



基于星载合成孔径雷达图像交叉谱的全球海浪特征研究

李慧敏, 何宜军, 王臣, 林文明, 杨劲松

Study of global ocean wave characteristics based on spaceborne SAR image cross-spectrum

Li Huimin, He Yijun, Wang Chen, Lin Wenming, Yang Jingsong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12284/hyxb2024040>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

复合雷达后向散射模型与合成孔径雷达、散射计和高度计海面雷达后向散射观测的比较分析

Comparisons of composite radar backscattering model and sea surface radar backscatter from synthetic aperture radar, scatterometer and altimeter
海洋学报. 2019, 41(7): 123–135 <https://doi.org/10.3969/j.issn.0253-4193.2019.07.011>

基于SAR图像速度聚束调制的海浪反演研究

Ocean wave inversion based on the velocity bunching modulation of SAR image
海洋学报. 2021, 43(12): 111–121 <https://doi.org/10.12284/hyxb2021103>

星载合成孔径雷达北极海冰覆盖观测

$\${suggestArticle.titleEn}$
海洋学报. 2019, 41(4): 145–146 <https://doi.org/10.3969/j.issn.0253-4193.2019.04.013>

基于TerraSAR-X卫星数据的内孤立波参数和海表流速信息提取的探索研究

Exploratory research on the retrieval of internal wave parameters and sea surface current velocity based on TerraSAR-X satellite data
海洋学报. 2020, 42(1): 90–101 <https://doi.org/10.3969/j.issn.0253-4193.2020.01.010>

基于混合损失U-Net的SAR图像渤海海冰检测研究

Detecting sea ice of Bohai Sea using SAR images based on a hybrid loss U-Net model
海洋学报. 2021, 43(6): 157–170 <https://doi.org/10.12284/hyxb2021084>

基于SAR子孔径分解的海表面二维流场反演

Two-dimensional sea surface current field inversion based on SAR sub-aperture decomposition
海洋学报. 2023, 45(8): 24–30 <https://doi.org/10.12284/hyxb2023094>

关注微信公众号, 获得更多资讯信息

李慧敏, 何宜军, 王臣, 等. 基于星载合成孔径雷达图像交叉谱的全球海浪特征研究[J]. 海洋学报, 2024, 46(3): 111–117, doi:10.12284/hyxb2024040

Li Huimin, He Yijun, Wang Chen, et al. Study of global ocean wave characteristics based on spaceborne SAR image cross-spectrum[J]. Haiyang Xuebao, 2024, 46(3): 111–117, doi:10.12284/hyxb2024040

基于星载合成孔径雷达图像交叉谱的 全球海浪特征研究

李慧敏^{1,2}, 何宜军^{1,2*}, 王臣^{1,2}, 林文明^{1,2}, 杨劲松³

(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研究实验室, 北京 100081; 3. 自然资源部第二海洋研究所 卫星海洋环境动力学国家重点实验室, 浙江 杭州 310012)

摘要: 星载合成孔径雷达 (Synthetic Aperture Radar, SAR) 因其全天时、全天候的观测能力, 为全球海洋动力环境要素研究提供了重要数据支撑。然而, SAR 海浪成像是非线性过程, 现有理论中的近似求解会导致海浪谱反演的信息缺失。SAR 图像交叉谱技术的提出一定程度上突破了这一限制, 能够很好地量化海浪谱特性及海浪传播方向。本研究延续前人系列成果, 利用最新提出的面向径向海浪的图像谱强度, 开展不同尺度海浪随局地风速的变化趋势分析, 并基于雷达视向图像谱强度提取了谱峰波数, 进而结合欧洲空间局环境遥感卫星先进合成孔径雷达波模式在开阔大洋获取的近 400 万景 SAR 图像, 分析了谱峰波数的全球分布特征, 为量化全球风浪耦合过程提供新视角, 揭示了海浪与风速耦合关系的空间分布与季节变化规律。

关键词: 星载合成孔径雷达; 欧洲空间局环境遥感卫星先进合成孔径雷达 (Envisat/ASAR); 图像交叉谱; 风浪耦合

中图分类号: P731.21

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2024)03-0111-07

1 引言

海浪是海面风力作用下形成的水面规律运动, 是表层海洋的最基本特征之一, 对上层海洋物理过程和海洋大气环境交互有重要影响。在广阔的海气界面, 海浪不仅对热动能及物质传递起着关键作用, 还对海洋的能量输送和搬运具有重要的地理和生态效应。特别是在与人类活动息息相关的沿海地带, 海浪产生的水动能能够改变海底地貌, 海水本身也会导致沿岸沉积和侵蚀过程, 对海洋生态系统的结构和功能具有主导作用^[1]。因此, 充分诊断并量化全球和区域海洋波浪特性, 对于深入理解海洋动力过程、挖掘海洋与大

气圈层科学问题以及沿海管理和生态保护至关重要。

现场测量和遥感技术是当前获取海浪信息的主要方法。其中, 现场测量主要以仪器阵列、自由浮标、潜标等设备为主, 能够在有限空间点位获取较高精度的海浪信息。然而, 现场测量存在仪器布放难度大、费用高且重复利用率低等局限, 不能提供用于研究海浪时空变化规律的大数据样本。高频地波雷达和 X 波段航海雷达均可对海浪行进区域进行遥测, 但作用时空范围仍然有限, 无法满足新时代全球海浪观测的需要。而基于星载遥感的反演方法能够提供近实时的大面积海面特征数据, 逐渐发展为全球海浪观测的主要技术手段^[2]。虽然传统卫星高度计已初步

收稿日期: 2023-08-03; 修订日期: 2023-12-19。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (43006163, 42206179, 42027805)。

作者简介: 李慧敏 (1990—), 女, 山东省淄博市人, 讲师, 研究方向为微波海洋遥感。E-mail: Huimin.li@nuist.edu.cn

* 通信作者: 何宜军, 教授, 博士生导师, 研究方向为海洋遥感。E-mail: yjhe@nuist.edu.cn

实现全球海浪观测覆盖,但其仅能获取星下点海浪的有效波高数据。作为首颗星载概念实验卫星,中法海洋卫星搭载的波谱仪聚焦测量海浪方向谱,是近年来对海浪遥感新能力的尝试,但其海浪反演和参数提取算法仍在探索改进中^[3]。

近几十年来,通过波浪数值模式输出、卫星遥感观测或两者结合,对全球和区域海洋波浪特征进行了大量研究^[4-5]。相关成果极大推动了业界对海洋波浪时空分布的深入理解^[6-7]、海洋风浪和涌浪异同的认识^[8-9]、海洋波浪对全球气候的响应^[10]等。但是,目前大部分研究集中在波浪的积分参数(如有效波高、平均波周期和平均波方向等),无法有效描述局地实时波浪特性。尤其是对于多模态波浪系统,海浪成分区分、成因及能量传递尚没有明确定论。主流做法是通过波浪频谱分析,描述每个波浪系统的积分参数,并利用再分析数据更准确地描绘当地的波浪条件^[11]。

星载合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)能够对海面进行大面积连续观测,获取高空间分辨率的海面粗糙度图像,用于二维海浪谱及海浪特征参数提取,已发展成为当前全球海浪观测应用最广泛的卫星传感器^[12]。自1978年第1颗海洋实验卫星Seasat-A发射以来,星载SAR图像空间分辨率不断提高,成像模式日趋丰富,极化通道由单极化发展为双极化和全极化,为全球海浪研究提供了海量观测数据。星载SAR海浪测量已为涌浪追踪^[13]和波浪-冰交互作用^[14]方面提供了高质量的观测数据。比如,基于10年的欧洲空间局环境遥感卫星(Envisat/ASAR)长时间数据序列研究全球交叉涌浪特征,发现了不同大洋交叉涌浪分布差异^[15]。

我们延续前人研究思路,在SAR图像交叉谱基础上,发现并定义了表征径向中小尺度海浪特征的新参数MeAn Cross-Spectral(MACS)^[16],该参数一方面展示了其与海面局地风场的紧密相关性,为独立风场反演算法提供了新思路。另一方面,通过对比大量的仿真图像谱MACS参数,证明了其在海浪成像精度评估方面的有效性^[17]。同时,不同波长的MACS参数组成的剖面能够在一定程度上反映海浪谱沿雷达径向的变化趋势,为提取谱峰波长提供了技术基础。因而,本文旨在探究SAR MACS在径向谱峰波长中的应用,研究全球及局地海浪时空变化规律。

2 数据与方法

2.1 合成孔径雷达数据

本文研究使用Envisat/ASAR获取的开阔大洋波

模式数据。Envisat卫星于2002年11月发射升空,至2012年4月持续获取了近10年的全球数据。ASAR是C波段雷达(中心频率为5.33 GHz),可以收集4种模式SAR图像。其中,波模式是专门用于全球海浪的常规观测模式。波模式图像沿卫星飞行轨道方向每100 km获取1景SAR图像,空间覆盖范围为10 km × 7 km(方位 × 距离),分辨率为9 m × 6 m。本文使用23°入射角和VV极化方式获取的波模式图像。

SAR图像交叉谱从单视复数据(Single Look Complex, SLC)SAR图像计算得到,本研究中使用了欧洲空间局发布的1B级交叉谱数据集。每幅图像的频谱涵盖24个离散波数,范围从0.008 rad/m到0.2 rad/m,角度范围为360°且角度分辨率为10°。本研究选取2007年1月至2011年12月期间获取的重处理数据,与欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)的再分析风矢量进行位置匹配,再分析产品提供每6 h、空间分辨率为0.5°的风场数据。每幅SAR图像的参考风矢量选取最接近SAR获取时间和空间的风矢量。

本文共收集了超过400万景ASAR图像交叉谱数据,图1a给出了其在全球2.5° × 2.5°空间网格的数据分布情况,平均数值在450个左右,个别位置处超过550景图像,为SAR MACS参数统计与分析提供了重要数据支持。图1b给出了每月数据量的变化趋势,显示在2007-2011年数据获取量基本保持稳定,月均数据量在35 000景左右。

2.2 MACS参数提取

本文结合我们近期研究成果中的MACS参数定义方法,即利用雷达视向方向的图像交叉谱强度表征不同尺度海浪强度。具体将方位向波长范围限制在300 m以上,而将径向±15°角度范围内波长在47~800 m之间的SAR图像交叉谱进行平均,得到MACS剖面,如图2所示。由于ASAR波模式数据的距离空间分辨率约为9 m,我们将最小波长定于5倍于分辨率的47 m,以确保能够较为准确地捕捉到海浪谱信号。其实,使用ASAR波模式SAR数据,可以计算30~800 m之间任意波长范围内的MACS。为清晰起见,本文将每个独立波数/波长分量的MACS表示为MACS^λ,其中λ表示波长。例如,MACS⁶²表示波长为62 m的MACS,用以表征真实海浪系统总能量在62 m波长海浪成分处的分布大小。

3 结果与讨论

3.1 MACS与风速的关系

在局地海面风应力的作用下,海浪随风时和风区

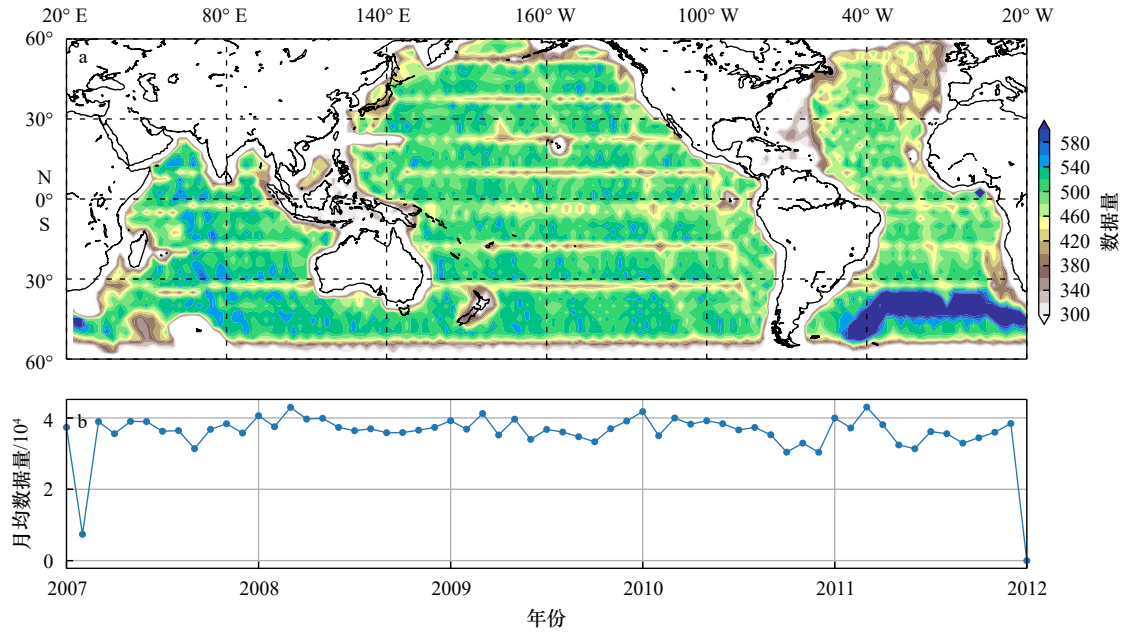


图1 欧洲环境卫星先进合成孔径雷达数据的全球空间分布

Fig. 1 Global spatial distribution of Envisat/ASAR data

a. 空间 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 统计; b. 月统计

a. Spatial grid of $2.5^\circ \times 2.5^\circ$; b. monthly data count

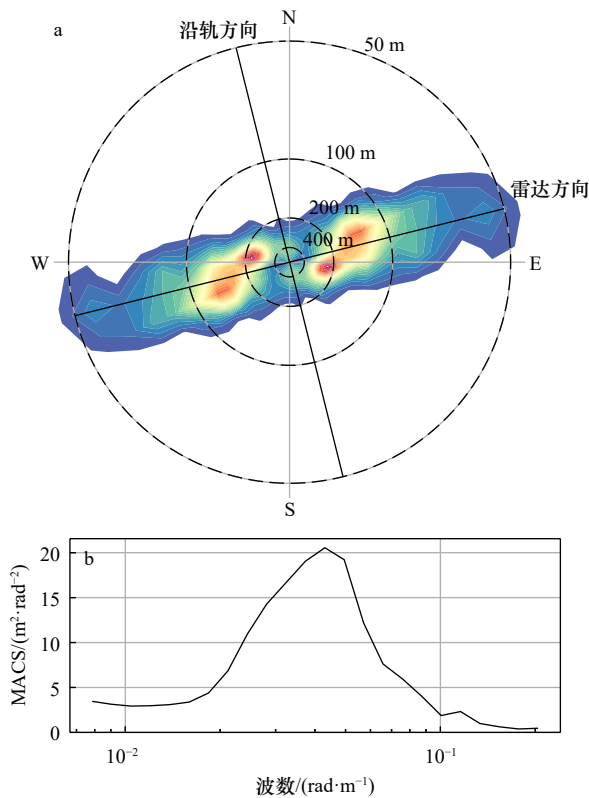


图2 MACS 参数定义示意图

Fig. 2 Schematic diagram of MACS parameter definition

a. SAR 图像交叉谱, 颜色表征归一化图像谱值(蓝色至红色取值 $0 \sim 1$); b. MACS 剖面

a. SAR cross-spectrum, color denotes the normalized image spectrum (values from blue to red are $0 \sim 1$); b. MACS profile

的增加逐渐增长, 直至达到充分成长状态。对于给定波长的海浪, 其波谱能量逐步增加并最终呈现饱和状态。尽管 MACS 与波谱间接相关, 但 MACS 仍然可以定量地反映海浪成长与风速的关系。由于 MACS 只能捕捉雷达视线方向海浪信息, 我们将风向限制在与同向(顺风)和逆向(逆风) $\pm 5^\circ$ 范围内。图 3 展示了 MACS 随风速增加时的变化情况。图 3a 中, MACS⁴⁷ 随风速增大而逐渐增加, 在风速高于 10 m/s 后达到饱和状态。图 3b 描述了波长从 46~255 m 范围内的 MACS 参数变化趋势。可以发现, 饱和风速随着波长增加而增加, 从 81~255 m 的波长范围内, 饱和风速从 10 m/s 增加到 18 m/s(饱和风速是 MACS 参数增加速度显著降低的风速)。这一规律与海浪成长规律基本一致。基于 JONSWAP 海浪谱, 10 m/s 风速下充分成长海浪的谱峰为 87 m, 16 m/s 风速下谱峰为 224 m, 均稍大于研究波长。另一影响因素是 SAR 图像交叉谱的波长分辨率, 图像谱在波数空间的等间隔采样意味着波长的非均匀采样, 波长 46 m 时的波长采样间隔约为 6 m, 该数值在波长 144 m 时增加为 20 m。因此可以认定, 不同波长的 MACS 达到饱和数值的风速与该波长接近谱峰波长时的风速基本一致。

3.2 MACS 剖面特征与径向谱峰波长提取

不同波长 MACS 的全球特征与海面风场特征较为相似, 尤其是在太平洋上从南大洋高风速过渡为信

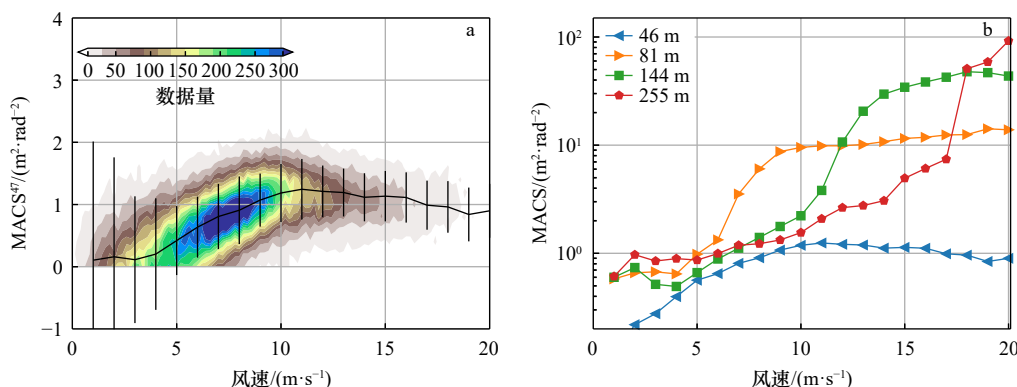


图3 图像谱参数随风速变化趋势

Fig. 3 Variation of MACS versus the wind speed

- a. MACS⁴⁷ 随风速变化的数据密度, 黑色实线为均值及标准差; b. 不同波长 MACS 随风速变化
- a. Data density of MACS⁴⁷ relative to wind speed, solid black line indicates the mean and standard deviation;
- b. variation of MACS at various wavelengths with wind speed

风带的中低风速区。为更加清晰地展现 MACS 剖面中海浪信息变化趋势,我们选取了太平洋 150°~145°W 之间区域,计算了 MACS 剖面随纬度变化的季节规律,如图 4 所示。在南北半球,特定波长下的 MACS 参数从高纬到赤道逐渐减小,这与风速变化趋势基本一致。沿着纬度方向存在 4 个明显的海浪聚集区,且聚集区的强度与位置随季节呈现明显变化。在北半球副热带地区,这个聚集区在冬季(DJF)达到最大值,分布在 25°~60°N 之间。在夏季(JJA)时减少到最小值,收缩到 40°N。该特征与北半球冬季风暴的影响密切相关。冬季风暴产生的长波浪向南传播并推动这个聚集区向南移动。而在南半球副热带地区,

趋势则相反,聚集区在夏季分布最广,冬季最小。两个位于信风带上的聚集区与副热带地区的邻近聚集区呈相似变化。

为探究不同海域 MACS 剖面的典型变化,本文选取了图 4a 中标注的 3 个区域(A1, A2, A3),分别位于 (44° ± 0.25°) N、(2° ± 0.25°) S 和 (52° ± 0.25°) S 上。MACS 剖面均值及其每个位置处的季节均值如图 5 所示,该参数剖面的形状有助于判别风浪与涌浪的相对主导地位。在图 5a 中,南大洋 A3 区域的 MACS 剖面曲线形状风浪频谱基本一致,长波处的 MACS 幅值相比谱峰位置处显著减小。而其他两个感兴趣区域处 MACS 在长波波数上并未出现明显降低趋势,

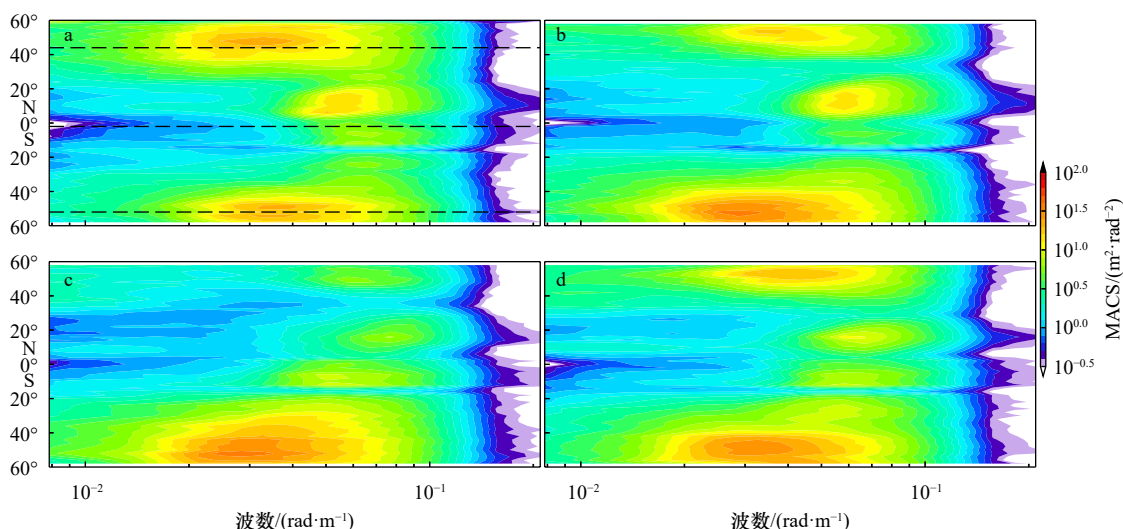


图4 太平洋 150°~145°W 间 MACS 平均剖面随纬度的季节变化

Fig. 4 Seasonal variation of averaged MACS profile over 150°-145°W along the latitude

- a. 冬季; b. 春季; c. 夏季; d. 秋季
- a. Winter; b. spring; c. summer; d. autumn

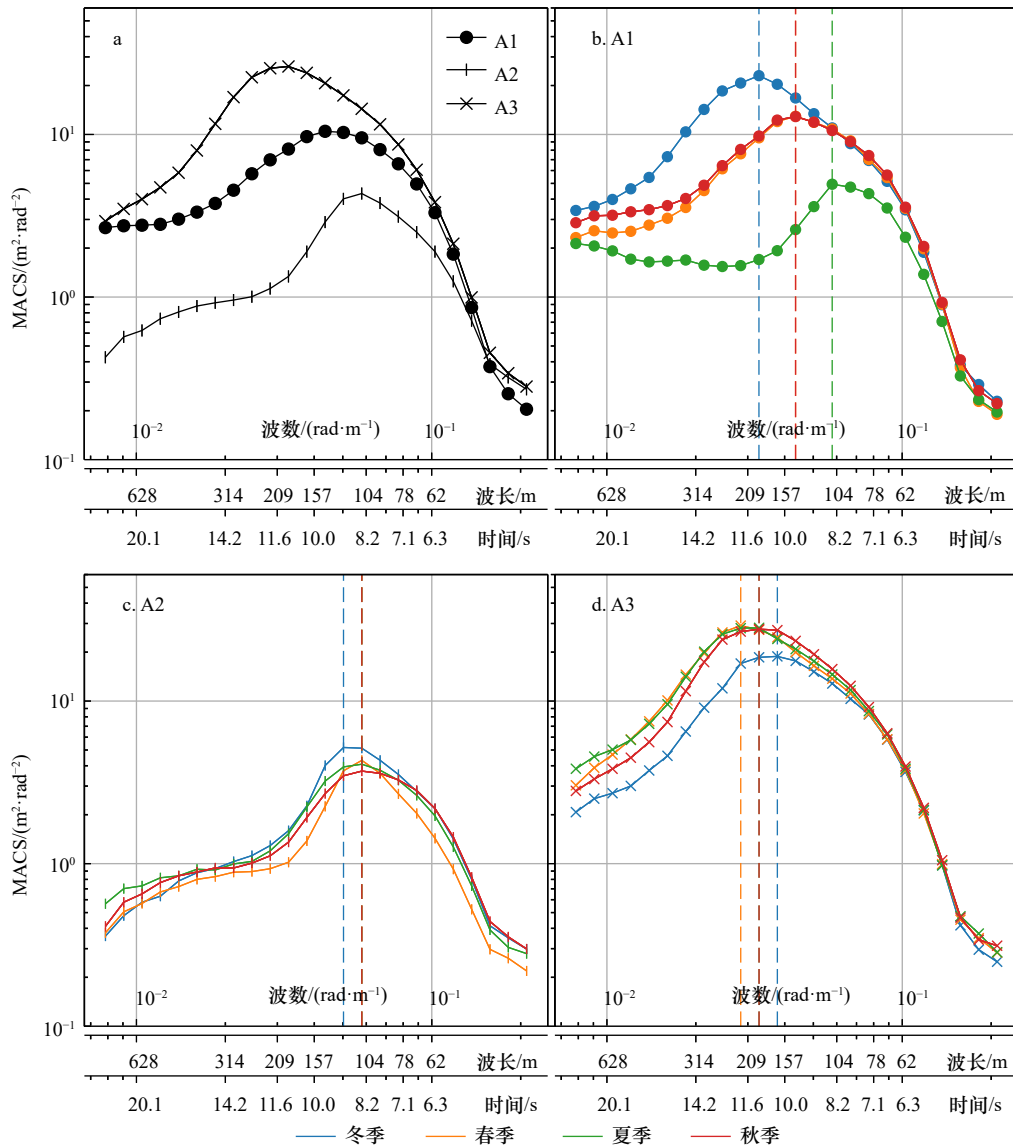


图5 3个选定纬度处的均值图像谱参数剖面(a)及其季节变化(b-d)

Fig. 5 Averaged MACS profile at three selected latitude transects (a) and their seasonal variation (b-d)

甚至在某些波长上有所增加,表明涌浪在这些区域是普遍存在的,这与文献[8]的研究结果一致。尽管MACS剖面是沿SAR视向提取得到,基于该曲线的峰值波数(图5的垂直虚线)仍能在一定程度上体现局地海况的特性。总体上,A1和A3的峰值波长约为250 m,而A2的峰值波长为120 m。北半球A1区域的最大峰值波长出现在冬季,这是由于冬季风暴的强风造成的。值得一提的是,春季和秋季的峰值波数相同,在图5上有所重叠。信风带的A2区域全年盛行中低风速,因此峰值波长基本稳定在100 m左右,并未观测到明显的季节变化。南大洋的A3区域常年风速较高,峰值波长较高,季节变化同样较弱(图5d)。

3.3 径向峰值波数特征分析

基于MACS剖面提取的径向峰值波数的季节性

平均值如图6所示。总体而言,温带地区的径向峰值波数值较小(波长较大),而信风带地区的径向峰值波数较大(波长较小)。这一空间特征与全球风场分布一致,温带地区较高风速产生较长波浪,信风带的低风速产生的波浪较短。在南大洋产生的长海浪向北传播成为涌浪,其传播路径也有所体现,直至南美洲的秘鲁海岸及澳大利亚的西北端等。

径向峰值波数的季节变化也十分显著。冬季时的最小值位于北太平洋和北大西洋35°~55°N之间,冬季风暴产生的长波浪可延伸至加利福尼亚西海岸。信风带区域的径向峰值波数相对较高,特别是在赤道太平洋、大西洋和北印度洋(橙色)。随着北半球冬季风暴的消亡,夏季时径向峰值波数在北太平洋和北大西洋明显增加。此时,南大洋的风暴活动最为活跃,风速较

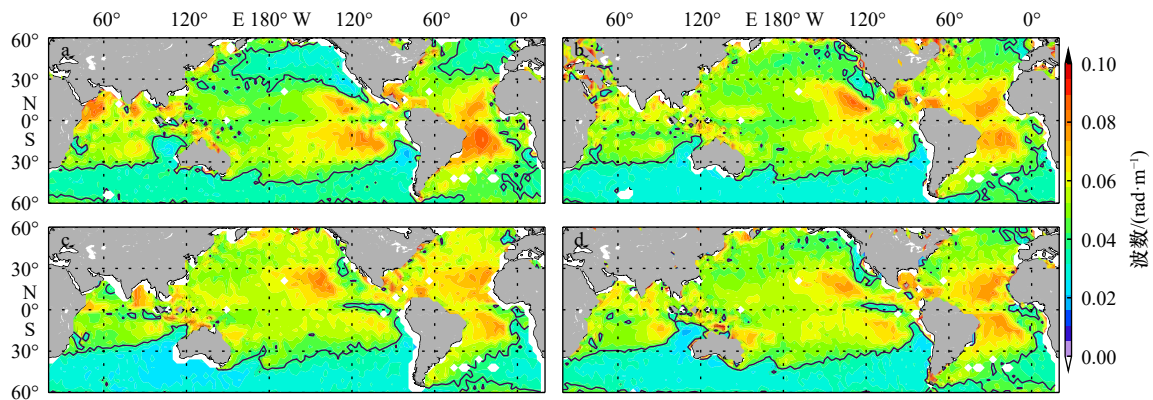


图 6 全球径向峰值波数的季节变化

Fig. 6 Seasonal average of range peak wavenumber at the global scale

a-d 分别为冬、春、夏、秋; 等值线为 0.04 rad/m; 空间分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$

a-d are winter, spring, summer and autumn; the isoline is 0.04 rad/m; the spatial resolution is $2.5^\circ \times 2.5^\circ$

高, 径向峰值波数最小即波长最大。夏季阿拉伯海上的径向峰值波数较小, 这可能与夏季季风的大风有关^[4]。

4 结论与展望

海浪是海-气相互作用界面中的重要介质, 对能量物质交换与传递有决定性影响。卫星观测已被广泛证明对全球海浪研究有重要贡献。特别是高分辨率的合成孔径雷达图像, 具有解析海洋波浪谱特征的巨大潜力, 但该能力目前尚未被充分开发利用。全球 SAR 观测数据为探索全球海浪特性提供了重要数据支撑, 本文利用从 SAR 图像谱定义的距离向剖面 MACS, 分析了不同波长海浪与局地风场的关系及其径向谱峰波数的空间分布。

海浪中的风浪成分与局地风场相互耦合, 通过不同波长的 MACS 与风速的变化来看, 较长的海浪与较高的风速有更高程度的耦合。尽管本文仅展示了部分波长海浪分析结果, 但 MACS 提供的风-浪相互

作用信息仍然十分重要。通过从合成孔径雷达图像中独立获取准确的风速, 有助于进一步研究更小尺度的风-浪相互作用机制。另外, 波浪范围峰值波数的变化也揭示了涌浪在大洋的传播路径。

合成孔径雷达因其全天时全天候的观测优势, 辅以高空间分辨率, 已成为观测亚中尺度海洋及大气现象的有力技术。如何充分利用精细数据观测优势, 深入探究海洋、大气现象对合成孔径雷达风、浪观测的影响机制, 进而服务于海洋动力现象解译, 将是未来合成孔径雷达数据应用的研究重点与难点。

致谢: 本文使用的 Envisat/ASAR 1B 级卫星图像谱数据由欧洲空间局提供, 该数据可通过网站 <https://www.esa.int/> 获取。欧洲中期天气预报中心再分析风场产品由 ECMWF 气象存档与检索系统提供, 该数据可通过 <https://www.ecmwf.int/> 公开获取。

参考文献:

- [1] Toba Y. Local balance in the air-sea boundary processes: I. On the growth process of wind waves[J]. *Journal of Oceanography*, 1972, 28(3): 109-120.
- [2] 陈戈, 杨杰, 张本涛, 等. 新一代海洋科学卫星的思考与展望 [J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2019, 49(10): 110-117.
Chen Ge, Yang Jie, Zhang Bentaotao, et al. Thoughts and prospects on the new generation of marine science satellites[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2019, 49(10): 110-117.
- [3] Hauser D, Tison C, Amiot T, et al. SWIM: the first spaceborne wave scatterometer[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2017, 55(5): 3000-3014.
- [4] Young I R. Seasonal variability of the global ocean wind and wave climate[J]. *International Journal of Climatology*, 1999, 19(9): 931-950.
- [5] Young I R, Zieger S, Babanin A V. Global trends in wind speed and wave height[J]. *Science*, 2011, 332(6028): 451-455.
- [6] Hanley K E, Belcher S E, Sullivan P P. A global climatology of wind-wave interaction[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2010, 40(6): 1263-1282.
- [7] Stopa J E, Cheung K F, Tolman H L, et al. Patterns and cycles in the climate forecast system reanalysis wind and wave data[J]. *Ocean Modelling*, 2013, 70: 207-220.

- [8] Chen Ge, Chapron B, Ezraty R, et al. A global view of swell and wind sea climate in the ocean by satellite altimeter and scatterometer[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2002, 19(11): 1849–1859.
- [9] Jiang Haoyu, Chen Ge. A global view on the swell and wind sea climate by the Jason-1 mission: a revisit[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2013, 30(8): 1833–1841.
- [10] Shimura T, Mori N, Mase H. Future projections of extreme ocean wave climates and the relation to tropical cyclones: ensemble experiments of MRI-AGCM3.2H[J]. *Journal of Climate*, 2015, 28(24): 9838–9856.
- [11] Portilla-Yandún J. The global signature of ocean wave spectra[J]. *Geophysical Research Letters*, 2018, 45(1): 267–276.
- [12] 杨劲松. 合成孔径雷达海面风场、海浪和内波遥感技术 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2001.
Yang Jingsong. SAR remote sensing of sea surface wind field, ocean waves and internal waves [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2001.
- [13] Stopa J E, Ardhuin F, Husson R, et al. Swell dissipation from 10 years of Envisat advanced synthetic aperture radar in wave mode[J]. *Geophysical Research Letters*, 2016, 43(7): 3423–3430.
- [14] Ardhuin F, Collard F, Chapron B, et al. Estimates of ocean wave heights and attenuation in sea ice using the SAR wave mode on Sentinel-1A[J]. *Geophysical Research Letters*, 2015, 42(7): 2317–2325.
- [15] Li Xiaoming. A new insight from space into swell propagation and crossing in the global oceans[J]. *Geophysical Research Letters*, 2016, 43(10): 5202–5209.
- [16] Li Huimin, Chapron B, Mouche A, et al. A new ocean SAR cross-spectral parameter: definition and directional property using the global Sentinel-1 measurements[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2019, 124(3): 1566–1577.
- [17] Li Huimin, Stopa J, Mouche A, et al. Assessment of ocean wave spectrum using global Envisat/ASAR data and hindcast simulation[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2021, 264: 112614.

Study of global ocean wave characteristics based on spaceborne SAR image cross-spectrum

Li Huimin^{1,2}, He Yijun^{1,2}, Wang Chen^{1,2}, Lin Wenming^{1,2}, Yang Jingsong³

(1. School of Marine Sciences, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 2. Key Laboratory of Space Ocean Remote Sensing and Application, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081, China; 3. State Key Laboratory of Satellite Ocean Environment Dynamics, Second Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Hangzhou 310012, China)

Abstract: Spaceborne synthetic aperture radar (SAR) is able to collect observations under all kinds of weather during day and night. Such measurements have been proven to provide significant data support for the ocean dynamics study. While SAR imaging of ocean waves is a highly nonlinear process, leading the wave signal missing along the azimuth direction. The image cross-spectrum provides a way to help investigate the ocean wave features particularly for their propagation direction. In this study, we extended a recently defined parameter based on SAR image cross-spectrum and analyzed the correlation of different wave scales with the local wind speed. The range peak wavenumber (wavelength) extracted from the range spectral profile is also demonstrated at the global scale based on about 4 million SAR images. It is found that this new spectral parameter could to some extent reflect the coupling between wind and waves. The global pattern of range peak wavenumber also illustrates evident seasonality.

Key words: spaceborne synthetic aperture radar; ENVIRONMENT SATellite/Advanced SAR (Envisat/ASAR); image cross-spectrum; wind-wave coupling