

研究论文

基于无人机观测的北极冰面融池及冰面粗糙度信息提取方法研究

王明锋^{1,2} 苏洁^{1,2} 李涛^{1,2} 王晓宇^{1,2} 季青³ 曹勇^{1,2} 林龙^{1,2} 刘一林^{1,2}

¹中国海洋大学, 物理海洋教育部重点实验室, 山东 青岛 266100;

²青岛海洋科学与技术国家实验室, 山东 青岛 266100;

³武汉大学, 中国南极测绘研究中心, 湖北 武汉 430079)

摘要 北极冰面融池对于研究北极海冰质量平衡、海洋混合层热收支和盐量收支等具有重要意义。为了获得准确的融池覆盖率, 本研究提出了一种利用无人机进行北极海冰融池及冰面粗糙度信息提取的方法。在第 7 次中国北极科学考察期间, 利用无人机获取加拿大海盆周边浮冰区冰面航拍影像, 针对海冰航拍图像特殊性改进了基于暗原色先验的图像去雾算法, 对拼接后的航拍图像进行融池识别, 计算得到航拍区域的融池覆盖率。同时利用航拍影像三维建模得到海冰表面相对高程和冰面粗糙度, 继而对融池覆盖率和海冰表面粗糙度分布规律进行研究。结果表明, 在本次航拍区域, 海冰粗糙度大的区域具有更多小面积的融池, 而融透的、面积大的融池多出现在粗糙度小的平整冰区。

关键词 北极 无人机 融池覆盖率 去雾算法 冰面粗糙度

doi: 10.13679/j.jdyj.2017.4.436

0 引言

在北冰洋的海冰融化季节, 海冰和积雪的融水在海冰表面低洼处汇聚形成融池。海冰消融后, 区域反照率降低, 海洋吸收更多的热量, 从而融化更多的海冰, 称为海冰-反照率反馈机制^[1]。融池的反照率约在 10%—50%^[2], 远远小于冰面的反照率, 但大于海水的反照率, 融池的发展会增加冰面透射率, 加热上层海洋, 改变混合层热收支, 加速海冰融化, 因此, 在北冰洋的海冰反照率-反馈机制中, 融池有着至关重要的作用。此外, 融池冻结释放的潜热会减缓海冰底部的增长, 影响冬季的海冰质量平衡。融池渗透带走海冰中的

盐分, 是多年冰脱盐的主要途径。因此, 融池覆盖率对于研究北极海冰质量平衡、海洋混合层热收支、盐量收支等具有重要的意义。

融池覆盖率的时空变化率很大, Perovich 等^[1]在 1998 年 SHEBA 计划期间观测到部分一年冰上的融池覆盖率仅为 20%左右; Eicken 等^[3]的观测显示 2004 年巴罗附近一年冰上的融池覆盖率可以达到 42%^[3]; Fetterer 和 Untersteiner^[4]观测到 1998 年波弗特海多年冰上的融池覆盖率高达 50%。2005 年 Scharien 和 Yackel^[5]在加拿大群岛雷索卢特附近一年冰的观测显示, 融池覆盖率的日变化率达到 35%, Tschudi 等^[6]研究了融池覆盖率在不同纬度的季节变化, 指出在融池覆盖率最大值的出现时间上高纬度晚于低纬度, 但在年平

[收稿日期] 2017 年 6 月收到来稿, 2017 年 7 月收到修改稿

[基金项目] 国家重大科学研究计划(2013CBA01805)、国家重点研发计划(2016YFC1402704)、南北极环境综合考察与评估专项(CHINARE2017-04-02)和国家自然科学基金(41276193)资助

[作者简介] 王明锋, 男, 1993 年生。硕士研究生, 主要从事海冰遥感研究。E-mail:wmfyl@163.com

[通信作者] 苏洁, E-mail:sujie@ouc.edu.cn

均融池覆盖率方面高纬度大于低纬度。

由于现场观测的成本和危险性,融池的观测数据非常稀疏,而获取时空连续的融池数据又十分必要。目前较有代表性的利用可见光遥感数据反演融池覆盖率的算法包括: Rösler 等^[7]利用神经网络算法得到融池覆盖率; Tschudi 等^[6]基于混合像元模型反演得到海盆尺度的融池覆盖率; Istomina 等^[8]发展了基于物理模型的融池反演算法。其中只有 Rösler 的算法(2012)已经发布融池覆盖率产品,但这些算法的准确性仍需要大量实地观测数据进行验证。

通常人们利用现场观测的影像数据进行融池遥感反演结果的验证,如船基走航拍摄和航空拍摄等。SHEBA 计划中对主要站位进行了系统的航空拍摄。结果显示,融池在6月初形成,8月初的海冰融化最盛,融池覆盖率达到20%,8月中旬融池开始冻结,9月中旬融池完全冻结^[9]。Lu 等^[10]利用中国第3次北极科学考察得到的直升机航拍数据对融池形态和空间分布进行了研究,指出融池尺寸分布很好地符合幂法则,在一年冰和多年冰上存在显著差异。Huang 等^[11]对中国第4次北极科学考察的航拍数据进行处理,得到海冰密集度、融池覆盖率以及面积、周长、圆度等融池几何特征参数,为融池模型建立提供观测数据。但是,传统的直升飞机拍摄经济成本高,船基走航拍摄获取的数据为线型分布,难以提供与遥感数据进行比对的、能有效覆盖遥感数据网格的面尺度数据。

近期,国内无人机行业发展迅猛,中国产民用无人机在国际市场上已经处于主导地位^[12],通过不断的技术创新,满足不同用途的新机型层出不穷,在不同行业得到广泛应用。在极地海冰观测领域,无人机也显示了极大的应用潜力,为了探索一个能够低成本获取北极海冰图像的途径,中国第7次北极科学考察过程中,我们使用一款大疆消费级小型无人机(DJI phantom4)成功获取了两个冰站共 $3.16 \times 10^5 \text{m}^2$ 的航拍影像,通过航拍影像数据处理,得到正射影像和冰面高程数据,并推算了融池覆盖率和冰面粗糙度。继而,利用 ERA interim 相关热力学数据分析研究了航拍区域融池再冻结过程;结合短波辐射观测数据讨论了冰面不同地物的辐射特性;对观测区域冰面粗

糙度与融池分布的关系进行了初步分析。

1 数据来源及预处理

2016年中国第7次北极科学考察期间,借助小型四旋翼无人机分别对门捷列夫海脊和加拿大海盆中央区周边的浮冰表面融池特征进行了观测,其中对应的冰站观测站位分别为短期冰站 SS06 (Short-term Station, $76^\circ 18.63' \text{N}$, $179^\circ 35.76' \text{E}$, 8月20日)和长期冰站 LS (Long-term Station, $82^\circ 38.40' \text{N}$, $166^\circ 58.80' \text{W}$, 8月7日),位置见图1。由于长期冰站附近的海冰密集度很高,几乎没有融池,本文主要以融池为研究对象,所以这里仅对短期冰站 SS06 的数据进行分析。

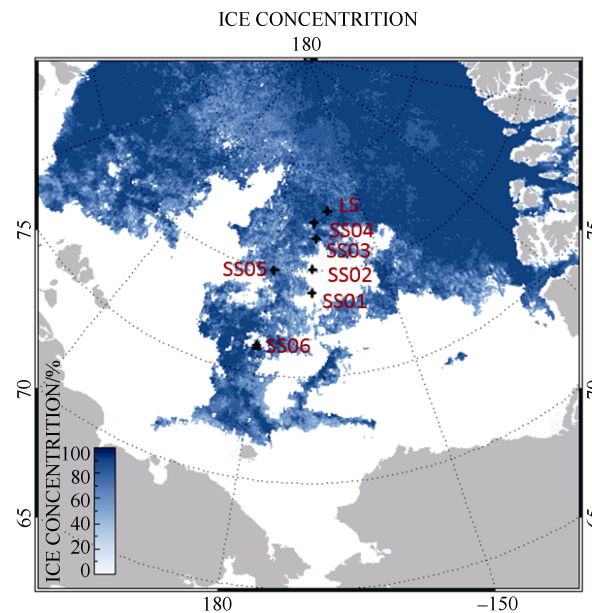


图1 中国第7次北极科学考察冰站位置图。本文使用数据所对应的航拍站位 SS06 为三角符号标识,背景颜色为 AMSR2 反演得到的2016年8月20日海冰密集度

Fig.1. Sea ice stations of 7th Chinese National Arctic Research Expedition. SS06, the station in this paper is marked in triangle symbol; Background color is the sea ice concentration derived from AMSR2 data on August 20, 2016

1.1 航拍数据的获取

执行本次北极夏季浮冰表面融池观测任务的无人机系 DJI 公司生产的商用型小型四轴固定翼无人机(型号: DJI phantom4)。在 $-5 \sim 0^\circ \text{C}$ 的低温条

件下该型号飞行器的有效续航时间不短于 15 min (单电池), 最大飞行速度为 $20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 可以有效地对冰站周边 2.5 km 范围内的浮冰表面特征进行遍历观测。用于记录冰面影像的机载相机安装在飞行器正下方, 使用 1/2.3 SONY 图像传感器, 有效像素为 1 240 万个。为保证图片质量, 飞行窗口尽量选择晴空弱风条件且低空能见度良好时进行, 避免海雾和雨雪天气的影响。

针对本次考察作业区域内海冰的冰情分布, 为保证航片有效覆盖面积, 同时兼顾浮冰表面融池细节, 便于后期对冰面特征进行三维重建, 选择 100 m 作为无人机水平巡航高度。无人机自起飞原点垂直升空达到预定高度(100 m)后, 以 500 m 为边长做弓形折返飞行, 平行线路之间间隔 100 m, 航向重叠率约 70%, 侧向重叠率约 50%, 最终完成对约 $600 \text{ m}\times 500 \text{ m}$ 区域内浮冰冰面特征的航拍测量, 航拍影像及飞行路线见图 2。

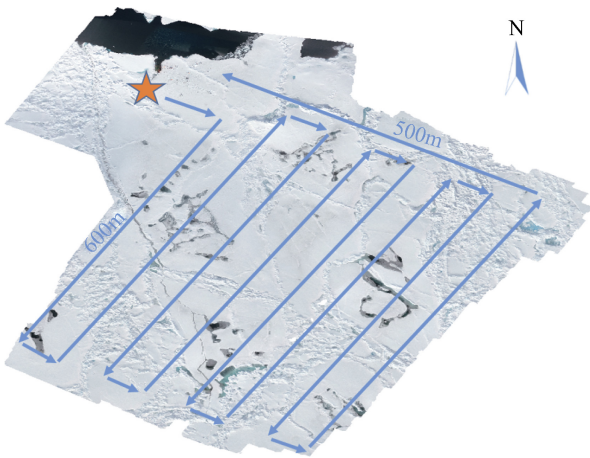


图 2 无人机的飞行路线. 箭头表示飞行方向, 五角星所示为操作无人机人员位置, 底图为航拍影像

Fig.2. Flight trajectory of unmanned aerial vehicle. Arrows indicate the flight direction; pentagram is the position of operation personnel; background is the aerial image mosaic

1.2 航片去雾处理

北极气象条件比较特殊, 云雾出现频繁, 这种天气条件下得到的图像, 往往出现对比度降低、模糊不清的退化现象, 无法进行地物类型的识别。在获得的航片中, 也有部分出现这种情况。因此为了解决航片降质问题, 利用改进的暗原色

先验去雾原理对航片进行了去雾处理。暗原色先验原理由 He 等^[13]在 2009 年最先发现, 是使用大量户外无雾图像得到的统计规律, 并将其应用于图像去雾。对任意户外无雾图像的某一局部小块, 总存在至少一个像素的某个通道强度值很低或接近零, 该强度值就称为暗原色。求取暗原色的数学表达式描述如下:

$$J_{dark}(x) = \min_{c \in \{r, g, b\}} (\min_{y \in \Omega(x)} (J_C(y))) \quad (1)$$

其中, J_{dark} 表示图像 j 的暗原色, J_C 表示像素 x 附近小块区域 $\Omega(x)$ 的 R、G、B 强度值。无雾场景中暗原色接近零, 而当有雾存在时, 会提高暗原色的强度值, 因此可以用暗原色 J_{dark} 估算成像时的雾浓度进而计算大气透射率 $t(x)$, 公式如下:

$$t(x) = 1 - J_{dark}(x) / A_C \quad (2)$$

其中, A_C 为大气光强度。

求得大气透射率后, 由雾天成像的大气光模型公式可以求得最终的去雾图像, 公式如下:

$$I(x) = J(x)t(x) + A(1-t(x)) \quad (3)$$

其中, $J(x)$ 为原始图像, $I(x)$ 即为去雾后的图像。

将基于暗原色先验原理和大气光模型的去雾过程应用到航拍图片时发现, 实际上在明亮的白色冰面无雾图像暗原色接近零的假设是不成立的, 暗原色偏高, 因此求得的透射率偏低, 造成去雾结果的错误。为了解决这个问题设定一个暗原色的阈值 R , 对于暗原色大于 R 的区域(冰面), 公式(2)修改为:

$$t(x) = 1 - |J_{dark}(x) - R| / A_C \quad (4)$$

去雾效果如图 3 所示。可以看到, 去雾处理后冰水区别更加鲜明, 冰面纹理细节和融池的颜色得到还原。

1.3 生成航片拼接影像和数字高程图

图像数据处理使用 AGISOFT 公司出品的 Agisoft Photoscan 软件, 将航片导入软件生成带有真实地理参考的正射影像和带有彩色纹理的数字地表高程模型, 并将结果转换到大地坐标系^[14]。李秀全等^[15]对 Agisoft Photoscan 软件生成的高程模型进行了精度检验, 使用手持 GPS 实际测量了 24 个控制点的坐标, 与软件解译的三维坐标进行对比, 发现总体高程误差控制在 0.05 m 左右, 说明 Photoscan 三维重建得到的高程数据具有较高的精度。

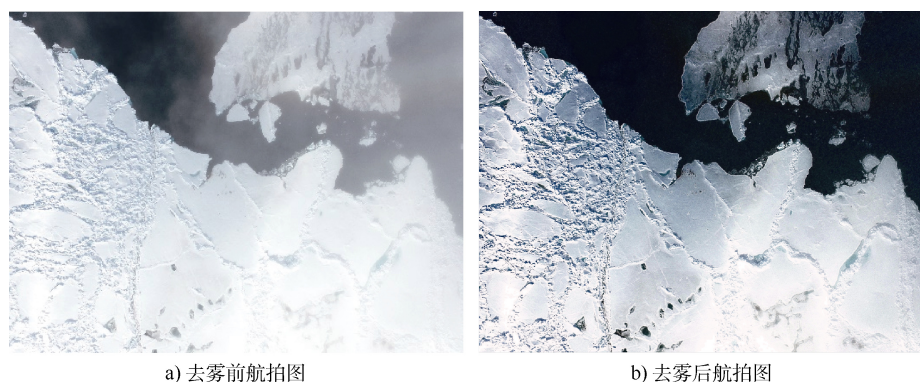


图3 去雾前后的航拍图

Fig.3. Photos from UAV before and after fog filtering

1.4 融池短波辐射观测数据和气温数据

在海冰航拍观测现场同时开展了冰面不同表面类型的短波辐射观测。短波辐射观测采用的测量仪器是 Cropsan 公司生产的多光谱辐射仪 MSR16R, 测量波长范围为 460—1 480 nm。MSR16R 采用垂直测量方式, 32 个集成探测器分为朝上、朝下两组各 16 个探测器, 每上下两个探测元件对应同一个波段, 朝上的探测器接受来自太阳和天空的下行辐照度, 朝下的探测器接受来自地面的反射辐射。由此得到冰面不同地物的反射率, 分析其辐射特性。

本文还使用了 ERA interim 近地面气温、冰温、冰表面感热通量、冰表面潜热通量、地面下行太阳短波辐射数据和地面长波辐射数据研究观测区域的热力学性质。

2 结果分析

对 SS06 短期冰站(图 1 红色标志)获得的 468 张航片进行整理以及去雾处理后, 使用 Photoscan 软件对航片进行拼接合成, 得到冰站附近覆盖区域约 600 m×500 m, 分辨率约 2 cm 的航拍拼接影像(图 4 左图)。其中 A 子区为运送科考人员的黄河艇停泊处, D 子区为科考人员进行融池短波辐射观测现场。从图 4 左图可以看到, 自南而北有狭长的冰间水道(图 4 中黑色箭头所示), 该水道曲折向北延伸, 全长约 621 m, 在水道的附近存在融化程度不同的融池。选择 2 个具有代表性的小区域(图 4 中 B、C 子区), 分别为浅蓝色和绿色两种

颜色不同的融池, 进行融池覆盖率反演。

2.1 融池覆盖率

基于航片进行融池识别, 首先需要确定各类地物在航片中 RGB 3 个通道的灰度值与其光谱反射曲线的关系。光谱反射曲线由第 7 次北极考察现场多光谱辐射测量仪测量获得。图 5 给出了 SS06 冰站坦雪、冰脊雪、融池覆冰、雪坑冰、融池、海水这几种典型地物的光谱反射曲线。由图可见, 反射率随波长增加呈下降趋势, 反射曲线在 600 nm、670 nm 和 700 nm 处具有明显的反射峰, 在 630 nm、690 nm 和 820 nm 处于光谱吸收态, 冻结的融池较未冻结的融池反射率在全波段增加 15%—20%。根据图 5 所示的短波辐射光谱曲线, 冰脊雪反射率在可见光波段略大于平坦雪, 融池的反射率较以往的观测偏高, 原因可能是观测的融池面积较小, 观测仪器受到了周围积雪散射的影响; 雪坑冰因为坑壁四周的多次反射/吸收, 其反射率也远低于平坦雪, 介于融池和融池覆冰之间。这说明除融池外, 冰脊和雪坑冰也是决定冰面太阳短波辐射吸收的重要因素, 而后两者也同时决定冰面粗糙度, 冰面粗糙度的计算详见 2.2 节。

对航片而言, 冰面反射的太阳光线经相机镜头进入相机后, 经红外滤波的光分别进入红绿蓝 3 种基色的光电耦合材料, 耦合材料受光激发产生电子, 转化为电信号。因此像素灰度值实际上可以作为一定波段内光强度的度量。由图 5 航片中 RGB 3 个通道的灰度值与其光谱反射曲线的关系, 可以确定融池的识别方法, 即将图 4D 子区中

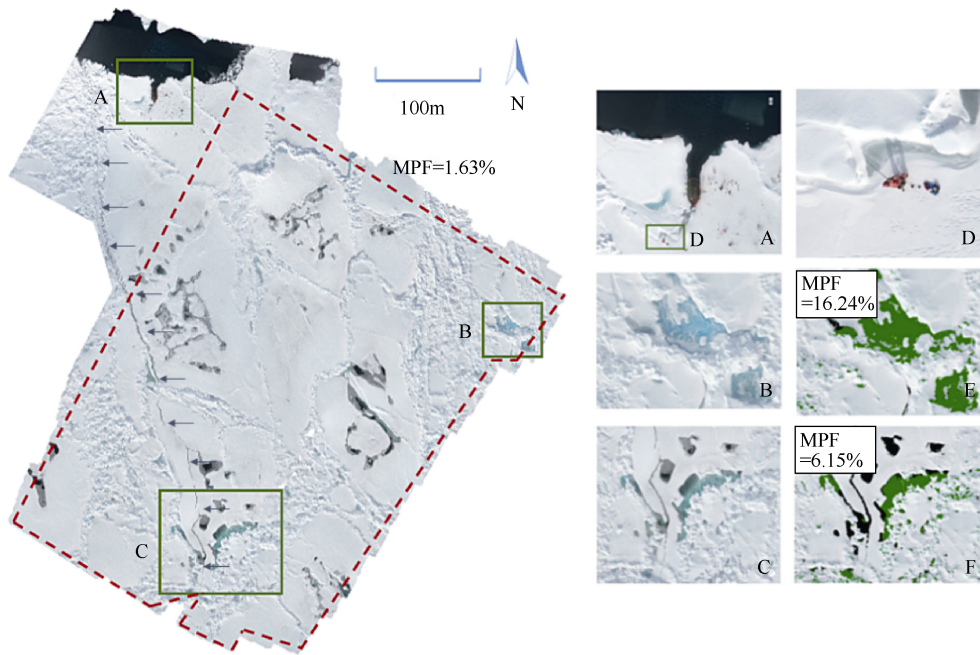


图 4 航片拼接图及融池覆盖率反演结果. A 为 SS06 冰站作业区域, B、C 为两个代表性融池覆盖区域, D 为融池短波辐射观测现场, E、F 为 B、C 的融池识别结果(绿色为融池, 黑色为融透融池), 红框内为 2.2 节进行三维建模的区域

Fig.4. Aerial photo mosaic and melt pond fraction retrieval result. Domain A is the operation area of station SS06; domain B and C are typical melt pond cover areas; domain D is the position of shortwave radiation observation on melt pond; subfigures E and F in right panel are the melt pond discrimination results of domains B and C (green and black regions represent close melt pond and dissolved melt pond, respectively); red dotted line on the left panel marked the area of 3D modeling in section 2.2

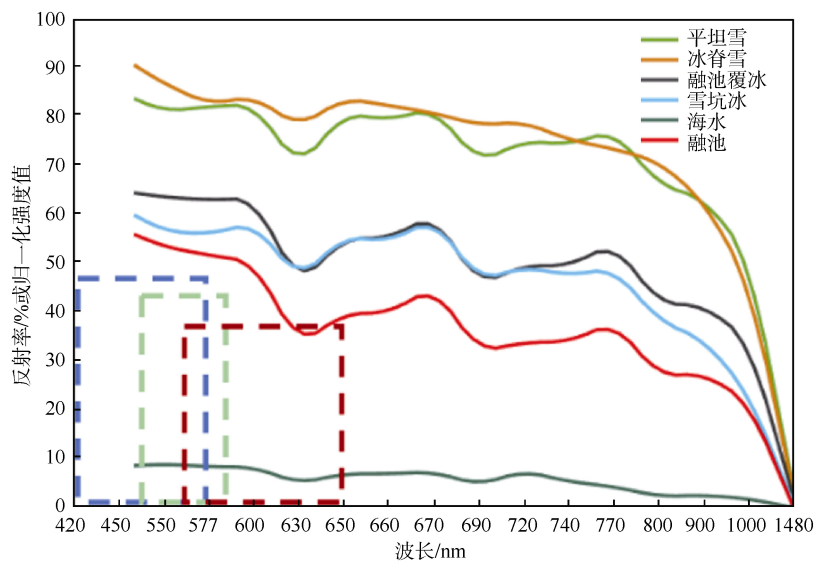


图 5 现场观测的不同冰面类型光谱曲线. 红绿蓝柱形的横坐标范围分别代表航片 D 子区中融池点的 RGB 3 个通道的光谱响应范围, 纵坐标表示归一化的亮度值

Fig.5. Observed spectral albedo curves of different ice types. The x-coordinate range of red, green and blue cylindrical respectively represent the spectral response range of RGB channels of the meltpond in domain D, and the y-coordinate represent the normalization brightness

识别为融池的点的RGB 3个通道的强度值做归一化处理, 结果见图5虚线矩形, 矩形的纵坐标表示归一化像素强度值, 横坐标范围分别表示航拍所用相机的RGB 3个通道光谱响应范围; 可以看出, 融池航拍图像的RGB 3个通道归一化强度值与多光谱辐射计测量得到的对应频率反射率较为吻合, 但总体偏小。原因之一是相比于多光谱辐射计, 相机接收的光经过了一定程度大气散射; 另一方面是因为受相机CCD性能制约, 理想情况下场地定标处理对航测相机CCD光谱响应特性具有更高要求。

根据上述分析, 未融透融池、融透融池、海冰由于不同波段的光谱反射率差异在航片中呈现不同的颜色。统计显示, 融池和融透融池的红色通道强度值较海冰低, 而融池的蓝绿通道与红色通道的差值较其余两者高, 因此, 定义参数 C :

$$C_{ij} = B_{ij} + G_{ij} - 2 \times R_{ij} \quad (5)$$

其中, R_{ij} 、 G_{ij} 、 B_{ij} 分别代表像素点 (i,j) 红、绿、蓝3个通道的强度值, C 越大表示蓝绿通道与红色通道差值越高, 从航片中分别选择3种地物(融池、融透融池和海冰)的 R 和 C 的值域, 如图6所示。

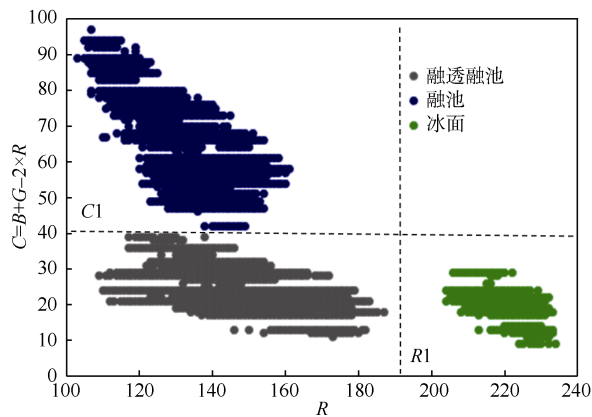


图6 融池识别方法的示意图, 蓝点、绿点、黑点分别代表融池、冰面、融透融池三种类型, 横坐标为航片红色通道的强度值。R1、C1分别为对R和C画直方图人工选取的阈值

Fig.6. The diagram of melt pond discrimination. Blue, green and black dots respectively represent close melt pond, ice and dissolved melt pond; the x-coordinate is the red channel brightness value of the aerial photo; R1 and C1 are obtained by artificial selection from the statistical distribution histogram of R and C respectively

分别画出待识别区域 $C1$ 和 $R1$ 的概率密度分布直方图, 依据贝叶斯原理, 选取概率密度分布直方图的谷值即可作为地物分类的阈值 $R1$ 、 $C1$, 可以直接将图像各像元判别为融池、融透融池和海冰, 识别结果见图4E和4F。

根据以上方法对子区 B 和 C 进行融池识别, 识别结果见图4E和4F, 计算得到的相对融池覆盖率分别为16.14%和6.15%。整个航拍区域总的相对融池覆盖率为1.63%。

图4左图中, 各融池的颜色不尽相同。融池的发展状态不同可能会造成融池颜色的差异。在SS06站观测时, A子区中D子区以北的融池就属于表面冻结的情况。降温过程可能会导致融池表面的再冻结, 改变融池的辐射特性和热收支。当然, 融池深度不同也会导致可见光反射频谱的差异。对不同颜色融池深度和光谱特性的测量, 有待于今后的考察进一步研究。这里, 利用ERA interim数据对8月份该区域相关热力学参数的变化进行分析。图7显示, 航拍时间(8月20日)前三天左右该区域2m冰面气温($T2m$)有所降低, 最低气温下降明显, 相应地冰表面温度($It1$)迅速下降, 现场观测结果也显示融池表面大部分冻结, 融池和海水冻结过程会释放潜热(Fl), 导致局地云和水汽的增加, 这可以解释短波辐射(Dsw)在20日之后明显减小的现象, 而冰温和气温同时降低导致感热(Fs)没有明显变化。冰表面与大气间热量收支关系为:

$$Q_{is} = Fs + Fl + Sw + Lw \quad (6)$$

其中, Q_{is} 为冰表面与大气间热收支, Fs 为冰表面感热通量, Fl 为冰表面潜热通量, Sw 为冰面净太阳短波辐射, Lw 为冰面净长波辐射。

如图7所示, 冰表面与大气间热量收支在航拍前几天有逐渐下降趋势, 航拍前夜处于失热状态, 因此进一步证实航拍观测的融池大部分冻结的情况。

2.2 冰面粗糙度与冰型冰貌观测

冰面粗糙度对融池的形成位置和深度都具有重要影响, 另外, 要准确模拟冰雪表面热收支, 需要确定冰雪和大气界面的潜热和感热动力学传输系数, 而该参数是风速和冰雪冰面粗糙度的函数^[16], 因此冰雪冰面粗糙度的计算具有重要意义。

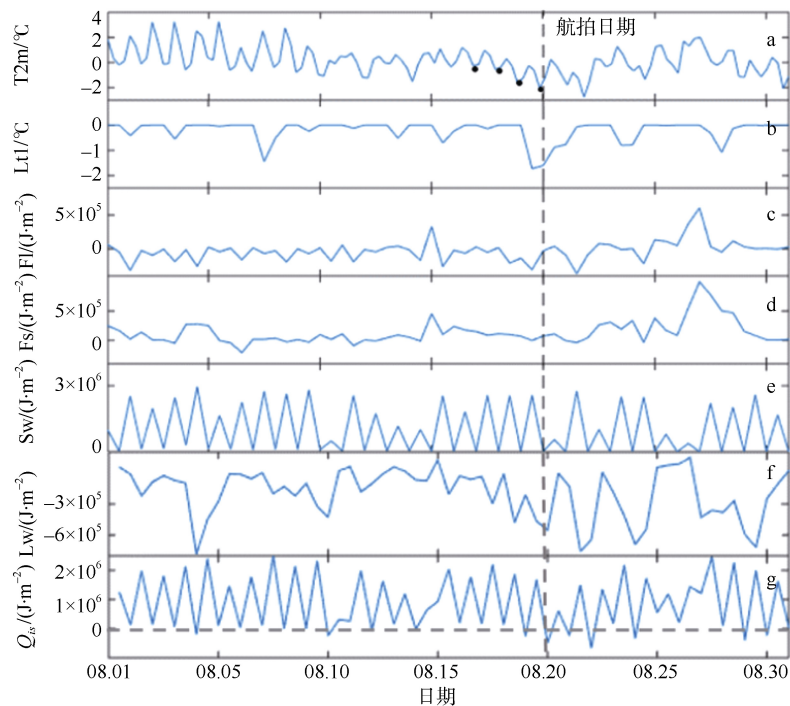


图 7 航拍区域观测时间前 20 天的相关热力学参数。T2m: 近地面气温, Itl: 表面冰温, Fs: 冰表面感热通量, Fl: 冰表面潜热通量, Sw: 冰面净太阳短波辐射, Lw: 冰面净长波辐射, Q_{is} : 冰表面与大气间热收支

Fig. 7. Thermodynamic parameters of the study area during 20 days before the observation date. T2m, air temperature in 2 meters height; Itl, surface ice temperature; Fl, ice surface latent heat flux; Fs, ice surface sensible heat flux; Sw, ice surface net shortwave radiation; Lw, Net longwave radiation on ice surface, Q_{is} , Heat budget between ice and atmosphere

某像元的冰面粗糙度定义为该像元一定邻域内的所有像元相对表面高度的标准差, 设某像元选定邻域范围内的像元相对表面高度表示为 H_i , 平均相对高度为 \bar{H} , 像元个数为 n , 则该像元冰面粗糙度 R 定义为:

$$R = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (H_i - \bar{H})^2}{n}} \quad (7)$$

Beckers 等^[17]使用机载激光扫描仪和激光高度计估算了弗拉姆(Fram)海峡和斯瓦尔巴特群岛北部等海区的海冰冰面粗糙度, 发现在弗拉姆海峡内冰脊方向分布为各向异性, 垂直于海冰主要漂流方向的东-西断面具有更高的海冰粗糙度, 而在斯瓦尔巴特群岛北部没有类似的各向异性。Nolin 等^[18]使用 MISR 数据反演格陵兰岛西部雅各布港冰川的海冰冰面粗糙度, 结果与机载激光高度计估算结果较符合。Peterson 等^[19]在南极阿蒙森湾使用搭载在直升机上的一套集成电磁传感器(测量传感器到冰-水界面距离)和激光高度计(测量传感器到海冰表面距离)的观测系统, 反演

了海冰冰面粗糙度和海冰厚度, 结果显示海冰粗糙度较大的冰脊区通常具有较大的海冰厚度。

在本次考察中, 我们初步尝试通过航拍图片三维建模绘制冰面数字高程图, 从而获取海冰冰面粗糙度。利用 Photoscan 软件进行三维建模后得到数字高程图(图 8a)和带有彩色纹理的三维模型, 直观、量化地展现了观测区域的冰型冰貌。以 5×5 个像素为滑动窗口估算的海冰冰面粗糙度如图 8b 所示。研究区域为图 4 中的红色虚线区域。

结果显示该区域海冰成脊情况严重, 冰脊高度高、覆盖率高, 达到 42%, 呈片状或条状分布, 以经验水准平坦冰面为基准面, 平均相对高度 \bar{H} 为 0.22m, 平均冰面粗糙度 R 为 0.12m, 冰面粗糙度和冰面相对高程有很高的相关性(图 8a, b), 说明影响冰面粗糙度的因素主要是冰面成脊。相对高程大部分在 1m 以下, 最高达到 3 m, 冰面粗糙度大部分为 0.4 m 以下, 很少的区域超过 0.8 m。对融池颜色和大小分布进行统计, 发现海冰粗糙

度大的区域具有更多小面积的融池, 而粗糙度小的平整冰区具有更多融透的、面积较大的融池。这是合理的, 因为融池通常在冰面低洼处由融雪汇聚而成, 在粗糙度小的平整冰区, 融池水更容

易向四周扩展, 形成面积较大的融池, 之后才主要在深度上增加; 同时平整冰的厚度通常较冰脊薄, 更容易融透, 而在冰脊冰附近, 融池水更倾向于逐渐增加深度。

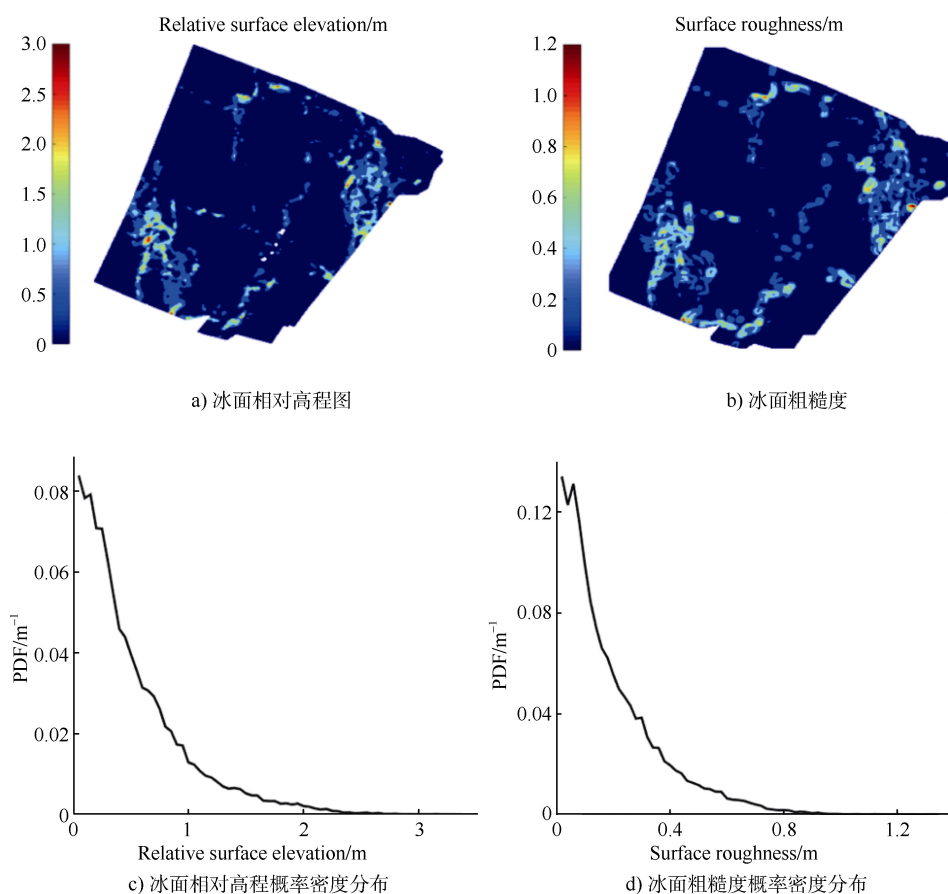


图8 由航拍图片三维建模得到的冰面相对高程图和海冰表面粗糙度

Fig.8. The ice surface relative elevation and surface roughness of sea ice resulted from a 3-dimensional modeling based on the aerial photo

3 小结

国内对于无人机在极区的应用仍然处于探索阶段, 本研究首次在北极利用无人机观测冰面融池和冰型冰貌, 提出利用无人机进行北极冰面融池和冰面粗糙度信息提取的方法。主要结论如下。

1. 北极云雾天气频发, 需要对所获得的无人机航片进行去雾处理。基于传统的暗原色先验原理去雾理论, 针对下界面为海冰时暗原色失效的情况, 修正透射率计算公式, 提供了适用于极地

海冰航拍图片的去雾处理方法。

2. 建立高分辨率的冰面航拍图像融池识别组合判据, 对拼接后的航片进行融池识别, 反演计算观测区域及两个子区的融池覆盖率分别为 1.63%、16.14%和 6.15%。

3. 初步探索利用航拍图片三维建模技术进行海冰冰面粗糙度估算, 计算得到区域平均粗糙度为 0.12 m, 融池分布的统计结果表明, 在本次航拍区域, 海冰粗糙度大的区域具有更多小面积的融池, 而粗糙度小的平整冰区具有更多融透的、面积大的融池。

与传统的船基和直升机观测方法相比, 无人

机的便携性和高分辨率, 将作为北极海冰融池覆盖率监测的有力工具, 本文进行了初步的尝试。若与卫星过境时间相协调, 还可以为相关海冰遥感产品的验证提供数据。

参考文献

- 1 Perovich D K, Grenfell T C, Richter-Menge J A, et al. Thin and thinner: Sea ice mass balance measurements during SHEBA[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2013, 108(C3): 8050.
- 2 Untersteiner N. Natural desalination and equilibrium salinity profile of perennial sea ice[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1968, 73(4): 1251—1257.
- 3 Eicken H, Grenfell T C, Perovich D K, et al. Hydraulic controls of summer Arctic pack ice albedo [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2004, 109(C8).
- 4 Fetterer F, Untersteiner N. Observations of melt ponds on Arctic sea ice[J]. *Journal of Geophysical Research: Ocean*, 1998, 103(C11): 24821—24835.
- 5 Scharien R K, Yackel J J. Analysis of surface roughness and morphology of first-year sea ice melt pond: Implications for microwave scattering[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2005, 43(12): 2927—2939.
- 6 Tschudi M A, Maslanik J A, Perovich D K. Derivation of melt pond coverage on Arctic sea ice using MODIS observation[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(5): 2605—2614.
- 7 Rösel A, Kaleschke L, Birnbaum G. Melt ponds on Arctic sea ice determined from MODIS satellite data using an artificial neural network[J]. *The Cryosphere*, 2012, 6(2): 431—446.
- 8 Istomina L, Heygster G, Huntermann M, et al. The melt pond fraction and spectral sea ice albedo retrieval from MERIS data: validation and trends of sea ice albedo and melt pond fraction in the arctic for years 2002—2011[J]. *The Cryosphere Discussion*, 2014, 8(5): 5227—5292.
- 9 Perovich D K, Tucker W B, Ligett K A. Aerial observations of the evolution of ice surface conditions during summer[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2002, 101(C10): SHE 24-1-SHE 24-14.
- 10 Lu P, Li Z J, Lei R B, et al. Aerial observations of melt pond distributions in Arctic summer 2008[C]//*The Proceedings of The Twenty-first (2011) International Offshore and Polar Engineering Conference*. Maui, Hawaii: International Society of Offshore and Polar Engineers, 2011: 1—4.
- 11 Huang W, Lu P, Lei R B, et al. Melt pond distribution and geometry in high Arctic sea ice derived from aerial investigations[J]. *Annals of Glaciology*, 2016, 57(73): 105—118.
- 12 宇辰网. 中国民用无人机发展概况[J]. *机器人产业*, 2017(1): 52—58.
- 13 He K M, SUN J, TANG X O. Single image haze removal using dark channel prior[C]//*Proceedings of 2009 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Miami, Florida: IEEE, 2009: 1956—1963.
- 14 张小宏, 赵生良, 陈丰田. Agisoft Photoscan 在无人机航空摄影影像数据处理中的应用[J]. *价值工程*, 2013(20): 230—231.
- 15 李秀全, 陈竹安, 张立亭. 非量测相机影像三维模型构建及精度检验[J]. *测绘科学*, 2016, 41(6): 144—147.
- 16 Andreas E L. A Theory for the scalar roughness and the scalar transfer coefficients over snow and sea ice[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 1987, 38(1): 159—184.
- 17 Beckers J F, Renner A H H, Spreen G, et al. Sea-ice surface roughness estimates from airborne laser scanner and laser altimeter observations in Fram Strait and north of Svalbard[J]. *Annals of Glaciology*, 2015, 56(69): 235—244.
- 18 Nolin A W, Fetterer F M, Scambos T A. Surface roughness characterizations of sea ice and ice sheets: case studies with MISR data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2002, 40(7): 1605—1615.
- 19 Peterson I K, Prinsenber S J, Holladay J S. Observations of sea ice thickness, surface roughness and ice motion in Amundsen Gulf[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2008, 113(C6): C06016.

STUDY ON THE METHOD OF EXTRACTING ARCTIC MELT POND AND ROUGHNESS INFORMATION ON SEA ICE SURFACE BASED ON UAV OBSERVATION

Wang Mingfeng^{1,2}, Su Jie^{1,2}, Li Tao^{1,2}, Wang Xiaoyu^{1,2}, Ji Qing³, Cao Yong^{1,2},
Lin Long^{1,2}, Liu Yilin^{1,2}

¹Physical Oceanography Laboratory/CIMST, Ocean University of China, Qingdao 266100, China

²Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266100, China

³Chinese Antarctic Center of Surveying and Mapping, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

Abstract

Arctic melt pond over sea ice surface is of great significance in the study of Arctic sea ice mass balance and heat and salt balances in the ocean mixed layer. In order to obtain accurate melt pond fraction, this paper proposes a method for extracting Arctic melt pond and roughness information from the sea ice surface based on unmanned aerial vehicle (UAV) observations. We made UAV observations over the sea ice surface in the Canada basin during the 7th Chinese National Arctic Research Expedition. Improvement on the dark-channel-prior defogging algorithm based on the special environment of Arctic, a mosaic process, melt pond discrimination on the mosaic image, and melt pond fraction calculation were done step by step. Meanwhile, we used three-dimensional aerial-image modeling to calculate the sea ice surface relative elevation and sea ice surface roughness. Study on the relationship of melt pond and sea ice surface roughness distribution showed that areas with higher surface roughness generally have more smaller melt ponds, whereas dissolved and larger melt ponds usually occur in areas with lower surface roughness.

Key words Arctic, unmanned aerial vehicle(UAV), melt pond fraction, defogging algorithm, sea ice surface roughness