文章编号:1001-9014(2025)06-0887-09

DOI:10. 11972/j. issn. 1001-9014. 2025. 06. 007

基于ICESat-2单光子激光雷达的南海浪高探测

周智标[1], 杨 坚[1], 宋 越[1], 栾 超[2], 杨 喆[3], 李 松[1,4*]

(1. 武汉大学 电子信息学院,湖北 武汉 430072;
2. 北京控制与电子技术研究所,北京 100045;
3. 西安测绘研究所,陕西 西安 710054;
4. 武汉量子技术研究院,湖北 武汉 430206)

摘要:2018年9月,美国航空航天局(NASA)发射了卫星ICESat-2(Ice, Cloud, and Land Elevation Satellite-2),其上搭载了迄今为止唯一在轨运行的星载单光子激光雷达系统ATLAS(Advanced Topographic Laser Altimeter System)。该激光雷达具有多波束、高重频、高测距精度的特性,在获取高精度、高分辨率的海浪参数方面具有巨大的潜力。文章提出了一种优化的基于点密度自适应阈值的海面信号光子提取方法,以及基于海面几何形态的海浪有效波高的计算方法,证明在1 km的数据长度上就能获得与NASA官方海洋产品一致的有效波高计算结果,获得了优于NASA官方3~7 km的波高数据分辨率。利用有效波高数据在南海生成了0. 2°×0. 2°格网的波高空间分布,分析了南海有效波高的空间分布特点和随时间变化的规律。发现南海海域中沙群岛周围和吕宋海峡附近海域的有效波高全年都呈现出较大值,北部湾、纳土纳群岛、苏禄海及西里伯斯海几个区域的值较小。南海波高和风速随时间的变化高度同步,表明该区域的海浪主要由风驱动。结合ERA5同时相的风速数据分别给出了近岸波高和深水波高与风速的定量关系,证明在同样风速下后者波高要大于前者。借助ICESat-2单光子激光测高雷达可以获取更高分辨率的浪高空间分布,特别是能准确获取近岸浅水区波高,能填补其他海浪观测手段在空间和时间上的空白,有助于海浪数值模式的优化和海洋学研究。

关 键 词:单光子激光雷达;海面探测;信号去噪;有效波高

中图分类号:TP79　　**文献标识码**:A

Detection of wave height in the South China Sea with ICESat-2 photon-counting lidar

ZHOU Zhi-Biao[1], YANG Jian[1], SONG Yue[1], LUAN Chao[2], YANG Zhe[3], LI Song[1,4*]

(1. School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430072, China;
2. Beijing Institute of Control and Electronic Technology, Beijing 100045, China;
3. Xi'an Institute of Surveying and Mapping, Xi'an 710054, China;
4. Wuhan Institute of Quantum Technology, Wuhan 430206, China)

Abstract: In September 2018, NASA launched ICESat-2 (Ice, Cloud, and Land Elevation Satellite-2) which carried the unique spaceborne photon-counting lidar system ATLAS (Advanced Topographic Laser Altimeter System) in orbit so far. The lidar has the characteristics of multi-beams, high repetition rate, high ranging accuracy, and has great potential in obtaining high-precision and high-resolution wave parameters. In this paper, an optimized algorithm based on point density with adaptive thresholds is proposed to extract sea surface signal photons, and a method based on sea surface geometry shape to calculate the significant wave height value of sea waves, which proves that the significant wave height value that is consistent with the NASA marine product can be obtained using photon data with a length of 1 km, better than NASA's 3-7 km wave height data resolution. Significant wave height data are used to generate a wave height space distribution with 0. 2°×0. 2° grids in the South China Sea, and to analyze the spatial distribution characteristics of significant wave height and the law of its variation with time. It shows that the significant wave height values in

收稿日期:2025-01-10,**修回日期**:2025-04-14　　**Received date**:2025-01-10,**Revised date**:2025-04-14

基金项目:航天系统装备预先研究项目

Foundation items:Supported by the Equipment Pre-research Project of Aerospace Systems Department

作者简介(Biography):周智标(1988—),男,湖北孝感人,博士研究生,主要研究领域为星载单光子激光雷达海洋遥感. E-mail: zhouzhibiao@whu. edu. cn

*通讯作者(Corresponding author): E-mail: ls@whu. edu. cn

the sea areas around the Zhongsha Islands and the Luzon Strait are larger throughout the year, while the values in the Beibu Gulf, the Natuna Islands, the Sulu Sea, and the Celebes Sea are smaller. The changes of wave height and wind speed with time in the South China Sea are highly synchronous, indicating that the wave in this area is mainly driven by wind. The quantitative relationships between the significant wave height and wind speed in nearshore shallow water and offshore deep water are given respectively in combination with the wind speed data of ERA5, and prove that the significant wave height of the deep water is greater than the shallow water under the same wind speed. With the help of ICESat-2 photon-counting lidar, a higher resolution wave height space distribution can be obtained, especially accurate wave heights in nearshore shallow water areas, which can fill the space and time gaps of other observation methods of wave, that is helpful to the optimization of wave numerical model and the oceanographic research.

Key words: photon-counting lidar, ocean surface detection, signal denoising, significant wave height

引言

海浪是海上最普遍的自然现象之一,它不仅会影响海洋工程建设、船舶设计、海上航行[1-3],还会影响海水混合、海洋生态过程和气候变化[4],较大的海浪具有较大的破坏力,能威胁人类生命和财产安全[5-6],因此获取准确的海浪参数至关重要。海浪高度(波高)是最为常用的用来描述海浪的参数。在海洋研究中,常说的波高一般为有效波高(Significant Wave Height, SWH),指的是将波高按照从大到小排列的前三分之一大波高的平均值[7]。传统的部署在陆地的或者船载、机载的传感器测量效率低、成本高,不适合用来测大面积海域的波浪,星载传感器很好地弥补了这一不足。目前,一般采用星载微波高度计来测量SWH,但是星载微波高度计探测海面的水平分辨率较低,例如,Jason-2和Jason-3的沿轨和垂轨分辨率分别是11.2 km和5.1 km,在赤道的交叉点间隔300 km,探测海面会留下巨大空隙[8]。且微波高度计的足印往往较大,在近岸海域雷达回波易受到陆地或岛礁的污染导致SWH测量精度较差[9-10]。

美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)于2018年9月发射了ICESat-2(Ice, Cloud, and Land Elevation Satellite-2)卫星,其上搭载了单光子激光雷达ATLAS(Advanced Topographic Laser Altimeter System),它的脉冲发射频率高达10 kHz,光斑中心间隔仅0.7 m,较小的发散角使得照射到地表的光斑直径只有十几米,在沿轨方向上有极高的分辨率;测高精度能达到10 cm以上[11-14]。ICESat-2的重访周期为91天,一个周期内绕地球1 387圈,并且拥有3对激光束,对内光束地表轨迹间隔约90 m,对间间隔约3 km[15-16]。以上设计保证了ICESat-2能对海面进行快速而密集的采样,为精细化地描述海浪SWH的空间分布提供了可能。目前,已经有一些研究者基于ICESat-2的数据计算海浪SWH并作了验证。Klotz等人从ICESat-2的初级数据产品ATL03中提取海洋表面廓线并计算出北大西洋开阔洋面的海浪SWH,并且将其获取的SWH结果和ICESat-2的高级数据产品ATL12中的SWH分别与欧洲中期天气预报中心的ERA5(ECMWF Re-Analysis 5)波高进行对比,均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)分别为0.37 m和0.33 m,初步证明用ICESat-2得到的SWH精度与其他微波高度计相当但是有更高的分辨率[8]。Nilsson等人将用ICESat-2数据获取的SWH与用CryoSat-2微波雷达获取的SWH做了对比,RMSE在0.3 m左右,二者有很好的一致性[17]。

单光子激光雷达ATLAS对地表有较高的采样率,探测波高有较好的精度,很适合用来精细地刻画海浪的空间分布。但是受海洋表面信号光子水平较低的影响,ICESat-2的高级海洋数据产品ATL12中的SWH分辨率在3~7 km之间[18],未能很好地体现原始数据高分辨率的优势。另外,南海海域多岛礁并且受季风影响较明显[19],海况复杂,目前未见学者用ICESat-2数据对该海域的海浪SWH进行时空分析。本文选择南海海域作为研究区域,首先探讨在更小的空间尺度上获取可靠SWH值的方法,这有助于在近岸或多岛礁的狭窄海域获取更多的SWH。其次,基于较高分辨率海浪SWH分析南海海域海浪空间分布及其随时间的变化规律。最后利用ICESat-2能准确获取近岸浅水SWH的特点,给出了近岸浅水区SWH与风速的定量关系,并与深水海域作了比较。

1 数据和方法

1.1 ATL03数据

ICESat-2的ATL03数据包含了探测到的每个

光子对应地表位置点的经度、纬度和相对于WGS84椭球的高程值,包括噪声光子。官方用HDF5格式的文件来保存数据,将绕地球飞行一周的数据均分成了14份,每个ATL03的数据文件包含一份即1/14个完整轨道数据,对应地表轨迹长度约3 000 km。图1是一段典型的海上ATL03数据可视化后的点云图,该段数据位于东沙群岛附近海域。海面返回的信号光子在沿轨方向上比较密集,根据这一特点可以从中提取海面返回的信号光子。官方用直方图统计的方法区分信号光子和噪声光子,并且根据信噪比来给每个信号光子赋予"低、中、高"三种置信度。详细的生成ATL03数据的方法见文献[13]。

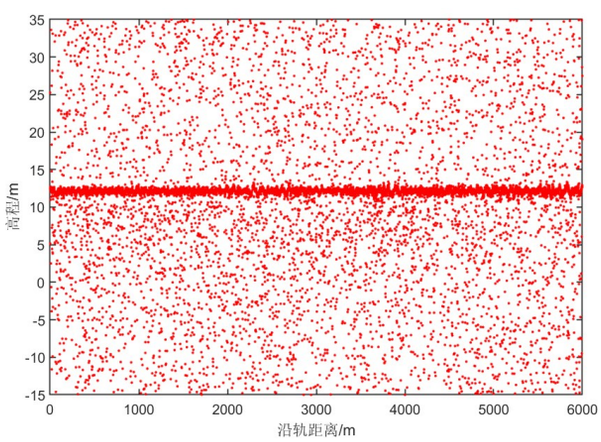

图1　ATL03数据可视化之后的点云图,红点表示ATLAS探测到的光子事件,横坐标表示获取的光子对应的沿轨距离,纵坐标是根据获取的光子对应飞行时间计算得到的高程值

Fig. 1　Point cloud diagram by visualizing ATL03 data, the red dots represent photon events detected by the ATLAS, with the horizontal coordinate indicating the along-track distance corresponding to the acquired photon, and the vertical coordinate denoting the elevation value derived from the time-of-flight of the detected photon

1.2　ATL12数据

ATL12是ICESat-2的海洋数据产品,它通过对ATL03数据进行处理得到。ATL12数据同样是用HDF5格式的文件来存储,每个文件包含4个完整轨道(绕地球4圈)的数据,也就是说,每个完整的ATL12文件对应56(4×14)个ATL03文件。ATL12数据将ATL03数据分成了一个个3~7 km长度不等的海洋段,通过统计每段内的信号光子来得到海面相关的参数,如:海面地形高度值和SWH值等。详细的生成ATL12数据的方法见文献[18]。

1.3　计算和评价有效波高的方法

NASA官方的ATL12数据产品仅使用直方图统计的方法提取海面信号光子,但是海面不是一个平面而是存在不同程度的起伏,基于直方图统计的方法无法剔除每个信号光子所在的子区间(bin)内部的噪声光子,影响了信号提取的准确度。另外,官方基于统计学的方法计算海面SWH,由于噪声的存在,需要累计大量的沿轨数据才能得到较为准确的统计结果,从而影响了海洋数据产品的分辨率。用来生成ATL12海洋数据产品的海洋段沿轨长度是3~7 km,为在更小的尺度上得到较为可靠的SWH值,本文尝试更准确的海面信号光子提取方法,并且基于海面廓线的几何形态来计算SWH。本文进一步对文献[20]的算法进行优化用来提取海面信号光子,以图1所示的点云数据为例介绍算法步骤如下:

(A)对一大段ATL03点云数据,每次按照沿轨距离取300 m的数据进行处理。

(B)对300 m窗口内点云数据的高程值进行直方图统计,用自适应的阈值划分出信号所在的高程区域和噪声所在的高程区域。因为噪声所在高程片(直方图统计中划分的较小的高程区间)中的光子数小于有信号光子的高程片的光子数,所以这里假设光子数小于所有高程片内光子数中值的高程片是噪声光子所在的高程片。计算噪声光子所在的所有高程片中光子个数的平均值μ_p和标准差σ_p。区分信号光子所在的高程片和噪声光子所在的高程片的阈值Th_1由公式(1)计算得到。光子数大于Th_1的高程片就是信号光子所在的高程片。这一步可以得到点云中信号和噪声所在的区域。这一步处理后的结果如图2(a)所示,信号所在的区域为红色点云,噪声所在的区域为灰色点云。

$$Th_1 = \mu_p + 3\sigma_p \quad . \quad (1)$$

(C)分别计算信号区域和噪声区域光子的点密度。在计算点密度时,考虑到信号点云在沿轨方向上连续且聚集,而噪声光子不具有此特征,为了增加信号点云和噪声点云的区分度,所以选用椭圆邻域。椭圆邻域的长轴与沿轨方向平行,因为ICESat-2的激光雷达光斑直径为十几米,因此本文将椭圆的长轴长设置为20 m。ICESat-2的激光雷达脉宽为1.5 ns,对应的高程值约为0.2 m,因此本文将椭圆的短轴长设置为0.4 m。落入某光子点邻域中的光子个数即为该光子的密度值。噪声区域点密

度的最大值为进一步去噪的阈值Th_2。这一步的阈值也是自适应的，处理过后能得到候选的海面信号光子。

(D)获取下一段的长度为300 m的数据，重复步骤(B)-(C)，直到这一整个大段ATL03数据都处理完毕。这一步处理后的结果如图2(b)所示，可以看到仍然有一部分密度较大的噪声光子被误判为了信号。

(E)为了进一步剔除因水上大气散射和水下水体散射造成的密度较大的噪声光子，用高斯函数对上面得到的候选信号光子的高程分布进行拟合。拟合得到的均值μ_g=12.133 7以及标准差σ_g=0.300 4，高程值在区间$[\mu_g-3\sigma_g, \mu_g+3\sigma_g]$范围内的光子为最终的海面信号光子。高斯函数拟合的结果如图2(c)所示，黄色虚线和黑色虚线分别是信号光子高程值所在区间的下限和上限。最终提取的海面信号光子如图2(d)和(e)中的红色圆点所示，可以看到这一步成功剔除了上一步中的密度较大的噪声。

对于较长的海面点云数据(例如沿轨距离达几十公里)，可能因为海面地形的影响而存在明显的坡度，导致一些贴近海面的海上大气和水下散射的噪声光子无法剔除，影响去噪精度。这种情况下，应将高斯拟合去噪这一步放在每个300 m小段内部进行。这样在批量处理较长的点云数据时也能有较好的效果。

经过上述步骤就能获取最终的海面信号光子。要得到SWH的值还必须要先获取海面几何形态廓线。

对从ATL03数据中提取的海面信号光子而言，考虑到ICESat-2的激光雷达在海面的光斑直径为十几米，本文按照沿轨距离每10 m一段取该段内所有海面信号光子高程的中值作为该段中心位置对应的海面高度。得到的海面廓线如图2(d)和(e)中实线所示。按照波浪理论，SWH大小Hs往往用公式(2)计算：

$$Hs = 4 \times \sqrt{m_0} \quad , \quad (2)$$

其中m_0是海面高度的方差[7,21]。对该段示例点云数据进行计算得到的最终的SWH值为0.97 m。

为验证本文提出的有效波高计算方法的正确性，对由ATL03数据中计算出来的SWH和NASA官方同轨数据生成的ATL12中的有效波高进行比对。由于两者分辨率不一致，具体比较某个位置点的

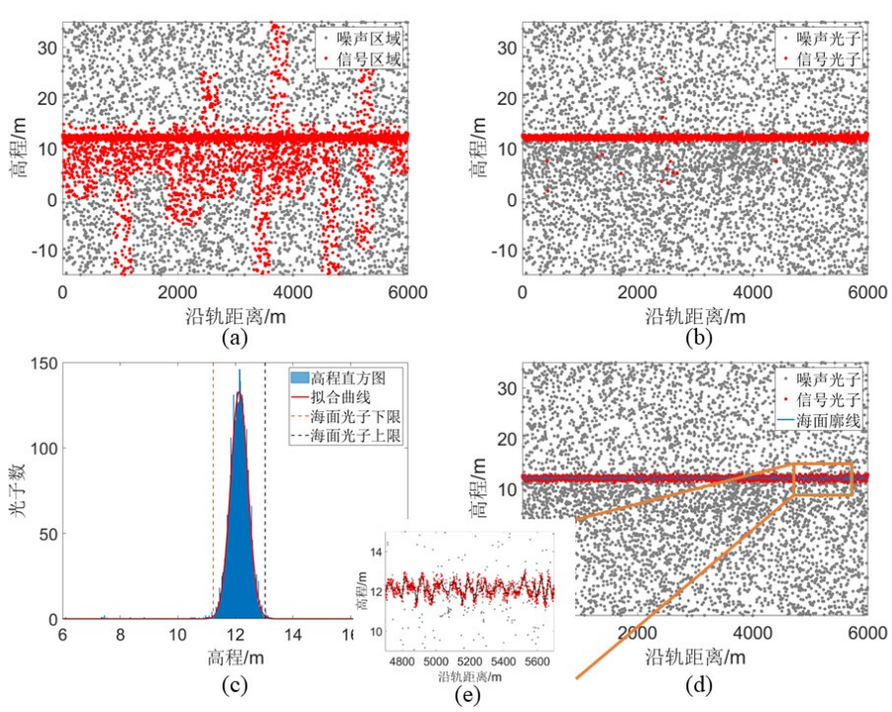

图2 获取海面信号光子和廓线的算法的中间结果示意图：(a)算法步骤(B)划分信号和噪声区域后的结果；(b)算法步骤(D)处理后的结果；(c)高斯拟合结果；(d)最终提取的海面信号光子和海面廓线；(e)提取结果的局部放大图

Fig. 2 Results of steps in the algorithm for obtaining sea surface signal photons and profile: (a) results of the step (B) in the algorithm after dividing signal and noise areas; (b) results of the step (D) in the algorithm; (c) results of the Gaussian fitting; (d) the obtained sea surface signal photons and profile; (e) the locally magnified view of the extraction results

SWH值时对ATL12数据用线性插值。评价两者一致性的指标如公式(3)所示,本文中x表示ATL12的SWH值,y表示用本文的方法获取的SWH值。

$$\begin{aligned}\text{Mean Bias} &= \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(y_i - x_i)\\ \text{RMSE} &= \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(y_i - x_i)^2}\\ r &= \frac{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y})(x_i - \bar{x})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y})^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2}}\end{aligned} \quad . \quad (3)$$

2　有效波高的验证

用于验证的数据来自2022年全年的ATL12产品及其对应的ATL03产品。按照1.3所述方法,本文分别尝试了用沿轨距离长度为1 km、2 km、3 km、5 km的ATL03数据来计算SWH值,并与ATL12的SWH值作了比对,结果如图3所示。其中的ATL03N是相应数据长度下计算得到的有效波高样本数。可以看到,总体上数据长度越长一致性越好,但是较长的数据长度导致获取的SWH样本数减少,降低了获取的SWH的分辨率。从图3可以看到,数据的相关系数都超过了0.97,Mean Bias不超过0.04 m,RMSE不超过0.14 m,各个数据长度得到的SWH值的一致性都较好,基本上与ATL12的SWH值的精度相当。在较高的海况下二者的一致性会变差,并且高海况下的样本数也会变少。这是因为,根据海面激光雷达方程,风速越大海面回波信号光子数越少,稀疏的光子信息让获取准确的海面廓线变得困难,从而影响了ICESat-2激光雷达探测浪高值的稳定性和准确性,特别是在白天信噪比较低的情况下,会让探测能力进一步恶化。

本文从1 km分辨率的实验数据中选取了误差较大的一组进行了分析。该组数据用本文方法获得的SWH值为0.27 m,而通过官方的ATL12的数

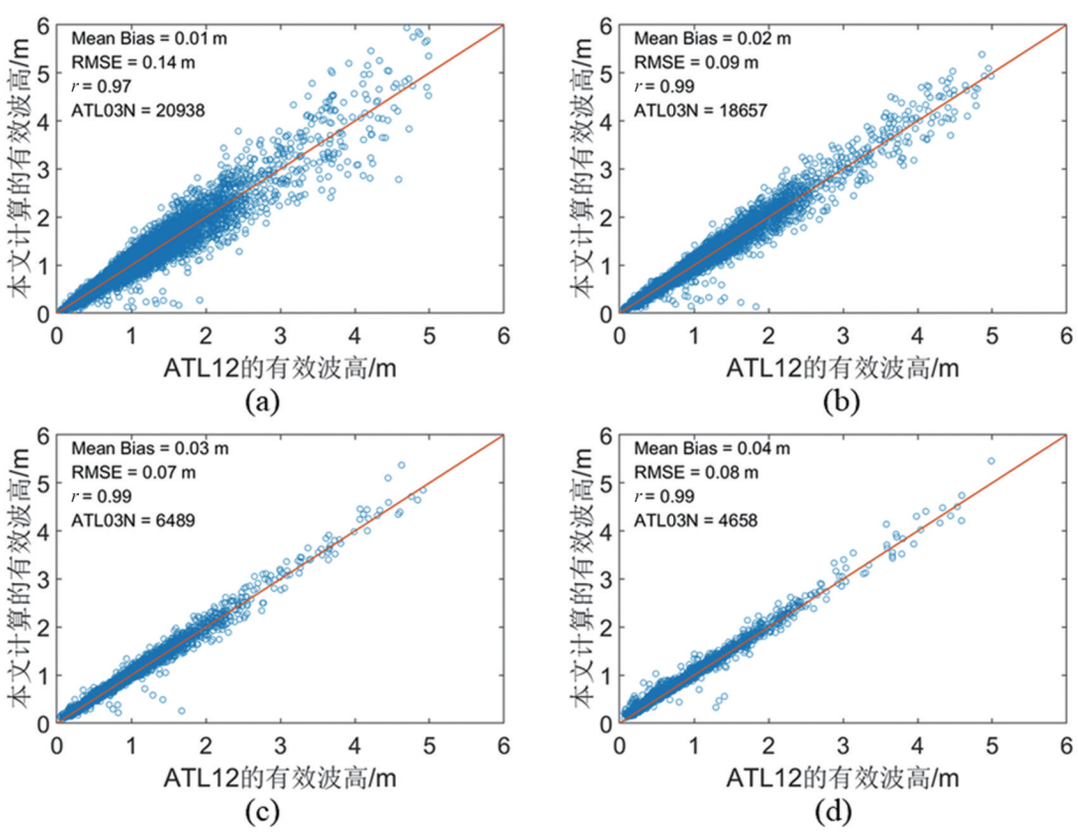

图3　本文计算的有效波高与ATL12产品有效波高的一致性验证结果:(a)计算有效波高的沿轨数据长度为1 km;(b)计算有效波高的沿轨数据长度为2 km;(c)计算有效波高的沿轨数据长度为3 km;(d)计算有效波高的沿轨数据长度为5 km

Fig. 3　The consistency verification results between the significant wave height calculated in this paper and the significant wave height of ATL12 product: (a) the length of track-along data for calculating significant wave height is 1 km; (b) the length of track-along data for calculating significant wave height is 2 km; (c) the length of track-along data for calculating significant wave height is 3 km; (d) the length of track-along data for calculating significant wave height is 5 km

据获取的SWH值为1.92 m。该组数据对应的原始点云及信号光子提取结果如图4所示。从图4可以看到,用本文的方法可以准确地提取出海面信号光子(红色点)。通过观察原始数据,可以明显看出海面高度起伏不超过0.5 m,ATL12得到的SWH值为1.92 m显然不合理,而用本文方法得到的SWH值为0.27 m更接近真实情况。另外,图4(a)黄色矩形框中的噪声点云虽然相较于其他噪声点密度更大,呈现出聚集性,本文算法也能准确将其判断为噪声,显示出该算法较好的性能。

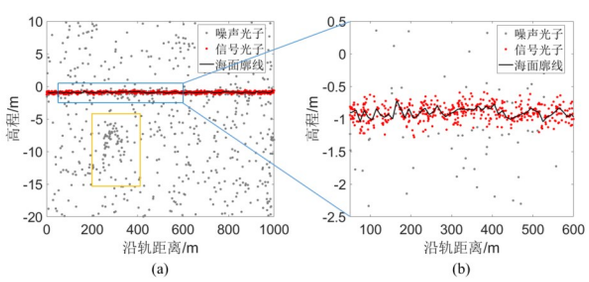

图4 与ATL12对比存在显著偏差的数据对应的点云及处理结果:(a)ATL03原始数据可视化后的点云及处理结果;(b)局部放大图

Fig. 4 The point cloud and processing results corresponding to data with significant deviations compared to ATL12: (a) visualized point cloud from ATL03 raw data and the corresponding processing results; (b) the locally magnified view

实验结果表明,采用本文的方法只需要累计沿轨距离长度为1 km的ATL03数据就可以得到与ATL12同等精度的SWH值,这有助于在海上获取更多的SWH样本,特别是在近岸或多岛礁的狭窄海域也能得到可靠的SWH值,展现出在获取高分辨率海面波浪场的巨大潜力。

3 南海波高的时空分布

3.1 有效波高的空间分布

选择用ICESat-2的单光子激光雷达测量得到的2019年—2022年南海四年的SWH数据并将其网格化,网格分辨率为0.2°,每个网格的SWH值取落入该网格内的所有SWH样本的平均值,得到每个网格的SWH样本数空间分布和SWH值空间分布如下图5所示。从图5(b)可以看到,南海中部和东北部的海浪SWH较高,在西北角(北部湾)、西南角(纳土纳群岛)、东南角(苏禄海及西里伯斯海)的海浪SWH较低,这与文献[22]的结果一致。因为ICESat-2对海面的密集采样,得到的海浪波高场有更高的分辨率,能展现出更多细节。例如,通过ICESat-2可以观测到广东省近岸和越南东南部近岸部分海面也存在较大的波高,这有别于传统的微波高度计。因为微波高度计的足印尺寸较大,回波信号容易受到陆地信号的污染,很难准确观测到这些近岸区域的波高[23]。

2019年—2022年四年间南海海浪SWH空间分布随季节的变化如图6所示。可以看出,南海的SWH呈现出明显的季节特征,夏季的SWH普遍较低,冬季的普遍大于其他季节。无论在哪个季节,南海中沙群岛附近和南海东北部靠近吕宋海峡的SWH都较高。在西北角(北部湾)、西南角(纳土纳群岛)、东南角(苏禄海及西里伯斯海)三个区域的SWH全年都较低且变化不大。在冬季,南海盛行东北季风,风时和风区都较大,能让海浪充分成长。并且东北季风有助于西太平洋的海浪通过吕宋海峡传播进入南海海域。所以,冬季的南海SWH普遍较大,并且明显地展现出从吕宋海峡向西逐渐扩散衰减。在夏季,南海盛行南风和西南风,风时风区较小,SWH普遍较低。

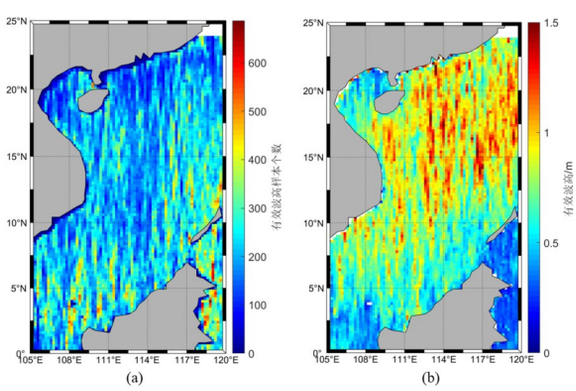

图5 由ICESat-2获取的2019年—2022年南海有效波高的样本数和有效波高值的空间分布:(a)有效波高样本数的空间分布;(b)有效波高值的空间分布

Fig. 5 The spatial distributions of the number of samples of significant wave height and significant wave height values in the South China Sea from 2019 to 2022 obtained by ICESat-2: (a) the spatial distribution of the number of samples of significant wave height; (b) the spatial distribution of significant wave height values

3.2 有效波高的时间分布

2019年—2022年四年间南海平均SWH随时间的变化如图7所示。图中还用ERA5的风速数据展示了南海平均风速随时间的变化。可以看到,SWH

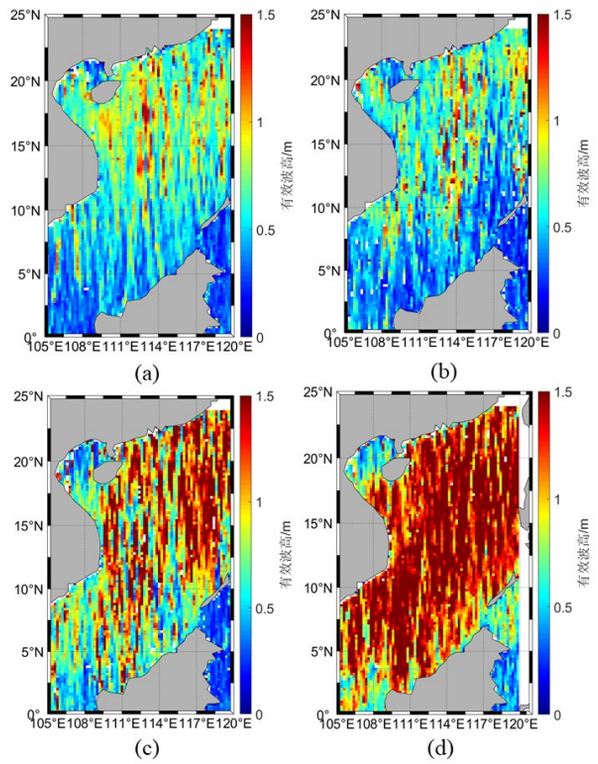

图6　由ICESat-2获取的2019年—2022年南海有效波高按季节的空间分布：(a)春季，3—5月；(b)夏季，6—8月；(c)秋季，9—11月；(d)冬季，12—2月

Fig. 6　Seasonal spatial distributions of significant wave height values obtained by ICESat-2 in the South China Sea from 2019 to 2022: (a) Spring, from March to May; (b) Summer, from June to August; (c) Autumn, from September to November; (d) Winter, from December to February

和风速随时间的变化非常同步，风速越大SWH越大，在风速局部最大值和最小值发生的时间点SWH也出现局部最大值和最小值，皮尔逊相关系数达到0.89，而且二者均具有明显的周期性，说明风速是造成南海波高季节性变化的主要因素。SWH最大值出现在冬季，最小值出现在春夏季，与上一节分析的结果一致，说明该区域的海浪主要由风驱动。

3.3　有效波高与风速的关系

上节的结果表明，南海的SWH与风速呈现明显的正相关，本节进一步分别讨论近岸浅水海域和深海海域的SWH与风速的定量关系。GEBCO(General Bathymetric Chart of the Oceans)是公开的权威世界海洋水深数据集，它由国际水文学组织(IHO)和联合国教科文组织政府间海洋学委员会(IOC)联合主持运作[24]。本文基于GEBCO水深数据，将SWH数据分成浅水(水深不大于50 m)子集和深水(水深

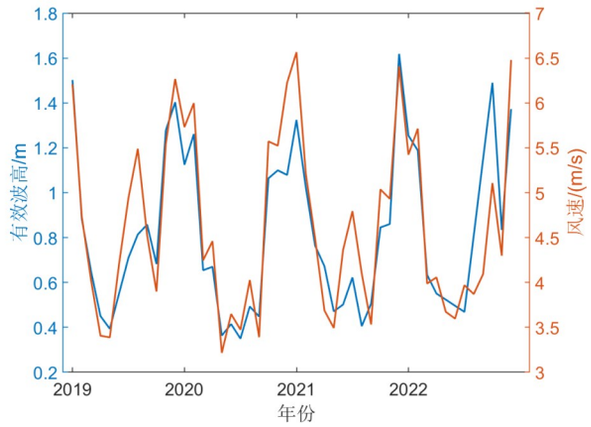

图7　南海海浪有效波高和风速随时间的变化

Fig. 7　Time dependence of significant wave height and wind speed in the South China Sea

大于50 m)子集。浅水子集SWH样本所在位置分布如图8所示，可以看到，SWH样本基本集中在陆地近岸海域和岛礁周围。在将SWH样本与ERA5风速数据做时空匹配时，因为ERA5数据的时间粒度是1小时，所以对SWH样本按照小时四舍五入就可以保证时间偏差不超过0.5小时。空间上采用双线性插值，将ERA5的风速插入到SWH样本所在位置。

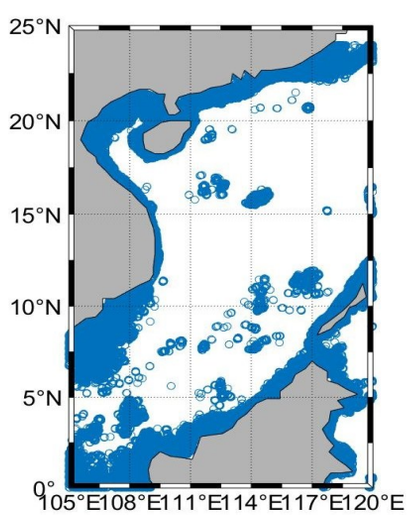

图8　浅水有效波高样本的位置分布

Fig. 8　Positions of shallow water significant wave height samples

已有的研究表明，在主要受风影响的海面，海面高度的标准差与风速存在二次方的关系[25-26]。同时由于SWH与海面高度方差存在定量关系(如公式(2)所示)，所以SWH与风速满足如公式(4)所示的

模型：

$$Hs = aU^2 + b \quad , \quad (4)$$

其中Hs是有效波高值，U是风速，a和b是待定系数。用参数b表示涌浪和海底地形对波高的影响。本文得到的波高与对应风速的样本热力图如图9所示。考虑到不同风速下的样本数存在差异，如果直接对这些样本进行拟合可能导致样本数较少的部分的拟合结果较差。因此，这里以1 m/s为风速区间长度计算出各风速区间内的波高中值（如图9红点所示），对这些中值进行拟合，得到的SWH与风速的关系模型如图9所示。浅水区和深水区模型的比较结果如图10所示。从结果中可以看到，在同样的风速下深水海域的波高要大于浅水海域。近岸浅水区存在海底地形的摩擦和波浪破碎导致的海浪能量耗散，这可能是导致同样风速下近岸浅水波高小于深海波高的原因。由于本文在南海获取的波高样本对应风速基本都在10 m/s以下，因此得到的模型在风速大于10 m/s的情况下可能不适用，需另作研究。

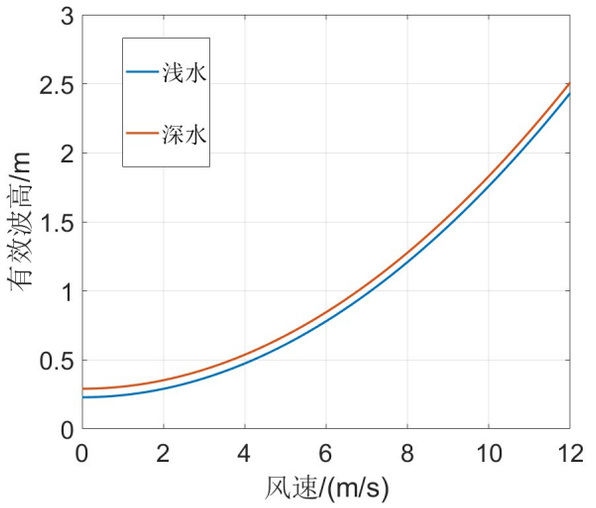

图10 浅水和深水海域的有效波高与风速的定量关系曲线对比

Fig. 10 Comparison of the quantitative relationship between significant wave height and wind speed in shallow water and deep water sea areas

4 总结和结论

本文探讨了利用星载单光子激光雷达ATLAS系统在更小的空间尺度上获取可靠SWH值的方法。研究结果表明，用ATL03长度为1 km的数据就能获得较可靠的SWH值，这有别于NASA官方ATL12数据的3~7 km分辨率，说明通过优化数据处理算法能进一步提升ICESat-2海洋数据产品的分辨率，有助于在近岸或多岛礁的狭窄海域获取更多的SWH。通过对南海地区高分辨率的SWH分析，发现不管是全年平均还是季节平均SWH，都表现出中沙群岛周围和吕宋海峡附近海域的值较大，北部湾、纳土纳群岛、苏禄海及西里伯斯海这几个区域的值较小并且随季节波动较小的特征。南海海域的SWH和风速随时间的变化高度同步，说明南海海域波浪的主要诱因是风。

通过对南海海域近岸浅水和离岸深水SWH与匹配的ERA5风速进行的相关性分析，给出了两种海洋环境下SWH与风速的定量关系，表明在同样风速下南海深水区的SWH要大于近岸浅水区。本文得到的SWH与风速的定量关系有望用于海面风速和浅海水下地形反演。ICESat-2提供的高分辨率海浪实测数据，可以与其他遥感设备或者浮标数据

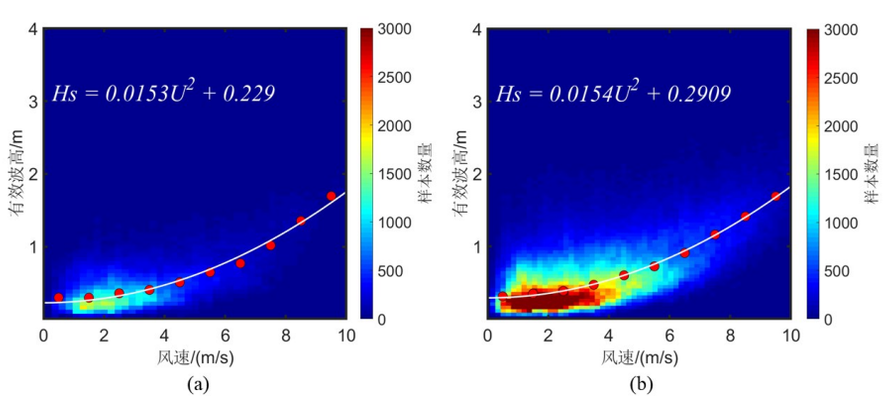

图9 有效波高与风速的定量关系模型：(a)近岸浅水海域；(b)深水海域

Fig. 9 Quantitative relationship model between significant wave height and wind speed: (a) nearshore shallow water area; (b) deep water area

同化,填补其他观测手段在空间和时间上的空白,有助于海浪数值模式的优化和海洋学研究。

References

[1] Lyu Jia Lei, Zhang Wen Jing, Shi Jian, et al. The wave period parameterization of ocean waves and its application to ocean wave simulations [J]. Remote Sensing, 2023, 15(22): 5279.

[2] Tan K, Xie L, Bai P, et al. Modulation effects of mesoscale eddies on sea surface wave fields in the South China Sea derived From a wave spectrometer onboard the China-France Ocean Satellite [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2023, 128(1): e2021JC018088.

[3] Hauser D, Abdalla S, Ardhuin F, et al. Satellite remote sensing of surface winds, waves, and currents: where are we now?[J]. Surveys in Geophysics, 2023, 44:1357-1446.

[4] Li Song Lin, Yu Hua Ming, Wu Ke Jian, et al. Validation of the ocean wave spectrum from the remote sensing data of the Chinese - French Oceanography Satellite [J]. Remote Sensing, 2023, 15(16): 3918.

[5] Lavrentiev M, Marchuk A, Oblaukhov K. Low power computation of transoceanic wave propagation for tsunami hazard mitigation [J]. Ocean Modelling, 2024, 192: 102459.

[6] Mori N, Ho T C , Miyashita T, et al. Giant tsunami monitoring, early warning and hazard assessment [J]. Nature Reviews Earth & Environment, 2022, 3(9): 557-572.

[7] Tsai B M, Gardner C S. Remote sensing of sea state using laser altimeters [J]. Applied Optics, 1982, 21(21): 3932-3940.

[8] Klotz B W, Neuenschwander A, Magruder L A. High-resolution ocean wave and wind characteristics determined by the ICESat-2 land surface algorithm [J]. Geophysical Research Letters, 2020, 47(1): e2019GL085907.

[9] Vignudelli S, Birol F, Benveniste J, et al. Satellite altimetry measurements of sea level in the coastal zone [J]. Surveys in Geophysics, 2019, 40(6):1319-1349.

[10] Gomez-Enri J, Vignudelli S, Quartly G D, et al. Modeling envisat RA-2 waveforms in the coastal zone: case study of calm water contamination [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2010, 7(3): 474-478.

[11] Neumann T A, Martino A J, Markus T, et al. The ice, cloud, and land elevation Satellite-2 mission: A global geolocated photon product derived from the advanced topographic laser altimeter system [J]. Remote Sensing of Environment, 2019, 233: 111325.

[12] Markus T, Neumann T, Martino A, et al. The ice, cloud, and land elevation Satellite-2 (ICESat-2): science requirements, concept, and implementation [J]. Remote Sensing of Environment, 2017, 190: 260-273.

[13] Neumann T A, Brenner A, Hancock D, et al. ATLAS/ICESat-2 L2A global geolocated photon data, version 3 [R]. Boulder, Colorado USA. NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center, 2021.

[14] Brunt K M, Neumann T A, Smith B E. Assessment of ICESat-2 ice sheet surface heights, based on comparisons over the interior of the Antarctic ice sheet [J]. Geophysical Research Letters, 2019, 46(22): 13072-13078.

[15] Yu Y, Sandwell D T, Gille S T, et al. Assessment of ICESat-2 for the recovery of ocean topography [J]. Geophysical Journal International, 2021, 226(1): 456-467.

[16] Magruder L, Brunt K, Neumann T, et al. Passive ground-based optical techniques for monitoring the on-orbit ICESat-2 altimeter geolocation and footprint diameter [J]. Earth and Space Science, 2021, 8(10): 9.

[17] Nilsson B, Andersen O B, Ranndal H, et al. Consolidating ICESat-2 ocean wave characteristics with CryoSat-2 during the CRYO2ICE campaign [J]. Remote Sensing, 2022, 14(6): 1300.

[18] Morison J, Hancock D, Dickinson S, et al. Ice, cloud, and land elevation Satellite (ICESat-2) project algorithm theoretical basis document (ATBD) for ocean surface height, Version 6 [R]. ICESat-2 Project, 2022.

[19] Qiu Sha Yi, Liang Chu Jin, Dong Chang Ming, et al. Analysis of the temporal and spatial variations in the wind and wave over the South China Sea [J]. Journal of Marine Sciences, 2013, 31(04): 1-9.
裘沙怡,梁楚进,董昌明,等. 南海海面风、浪场时空变化特征及其关系分析[J]. 海洋学研究, 2013, 31(04): 1-9.

[20] Zhou Zhi Biao, Zhou Hui, Ma Yue, et al. ICESat-2 lidar sea surface signal extraction and ocean wave element calculation [J]. Infrared and Laser Engineering, 2023, 52(2): 20220366-1-20220366-9.
周智标,周辉,马跃,等. ICESat-2激光雷达海面信号提取和海浪要素计算[J]. 红外与激光工程, 2023, 52(2): 20220366-1-20220366-9.

[21] Canard M, Ducrozet G, Bouscasse B. Varying ocean wave statistics emerging from a single energy spectrum in an experimental wave tank[J]. Ocean Engineering, 2022, 246(Feb.15): 110375.1-110375.15.

[22] Li S, Bi F, Hou Y, et al. Characterization of wind-sea and swell in the South China Sea based on HY-2 satellite data [J]. Journal of Coastal Research, 2018(84): 58-62.

[23] Nencioli F, Quartly G D. Evaluation of Sentinel-3A wave height observations near the coast of Southwest England [J]. Remote Sensing, 2019(24): 2998.

[24] Carpine-Lancre J, Fisher R, Harper B, et al. The 100-year story of the general bathymetric chart of the oceans [J]. GITC bv, Lammer, Netherlands, 2003, 5: 149.

[25] Apel J R. An improved model of the ocean surface wave vector spectrum and its effects on radar backscatter [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 1994, 99(C8): 16269-16291.

[26] Kay S, Hedley J, Lavender S, et al. Light transfer at the ocean surface modeled using high resolution sea surface realizations [J]. Optics Express, 2011, 19(7): 6493-6504.