献数据 120 d ^[8]。 $f_{(\text{CH}_4/\text{N}_2\text{O})}$ 为 4°C 培养条件下 CH_4 和 N_2O 的排放通量($\mu\text{g kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$), 朱仁斌等人^[11]研究结果显示, CH_4 和 N_2O 的平均排放通量为 171.88 和 $1.87 \mu\text{g kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$, M_c 为企鹅粪便水分含量(以干重基础计算)为 187% 。

2 结果与讨论

2.1 企鹅数量遥感方法识别及其精度评价

通过对南极维多利亚地难言岛典型区域处理和分析, 在Matlab平台中探究合适的RGB颜色模型提取企鹅阴影像元。结果表明, 企鹅阴影像元在RGB彩色空间中的 R 值与其他背景像元存在显著差异。随机选取的企鹅阴影像元样本的 R 值($17 \sim 104$)普遍低于非企鹅阴影像元的 R 值(大于 110)(图5), 该差异可以作为将企鹅与背景像元有效分离的理论依据。因此, 将影像的 R 阈值区间设定为 $17 \sim 110$ 提取企鹅阴影像元。

基于Matlab平台得到企鹅灰度图, 将企鹅灰度图在ArcGIS中进行重分类得到企鹅二值图(图6), 统计二值图中的企鹅阴影像元总数为 298642 。采用4邻接的图像连通域算法检测得到像元个数为1的集群为 34381 。将企鹅阴影像元总数与像元个数为1的集群做差, 得到二值图中真实的企鹅阴影像元数为 264261 (图6)。

阿德利企鹅的高度为 $46 \sim 61 \text{ cm}$, 胸围为 $15 \sim$

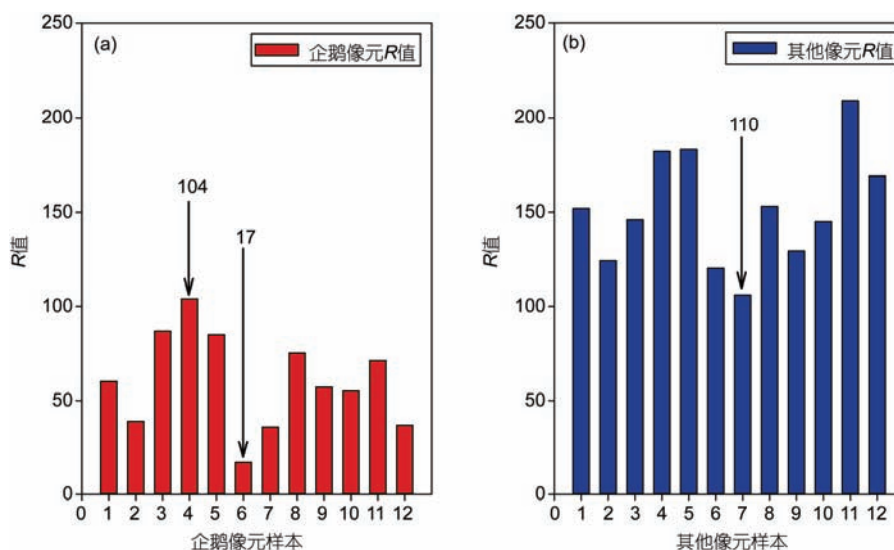


图5 企鹅阴影像元样本R值(a)和其他像元样本R值(b)

Figure 5 R value of penguin shadow pixel samples (a) and other pixel samples (b)

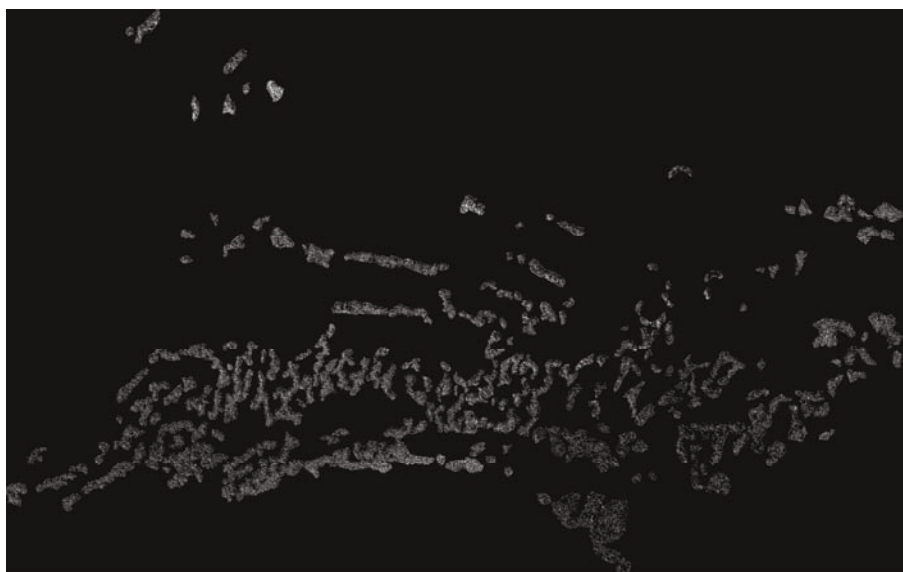


图6 基于RGB颜色模型得到的企鹅二值图(白色像元为企鹅像元)

Figure 6 Penguin binary image based on RGB color model (white pixels are penguin pixels)

25 cm^[31], 取其均值分别为高度53.5 cm, 胸围20 cm. 阴影分析结果显示, 太阳高度角为37.72°. 根据方程式(4)计算得出1只阿德利企鹅的平均阴影像元为13.8. 通过航拍照片中阿德利企鹅阴影像元总数及1只阿德利企鹅所占的平均阴影像元可以计算出航拍照片中阿德利企鹅的总数为19150只.

采用面向像元的RGB颜色模型法提取企鹅阴影像元是行之有效的方法, 辅助以目视解译对该方法

进行精度评价. 对选取的6个样本采用RGB颜色模型法识别其企鹅数量, 结果分别为27, 34, 32, 63, 38和59. 6个样本的目视解译结果分别为30, 38, 36, 71, 35和67(图7). 将两组结果对比分析, 利用方程(8)计算得到6个样本的相对偏差分别为10.53%, 11.11%, 11.76%, 11.94%, 8.22%和12.70%(图7), 平均相对偏差11.04%. 引起两个结果差异可能的主要原因是: (1) 单只企鹅的阴影像元采用平均值计算会影响企鹅数

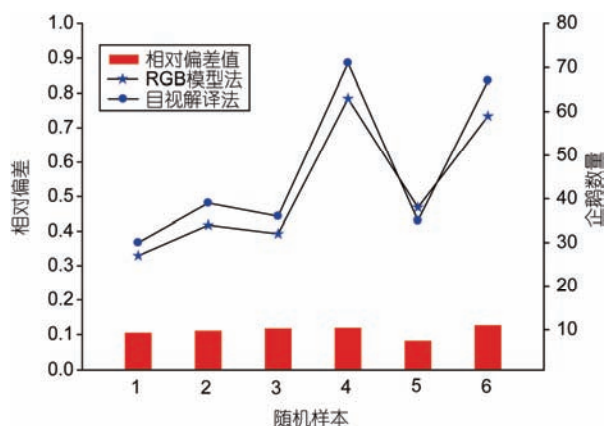


图7 面向像元法和目视解译法识别企鹅的结果对比及其相对偏差
Figure 7 Comparison of two penguin identification methods (pixel-oriented method and visual interpretation method) and their relative deviation

量识别结果。由于无法精确判断大小企鹅的数量比例,而且由实地考察人员带回的影像资料发现,航拍照片中大部分企鹅的大小比较均匀而且一致,认为采用均值计算较为合理。但实际企鹅的大小并不是严格均等的,采用均值会产生误差。(2) 企鹅站立姿势和聚集状态影响数量识别结果。研究中假设企鹅全部处于站立姿势且彼此之间间隔均匀,但实际情况中少数企鹅可能趴在聚居区以及几只企鹅聚集在一起,这些因素都会直接导致1只企鹅在航拍照片中的平均阴影像元偏差,最终影响估算结果。

2.2 企鹅源温室气体排放量估算及不确定性分析

Zhu等人^[11]基于室内培养试验研究阿德利企鹅粪便在在有氧环境下的温室气体排放通量,结果显示,阿德利企鹅粪便CH₄和N₂O的平均排放通量分别为171.88和1.87 μg kg⁻¹ h⁻¹,阿德利企鹅粪便的平均含水量(以干重基础计算)为185.72%。以此为基础数据,计算南极维多利亚地难言岛夏季企鹅源CH₄和N₂O排放总量约为275和2.99 kg(表1)。以往研究中,Zhu的Sun^[12]室内培养试验研究指出,150 g企鹅聚集区苔原土壤CH₄排放因子为9.0 μg h⁻¹(合60 μg kg⁻¹ h⁻¹),由此推算法尔兹半岛1万只左右企鹅所产生粪便的夏季CH₄排放量约为18 kg。该结果低于本研究涉及的难言岛企鹅粪便CH₄排放量,可能与企鹅粪便的CH₄排放因子数值和企鹅粪土组成状态有关。Zhu和Sun^[12]室内培养的企鹅粪土是包含企鹅粪土的苔原土壤,其CH₄排放因子较低(60 μg kg⁻¹ h⁻¹);而

表1 企鹅源CH₄和N₂O排放通量、排放总量及计算偏差

Table 1 Different greenhouse gases emissions, flux factors and relative deviation

温室气体类型	CH ₄	N ₂ O
GHG排放通量 (μg kg ⁻¹ h ⁻¹)	171.88	1.87
GHG排放总量 (kg)	275	2.99
GHG排放量偏差 (kg)	32.10	0.35

Zhu等人^[11]室内培养的企鹅粪土样品是基于企鹅粪土剖面获取,粪土有机质含量较高,其CH₄排放因子较高(171.88 μg kg⁻¹ h⁻¹);不同的企鹅粪土组成状态导致CH₄排放因子存在较大差异。此外,企鹅数量是影响南极不同地区企鹅源CH₄排放量的重要因素,难言岛地区较多的企鹅数量为较高的CH₄排放量提供可能。

难言岛企鹅源CH₄和N₂O排放量估算的不确定性来源可能存在以下3个方面:(1) 室内培养实验中涉及温室气体排放潜势的土壤样品采集区域与实际估算区域不匹配。文献[11]中数据的发生点位在南极洲东部普里兹湾附近的两个小岛上,与难言岛的气候条件与土壤环境可能存在差异进而影响温室气体排放的估算结果。(2) 企鹅源温室气体排放估算模型中企鹅粪便温室气体排放通量、企鹅排便量及企鹅繁殖期等参数的设定将影响估算结果。文献[11]中企鹅粪便温室气体排放通量是在4℃的条件下培养得到的,实际现场温度变化较大;现实中企鹅的繁殖期及其排便量可能不等同于理论值,从而产生企鹅源温室气体排放总量估算偏差。(3) 企鹅数量识别的准确性影响温室气体排放总量的估算结果。企鹅数量识别的精度分析可知,航拍照片中企鹅数量存在11.04%的识别偏差,即2238只企鹅,这些企鹅产生的CH₄和N₂O排放量分别为32.10和0.35 kg(表1)。

下一步将参加南极科学考察,通过样方法对企鹅聚居区的企鹅数量进行统计,进一步验证面向像元法的RGB颜色模型法的准确性。同时,采用静态密闭箱法针对不同区域进行温室气体野外观测,并采集样品带回实验室进行模拟研究,将测量数据及实验室结果与我们的结论对比分析,比较难言岛与南极其他观测区域的异同。此外,借助高分辨率、时空连续性较高的遥感数据对温室气体排放总量进行验证,提高南极企鹅源温室气体排放总量估算的准确度。

3 结论

通过面向像元的RGB颜色模型法识别南极企鹅数量,并建立了南极企鹅源温室气体排放量估算模型,将“点位”的温室气体通量观测拓展为“区域”温室气体排放总量估算。基于RGB颜色模型法得到难言

岛阿德利企鹅数量约为19150只,相对偏差为11.04%,企鹅源温室气体排放以CH₄为主,其夏季排放量约为275 kg。本文提出了面向像元识别企鹅影像的方法,同时基于点位的温室气体排放通量估算了区域尺度企鹅源温室气体排放总量,旨在为南极地区温室气体收支估算提供重要参考。

参考文献

- 1 Riddick S N, Dragosits U, Blackall T D, et al. The global distribution of ammonia emissions from seabird colonies. *Atmos Environ*, 2012, 55: 319–327
- 2 Huang T. Holocene ecological responses of penguins and seals to the changes of Antarctic climate. Doctor Dissertation. Hefei: University of Science and Technology of China, 2010. 48–49 [黄涛. 全新世西南极企鹅海豹生态对气候变化的响应与对比. 博士学位论文. 合肥: 中国科学技术大学, 2010. 48–49]
- 3 Sun L G, Zhu R B, Xie Z Q, et al. Emissions of nitrous oxide and methane from Antarctic tundra: Role of penguin dropping deposition. *Atmos Environ*, 2002, 36: 4977–4982
- 4 Zhu R B, Liu Y S, Ma E D, et al. Greenhouse gas emissions from penguin guanos and ornithogenic soils in coastal Antarctica: Effects of freezing-thawing cycles. *Atmos Environ*, 2009, 43: 2336–2347
- 5 Liu Y S. Temporal and spatial variations of greenhouse gas fluxes and their production mechanism in Antarctic tundra. Doctor Dissertation. Hefei: University of Science and Technology of China, 2011. 9–11 [刘雅淑. 南极苔原温室气体通量时空变化规律与产生机理研究. 博士学位论文. 合肥: 中国科学技术大学, 2011. 9–11]
- 6 Sun L G, Xie Z Q, Zhao J L, et al. Monitoring the concentration of N₂O in the Fildes Peninsula, maritime Antarctica. *Chin Sci Bull*, 2000, 45: 2000–2004
- 7 Zhu R B, Liu Y S, Xu H, et al. Methane emissions from three sea animal colonies in the maritime Antarctic. *Atmos Environ*, 2008, 42: 1197–1205
- 8 Zhu R B, Liu Y S, Xu H, et al. Nitrous oxide emissions from sea animal colonies in the maritime Antarctic. *Geophys Res Lett*, 2008, 35: L09807
- 9 Zhu R B, Liu Y S, Xu H, et al. Marine animals significantly increase tundra N₂O and CH₄ emissions in maritime Antarctica. *J Geophys Res-Biogeosci*, 2013, 118: 1773–1792
- 10 Zhu R B, Liu Y S, Sun L G, et al. Methane emissions from two tundra wetlands in eastern Antarctica. *Atmos Environ*, 2007, 41: 4711–4722
- 11 Zhu R B, Liu Y S, Ma E D, et al. Nutrient compositions and potential greenhouse gas production in penguin guano, ornithogenic soils and seal colony soils in coastal Antarctica. *Antarct Sci*, 2009, 21: 427–438
- 12 Zhu R B, Sun L G. Methane fluxes from tundra soils and snowpack in the maritime Antarctic. *Chemosphere*, 2005, 59: 1583–1593
- 13 Schwaller M R, Benninghoff W S, Olson Jr C E. Prospects for satellite remote sensing of Adélie penguin rookeries. *Int J Remote Sens*, 1984, 5: 849–853
- 14 Schwaller M R, Olson C E, Ma Z, et al. A remote sensing analysis of Adélie penguin rookeries. *Remote Sens Environ*, 1989, 28: 199–206
- 15 Guinet C, Jouventin P, Malacamp J. Satellite remote sensing in monitoring change of seabirds: Use of Spot Image in king penguin population increase at Ile aux Cochons, Crozet Archipelago. *Polar Biol*, 1995, 15: 511–515
- 16 Woehler E J, Riddle M J. Spatial relationships of Adélie penguin colonies: Implications for assessing population changes from remote imagery. *Antarct Sci*, 1998, 10: 449–454
- 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. *Polar Biol*, 2014, 37: 507–517
- 18 LaRue M A, Kooyman G, Lynch H J, et al. Emigration in emperor penguins: Implications for interpretation of long-term studies. *Ecography*, 2015, 38: 114–120
- 19 Barber-Meyer S M, Kooyman G L, Ponganis P J. Estimating the relative abundance of emperor penguins at inaccessible colonies using satellite imagery. *Polar Biol*, 2007, 30: 1565–1570
- 20 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. *PLoS One*, 2012, 7: e33751

- 21 Fretwell P T, Trathan P N, Wienecke B, et al. Emperor penguins breeding on iceshelves. *PLoS One*, 2014, 9: e85285
- 22 Lynch H J, White R, Black A D, et al. Detection, differentiation, and abundance estimation of penguin species by high-resolution satellite imagery. *Polar Biol*, 2012, 35: 963–968
- 23 Woehler E J, Croxall J P. The status and trends of Antarctic and sub-Antarctic seabirds. *Marine Ornithol*, 1997, 25: 43–66
- 24 Schwaller M R, Southwell C J, Emmerson L M. Continental-scale mapping of Adélie penguin colonies from Landsat imagery. *Remote Sens Environ*, 2013, 139: 353–364
- 25 Lynch H J, White R, Black A D, et al. Detection, differentiation, and abundance estimation of penguin species by high-resolution satellite imagery. *Polar Biol*, 2012, 35: 963–968
- 26 Yang J, Zhu L. Color image segmentation method based on RGB color space. *Comput Moderniz*, 2010, 8: 147–149 [杨璟, 朱雷. 基于 RGB 颜色空间的彩色图像分割方法. *计算机与现代化*, 2010, 8: 147–149]
- 27 Zhang C B, Li J L, Zhang Y, et al. A quantitative analysis method for measuring grassland coverage based on the RGB model. *Acta Pratacut Sin*, 2013, 220: 226 [章超斌, 李建龙, 张颖, 等. 基于 RGB 模式的一种草地盖度定量快速测定方法研究. *草业学报*, 2013, 220: 226]
- 28 Wang G C. A view on measurement methods for greenhouse gases emission from terrestrial ecosystem. *Clim Environ Res*, 2011, 2: 251–263 [王庚辰. 陆地生态系统温室气体排放(吸收)测量方法简评. *气候与环境研究*, 2011, 2: 251–263]
- 29 Sun L G, Liu X D. Eco-environmental change records of Antarctic ice-free areas in sediments influenced by marine animals. *Adv Atmos Sci*, 2006, 2: 57–62 [孙立广, 刘晓东. 南极无冰区生态与环境变化在粪土层中的记录. *气候变化研究进展*, 2006, 2: 57–62]
- 30 Wu B L, Wei J C, Liang Y L. Investigation of Ecosystems in Fildes Peninsula and Its Neighboring Area, Antarctic. Beijing: China Ocean Press. 65–361 [吴宝铃, 魏江春, 梁彦龄. 南极菲尔德斯半岛及其附近地区生态系统的研究. 北京: 海洋出版社. 65–361]
- 31 Williams T D. *The Penguins*. Oxford: Oxford University Press, 1995

Aerial photography based estimation of greenhouse gas emissions from penguins in Victoria Land, Antarctica

HE Hong¹, LI XiangLan¹, CHENG Xiao¹, ZHU RenBin², TANG JianWu³, HUI FengMing¹, WU WenHui⁴, ZHAO TianCheng¹, LIU Yan¹ & KANG Jing¹

¹ College of Global Change and Earth System Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

² Institute of Polar Environment, School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;

³ The Ecosystems Center, Marine Biological Laboratory, Woods Hole, MA 02543, USA;

⁴ Polar Surveying and Mapping Engineering Center, Heilongjiang Administration of Surveying, Mapping and Geoinformation, Harbin 150081, China

Marine animals are “bio-indicators” of climate change in the Antarctic. The abundance of nutrients in their excreta, such as carbon (C) and nitrogen (N), promotes the emission of greenhouse gases (GHGs), including methane (CH₄) and nitrous oxide (N₂O). Adélie penguins are important marine animals, and their colonies have therefore become potential “hotspots” of GHG emissions. Field observations have been conducted to study penguin excreta as a source of CH₄ and N₂O emissions in the Antarctic Peninsula. However, due to the lack of penguin population data, the total GHG emissions have not been estimated at the regional scale. With the development of remote sensing monitoring techniques in recent years, high-resolution satellite imagery and aerial photographs have made it possible to monitor penguin populations in the Antarctic, with the results used as a foundation to estimate GHG emissions. Inexpressible Island, a small, rocky island on the shore of the Ross Ice Shelf in Terra Nova Bay, Victoria Land, Antarctica, houses an important colony of Adélie penguins. This study extracted information about the penguins from aerial photographs using a pixel-oriented RGB (red, green, and blue) color space model of Victoria Land. Adélie penguin populations on Inexpressible Island could be estimated via a penguin shadow analysis in the RGB model. To validate the accuracy of the RGB model, we randomly selected several images and used the RGB method alongside an artificial visual interpretation method, with the results from both methods compared using the relative deviation index. In addition, a GHG model was developed to estimate CH₄ and N₂O emissions from Adélie penguins. The model included a variety of parameters, such as the CH₄ and N₂O fluxes from penguin excreta, the population number, the fresh weight of excreta produced by a penguin each day, and the duration of CH₄ and N₂O emissions from the excreta.

The results revealed significant differences in the *R* values between the penguin (*R*=17–104) and non-penguin (*R*>110) pixels in the aerial photographs assessed by the RGB model. We effectively separated the penguin pixels from background pixels based on the *R* values. The total number of penguins on Inexpressible Island was estimated to be 19150 and the average percentage deviation of the estimation was 11.04%. The total emissions of CH₄ and N₂O from these penguins in summer was 275 and 2.99 kg, respectively. Two factors might have led to GHG estimation uncertainties: (1) the GHG emission factors were obtained from an incubation experiment conducted during a previous study that was conducted much earlier than 2013 (i.e., the date of this study); (2) The parameters used in the GHG estimation model, such as the penguin population, fresh weight of penguin excreta, and the duration of the study period, would affect the total estimation of CH₄ and N₂O emissions. This study established a pixel-oriented method to extract information regarding penguin populations from aerial photographs, and estimated the total GHG emissions from penguins at the regional scale. The results will provide important reference values for the estimation of the GHG budget from marine animals.

Antarctic, penguin, greenhouse gas estimation, pixel-oriented, RGB color model, aerial photograph

doi: 10.1360/N972016-00546