高分辨率遥感数据在南极企鹅与温室气体研究中的应用

李香兰^{1,2}, 贺红^{1,2}, 程晓^{1,2*}, 张晶^{1,2}, 董国英^{1,2}, 冀明^{1,2}, 吕鑫晨^{1,2}, 李森^{1,2}, 王思宇^{1,2}

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. 北京师范大学全球变化与中国绿色发展协同创新中心, 北京 100875

* 联系人, E-mail: xcheng@bnu.edu.cn

2017-06-08 收稿, 2017-07-14 修回, 2017-07-17 接受, 2017-09-15 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)、中央高校基本科研业务费专项(312231103)、国家自然科学基金(41106157, 41176163)和国家海洋局海洋公益性行业科研专项(201205007-03)资助

摘要 南极企鹅是南大洋环境变化的“生物指示剂”, 其排泄物中丰富的碳(C)、氮(N)等营养物质为温室气体产生排放提供可能, 使企鹅聚居区成为大气二氧化碳(CO₂)、甲烷(CH₄)和氧化亚氮(N₂O)排放的重要来源. 中国第15次南极科学考察以来, 陆续开展了南极典型企鹅聚居区土壤养分分析、聚居区土壤温室气体野外观测和室内培养的研究工作, 指出企鹅活动显著促进温室气体的排放, 但受企鹅数量与分布资料的限制, 区域乃至环南极企鹅源温室气体排放量估算尚未开展. 随着卫星遥感技术发展, 20世纪80年代开始企鹅聚居区的遥感识别. 近年来, 特别是高精度卫星遥感资料和航拍照片的应用, 区域范围内企鹅数量遥感识别体系逐渐建立起来. 在综述以往研究工作的基础上, 综合分析了南极典型区域温室气体野外观测研究及企鹅源温室气体排放量估算方法, 系统比较了环南极分布的5种企鹅类型, 如阿德利企鹅(*Pygoscelis adeliae*)、帽带企鹅(*Pygoscelis antarctica*)、巴布亚企鹅(*Pygoscelis papua*)、帝企鹅(*Aptenodytes forsteri*)和马可罗尼企鹅(*Eudyptes chrysolophus*)的遥感识别方法, 并从气候变化(海表温度、海冰面积等)和人类活动(旅游、船舶等工业活动)以及其他因素(食物来源)等方面探讨影响企鹅数量变化的可能因素.

关键词 南极, 企鹅, 温室气体, 遥感

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, 此外, 以企鹅、海豹和贼鸥等海洋动物的数量居多, 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]. 企鹅排泄物显著影响聚居区土壤的物理和化学特性, 并形成一种被称为“鸟成土”的土壤类型^[3]. 每年夏季, 大量海洋动物排泄物为聚居地土壤提供

了丰富的碳(C)、氮(N)养分, 从而为土壤中二氧化碳(CO₂)、甲烷(CH₄)和氧化亚氮(N₂O)等温室气体的产生与排放创造了有利条件^[4-6]. 作为强效的温室气体, CH₄和N₂O吸收热量分别是CO₂的25和298倍, 大气CH₄浓度在1999~2006年间呈现总体平稳趋势, 但在2007年后出现骤然升高现象, 探究不同来源甲烷排放是解释大气甲烷浓度变化的重要前提^[7,8]. 因此, 研究南极企鹅源CO₂、N₂O和CH₄排放通量及其变化趋势将为研究极地气候变化提供确凿有效的证据. 特别是, 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; 南极海岸带作为重要的企鹅

引用格式: 李香兰, 贺红, 程晓, 等. 高分辨率遥感数据在南极企鹅与温室气体研究中的应用. 科学通报, 2017, 62: 3605–3618

Li X L, He H, Cheng X, et al. Application of very high resolution remote sensing data in studies of Antarctic penguins and greenhouse gases: A review (in Chinese). Chin Sci Bull, 2017, 62: 3605–3618, doi: 10.1360/N972017-00637

聚居地,其温室气体排放潜势更加值得关注.然而,受遥感资料限制,区域上企鹅源温室气体排放量估算存在一定的局限性.

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^[9-12],以往研究分别对南极局部地区的阿德利企鹅(*Pygoscelis adeliae*)^[13,14]、帝企鹅(*Aptenodytes forsteri*)^[15-17]、帽带企鹅(*Pygoscelis antarctica*)、巴布亚企鹅(*Pygoscelis papua*)和马克罗尼企鹅(*Eudyptes chrysolophus*)进行了遥感识别^[18].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^[19],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%的阿德利企鹅通过遥感手段识别出来^[20].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.气候变化对南极企鹅的数量和分布有很大影响,不同的区域气候变化不同,其对企鹅的影响方式也不同,研究预测在22世纪阿德利企鹅可能会整体向南迁移^[21].一些研究表明阿德利企鹅数量在南极半岛北部快速减少,而在南极半岛南部和罗斯海区域呈现增长趋势^[13,22].有研究表明高温对罗斯海区域的阿德利企鹅有利,因为温度升高可以使冰川退缩和冰雪消融,从而增加阿德利企鹅聚居地面积^[23].然而,南极半岛的阿德利企鹅数量却由于高温而减少^[24].影响企鹅数量的原因可以从物理环境和生物环境两个方面研究,物理环境因素包括海冰、温度、风速及冰间湖等^[25].生物环境主要表现为南极磷虾 Antarctic krill (*Euphausia superba*)等食物的丰度以及阿德利企鹅与其他生物对其的竞争^[13,23,26,27].当前,与南极企鹅和温室气体排放有关的研究,比如企鹅聚居区温室气体排放通量与影响因素分析、基于高分辨率遥感数据进行企鹅数量估算及影响因素分析、企鹅源温室气体排放量估算等,已经成为极地遥感和极地生态研究的热点,其研究内容涉及遥感科学、土壤学、生态学、生命科学等学科领域,是交叉学科在极地科学研究中的典范.

1 南极企鹅源温室气体研究进展

1.1 企鹅聚居区土壤养分分析

近年来,国内外学者在南极苔原土壤、湖泊沉积物、生态地质、大气和海洋生态等方面开展了大量研究工作^[6,28-30].在南极,海洋动物、苔原植被及其相

互作用形成特殊的陆地生态系统类型^[31],在生态系统养分循环,特别是C和N从海洋转向陆地的过程中发挥着重要作用^[32,33].企鹅粪土与鸟成土的有机碳、土壤全氮和全磷的含量较高,pH变化较大^[3,34,35].据统计,南极和亚南极岛屿海鸟粪便的全氮含量为858 Gg N a⁻¹,占全球海鸟粪便的79%^[1].企鹅粪土和鸟成土是南极重要的C库和N库,为南极海洋聚居区温室气体排放提供可能.

近期研究指出,海洋动物活动显著提高南极CH₄和N₂O排放量,全氮(TN)和有机碳(TOC)是影响CH₄和N₂O空间格局的重要因子^[36-38].海洋动物聚居区土壤富含TOC, TN, NH₄⁺-N和NO₃⁻-N与N₂O排放通量之间存在较高的相关性,说明土壤基本成分和养分控制着苔原不同生态区N₂O通量的季节变化.

1.2 企鹅聚居区温室气体观测试验

静态箱-气相色谱法开展的野外实测数据是研究南极温室气体排放的重要手段.中国第15次南极科学考察期间,Sun等人^[4,39]开拓了静态箱法观测西南极法尔兹半岛CH₄和N₂O通量的夏季排放通量,发现法尔兹半岛植被土壤分布区、企鹅聚居区是温室气体的“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”.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原位观测,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^[4,5,36,37,40-43].

企鹅聚居区是大气温室气体排放的“hotspots”,企鹅活动显著提高温室气体排放,并存在一定的空间和时间异质性^[43].对比普通苔原,南极沿海苔原的海鸟聚居区显著增强温室气体通量,尤其是企鹅聚居区^[4,36,37,44].在空间尺度上,受海洋动物聚居区土壤养分含量影响,西南极法尔兹半岛企鹅、贼鸥和海豹聚居区CH₄平均排放通量分别为231, 143和94 μg m⁻² h⁻¹, N₂O平均排放通量为856, 132和189 μg m⁻² h⁻¹,存在较大的空间差异,全氮(TN)和有机碳(TOC)是影响CH₄和N₂O空间格局的重要因子.在时间尺度上,企鹅、贼鸥和海豹聚居区N₂O通量在1月之前较低,1月之后迅速增长并在2月达到峰值,其N₂O通量高达2778 μg N₂O-N m⁻² h⁻¹,表现出显著的季节变化,可

能与当地不稳定的气候环境状况有关,地面温度在0℃附近波动很大,易导致当地土壤发生高频率的冻融.在粪土区,伴随着融化过程,土壤含水量增加,出现了较高的N₂O排放通量,表明冻融交替过程控制着聚居地N₂O排放通量.

室内培养实验是研究南极温室气体排放的另一重要手段,这是因为南极地区温室气体排放通量的野外观测受人力资源、天气状况、仪器设备、交通不便等多方面因素的限制,一般观测时间较短、观测次数较少,难以深入研究各种环境因子对土壤温室气体的影响,不能同时测量不同类型土壤温室气体排放,使得结果的比较和分析存在一定的偏见^[6,38].通过实验室培养试验,可以从机理上阐明动物排泄物对温室气体排放潜能的影响,探究冻融循环对土壤温室气体排放的影响,阐释不同环境变量及土壤理化性质对土壤温室气体排放的影响^[5,6,38,40].Zhu等人^[40]通过室内培养实验研究南极企鹅和海豹聚居区土壤的养分含量及温室气体产生潜势,结果表明,海洋动物聚居区土壤有机碳(TOC)含量和土壤全氮(TN)为0.2%~14.7%和0.05%~3.60%,与西伯利亚北部苔原土壤含量相当^[45],进一步说明企鹅和海豹聚居区较高的土壤养分含量为CH₄、N₂O和CO₂等温室气体产生提供可能.

1.3 企鹅源温室气体排放量估算

企鹅聚居区温室气体野外观测试验和室内培养实验为研究企鹅源温室气体排放量提供重要数据基础,尚不能从区域上揭示企鹅源温室气体排放量.Zhu等人^[42]曾对企鹅粪便产生温室气体的潜力做了粗略估算,结果显示约1.1万只企鹅在繁殖期产生18.0±10.8 kg CH₄.然而由于缺少高分辨率影像对企鹅数量的准确估算,区域尺度上企鹅源CH₄和N₂O的

精确估算仍有很多不确定性.发展南极典型区域海洋动物源温室气体估算模型,借助遥感数据对典型区域海洋动物进行识别,结合企鹅粪便温室气体排放通量数据,进而估算温室气体排放总量,将为全球温室气体收支估算和南极物质循环研究提供重要参考,目前尚缺乏相关研究.贺红等人^[46]以南极维多利亚地难言岛企鹅聚居区为研究对象,基于0.1 m分辨率航拍照片发展了面向像元的RGB(red, green, and blue)颜色模型法(pixel-oriented RGB color model)识别企鹅数量.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,由此估算南极维多利亚地难言岛企鹅总数为19150只.

2 南极企鹅遥感监测研究进展

2.1 南极主要企鹅类型及地貌特征

南极企鹅是南大洋生物质能的重要组成部分,是海洋生态系统重要的消费者,环南极大陆分布^[47,48].典型的企鹅类型包括阿德利企鹅、帽带企鹅、巴布亚企鹅、帝企鹅和马可罗尼企鹅,其中,阿德利企鹅、帝企鹅和马可罗尼企鹅的体型较大,寿命较长^[49],其地貌特征和生活习性存在显著差异(表1).

(1) 阿德利企鹅,名称来源于南极大陆的阿德利地.阿德利企鹅环南极分布,是南极最常见的企鹅,通常体长46~75 cm,体重4~6 kg,眼圈为白色,头部呈蓝绿色,嘴为黑色,嘴角有细长羽毛,腿短,爪黑;羽毛由黑、白两色组成,头部、背部、尾部、翼背面、下颌为黑色,其余部分均为白色(图1(a)).阿德利企鹅4~5 a进入生殖成熟期,平均寿命达8 a(表1).阿德利企鹅的食物主要是鳞虾、乌贼和海洋鱼类.阿德利

表1 南极洲主要企鹅类型的生活史(根据Forcada和Trathan^[50]改编)^{a)}

Table 1 Life history of the major penguin types in Antarctica (according to the adaptation of Forcada and Trathan^[50])

企鹅类型	平均成熟 年龄(a)	孵蛋个数 (个)	孵育期 (d)	饲养周期 (d)	羽毛丰满时间 (d)	繁殖成率 (%)	成年生存率 (%)	寿命 (a)
阿德利企鹅	4~5	2	30~36	16~34	40~65	0.7~1.4	0.8~0.97	8
帽带企鹅	4~5	2	30~40	20~30	50~60	0.6~1.8	Nd ^{a)}	Nd ^{a)}
巴布亚企鹅	3~4	2	30~40	20~30	80~105	0.3~1.2	0.75~0.9	8
帝企鹅	5~6	1	60~70	40~50	150	0.6~0.85	0.9~0.95	14
马可罗尼企鹅	5~6	1	30~36	20~40	60~70	0.6~0.85	0.8	9

a) Nd: no data, 表示缺失数据

图 1 南极和亚南极主要企鹅类型(图片来源: Wikipedia)

Figure 1 The major penguin types in Antarctica and sub-Antarctic zone (Source: Wikipedia)

企鹅在海洋中越冬, 冬天时成群结队出现在浮冰或冰山上活动, 春天一到即返回其陆地栖息处, 每年10月到次年3月在陆地繁殖区, 企鹅粪便通常在繁殖区的岩石或冰山上. 迁徙距离可达13000 km, 最高达17600 km.

(2) 帽带企鹅, 脖子底下有一道黑色条纹, 像海军军官的帽带, 像戴着盔帽一般, 又称颊带企鹅. 帽带企鹅体长72 cm, 平均重约4.5 kg, 与同属的阿德利企鹅长得相似, 眼圈为白色, 头部呈蓝绿色, 嘴为黑色, 嘴角有细长羽毛, 腿短, 爪黑. 羽毛由黑、白两色组成, 头部、背部、尾部、翼背面、下颌为黑色, 其余部分均为白色(图1(b)). 帽带企鹅会在陆地上筑起一个个由石头组成圆形的巢, 每次孵约两枚卵, 而孵卵则由雄性和雌性轮流进行, 每隔5~10 d换班一次, 幼企鹅会约35 d后孵化. 幼企鹅在巢中多逗留20~30 d之后就会离巢, 在出生后50~60 d后会换毛, 之后就可以出海.

(3) 巴布亚企鹅, 又名白眉企鹅、金图企鹅, 体形较大, 身长约60~80 cm, 重约6 kg. 眼睛上方有一个明显的白斑, 嘴细长, 嘴角呈红色, 眼角处有一个

红色的三角形(图1(c)). 生活在较南地区的巴布亚企鹅以磷虾为食, 生活在较北的则以鱼类为食. 11月栖息地交配, 12月底至1月左右产下雏鸟, 之后1~3月就由父母抚育雏鸟, 一直到夏季结束. 巴布亚企鹅是企鹅家族中最快速的泳手, 最高达36 km/h. 雌企鹅在南极的冬季产卵, 每次产2枚, 雌雄企鹅轮流孵卵, 先雄后雌, 每隔1~3 d换班一次. 在繁殖期, 巴布亚企鹅只在群居地方圆10~20 km的范围内活动.

(4) 帝企鹅, 也称皇帝企鹅, 是企鹅家族中个体最大的, 平均身高115 cm, 一般身高在90~120 cm, 体重可达20~45 kg. 其形态特征是, 全身色泽协调, 颈部为淡黄色, 耳朵的羽毛鲜黄橘色, 腹部乳白色, 背部及鳍状肢则是黑色, 鸟喙的下方是鲜桔色(图1(d)). 帝企鹅环南极分布, 唯一一种在南极洲的冬季冰上进行繁殖的企鹅. 4月, 南极开始进入初冬, 帝企鹅上岸, 到达繁殖地一个多月后, 雌帝企鹅一般会产下一枚淡绿色、重约500 g的蛋, 然后将蛋交给雄帝企鹅, 返回食物丰富的海洋捕食. 帝企鹅可以潜入水底150~500 m, 主要以甲壳类动物为食, 偶尔也捕食小鱼和乌贼, 平均寿命可达14 a, 最高寿命达20 a(表1).

帝企鹅迁徙距离可达110~1000 km^[51~53], 通常在远离聚居区数百公里的浮冰上蜕毛^[54,55].

(5) 马可罗尼企鹅, 体重在3.2~6.1 kg, 身高为51~77 cm. 双眼间有左右相连的橘色的装饰羽毛, 喙角有粉色的羽圈, 幼鸟缺乏优雅的头冠, 眼睛棕色, 体羽和鸟喙黑色(图1(e)), 分布于南非到南美西部以及南极洲沿岸. 马可罗尼企鹅拥有很强的潜水本领, 但不会飞行. 每到夏季时, 成千上万的马可罗尼企鹅会游到南大洋中, 在布满岩砾的小岛上交配、繁殖. 主要以磷虾为食, 也捕食鱿鱼和小鱼. 前肢发育成为鳍脚, 适于划水. 具鳞片状羽毛, 羽轴宽而短, 羽片狭窄而密集, 均匀分布于体表.

2.2 南极企鹅数量遥感监测方法

通过遥感手段监测企鹅数量最早是在19世纪80年代, 常用的方法是建立企鹅粪便区面积与企鹅数量的简单线性模型或广义线性混合模型, 从而获取中分辨率和高分辨率遥感数据的企鹅数量^[13,16]. 不同来源的遥感数据(比如Landsat, SPOT, Worldview, QuickBird-2与航拍照片等)通常被用来监测企鹅数量的分布和变化^[16,17,20,23,56~59]. 总体而言, 阿德利企鹅和帝企鹅的分布呈现环南极分布, 巴布亚企鹅、帽带企鹅和马克罗尼企鹅主要分布在南极半岛和亚南极(图2). 中分辨率的Landsat数据能识别企鹅大致分布状况与变化, 卫星高分辨率数据和航拍数据能识别企鹅的数量. 随着遥感技术发展, 高分辨率影像被用来提取不同种类的企鹅数量, 阿德利企鹅和帝企鹅的研究体系比较成熟, 多种企鹅类型综合遥感监测和不同典型区域企鹅遥感监测的研究体系逐渐形成.

(i) 典型企鹅类型遥感监测. 阿德利企鹅被比作“煤矿里的金丝雀”, 对南大洋环境变化起到警示作用. 其呈现环南极分布的格局特征, 通常生活在无冰区^[61](图2). 阿德利企鹅间隙性地占领西南极半岛约6000 a, 东南极半岛至少14000 a, 罗斯海约45000 a^[21,62~64]. 以往关于阿德利企鹅分布的研究大都基于几十年的实地观测、船上调查和航拍数据, 获取了企鹅聚居地位置, 并估算企鹅数量变化. 遥感影像为准确估算南极企鹅数量提供重要手段, 阿德利企鹅和帝企鹅粪便的光谱特征明显不同于其他地物的光谱特征, 是识别阿德利企鹅和帝企鹅的有效途径. Schwaller等人^[9,10]指出, 罗斯海周边阿德利企鹅聚居区粪便颜色与周围其他地貌特征不同, 企鹅粪区的

像元数目与企鹅数量之间存在一定的相关性. Schwaller等人^[20]基于30 m Landsat-7 ETM+数据分析环南极(不包括南极半岛和罗斯冰架)阿德利企鹅聚居区, 结果发现共9143个像元为企鹅聚居区, 187个企鹅聚居区, 其大小为1~875个像元, 发现6个新的企鹅聚居区; 同时, Landsat数据确定为识别企鹅聚居区的遥感数据, 与地面观测值对比能识别96%~97%的企鹅聚居区. 20世纪90年代, Ainley^[61]指出了新的企鹅聚居地可能存在并估算了阿德利企鹅数量为240~320万对. Lynch和LaRue^[65]通过卫星影像和地面实测数据估算了环南极379万对企鹅的分布区, 发现17个未知的企鹅聚居区分布着42万对企鹅, 其中11个聚居区为近期发现的. 南极恶劣环境使得部分区域难以抵达, 并受南极遥感资料限制, 大区域尺度或环南极的企鹅数量估算可能存在严重的低估现象^[66]. 因此, 基于高分辨率遥感影像和无人机航拍数据研究南极企鹅数量变化备受关注.

帝企鹅生活在海冰或冰架上, 其识别难度相对较小. Chamailé-Jammes等人^[57]使用具有地理参考信息的航拍照片在地理信息系统中探究了几十年来帝企鹅(*Aptenodytes patagonicus*)数量的变化, 该航拍照片曾被用于建立南极东部阿德利企鹅聚居区面积和企鹅数量之间的回归模型^[12]. Fretwell和Trathan^[58]通过Landsat ETM提取已知的企鹅聚居地和尚未报道的企鹅聚居地, 识别了环南极38个帝企鹅分布格局, 包括10个新发现企鹅聚居区. Fretwell等人^[16]通过中高分辨率遥感数据和地面实测企鹅密度数据建立了面积回归模型, 第一次全球企鹅物种数据中采用监督分类方法识别帝企鹅(*Aptenodytes forsteri*)的数量, 南极大陆海岸46个企鹅聚居地, 成年帝企鹅数量为238000. Fretwell等人^[17]指出, 46个帝企鹅聚居地中有44个分布在海冰上, 2个分布在陆冰架上, 全球气候变暖导致海冰融化可能成为威胁帝企鹅生存的主要因素, 最新估算结果表明, 到2052年, 帝企鹅数量可能减少一半, 陆地冰的生存环境有利于缓解海冰融化导致帝企鹅数量减少. LaRue等人^[13]采用卫星数据和文献结果对全球帝企鹅聚居地进行研究, 发现3年内6个(Alexander Island, Bryan Coast, Burton Ice Shelf, Shackleton Ice Shelf, Sabrina Coast)聚居地的企鹅未返回原来的繁殖区域进行繁殖; 南极半岛新发现的帝企鹅聚居地的企鹅可能是从Dion Islands迁徙来的; 迁徙可能是造成20世纪70年代企鹅数量减少

图2 南极5种企鹅类型的聚居区点位分布图(数据来源: IBA^[60])

Figure 2 Colony distribution of five types of penguin in Antarctica (Source: IBA^[60])

的重要因素。

(ii) 多种企鹅类型综合遥感监测。近年来, 典型区域野外调查的方式成为研究不同类型企鹅数量的重要手段。Casanovas等人^[67]通过野外调查的方式研究了西南极半岛阿德利企鹅、巴布亚企鹅和帽带企鹅的数量变化, 并结合海冰范围和浮游植物叶绿素a浓度数据分析企鹅数量变化的原因; 结果显示, Marguerite Bay是企鹅数量增加或减少的过渡带,

Marguerite Bay北侧区域阿德利企鹅出现数量减少的趋势, 但巴布亚企鹅数量增加; Marguerite Bay南侧区域阿德利企鹅数量增加或呈现稳定的状态。浮游植物作为南极磷虾的食物来源, 其生产力影响南极磷虾的数量, 而磷虾是企鹅食物的重要来源, 进而影响企鹅数量变化^[68,69]。同时, 30年的海冰范围数据表明, 夏季海冰面积呈现降低的趋势, 为企鹅聚居地提供更大场所, 有利于企鹅数量增加。

随着高分辨率卫星遥感数据的发展,对连续分布的企鹅聚居区,可以通过不同企鹅的生活习性和粪便颜色在遥感影像的颜色不同区分企鹅种类.分辨率为0.5~0.6 m全色波段的卫星数据(如Worldview和Quickbird)能有效识别不同类型的企鹅和数量^[18].马克罗尼企鹅和帽带企鹅的生活习性不同,通过企鹅聚居密度在遥感影响上体现的颜色差异加以区分;马克罗尼企鹅在哺乳期间是弯腰驼背、缩成一团,其聚居区的企鹅密度要高于帽带企鹅,在遥感影像上的颜色偏黑,而成年帽带企鹅直立哺乳,聚居区密度相对较低,胸部的白色羽毛在卫星遥感数据中颜色偏浅.同样地,阿德利企鹅和帽带企鹅的区分主要靠粪土颜色的不同来判断,阿德利企鹅的粪土颜色在哺乳季节的后期呈现较深的颜色,对两种企鹅混合分布、难以区分的区域则通过实地观测的方法加以区分.基于上述原则,Lynch等人^[18]通过目视解译方法估算了Paulet Island阿德利企鹅数量为115673对,可信度达95%.

除实地观测和遥感识别外,模型模拟是研究不同企鹅数量变化的重要手段.Lynch等人^[22]结合统计数据和模拟结果分析了31年来南极半岛不同企鹅类型的变化趋势,在70个企鹅聚居区中,阿德利企鹅在该区域呈现降低的趋势,帽带企鹅尽管受益于海冰面积减少但数量出现递减趋势,巴布亚企鹅则呈现数量增加的趋势;夏季叶绿素a浓度和海冰面积是影响阿德利企鹅数量变化的主要因素,新的巴布亚企鹅聚居区往南移动可能是影响巴布亚企鹅数量变化的主要因素.目前通过遥感手段鉴别不同种类的企鹅还很局限,随着无人机的快速发展,未来通过遥感

鉴别企鹅种类或将实现.

(iii) 典型区域企鹅遥感监测.以罗斯海为研究区域,Lyver等人^[25]基于直升机航拍数据和地面实测数据采用计算机解译方法分析了罗斯海附近1981~2012年间阿德利企鹅的变化趋势,结果表明,罗斯海西部共有85万对阿德利企鹅,其中3个聚居地分布在罗斯岛,一个分布在蒲福岛.Schwaller等人^[9,10]指出,罗斯海周边阿德利企鹅聚居区粪便颜色与周围其他地貌特征不同,企鹅粪区的像元数目与企鹅数量之间存在一定的相关性.LaRue等人^[13,23]和Lynch等人^[18]基于高分辨率遥感数据通过目视解译或监督分类等方法将企鹅粪便区从图像中解译出来,建立企鹅粪土面积与企鹅数量之间的广义混合模型,识别南极罗斯海阿德利企鹅的数量分布.南极罗斯海区域是重要的企鹅聚居地,如何从气候变化与人类活动角度阐释企鹅数量变化,具有较高的科研价值.

3 南极企鹅数量变化的影响因素

南极企鹅数量变化受综合因素的影响,以往研究指出,气候变化、海表温度、海冰消退、旅游和科研人员干扰是影响阿德利企鹅和帝企鹅的主要因素;巴布亚企鹅成为近危物种,气候变化、旅游、污染和渔业活动对巴布亚企鹅的影响较大(表2).气候因子与人类活动成为影响南极企鹅数量变化的重要因素.

3.1 气候环境因子

气候变化是影响企鹅数量的重要因子.南极企鹅能够适应数千年的气候变化,在剧烈的气候环境

表2 南极企鹅种群的危险程度及对气候变化的响应(根据Forcada和Trathan^[50]改编)

Table 2 The danger level of penguin populations in Antarctica and their response to climate change (According to the adaptation of Forcada and Trathan^[50])

企鹅类型	IUCN标准	影响因素	对气候变化响应	参考文献
阿德利企鹅	无危物种	气候变化、海表温度、海冰消退、旅游和科研人员干扰	向南迁徙、范围缩小、食物网变化	Ainley ^[61] Ainley等人 ^[70] Croxall等人 ^[71]
帽带企鹅	无危物种	气候变化、海表温度	范围扩张、食物网变化	Fraser等人 ^[72] ; Smith等人 ^[73]
巴布亚企鹅	近危物种	气候变化、旅游、污染和渔业活动	范围扩张、食物网变化	Ellis等人 ^[74] ; Fraser等人 ^[72] ; Smith等人 ^[73]
帝企鹅	无危物种	气候变化、海表温度、海冰消退	向南迁徙、范围缩小、食物网变化	Croxall等人 ^[71] ; Ainley等人 ^[70]
马可罗尼企鹅	易危物种	气候变化、海表温度	食物网变化	Ellis等人 ^[74]

中生存, 生命周期长达20 a, 主要是因为企鹅能够快速储备脂肪且持续时间较长^[50,75,76]. 企鹅对气候变化敏感, 其体积大小和体貌形态限制了自身觅食的范围和深度, 通常在觅食资源富集且可以获取的范围内进行捕食. 海洋地理稳定性、天气状况和海冰范围是影响觅食来源的重要因子, 且影响企鹅的繁殖和蜕毛等活动^[53,76-83]. 特别是, 改变生存环境能够改变企鹅的体重和体积、繁殖和蜕毛、孵蛋时间、孵蛋大小、繁殖成功率和个体存活率.

古气候研究发现, 随着冰川扩张和固定冰范围扩大阿德利企鹅通常放弃原有聚居地, 而随着冰川消失或海冰范围缩小显露的岩石为阿德利企鹅筑巢提供极大便利从而被阿德利企鹅重新占据为筑巢领地^[62-64]. 20世纪晚期, 西南极半岛出现气温变暖趋势, 阿德利企鹅数量开始下降, 而其他区域的企鹅数量则呈现升高或稳定的趋势. 气候环境对企鹅的影响, 主要表现在其聚居区的地理分布向南极移动、企鹅聚居范围的扩张和收缩、企鹅生物事件(物候)、捕食和捕食者相关性^[50]. 20世纪70年代以来, 阿德利企鹅和帝企鹅的最北的聚居区几近消失, 出现向南移动的趋势. 帝企鹅在西南极半岛的Dion岛几乎消失, 在Terre Adelie和Indian Ocean的递减速率达到50%^[84].

多年遥感观测资料为研究阿德利企鹅数量提供重要参考手段, 海表温度和海冰密集度是影响企鹅栖息地的重要环境因子. Cimino等人^[21]基于阿德利企鹅聚居区点位分布、裸岩位置、海表温度和海冰密集度建立了南极夏季企鹅栖息地最适模型(austral-summer chick-rearing habitat suitability models, CRHS), 耦合气候变化模型, 预测未来企鹅聚居区的环境质量, 结果表明, 企鹅数量降低与海表温度升高呈现较高的一致性, 到2060年, 约1/3的企鹅聚居区可能出现阿德利企鹅数量下降的趋势.

气候变化通过影响企鹅筑巢或海洋食物来源进而影响企鹅数量. 阿德利企鹅通常在无冰区或无雪区通过鹅卵石筑巢使得幼小企鹅远离水源并保持干燥. 研究表明, 降水和冰雪融化会使得筑巢区淹水, 影响幼小企鹅和企鹅孵蛋的存活率, 从而降低企鹅数量^[85-87]. 阿德利企鹅和帝企鹅对固定冰和浮冰的依赖性较大, 通常时间在冰上生存, 尽管阿德利企鹅繁殖期在无冰区的陆地生存^[70,72]. 巴布亚企鹅、帽带企鹅和马可罗尼企鹅能够在无冰环境的群岛上生

存^[72,83].

通过分析罗斯海区域McMurdo试验站长时间序列的空气温度数据表明, 年均温、夏季均温和冰雪融化期均温都呈现升高的趋势, 可能加速陆面冰雪覆盖融化, 为企鹅聚居提供更多适宜区域, 有利于企鹅繁衍^[23]. 海冰范围和海冰面积对企鹅数量的影响相对复杂, 过多的海冰分布延长了企鹅捕食的路径, 不利于企鹅生存; 而过少的海冰面积不利于企鹅的食物来源磷虾的生存, 可能通过食物链的作用影响企鹅数量^[24,25,73,88]. 通过分析罗斯海区域1979~2012年海冰面积和海冰范围的数据, 结果发现, 两者均呈现增加的趋势, 与企鹅数量的增加趋势相吻合, 这说明罗斯海区域的海冰分布尚未达到最适合企鹅生存的临界值, 可能呈现进一步增多的趋势.

3.2 人类活动因子

南极海岸带无冰区的陆地面积较小, 这些区域通常用来建立实验站和旅客登陆地, 生活在这些区域的阿德利企鹅通常会受到干扰. 随着物流运营和旅游观光业的发展, 人类活动在南极的强度不断提高. Bender等人^[89]基于历史资料和最新船只登陆数据提取了南极半岛近20年来的旅游业的发展状况, 结果表明, 乘客登陆和船舶航行主要分布在南极半岛的西南部, 从1990~2010年登陆乘客人数以6.3%的年增长率持续增加, 其中中国旅客人数递增趋势明显; 目前南极旅游空间尚未饱和, 旅客人数具有增长潜力. 同时研究指出, 旅客登陆的区域同时也是企鹅聚居区域, 统计数据表明, 1994/1995年夏季乘客登陆区域存在巴布亚企鹅、阿德利企鹅和帽带企鹅分布的站点比例分别是73%, 20%和16%; 2012/2013年夏季该数据分别是59%, 29%和27%, 旅游人员的登陆可能影响到当地企鹅的生存环境. Carlini等人^[90]以距离实验站的远近为参照, 通过对比高干扰和低干扰的企鹅聚居区数量变化, 结果发现, 两个研究区域成年阿德利企鹅数量均呈现降低的趋势(37.4%~38.6%), 企鹅幼鸟的数量在低干扰区呈现增加趋势(6.7%), 在高干扰区呈现降低趋势(4%). Trathan等人^[91]以高迪尔岛为研究对象, 开展12年连续观测, 研究旅游人数与巴布亚企鹅数量的相关性, 结果表明, 随着旅游人数增加巴布亚企鹅数量呈现下降的趋势, 可能的原因是, 旅游人员会影响巴布亚企鹅的聚居区进而导致巴布亚企鹅离开原来的聚居地寻找新的栖息地^[92].

人类活动是影响企鹅数量的重要因素。尽管人为因素对企鹅的生存环境造成扰动,但长时间序列人类活动干扰对企鹅数量的影响,存在较大争议。前人研究指出,人类活动影响企鹅生理和行为^[93~97]、繁殖模式^[98,99]、数量变化^[99]等,也有人指出人类活动不会影响企鹅数量变化^[27,100,101]。如何从气候变化与人为活动角度阐释南极企鹅数量变化是当前研究的学术热点。

3.3 其他因素

企鹅食物网中,企鹅的主要食物来源为磷虾,而磷虾以浮游植物为食;与海冰范围、风速和水体稳定性有关的环境因子会影响企鹅对浮游植物和磷虾的获取量进而影响企鹅数量变化^[102]。然而,近20年(1993~2013年)大型浮游生物数据表明,西南极半岛磷虾数量变化不大可能有利于企鹅繁殖^[103],磷虾数量可能不是影响西南极半岛企鹅数量的主要因素,但是水温升高对磷虾质量和企鹅对磷虾的获取的负面影响尚未得知^[21]。南极银鱼(*Silverfish*, *Pleu- ragramma antarcticum*)同样以磷虾为食,是企鹅获取食物的竞争对手,随着西南极半岛气温变暖银鱼数量出现下降趋势,一定程度上影响企鹅的繁殖存活率进而影响企鹅数量^[104,105]。以罗斯海湾为例,罗斯海南部企鹅聚居地数量在2000年前呈现降低的趋势,气候因子和鲸鱼数量是影响企鹅变化的主要原因;2000年之后呈现升高的趋势,竞争对手洋枪鱼数量是导致企鹅数量增加的主要因素^[25]。海洋中叶绿素a浓度是体现磷虾食物来源海藻的重要表征,结果发现罗斯海区域叶绿素a浓度呈现逐年增高的趋势,有利于企鹅捕食与生存^[67,69]。

火山喷发、冰山崩解等自然现象也会影响南极企鹅的生存。即使规模较小的火山喷发也能对距离爆发源较远地区的生态环境造成毁灭性的破坏^[106]。火山爆发后产生的火山灰包含大量精细磨砂玻璃,有毒气溶胶以及有毒的微量元素和金属等,这些物质对企鹅的生理功能有不利影响^[106,107]。Roberts等人^[107]运用详细的生物地球化学分析追踪位于南极半岛阿德雷岛上的巴布亚企鹅聚居区在过去8500年的变化,发现大的火山喷发会导致企鹅聚居区的扩张突然停止,导致几乎所有的企鹅聚居区消失,而且至少需要400~800 a才会逐渐恢复。此外,巨大冰山的出现可能会影响企鹅的数量。对罗斯海南部的研究

表明,巨型冰山会扰乱海冰的运动,导致罗斯海冰间湖的暂时覆盖,进而降低初级生产力,改变食物链^[108]。而阿德利企鹅的捕食与海冰及冰间湖息息相关,由巨型冰山引发的这些改变会降低企鹅数量^[109~111]。Lyver等人^[25]认为罗斯海南部阿德利企鹅的数量在2001年出现低谷与该年1月到达的两个巨型冰山B-15A和C-16有关。Wilson等人^[112]通过研究得出结论,如果冰山B-09B不移动位置,而且常年固定冰不破碎,那么位于丹尼森海岬的阿德利企鹅可能在20年内灭绝。

4 结论与展望

企鹅是南大洋环境变化的“生物指示剂”,其数量与分布对全球变化的响应敏感,具有较高的研究意义。企鹅聚居地是南极潜在的强排放温室气体的点源,估算其温室气体排放对于南极海洋的生态系统研究乃至全球环境变化具有重要的科学意义。本文基于以往研究中涉及高分辨率遥感数据(卫星数据和航拍数据)在南极企鹅数量与温室气体排放量估算中的应用为研究对象,综述了近期(特别是2000年以来)南极企鹅遥感识别的研究进展,以及企鹅聚居区有关的温室气体排放量研究。南极企鹅类型主要包括阿德利企鹅、帽带企鹅、帝企鹅、巴布亚企鹅和马克罗尼企鹅,其中阿德利企鹅和帝企鹅环南极分布,而阿德利企鹅和帽带企鹅数量较多。气候环境因子和人类活动因子是影响企鹅数量分布与变化的主要因子,且随着旅游业和渔业的快速发展,人类活动对南极半岛企鹅数量的影响将会愈加显著。此外,捕食、火山爆发及冰山等也是影响企鹅数量的重要因素。相对于普通苔原区,企鹅聚居区的温室气体排放通量相对较高,主要与企鹅粪便中丰富的C、N含量有关;受企鹅分布资料限制,区域乃至环南极企鹅源温室气体排放量估算鲜有报道。

以往研究中采用中、高分辨率遥感数据对典型地区、特定企鹅类型的聚居区与企鹅数量进行识别与估算。随着遥感技术发展和无人机应用,南极企鹅数量识别精度大幅提升,同时研究表明气候变化和人类活动是影响企鹅数量的主要因素。但针对环南极典型企鹅聚居区,尚缺乏综合数量变化与影响因素的分析,尚未对企鹅源温室气体排放量进行总体估算。以往研究中关于企鹅源温室气体排放研究大都集中在点位观测和室内培养,受遥感数据资料与识别方

法的限制,较大区域企鹅源温室气体排放量估算尚未开展.发展并改进基于遥感数据的温室气体(CH_4 , N_2O 和 CO_2)排放估算模型,借助野外实测、卫星遥感数据对估算结果进行验证,将为定量研究企鹅源温室气体排放总量提供重要保障.

基于高分辨率遥感数据的企鹅源温室气体估算将是极地生态研究的热点领域,其研究内容涉及遥感科学、土壤学、生态学、生命科学等学科领域,是交叉学科在极地科学研究中的典范,值得高度关注.

参考文献

- 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
- Huang T. Holocene ecological responses of penguins and seals to the changes of Antarctic climate (in Chinese). Doctor Dissertation. Hefei: University of Science and Technology of China, 2010 [黄涛. 全新世东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]
- Schaefer C E G, Simas F N, Gilkes R J, et al. Micromorphology and microchemistry of selected Cryosols from maritime Antarctica. *Geoderma*, 2008, 144: 104–115
- Sun L, Zhu R, Xie Z, et al. Emissions of nitrous oxide and methane from Antarctic tundra: Role of penguin dropping deposition. *Atmos Environ*, 2002, 36: 4977–4982
- Zhu R, Liu Y, Ma E, 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
- Liu Y S. Temporal and spatial variations of greenhouse gas fluxes and their production mechanism in Antarctic tundra (in Chinese). Doctor Dissertation. Hefei: University of Science and Technology of China, 2011 [刘雅淑. 南极苔原温室气体通量时空变化规律与产生理研究. 博士学位论文. 合肥: 中国科学技术大学, 2011]
- Wadham J L, Arndt S, Tulaczyk S, et al. Potential methane reservoirs beneath Antarctica. *Nature*, 2012, 488: 633–637
- Nisbet E G, Dlugokencky E J, Bousquet P. Methane on the rise—Again. *Science*, 2014, 343: 493–495
- 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
- Schwaller M R, Jr C E O, Ma Z, et al. A remote sensing analysis of Adélie penguin rookeries. *Remote Sens Environ*, 1989, 28: 199–206
- 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
- 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
- LaRue M A, Lynch H, Lyver P, et al. A method for estimating colony sizes of Adélie penguins using remote sensing imagery. *Polar Biol*, 2014, 37: 507–517
- 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
- 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
- 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
- Fretwell P T, Trathan P N, Wienecke B, et al. Emperor penguins breeding on iceshelves. *PLoS One*, 2014, 9: e85285
- 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
- Woehler E, Croxall J. The status and trends of Antarctic and sub-Antarctic seabirds. *Mar Ornithol*, 1997, 25: 43–66
- 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
- Cimino M A, Lynch H J, Saba V S, et al. Projected asymmetric response of Adélie penguins to Antarctic climate change. *Sci Rep*, 2016, 6: 28785
- Lynch H J, Naveen R, Trathan P N, et al. Spatially integrated assessment reveals widespread changes in penguin populations on the Antarctic Peninsula. *Ecology*, 2012, 93: 1367–1377

- 23 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. *PLoS One*, 2013, 8: e60568
- 24 Ainley D, Russell J, Jenouvrier S, et al. Antarctic penguin response to habitat change as Earth's troposphere reaches 2°C above preindustrial levels. *Ecol Monogr*, 2010, 80: 49–66
- 25 Lyver P O B, Barron M, Barton K J, et al. Trends in the breeding population of Adélie penguins in the Ross Sea, 1981–2012: A coincidence of climate and resource extraction effects. *PLoS One*, 2014, 9: e91188
- 26 Bricher P, Lucieer A, Woehler E J. Population trends of Adélie penguin (*Pygoscelis adeliae*) breeding colonies: A spatial analysis of the effects of snow accumulation and human activities. *Polar Biol*, 2008, 31: 1397–1407
- 27 Fraser W R, Patterson D L. Human disturbance and long-term changes in Adélie penguin populations: A natural experiment at Palmer Station, Antarctic Peninsula. In: Battaglia B, Valencia J, Walton D W H, eds. *Antarctic Communities: Species, Structure and Survival*. Cambridge: Cambridge University Press, 1997. 445–452
- 28 Zhu R, Bao T, Wang Q, et al. Summertime CO₂ fluxes and ecosystem respiration from marine animal colony tundra in maritime Antarctica. *Atmos Environ*, 2014, 98: 190–201
- 29 Zhu R, Liu Y, Li X, et al. Stable isotope natural abundance of nitrous oxide emitted from Antarctic tundra soils: Effects of sea animal excrement depositions. *Rapid Commun Mass Sp*, 2008, 22: 3570–3578
- 30 Zhu R, Sun J, Liu Y, et al. Potential ammonia emissions from penguin guano, ornithogenic soils and seal colony soils in coastal Antarctica: Effects of freezing-thawing cycles and selected environmental variables. *Antarct Sci*, 2011, 23: 78–92
- 31 Tatur A. Ornithogenic ecosystems in the maritime Antarctic—Formation, development and disintegration. In: Beyer L, Böltner M, eds. *Geocology of Antarctic Ice-Free Coastal Landscapes*. Berlin: Springer, 2002. 161–184
- 32 Nie Y, Liu X, Sun L, et al. Effect of penguin and seal excrement on mercury distribution in sediments from the Ross Sea region, East Antarctica. *Sci Total Environ*, 2012, 433: 132–140
- 33 Nie Y, Sun L, Liu X, et al. From warm to cold: Migration of Adélie penguins within Cape Bird, Ross Island. *Sci Rep*, 2015, 5: 11530
- 34 Simas F N, Schaefer C E G, Melo V F, et al. Ornithogenic cryosols from maritime Antarctica: Phosphatization as a soil forming process. *Geoderma*, 2007, 138: 191–203
- 35 Simas F N, Schaefer C E G, Albuquerque Filho M R, et al. Genesis, properties and classification of Cryosols from Admiralty Bay, maritime Antarctica. *Geoderma*, 2008, 144: 116–122
- 36 Zhu R, Liu Y, Xu H, et al. Methane emissions from three sea animal colonies in the maritime Antarctic. *Atmos Environ*, 2008, 42: 1197–1205
- 37 Zhu R, Liu Y, Xu H, et al. Nitrous oxide emissions from sea animal colonies in the maritime Antarctic. *Geophys Res Lett*, 2008, 35: L09807
- 38 Zhu R, Liu Y, Xu H, et al. Marine animals significantly increase tundra N₂O and CH₄ emissions in maritime Antarctica. *J Geophys Res-Biogeosci*, 2013, 118: 1773–1792
- 39 Sun L G, Zhao J L. Measurement of N₂O Concentration on the Fildes Peninsula, Antarctica (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2000, 45: 1195–1199 [孙立广, 赵俊琳. 南极菲尔德斯半岛 N₂O 浓度的监测. 科学通报, 2000, 45: 1195–1199]
- 40 Zhu R, Liu Y, Ma E, 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
- 41 Zhu R, Liu Y, Sun L, et al. Methane emissions from two tundra wetlands in eastern Antarctica. *Atmos Environ*, 2007, 41: 4711–4722
- 42 Zhu R, Sun L. Methane fluxes from tundra soils and snowpack in the maritime Antarctic. *Chemosphere*, 2005, 59: 1583–1593
- 43 Zhu R, Sun L, Ding W. Nitrous oxide emissions from tundra soil and snowpack in the maritime Antarctic. *Chemosphere*, 2005, 59: 1667–1675
- 44 Park J-H, Day T A, Strauss S, et al. Biogeochemical pools and fluxes of carbon and nitrogen in a maritime tundra near penguin colonies along the Antarctic Peninsula. *Polar Biol*, 2007, 30: 199–207
- 45 Rodionow A, Flessa H, Kazansky O, et al. Organic matter composition and potential trace gas production of permafrost soils in the forest tundra in northern Siberia. *Geoderma*, 2006, 135: 49–62
- 46 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 [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]
- 47 Brooke M D L. The food consumption of the world's seabirds. *Proc R Soc B-Biol Sci*, 2004, 271(Suppl 4): S246–S248
- 48 Woehler E J, Cooper J, Croxall J, et al. A statistical assessment of the status and trends of Antarctic and Subantarctic seabirds. Technical Report. Scientific Committee on Antarctic Research (SCAR), 2001
- 49 Borboroglu P G, Boersma P D. *Penguins: Natural History and Conservation*. London: University of Washington Press, 2015
- 50 Forcada J, Trathan P N. Penguin responses to climate change in the Southern Ocean. *Glob Change Biol*, 2009, 15: 1618–1630
- 51 Ancel A, Kooyman G, Ponganis P, et al. Foraging behaviour of emperor penguins as a resource detector in winter and summer. *Nature*, 1992, 360: 336–339

- 52 Kirkwood R, Robertson G. The foraging ecology of female emperor penguins in winter. *Ecol Monogr*, 1997, 67: 155–176
- 53 Zimmer I, Wilson R P, Gilbert C, et al. Foraging movements of emperor penguins at Pointe Géologie, Antarctica. *Polar Biol*, 2008, 31: 229–243
- 54 Kooyman G, Hunke E, Ackley S, et al. Moults of the emperor penguin: travel, location, and habitat selection. *Mar Ecol Prog Ser*, 2000, 204: 269–277
- 55 Wienecke B, Kirkwood R, Robertson G. Pre-moult foraging trips and moult locations of emperor penguins at the Mawson Coast. *Polar Biol*, 2004, 27: 83–91
- 56 Bhikharidas A, Whitehead M, Peterson J. Mapping Adélie penguin rookeries in the Vestfold Hills and Rauer Islands, east Antarctica, using SPOT HRV data. *Int J Remote Sens*, 1992, 13: 1577–1583
- 57 Chamaillé-Jammes S, Guinet C, Nicoleau F, et al. A method to assess population changes in king penguins: The use of a Geographical Information System to estimate area-population relationships. *Polar Biol*, 2000, 23: 545–549
- 58 Fretwell P T, Trathan P N. Penguins from space: Faecal stains reveal the location of emperor penguin colonies. *Glob Ecol Biogeogr*, 2009, 18: 543–552
- 59 Naveen R, Lynch H J, Forrest S, et al. First direct, site-wide penguin survey at Deception Island, Antarctica, suggests significant declines in breeding chinstrap penguins. *Polar Biol*, 2012, 35: 1879–1888
- 60 Harris C, Lorenz K, van Franeker J, et al. Important Bird Areas in Antarctica 2015. Cambridge: BirdLife International and Environmental Research & Assessment Ltd, 2015
- 61 Ainley D G. The Adélie Penguin: Bellwether of Climate Change. New York: Columbia University Press, 2002
- 62 Emslie S D. Radiocarbon dates from abandoned penguin colonies in the Antarctic Peninsula region. *Antarct Sci*, 2001, 13: 289–295
- 63 Emslie S D, Coats L, Licht K. A 45000 yr record of Adélie penguins and climate change in the Ross Sea, Antarctica. *Geology*, 2007, 35: 61–64
- 64 Younger J, Emmerson L, Southwell C, et al. Proliferation of East Antarctic Adélie penguins in response to historical deglaciation. *BMC Evol Biol*, 2015, 15: 236
- 65 Lynch H, LaRue M. First global census of the Adélie Penguin. *Auk*, 2014, 131: 457–466
- 66 Southwell C, Smith D, Bender A. Incomplete search effort: A potential source of bias in estimates of Adélie penguin breeding populations in the Australian Antarctic Territory. *Polar Record*, 2009, 45: 375–380
- 67 Casanovas P, Naveen R, Forrest S, et al. A comprehensive coastal seabird survey maps out the front lines of ecological change on the western Antarctic Peninsula. *Polar Biol*, 2015, 38: 927–940
- 68 Ballerini T, Hofmann E E, Ainley D G, et al. Productivity and linkages of the food web of the southern region of the western Antarctic Peninsula continental shelf. *Prog Oceanogr*, 2014, 122: 10–29
- 69 Marrari M, Daly K L, Hu C. Spatial and temporal variability of SeaWiFS chlorophyll a distributions west of the Antarctic Peninsula: Implications for krill production. *Deep Sea Res Part II: Topical Stud Oceanogr*, 2008, 55: 377–392
- 70 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. *Antarct Sci*, 2005, 17: 171–182
- 71 Croxall J P, Trathan P, Murphy E. Environmental change and Antarctic seabird populations. *Science*, 2002, 297: 1510–1514
- 72 Fraser W R, Trivelpiece W Z, Ainley D G, et al. Increases in Antarctic penguin populations: Reduced competition with whales or a loss of sea ice due to environmental warming? *Polar Biol*, 1992, 11: 525–531
- 73 Smith R C, Ainley D, Baker K, et al. Marine ecosystem sensitivity to climate change historical observations and paleoecological records reveal ecological transitions in the Antarctic Peninsula region. *BioScience*, 1999, 49: 393–404
- 74 Ellis S, Croxall J, Cooper J. Penguin Conservation Assessment and Management Plan. In: The Workshop, Cape Town, September 1996. Cape Town: IUCN/SSC Conservation Breeding Specialist Group, 1998
- 75 Emslie S D, McDaniel J D. Adélie penguin diet and climate change during the middle to late Holocene in northern Marguerite Bay, Antarctic Peninsula. *Polar Biol*, 2002, 25: 222–229
- 76 Kooyman G L. Evolutionary and ecological aspects of some Antarctic and sub-Antarctic penguin distributions. *Oecologia*, 2002, 130: 485–495
- 77 Ainley D G, Ribic C A, Ballard G, et al. Geographic structure of Adélie Penguin populations: Overlap in colony-specific foraging areas. *Ecol Monogr*, 2004, 74: 159–178
- 78 Bost C A, Charrassin J B, Clerquin Y, et al. Exploitation of distant marginal ice zones by king penguins during winter. *Mar Ecol Prog Ser*, 2004, 283: 293–297
- 79 Charrassin J B, Bost C A. Utilisation of the oceanic habitat by king penguins over the annual cycle. *Mar Ecol Prog Ser*, 2001, 221: 285–298
- 80 Croxall J, Prince P, Ricketts C. Relationships between prey life-cycles and the extent, nature and timing of seal and seabird predation in the Scotia Sea. In: Siegfried W R, Condy P R, Laws R M, eds. *Antarctic Nutrient Cycles and Food Webs*. Berlin: Springer, Berlin, Heidelberg, 1985. 516–533
- 81 Trathan P, Green C, Tanton J, et al. Foraging dynamics of macaroni penguins *Eudyptes chrysolophus* at South Georgia during brood-guard. *Mar Ecol Prog Ser*, 2006, 323: 239–251

- 82 Trathan P N, Bishop C, Maclean G, et al. Linear tracks and restricted temperature ranges characterise penguin foraging pathways. *Mar Ecol Prog Ser*, 2008, 370: 285–294
- 83 Trivelpiece W Z, Trivelpiece S G, Volkman N J. Ecological segregation of Adélie, gentoo, and chinstrap penguins at King George Island, Antarctica. *Ecology*, 1987, 68: 351–361
- 84 Barbraud C, Weimerskirch H. Emperor penguins and climate change. *Nature*, 2001, 411: 183
- 85 Cimino M A, Fraser W R, Patterson-Fraser D L, et al. Large-scale climate and local weather drive interannual variability in Adélie penguin chick fledging mass. *Mar Ecol Prog Ser*, 2014, 513: 253–268
- 86 Fraser W R, Patterson-Fraser D L, Ribic C, et al. A non-marine source of variability in Adélie penguin demography. *Oceanography*, 2013, 26: 207–209
- 87 McClintock J, Ducklow H, Fraser W. Ecological responses to climate change on the Antarctic Peninsula. *Amer Sci*, 2008, 96: 302–310
- 88 Jenouvrier S, Barbraud C, Weimerskirch H. Sea ice affects the population dynamics of Adélie penguins in Terre Adélie. *Polar Biol*, 2006, 29: 413–423
- 89 Bender N A, Crosbie K, Lynch H J. Patterns of tourism in the Antarctic Peninsula region: A 20-year analysis. *Antarct Sci*, 2016, 28: 194–203
- 90 Carlini A, Coria N, Santos M, et al. Breeding success and population trends in Adélie penguins in areas with low and high levels of human disturbance. *Polar Biol*, 2007, 30: 917–924
- 91 Trathan P N, Forcada J, Atkinson R, et al. Population assessments of gentoo penguins (*Pygoscelis papua*) breeding at an important Antarctic tourist site, Goudier Island, Port Lockroy, Palmer Archipelago, Antarctica. *Biol Conserv*, 2008, 141: 3019–3028
- 92 Holmes N D, Giese M, Achurch H, et al. Behaviour and breeding success of gentoo penguins *Pygoscelis papua* in areas of low and high human activity. *Polar Biol*, 2006, 29: 399–412
- 93 Culik B, Adelung D, Woakes A. The effect of disturbance on the heart rate and behaviour of Adélie penguins (*Pygoscelis adeliae*) during the breeding season. In: Kerry K R, Hempel G, eds. *Antarctic Ecosystems*. Berlin: Springer, Berlin, Heidelberg, 1990. 177–182
- 94 Giese M. Guidelines for people approaching breeding groups of Adélie penguins (*Pygoscelis adeliae*). *Polar Record*, 1998, 34: 287–292
- 95 Giese M, Riddle M. Disturbance of emperor penguin *Aptenodytes forsteri* chicks by helicopters. *Polar Biol*, 1999, 22: 366–371
- 96 Wilson R, Coria N, Spairani H, et al. Human-induced behaviour in Adélie penguins *Pygoscelis adeliae*. *Polar Biol*, 1989, 10: 77–80
- 97 Wilson R P, Culik B, Danfeld R, et al. People in Antarctica—How much do Adélie Penguins *Pygoscelis adeliae* care? *Polar Biol*, 1991, 11: 363–370
- 98 Giese M. Effects of human activity on Adélie penguin *Pygoscelis adeliae* breeding success. *Biol Conserv*, 1996, 75: 157–164
- 99 Woehler E, Penney R, Creet S, et al. Impacts of human visitors on breeding success and long-term population trends in Adélie penguins at Casey, Antarctica. *Polar Biol*, 1994, 14: 269–274
- 100 Copley N, Shears J. Breeding performance of gentoo penguins (*Pygoscelis papua*) at a colony exposed to high levels of human disturbance. *Polar Biol*, 1999, 21: 355–360
- 101 Micol T, Jouventin P. Long-term population trends in seven Antarctic seabirds at Pointe Géologie (Terre Adélie) Human impact compared with environmental change. *Polar Biol*, 2001, 24: 175–185
- 102 Saba G K, Fraser W R, Saba V S, et al. Winter and spring controls on the summer food web of the coastal West Antarctic Peninsula. *Nat Commun*, 2014, 5: 4318
- 103 Steinberg D K, Ruck K E, Gleiber M R, et al. Long-term (1993–2013) changes in macrozooplankton off the Western Antarctic Peninsula. *Deep-Sea Res Part I-Oceanogr Res Pap*, 2015, 101: 54–70
- 104 Ducklow H W, Baker K, Martinson D G, et al. Marine pelagic ecosystems: The west Antarctic Peninsula. *Philos Trans R Soc B-Biol Sci*, 2007, 362: 67–94
- 105 Ruck K E, Steinberg D K, Canuel E A. Regional differences in quality of krill and fish as prey along the Western Antarctic Peninsula. *Mar Ecol Prog Ser*, 2014, 509: 39–55
- 106 Loughlin S C, Sparks R S J, Brown S K, et al. *Global Volcanic Hazards and Risk*. Cambridge: Cambridge University Press, 2015
- 107 Roberts S J, Monien P, Foster L C, et al. Past penguin colony responses to explosive volcanism on the Antarctic Peninsula. *Nat Commun*, 2017, 8: 14914
- 108 Arrigo K R, van Dijken G L. Impact of iceberg C-19 on Ross Sea primary production. *Geophys Res Lett*, 2003, 30: 1836
- 109 Arrigo K R, van Dijken G L, Ainley D G, et al. Ecological impact of a large Antarctic iceberg. *Geophys Res Lett*, 2002, 29: 1104
- 110 Dugger K M, Ballard G, Ainley D G, et al. Adélie penguins coping with environmental change: Results from a natural experiment at the edge of their breeding range. *Ecol Evol*, 2014, 2: 68, doi: 10.3389/fevo.2014.00068
- 111 Shepherd L, Millar C, Ballard G, et al. Microevolution and mega-icebergs in the Antarctic. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2005, 102: 16717–16722
- 112 Wilson K J, Turney C S, Fogwill C J, et al. The impact of the giant iceberg B09B on population size and breeding success of Adélie penguins in Commonwealth Bay, Antarctica. *Antarct Sci*, 2016, 28: 187–193

Summary for “高分辨率遥感数据在南极企鹅与温室气体研究中的应用”

Application of very high resolution remote sensing data in studies of Antarctic penguins and greenhouse gases: A review

LI XiangLan^{1,2}, HE Hong^{1,2}, CHENG Xiao^{1,2*}, ZHANG Jing^{1,2}, DONG GuoYing^{1,2}, JI Ming^{1,2}, LÜ XinChen^{1,2}, LI Sen^{1,2} & WANG SiYu^{1,2}

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

² Joint Center for Global Change and China Green Development, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

* Corresponding author, E-mail: xcheng@bnu.edu.cn

Antarctic penguins are “bio-indicators” of environmental change in the Southern Ocean. The abundance of nutrients such as carbon (C) and nitrogen (N) in their excreta promotes the emission of greenhouse gases (GHGs), which makes penguin colonies an important source of carbon dioxide (CO₂), methane (CH₄), and nitrous oxide (N₂O) emissions. Since the 15th Chinese Antarctica research expedition, studies have been conducted via field observations and laboratory incubation experiments to determine the soil nutrient content in typical penguin colonies, and GHG production and emissions in these regions. These studies have indicated that the deposition of large amounts of penguin guano strongly influences the physical and chemical properties of soils in the Antarctic and creates favorable conditions for the production of CH₄ and N₂O in the soils and their subsequent emission. These studies have also shown that penguin activity significantly promotes CH₄ and N₂O emissions when compared with sites such as tundra ecosystems where penguins are absent. However, due to the lack of penguin population data, the total GHG emissions from penguin colonies at the regional and even circum-Antarctic scale have not been estimated. With the development of remote sensing technology, penguin colonies and their population changes have been identified by satellite images since the 1980s. In recent years, with the application of very high resolution (VHR) satellite images and aerial photographs, the identification of penguin populations at the regional scale has gradually been established. Based on previous research, this study comprehensively analyzed GHG emissions from penguins via field observations and laboratory incubation experiments, and introduced a method to estimate GHG emissions from penguin colonies via parameters such as guano deposition rates, CH₄ and N₂O emission factors, and penguin populations. This study also summarized the satellite data-based population estimations of five Antarctic penguin species: Adélie (*Pygoscelis adeliae*), Chinstrap (*Pygoscelis Antarctica*), Gentoo (*Pygoscelis papua*), emperor (*Aptenodytes forsteri*), and Macaroni (*Eudyptes chrysolophus*). Taking Adélie penguin as an example, Antarctic penguin colonies were investigated by considering the relationship between penguin guano areas and the number of breeding pairs, which determined a global total Adélie penguin population of 3.79 million breeding pairs. Some studies have shown that Adélie penguin populations have been declining rapidly on the islands of the northern Antarctic Peninsula, but have been increasing in the southern Antarctic Peninsula and the Ross Sea regions. The factors driving penguin populations were studied in terms of the physical and biological changes in the penguins' environment, including changes in sea-ice conditions (concentration, extent, and thickness), air temperature, wind speed, and sea surface temperature, all of which are likely to limit the abundance of Adélie penguins. Competition for food resources such as Antarctic krill (*Euphausia superba*) and continuous changes in the abundance of these resources also impacts on the number and density of Adélie penguins. Some of the factors that influence penguin population changes were discussed, including environmental factors (sea surface temperature, sea ice area, and Chlorophyll a concentration), human activities (the tourism and fishing industries), and other factors (food sources, volcanic eruptions, and iceberg calving). VHR remote sensing data-based estimations of penguin populations and GHG emissions will become a research focus in the field of polar ecology, and synthesizes the disciplines of remote sensing, biology, soil science, ecology, and geography.

Antarctic, penguin, greenhouse gas, remote sensing

doi: 10.1360/N972017-00637