

基于 Landsat 8 影像的海表波浪参数 获取方法研究

李 行¹, 王利花², 田 波³

(1. 江苏师范大学 地理测绘与城乡规划学院, 江苏 徐州 221116; 2. 成都信息工程大学 资源环境学院, 四川 成都 610225;
3. 华东师范大学 河口海岸学国家重点实验室, 上海 200062)

摘要: 以长江口海域作为研究区, 利用 Landsat 8 OLI 影像数据, 重点探讨了光学影像中波长和波向的获取技术及存在的问题。首先对影像数据进行预处理, 包括大气校正、波段选择、去云、高通滤波等。通过波段选择, 选取受水体浑浊度影响较小、能够更好表现海浪特征的第 7 波段和空间分辨率较高的全色波段(第 8 波段)。然后, 基于傅里叶变换利用网格法和跟踪法获取波浪频谱, 根据频谱中极值的分布情况计算得到波长和波向角。结果表明, 云、船只、船迹、船行波、锋面等都会对影像频谱产生较大的影响, 进而导致波浪特征提取结果偏离真实值。滤波处理和选用的网格大小也都会对波浪特征提取结果产生影响, 但总体上波长和波向跟目视判读结果吻合较好。另外, 与海图水深数据的初步对比分析发现, 波浪特征的变化与水下地形存在显著的相关性。本研究展示了光学影像在提取波浪特征方面的潜力。

关键词: 光学影像; Landsat 8; 傅里叶变换; 波浪参数; 水下地形

中图分类号:P407; TP79

文献标识码:A

文章编号:1671-6647(2018)02-0197-09

doi:10.3969/j.issn.1671-6647.2018.02.005

海表波浪是海洋学研究的重要对象之一, 对于港口及海岸工程建设、航海安全、泥沙传输、海气交互作用研究等诸多领域都是极其关键的参数^[1]。目前, 波浪数据获取的方法主要有现场直接观测、数值模型模拟和遥感间接探测三种。现场观测可以对海表波浪进行长期、实时和定点观测, 时间连续性好, 精度高, 但空间覆盖范围非常有限, 而且现场观测属于接触性测量方法, 其本身对波浪运动存在干扰。现场直接观测所获得的波浪数据非常稀少, 数值模拟方法得到了广泛应用, 但模型本身存在内在的不确定性, 模拟所需的驱动因子如风场数据、地形数据以及波浪传播行为建模等都使模拟结果存在误差^[2-3]。因此, 可靠和高分辨率的波浪数据获取仍然面临挑战^[4]。

遥感技术为波浪特征的获取提供了可行的解决方案, 已有观测海表波浪的遥感传感器类型主要有卫星高度计^[5]、SAR^[6-9]、LiDAR^[10-11]和光学传感器^[3,12]等。齐义泉等^[5]利用 GEOSAT 卫星高度计数据研究了南海北部海域的有效波高特征, 发现大风浪海况条件下具有明显的优势。Marom 等^[6]展示了利用合成孔径雷达干涉测量技术(InSAR)获取的海表波浪波数谱, 与现场观测得到的功率谱一致, 因此 InSAR 技术可用来获取海表波浪场结构的瞬时空间信息。Baxter 等^[13]发展了利用机载极化成像仪通过测量波倾角(wave slope)进而获取有效波高的技术。也有研究者利用导航卫星海洋反射信号测量有效波高^[14-16]。Populus 等^[3]主要从理论上分析了波浪成像条件、波浪特征的计算方法, 并通过与浮标观测数据相比较, 探讨了利用 SPOT 影像获取波浪特征参数的可行性, 最后提出了开发自动化波浪参数提取软件的建议。de Michele 等^[12]提出了利用 SPOT 全色影像与多光谱影像之间的时间延迟直接测量海表波浪速度场的方法。Dugan

收稿日期:2017-04-24

资助项目:国家自然科学基金项目——长江河口湿地演变对流域来沙减少的响应机理研究(41401093); 江苏高校优势学科建设工程项
目——区域新型城镇化发展

作者简介:李 行(1981-), 男, 河南驻马店人, 副教授, 博士, 主要从事海岸带环境遥感与 GIS 应用方面研究. E-mail:lixing@jsnu.edu.cn

(王 燕 编辑)

等^[17]利用机载近红外影像序列提取表面波浪参数信息。通过获取波浪特征参数,还可以进一步推导水下地形数据^[18-20]。长期以来,傅里叶变换^[21-22]、Hough 变换^[23]、纹理测度^[24]等各种方法被用于从不同类型的遥感影像中提取波浪特征,其中,傅里叶变换是应用最为广泛的技术。在已有的研究当中,采用光学遥感影像的研究相对较少,主要原因在于光学影像易受云的影响使得晴空条件下的影像不易获取,而且光学影像中波浪特征的提取易受水中其他对象的干扰,以及中低分辨率光学影像中波浪特征不易呈现,但与其他类型的遥感数据相比,光学遥感影像易于获取、成本相对较低,且时空分辨率更高,这为基于光学遥感影像提取高质量的波浪特征参数提供了可能。本文将以长江口的 Landsat 8 影像为例对光学影像波浪特征提取技术进行探讨。

1 数据与方法

采用长江口海域 Landsat 8 卫星的 OLI 影像数据及 2013 年长江口及附近 1 : 150 000 海图水深数据。遥感影像数据成像时间为北京时间 2013-08-29T10:27,中心经纬度为(121°54'52.55"E, 31°44'18.66"N)。数据预处理包括大气校正、去云和高通滤波等。选取受水体浑浊度影响较小,能够更好表现海表波浪特征的第 7 波段和空间分辨率较高的全色波段(第 8 波段)。

采用规则网格法和跟踪法两种方法分别提取波浪信息。前者在研究区生成一定大小的正方形网格,去除可能影响波浪参数获取的含有船只、岛屿等对象的网格。然后对每一个网格利用式(1)进行二维离散傅里叶变换。跟踪法可以跟踪一条完整的波向线,首先选择一个起始点,以起始点为中心提取一定大小正方形的影像块,同样利用式(1)进行二维离散傅里叶变换计算波长和波向角,进而根据波向角沿波浪传播的方向移动一定的距离,作为下一个起始点,以新获取的起始点作为中心重复同样的操作,直到陆地停止,从而完成一条完整波向线的跟踪。

二维离散傅里叶变换(DFT)的计算公式^[3]为

$$F(n_u k_0, n_v k_0) = \frac{1}{N^2} \sum_{m_x=0}^{N-1} \sum_{m_y=0}^{N-1} f(m_x, m_y) e^{-j \Delta x k_0 (n_u m_x + n_v m_y)}, \quad (1)$$

式中, $n_u k_0, n_v k_0$ 分别为 u 和 v 方向的波数; n_u, n_v 中 n 取值为 $1, 2, 3, \dots, N$; N 为二维 DFT 输入影像块的行列数; $k_0 = \frac{2\pi}{D}$, D 表示二维 DFT 输入影像块的尺寸,且 $D = N \Delta x$, Δx 为像元大小; $f(m_x, m_y)$ 代表位置 (m_x, m_y) 处的像元值。根据二维 DFT 频谱中极值的分布情况可以获得对应的波长(λ)和波浪传播方向的角度(α),公式为

$$\begin{aligned} \lambda &= \frac{D}{\sqrt{k'_u{}^2 + k'_v{}^2}}, \\ \alpha &= \arctan\left(\frac{k'_v}{k'_u}\right), \end{aligned} \quad (2)$$

式中, k'_u, k'_v 分别是频谱中峰值点对应的 u 和 v 方向的波数; λ, α 分别为峰值波长和波向角。当存在 2 种甚至 2 种以上的波浪成分时,频谱出现多个明显的极值点,可以通过计算频谱的重心来获得中心波长和波向角。计算得到的波浪传播方向具有 180° 方向模糊性,可根据波浪传播的特性及风向加以去除。

根据线性波理论,水深 d 可由弥散方程^[18]给出

$$d(L, \omega) = \frac{L}{2\pi} \operatorname{arctanh}\left(\frac{\omega^2 L}{2\pi g}\right), \quad (3)$$

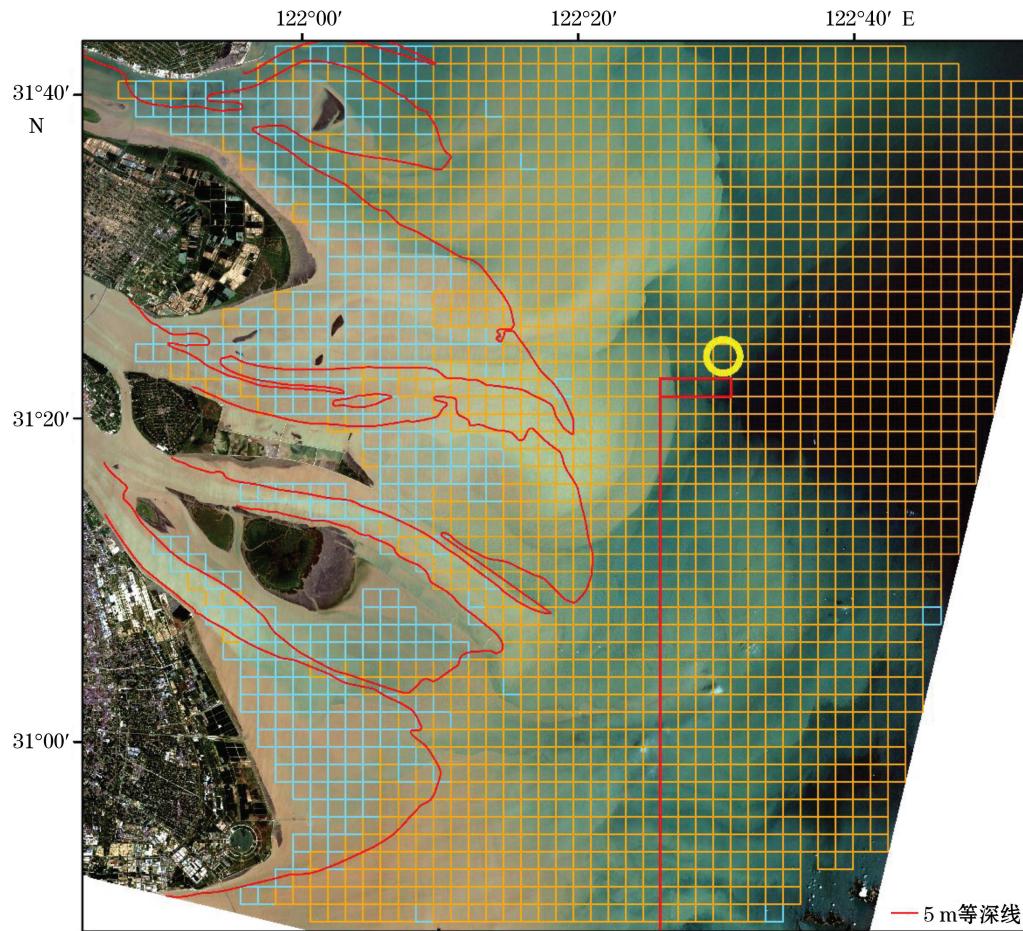
式中, L 为峰值波长, ω 为峰值波频率($\omega = 2\pi/T$), T 为峰值波周期, g 为重力加速度。这里峰值波频率无法从 Landsat 8 影像中获取,因此要想根据波长得到水深数据,还需要利用浮标或船只等现场观测手段得到峰值波频率。

2 结果与分析

本研究分别测试了0.5~3.0 m不同尺度的网格。比较发现,相对于波浪尺度,小尺度网格包含的有效信息过少,小的异常点容易导致结果产生较大的偏差;过大尺度的网格能够包含足够的有效波浪信息,但会降低结果的空间分辨率,而且网格越大可能包含的干扰信息就越多。对于规则网格法,本文采用2 km网格;对于跟踪法,每一个数据点所提取的图像块大小为3 km×3 km,2个相邻数据点之间的距离为2 km。从网格法计算结果来看,在去除无效区域之后,研究区最大波长为226.2 m,最小波长为72.0 m,平均波长为136.0 m,标准差为30.5 m。从深水区向浅水区,波长呈逐渐减小的趋势,跟波长与水深的关系吻合。从图1a和图1c可以看出,5 m等深线以浅的近岸区域,由于波浪的浅化(wave shoaling)变形以及反射波的影响,波浪特征在影像上变得不太明显,出现较大的误差。但5 m等深线以深的区域,除了个别异常点外,总体上提取结果与实际吻合较好(图1a和图1b)。

为了进一步证实所提取波长与水深的关系,采用跟踪法提取波浪。图2是分别基于第7波段和全色波段(第8波段)利用跟踪法提取波浪的结果。图中每一个圆点代表一个波浪特征提取结果,圆点从右下至左上颜色从红色逐渐变为绿色,代表对应数值从大变小。对照叠加的等深线可以发现,其傅里叶谱零阶矩和中心波长都与水深存在一定的相关性。对于第7波段,零阶矩比中心波长相关性强;对于全色波段则相反,中心波长比零阶矩相关性强。其中,零阶矩是傅里叶幅度谱所有像元之和,反映的是3 km×3 km范围图像中所有频率成分能量的总和;而中心波长则是不同频率成分、不同方向波浪的一个综合反映。第7,8波段空间分辨率为30 m和15 m。第8波段能够表达更高频率成分(波长较短)的波浪,从第8波段的影像上也能够看出,除了低频波浪(波长150~200 m左右)之外,可见大量较细的波纹(波长30~40 m左右);第7波段则只能显示出波长较长的低频波浪成分。相应地在第7波段的频谱图上,主要体现了低频波浪特征;在第8波段的波浪频谱图上,低频和高频波浪特征都较为明显(图3)。因此,第7波段波浪频谱的零阶矩和第8波段波浪频谱的中心波长更能体现出低频波浪成分的影响。而此处高频波浪满足了深水波的条件,其波长与水深无关。这可能是第7波段和第8波段两个波段波浪频谱特征与水深相关性差异的原因。另外,可以看到许多跟踪线中从红色到绿色的渐变中夹杂了一些异常点,导致异常的原因包括云、船只、船迹、船行波、锋面等(图4)。此外,Landsat 8影像中水体区域由于传感器辐射非均一性导致的条带(banding)^[25]也会对所提取的波浪特征产生影响。

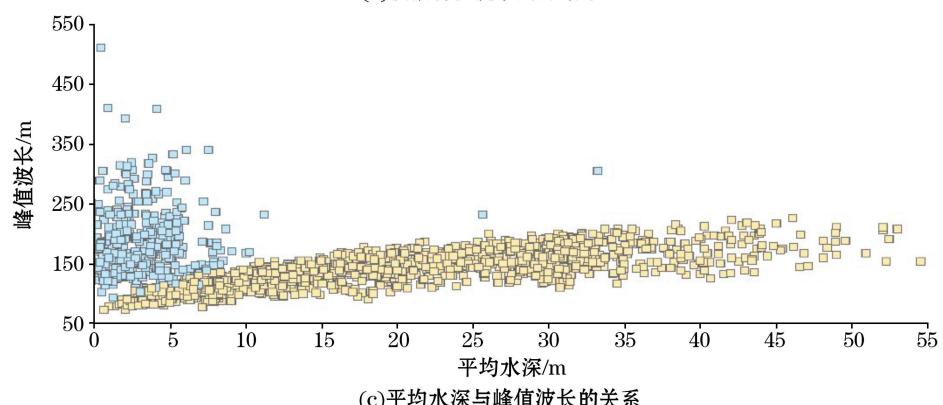
由于没有影像过境时刻对应的水深数据,所以选择2013年出版的长江口及邻近海域1:150 000的海图数据进行比较,鉴于该数据大部分区域都不是2013年的测量结果,此处仅作定性分析。比较发现,波浪特征与水深存在显著相关关系(图2和图4)。从图4中2个线划图可以看出波浪频谱零阶矩存在很多异常点,其中异常点①和③是由船只引起的,异常点②和④主要是由锋面引起的。



(a) 提取波浪特征所采用 2 km 网格分布情况



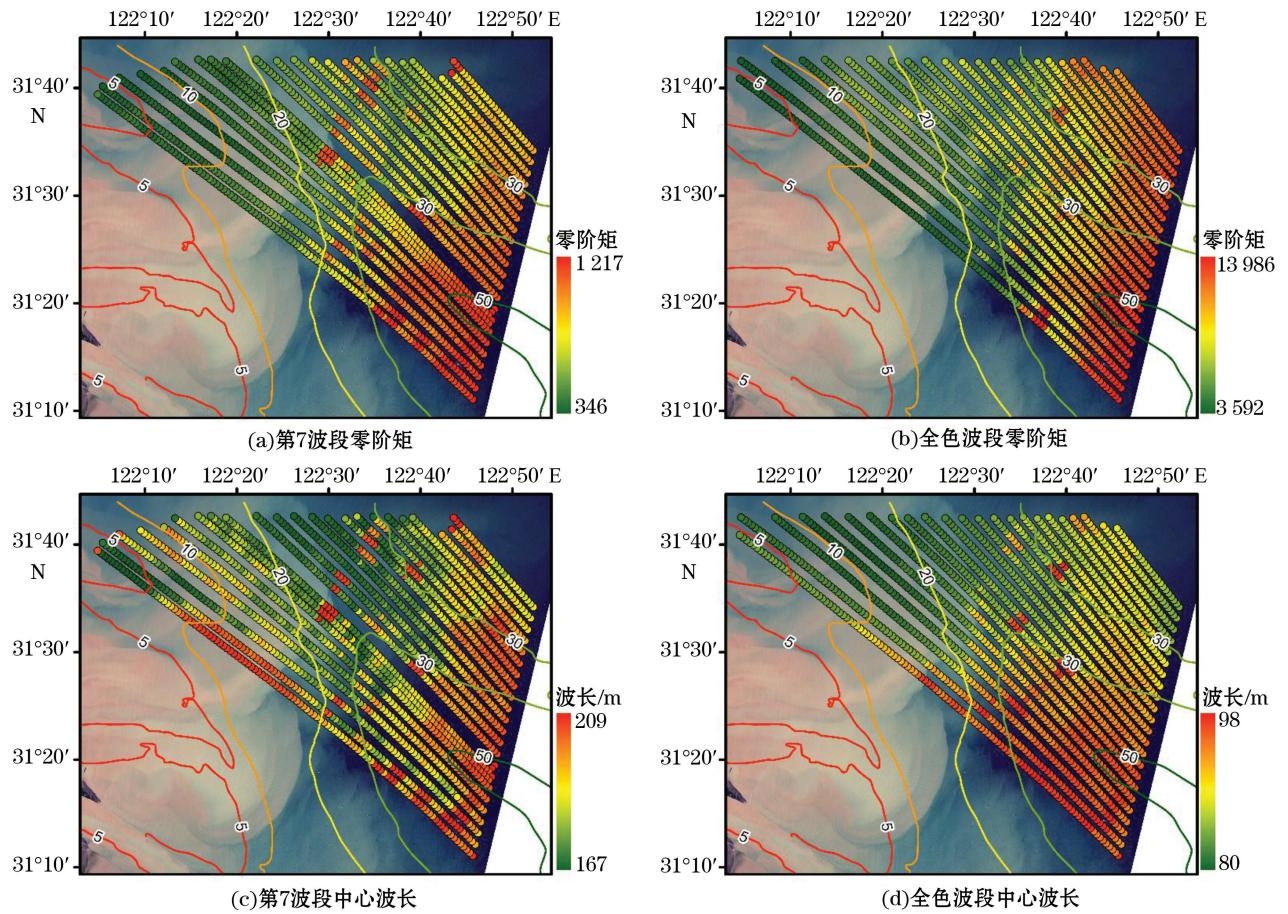
(b) 波浪特征提取局部结果



(c) 平均水深与峰值波长的关系

图 1 2 km 网格法波浪特征提取结果

Fig.1 Wave parameters extraction based on 2 km grid



注:图中数字 5,10,20,30,50 为水深,单位为 m

图 2 Landsat 8 影像第 7 波段和全色波段(第 8 波段)跟踪线波浪特征提取结果

Fig.2 Wave parameters extraction based on Landsat 8 band 7 and panchromatic band (band 8)

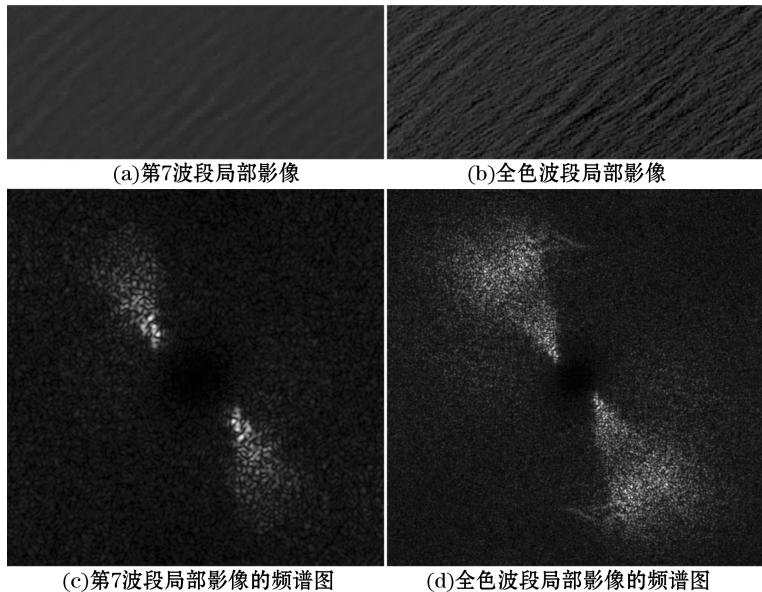


图 3 图 1 中黄色圆圈所指示位置的 Landsat 8 第 7 波段和全色波段(第 8 波段)影像及对应的频谱图

Fig.3 Images of Landsat 8 band 7, panchromatic band (band 8) and the Fourier spectrum in the area indicated by the yellow circle in Fig.1

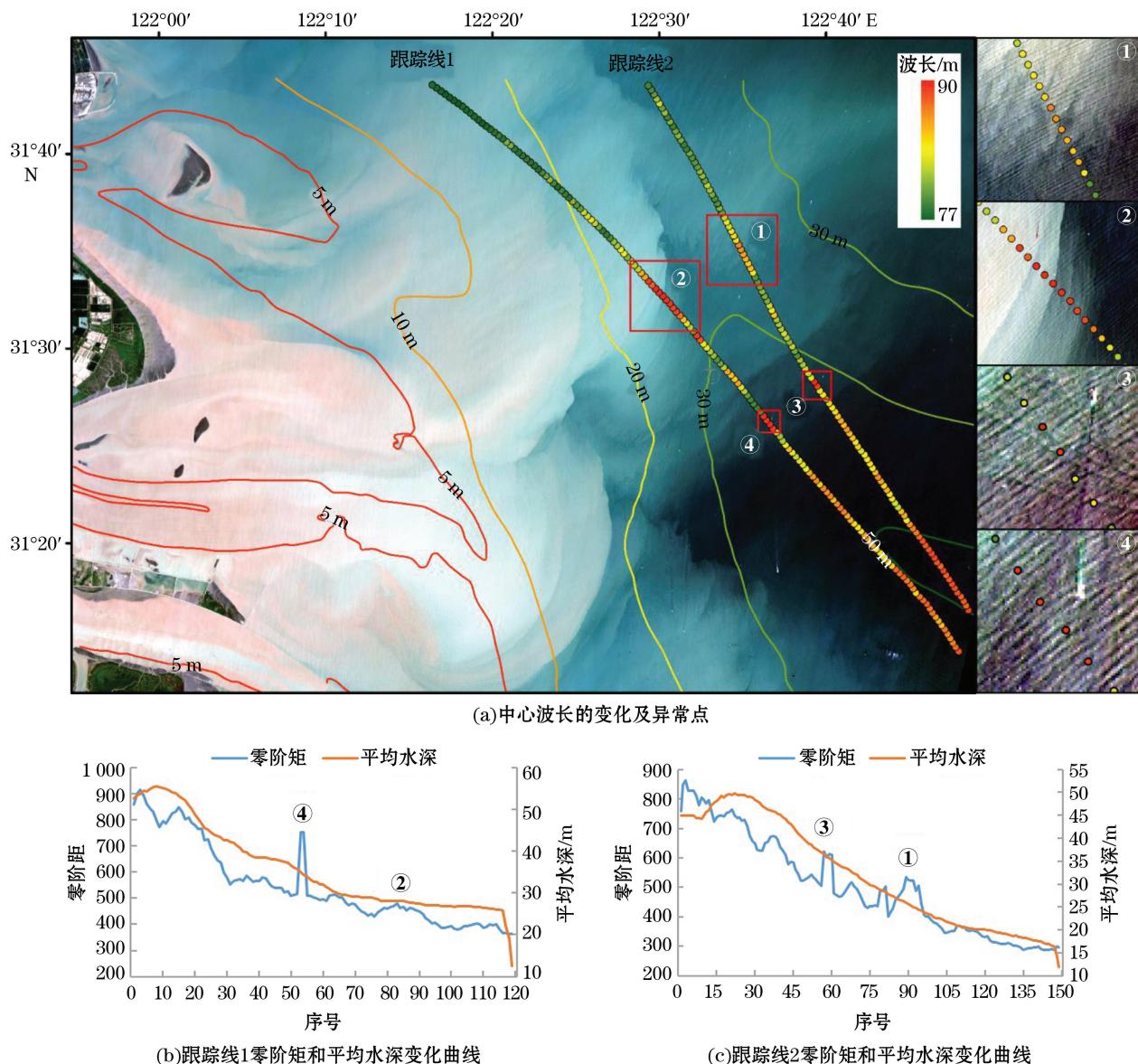


图4 波浪频谱特征与水深的关系以及船只和锋面对频谱的影响

Fig.4 The relationship between the Fourier spectrum zero-moment and the average water depth, as well as the impact of boat and front on the Fourier spectrum

波浪的形成与发展受到多种因素的影响,从光学影像中提取波浪特征信息同样存在多种干扰因素,进而导致所提取的波浪信息失真甚至错误。这些干扰因素包括船只、船迹、船行波、内波、泥沙锋面、云、小的岛屿、辐射非均一性(如 Landsat 8 水体中的条带)等。遥感图像处理可以部分地消除这些干扰信息的影响。图 5a 和图 5c 分别是 Landsat 8 影像第 7 波段和全色波段(第 8 波段)影像数据,图 5b 和图 5d 分别是第 7 波段和全色波段(第 8 波段)高斯高通滤波的结果。比较可以发现,第 7 波段上船迹在滤波前后都比较明显,而全色波段滤波之前船迹并不明显,滤波之后基本不可见;而锋面则相反,在全色波段上滤波前后都比较明显,第 7 波段在滤波之前锋面可识别,滤波之后基本不可见。分析可以发现,多光谱波段和全色波段受到的影响因素不同,在进行波浪特征提取时,可借助高通滤波消除或减少部分影响,经过高通滤波的影像更易于在傅里叶谱中寻找极值。

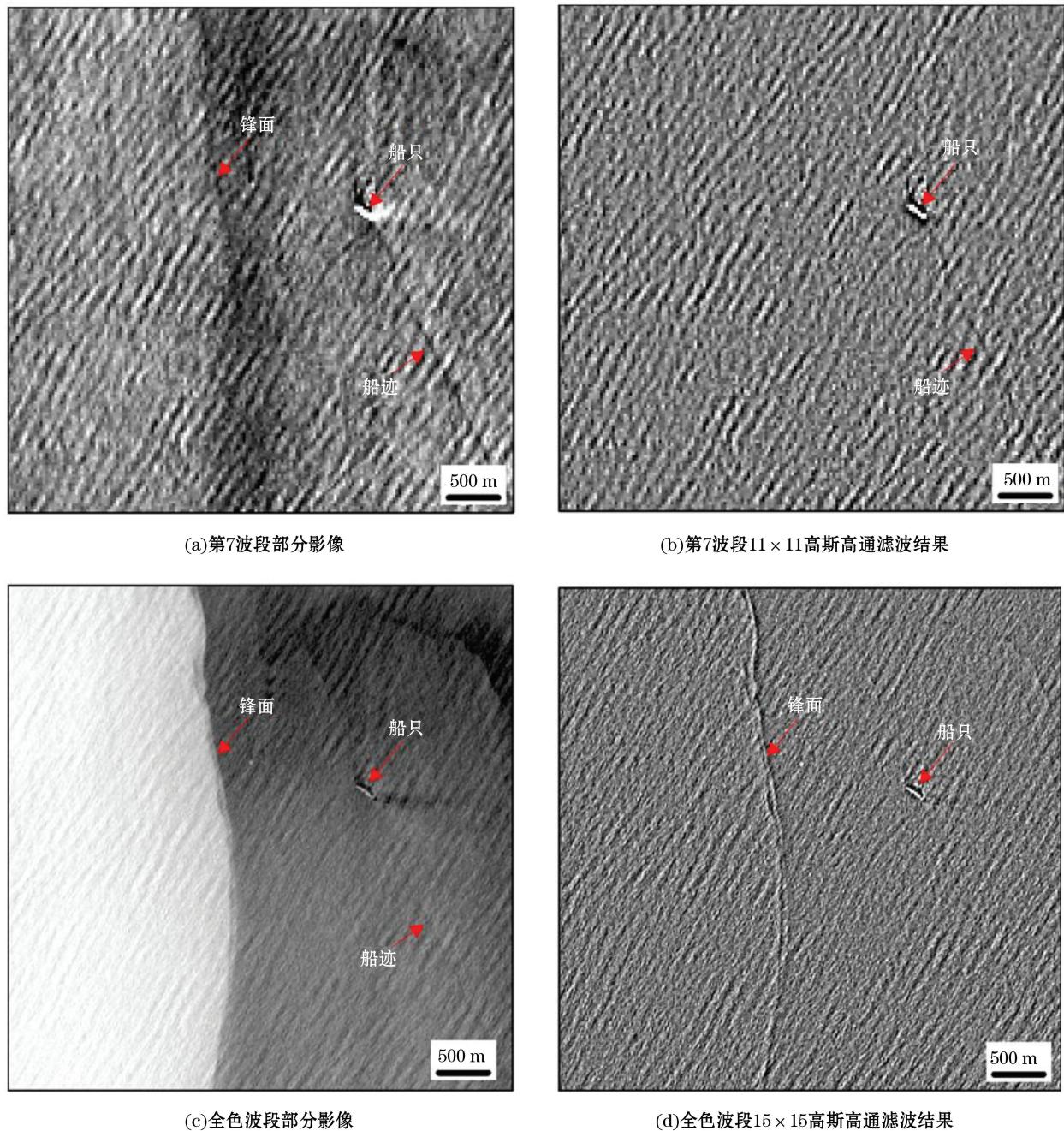


图 5 Landsat 8 第 7 波段和全色波段(第 8 波段)影像及其高斯高通滤波结果

Fig.5 Images of Landsat 8 band 7, panchromatic band (band 8) and the filtered images by the Gaussian high pass filter

3 结语

利用 Landsat 8 卫星多光谱和全色影像研究了海表波浪参数的提取技术,结果表明波长和波向角提取结果与目视解译的结果吻合较好。由于没有与遥感影像同步的高精度水深数据和现场观测数据,波长与水深的定量关系没有做深入研究,但定性分析表明两者之间存在显著的相关性。由于没有高分辨率的有效波

高数据,本文也没有对有效波高的获取做深入研究,随着光学影像空间分辨率的提高,或许能够利用波浪影像傅里叶频谱统计特征与有效波高之间的关系推导有效波高数据。对于干扰噪声的影响,可以进一步研究信息提取技术以改进从影像和傅里叶频谱提取波浪特征信息的准确性,以减少提取结果中异常点的数量。此外,光学影像的成像条件与海况条件也会对海表波浪在影像中的可见性产生影响,使得一些高质量的影像上波浪特征并不明显,在一定程度上限制了光学影像提取波浪特征参数的应用。尽管如此,利用光学影像提取波浪特征仍有巨大的潜力。首先,光学影像可以覆盖大面积的空间范围,弥补现场观测的不足;其次,光学传感器数量越来越多,空间分辨率不断提高,使得基于光学影像推导波浪特征参数的时空分辨率和精度将逐渐提高;再次,许多光学影像数据都可以免费或低成本获取,与雷达数据相比具有更好的数据可获取性;最后,如果将光学影像波浪提取技术与模型模拟相结合将能够提供高时空精度的波浪数据产品。

参考文献(References):

- [1] WANG X L, FENG Y, SWAIL V R. Changes in global ocean wave heights as projected using multimodel CMIP5 simulations[J]. *Geophysical Research Letters*, 2014, 41(3): 1026-1034.
- [2] HEMER M A, FAN Y, MORI N, et al. Projected changes in wave climate from a multi-model ensemble[J]. *Nature Climate Change*, 2013, 3(5): 471-476.
- [3] POPULUS J, ARISTAGHES C, JONSSON L, et al. The use of SPOT data for wave analysis[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1991, 36(1): 55-65.
- [4] WAHLE K, STANEVA J, KOCH W, et al. An atmosphere-wave regional coupled model: improving predictions of wave heights and surface winds in the Southern North Sea[J]. *Ocean Science Discussions*, 2017, 13(2): 289-301.
- [5] QI Y Q, SHI P, MAO Q W. Characteristics of sea wave over the northern South China Sea from GEOSAT altimetric observations[J]. *Haiyang Xuebao*, 1998, 20(2): 20-26. 齐义泉, 施平, 毛庆文. GEOSAT 高度计遥感分析南海北部的海浪特征[J]. 海洋学报, 1998, 20(2): 20-26.
- [6] MAROM M, GOLDSTEIN R M, THORNTON E B, et al. Remote sensing of ocean wave spectra by interferometric synthetic aperture radar[J]. *Nature*, 1990, 345(6278): 793-795.
- [7] SUN J, KAWAMURA H. Retrieval of surface wave parameters from SAR images and their validation in the coastal seas around Japan [J]. *Journal of Oceanography*, 2009, 65(4): 567-577.
- [8] YANG J S, HUANG W G, ZHOU C B. A new method on wave propagation direction determination from SAR imagery[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2002, 6(2): 113-116. 杨劲松, 黄伟良, 周长宝. 星载 SAR 海浪遥感中波向确定的一种新方法[J]. 遥感学报, 2002, 6(2): 113-116.
- [9] BRUCK M, LEHNER S. Coastal wave field extraction using TerraSAR-X data[J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2013, 7(1): 073694.
- [10] HWANG P A, WANG D W, WALSH E J, et al. Airborne measurements of the wavenumber spectra of ocean surface waves. Part I: spectral slope and dimensionless spectral coefficient[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2000, 30(11): 2753-2767.
- [11] HWANG P A, WANG D W, WALSH E J, et al. Airborne measurements of the wavenumber spectra of ocean surface waves. Part II: directional distribution[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2000, 30(11): 2768-2787.
- [12] DE MICHELE M, LEPRINCE S, THIÉBOT J, et al. Direct measurement of ocean waves velocity field from a single SPOT-5 dataset [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 119: 266-271.
- [13] BAXTER R. Ocean wave slope and height retrieval using airborne polarimetric remote sensing[D]. Washington D C: Georgetown University, 2012.
- [14] YIN C, CAO Y C, ZHU B, et al. Application of significant wave height measurement using GNSS-R signals[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2012, 31(6): 36-40. 尹聪, 曹云昌, 朱彬, 等. GNSS-R 信号测量海面有效波高的应用[J]. 热带海洋学报, 2012, 31(6): 36-40.
- [15] WANG X, SUN Q, ZHANG X X, et al. A first oceanographic remote sensing experiments of China's ground-based GNSS airborne[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2008, 53(5): 589-592. 王鑫, 孙强, 张训械, 等. 中国首次岸基 GNSS-R 海洋遥感实验[J]. 科学通报, 2008, 53(5): 589-592.
- [16] LI Y, ZHU X Y, CUI C, et al. Preliminary study on ship-borne significant wave height measurement using GNSS-R signals[J]. *Marine Environmental Science*, 2016, 35(2): 180-183. 李颖, 朱雪媛, 崔璨, 等. 船载 GNSS-R 有效波高测量的初步研究[J]. 海洋环境科学,

- 2016, 35(2): 180-183.
- [17] DUGAN J P, SUZUKAWA H H, FORSYTH C P, et al. Ocean wave dispersion surface measured with airborne IR imaging system[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1996, 34(5): 1282-1284.
- [18] BRUSCH S, HELD P, LEHNER S, et al. Underwater bottom topography in coastal areas from TerraSAR-X data[J]. International Journal of Remote Sensing, 2011, 32(16): 4527-4543.
- [19] PLESKACHEVSKY A, LEHNER S, HEEGE T, et al. Synergy and fusion of optical and synthetic aperture radar satellite data for underwater topography estimation in coastal areas[J]. Ocean Dynamics, 2011, 61(12): 2099-2120.
- [20] ALPERS W, HENNINGS I. A theory of the imaging mechanism of underwater bottom topography by real and synthetic aperture radar [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans(1978—2012), 1984, 89(C6): 10529-10546.
- [21] BARBER N. A diffraction analysis of a photograph of the sea[J]. Nature, 1949, 164(4168): 485.
- [22] STILWELL D. Directional energy spectra of sea from photographs[J]. Journal of Geophysical Research, 1969, 74(8): 1974-1986.
- [23] LIU Z K, BI Y L, HUANG R H. Application of HOUGH transform in analyzing ocean wave from seasat SAR image[J]. Journal of Remote sensing, 1991, 6(1): 36-41, 86. 刘政凯, 毕亚雷, 黄润恒. HOUGH 变换在海浪遥感图像处理中的应用[J]. 遥感学报, 1991, 6(1): 36-41, 86.
- [24] XU J H, ZHENG J W. A texture analysis technique to wave length and direction extracting from ocean wave image[J]. Journal of Remote sensing, 1990, 5(4): 286-296. 徐建华, 郑君伟. 波浪波长和方向提取的图像纹理分析技术[J]. 遥感学报, 1990, 5(4): 286-296.
- [25] PAHLEVAN N, LEE Z P, WEI J W, et al. On-orbit radiometric characterization of OLI (Landsat-8) for applications in aquatic remote sensing[J]. Remote Sensing of Environment, 2014, 154: 272-284.

Retrieval of Surface Wave Parameters From Landsat 8 Image

LI Xing¹, WANG Li-hua², TIAN Bo³

(1. School of Geography, Geomatics and Planning, Jiangsu Normal University, Xuzhou 221116, China;
 2. College of Resources and Environment, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China;
 3. State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200062, China)

Abstract: Landsat 8 Operational Land Imager (OLI) image was used to extract ocean surface wave parameters in the Yangtze estuary. We studied the extraction method of the wavelength and propagation direction of the surface wave, and discussed some relevant problems. Some preprocessing was performed, including atmospheric correction, band selection, cloud/haze removal, high pass filter, etc. Band selection was used to identify the bands which are more expressive to surface wave and immune to the influence of ocean color. For Landsat 8 OLI image, besides panchromatic band with higher spatial resolution, band 7 covers a slice of the shortwave infrared spectral domain, which is little affected by the turbidity that is conducive to accurately retrieval of the surface wave. Based on Fourier transform theory, the Fourier spectrum of the surface wave was calculated by means of grid method and track method, respectively. Finally, wavelength and propagation direction can be derived according to the spatial distribution of the maxima in the Fourier spectrum. Results show that cloud, ship, ship wake, ship wave and front can contaminate the Fourier spectrum and cause abnormal results. Besides, both the filtering procedure and the grid size influence the results. But generally the derived results are consistent with the visual interpretations. Furthermore, there is significant correlation between wavelength and underwater topography.

Key words: optical image; Landsat 8; Fourier transform; surface wave parameters; underwater topography

Received: April 24, 2017