

羊丽青,林文明.中法海洋卫星微波散射计海冰区后向散射系数时空变化特征[J].海洋气象学报,2024,44(4):76-90.
YANG Liqing, LIN Wenming. Spatial and temporal characteristics of CSCAT backscattering coefficient over sea ice zone[J]. Journal of Marine Meteorology, 2024, 44(4): 76-90. DOI: 10.19513/j.cnki.hyqxxb.20240109001. (in Chinese)

中法海洋卫星微波散射计海冰区后向散射系数时空变化特征

羊丽青^{1,2}, 林文明^{1,2}

(1.南京信息工程大学海洋科学学院,江苏 南京 210044;2.自然资源部空间海洋遥感与应用重点实验室,北京 100081)

摘要 以往基于微波散射计的海冰遥感研究主要是进行海冰和海水的区分,进而探究海冰的覆盖范围。中法海洋卫星(China-France Oceanography SATellite, CFOSAT)散射计(SCATterometer, 简称为“CSCAT”)利用扇形波束旋转扫描对地面进行观测,其多入射角和多方位角的观测几何特点为海冰监测提供了新机遇。首先将CSCAT后向散射系数数据与欧洲气象卫星应用组织的海冰密集度(sea ice concentration, SIC)数据进行匹配,其次分析南北两极不同海冰密集度下CSCAT后向散射系数的季节性变化,厘清CSCAT海冰后向散射系数的时空分布特征,为后续构建海冰后向散射地球物理模式函数(Geophysical Model Function, GMF)奠定基础。结果表明,CSCAT后向散射系数随海冰密集度的增加而增强。海冰密集度较低时,CSCAT在南北两极的后向散射系数具有良好的一致性,但存在明显的风速调制效应,且该效应随着海冰密集度的增加逐渐减弱。研究结果为利用扇形波束旋转扫描散射计进行海冰密集度遥感提供参考。

关键词 中法海洋卫星(CFOSAT);散射计;海冰密集度(SIC);后向散射系数;时空分布特征

中图分类号: P715.6 **文献标志码**: A **文章编号**: 2096-3599(2024)04-0076-15

DOI: 10.19513/j.cnki.hyqxxb.20240109001

Spatial and temporal characteristics of CSCAT backscattering coefficient over sea ice zone

YANG Liqing¹, LIN Wenming^{1,2}

(1. School of Marine Sciences, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2. Key Laboratory of Space Ocean Remote Sensing and Applications, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081, China)

Abstract Previous studies on the sea ice remote sensing based on microwave scatterometers mainly focus on distinguishing sea ice from sea water, and in turn, exploring the coverage of sea ice. The scatterometer onboard China-France Oceanography SATellite (CFOSAT), namely CSCAT, uses rotary fan beams to observe the earth surface, such that its multi-incidence and multi-azimuth observation geometry provides new opportunities for sea ice monitoring. In this study, the CSCAT backscattering coefficient data are firstly collocated with the sea ice concentration (SIC) data from European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites (EUMETSAT), and then the seasonal variations of the CSCAT backscattering coefficient under different SIC conditions in the Arctic and Antarctic are analyzed. Consequently, the spatial and temporal characteristics of the CSCAT

收稿日期:2024-01-09;修回日期:2024-03-24

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFC3104900,2022YFC3104902)

第一作者简介:羊丽青,女,硕士研究生,研究方向为海冰遥感,ylq19970619@163.com。

通信作者简介:林文明,男,博士,教授,研究方向为海洋微波遥感、先进数据处理方法、雷达定标技术、海面风场遥感及应用,wenminglin@nuist.edu.cn。

backscattering coefficient over the sea ice zones are derived, which provide a foundation for developing a sea ice geophysical model function (GMF). The results show that the CSCAT backscattering coefficient increases with SIC. Under low SIC condition, the CSCAT backscattering coefficient shows good consistency in the Arctic and Antarctic, but there is an obvious modulation by wind speed, whose effect weakens as the SIC increases. In summary, the study provides relevant hints for the SIC retrieval using the scatterometer with fan-beam rotary scanning system.

Keywords China-France Oceanography SATellite (CFOSAT); scatterometer; sea ice concentration (SIC); backscattering coefficient; spatial and temporal characteristics

引言

极地海冰对海洋环流以及海洋水文要素的垂直分布有着重要影响,也是全球气候模型的重要输入和气候变化的敏感指标,一直受到气候研究人员的关注^[1-3]。海冰形成过程中析出盐可以导致冰下海水密度增加,有助于垂直方向的海洋温盐环流,而海冰融化会增加上层海洋的层结^[4]。因此,研究极地海冰的时空特性对于监测全球气候变化、天气预报、渔业捕捞和海洋运输具有重要意义^[4-6]。

卫星遥感是研究极地海冰的有效手段。用于海冰监测的遥感传感器主要包括可见光和红外传感器^[7]、微波辐射计^[8]、合成孔径雷达^[9]以及微波散射计^[10]等。但是可见光和红外传感器容易受到云、雾、极夜等天气条件的影响,造成遥感图像质量下降,从而影响观测结果。而星载微波传感器具有全天候、近实时、大范围、且长期连续观测等优点^[11]。其中,微波辐射计在海冰遥感中的应用最早且最为成熟。1990年代以来,微波散射计开始用于海冰探测,其中包括C波段的欧洲遥感卫星(European Remote Sensing Satellite,简记为“ERS-1”)^[12]、ERS-2^[13]、ASCAT(Advanced SCATterometer)^[14]以及Ku波段的美国航空航天局散射计(NASA SCATterometer, NSCAT)^[15]、快速散射计(Quick SCATterometer, QuikSCAT)^[16]、海洋二号A卫星(HY-2A)散射计^[17]、海洋二号B卫星(HY-2B)散射计^[18]、中法海洋卫星(China-France Oceanography SATellite, CFOSAT)微波散射计(SCATterometer,简记为“CSCAT”)^[19-21]等。其中,CSCAT是国际上首次采用扇形波束旋转扫描体制的卫星散射计^[22],较笔形波束散射计能获取更多丰富的观测几何信息以及更多的观测样本数,能够以多入射角对同一海面网格单元进行观测,为研究海冰后向散射、改进海冰反演方法、

提高反演精度提供了新的机遇^[23]。

既往的研究中,散射计数据多应用于海冰范围、分类、漂移和运动监测等方面的研究^[24]。海冰覆盖的洋面表面与开阔大洋表面的雷达后向散射特征明显不同^[15,25],为利用扇形波束散射计进行高精度海冰探测提供了可能性。卫星散射计的海冰监测方法主要分为散射机制和数据驱动两种类型^[26-27],这两种类型的方法都是基于海冰和开阔洋面的散射特性对比。基于CSCAT测量海冰雷达后向散射的研究很少,只有Li等^[28]和刘建强等^[25]对CSCAT在海冰环境下的后向散射系数进行了初步研究,因此文中主要是进一步研究CSCAT海冰区后向散射的时空分布特征。首先将CSCAT后向散射系数数据与欧洲气象卫星应用组织(European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites, EUMETSAT)的海冰密集度(sea ice concentration, SIC)数据进行匹配,其次分析南北两极不同SIC下CSCAT后向散射系数的季节性变化,厘清CSCAT海冰后向散射系数的时空分布特征,为构建海冰后向散射地球物理模式函数(Geophysical Model Function, GMF)提供思路,对Ku波段扇形波束旋转扫描散射计的海冰区后向散射进一步研究,为开展高精度海冰遥感提供新的支撑。

1 数据和方法

1.1 数据

文中基于CSCAT L1B数据产品开展极地海冰区雷达后向散射系数(σ^0)的时空分布特征研究。该数据为沿轨条带(slice)数据,原始分辨率约为10.0 km×12.5 km,包括 σ^0 、方位角、入射角、残差等参数,比L2数据包括更多的原始信息,后者是将L1B σ^0 按照入射角和方位角相近原理进行平均处理后的结果,每个L2观测网格的空间分辨率为12.5 km×12.5 km或

25.0 km×25.0 km,最多包括16条数据。

CSCAT海冰匹配使用的是欧洲气象卫星应用组织海洋与海冰卫星应用设施(Ocean and Sea Ice Satellite Application Facility, OSI SAF)提供的SIC数据。该数据^[29]产品是利用多源卫星遥感数据融合处理得到的,时间分辨率为1 d,空间分辨率为10 km。由于参考的SIC数据本身具有一定的误差,且SIC的概率分布不十分均匀,文中将海冰密集度的值(V_{SIC})划分为以下5个区间:(1) $V_{SIC} < 15\%$, (2) $15\% \leq V_{SIC} <$

30% , (3) $30\% \leq V_{SIC} < 50\%$, (4) $50\% \leq V_{SIC} < 70\%$, (5) $V_{SIC} \geq 70\%$ 。其中,下限15%的取值依据是海冰覆盖范围统计通常只计算 $V_{SIC} \geq 15\%$ 的海冰面积,即 $V_{SIC} < 15\%$ 的海面视为海水表面^[26];上限70%的取值依据是OSI SAF将 $V_{SIC} \geq 70\%$ 的海冰区定义为密集冰区^[25]。两者之间以15%~20%的间隔划分区间既确保每个区间的样本数足够多,又能反映散射计 σ^0 随SIC变化的趋势。图1展示了2021年1月10日南北两极SIC数据的分布情况。

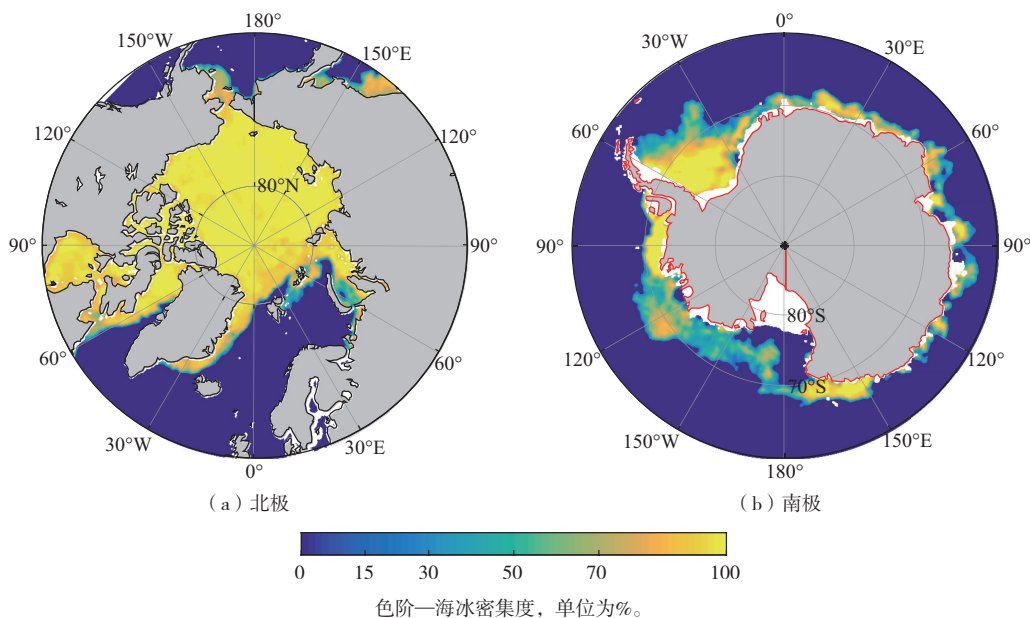


图1 2021年1月10日南北两极OSI SAF海冰密集度分布

Fig.1 Distribution of OSI SAF sea ice concentration in the Arctic and Antarctic on 10 January 2021

此外,研究冰水混合海面的后向散射特征还需要海面风场的信息。文中使用欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)提供的海面10 m高度逐3 h的预报风场,通过时空插值获取与CSCAT观测位置和时间相匹配的ECMWF风场数据^[25]。

1.2 数据匹配

为了方便后续的分析处理,研究以OSI SAF海冰密集度数据产品的极射赤平投影网格为基准,利用改进的CSCAT数据处理软件将观测入射角和方位角相近的L1B原始分辨率的条带 σ^0 直接平均处理,得到10 km网格分辨率的格点 σ^0 ,进而开展 σ^0 的时空分布特征研究。与以往将L2数据和参考数据(如OSI SAF海冰密集度数据)时空匹配相比,这种投影处理方法更为直接,避免了数据空间匹配引入的代表性误

差,同时也能充分利用CSCAT原始空间分辨率较高的优点,为探索高分辨率海冰遥感提供新的技术支持。极射赤平投影的处理流程如下:首先将CSCAT L1B数据 σ^0 的经度 θ 或纬度 φ 转化为弧度,其次利用公式(1)~(4)计算投影变化的系数 r ^[30]。

$$t = \frac{\tan\left(\frac{\pi - \varphi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right)}{\left(\frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi}\right)^{\frac{c}{2}}}, \quad (1)$$

$$t_c = \frac{\tan\left(\frac{\pi - \varphi_c}{4} - \frac{\varphi_c}{2}\right)}{\left(\frac{1 - \sin \varphi_c}{1 + \sin \varphi_c}\right)^{\frac{c}{2}}}, \quad (2)$$

$$m_c = \frac{\cos \varphi_c}{\sqrt{1 - e^{2\sin^2 \varphi_c}}}, \quad (3)$$

$$r = am_c \frac{t}{t_c} \quad (4)$$

式中: a 为地球赤道半径; e 为地球偏心率; t 、 t_c 、 m_c 和 r 为中间变换系数; φ 为CSCAT L1B数据 σ^0 的纬度,单位为rad; φ_c 为投影参考点的纬度,为常数,在处理北半球的数据时, $\varphi_c = 1.2217$ rad,在处理南半球的数据时, $\varphi_c = -1.2217$ rad。之后,利用下列变换关系式得到投影网格的坐标值 (x, y) 。

$$\begin{cases} x = p_m r \sin(\theta - \theta_c) \\ y = p_m r \cos(\theta - \theta_c) \end{cases} \quad (5)$$

式中: θ 为CSCAT L1B σ^0 数据的经度,单位为rad; p_m 和 θ_c (投影参考点的经度)为常数,在处理北半球的数据时, $p_m = 1$, $\theta_c = -0.7854$ rad,在处理南半球的数据时, $p_m = -1$, $\theta_c = 0$ 。通过式(5)计算得到极射赤平投影坐标 x 和 y ,即可以OSI SAF海冰密集度数据产品的极射赤平投影网格为基准进行匹配。

2 结果分析

2.1 不同入射角下海冰区后向散射时空分布特征

不同SIC下和不同入射角下的海冰 σ^0 明显不同。C波段固定扇形波束散射计和Ku波段笔形波束扫描散射计的海冰散射模型已得到了较为充分的研究^[22],然而自NSCAT失效以后,目前针对Ku波段扇形波束散射计的海冰散射的研究十分有限。CSCAT同时拥有水平(HH)极化和垂直(VV)极化两种方式,在轨期间均工作良好^[22]。通过分析不同SIC下CSCAT测量的HH和VV极化平均 σ^0 随入射角和风速的变化,可以拓展人们对Ku波段扇形波束散射计在海冰区后向散射特征的认知。刘建强等^[25]已对VV极化 σ^0 随入射角和风速的变化进行了研究,因此尽管文中对CSCAT的两种极化方式都进行了研究,这里为了简洁每部分仅展示一种极化方式(HH或VV) σ^0 的分析结果。

2.1.1 南北两极海冰区 σ^0 的分布特征

通过对比、分析南北两极海冰区 σ^0 随海面风速和观测入射角的变化特点,阐述海冰区CSCAT后向散射的空间分布特征。随机选取某月份(如2021年6月)的数据,图2展示了南北两极HH极化 σ^0 随入射角和风速变化的二维等值线。可以看出, $V_{SIC} < 15\%$ 时,南北两极的雷达后向散射特征具有良

好的一致性, σ^0 等值线与观测入射角近似呈线性关系(图2a、f);不完全重合主要是因为考虑 σ^0 随风向变化的情况。随着SIC的增加, σ^0 存在显著增强,但两极的后向散射特征存在明显的不同。VV极化分析的主要结论与HH极化一致,不再展示。总体上,南极海冰区的 σ^0 显著大于北极海冰区,可能的原因有以下两点:首先,该时段北极处于海冰消融期,而南极处于海冰增长期,后者冰水混合的海面更加复杂,或导致更强的雷达后向散射;其次,图2没有考虑风向的调制效应,该时段南北极的气候态平均风向有可能刚好使CSCAT在北极的相对方位角趋于侧风向(σ^0 较小),在南极的相对方位角趋于迎风向或逆风向(σ^0 较大)^[25]。特别地,由图2a—e可以看出,北极海域6月的 σ^0 随SIC的增加而增强的幅度很小,这种增幅比同年其他月份明显更小(图略);相同地,由图2f—j可以看出,北极海域6月的这种增幅也比同月南极海域的增幅小。当 $V_{SIC} \geq 70\%$ 时,由图2e、j可知,南北两极 σ^0 等值线差异巨大,且 σ^0 的风速调制效应较小。注意,图2中的空白部分表示相应的风速-入射角区间的样本数小于10,因缺乏统计显著性不予展示,说明该月份北极海域缺乏高风速的情况(图3)。

SIC较低的海域,散射计观测面元内既有海冰又有大面积的裸露海水,其测量的 σ^0 受风生浪的布拉格散射和海冰表面粗糙度的双重调制,由图2b、c、g、h可见, σ^0 呈现出风速的调制效应。随着SIC的增大,由于散射计观测面元内裸露海水的占比减小,因此其 σ^0 的风速调制效应逐渐变小(图2d、e、i、j),特别地,随着SIC的增加,南极海域受风速调制效应的影响比北极海域所受影响更小,这可能与6月属于南半球的秋冬季有关,该月份南极处于海冰增长期。

2.1.2 σ^0 的时间变异性

随着季节的变化,极区海冰存在增长期和消融期,导致散射计观测面元内的海冰面积和性质的变化,进一步造成 σ^0 的变化。图4和图5分别展示了2021年1—12月南北两极在 $15\% \leq V_{SIC} < 30\%$ 时,CSCAT测量的HH极化平均 σ^0 随入射角和风速变化的二维等值线。图4中的空白部分说明与图2一致。

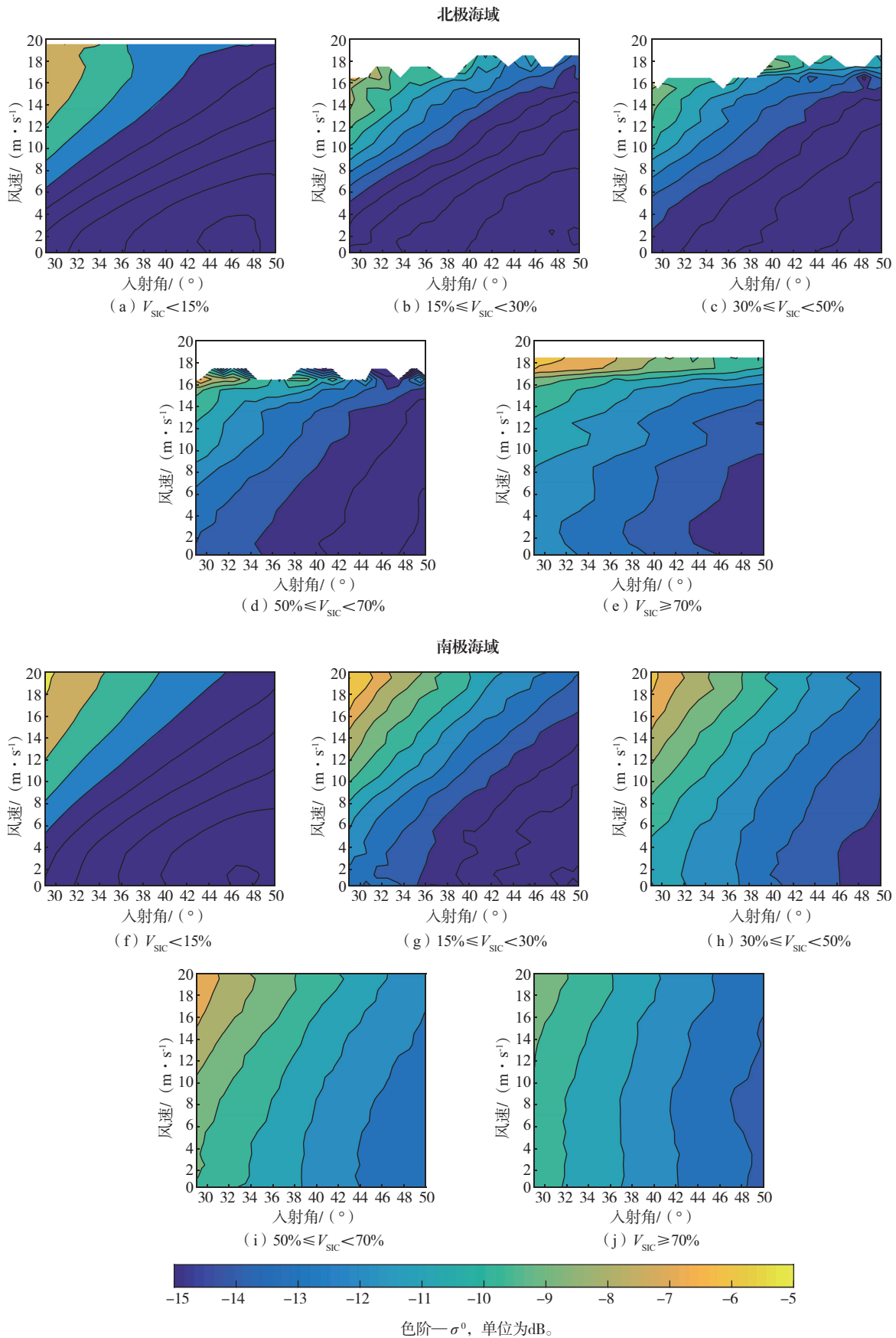


图2 2021年6月不同SIC下HH极化 σ^0 随入射角和风速的变化

Fig.2 Variation of horizontally-polarized σ^0 with incidence angle and wind speed under different SIC conditions in June 2021

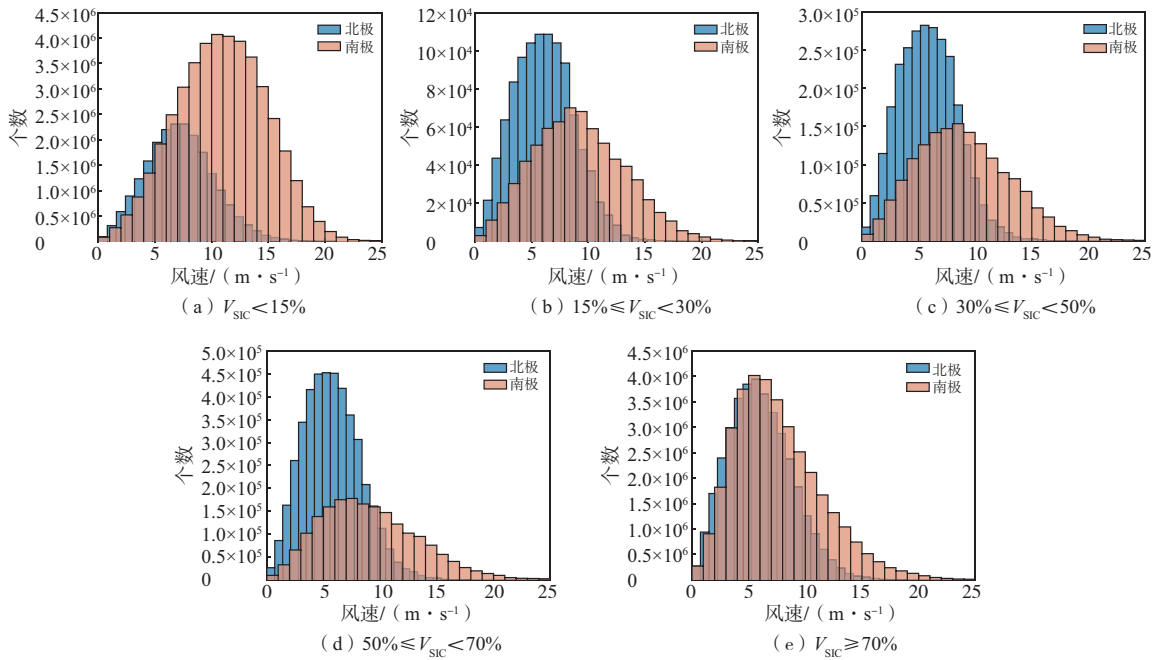


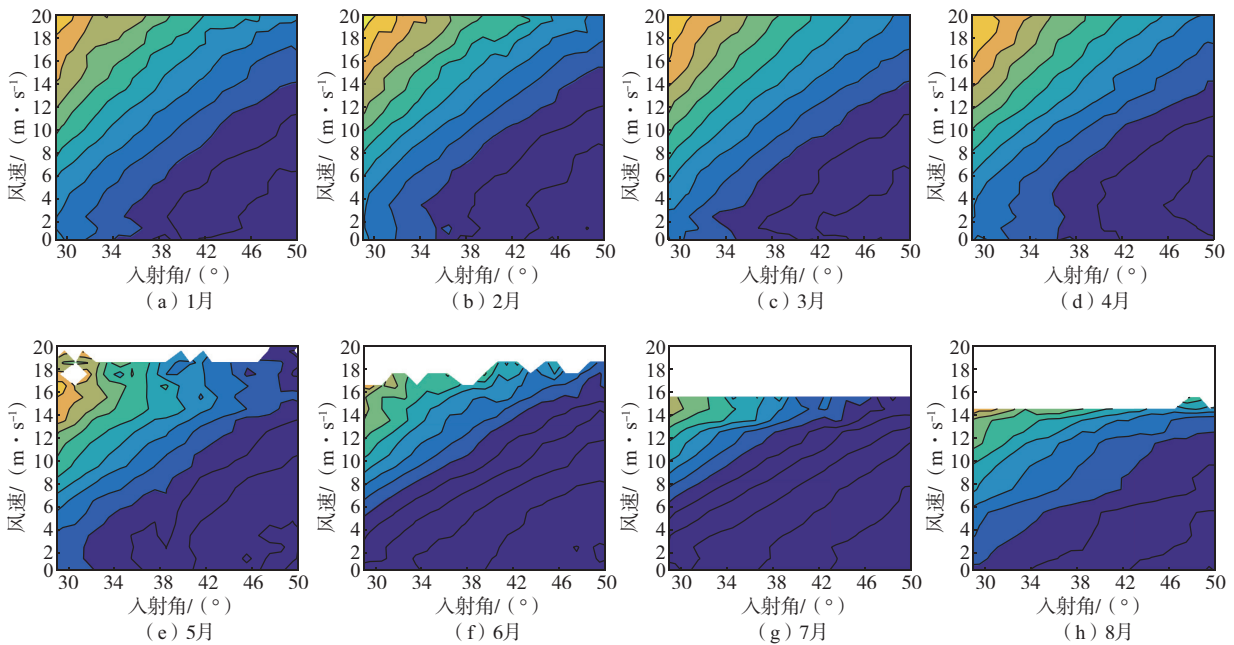
图 3 2021 年 6 月不同 SIC 下 HH 极化 σ^0 风速的个数

Fig.3 The number of horizontally-polarized σ^0 wind speed under different SIC conditions in June 2021

由图 4 和图 5 可见,当 SIC 较低时,南北两极月平均 σ^0 变化较小, σ^0 与观测入射角近似呈线性关系。由图 4i 可见,2021 年北极海域最强海冰后向散射在 9 月,这与本节后续所述的 $V_{SIC} \geq 70\%$ 的情况(图 6i)一致,而南极海域最强海冰后向散射在 2 月(图 5b),这也与 $V_{SIC} \geq 70\%$ 时(图 7b)一致。

SIC 较低时,极区海面散射计观测面元内海冰面积较低,海冰后向散射由布拉格散射、海表面风的

调制效应主导,月平均 σ^0 变化较小,两极差异也较小,随着 SIC 的增大,散射计观测面元内海冰面积增大,冰情变得复杂,海冰后向散射的影响因素增多,两极月平均 σ^0 出现较大差异(图 6—7)。图 6 和图 7 分别展示了 2021 年 1—12 月南北两极在 $V_{SIC} \geq 70\%$ 时,CSCAT 测量的 HH 极化平均 σ^0 随入射角和风速变化的二维等值线图。图 6e—j 的空白部分说明与图 2 一致。



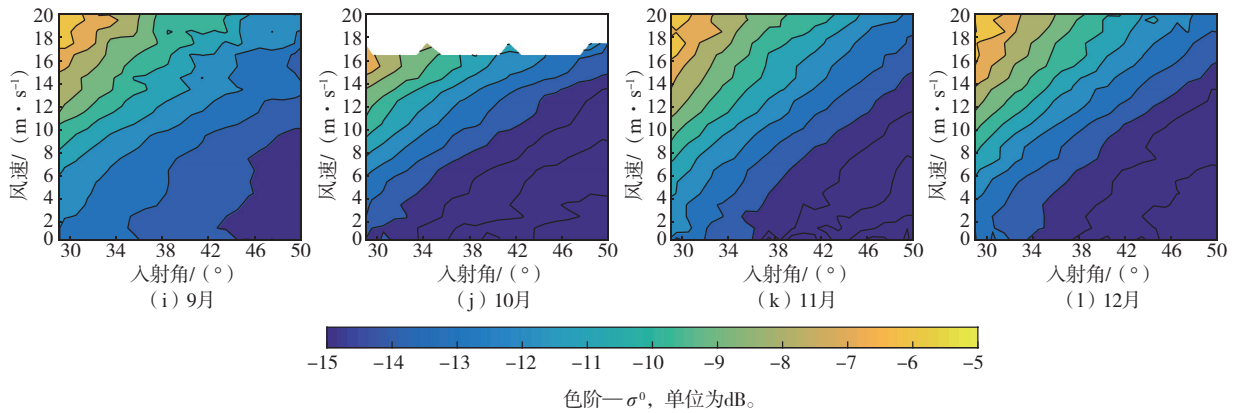


图4 2021年 $15\% \leq V_{\text{sic}} < 30\%$ 时北极CSCAT HH极化 σ^0 随入射角和风速的变化
 Fig.4 Variation of CSCAT horizontally-polarized σ^0 with incidence angle and wind speed in the Arctic in 2021 ($15\% \leq V_{\text{sic}} < 30\%$)

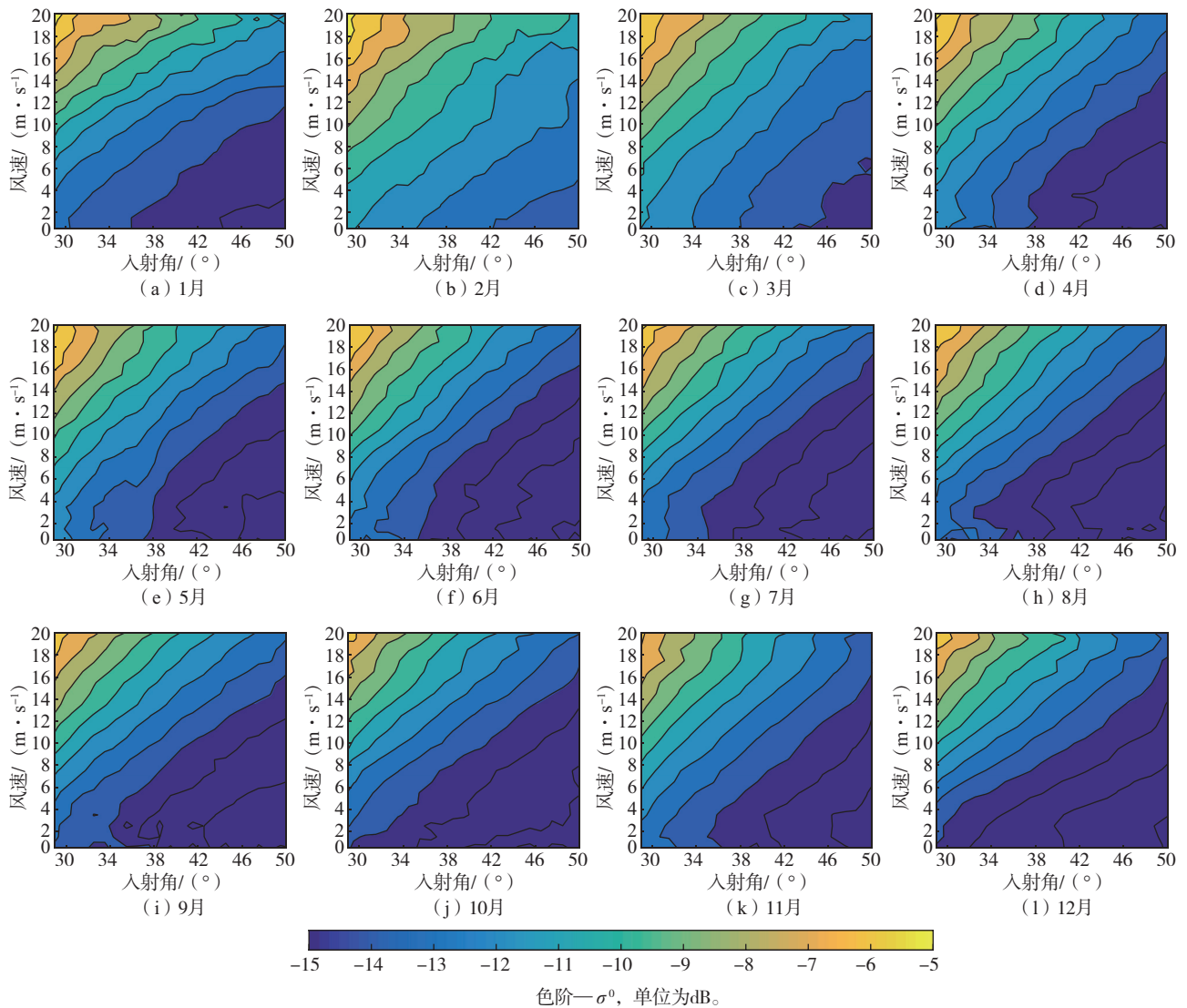


图5 2021年 $15\% \leq V_{\text{sic}} < 30\%$ 时南极CSCAT HH极化 σ^0 随入射角和风速的变化
 Fig.5 Variation of CSCAT horizontally-polarized σ^0 with incidence angle and wind speed in the Antarctic in 2021 ($15\% \leq V_{\text{sic}} < 30\%$)

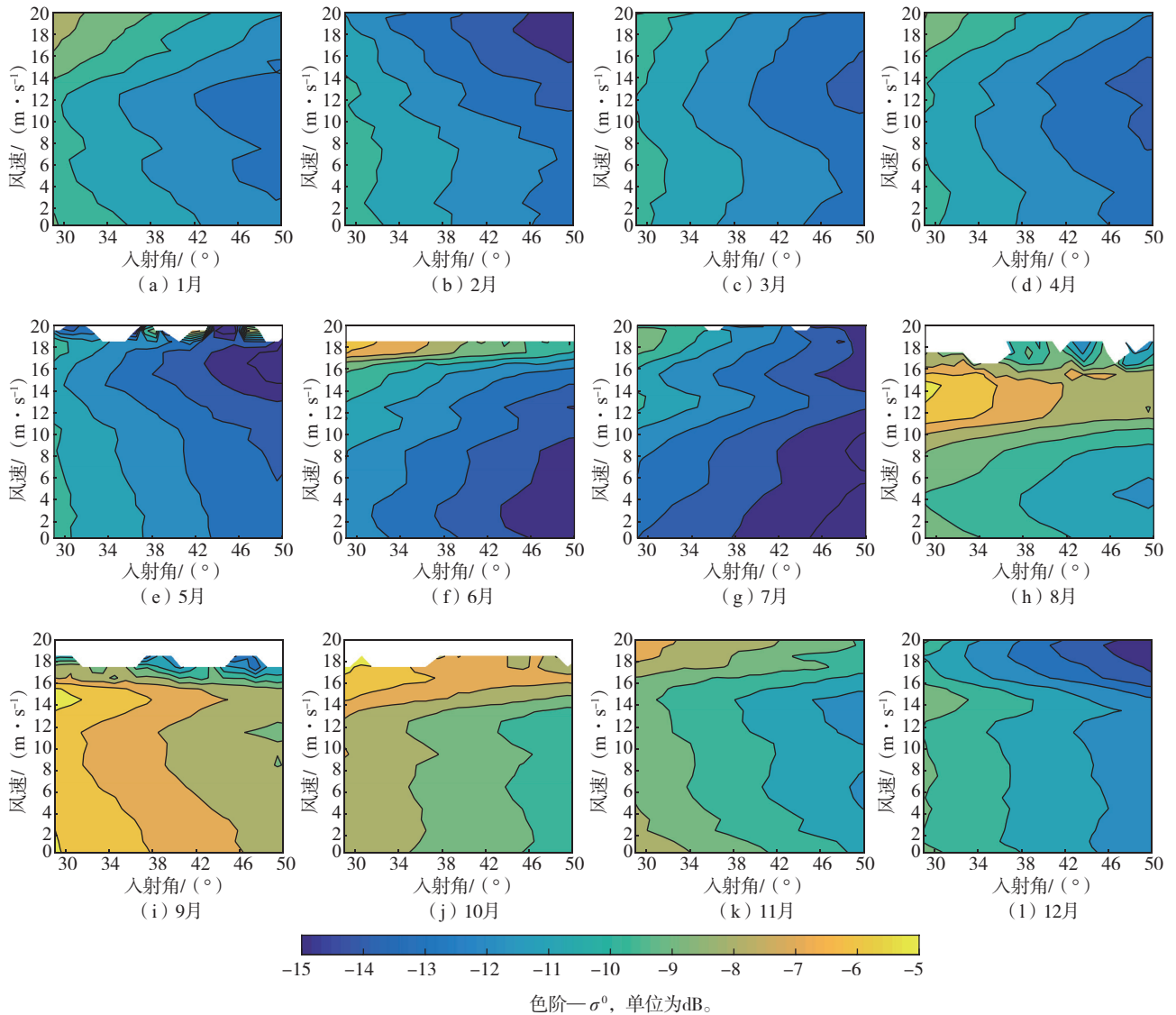


图6 2021年 $V_{SIC} \geq 70\%$ 时北极 CSCAT HH 极化 σ^0 随入射角和风速的变化
 Fig.6 Variation of CSCAT horizontally-polarized σ^0 with incidence angle and wind speed in the Arctic in 2021 ($V_{SIC} \geq 70\%$)

由图6可以看出,当SIC较大时,北极海域每个月的平均 σ^0 存在明显差异,2021年的月平均 σ^0 整体呈现出随着月份先变小、后变大的趋势。其中,6月(图6f)和7月(图6g)海冰后向散射最弱,这可能与北半球处于夏季有关,该时段海冰处于消融期、海冰表面相对光滑。而8月(图6h)的后向散射存在明显增强,8—10月(图6h—j)后向散射为全年最强。由图7可见,2021年南极海域月平均 σ^0 整体呈现随着月份缓慢变小的趋势。其中,1—3月(图7a—c)为全年后向散射最强,10和11月(图7j,k)为全年后向散射最弱。特别地,4—9月(图7d—i)平均 σ^0 的变化很小。

对比图6和图7,可以明显看出同一时间段内,南北两极的雷达后向散射特征存在明显差异。北极海域雷达 σ^0 的极值出现在9月,而南极海域则出现在2月,南北两极的雷达 σ^0 在变化趋势上有明显的差异,这主要是因为两极相反的季节变化。其中,北极海冰区的 σ^0 在9月出现较明显的突变,这需要结合其他气候态地球物理参数进一步分析才能厘清其变化因素。

2.1.3 风向的调制效应

图8和图9展示了CSCAT在南极海域5种不同SIC冰面获取的VV极化 σ^0 的二维密度图。图8对应的ECMWF预报风速为 $5 \sim 7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,图9对

应的 ECMWF 预报风速为 $14 \sim 16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 观测入射角均为 $39^\circ \sim 41^\circ$ 。由图 8a 可见, 当 CSCAT 观测面元的 $V_{\text{SIC}} < 15\%$ 时, σ^0 的分布并不集中, 风向对 CSCAT 后向散射的调制作用比较明显, 但是随着 SIC 的增加, σ^0 的分布逐渐变得集中, 风向的调制作用也逐渐减弱(图 8b)。当 $V_{\text{SIC}} \geq 30\%$ 时, 由图 8c—e 可见, 高密度冰面的 σ^0 分布比低密集度

冰面更为集中, 风向的调制作用更小。由图 9 可见, 当风速更高时能得到与图 8 相似的结论。低密集度冰面的散射计观测面元内有大面积的裸露海水, 使得其冰面通常具有良好的 consistency, 风向和风速的调制效应都更加明显, 而高密度冰域的冰面粗糙度受冰龄、积雪等因素的影响更为复杂, 使得 σ^0 的分布更加集中。

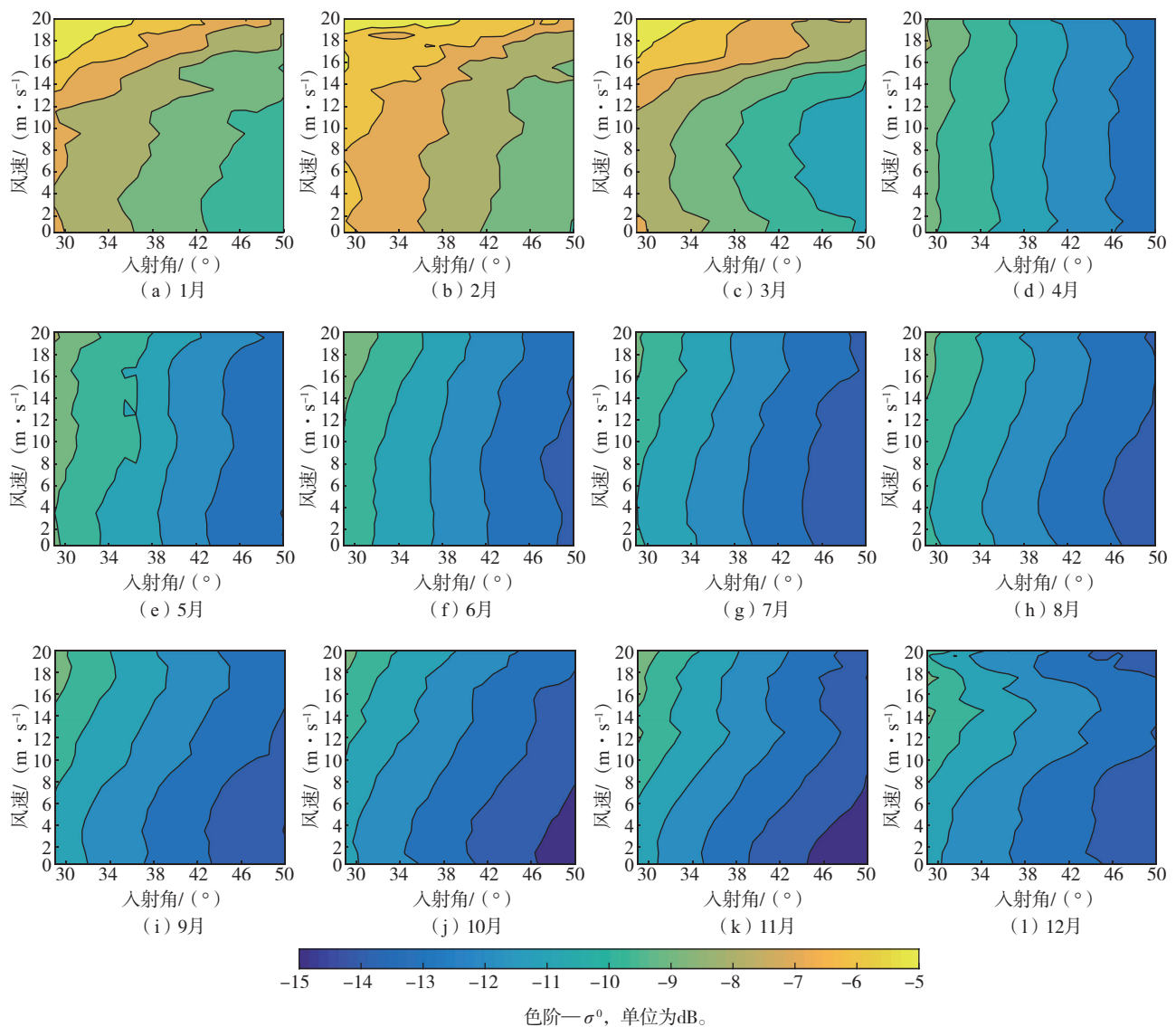


图7 2021年 $V_{\text{SIC}} \geq 70\%$ 时南极 CSCAT HH 极化 σ^0 随入射角和风速的变化

Fig.7 Variation of CSCAT horizontally-polarized σ^0 with incidence angle and wind speed in the Antarctic in 2021 ($V_{\text{SIC}} \geq 70\%$)

综上, 当 SIC 较低时, 风向和风速的调制效应明显, 这两种效应随着 SIC 的增大而减弱。南北两极的 CSCAT 截取的月平均 VV 极化 σ^0 存在明显的空间变异性, 且这种变异性随着时间而变化, 即存在明

显的时间变异性。HH 极化 σ^0 随相对方位角和 SIC 变化特性与 VV 极化类似, 不再予图赘述。总之, CSCAT 海冰区 σ^0 与观测几何、海面风场、入射角、相对方位角、SIC 等因素息息相关。

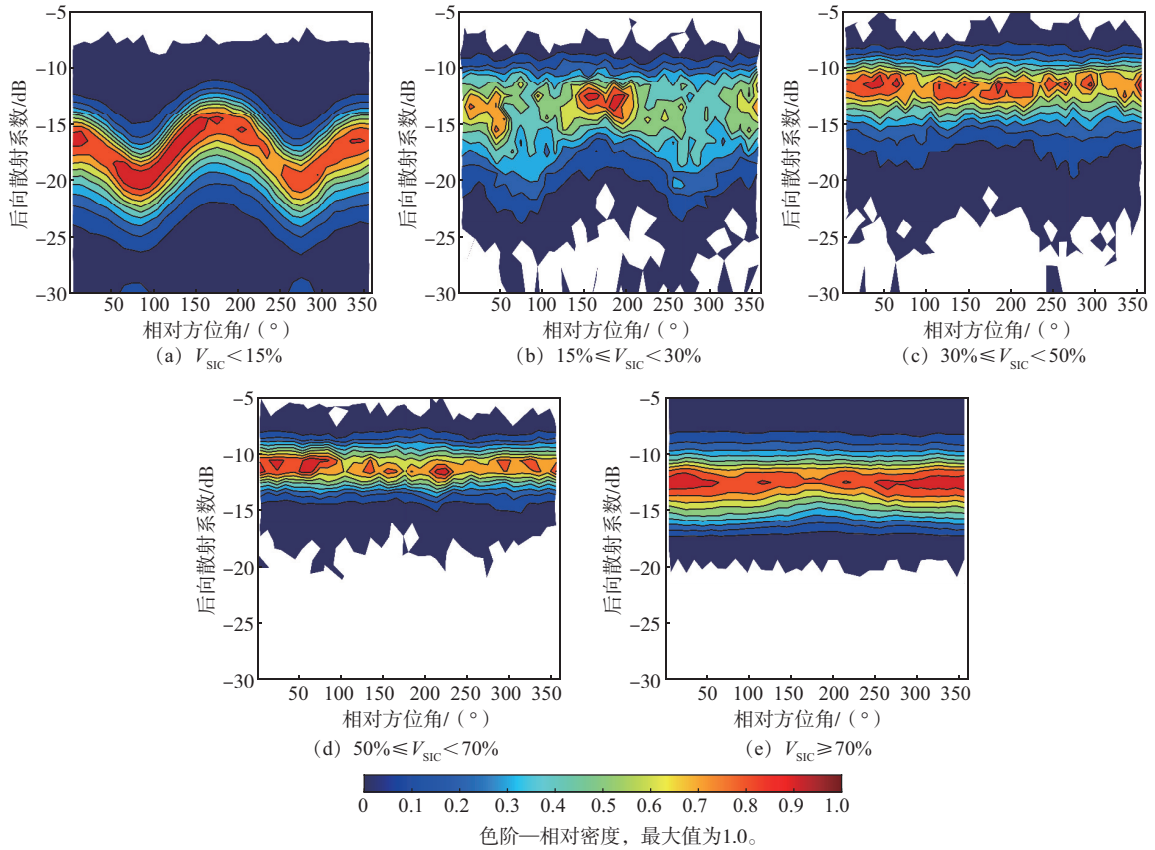


图 8 2021 年 6 月风速为 $5 \sim 7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、入射角为 $39^\circ \sim 41^\circ$ 时南极 CSCAT VV 极化 σ^0 的二维等密度图

Fig.8 Two-dimensional isodensity map of CSCAT vertically-polarized σ^0 in the Antarctic in June 2021 (wind speed: $5 \sim 7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; incidence angle: $39^\circ \sim 41^\circ$)

2.2 波束中心的 σ^0 随风速的变化

CSCAT 截取的 σ^0 与海面风场关系密切。为了分析风速与 σ^0 之间的关系,文中以波束中心 40° 为例,图 10 展示了 2021 年 12 个月 CSCAT VV 极化的 σ^0 随风速变化的折线图。HH 极化 σ^0 随风速和入射角的变化特性与 VV 极化类似,不再予图赘述。

由图 10 可知,各月两极 σ^0 随风速都呈现逐渐变大的趋势,但是在高风速存在突变,这可能与高风速的数据较少有关。由图 10a、f 可见,当 $V_{\text{SIC}} < 15\%$ 时,两极 σ^0 随风速的变化较大,最大值和最小值的差值约为 10 dB,并且各月 σ^0 的变化基本一致;当风速低于 $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, σ^0 随风速增大的趋势更快,而当风速大于 $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, σ^0 随风速增大的趋势变缓。随着 SIC 的增加, σ^0 的最大值与最小值的差值变化逐渐变小, σ^0 的分布逐渐集中。特别地,当 $V_{\text{SIC}} \geq 70\%$ 时, σ^0 随风速的变化很小,且在高风速时存在突变,这主要是由于风速的数据量十分有限,存在较大的统计不确定性。

通过图 10 对比南北两极各月 σ^0 随风速的变化趋势,可以发现南北两极存在明显的差异。由图 10b—d 可见, $15\% \leq V_{\text{SIC}} < 70\%$ 时,北极海域 2021 年 6 月和 7 月的 σ^0 较其余月份明显偏小,8 月和 9 月的 σ^0 较其余月份明显偏大,而 1—5 月、10—12 月 σ^0 随风速的变化较为一致。当 $V_{\text{SIC}} \geq 70\%$ (图 10e) 时,各个月份 σ^0 随风速的变化差异明显,但集中在 $-15 \sim -5 \text{ dB}$ 。其原因可能是不同月份海冰表面的粗糙度和积雪覆盖情况变化显著,因此 SIC 大的表面 σ^0 往往具有更强的时间变异性。由图 10g—i 可见, $15\% \leq V_{\text{SIC}} < 70\%$ 时,南极海域 2021 年 1、2、3 月的 σ^0 较其余月份明显偏大,而 4—12 月 σ^0 随风速的变化较为一致。同时,南极海域各月 σ^0 随风速的变化更为集中,而北极海域各月 σ^0 随风速的变化则存在明显差异。鉴于高风速存在突变,文中在剔除平均 σ^0 异常值后,以 $30\% \leq V_{\text{SIC}} < 50\%$ 为例,利用最小二乘法构建了特定 SIC 和入射角条件下海冰 σ^0 随风速变化的多项式模型,得到多项式的拟合系数(详见附录 A 中的表 A1)。

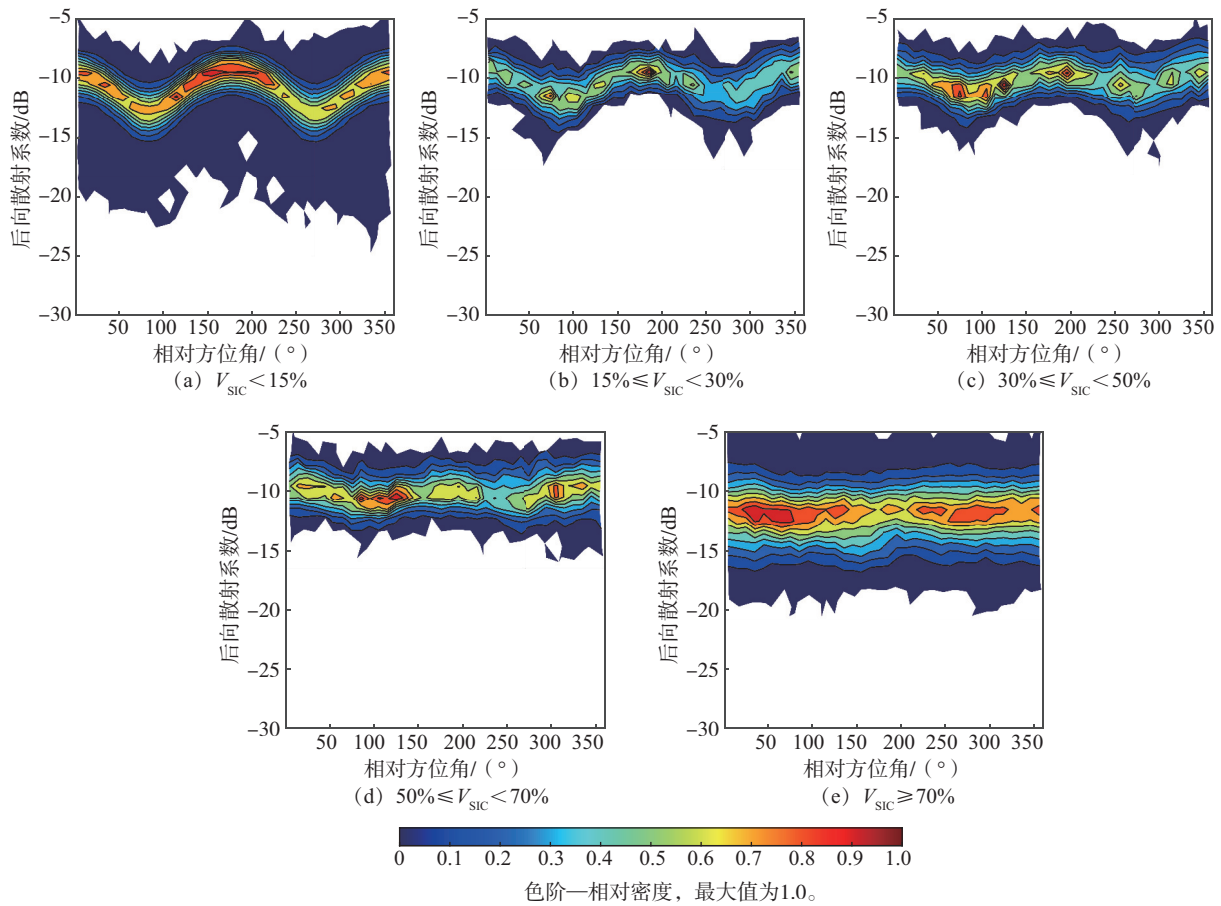
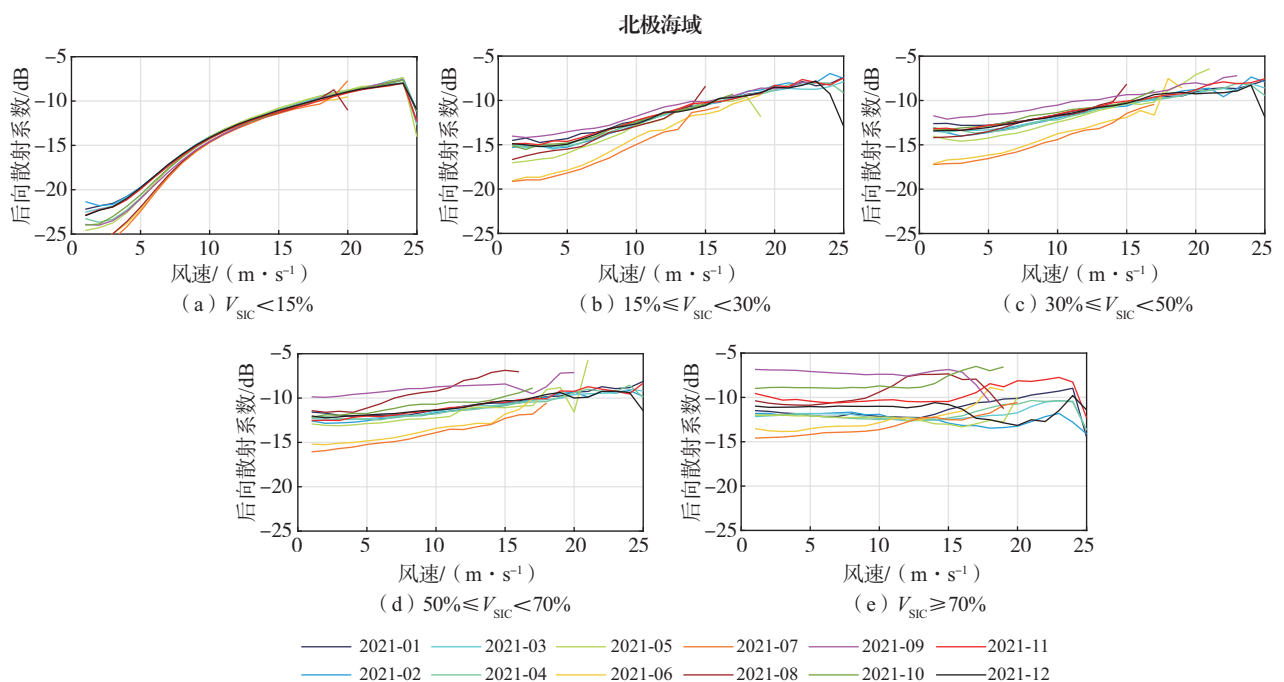


图9 2021年6月风速为 $14 \sim 16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、入射角为 $39^\circ \sim 41^\circ$ 时南极 CSCAT VV 极化 σ^0 的二维等密度图
 Fig.9 Two-dimensional isodensity map of CSCAT vertically-polarized σ^0 in the Antarctic in June 2021 (wind speed: $14 \sim 16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; incidence angle: $39^\circ \sim 41^\circ$)



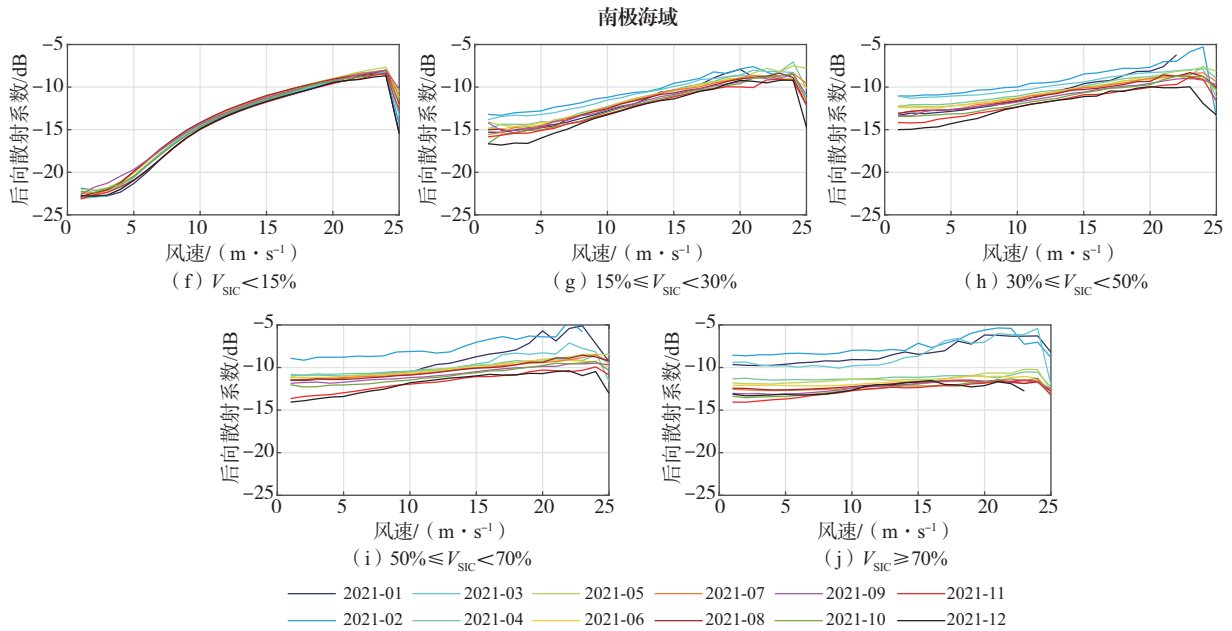


图 10 2021 年不同 SIC 下 CSCAT VV 极化 σ^0 随风速的变化
 Fig.10 Variation of CSCAT vertically-polarized σ^0 with wind speed under different SIC conditions in 2021

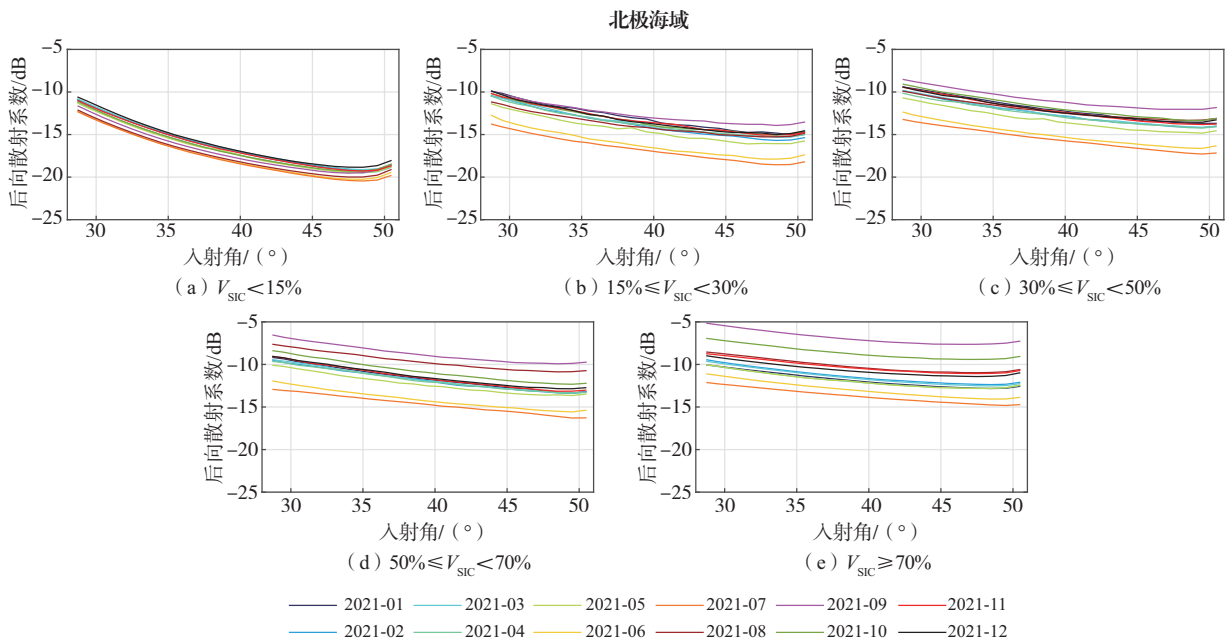
2.3 不同 SIC 下 σ^0 随入射角变化的差异

CSCAT 截取的雷达 σ^0 与入射角同样关系密切,文中以 $6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 风速时,2021 年各月 σ^0 随入射角的变化为例来分析(图 11)。

由图 11 可知, σ^0 随入射角的增大逐渐减小,呈现负相关。由图 11a、f 可以看出,南北两极在开阔洋面 ($V_{\text{SIC}} < 15\%$) 上布拉格散射占主导地位,后向散射随着入射角的增加而减小,在大入射角下, σ^0 最小能到 -20 dB ,最大值和最小值的差值近 10 dB ,这

与相应的风速、相对风向的概率分布有关。

随着 SIC 的增加,平均 σ^0 逐渐增大, σ^0 的最大值和最小值的差值也随之减小。可以看出,开阔洋面上各个月份的平均 σ^0 基本一致,没有明显的差异。随着 SIC 的增大,南北两极各月平均 σ^0 随入射角的变化趋势基本一致。同样地,文中以 $30\% \leq V_{\text{SIC}} < 50\%$ 为例,利用最小二乘法构建了特定风速和 SIC 条件下海冰 σ^0 的多项式模型,得到多项式的拟合系数(详见附录 A 中的表 A2)。



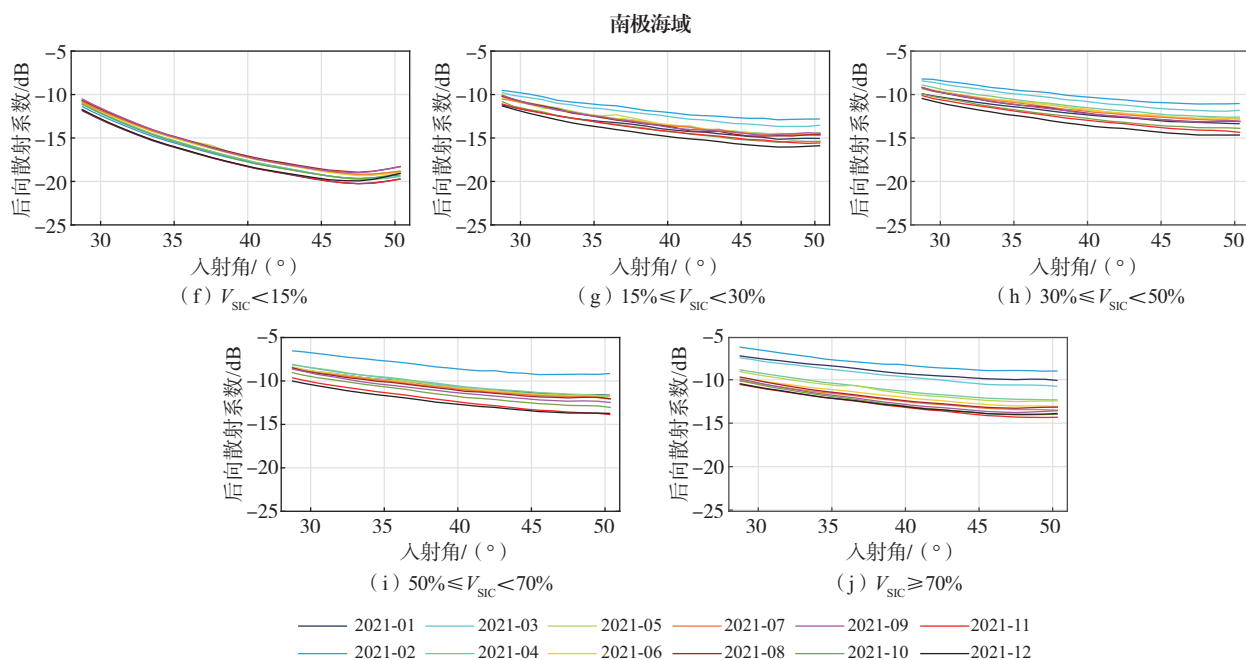


图 11 2021 年不同 SIC 下 CSCAT VV 极化 σ^0 随入射角的变化

Fig.11 Variation of CSCAT vertically-polarized σ^0 with incidence angle under different SIC conditions in 2021

3 结论和展望

文中针对 Ku 波段扇形波束散射计的海冰后向散射进行研究,发现 CSCAT 在 SIC 不同的海域获取的 σ^0 具有显著的差异,且这种差异与观测几何、观测入射角、海面风速、SIC 等因素息息相关。通过将 CSCAT σ^0 数据与欧洲气象卫星应用组织的 SIC 数据进行匹配,分析南北两极不同 SIC 下 CSCAT σ^0 的季节性变化,主要结论如下:

(1) 南北两极在 SIC 较低时, σ^0 具有良好的一致性,存在明显的风速和风向的调制效应,这种效应随着 SIC 的增加逐渐变小。

(2) 两极 σ^0 随 SIC 的增加而增强,但存在明显的季节变化差异。同观测入射角下,月平均 σ^0 随风速的增大而增大,且存在明显的时间和空间差异。

(3) 散射计 σ^0 对 SIC 的敏感性与观测入射角息息相关。CSCAT 在同一海面单元通常有 2~8 次(每种极化)不同入射角或方位角的观测信息,这在大量观测样本中选择更为适合 SIC 反演的样本提供了前所未有的机遇。

研究结果为后续利用 CSCAT 观测数据进行 SIC 反演奠定了基础,也为后续研究构建海冰后向散射 GMF 提供支撑。

参考文献:

- [1] WALSH J E. The role of sea ice in climatic variability: theories and evidence [J]. *Atmosphere-Ocean*, 1983, 21 (3): 229-242.
- [2] SCREEN J A, SIMMONDS I. The central role of diminishing sea ice in recent Arctic temperature amplification [J]. *Nature*, 2010, 464 (7293): 1334-1337.
- [3] 吴彦洁, 黄菲, 许士斌, 等. 秋季西北太平洋热带气旋累积能量的年际变化及其预报 [J]. *海洋气象学报*, 2018, 38 (4): 19-27.
- [4] 赵朝方, 徐锐, 赵可. 基于 HY-2A/SCAT 数据极地海冰检测方法研究 [J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2019, 49 (10): 140-149.
- [5] LI M M, ZHAO C F, ZHAO Y, et al. Polar sea ice monitoring using HY-2A scatterometer measurements [J]. *Remote Sens*, 2016, 8 (8): 688.
- [6] 宋姝彤, 衣立, 张苏平, 等. Polar WRF 模式海冰密集度方案对北极海雾模拟效果的个案研究 [J]. *海洋气象学报*, 2019, 39 (2): 34-42.
- [7] 李彦青. 渤海海冰可见光遥感数据的反演、同化和候平均时间序列的构建分析 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013.
- [8] 石立坚, 王其茂, 邹斌, 等. 利用海洋 (HY-2) 卫星微波辐射计数据反演北极区域海冰密集度 [J]. *极地研究*,

- 2014,26(4):410-417.
- [9] 郎姝燕,孙从容,鲁云飞,等.中法海洋卫星微波散射计近海岸产品在台风遥感监测中的应用[J].海洋气象学报,2022,42(2):74-80.
- [10] JOHANSSON A M, BREKKE C, SPREEN G, et al. X-, C-, and L-band SAR signatures of newly formed sea ice in Arctic leads during winter and spring[J]. Remote Sens Environ,2018,204:162-180.
- [11] CARTWRIGHT J, FRASER A D, PORTER-SMITH R. Polar maps of C-band backscatter parameters from the Advanced Scatterometer[J]. Earth Syst Sci Data,2022,14(2):479-490.
- [12] 周玮辰,韩震,王艺晴,等.SMAP 卫星后向散射系数与海表面风场关系[J].遥感信息,2018,33(6):48-54.
- [13] DE HAAN S, STOFFELEN A. Ice discrimination using ERS scatterometer[R]. Netherlands: Royal Netherlands Meteorological Institute,2001:1-38.
- [14] VERSPEEK J. Sea ice classification using Bayesian statistics [R]. Netherlands: Royal Netherlands Meteorological Institute,2006:1-30.
- [15] BELMONTE RIVAS M, VERSPEEK J, VERHOEF A, et al. Bayesian sea ice detection with the advanced scatterometer ASCAT [J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens,2012,50(7):2649-2657.
- [16] REMUND Q P, LONG D G. Sea ice mapping algorithm for QuikSCAT and SeaWinds [C]//IEEE. Symposium Proceedings of 1998 IEEE International Geoscience and Remote Sensing. Seattle:IEEE,1998:1686-1688.
- [17] BELMONTE RIVAS M, STOFFELEN A. Near real-time sea ice discriminatin using SeaWinds on QuikSCAT[R]. Netherlands: Royal Netherlands Meteorological Institute, 2009:1-54.
- [18] ZOU J H, ZENG T, GUO M H, et al. The study on an Antarctic sea ice identification algorithm of the HY-2A microwave scatterometer data [J]. Acta Oceanol Sin, 2016,35(9):74-79.
- [19] HAN L, CHEN H H, GUAN L, et al. Multiple sea ice type retrieval using the HaiYang-2B scatterometer in the Arctic[J]. Remote Sens,2023,15(3):678.
- [20] XU R, ZHAO C F, ZHAI X C, et al. Arctic sea ice type classification by combining CFOSCAT and AMSR-2 data [J]. Earth Space Sci,2022,9(2):e2021EA002052.
- [21] LIU L L, DONG X L, YANG L Q, et al. Sea ice extent retrieval using CSCAT 12.5 km sampling data [J]. Remote Sens,2024,16(4):700.
- [22] 董晓龙,朱迪,林文明,等.中法海洋卫星微波散射计在轨性能验证[J].空间科学学报,2020,40(3):425-431.
- [23] 刘建强,蒋兴伟,郎姝燕,等.中法海洋卫星及其典型应用[J].卫星应用,2021(9):41-48.
- [24] 许昌敬.多源卫星散射计极地海冰检测方法研究[D].南京:南京信息工程大学,2023.
- [25] 刘建强,刘思琦,林文明,等.基于 CFOSAT 散射计的海冰识别方法研究[J].海洋学报,2023,45(6):134-140.
- [26] ZHAI X C, WANG Z X, ZHENG Z J, et al. Sea ice monitoring with CFOSAT scatterometer measurements using random forest classifier[J]. Remote Sens,2021,13(22):4686.
- [27] XU C J, WANG Z X, ZHAI X C, et al. SVM-based sea ice extent retrieval using multisource scatterometer measurements[J]. Remote Sens,2023,15(6):1630.
- [28] LI Z, VERHOEF A, STOFFELEN A. Bayesian sea ice detection algorithm for CFOSAT[J]. Remote Sens,2022,14(15):3569.
- [29] LAVELLE J, TONBOE R T, HOWE E. Product user manual for the global sea ice concentration Level 2: version 1.1 [EB/OL]. (2021-06-21) [2024-01-09]. https://osisaf-hl.met.no/sites/osisaf-hl/files/user_manuals/osisaf_cdop3_ss2_pum_ice-conc-level2_v1p1.pdf.
- [30] GWG World Geodetic System and Geomatics Focus Group. The universal grids and the transverse mercator and Polar stereographic map projections: NGA. SIG. 0012 [R]. Springfield:National Geospatial-Intelligence Agency,2014.

附录 A:

为后续研究构建海冰区 σ^0 关于入射角、风速、SIC 等参数变化的地球物理模型函数,这里给出特定入射角和 SIC 下, σ^0 与风速的多项式模型,以及特定风速和 SIC 下, σ^0 与入射角的多项式模型。

以 $30\% \leq V_{\text{SIC}} < 50\%$ 为例,在剔除平均 σ^0 异常值后,利用最小二乘法构建入射角条件下 (40°) 海冰 σ^0 随风速变化的多项式模型,多项式如下:

$$\sigma^0(w) = P_{a4}w^4 + P_{a3}w^3 + P_{a2}w^2 + P_{a1}w + P_{a0} \quad (A1)$$

式中: w 为风速,单位为 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; P_{an} 为拟合系数, $n=0,1,2,3,4$ 。表 A1 为 $\sigma^0(w)$ 拟合系数。

同样地,以 $30\% \leq V_{\text{SIC}} < 50\%$ 为例,利用最小二乘法构建了特定风速 ($6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) 条件下海冰 σ^0 随入射角的多项式模型,多项式如下:

$$\sigma^0(\theta) = P_{b4}\theta^4 + P_{b3}\theta^3 + P_{b2}\theta^2 + P_{b1}\theta + P_{b0} \quad (A2)$$

式中: θ 为入射角,单位为 ($^\circ$); P_{bn} 为拟合系数, $n=0,1,2,3,4$ 。表 A2 为 $\sigma^0(\theta)$ 拟合系数。

表 A1 2021 年北极海域和南极海域 $\sigma^0(w)$ 的拟合系数结果Table A1 Results of fitting parameters of $\sigma^0(w)$ in the Arctic and Antarctic in 2021

月份	拟合系数									
	北极海域					南极海域				
	P_{a4}	P_{a3}	P_{a2}	P_{a1}	P_{a0}	P_{a4}	P_{a3}	P_{a2}	P_{a1}	P_{a0}
1	6.2165×10^{-5}	-0.0038	0.0794	-0.4224	-12.1678	8.0648×10^{-5}	-0.0039	0.0709	-0.2619	-12.9319
2	1.0309×10^{-4}	-0.0062	0.1239	-0.6598	-12.6960	7.5411×10^{-5}	-0.0036	0.0619	-0.2403	-10.7712
3	2.9403×10^{-5}	-0.0022	0.0527	-0.1959	-13.3183	-4.3760×10^{-6}	-3.9277×10^{-4}	0.0222	-0.1158	-11.0342
4	1.2570×10^{-5}	-0.0020	0.0641	-0.3847	-12.8549	2.2259×10^{-5}	-0.0015	0.0344	-0.1082	-12.0875
5	2.7212×10^{-4}	-0.0119	0.1878	-0.8663	-13.3286	5.2830×10^{-6}	-7.5803×10^{-4}	0.0270	-0.1099	-12.1759
6	3.1218×10^{-4}	-0.0114	0.1478	-0.3783	-16.6855	-1.3475×10^{-6}	-6.8307×10^{-4}	0.0272	-0.0955	-12.3542
7	1.3500×10^{-4}	-0.0054	0.0881	-0.2134	-17.0702	2.1393×10^{-5}	-0.0014	0.0322	-0.0408	-12.9736
8	0.0011	-0.0332	0.3339	-0.9750	-13.3997	-2.8986×10^{-6}	-3.2304×10^{-4}	0.0168	0.0135	-13.0326
9	7.2045×10^{-5}	-0.0036	0.0648	-0.2427	-11.6557	-6.2300×10^{-5}	0.0027	-0.0356	0.3484	-13.7504
10	4.1163×10^{-4}	-0.0145	0.1740	-0.5527	-12.7899	2.0594×10^{-5}	-0.0015	0.0369	-0.1125	-13.3533
11	2.7342×10^{-5}	-0.0017	0.0415	-0.1118	-13.1559	5.0787×10^{-5}	-0.0027	0.0457	-0.0479	-14.2298
12	3.9130×10^{-5}	-0.0027	0.0577	-0.1897	-13.2355	5.1999×10^{-5}	-0.0032	0.0577	-0.0547	-15.0578

表 A2 2021 年北极海域和南极海域 $\sigma^0(\theta)$ 的拟合系数结果Table A2 Results of fitting parameters of $\sigma^0(\theta)$ in the Arctic and Antarctic in 2021

月份	拟合系数									
	北极海域					南极海域				
	P_{b4}	P_{b3}	P_{b2}	P_{b1}	P_{b0}	P_{b4}	P_{b3}	P_{b2}	P_{b1}	P_{b0}
1	1.6515×10^{-5}	-0.0024	0.1378	-3.7670	31.6723	9.6326×10^{-5}	-0.0015	0.0909	-2.7286	22.2749
2	3.5365×10^{-5}	-0.0056	0.3319	-9.0695	84.8046	1.0043×10^{-5}	-0.0014	0.0717	-1.9174	13.2713
3	7.1508×10^{-5}	-0.0010	0.0608	-1.9701	16.1147	2.7999×10^{-5}	-0.0042	0.2433	-6.4180	56.8235
4	1.3633×10^{-5}	-0.0020	0.1197	-3.4189	28.5901	2.1532×10^{-5}	-0.0034	0.2018	-5.6157	51.2760
5	4.1573×10^{-5}	-0.0064	0.3769	-10.0647	91.8896	3.3826×10^{-5}	-0.0052	0.2959	-7.7567	68.5632
6	4.5553×10^{-5}	-0.0072	0.4232	-11.3624	103.4336	3.7036×10^{-5}	-0.0058	0.3391	-9.0435	82.5574
7	2.6131×10^{-5}	-0.0041	0.2385	-6.4075	52.7963	-3.9977×10^{-5}	6.4521×10^{-4}	-0.0331	0.4079	-6.3482
8	2.1447×10^{-5}	-0.0033	0.1944	-5.3935	48.0726	4.1296×10^{-5}	-0.0065	0.3830	-10.3420	97.0556
9	1.7046×10^{-5}	-0.0025	0.1457	-4.0759	36.5857	3.4840×10^{-5}	-0.0054	0.3230	-8.8017	82.4420
10	2.5070×10^{-5}	-0.0038	0.2208	-5.9950	54.1977	2.0181×10^{-5}	-0.0031	0.1876	-5.2881	47.8562
11	2.2232×10^{-5}	-0.0034	0.2003	-5.5294	49.9816	1.0552×10^{-5}	-0.0017	0.1029	-3.1214	26.9296
12	2.3575×10^{-5}	-0.0036	0.2052	-5.6039	50.3734	2.2891×10^{-5}	-0.0036	0.2132	-5.9868	54.5791