

谢涛, 艾润冰, 王彦, 等. SAR 重构分辨率对海冰侧向融化量预测影响研究[J]. 海洋学报, 2021, 43(7): 173–182, doi:10.12284/hyxb2021107
Xie Tao, Ai Runbing, Wang Yan, et al. Research on the influence of SAR reconstruction resolution on the prediction of sea ice lateral melting quantity[J]. Haiyang Xuebao, 2021, 43(7): 173–182, doi:10.12284/hyxb2021107

SAR 重构分辨率对海冰侧向融化量预测影响研究

谢涛¹, 艾润冰², 王彦³, 刘彬贤⁴

(1. 南京信息工程大学 遥感与测绘工程学院, 江苏 南京 210044; 2. 驻马店市气象局, 河南 驻马店 450003; 3. 天津市人工影响天气办公室, 天津 300074; 4. 天津市海洋中心气象台, 天津 300074)

摘要: 利用 RADARSAT-2 的海冰 SAR 图像, 分别采用 Prewitt、Sobel 和 Canny 边缘检测算子计算图像范围内的海冰周长, 分析不同图像分辨率、不同边缘检测算子分别对周长计算结果产生的影响。结合冰层侧向融化速率参数化方案进行了海冰侧向融化温度敏感性模拟实验, 分析了图像重构分辨率对海冰侧向融化结果的影响。结果表明: 海冰破碎程度不同时, 对应不同的最佳边缘检测算子和最佳分辨率; 仅考虑侧向融化时, 随着温度升高, 3 种算子模拟的海冰面积融化趋势基本一致, 均呈指数型增加, Prewitt 算子模拟效果最好, 对应的最佳重构分辨率为 30 m×30 m、65 m×65 m 和 155 m×155 m。

关键词: SAR; 海冰侧向融化; 重构分辨率; 边缘检测

中图分类号: P731.15

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2021)07-0173-10

1 引言

海冰侧向融化是指水道吸收的热量在水道两侧的浮冰侧表面的热量传输, 它会导致海冰面积和厚度的变化, 是水道热力过程的一部分^[1]。国内外关于海冰侧向融化的研究主要包括模式发展和现场实测发展。Zubov^[2]首次提出在海冰边缘区发生的侧向融化可以加速冰盖的瓦解, 并且推导了一个简单的方程式来描述这一过程。随后多位科学家先后提出了水道模型和海冰侧向融化速率参数化方案, 并逐渐引入水道表面风速和海冰大小、形状等参数, 使得该方案更加完善^[3-9]。目前, 国际海冰模式中普遍使用的侧向融化速率参数化方案为 Steele^[9]的方案。2013 年, 王庆元等^[1]为了探究侧向融化对北极海冰面积和厚度的影响, 利用 NCAR CSIM5 海冰模式设置了两组不同的试验, 其中一组加入了海冰侧向融化的影响, 而另一组不考虑侧向融化, 结果表明, 冰层的侧向融化会使冰层的消融加快, 海冰的面积和厚度相应减小。

现场实测经典的案例之一是李志军等^[10]在中国第二次北极科学考察期间, 对北极浮冰冰层内温度及冰底海水温度进行了现场观测, 同时测量了浮冰表面及底面厚度的变化, 讨论了冰底水温的空间变化特征。雷瑞波等^[11]于中国第三次北极科学考察期间首次开展了浮冰-水道系统热力学特征的现场观测, 优化了李志军等^[10]的冰底水温观测系统, 增加了对浮冰侧向生消过程和水道温度等的测量。王庆凯等^[12-13]分别于 2016 年和 2018 年在乌梁素海人工挖凿开敞水域, 模拟了融冰期的浮冰-水道系统, 对开敞水域冰层侧向及底部融化进行连续观测, 记录了融冰期太阳辐射、气温、水温等气象、水文要素, 根据实测数据, 分析了冰层侧向融化剖面的变化及影响侧向融化的主要因素。2018 年方贺等^[14]为了获取北极海冰融化速率以及侧向剖面的声-光反射特征, 设计了一种基于超声波传感器的水下测距系统。该系统在封闭实验室环境下最大测量误差为 5 mm, 自然环境下测量平均绝对误差为 14 mm, 符合实际应用要求。

此外, 基于航空摄影观测海冰密集度和尺寸分布

收稿日期: 2020-06-19; 修订日期: 2020-10-29。

基金项目: 国家自然科学基金项目(41675046, 41776181); 天津市自然科学基金(19JCYBJC23700)。

作者简介: 谢涛(1973—), 男, 湖南省张家界市人, 教授, 主要从事海洋微波遥感研究。E-mail: xietao@nuist.edu.cn

的调查方法也已经得到广泛应用。1983–1984 年 Hall 和 Rothrock^[15] 利用航空摄影技术对融冰期的格陵兰海边缘冰区进行了连续拍摄,通过控制拍摄高度以及在被测浮冰上建立几何控制的方法,采集了海冰融化期的连续图像,利用观测浮冰周长的变化估算了海冰侧向融化的平均速率。

虽然海冰侧向融化的研究较多,但都存在一定的不足。在数值模拟领域,由于缺乏实测数据,关键参数的取值过于理想;在现场实测领域,固定平台的观测很难及时追踪海冰侧向融化的过程。利用卫星遥感来获取海冰信息是海冰研究中的重要方法,但研究内容主要是关于海冰厚度和密集度方面,分析海冰侧向融化的相关研究甚少^[16–18]。考虑到 Steele^[9] 侧向融化速率参数化方案引入了浮冰几何形状和大小的影响参数,而浮冰几何形状和大小等因素又与海冰周长的确定有关,因此本文利用 3 种边缘检测算子分析了不同重构分辨率对 SAR 图像海冰边缘提取及周长计算的影响,并结合艾润冰等^[19] 的参数化方案进行了侧向融化温度的敏感性试验,分析了图像重构分辨率对海冰侧向融化模拟结果的影响。

2 数据与方法

2.1 SAR 数据及其预处理

RADASAT-2 是 2007 年加拿大航天局发射的一颗搭载 C 波段传感器的高分辨率商用雷达卫星,也被普遍应用于科学研究。其空间分辨率范围为 3~100 m,入射角范围为 10°~60°,最大成像幅宽为 500 km。本文使用的图像分别为 2010 年 9 月 11 日和 2011 年 1 月 16 日的 RADASAT-2 海冰图像,是包含 HH、HV、VV 和 VH 的四极化方式的单视复型产品(Single Look Complex, SLC),幅面均为 15 km×25 km,2010 年 9 月 11 日的图像中心点坐标为 77.55°N, 105.00°W,分辨率为 4.7 m×5.5 m;2011 年 1 月 16 日的图像中心点坐标为 75.46°N, 104.15°W,分辨率为 4.7 m×4.8 m。2010 年 9 月 11 日的图像中海冰破碎程度较 2011 年 1 月 16 日的图像高。

为了消除系统性误差,获得更加有意义的海冰信息,应对图像进行预处理:首先进行辐射校正,将图像的 DN 值转换成代表目标真实特征的归一化雷达后向散射截面(NRCS) σ_0 。其次,为了获取准确的 SAR 图像空间位置信息,还需对 SAR 图像进行一定的几何校正。由于本文所研究的对象为海洋,地球重力作用使得海表面变得相对平缓,起伏度较小,在成像海域面积小的情况下,可以忽略因斜距成像而导致的叠掩

和几何畸变等现象,因此几何校正仅采用产品文件 product.xml 进行地理编码校正。此外, SAR 成像过程中受发射波和回波干涉等影响,会在图像上以噪声形式呈现,给图像解译带来困难,为了抑制这些斑点噪声,突出地物信息,需要对图像进行滤波处理,文中所用滤波方法为 Refined lee 滤波。最后,本文所选取图像的空间分辨率为 4.7 m×5.5 m,但在实际计算海冰周长时,需要忽略部分小块碎冰,只计算较大块碎冰的周长,无需使用如此高的分辨率。因此我们在原分辨率的基础上对距离向和方位向分辨率每隔 5 m 重构一次,至 200 m×200 m 分辨率时,冰水界限变得模糊无法识别,因而本文主要研究 5 m×5 m 至 200 m×200 m 范围内分辨率对海冰周长的影响。

2.2 边缘检测算法

本研究利用边缘检测算法^[20] 进行海冰边缘的提取。边缘检测主要包括以下两个基本内容:

(1)用边缘算子突出图像中的边缘像素,提取出反映灰度变化的边缘点集。

(2)通过设置阈值的方法剔除某些误判的边界点或对间断的边界点进行补充,最后将这些边界点连接成完整的线。

常用的边缘检测方法有一阶边缘检测和二阶边缘检测。文中分别使用一阶边缘检测算子中的 Sobel 算子、Prewitt 算子和二阶边缘检测算子中的 Canny 算子进行海冰周长的计算。

3 结果

3.1 分辨率对图像检测结果的影响

图 1 为使用 Sobel 算子对 2010 年 9 月 11 日图像进行边缘检测的结果,图 1a 至图 1d 分别表示 5 m×5 m、50 m×50 m、100 m×100 m、150 m×150 m 分辨率下的图像(下同),可以看出:50 m×50 m 分辨率下边缘检测的效果最好,冰水边界线清晰且边缘线较完整;5 m×5 m 分辨率下误判的边缘点较多,部分海冰像素也被确定为边缘点,导致边缘线不清晰,过分估计了碎冰的量;100 m×100 m、150 m×150 m 分辨率下检测的边缘线较宽且间断点较多。

图 2 为使用 Prewitt 算子对 2010 年 9 月 11 日图像进行边缘检测的结果,可以看出:随着分辨率的变化 Prewitt 算子与 Sobel 算子的检测结果表现出相似的规律,同样在 50 m×50 m 分辨率下效果最好,但 Prewitt 算子对边缘的定位不如 Sobel 算子,确定的海冰边缘线较宽。优点是整体看来 Prewitt 算子检测出的边缘间断点较少,在分辨率较小的情况下仍可看出海冰的

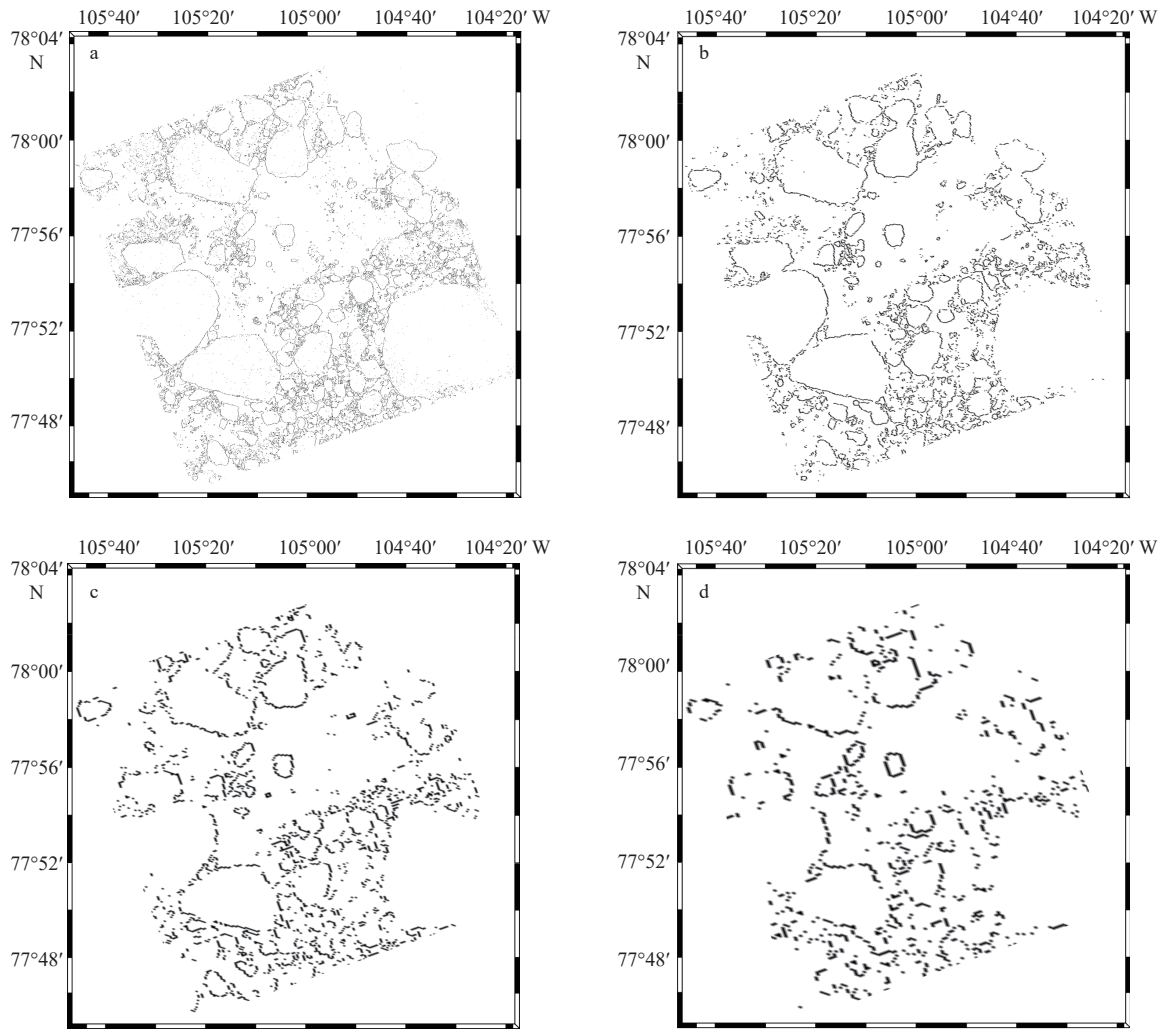


图 1 Sobel 算子对 2010 年 9 月 11 日图像边缘检测的结果

Fig. 1 Results of Sobel operator on image edge detection on September 11, 2010

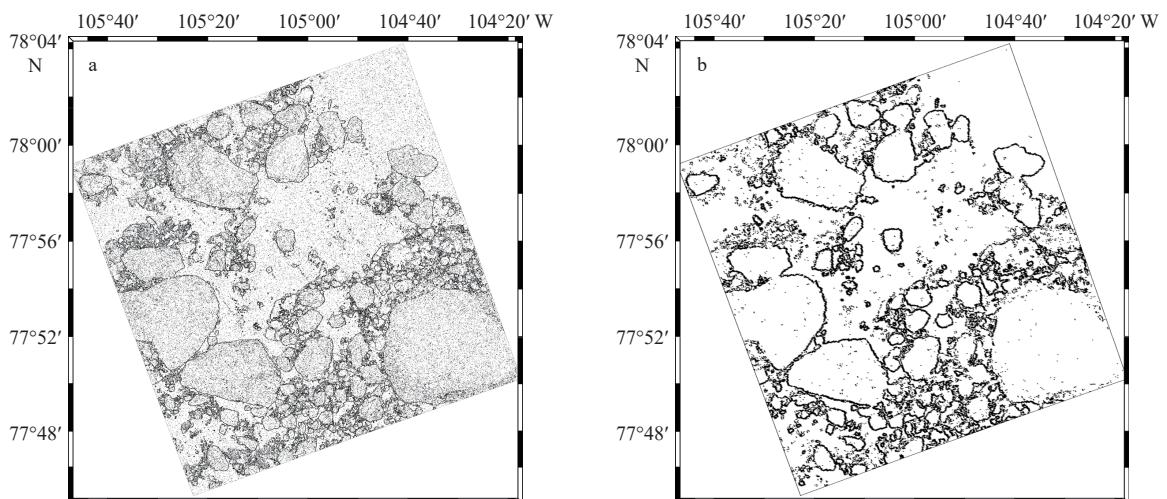
a. 5 m×5 m 分辨率; b. 50 m×50 m 分辨率; c. 100 m×100 m 分辨率; d. 150 m×150 m 分辨率

a. 5 m×5 m resolution; b. 50 m×50 m resolution; c. 100 m×100 m resolution; d. 150 m×150 m resolution

边缘轮廓。

图 3 为使用 Canny 算子对 2010 年 9 月 11 日图像进行边缘检测的结果,可以看出: 100 m×100 m 分辨

率下检测效果最好, 5 m×5 m 分辨率下完全无法区分海冰和海水像素, 50 m×50 m 分辨率下将很多像素误判为边缘像素, 这是因为 Canny 算子先对图像进行了



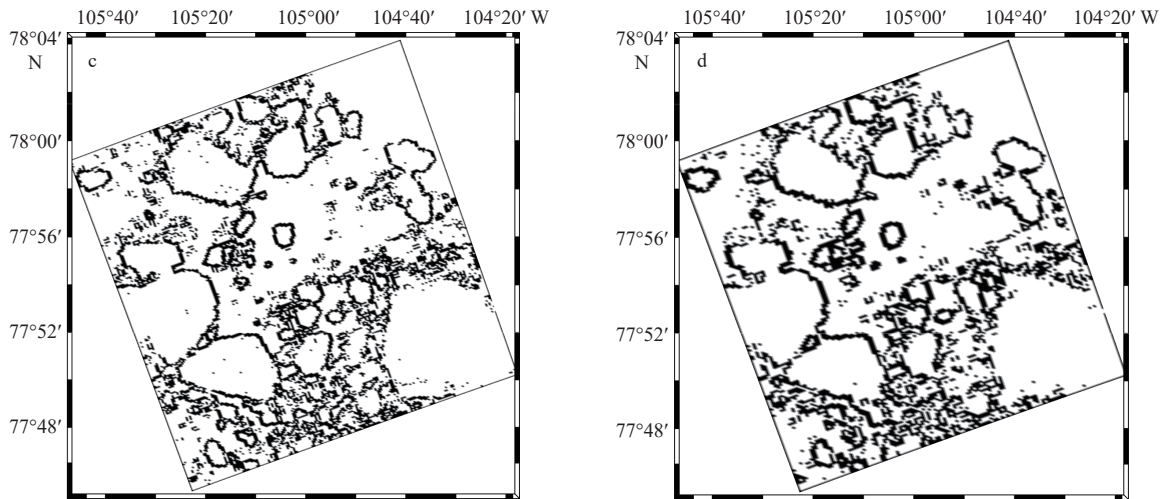


图 2 Prewitt 算子对 2010 年 9 月 11 日图像边缘检测的结果

Fig. 2 Results of Prewitt operator on image edge detection on September 11, 2010

a. 5 m×5 m 分辨率; b. 50 m×50 m 分辨率; c. 100 m×100 m 分辨率; d. 150 m×150 m 分辨率

a. 5 m×5 m resolution; b. 50 m×50 m resolution; c. 100 m×100 m resolution; d. 150 m×150 m resolution

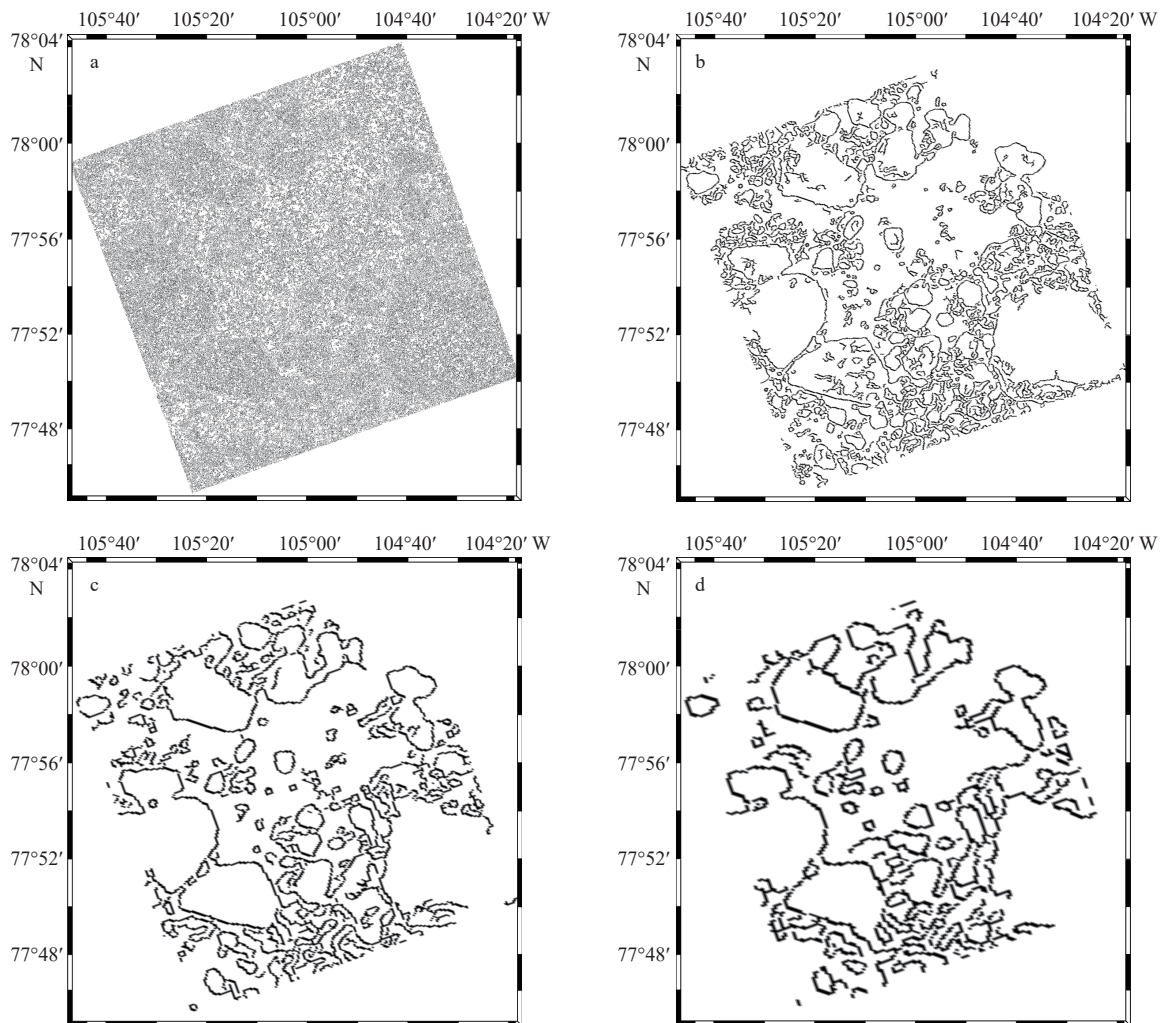


图 3 Canny 算子对 2010 年 9 月 11 日图像边缘检测的结果

Fig. 3 Results of Canny operator on image edge detection on September 11, 2010

a. 5 m×5 m 分辨率; b. 50 m×50 m 分辨率; c. 100 m×100 m 分辨率; d. 150 m×150 m 分辨率

a. 5 m×5 m resolution; b. 50 m×50 m resolution; c. 100 m×100 m resolution; d. 150 m×150 m resolution

滤波处理,不易受到噪声的影响,因此会将很多弱边缘归于边缘点集内,造成误判。 $150\text{ m}\times 150\text{ m}$ 分辨率下检测到的海冰边缘较宽。

图4为使用Sobel算子对2011年1月16日图像进行边缘检测的结果,可以看出: $50\text{ m}\times 50\text{ m}$ 分辨率下的海冰边缘检测效果较好,但整体仍出现许多误判区域,这可能是因为图像本身就具有较多小块碎冰区,灰度渐变不明显导致误判增加。 $5\text{ m}\times 5\text{ m}$ 分辨率下冰水界限不明显且误判点较多, $100\text{ m}\times 100\text{ m}$ 和 $150\text{ m}\times 150\text{ m}$ 分辨率下断点较多。

图5为使用Prewitt算子对2011年1月16日图像进行边缘检测的结果,可以看出: $100\text{ m}\times 100\text{ m}$ 分辨率下的海冰边缘检测效果最好,冰水边界线清晰且边缘线较完整,但部分海冰和海水像素上出现了少许误判区域, $5\text{ m}\times 5\text{ m}$ 和 $50\text{ m}\times 50\text{ m}$ 分辨率下冰水界限明

显但误判点较多, $150\text{ m}\times 150\text{ m}$ 分辨率下冰水界限不明显且间断点较多。

图6为使用Canny算子对2011年1月16日图像进行边缘检测的结果,可以看出: $150\text{ m}\times 150\text{ m}$ 分辨率下检测结果较好但边缘线较宽, $5\text{ m}\times 5\text{ m}$ 分辨率下完全无法区分海冰和海水像素, $50\text{ m}\times 50\text{ m}$ 和 $100\text{ m}\times 100\text{ m}$ 分辨率下边缘线清晰但很多海冰像素被误判为边缘像素,原因同上。

3.2 分辨率对海冰周长计算结果的影响

图7为利用3种边缘检测算子对2010年9月11日图像计算得到的海冰周长随分辨率的变化,其中灰色虚线表示人工判别的结果。可以看出Prewitt算子在分辨率为 $40\text{ m}\times 40\text{ m}$ 至 $50\text{ m}\times 50\text{ m}$ 范围内的计算结果与人工判别结果最为接近,最佳分辨率为 $30\text{ m}\times 30\text{ m}$,高于最佳分辨率时会少量高估海冰边缘周长,

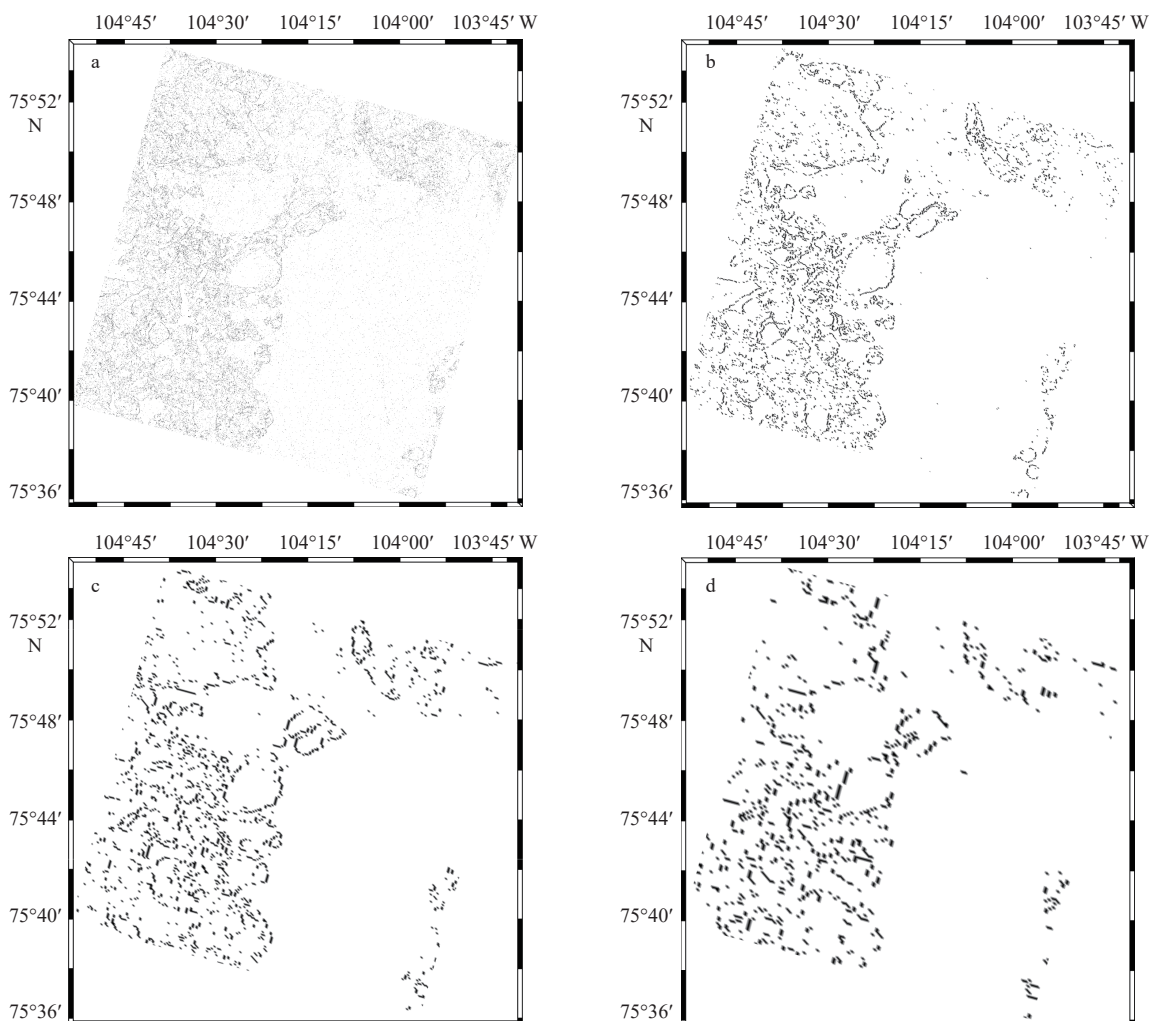


图4 Sobel算子对2011年1月16日图像边缘检测的结果

Fig. 4 Results of Sobel operator on image edge detection on January 16, 2011

a. $5\text{ m}\times 5\text{ m}$ 分辨率; b. $50\text{ m}\times 50\text{ m}$ 分辨率; c. $100\text{ m}\times 100\text{ m}$ 分辨率; d. $150\text{ m}\times 150\text{ m}$ 分辨率

a. $5\text{ m}\times 5\text{ m}$ resolution; b. $50\text{ m}\times 50\text{ m}$ resolution; c. $100\text{ m}\times 100\text{ m}$ resolution; d. $150\text{ m}\times 150\text{ m}$ resolution

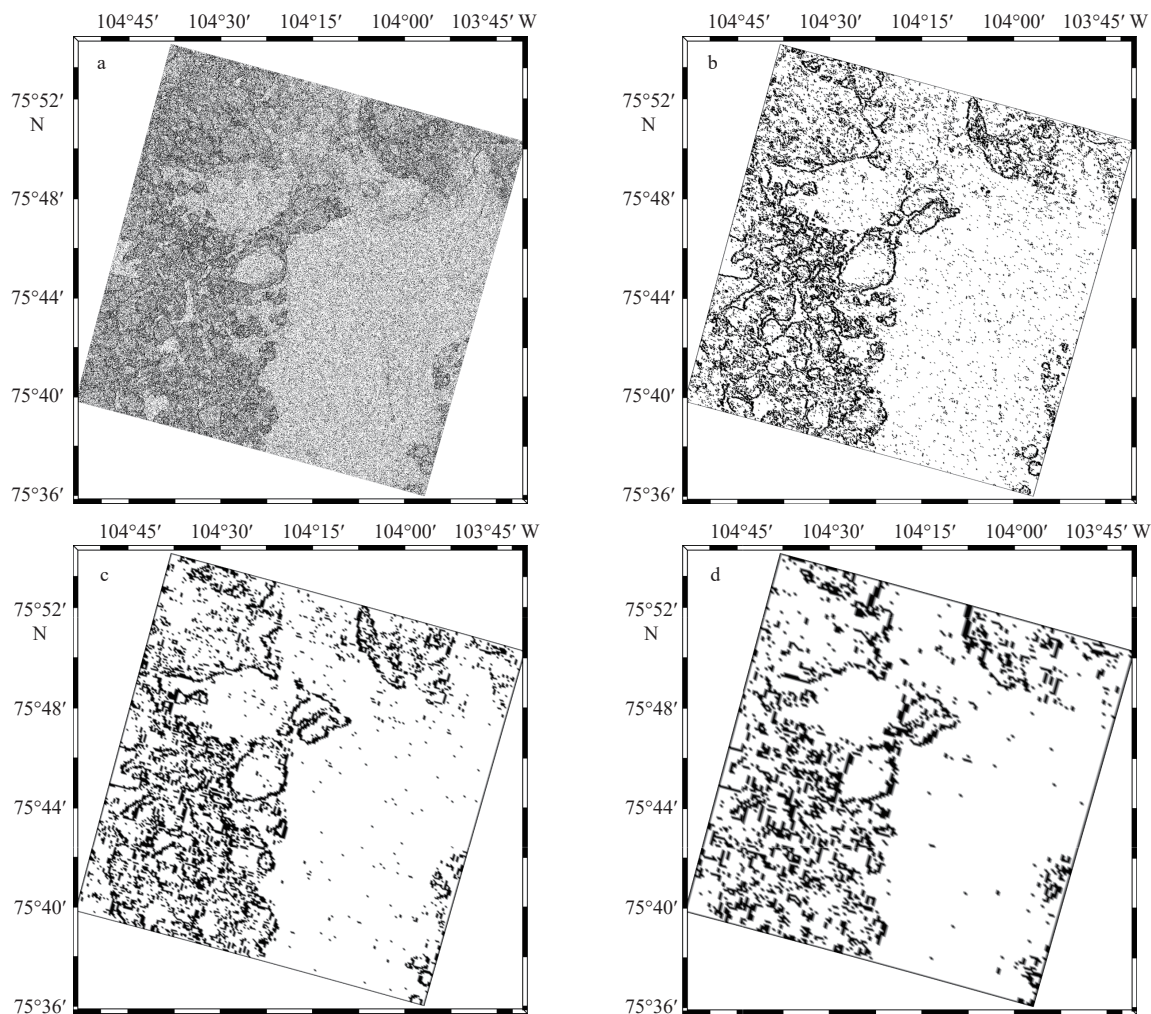


图 5 Prewitt 算子对 2011 年 1 月 16 日图像边缘检测的结果

Fig. 5 Results of Prewitt operator on image edge detection on January 16, 2011

a. 5 m×5 m 分辨率; b. 50 m×50 m 分辨率; c. 100 m×100 m 分辨率; d. 150 m×150 m 分辨率

a. 5 m×5 m resolution; b. 50 m×50 m resolution; c. 100 m×100 m resolution; d. 150 m×150 m resolution

而后随着分辨率逐渐降低计算得到的海冰周长也逐渐变小,且计算结果均低于人工判别结果,120 m×120 m 后变化趋势趋于平稳。Sobel 算子的计算结果整体高于 Prewitt 算子, Sobel 算子变化趋势与 Prewitt 算子大致相同,最佳分辨率在 40 m×40 m 和 45 m×45 m 附近,当分辨率高于 40 m×40 m 时会少量高估海冰边缘周长。Canny 算子的计算结果则明显低于 Prewitt 算子和 Sobel 算子,与人工判别结果相差较大,整体结果随分辨率变化趋势平稳。可能有以下几点原因对以上结果产生影响:首先, SAR 系统固有的背景噪声会随着重构分辨率的降低而降低;其次,成像时 SAR 发射的电磁波与目标的回波会相干叠加,造成斑点噪声,在较高分辨率下,像素的像元面积较小,斑点噪声对回波信息造成的影响就较大,随着分辨率的降低,像素的像元面积也随之变大,斑点噪声造成的影

响也会变小,噪声减少会使得边缘检测的结果更加准确;最后,分辨率的降低意味着 SAR 图像单个像元面积变大,海冰图像变得平滑,当分辨率低于某一阈值时,图像中无法捕捉到小块碎冰的像素,因此边缘检测计算结果变小。由于 Canny 算子在边缘检测过程中进行了滤波,去除了大部分图像噪声,因此分辨率的变化对其计算结果影响不大。

图 8 为 3 种边缘检测算子对 2011 年 1 月 16 日图像计算得到的海冰周长随分辨率的变化,可以看出 Canny 算子和 Sobel 算子的计算结果随着分辨率逐渐降低有减小趋势,且均低于人工判别结果; Prewitt 算子最佳分辨率为 65 m×65 m 和 155 m×155 m 左右,在此范围内的计算结果均大于人工判别结果,造成以上结果的原因可能是图像中有大量破碎冰区,噪声对这些碎冰区域的边缘检测影响较大。

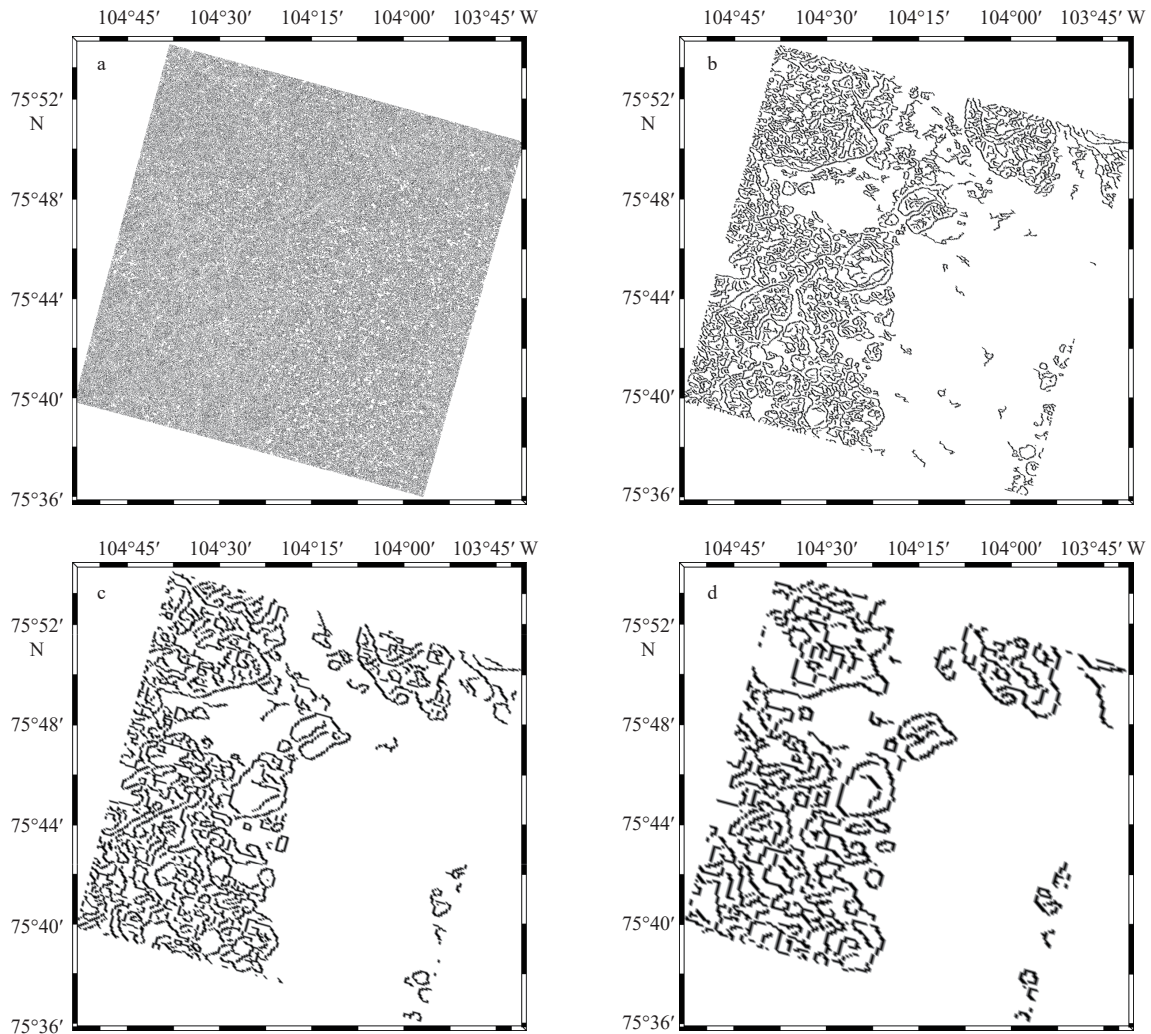


图 6 Canny 算子对 2011 年 1 月 16 日图像边缘检测的结果

Fig. 6 Results of Canny operator on image edge detection on January 16, 2011

a. 5 m×5 m 分辨率; b. 50 m×50 m 分辨率; c. 100 m×100 m 分辨率; d. 150 m×150 m 分辨率
 a. 5 m×5 m resolution; b. 50 m×50 m resolution; c. 100 m×100 m resolution; d. 150 m×150 m resolution

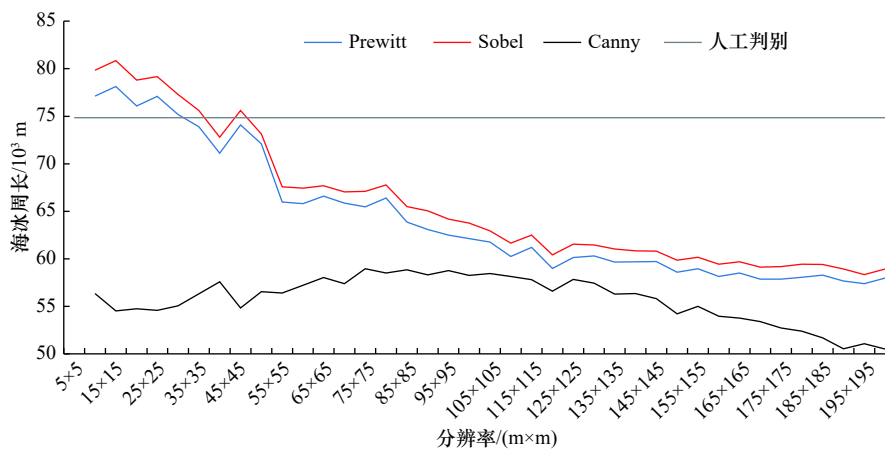


图 7 3 种边缘检测算子得到的 2010 年 9 月 11 日海冰周长随分辨率的变化

Fig. 7 Changes in sea ice perimeter with resolution obtained by three edge detection operators on September 11, 2010

3.3 温度对海冰侧向融化的影响

艾润冰等^[19]在 2018 年进行了纯水冰的侧向融化

实验, 测量了融冰期间实验室气温、水温垂向分布以及冰厚和冰侧面生消量等要素, 利用 Liang-Kleeman

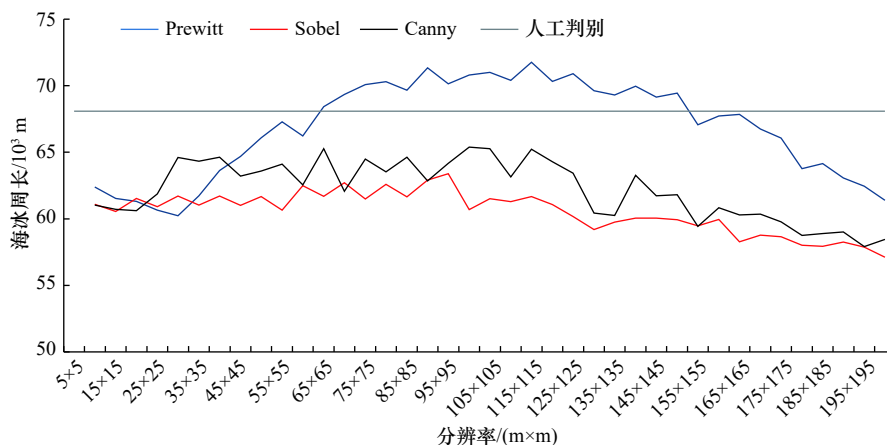


图 8 3 种边缘检测算子得到的 2011 年 1 月 16 日海冰周长随分辨率的变化

Fig. 8 Changes in sea ice perimeter with resolution obtained by three edge detection operators on January 16, 2011

信息流理论对冰层侧向融化速率的影响因素进行定量计算,并通过拟合得到了仅用气温表征的侧向融化速率参数化方案

$$M_r = 0.063 \ 63 T_a^{1.243}, \quad (1)$$

式中, M_r 表示侧向融化速率,单位为 mm/h; T_a 代表气温,单位为 $^{\circ}\text{C}$,该参数化方案能够较好地描述侧向融化速率与气温之间的关系^[9]。

结合边缘检测计算所得海冰周长及上述侧向融化速率参数化方案,进一步得到图像中海冰面积的融化速率,分别模拟了当海冰破碎程度不同时,在不同温度下 1 年内融化的海冰面积。图 9 是以 2010 年 9 月 11 日图像中海冰为例模拟的不同温度下海冰的融化面积,可以看出:当海冰破碎程度较低时,随着温度升高,海冰融化面积随时间呈指数型增加,利用 3 种算子模拟的海冰融化面积变化趋势基本一致,均低于人工判别结果, Prewitt 算子和 Sobel 算子模拟结

果与人工判别最为接近, Canny 算子模拟结果与人工判别结果相差较大。

图 10 是以 2011 年 1 月 16 日图像中海冰为例模拟的不同温度下海冰的融化面积,可以看出:当海冰破碎程度较高时,随着温度升高,3 种算子模拟的海冰融化面积变化趋势与海冰破碎程度较低时一致, Prewitt 算子模拟结果与人工判别最为接近。

4 结论与讨论

本文利用 Prewitt、Sobel 和 Canny 边缘检测算子,计算了 RADASAT-2 的海冰 SAR 图像范围内的海冰破碎边界周长,分析不同图像分辨率、不同边缘检测算子分别对周长计算结果产生的影响;结合海冰侧向融化速率参数化方案,进行了海冰侧向融化温度敏感性模拟实验,分析了图像重构分辨率对海冰侧向融化结果的影响,得到如下几方面的结论:

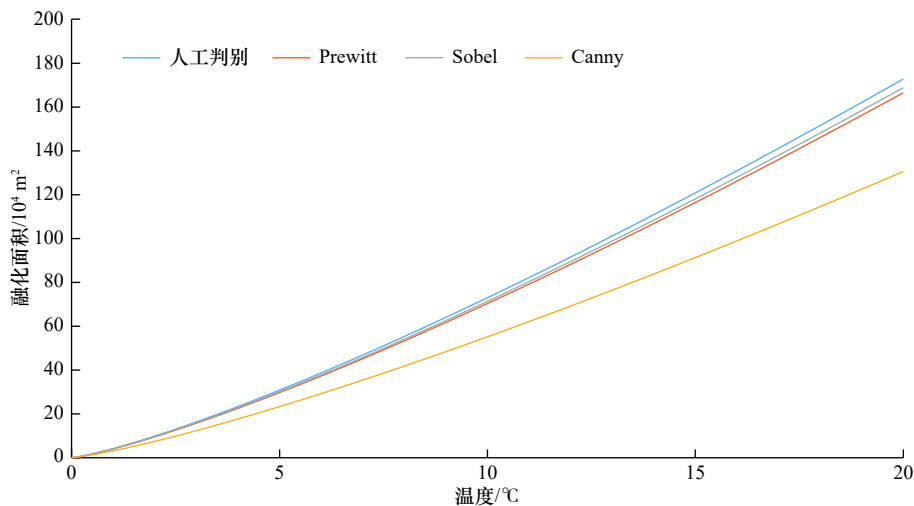


图 9 以 2010 年 9 月 11 日图像为例海冰融化面积随温度变化趋势

Fig. 9 Taking the image of September 11, 2010 as an example, the sea ice melting area changes with temperature

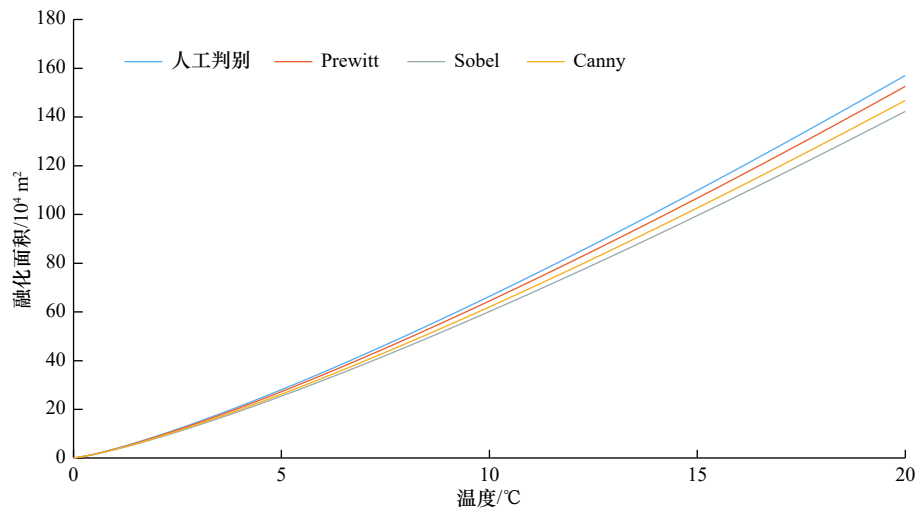


图 10 以 2011 年 1 月 16 日图像为例海冰融化面积随温度变化趋势

Fig. 10 Taking the image of January 16, 2011 as an example, the sea ice melting area changes with temperature

(1) 不同图像分辨率下边缘检测算子的结果不同。在海冰边缘区检测方面,当海冰图像上小块碎冰区域较少时适合使用 Sobel 边缘检测算子,且分辨率在 $50\text{ m}\times 50\text{ m}$ 附近时检测效果最好,冰水边界线清晰且边缘线较完整;而海冰图像上小块碎冰区域较多时则适合使用 Canny 边缘检测算子,且分辨率在 $100\text{ m}\times 100\text{ m}$ 附近时检测结果最好,这是因为 Canny 算子先对图像进行了滤波处理,即使图像上噪声较多,检测结果也不易受到噪声的影响。

(2) 在海冰周长计算方面,当海冰图像上小块碎冰区域较少时,适合使用 Prewitt 算子和 Sobel 算子,且在分辨率为 $30\text{ m}\times 30\text{ m}$ 至 $45\text{ m}\times 45\text{ m}$ 时计算结果与人工判别结果最接近;当海冰图像上小块碎冰区域较多时适合使用 Prewitt 算子,分辨率在 $65\text{ m}\times 65\text{ m}$ 和 $155\text{ m}\times 155\text{ m}$ 附近时计算结果与人工判别结果最

接近。

(3) 在仅有侧向融化的条件下,随着温度升高,3 种算子模拟的海冰面积融化趋势均呈指数型增加, Prewitt 算子模拟结果与人工判别结果最为接近。

在使用边缘检测算子计算海冰周长时,仅仅将周长变化归因于侧向融化,而没有考虑海冰破碎对计算结果的影响;在分析重构分辨率的影响时,只是将计算结果与人工判别结果作对比,这在一定程度上会受到主观意识的影响,可考虑使用更加直观的判别标准;其次本文所使用的冰层侧向融化速率参数化方案仅考虑了气温的影响,忽略了辐射、湍流、海洋混合等自然环境因素,这对模拟海冰面积的融化过程有一定的影响,应考虑改进该参数化方案;且文中只对两幅图像进行分析,缺乏结果验证,未来还需要进一步分析研究。

参考文献:

- [1] 王庆元,李清泉,王兰宁. 侧边界融化对北极海冰影响的数值模拟[J]. 极地研究, 2013, 25(1): 84-89.
Wang Qingyuan, Li Qingquan, Wang Lanning. Numerical simulations of the effects of lateral melting on Arctic sea ice[J]. Chinese Journal of Polar Research, 2013, 25(1): 84-89.
- [2] Zubov N N. Arctic Ice[M]. U.S. Naval Oceanographic and American Meteorological Society, trans. San Diego: Navy Electronics Laboratory, 1963.
- [3] Maykut G A, Untersteiner N. Some results from a time-dependent thermodynamic model of sea ice[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1971, 76(6): 1550-1575.
- [4] Langleben M P. On the factors affecting the rate of ablation of sea ice[J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 1966, 3(4): 431-439.
- [5] Parkinson C L, Washington W M. A large-scale numerical model of sea ice[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1979, 84(C1): 311-337.
- [6] Josberger E G, Martin S. A laboratory and theoretical study of the boundary layer adjacent to a vertical melting ice wall in salt water[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1981, 111: 439-473.
- [7] Perovich D K. On the summer decay of a sea ice cover[D]. Seattle: University of Washington, 1983: 176.
- [8] Maykut G A, Perovich D K. The role of shortwave radiation in the summer decay of a sea ice cover[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1987, 92(C7): 7032-7044.
- [9] Steele M. Sea ice melting and floe geometry in a simple ice-ocean model[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1992, 97(C11):

- 17729–17738.
- [10] 李志军, 张占海, 董西路, 等. 北极海冰生消过程关键指标的观测新技术[J]. *自然科学进展*, 2004, 14(9): 1077–1080.
Li Zhijun, Zhang Zhanhai, Dong Xilu, et al. New observation techniques for key indicators of Arctic sea ice generation and depletion process[J]. *Progress in Natural Science*, 2004, 14(9): 1077–1080.
- [11] 雷瑞波, 李志军, 程斌, 等. 夏季北冰洋浮冰-水道热力学特征现场观测研究[J]. *极地研究*, 2010, 22(3): 286–295.
Lei Ruibo, Li Zhijun, Cheng Bin, et al. Observations on the thermodynamics mechanism of the floe-lead system in the Arctic ocean during summer[J]. *Chinese Journal of Polar Research*, 2010, 22(3): 286–295.
- [12] 王庆凯, 李志军, 曹晓卫, 等. 实测冰-水侧向界面热力学融化速率[J]. *南水北调与水利科技*, 2016, 14(6): 81–86.
Wang Qingkai, Li Zhijun, Cao Xiaowei, et al. Analysis of measured thermodynamic melting rate of lateral interface between ice and water[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2016, 14(6): 81–86.
- [13] 王庆凯, 方贺, 李志军, 等. 湖冰侧、底部融化现场观测与热力学分析[J]. *水利学报*, 2018, 49(10): 1207–1215.
Wang Qingkai, Fang He, Li Zhijun, et al. Field investigations on lateral and bottom melting of lake ice and thermodynamic analysis[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2018, 49(10): 1207–1215.
- [14] 方贺, 谢涛, 杜路遥, 等. 一种用于观测北极海冰侧边界融化的水下超声波测距系统[J]. *仪表技术与传感器*, 2018(9): 45–50.
Fang He, Xie Tao, Du Luyao, et al. Underwater ultrasonic distance measurement system for observation Arctic sea ice lateral boundary melting[J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2018(9): 45–50.
- [15] Hall R T, Rothrock D A. Photogrammetric observations of the lateral melt of sea ice floes[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1987, 92(C7): 7045–7048.
- [16] Xie Tao, Zhao Li, Perrie W, et al. The sea-ice detection capability of synthetic aperture radar[J]. *Open Journal Systems*, 2017, 2(2): 261.
- [17] Zhao Li, Xie Tao, Meng Lei, et al. Polarization ratio characteristics of electromagnetic scattering from sea ice in polar areas[J]. *Chinese Physics B*, 2018, 27(12): 124102.
- [18] Xie Tao, Perrie W, Wei Caiying, et al. Discrimination of open water from sea ice in the Labrador Sea using quad-polarized synthetic aperture radar[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 247: 111948.
- [19] 艾润冰, 谢涛, 刘彬贤, 等. 基于气温的浮冰侧向融化速率参数化方案实验研究[J]. *海洋学报*, 2020, 42(5): 150–158.
Ai Runbing, Xie Tao, Liu Binxian, et al. An experimental study on parametric scheme of lateral melting rate of ice layer based on temperature[J]. *Haiyang Xuebao*, 2020, 42(5): 150–158.
- [20] 江笑婵, 万振凯, 陈利. 基于matlab边缘提取的几种方法的比较[J]. *电脑知识与技术*, 2006(1): 138, 141.
Jiang Xiaochan, Wan Zhenkai, Chen Li. The comparison of several edge detection methods based on matlab[J]. *Computer Knowledge and Technology*, 2006(1): 138, 141.

Research on the influence of SAR reconstruction resolution on the prediction of sea ice lateral melting quantity

Xie Tao¹, Ai Runbing², Wang Yan³, Liu Binxian⁴

(1. School of Remote Sensing and Geomatics Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 2. Zhumadian Meteorological Service, Zhumadian 450003, China; 3. Tianjin Weather Modification Office, Tianjin 300074, China; 4. Tianjin Central Observatory for Oceanic Meteorology, Tianjin 300074, China)

Abstract: Using RADARSAT-2 sea ice SAR images, by the way of Prewitt, Sobel and Canny edge detection operators to calculate the sea ice perimeter in the image, and consider the influence of different image resolutions and different edge detection operators on the calculation results respectively. Combined with the ice lateral melting rate parameterization scheme, the sensitivity experiment of the lateral melting of sea ice to temperature was carried out, and the effect of image reconstruction resolution on the simulation results of sea ice lateral melting was analyzed. The results show that the best edge detection operator corresponding to different degrees of sea ice breakage in the image is different, and the best resolution is also different. Under the condition of only lateral melting, the melting area of sea ice increases exponentially with increasing temperature. The simulation trends of the three operators are basically the same. The Prewitt operator has the best simulation effect, and the corresponding optimal reconstruction resolution is 30 m×30 m, 65 m×65 m and 155 m×155 m.

Key words: SAR; lateral melting of sea ice; reconstruction resolution; edge detection