

风云三号卫星 MERSI 影像提取北极海冰参数的方法

周颖¹, 匡定波², 巩彩兰^{2*}, 胡勇², 方圣辉¹, 张熠¹, 彭漪¹

(1. 武汉大学 遥感信息工程学院, 武汉 430072;

2. 中国科学院上海技术物理研究所 中国科学院红外探测与成像技术重点实验室, 上海 200083)

摘要: 风云三号卫星 MERSI 影像的空间分辨率达到 250 m, 不仅可以长期宏观监测海冰整体分布变化, 而且能够观测分析破碎冰块的面积、圆度等细节形态特征. 从海冰光谱特征和冰块灰度分布特征出发, 给出 MERSI 影像提取海冰整体分布参数和冰块形态参数方法, 包括海冰识别、冰块分离提取以及海冰参数提取, 利用这些方法成功提取了 2014 年夏季弗拉姆海峡海冰边缘区的海冰细节信息. 给出的方法可为研究分析北极海冰变化及海气相互作用提供方法支持和信息保障.

关键词: MERSI 影像; 海冰分布; 冰块形态; 特征参数; 北极

中图分类号: TP7 **文献标识码:** A

A method to extract parameters of Arctic sea ice from FY-3/MERSI imagery

ZHOU Ying¹, KUANG Ding-Bo², GONG Cai-Lan^{2*}, HU Yong²,
FANG Sheng-Hui¹, ZHANG Yi¹, PENG Yi¹

(1. School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. Key Laboratory of Infrared System Detection and Imaging Technology,

Shanghai Institute of Technical Physics Chinese Academic of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: With high spatial resolution of 250 m, MERSI images obtained from FY-3 satellite not only reveals information about the long term distribution of sea ice in large scale, but also contains information about its detailed shape characteristics, such as ice block area and roundness. Based on the spectral feature of sea ice and gray distribution feature of ice block, an integral method and process for extracting the macroscopic sea ice distribution and detail ice block shape parameters was proposed in this paper. This method consisted of sea ice recognition, ice block detection and sea ice parameters extraction. In the summer of 2014, the detail sea ice information of the marginal ice zone in the Fram Strait was extracted accurately by using the proposed method. And consequently this method can provide methodological support and information security for the study on the change of Arctic sea ice and interaction between atmosphere and ocean.

Key words: MERSI imagery, sea ice distribution, ice block shape, characteristic parameter, Arctic

PACS: 95.75.Rs

引言

由于海冰对太阳辐射的反射率远大于海水, 它

的存在阻止了大气与海洋之间直接的能量交换, 进而调控全球大气和海洋的能量平衡. 近 40 年来, 北极海冰面积快速缩减, 作为全球气候变化的重要标

收稿日期: 2016-01-27, 修回日期: 2016-11-04

Received date: 2016-01-27, revised date: 2016-11-04

基金项目: 国家自然科学基金(41401490); 中国科学院上海技术物理研究所创新专项项目(Q-ZY-52)

Foundation items: Supported by National Natural Science Foundation of China (41401490) and the special fund of innovation project of Shanghai Institute of Technical Physics of the Chinese Academic of Sciences(Q-ZY-52)

作者简介 (Biography): 周颖(1985-), 女(土家族), 湖北利川人, 博士后, 主要研究领域为遥感信息提取与应用、海洋遥感. E-mail: zhouying_85@126.com

* 通讯作者 (Corresponding author): E-mail: gclsw@163.com

志物,它的变化影响北极乃至全球大气环流和气候变化^[1]. 由于北极地区复杂恶劣的气候和海洋环境,北极海冰信息实地观测数据较少,遥感技术具有大尺度、可重复和成本低的优势,是长期动态获取北极海冰信息的首选手段.

目前,海冰范围、冰型、密集度以及厚度等海冰动力特征参数是海冰遥感主要研究对象^[2]. 海冰在外力作用下通常会破碎成大小不同、形状各异的破碎海冰,海冰的分布、形态特征与海冰、海洋和大气三者的水热交换关系密切,因此仅仅了解海冰动力学参数是不够的,需要获取更精细的海冰分布和形态特征. 卢鹏等已经利用航拍影像成功提取了部分海冰的分布和形态参数,但是航拍影像覆盖的空间和时间范围有限,难以提供大范围海冰的时序变化信息^[3]. 随着卫星遥感数据的空间分辨率不断提高,利用卫星遥感数据提取海冰分布和形态参数显得尤为重要,能够为海冰变化特征分析提供长期基础数据.

北极海冰研究中应用最广泛的卫星遥感数据是被动微波数据,但是被动微波数据的空间分辨率较低,能够获取的海冰细节信息非常有限^[4]. 可见光和红外遥感可以反映海冰的辐射特性,对北极海冰研究同样十分重要. 利用 AVHRR 数据能够准确获取海冰类型、海冰密集度以及海冰表面温度等参数信息^[5]. MODIS 空间分辨率和光谱分辨率都优于 AVHRR,在计算北极海冰覆盖范围和海冰密集度时发挥了重要作用^[6]. 我国风云三号卫星上搭载的中分辨率光谱成像仪(MERSI)设置的可见-近红外通道 1~4 以及热红外通道 5 的空间分辨率都为 250 m,与 MODIS 相比性能更优越,可以提供更多更精细的海冰信息.

本文利用多时相的高分辨率风云三号卫星 MERSI 影像,从边缘清晰较易观测的冰块入手,研究北极海冰分布和形态参数提取方法. 首先根据海冰的光谱特征,通过海冰识别确定影像中海冰覆盖范围,然后考虑冰块与碎屑冰在灰度分布特征上的差异,实现冰块的分离提取. 在此基础上,计算提取海冰总面积、海冰密集度、冰块密集度等整体分布参数以及冰块的面积、周长、圆度等形态参数.

1 研究区域和研究数据

弗拉姆海峡是北冰洋与北大西洋进行冰-水交换的主要通道,也是北极海冰最大的输出口,尤其是海峡内海冰与开阔海水交界的海冰边缘区,是海冰

与海洋、大气热量和能量交换最激烈的关键区域^[7]. 因此,选择弗拉姆海峡海冰边缘区(10°W~8°E,77°N~81°N)作为研究区域.

为说明研究区域海冰参数的变化情况,本文选择 2014 年 6 月 10 日、7 月 14 日和 8 月 18 日的 3 个时相的风云三号卫星 MERSI 影像,并对影像进行了辐射定标、几何校正、重采样和裁剪等预处理. 预处理后影像都采用极地方位投影,空间分辨率为 250 m,影像尺寸为 1 600 像元×1 600 像元,即 400 km×400 km. 图 1 为经过预处理后对应的 3 个时相影像.

2 海冰参数提取方法

2.1 海冰覆盖识别

北极地区地物类型少,但是在夏季,海冰边缘区海冰融化减少,海气间直接交换强烈,云量增多,云是干扰海冰识别的主要因素. 预处理完成后影像中包括海冰、海水以及云,确定海冰覆盖需要去除云和海水信息,剩下的即海冰.

根据海冰、云以及海水在可见、近红外波段的反射光谱特性,文献[8]分别以 MERSI 通道 1 与通道 2 反射率之比和归一化冰雪指数(NDSI)作为海水和云的判别指标,通过图像分割先后生成海水掩模和云掩模,最终实现图像中海水和云信息的去除. 其中归一化冰雪指数(NDSI)定义为:

$$NDSI = \frac{\rho_2 - \rho_6}{\rho_2 + \rho_6}, \quad (1)$$

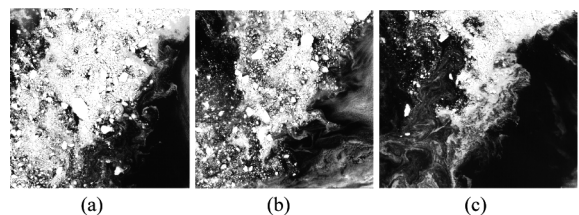


图 1 预处理后 3 个时相 MERSI 影像 (a) 6 月 10 日, (b) 7 月 14 日, (c) 8 月 18 日

Fig. 1 The preprocessed MERSI images. (a) June 10, (b) July 14, (c) August 18

其中, ρ_2 、 ρ_6 分别为 MERSI 通道 2 和通道 6 反射率.

在 1.6 μm 附近,云的反射率相对于海冰和海水都有较大差异, NDSI 能够突出云与海冰、海水的反射特性差异,并在一定程度上消除大气辐射及仪器的影响. 但是对比 NDSI 图像(图 2)及其所对应的云识别结果(图 3)发现,云覆盖的区域没有完全被识别出来,例如图 3 中红框区域的部分云像元被漏

识别. MERSI 通道 6 的中心波长位于 $1.64 \mu\text{m}$, 利用该通道反射率信息能更直接反映云的反射特性. 图 4 是通道 6 反射率图像及其图像分割结果, 可以看到利用通道 6 反射率图像, 能够改善红框区域的识别效果. 因此, 为了获取更准确的云识别结果, 本文在 NDSI 的基础上增加了 MERSI 通道 6 反射率作为云识别指标, 综合利用 NDSI 和通道 6 反射率两个识别指标建立云识别式为:

$$\begin{cases} NDSI < T_{ndsi} \\ \rho_6 > T_{b6} \end{cases} \quad (2)$$

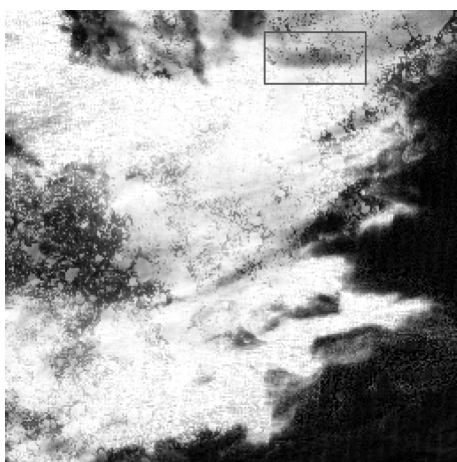


图 2 NDSI 图像
Fig. 2 Image of NDSI

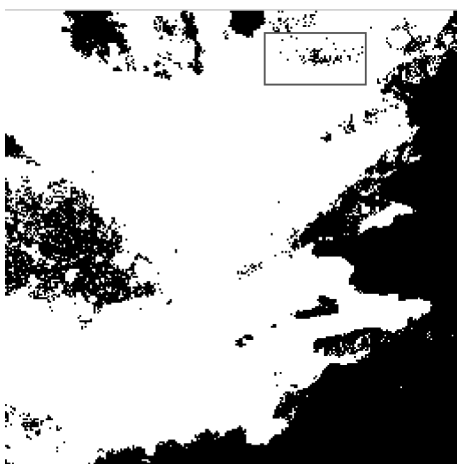


图 3 NDSI 识别云结果(黑色区域为云)
Fig. 3 Cloud recognition result by NDSI (The black pixels indicate cloud)

利用式(2)得到云识别结果如图 5 所示, 可以看出增加通道 6 反射率指标后识别出的云像元增多, 综合利用两个识别指标识别出的云覆盖区域更全面, 能够最大程度地降低云对海水识别以及后续

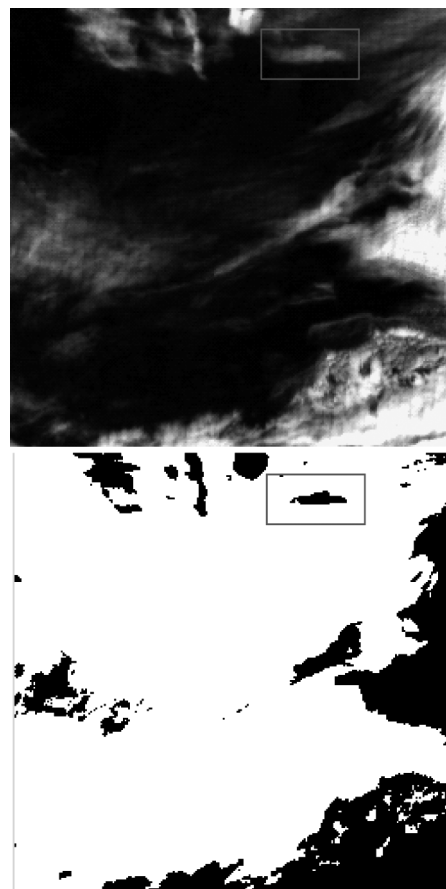


图 4 通道 6 反射率图像及其图像分割结果
Fig. 4 Reflectance image of channel 6 and the segmentation result from the image

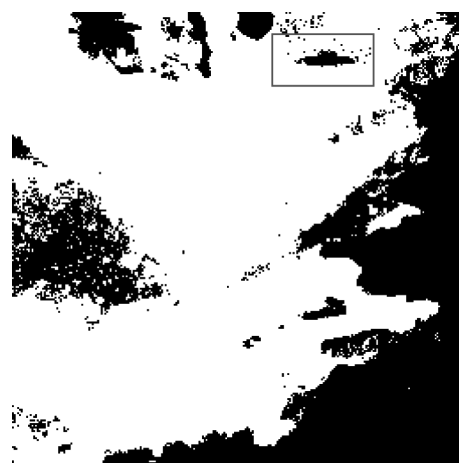


图 5 本文云识别结果(黑色区域为云)
Fig. 5 Cloud recognition result by the suggested method (The black pixels indicate cloud)

冰块提取的干扰.

同样, 对于海水识别, 文献[8]根据在 MERSI 通道 1 和通道 2 波段范围内海水与海冰反射率变化规

律差异,利用这两个通道反射率的比值实现冰水分离.进一步分析海冰与海水的反射特性,发现海水的反射率在 $0.6 \mu\text{m}$ 以后远远低于海冰的反射率,因此本文在利用通道 1 和通道 2 的比值的基础上,增加 MERSI 通道 3(中心波长 $0.65 \mu\text{m}$) 反射率指标进一步区分海冰和海水,最终建立海水识别式为:

$$\begin{cases} \rho_1/\rho_2 < T_{b1/b2} \\ \rho_3 > T_{b3} \end{cases}, \quad (3)$$

其中, ρ_1, ρ_2, ρ_3 分别为 MERSI 通道 1、2、3 的反射率.图 6 和图 7 分别是增加通道 3 反射率指标前后的海水识别结果,对比这两幅图像以及图 1(b),可以看到增加指标前后海水识别结果的主要差异集中在海水与海冰的交界的边缘区以及海冰破碎程度大的冰水混和区,只用两通道比值指标会将这两个区域的部分海水像元识别为海冰像元,这会损失海冰分布的细节信息,通过增加识别指标,冰水混合区内海水也被识别出来,有利于准确提取冰块及其密集度等形态参数.



图 6 两通道比值识别海水结果(黑色区域为海水)

Fig. 6 Sea water recognition by ratio of two channels(The black pixels indicate sea water)

通过改进云识别和海水识别,本文能够确定更准确的海冰覆盖范围,完成海冰覆盖识别,而这个过程的关键是确定合适的阈值 T_{ndsi} 、 T_{b6} 、 $T_{b1/b2}$ 、 T_{b3} .由图 1 可以看出不同时相图像中云、海水以及海冰的状态都有差异,采用统一阈值分割指标图像会造成识别误差.在不同时相图像中,云层厚度及其位置和面积都不尽相同,因此对应的云识别指标图像的灰度分布情况以及分割阈值存在差异.云层厚度影响通道 6 反射率图像的灰度分布,云层越厚,该指标图像中云区灰度值越大,分割阈



图 7 本文海水识别结果(黑色区域为海水)

Fig. 7 Sea water recognition with the suggested method (The black pixels indicate sea water)

值 T_{b6} 也相应越大.云对海冰和海水像元在通道 2 反射率的影响不同,被云覆盖的海冰区域灰度值降低,而被云覆盖的海水区域灰度值升高,从而影响 NDSI 值的灰度分布,因此云覆盖的位置和面积会造成 NDSI 图像分割阈值 T_{ndsi} 的差异.随着时间推移,海冰不断融化破碎,图像中海冰像元减少而海水像元增多,这时两通道比值图像中灰度值接近 1 的像元减少,灰度值远大于 1 的像元增多,为了保留完整的海冰像元,比值图像的分割阈值 $T_{b1/b2}$ 随之增大.而且随着海冰消融,海冰在通道 3 处的反射率也有所降低,该指标图像分割阈值 T_{b3} 相应减小.因此本文根据每个时相图像的灰度信息,采用最大类间方差阈值法自动确定最佳阈值对指标图像进行分割,从而实现海冰覆盖识别.

2.2 冰块分离提取

虽然去除云和海水后,图像中只剩下海冰,但是海冰尺寸和形状各异,本文将研究区域内海冰分为独立冰块和冰块之间夹杂的碎屑海冰两类(见图 8).由于海冰消融过程的差异,不同融化程度的海冰反射率存在差异,呈现出不同的颜色^[10].独立冰块边缘清晰可辨,亮度大且灰度分布均匀,间杂在独立冰块之间尺寸很小的碎屑海冰融化程度强于独立冰块,而且各种消融程度的碎屑海冰以及海水混合在一起,因此碎屑海冰较独立冰块色调较暗,且灰度分布杂乱,边缘和形状难以确定.本文只以独立冰块为研究对象,根据两类海冰灰度分布和形状差异,采用梯度和阈值分割相结合的方法实现独立冰块识别提取和碎屑海冰去除.实际上,独立冰块与碎屑海冰是相对于卫星数据的空间分辨率而言的,本文采用

的 MERSI 数据空间分辨率为 250 m,因此本文提取出来的独立冰块只能是像元面积的整数倍,因此后续所提取的冰块分布和形态参数的数值范围与精确度也被限制在像元级。

首先利用 4 个方向的梯度算子(图 9),获取海冰覆盖识别图像对应的梯度图像.因为独立冰块内部灰度分布均匀,与碎屑海冰相邻的边缘灰度变化剧烈,而碎屑海冰面积非常小,灰度分布杂乱,因此在梯度图像中碎屑海冰区域以及独立冰块的边缘变得突出.然后分别对海冰覆盖识别图像进行梯度分割处理,使

$$g(x,y) = \begin{cases} 0 & grad_i(x,y) \geq T_i, i = 1,2,3,4 \\ f(x,y) & \end{cases}, \quad (4)$$

其中 $f(x,y)$ 为海冰覆盖识别图像, $g(x,y)$ 为梯度分割处理后图像, $grad_i(x,y)$ 为第 i 幅梯度图像, T_i 为第 i 幅梯度图像分割阈值,本文采用第 i 幅梯度图像中所有非 0 像元灰度值标准差的 1/3 作为该幅梯度图像的分割阈值。

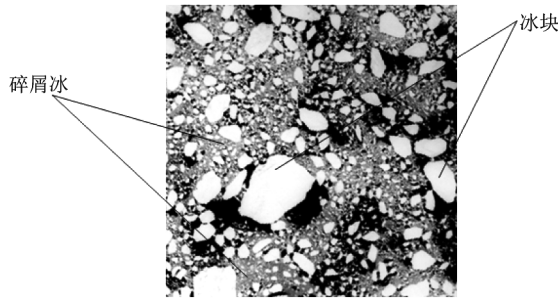


图 8 冰块与碎屑冰
Fig. 8 Ice block and trash ice

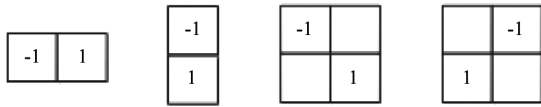


图 9 梯度算子
Fig. 9 Gradient operators

此时大部分碎屑冰已去除,但是一些连接成片的碎屑冰区域灰度变化不明显,梯度分割无法完全去除.因此,再根据碎屑冰与冰块灰度值的差异,进一步对梯度分割处理后图像 $g(x,y)$ 进行阈值分割和二值化,得到二值图像 $h(x,y)$:

$$h(x,y) = \begin{cases} 1 & g(x,y) \geq T_{\text{block}} \\ 0 & \end{cases}, \quad (5)$$

其中阈值 T_{block} 采用最大类间方差阈值法确定。

因为二值图像中一些冰块存在“空洞”,还有不少离散的孤立点,会影响后续海冰参数的提取,因此采用形态学开运算和闭运算对冰块二值图像进一步修复。

2.3 冰块分离提取

2.3.1 海冰分布参数

经过海冰覆盖识别以及冰块分离提取,影像中海冰覆盖区域以及冰块分布情况都已确定,进一步提取海冰分布参数包括:

(1) 海冰覆盖面积 S_{ice}

经过海冰覆盖识别,海冰覆盖范围已经确定,海冰覆盖面积可以计算为:

$$S_{\text{ice}} = N_{\text{ice}} \times pix^2, \quad (6)$$

其中, N_{ice} 为海冰像元个数总和, pix 为影像的空间分辨率。

(2) 海冰密集度 C_{ice}

海冰密集度是指一定区域内海冰覆盖面积与整个区域面积的比值,即:

$$C_{\text{ice}} = \frac{S_{\text{ice}}}{S_{\text{total}}} \times 100\%, \quad (7)$$

其中, S_{total} 为整个图像区域面积。

(3) 冰块数量 N_{block} 及其密集度 B

海冰密集度反映了海冰在整个图像区域范围内所占比例,但是相同海冰密集度下,冰块和碎屑冰的组成和分布可能存在很大差异.为了反映这两种海冰在海冰覆盖区域的数量和分布情况,我们统计了冰块的数量 N_{block} ,并定义新参数——冰块密集度 B ,为冰块总面积与整个区域面积的比值,即:

$$B = \frac{S_{\text{block}}}{S_{\text{total}}} \times 100\%, \quad (8)$$

其中 S_{block} 为所有冰块面积之和。

2.3.2 冰块形态参数

根据提取出的每块冰块对应的像元集合,提取冰块的形态参数包括:

(1) 面积 A

单块冰块对应的区域面积.冰块面积描述海冰的二维尺寸特征。

(2) 周长 P

单块冰块对应的边缘长度。

(3) 平均钳测直径 L

若以两条平行线夹住冰块的边缘,然后以 x^+ 方向为零度,逆时针旋转一周,平行线间距的均值称为平均钳测直径.当平行线倾斜角度为 θ 时,平行线间距即为

$$L_{\theta} = \max(x\sin\theta + y\cos\theta) - \min(x\sin\theta + y\cos\theta), \quad (9)$$

其中 (x, y) 为该冰块像素坐标,平行线旋转一周,也就是 θ 在 $[0, \pi]$ 范围内变化,则平均错测直径为:

$$L = \text{mean}[\max(x\sin\theta + y\cos\theta) - \min(x\sin\theta + y\cos\theta)] \quad (10)$$

平均错测直径和周长用来描述冰块的一维尺寸特征.

(4) 圆度 R

定义为冰块周长与相同面积的圆冰块周长之比,即:

$$R = \frac{P^2}{4\pi A} \quad (11)$$

圆度反映海冰形状复杂的程度,同时也反映海冰形状接近圆形的程度,海冰形状越复杂,圆度就会越大,偏离圆形也越大.

(5) 凸度 C

定义为周长与平均错测直径的比值,即:

$$C = \frac{P}{L} \quad (12)$$

凸度反映冰块形状的凹凸性,若冰块存在明显凹陷,则凸度增大,凹陷程度越大,凸度越大.

(6) 体态比 G

矩法是描述区域形状特征的一种经典有效的方法.根据矩描述,定义冰块的长轴长度 M_1 和短轴长度 M_2 分别为与冰块具有相同零阶矩、一阶矩和二阶矩的椭圆的长轴长度和短轴长度,即:

$$M_1 = 2 \left[\frac{2(\mu_{20} + \mu_{02} + \sqrt{(\mu_{20} - \mu_{02})^2 + 4\mu_{11}^2})}{\mu_{00}} \right]^{1/2}$$

$$M_2 = 2 \left[\frac{2(\mu_{20} + \mu_{02} - \sqrt{(\mu_{20} - \mu_{02})^2 + 4\mu_{11}^2})}{\mu_{00}} \right]^{1/2} \quad (13)$$

其中, $\mu_{20} = \sum (x - \bar{x})^2$, $\mu_{02} = \sum (y - \bar{y})^2$, $\mu_{11} = \sum (x - \bar{x})(y - \bar{y})$, μ_{00} 为该冰块的面积,即 $\mu_{00} = A$, (x, y) 为该冰块的像元坐标, (\bar{x}, \bar{y}) 为该冰块所有像元坐标计算所得的均值.

定义体态比为冰块的短轴长度与长轴长度的比值,即:

$$G = \frac{M_2}{M_1} \quad (14)$$

体态比反映冰块被拉长的程度,体态比越小,则冰块越狭长.

3 提取结果分析

根据上述方法,分别提取了图1中的3个时相图像中海冰的分布和形态参数,表1给出了3幅图像提取出的海冰整体分布参数.从表1可以看出,图1(b)中云的面积明显偏大,对比图1(b)及其对应的海冰识别结果(图10),发现云(图10中红色区域)覆盖的主要是海水区域,影响海水面积的统计,对海冰参数提取的影响较小.

比较3幅图像提取的海冰分布参数发现,从6月到8月研究区内的海冰面积不断缩减,冰块数量也相应减少,海冰密集度和冰块密集度都随之降低,这是北极夏季辐射增强,海冰加速破碎、融化的结果.但是冰块密集度的降低速率明显比海冰密集度快,图1(b)与图1(a)相比冰块密集度降低了2/3,海冰密集度只降低了1/3,说明这两个参数反映的海冰分布特征有差异.海冰密集度的变化只反映海冰“从有到无”的融化、消亡情况,冰块密集度变化能够反映海冰“从冰块到碎屑”的破碎情况.而且独立的冰块与挤在一起的碎屑冰对水热交换的影响不同,因此海冰密集度和冰块密集度一起能更全面准确地刻画海冰分布特征.

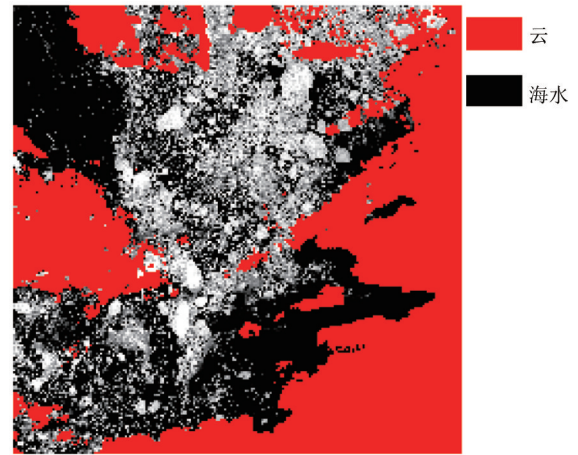


图10 图1(b)的海冰覆盖识别结果

Fig. 10 The sea ice coverage recognized from Fig. 1(b)

表2给出了3幅图像中所有冰块的形态参数,每个形态参数都以最小值、最大值、均值以及标准差的形式给出.受数据空间分辨率和海冰破碎过程的影响,因此3幅图中所有冰块形态参数的最小值都受到限制.

表2中反映冰块尺寸特征的面积、周长以及平均错测直径的总体趋势都是逐渐减小,但是各参数

的变化情况并不完全相同. 7 月 14 日时的冰块周长最大值反而大于 6 月 10 日. 比较图 1(b) 与图 1(c) 以及对应的冰块提取结果(图 11、图 12), 图 1(b) 中面积较大的冰块由于破碎、融化出现众多“空洞”和“缺口”, 故这些冰块的边缘曲折复杂, 造成提取的冰块周长增加, 而它们的面积却明显减少, 因此它们的面积和周长的变化趋势相反, 而且面积越大的冰块反差越明显. 圆度、凸度和体态比 3 个参数反映海冰形状特征, 曲折复杂的边缘也使得图 1(b) 中冰块的圆度和凸度最大值明显增加, 体态比的定义限制其最大值为 1. 另外, 3 幅图中冰块的尺寸差别明显, 但是圆度、凸度和体态比的均值和标准差变化幅度不大, 说明海冰的形状具有相似性, 基本都是接近于圆的凸图形^[11].

根据对 3 幅图像中冰块面积最大最小值、均值和标准差的统计, 发现冰块面积的差别非常大. 为了更详细直观地描述冰块大小的差别, 将冰块按面积大小分为小型冰块、中型冰块、大型冰块和巨型冰块

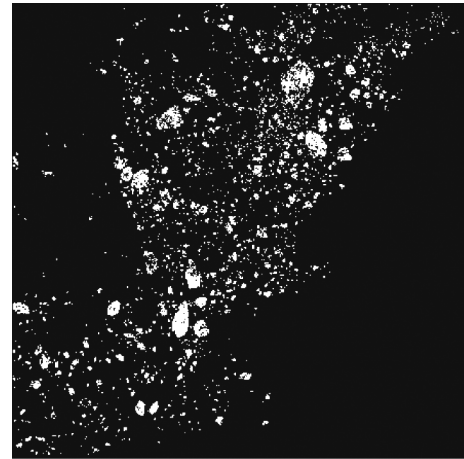


图 11 图 1(b) 的冰块分离提取结果
Fig. 11 The ice blocks detected from Fig. 1(b)

4 类:

- 1) 小型冰块 < 16 个像元, 即面积 < 1 km² 的冰块;
- 2) 中型冰块 16 ~ 160 个像元, 即面积为 1 ~ 10

表 1 3 幅图像提取的海冰分布参数

Table 1 Sea ice distribution parameters extracted from the three images

	海冰面积/km ²	海水面积/km ²	云面积/km ²	海冰密集度	冰块数量/块	冰块密集度
图 1(a)	86 945.9	63 467.4	9 586.7	54.3%	2 983	15.8%
图 1(b)	57 500.8	50 833.1	51 666.1	35.9%	1 793	5.1%
图 1(c)	42 017.6	112 911.7	5 070.7	26.3%	854	2.2%

表 2 3 幅图像提取的冰块形态参数

Table 2 Ice block shape parameters extracted from the three images

	面积/km ²	周长/km	平均锚测直径/km	圆度	凸度	体态比
图 1(a)	最小值	0.38	1.50	0.48	2.69	0.20
	最大值	1357.06	289.00	52.10	5.40	1.00
	均值	8.46	7.54	2.40	0.88	0.72
	标准差	34.40	10.09	2.69	0.37	0.18
图 1(b)	最小值	0.38	1.50	0.48	2.76	0.21
	最大值	416.81	432.00	33.33	35.63	1.00
	均值	4.65	6.96	1.88	1.05	0.73
	标准差	17.54	15.28	2.15	1.21	0.20
图 1(c)	最小值	0.38	1.50	0.48	2.75	0.26
	最大值	145.25	126.00	20.09	8.70	1.00
	均值	4.13	6.39	1.86	0.97	0.72
	标准差	9.74	9.27	1.84	0.74	0.20

表 3 3 幅图像中的冰块分类统计表

Table 3 Ice block classification statistics

		小型冰块	中型冰块	大型冰块	巨型冰块	所有冰块
图 1(a)	数量/块	765	1751	430	37	2 983
	面积/km ²	533	5 697.1	11 024.4	7 990.9	25 245.5
图 1(b)	数量/块	712	937	136	8	1 793
	面积/km ²	475.2	2 818.9	3 327.6	1 723.7	8 345.4
图 1(c)	数量/块	284	498	70	2	854
	面积/km ²	183.7	1 412.8	1 681.6	249.6	3 527.7

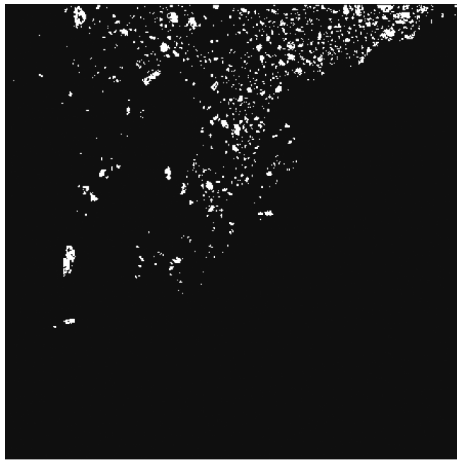


图 12 图 1-(c) 的冰块分离提取结果
Fig. 12 The ice blocks detected from Fig. 1(c)

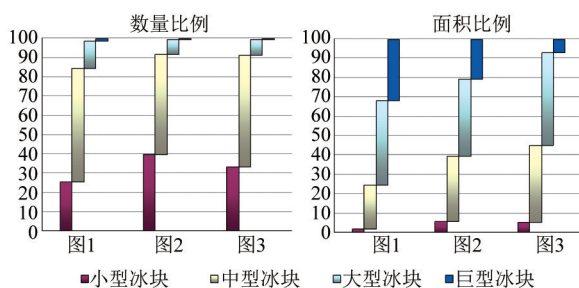


图 13 各类冰块所占比例
Fig. 13 The proportion of different kinds of ice blocks

km² 的冰块;

3) 大型冰块 160 ~ 1 600 个像元, 即面积为 10 ~ 100 km² 的冰块;

4) 巨型冰块 > 1 600 个像元, 即面积 > 100 km² 的冰块。

对 3 幅图像中 4 类冰块分别按照数量和面积进行统计, 得到结果如表 3 和图 13 所示. 3 个时相图像中都是中型冰块数量最多, 占到 50% 以上, 小型冰块次之, 大型和巨型冰块很少, 体现了海冰边缘区海冰的特点, 由于频繁受到波浪的入侵, 海冰边缘区内海冰尺寸差异明显. 虽然从图 1-(a) 到图 1-(c), 冰块数量和面积都在减少, 海冰密集度也减小, 波浪影响的范围和强度都增大, 边缘区冰块尺寸变化加快, 4 类冰块所占的比例也会变化, 巨型冰块的数量和面积比例都明显减少, 大型冰块的变化不大, 中型和小型冰块二者所占比例增加. 弗拉姆海峡作为北极海冰最大的输出口, 该区域内海冰运动速度快, 运动方向多是由北向南, 从北极穿过该海峡再注入格陵兰海^[12]. 因此该海峡内冰块种类的变化主要有

两个原因: 一是冰块自身融化和破碎使得面积大的冰块减少、面积小的冰块增多; 二是冰块的运动, 海峡内原有的巨型和大型冰块流出, 而从北极中心区域流入的主要是面积较小的冰块. 后续结合冰块的运动速度进一步分析该海峡冰块输入输出量, 为分析北极海冰变化提供新的技术思路.

4 结论

给出风云三号卫星 MERSI 影像提取海冰分布和形态参数的完整流程和方法, 利用这些方法成功提取了 2014 年夏季弗拉姆海峡海冰边缘区的海冰细节信息, 可为分析海冰参数的时序变化及其物理过程提供科学数据和方法支持.

通过增加识别指标改进了云和海水识别模型, 提高了海冰覆盖识别精度. 为实现冰块与碎屑冰的分离, 提出了梯度和阈值分割相结合的方法, 既有效去除碎屑冰, 又准确保留了完整冰块. 在此基础上, 提取了与冰块分布相关的冰块数量和冰块密集度两个参数, 并对冰块进一步提取面积、周长、平均锚测直径、圆度、凸度和体态比 6 个形态参数. 冰

本文以风云三号卫星 MERSI 影像提取海冰参数的方法研究为主, 仅采用三幅 MERSI 影像实验进行个例分析, 后续将应用本文方法从长时间序列 MERSI 影像中提取海冰分布和形态参数, 全面详细地分析北极海冰变化特征.

致谢: 感谢国家卫星气象中心提供的 FY-3/MERSI 影像数据.

References

- [1] STROEVE J C, SERREZE M C, HOLLAND M M, *et al.* The Arctic's rapidly shrinking sea ice cover: A research synthesis[J]. *Climatic Change*, 2012, 110(3-4): 1005 - 1027.
- [2] CAO Mei-Sheng, LI Xin, CHEN Xian-Zhang, *et al.* Cryosphere Remote Sensing[M]. Beijing: Science Press(曹梅盛, 李新, 陈贤章, 等. 冰冻圈遥感. 北京: 科学出版社), 2006.
- [3] LU Peng, LI Zhijun, ZHANG Zhanhai, *et al.* Arctic sea ice distribution in summer based on aerial photos[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2005, 24: 62 - 67.
- [4] W. Gareth Rees. Snow and Ice remote sensing[M]. (车涛, 高峰, 等译. 冰雪遥感. 第 1 版. 郑州: 黄河水利出版社, 2011).
- [5] SCOTT K A, BUEHNER M, CAYA A, *et al.* A preliminary evaluation of the impact of assimilating AVHRR data on sea ice concentration analyses[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2013, 128(128): 212 - 223.

(下转第 126 页)

VV 极化更适于干旱区土壤水分监测,并且在土壤水分含量 0~30%、组合地表粗糙度 0~0.06 cm 的区间范围内响应程度最为敏感,超过阈值可能逐渐出现“饱和现象”,敏感程度开始降低。

(2) 对 Sentinel-1 雷达影像预处理方法进行了初探,去噪过程中 7×7 窗口 GammaMAP 滤波效果较好,去除了大部分明显的斑点噪声,其后,利用构建的干旱区土壤水分经验模型获取了研究区土壤水分空间分布图。Sentinel-1 雷达影像反演情况同该时期研究区野外实际情况具有良好的一致性。四月是渭—库绿洲的春早期,这一时期降水稀少,蒸发强烈,植被处于生长发育初期且覆盖度普遍较低,研究区绿洲—荒漠交错带及外围荒漠区整体旱情较严重,较湿润区主要呈沿山区及绿洲内部稀疏植被覆盖脉络和近河流、灌渠沿线等分布特征。

(3) 野外土壤水分实测数据同模型模拟值之间进行了相关分析,0~10 cm 表层土壤水分实测值同模拟值之间相关系数达到了 0.76,符合区域尺度土壤水分建模的精度要求,表明构建的经验模型对于干旱区土壤水分提取具有一定的区域尺度适用性。此外,今后通过进一步工作改进或减少模型构建及地表参数定量化过程中出现的误差问题,模型精度仍有进一步提升的空间。

References

- [1] YU Fan, LI Hai-Tao, ZHANG Cheng-Ming, *et al.* Data assimilation on soil moisture content based on multi-source remote sensing and hydrologic model [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (余凡,李海涛,张承明,等.多源遥感数据与水文过程模型的土壤水分同化方法研究. *红外与毫米波学报*), 2014, **33**(6):603–607.
- [2] LI Xiang, DING Jian-li. Soil moisture monitoring based on measured hyper spectral index and HSI image index [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineer-*

ing (李相,丁建丽.基于实测高光谱指数与 HSI 影像指数的土壤含水量监测. *农业工程学报*), 2015, **31**(19):68–75.

- [3] LI Li, WANG Di, WANG Peng-Xin, *et al.* Progress on monitoring soil moisture using SAR data [J]. *Resources Science* (李俐,王荻,王鹏新,等.合成孔径雷达土壤水分反演研究进展. *资源科学*), 2015, **37**(10):1929–1940.
- [4] YANG Tao, GONG Hui-Li, LI Xiao-Juan, *et al.* Progress of soil moisture monitoring by remote sensing [J]. *Acta Ecologica Sinica* (杨涛,宫辉力,李小娟,等.土壤水分遥感监测进展. *生态学报*), 2010, **30**(22):6264–6277.
- [5] PALOSCIA S, PETTINATO S, SANTI E, *et al.* Soil moisture mapping using Sentinel-1 images: Algorithm and preliminary validation [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2013, **134**(4):234–248.
- [6] DOBSON M C, ULABY F T, HALLIKAINEN M T, *et al.* A microwave dielectric behavior of wet soil part II: Dielectric mixing models [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1985, **GE-23**(1):35–46.
- [7] DING Jian-li, YAO Yuan. Evaluation of soil moisture contents under sparse vegetation coverage conditions using microwave remote sensing technology in arid region [J]. *Scientia Geographica Sinica* (丁建丽,姚远.干旱区稀疏植被覆盖条件下地表土壤水分微波遥感估算. *地理科学*), 2013, **33**(3):837–843.
- [8] ZHANG Yan-Ning, LI Ying. The key technology of SAR image processing [M]. Beijing: Electronic Industry Press (张艳宁,李映. SAR 图像处理的关键技术 [M]. 北京:电子工业出版社), 2014:36–41.
- [9] WU T D, CHEN K S, SHI J C. A study of an AIEM model for bistatic scattering from randomly rough surfaces [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, **46**(9):2584–2598.
- [10] CHEN Jing, JIA Yi, YU Fan. Soil moisture inversion by radar with dual-polarization [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (陈晶,贾毅,余凡.双极化雷达反演裸露地表土壤水分. *农业工程学报*), 2013, **29**(10):109–115.
- [11] ZRIBI M, DECHAMBRE M. A New Empirical Model to Retrieve Soil Moisture and Roughness from Radar Data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, **84**(1):42–52.

(上接第 48 页)

References

- [6] KANG Daehyun, IM Jungho, LEE Myong-In, *et al.* The MODIS ice surface temperature product as an indicator of sea ice minimum over the Arctic Ocean [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2014, **152**:99–108.
- [7] KWOK R, GUNNINGHAM G F, PANG S S. Fram Strait sea ice outflow [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2004, **109**(C1):1–14.
- [8] ZHOU Ying, GONG Cai-Lan, HU Yong, *et al.* Extraction of Sea Ice Information in the Arctic Ocean by Using FY-3/MERSI Data [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental*

Optics (周颖,巩彩兰,胡勇,等.风云三号 MERSI 数据提取北冰洋海冰信息方法研究. *大气与环境光学学报*), 2013, **8**(1):53–59.

- [9] RIGGS G A, HALL D K, ACKERMAN S A. Sea ice extent and classification mapping with the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer Airborne Simulator [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1999, **68**(2):152–163.
- [10] KE Chang-Qing, XIE Hong-Jie, LEI Rui-Bo, *et al.* Spectral Features Analysis of Sea Ice in the Arctic Ocean [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis* (柯长青,谢红接,雷瑞

- 波,等. 北极海冰的光谱特征分析. 光谱学与光谱分析), 2012, 32(4): 1081 - 1084.
- [11] LU Peng. Study on Sea Ice Geometric Parameters and Parameterization of Drag Coefficient Based on Image Analysis [D]. Dalian University of Technology(卢鹏. 基于图像分析的海冰几何参数和拖曳系数参数化研究. 大连理工大学), 2007.
- [12] WIDELL K, ØSTERHUS S, GAMMELSRØD T. Sea ice velocity in the Fram Strait monitored by moored instruments [J]. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(19): 379 - 394.