

应用微波辐射亮温确定北极海冰边缘的算法^{*}

张树刚^{1,2}

(1. 中国海洋大学教育部物理海洋重点实验室, 山东 青岛 266100;

2. 山东省科学院海洋仪器仪表研究所海洋环境监测技术重点实验室, 山东 青岛 266100)

摘要: 海冰边缘区(MIZ)的边缘位置是微波遥感图像的 1 个基本特征,本文利用 AMSR-E 微波辐射亮温的强度比,提出 1 个确定 MIZ 边缘位置的方法。强度比最初用来确定数字影像中海冰和海水的阈值。研究发现,强度比也可以反应海冰与海水的微波辐射的差异。在无冰水域,垂直极化的 18.7(V18.7)和 36.5(V36.5)GHz 的高级微波扫描辐射计(AMSR-E)的亮温之比主要在 0.86~0.89 之间变化,此时它们在散点图中聚集成 1 条经过原点的直线;而在 MIZ,它们的比值发生了显著改变。强度比比较好的体现了 V18.7 和 V36.5 的亮温比值在 MIZ 边缘处的变化特征;强度比快速增大,并且它的梯度出现极大值。全年中 MIZ 边缘处的亮温比值在 0.89~0.90 之间变化,此时对应的海冰密集度为 0.08。

关键词: 海冰边缘区; 18.7GHz; 36.5GHz; 北极; 亮温

中图分类号: P727

文献标志码: A

文章编号: 1672-5174(2012)11-001-07

北极海冰是全球气候系统的重要组成部分,冰-雪反照率的反馈机制是导致高纬度区域增暖的 1 个重要因素^[1-2]。近几十年来,北极海冰发生了快速变化,夏季海冰覆盖范围呈现迅速减小趋势,特别在 2007 年达到历史最小值,这对全球气候产生了显著的影响^[3]。海冰边缘附近的区域为海冰边缘区(MIZ),它是连接海冰边缘与开阔水之间的 1 个过渡区域。MIZ 对海冰质量平衡、海冰边缘位置的判断、中小尺度大气模式和海冰监测等一系列问题的研究都非常重要^[4-5]。MIZ 的宽度与局地风、局地环流以及波浪有关,其宽度从几公里到一百公里之间变化^[6]。在冰区船舶航行是非常危险的,因此很多国家设有海冰专门观测机构来确定海冰边缘的位置。船舶和飞机可以用来确定海冰边缘,但是这 2 种方法受到财力、空间和时间的限制。可见光卫星遥感和热红外卫星遥感可以用来确定海冰边缘的位置,但是在云和雾的影响下这 2 种方法无法确定海冰边缘^[7]。此外,在极夜时间里可见光遥感不能应用。微波可以穿透厚云,并且不受极夜的影响,因此可以用微波辐射遥感有效地进行海冰观测。

在特定的频段(例如:6.9,36.5GHz)微波辐射不但受大气的影 响比较小,而且海冰和海水的微波辐射性质明显不同,因此应用微波辐射数据可以将海冰从海洋中区分开^[8-9]。2002 年,美国发射的 EOS-PM (Aqua)卫星装载的日本高级微波扫描辐射计(AMSR-E)在 6 个频段(12 个通道)观测地球表面水平极化(H)和垂直极化(V)的微波辐射,成为极区海冰监测的有力

手段。这 12 个通道分别是 VH6.9、VH10.7、VH18.7、VH23.8、VH36.5、VH89.0 GHz,其中 VH6.9 GHz 代表垂直极化和水平极化的 6.9GHz 通道。美国冰雪数据中心(NSIDC)提供了 2002 年以来日平均的网格化的 AMSR-E 亮温数据(见表 1)。海冰边缘区海冰密集度在 0~1 之间不断变化,从而导致微波辐射亮温不断改变。在海冰密集度为 0 的区域,V36.5 和 V18.7GHz 的亮温在散点图上沿一条直线分布^[10],这个特征是区分海冰边缘区与开阔水的 1 个重要依据。因此深入研究 V36.5 和 V18.7GHz 的亮温变化特点对确定 MIZ 边缘位置具有重要的意义。

表 1 NSIDC 提供的 AMSR-E 亮温数据

Table 1 The AMSR-E Brightness temperature from the NSIDC

通道 ^① (V&H)	瞬时视场 ^②	网格分辨率 ^③
/GHz	/km	/km
6.9	75×43	25.0×25.0
10.7	51×29	25.0×25.0
18.7	27×16	25.0×25.0,12.5×12.5
23.8	32×18	25.0×25.0,12.5×12.5
36.5	14×8.2	25.0×25.0,12.5×12.5
89.0	6.5×3.7(A)	25.0×25.0,12.5×12.5,
	5.9×3.5(B)	6.25×6.25

Note: ①Channel; ②Instantaneous field of view; ③Grid resolution size

由上面的论述可以知道,海冰边缘区是 1 个海冰-海洋-大气相互作用的关键区域,全天候监测海冰边缘区的变化对科学研究和船舶在冰区航行都具有重要意

^{*} 基金项目:全球变化研究重大科学研究计划项目(2010CB951403);国家高新技术研究发展计划项目(2008AA121701)资助
收稿日期:2011-12-30;修订日期:2012-01-17
作者简介:张树刚(1982-),男,博士。E-mail: zhangshugang6@163.com

义。本文通过研究 V18.7 和 V36.5GHz 的 AMSR-E 亮温数据特征,应用 1 个新的参数来确定 MIZ 边缘线的位置。本文研究思想主要有三部分:首先,定性分析 V18.7 和 V36.5 的亮温散点图特征和开阔水区域对应的亮温特点;其次,应用 1 个参数来定量描述 V18.7 和 V36.5 的亮温在 MIZ 的变化特征,确定它们在 MIZ 边缘附近的变化特点;最后,定量比较用 MODIS 图像反演的波弗特海海冰边缘线与用 AMSR-E 亮温确定的海冰边缘线在连续 4d 内的变化关系。

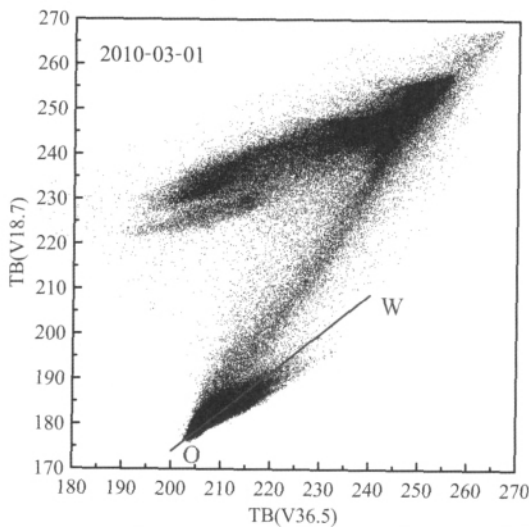
1 算法

1.1 V18.7 和 V36.5GHz 的 AMSR-E 微波辐射亮温

由微波辐射亮温的基本方程可以知道,在海冰边缘区亮温由海冰、海水和大气 3 部分组成,而大气对 V18.7GHz 和 V36.5GHz 的微波辐射影响比较小^[11-12]。因此亮温 T_B 可以表示为

$$T_B = \epsilon_i T_i C + \epsilon_w T_w (1 - C) \quad (1)$$

其中: C 为海冰密集度; T_i 为海冰温度; T_w 为海水温度; ϵ_i 为海冰微波发射率; ϵ_w 为海水微波发射率。NSIDC 提供了北极区域 $12.5 \text{ km} \times 12.5 \text{ km}$ 网格的 V18.7 和 V36.5 的 AMSR-E 亮温数据。Comiso^[10] 指出当海冰密集度接近或等于 0 时,V18.7 和 V36.5GHz 的亮温在散点图中沿斜率为正的直线 OW 分布;而在海冰的影响下,V18.7 和 V36.5GHz 的亮温不再沿 OW 分布(见图 1)。



(直线 OW 斜率为 0.88。The slope of line OW is 0.88.)

图 1 V18.7 和 V36.5GHz 的亮温散点图

Fig. 1 Scatter plot of V18.7 and V36.5 GHz

当海冰密集度为 0 时,由公式(1)得:

$$T_B(V36.5) = \epsilon_w(V36.5) T_w \quad (2a)$$

$$T_B(V18.7) = \epsilon_w(V18.7) T_w \quad (2b)$$

用(2b)除以(2a)得

$$\frac{T_B(V18.7)}{T_B(V36.5)} = \frac{\epsilon_w(V18.7) T_w}{\epsilon_w(V36.5) T_w} = \alpha \quad (3a)$$

即

$$\alpha = \frac{\epsilon_w(V18.7)}{\epsilon_w(V36.5)} \quad (3b)$$

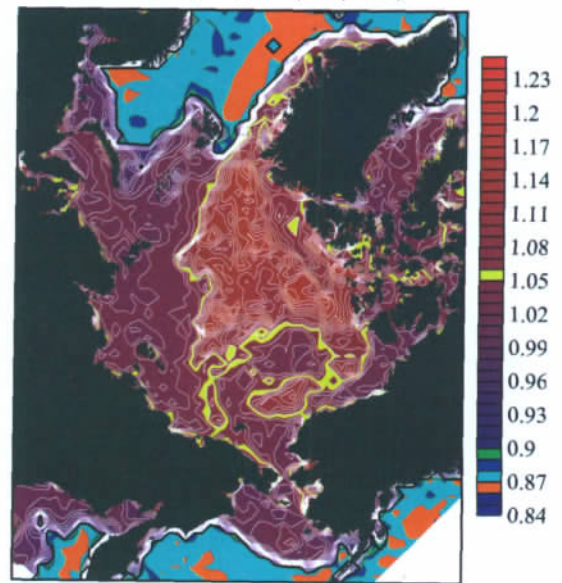
公式(3b)表明, α 事实上是直线 OW 的斜率,其值等于 V18.7 和 V36.5GHz 的海水发射率之比。由公式(3a)得

$$T_B(V18.7) = \frac{\epsilon_w(V18.7)}{\epsilon_w(V36.5)} \cdot T_B(V36.5) = \alpha \cdot T_B(V36.5) \quad (4)$$

由图 1 和公式(4)可以知道,V18.7 与 V36.5GHz 的亮温聚集成 1 条过原点的直线 OW。由于海洋表面的微波发射率受到海浪、海水温度、海水盐度以及气泡的影响,因此直线 OW 的斜率在一定范围内发生改变。

在海冰的影响下,海冰边缘区 V18.7 与 V36.5GHz 的亮温不满足公式(4),即亮点不再沿直线 OW 分布。因此,在 MIZ 存在 1 个海冰对微波辐射影响非常小的临界条件,这个临界条件是 V18.7 与 V36.5GHz 的亮温是否沿直线 OW 分布的判断依据,也是 MIZ 边缘的判断依据。由公式(3a)可以知道,直线 OW 的斜率 α 可以用 V18.7 与 V36.5GHz 的亮温比值确定。令 V18.7GHz 与 V36.5GHz 的亮温比值为 γ ,即

$$\gamma = \frac{T_B(V18.7)}{T_B(V36.5)} \quad (5)$$



(其中黑线是海冰密集度为 0.15 的等值线。Black line is contour for 15% sea ice concentration.)

图 2 V18.7 和 V36.5 的亮温之比(γ)空间分布图

Fig. 2 Spatial distribution of the ratio (γ) about V18.7 and V36.5

2010年3月1日 γ 空间分布如图2所示,图中黑线是NSIDC提供的海冰密集度为0.15时的等值线。从图中可以看到,在无冰水域比值 γ 比较小(小于0.89),等值线比较稀疏;在MIZ比值 γ 显著变大,等值线密集。从图2还可以看到,多年冰的亮温比值 γ 大于一年冰。海冰和海水的相互作用使 γ 变化非常大,而在MIZ边缘附近存在1个比值 α_0 使海冰对比值 γ 的影响非常小,因此将 α_0 作为MIZ与开阔水的分界条件。

图3给出了V18.7GHz与V36.5GHz的亮温之比 γ 在0.86~1.15之间的频率分布,从图中可以看到比值 γ 的频率统计呈现双峰结构。显然第1个峰对应开阔水,第2个峰对应高密度海冰覆盖区域。在开阔水区域,比值 γ 主要分布在0.86~0.89之间,并且频数相对比较大;在海冰覆盖区,比值 γ 主要分布在0.89到1.15之间,并且频数相对比较小。

综上所述,在MIZ边缘存在1个临界值 α_0 :当 $\gamma > \alpha_0$ 时, γ 受海冰影响比较大;当 $\gamma < \alpha_0$ 时,亮温点沿直线OW分布,并且直线OW经过原点;在 α_0 附近, γ 的频数会迅速减小。

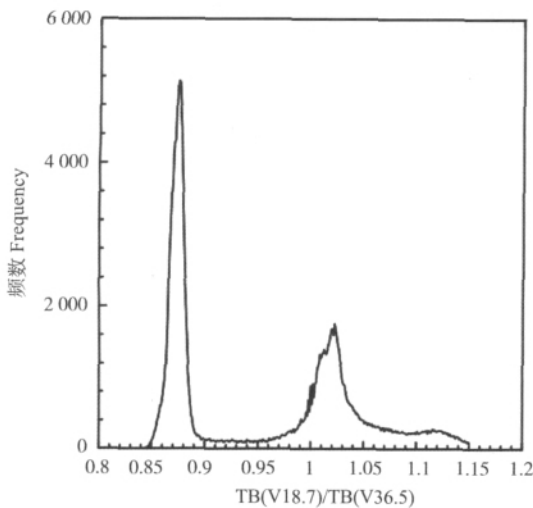


图3 V18.7和V36.5GHz的亮温之比(γ)的频率统计图

Fig. 3 Frequency of the ratio (γ) about V18.7 and V36.5 GHz

1.2 强度比的定义

赵进平和任敬平^[13]提出了1个新参数(强度比)来确定航空数字影像中海冰和海水的阈值。同理,在这一节中作者引入强度比来定量确定 α_0 。由图2和图3可以知道,整个北极区域 γ 主要在0.85和1.15之间,因此可以统计0.850、0.851、0.852、...、1.149、1.150之间的每1个 γ 值的频数,记为 $\sigma(\gamma)$ 。计算每个空间点的 γ 值与相邻空间点的 γ 值的差,如果差值大于临界值 P ,则统计这样的 γ 值的数量,记为 $\delta(\gamma)$ 。最后计算比值

$$\lambda(\gamma) = \frac{\delta(\gamma)}{\sigma(\gamma)}$$

$$\gamma \in [0.850, 0.851, 0.852, \dots, 1.149, 1.150] \quad (6)$$

则 $\lambda(\gamma)$ 称为比值 γ 的强度比。由强度比的定义可以知道,强度比包含了2个方面的信息,首先是 γ 值的变化,其次是 γ 数量的变化。因此用强度比可以很好的反应临界值 α_0 两侧 γ 的大小和数量的变化。

在亮温空间点上,一些 γ 并不只在1个方向上差值大于临界值 P ,因此强度比 $\lambda(\gamma)$ 可以大于1。临界值 P 的选择比较任意,选不同的值会改变强度比 $\lambda(\gamma)$,但是 $\lambda(\gamma)$ 的变化趋势不发生改变,在本文中 P 取值0.005。应用强度比的物理意义是:在 α_0 附近不但 γ 值变化最大,而且 γ 所对应的数量变化也最大。由1.1节的分析可以知道,在开阔水区域, γ 变化范围非常小,主要在0.86和0.89之间;而在 α_0 附近受海冰的影响 γ 值发生显著变化,此时 $\sigma(\gamma)$ 和 $\delta(\gamma)$ 也发生快速变化。因此,如果强度比 $\lambda(\gamma)$ 在MIZ中某个 γ 值附近变化最快,则这个值就是所求的 α_0 ,即海冰对海水的亮温影响可以忽略的临界值。

为了定量确定强度比的变化快慢,对公式(6)做 γ 的梯度:即

$$X(\gamma) = \frac{\partial[\lambda(\gamma)]}{\partial\gamma} \quad \gamma \in [0.850, 0.851, 0.852, \dots, 1.149, 1.150] \quad (7)$$

图4是应用公式(6)和(7)所求的2010年3月1日强度比 $\lambda(\gamma)$ (黑线),以及它的梯度 $X(\gamma)$ (红线)变化图。从图中可以看到在0.88到0.90之间强度比 $\lambda(\gamma)$ 从0.30迅速上升到1.96,此时 $X(\gamma)$ 存在1个极大值。在极大值处,强度比 $\lambda(\gamma)$ 变化最快,是所求的 α_0 。

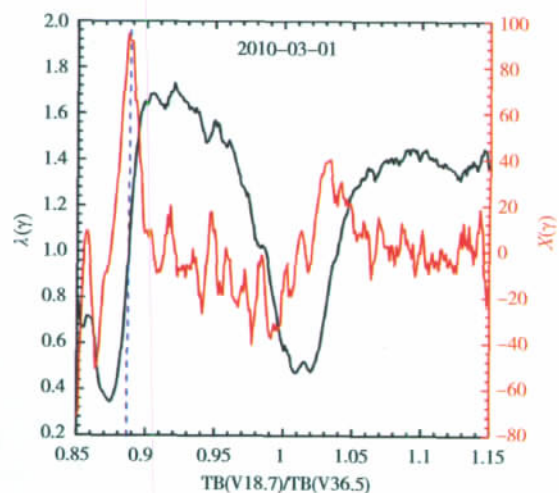


图4 比值 γ 的强度比 $\lambda(\gamma)$ 及其梯度 $X(\gamma)$ 变化图

Fig. 4 Contrast ratio $\lambda(\gamma)$ (black) and its gradient $X(\gamma)$ (red)

用强度比和它的梯度确定的2010年 α_0 随时间变

化图和频率统计图,如图5所示。从图可以看到, α_0 主要在0.89~0.90之间变化,变化幅度非常小,因此用

强度比确定的 α_0 具有相对稳定性。

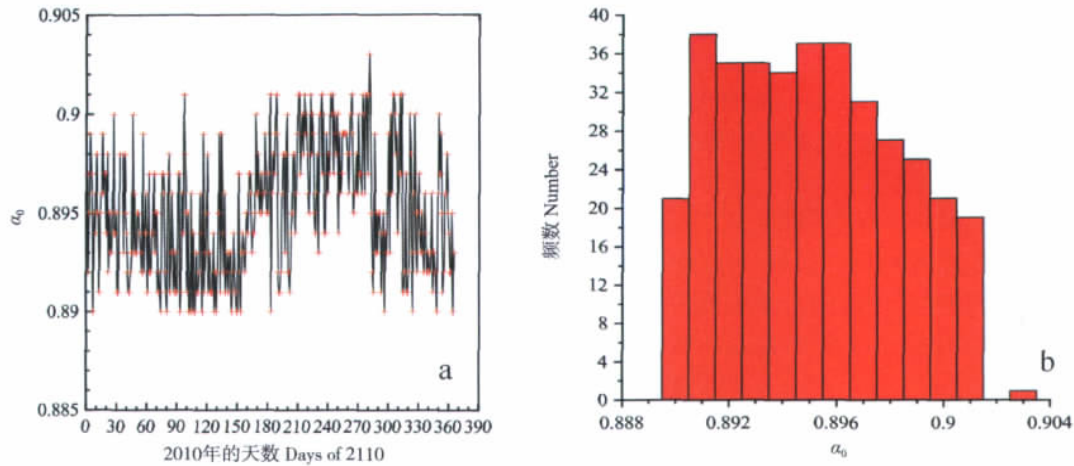
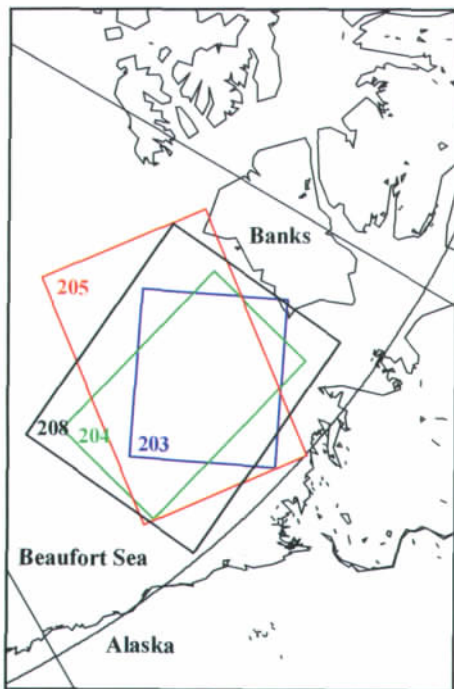


图5 2010年 α_0 的时间变化图(a)和频率统计图(b)

Fig. 5 Time series of boundary ratio α_0 (a) and the frequency of α_0 (b) during 2010



(方框中代表所选取的 MODIS 图像的位置: 蓝框, 7月22日(203); 绿框, 7月23日(204); 红框, 7月25日; 黑框, 7月27日(208), 其中括号内的数字为一年中的第几天。The boxes present the locations of the MODIS images: blue, July 22 (203); green, July 23 (204); red, July 24 (205); black, July 27 (208). Number in bracket is the day of year.)

图6 波弗特海验证区域

Fig. 6 The test area at Beaufort Sea

2 验证

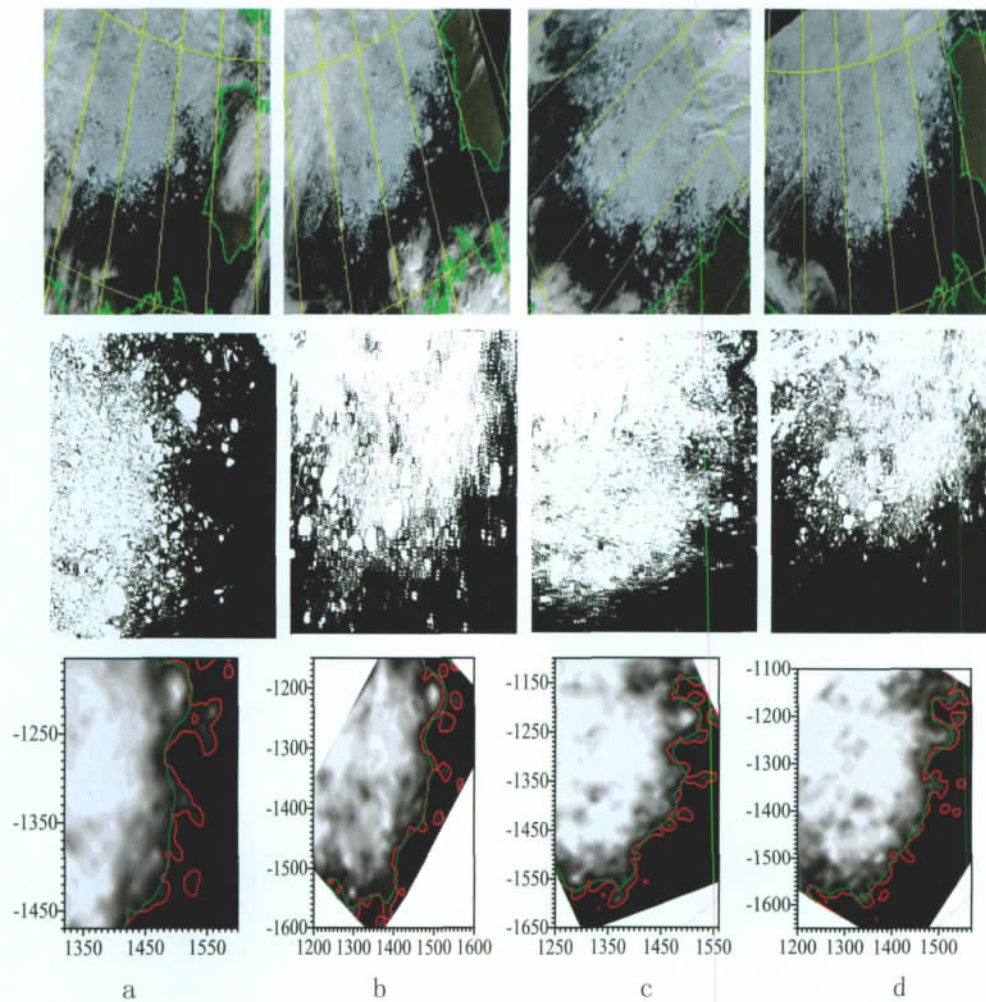
中等分辨率成像光谱仪(MODIS)是美国宇航局发射的EOS-TERRA和EOS-AQUA卫星上的重要星载仪器,它提供了从可见光到热红外(波长从0.4~14.4 μm)的36个通道数据。MODIS所有通道的空间分辨率在250~1000 m,其中通道2(841~876 nm)提供了250 m分辨率的影像数据。应用海冰和海水反射率差别比较大的性质可以在MODIS图像中确定海冰边缘的位置^[14]。MODIS卫星是用可见光进行遥感,受云和光照的影响比较大,因此在海冰边缘区选取验证区域时,必须保证该区域晴空无云。2010年7月22(203)日、23(204)日、24(205)日和27(208)日波弗特海MIZ连续4 d云量非常小或无云,因此可以作为验证区域(见图6),图注中括号内的数字为1a中的第几天。

图7给出了春季海冰边缘区MODIS遥感图像和冰水识别图像。在冰水识别图像中,白色是海冰,黑色是海洋。在验证区域内,每个AMSR-E网格内的海冰密集度为海冰像元个数与总像元个数的比值(见图7下排)。从图中可以知道,由MODIS数据反演的海冰密集数据在0~1之间变化,体现了海冰边缘区的变化特征。由强度比梯度 $X(\gamma)$ 确定的MIZ边缘的临界参数 α_0 主要在0.89和0.90之间变化,此时对应海冰密集度的值约为0.08。从图7中可以看到,海冰密集度为0.08的等值线(红色线)与亮温比值 γ 为0.90的等值线(绿色线)变化基本一致。一方面,在碎冰区域海冰一般比较薄,海冰对海洋的微波发射率影响比较小,

从而使部分区域的亮温显示海洋的特征;另外一方面,由于 MODIS 图像给出的是一天中某一时刻的影像,而 AMSR-E 是 1d 中亮温的平均值,海冰在风和海流的作用下不断发生运动。因此用 MODIS 确定的海冰边缘线(红色线)与 AMSR-E 确定的海冰边缘线(绿色线)存在一定的差异。

γ 为 0.90 的等值线和海冰密集度为 0.08 的等值线之间的距离可以用它们之间的最短距离进行确定。

应用均值、平均差和均方根对这 4d 的海冰边缘线变化进行对比(见表 2)。在这 4d 里,两等值线之间的均值、平均差和均方根的最大值分别为 7.1、4.4、6.7 km,都小于 AMSR-E 的网格(12.5 km)。图 8 给出了这 4d 两等值线距离的百分数的曲线图,从图中可以知道,两等值线之间的距离主要在 10 km 以内(小于 AMSR-E 网格)。因此,用 V18.7 和 V36.5 GHz 的亮温比值 γ 以及强度比 $\lambda(\gamma)$ 也可以确定 MIZ 的边缘。



(在海冰密集度图像中红色等值线对应的海冰密集度为 0.08, 绿线为亮温之比 γ 为 0.90 时的等值线。The red contour line is 8% sea ice concentration from MODIS and the green line is ratio about brightness temperature (green) at 0.90.)

图 7 上排:波弗特海 MODIS 遥感图像(<http://ladsweb.nascom.nasa.gov/>); 中间:对应区域的冰水识别图像;
下排:反演的 12.5km 的海冰密集度图像

Fig. 7 (Top): MODIS images provided by NASA (<http://ladsweb.nascom.nasa.gov/>); (Middle): pixels of ice or water recognized; (Bottom): sea ice concentration derived from MODIS data

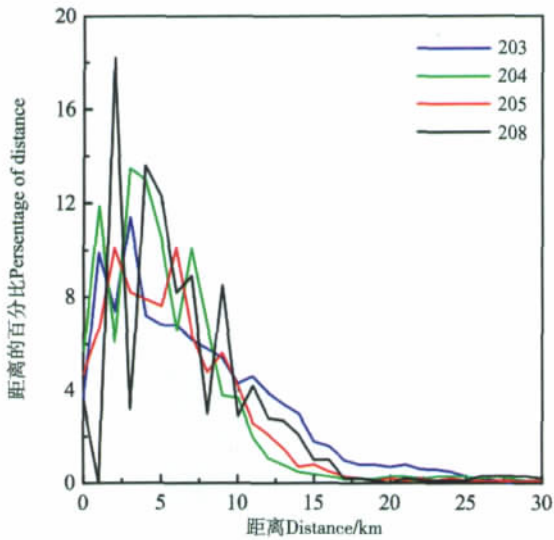


图8 AMSR-E与MODIS确定的海冰边缘线之间距离的曲线图

Fig. 8 Curves of distances between ice edges from AMSR-E and MODIS

表2 AMSR-E与MODIS确定的海冰边缘线之间距离比较

Table 2 Results from the analysis of ice edges derived from AMSR-E and MODIS

日期 Date	均值 ^①	平均差 ^②	均方根 ^③
2010-07-22(203)	7.1	4.4	5.3
2010-07-23(204)	5.4	3.1	4.5
2010-07-24(205)	6.2	3.6	5.2
2010-07-27(208)	7.1	4.1	6.7

Note: ①Mean; ②Mean difference; ③Root mean square

3 结语

本文展示了用微波辐射亮温确定MIZ边缘的方法,并将结果与MODIS图像确定的MIZ边缘线进行比较:在无冰水域,V18.7和V36.5GHz的亮温在相应散点图中聚集成1条经过原点的直线,它的斜率为V18.7和V36.5GHz的海水发射率之比,其值主要在0.86~0.89之间变化。在海冰覆盖区域亮温的比值从0.89变化到1.15,发生了显著改变。在MIZ边缘附近存在1个临界值,在临界值两侧不但V18.7与V36.5GHz的亮温比值变化比较大,而且其频数也变化比较大。用强度比可以确定MIZ边缘的临界值,其值主要在0.89~0.90之间变化。通过250m分辨率的MODIS数据验证表明,用强度比确定的MIZ边缘对应的海冰密集度为0.08。

本文的研究验证区域只局限在2010年夏季波弗特海的MIZ,因此在将来的工作中需要在不同的MIZ和不同的时间段内进行更加广泛的验证。此外其它卫星,例如RADARSAT-1,也为MIZ边缘的确定提供了

重要手段。

参考文献:

- [1] Curry J A, Schramm J L, Ebert E E. Sea ice albedo climate feedback mechanism [J]. J Clim, 1995, 8(2): 240-247.
- [2] Holland M M, Bitz C M. Polar amplification of climate change in coupled models [J]. Clim Dyn, 2003, 21(3/4): 221-232.
- [3] Perovich D K, RichterMenge J A. Loss of sea ice in the Arctic [J]. Annual Review of Marine Science, 2009, 1: 417-441.
- [4] L pkes C, Birnbaum G. Surface drag in the Arctic marginal sea-ice zone: a comparison of different parameterization concepts [J]. Boundary-Layer Meteorol, 2005, 117: 179-211.
- [5] Josberger E G. Sea ice melting in the marginal ice zone [J]. J Geophys Res, 1983, 88(C5): 2841-2844.
- [6] Bourke R. Currents, fronts and fine structure in the marginal ice zone of the Chukchi Sea [J]. Polar Record, 1983, 21(135): 569-575.
- [7] Pichel W G, Clemente-Colon P, Bertoia C. Routine production of SAR-derived ice and ocean products in the United States [C]. Svalbard, Norway: Proc. 2nd Workshop Coastal and Marine Appl. SAR, 2003: 175-182.
- [8] Zwally H J, Comiso J C, Parkinson C L. Antarctic sea ice, 1973-1976: satellite passive microwave observations [R]. [s. l.]: NASA Special Publication No. 459. 1983.
- [9] Comiso J C, Member S, Cavalieri D J, et al. Sea ice concentration, ice temperature, and snow depth using AMSR-E Data [J]. IEEE Trans Geoscience and Remote Sensing, 2003, 41: 243-252.
- [10] Comiso J C. SSM/I concentrations using the Bootstrap algorithm [J]. NASA Spec Publ, 1995, 1380: 40.
- [11] Wilheit T T. Atmospheric corrections to microwave radiometer data [J]. Boundary Layer Meteorol, 1980, 18: 65-77.
- [12] Comiso J C, Sullivan C W. Satellite microwave and in situ observations of the Weddell sea ice cover and its marginal ice zone [J]. J Geophys Res, 1986, 91(C8): 9663-9681.
- [13] 赵进平, 任敬平. 从航空数字影像提取北极海冰形态参数地方法研究 [J]. 遥感学报, 2000, 4(4): 271-278.
- [14] Heinrichs J F, Cavalieri D J, Markus T. Assessment of the AMSR-E sea ice concentration product at the ice edge using RADARSAT-1 and MODIS imagery [J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 2006, 44(11): 3070-3080.

An Algorithm to Detect Arctic Sea Ice Edge Using Microwave Brightness Temperature

ZHANG Shu-Gang^{1,2}

(The Key Laboratory of Physical Oceanography, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;
2. Shandong Provincial Key Laboratory of Ocean Environment Monitoring Technology, Institute of Oceanographic Instrumentation, Shandong Academy of Sciences, Qingdao 266001, China)

Abstract: The position of the marginal ice zone (MIZ) edge is a principal feature in microwave image. This paper presents an algorithm to detect the MIZ edge by using contrast ratio of AMSR-E brightness temperature. Contrast ratio originally used to determine the threshold between sea ice and sea water in the digital images. The study shows that contrast ratio could also show the difference of microwave radiation between sea ice and sea water. For open water, the ratio of the vertically polarized brightness temperature at 18.7 (V18.7) and 36.5 (V36.5) from the Advanced Microwave Scanning Radiometer Earth Observation System (AMSR-E) main changes between 0.86 to 0.89. At same time, the V18.7 and V36.5 appears along a line on the scatter plot, which crosses the origin of coordinates. However, the ratio of V18.7 and V36.5 largely changes in MIZ. At the MIZ edge, contrast ratio presents the change of the ratio better: contrast ratio increases rapidly and its gradient appears maximum. The threshold ratio of V18.7 and V36.5 at MIZ edge changes mainly between 0.89 and 0.90 during the whole year, which coincides with the contour line of 8% sea ice concentration.

Key words: marginal ice zone; 18.7GHz; 36.5GHz; Arctic; brightness temperature

责任编辑 庞旻