

Sentinel-2的胶州湾水体透明度遥感反演

杨雷 禹定峰 高皜 卞晓东 刘晓燕 盖颖颖 安德玉 周燕 唐世林

Remote sensing retrieval of secchi disk depth in Jiaozhou Bay using Sentinel-2 MSI image

Yang Lei, Yu Dingfeng, Gao Hao, Bian Xiaodong, Liu Xiaoyan, Gai Yingying, An Deyu, Zhou Yan, Tang Shilin

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/IRLA20210080>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于时序Sentinel-2影像的现代农业园区作物分类研究

Crop classification of modern agricultural park based on time-series Sentinel-2 images

红外与激光工程. 2021, 50(5): 20200318-1-20200318-11 <https://doi.org/10.3788/IRLA20200318>

东海有机碳存量估算

Estimation of organic carbon stocks in the East China Sea

红外与激光工程. 2021, 50(6): 20211031-1-20211031-12 <https://doi.org/10.3788/IRLA20211031>

CPU-GPU异构系统在光学遥感影像处理中的应用

Application of CPU-GPU heterogeneous system in optical remote sensing image processing

红外与激光工程. 2020, 49(S1): 20200092-20200092 <https://doi.org/10.3788/IRLA20200092>

基于遥感数据的地球背景中红外场景仿真

Simulation of global mid-infrared background based on remote sensing data

红外与激光工程. 2018, 47(11): 1104004-1104004(7) <https://doi.org/10.3788/IRLA201847.1104004>

空间遥感器 $\Phi 2$ m量级大口径SiC反射镜镜坯结构设计

Structural design of $\Phi 2$ m-level large-diameter SiC reflector used in space remote sensor

红外与激光工程. 2017, 46(7): 718005-0718005(9) <https://doi.org/10.3788/IRLA201746.0718005>

航天高光谱遥感应用研究进展(特邀)

Advances in application of space hyperspectral remote sensing(invited)

红外与激光工程. 2019, 48(3): 303001-0303001(15) <https://doi.org/10.3788/IRLA201948.0303001>

Sentinel-2 的胶州湾水体透明度遥感反演

杨 雷¹, 禹定峰^{1,2*}, 高 犒¹, 卞晓东¹, 刘晓燕¹, 盖颖颖¹, 安德玉¹, 周 燕¹, 唐世林²

- (1. 齐鲁工业大学(山东省科学院)山东省科学院海洋仪器仪表研究所 山东省海洋监测仪器
装备技术重点实验室 国家海洋监测设备工程技术研究中心, 山东 青岛 266100;
2. 热带海洋环境国家重点实验室 中国科学院南海海洋研究所, 广东 广州 510301)

摘 要: 针对目前透明度遥感反演研究多以较低空间分辨率卫星数据为主的现状, 采用分辨率高达 10 m 的 Sentinel-2 卫星数据进行了胶州湾海域水体透明度的遥感反演研究。构建了基于实测数据的反演模型。结果表明: 模型具有较高的精度, 反演值与实测值的平均相对误差为 9.86%, 均方根误差为 0.22 m。依据构建的反演模型与卫星影像数据反演了胶州湾水体的透明度, 绘制了水体的透明度分布图, 分析了胶州湾海域水体透明度的空间分布规律和局部的细微变化特征。研究发现, 胶州湾海域水体透明度呈现由近岸向外海逐渐升高的趋势, 径流量大的河流会造成汇入海域透明度明显降低的变化, 潮汐会引起透明度出现沿垂直于岸边方向的纹理变化特征, 大型船只的通航会造成透明度短时降低的变化。

关键词: 透明度; 哨兵 2 号; 遥感反演; 胶州湾

中图分类号: TP75 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20210080

Remote sensing retrieval of secchi disk depth in Jiaozhou Bay using Sentinel-2 MSI image

Yang Lei¹, Yu Dingfeng^{1,2*}, Gao Hao¹, Bian Xiaodong¹, Liu Xiaoyan¹,
Gai Yingying¹, An Deyu¹, Zhou Yan¹, Tang Shilin²

- (1. National Engineering and Technological Research Center of Marine Monitoring Equipment, Shandong Provincial Key Laboratory of Marine Monitoring Instrument Equipment Technology, Institute of Oceanographic Instrumentation, Qilu University of Technology (Shandong Academy of Sciences), Qingdao 266100, China;
2. State Key Laboratory of Tropical Oceanography, South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China)

Abstract: In view of the current situation that the existing research of retrieval of secchi disk depth (SDD) was mostly based on lower resolution satellite data, the retrieval of secchi disk depth had been carried out using Sentinel-2 MSI image with a resolution of up to 10 m in Jiaozhou Bay. A retrieval model based on measured data was constructed. The results show that the retrieval model has high accuracy. The average relative error between the inversion value and the measured value is 9.86%, and the root mean square error is 0.22 m. Based on the constructed retrieval model and Sentinel-2 MSI image, the SDD in Jiaozhou Bay was inverted, the SDD distribution map was drawn, and the spatial distribution and local subtle change characteristics of the SDD in

收稿日期:2021-07-10; 修订日期:2021-08-25

基金项目:国家重点研发计划(2018YFF01014101, 2017YFC1404800); 山东省重点研发计划(2019GHY112017); 国家海洋局海洋公益性行业科研专项(201505031-1); 山东省自然科学基金(ZR2019PD021); 热带海洋环境国家重点实验室开放课题(LTO2017)

作者简介:杨雷,男,工程师,硕士,主要从事遥感数据处理及系统设计方面的研究。

Jiaozhou Bay were analyzed. The study found that the SDD of Jiaozhou Bay showed a trend of gradually increasing from the coast to the sea. Rivers with large runoff caused changes that significantly reduce the SDD near the mouth of the river. The tide caused the texture change characteristics of SDD to appear along the direction perpendicular to the shore. The navigation of large vessels caused a short-term decrease of SDD.

Key words: SDD; Sentinel-2; remote sensing retrieval; Jiaozhou Bay

0 引言

透明度是描述水体光学性质的基本参数之一,它与水体中无机物、有机物、溶解物、颗粒物和浮游植物等组分含量密切相关^[1]。水体透明度表征着水体的光学透射传输能力,能够表示水体水质情况,评估水体的富营养化程度,是水质调查中的一个重要参数^[2]。水体透明度的变化会对水体生态环境、海防航运以及沿岸港口的发展产生严重的影响^[3]。因此,研究水体透明度对监测水体生态环境、可持续发展海洋经济、指导海洋国防建设有着重要的意义。透明度实测数据通常是通过传统的塞克盘法获得,它是指实验人员能够观察到的塞克盘在水中的最大深度^[4]。通过塞克盘法能够获取到准确有效的透明度数据,且测量方法简单,但其获取的数据量有限,覆盖面小,数据不连续且无法对大面积水域实现实时的同步监测。与传统的现场实测方法相比,遥感技术具有监测范围广、采集时效性高、周期性动态覆盖等优势。能够弥补传统方法的缺陷,并且可以实现对监测人员难以到达区域的监测。因此遥感技术正逐渐成为水体透明度监测的有效且重要手段之一^[5]。

近年来,随着众多的遥感卫星发射成功并进入业务化观测阶段,国内外很多学者针对不同的卫星数据提出了多种水体透明度的遥感反演方法。Doron 等提出了一种应用于 MERIS、MODIS 和 SeaWiFS 的传感器数据进行透明度遥感反演的半分析算法^[6]。刘翀等利用 MODIS 影像数据分析了气候变化对青藏高原湖泊透明度的影响^[7]。Leonardo 等提出了一种应用于 MERIS 卫星数据的机器学习遥感反演算法,并对墨西哥中部的 Valle de Bravo 水库的透明度进行了反演估算^[8]。张一博等通过 Landsat 卫星影像对中国不同类型湖泊的透明度进行了反演研究^[9]。曾帅等利用 GOCI 影像数据提出了一种适用于浑浊湖泊透明度反演的半分析算法^[10]。但这些卫星数据的空间分辨率都普遍较低,其中最高的 Landsat 分辨率也只能达到 30 m,无法体现水体透明度一些细微的细节性变化信

息。Sentinel-2 卫星数据分辨率高达 10 m,然而利用 Sentinel-2 数据进行透明度遥感反演尚未见报道。文中以实测数据与卫星遥感数据为基础构建胶州湾水体透明度反演模型,对胶州湾海域水体透明度的变化特征进行分析研究,分析讨论造成水体透明度变化的因素。

1 数据与方法

1.1 研究区域

胶州湾位于中国黄海中部、胶东半岛南岸、约在 120.10~120.37°E, 36.06~36.25°N 之间。胶州湾是形状近似椭圆形的一个半封闭型海湾,湾北部和西北部为平原,东部为崂山山脉,西南和南部为小珠山山脉^[11],湾口向东以团岛南段、薛家岛北端为界,宽约 3 km,湾中部东西宽约 28 km,湾内南北向最大长度约 40 km,岸线长为 163 km,面积约为 423 km²,其中滩涂面积约 125 km²,零米线以下水域面积约为 298 km²^[11]。各种水深水域面积分配很不均匀,平均水深 6~7 m,最大水深可达 64 m。汇入胶州湾的河流有大沽河、白沙河、李村河等 11 条河流。

近年来,随着青岛市社会经济的发展,胶州湾海域受沿岸港口发展,胶州湾大桥修建,企业污水排放,海水养殖,旅游垂钓等活动影响加剧,严重影响了该海域的生态环境。透明度作为水质监测的一个重要指标,不仅关乎海域生态环境的变化,也影响着海域港口通航、渔业养殖等社会经济的发展。

1.2 实测数据

该研究中所使用的胶州湾透明度实测数据是 2016 年 11 月 2 日胶州湾野外科学实验时获得的,现场采样实验当天天气晴朗无云,能见度高,微风。现场透明度实验观测的测量方法为塞克盘法,观测时间为 9:00~14:00,共 16 个站位。因胶州湾北部海域浅滩较多,海水深度较浅,西部海域渔业养殖区域较多,调查船只无法到达该区域进行实验采样,16 个实际采样站位如图 1 所示。

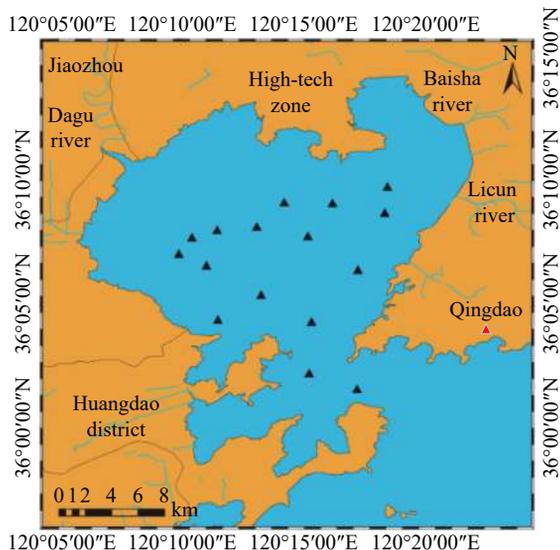


图 1 采样位置示意图

Fig.1 Schematic diagram of sampling location

1.3 遥感数据

Sentinel-2 卫星是全球环境与安全监测系统“哥白尼计划”中的第二颗卫星，是高分辨率多光谱成像卫星，其包括 Sentinel-2A 和 Sentinel-2B 两颗卫星，两颗卫星为同一组。均携带一枚多光谱成像仪 (Multi-spectral Imager, MSI)，高度为 786.13 km，可以覆盖 13 个光谱波段，对地刈幅宽度可达 290 km。地面像元分辨率分别为 10 m、20 m 和 60 m。每颗卫星的重访周期为 10 天，两颗卫星互补，重访周期为 5 天。MSI 的主要参数如表 1 所示。

该研究所用的遥感数据为 Sentinel-2A MSI 影像，其成像时间为格林尼治时间 2016 年 11 月 3 日上午 10:46:17 在相对轨道 R132 期间获得的，该幅影像质量较好且覆盖本研究区域。并且，成像时间与地面数据的采集时间最为接近，成像时与采样时天气、潮汐等情况变化很小。

遥感数据的预处理主要包括几何校正、辐射校正和大气校正。Sentinel-2A MSI 影像为 L1C 级多光谱数据，L1C 级数据是经过几何校正的正射影像数据，是大气表观反射率产品，并没有进行辐射定标和大气校正。

大气校正的模型方法有很多，包括大气校正简化模型 (SMAC)、6S 模型和 Sen2cor 方法。三种模型都是基于辐射传输理论的基本原理。文中采用欧空局官方提供的 Sentinel-2 卫星影像数据的大气校正方法——Sen2cor^[12]。其主要核心是大气辐射传输模型 libRadtran^[13]。其辐射传输方程可以表示为：

$$\frac{dL}{\beta ds} = -L + J \tag{1}$$

式中： L 为位置 (x, y, z) 的辐亮度； β 为体积消光系数； J 为源函数。其定义为：

$$J = \frac{\omega}{4\pi} \int p(\varphi, \varphi') L d\varphi' + (1 - \omega) B(T) \tag{2}$$

式中： ω 为单次散射反照率； $p(\varphi, \varphi')$ 为从方向 $\varphi' \sim \varphi$ 的相位函数； $B(T)$ 为普朗克函数。当波长小于 400 nm 时，

表 1 Sentinel-2 MSI 的主要技术指标

Tab.1 Main technical indicators of Sentinel-2 MSI

Sentinel-2 band	Wavelength/nm	Resolution/m	Swath width/km	Repeat cycle/d
B1(Coastal aerosol)	433-453	60		
B2 (Blue)	458-523	10		
B3 (Green)	543-578	10		
B4 (Red)	650-680	10		
B5 (Red edge)	698-713	20		
B6 (Red edge)	733-748	20		
B7 (Red edge)	773-793	20	290	5
B8 (NIR)	785-900	10		
B8A(Narrow NIR)	855-875	20		
B9 (Water vapor)	935-955	60		
B10 (SWIR-cirrus)	1 360-1 390	60		
B11 (SWIR-1)	1 565-1 655	20		
B12 (SWIR-2)	2 100-2 280	20		

通常忽略为普朗克常数^[12]。计算以 0.6 nm 的高光谱分辨率进行,并通过滤波对计算的结果数据进行重采样处理。

Sen2cor 主要实现大气上层表观反射率到大气下层地表反射率的转换。Sentinel-2 卫星获取的所有数据都经过有效载荷数据地面站 (Payload Data Ground Segment, PDGS) 处理,其主要实现 Level-0~Level-1C 的处理。有效载荷数据地面站处理过程中的数据产品不会分发给用户,Level-1C 级产品数据是分发给用户的最原始的卫星数据。该研究中应用该数据进行胶州湾透明度的反演,其数据处理流程如图 2 所示。

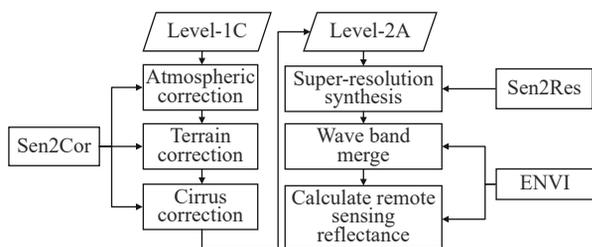


图 2 从 Level-1C 到遥感反射率的处理流程

Fig.2 Processing levels from Level-1C to remote sensing reflectivity

由于 Sentinel-2 卫星数据的各波段空间分辨率不同,无法对 Sen2cor 大气校正后的数据进行直接的处理应用,需将不同空间分辨率的波段数据重采样到相同的空间分辨率后才能做进一步处理。文中采用 Sen2Res 进行波段数据的超分辨重采样处理,将空间分辨率 20 m 和 60 m 的波段数据提升至 10 m。并通过 SNAP 导出 ENVI 能够识别处理的数据格式,利用 ENVI 进行所有波段数据的合成分析处理,得到所有波段数据对应实测采样点位置的遥感反射率数据。

1.4 水体透明度遥感原理

水体中主要包含纯水、无机物、有机物、溶解物、颗粒物和浮游植物等组分,不同水体各组分的含量不同导致太阳辐射在不同水体内的吸收和散射也不相同。这其中纯水、溶解性有机物、悬浮颗粒物和浮游植物对太阳辐射的传输和分布影响最大^[13]。由于纯水对太阳辐射的吸收特性是稳定不变的,因此其他组分含量的差异性决定了传感器接收到的离水辐射的差异性。通过遥感定量监测水质参数的关键即分析一定波谱范围内水体组分含量不同对遥感反射

率所造成的不同影响^[1]。

1.5 透明度遥感反演模型

Sentinel-2 卫星数据包含 13 不同的波段范围数据,如表 1 所示。其中, B10 波段用于大气校正。这里首先对 Sentinel-2 卫星 12 个不同波段的数据与对应实测的透明度数据进行相关性分析,相关性分析结果显示除了用于大气校正的水蒸气波段 (B9) 和短波红外波段 (B11、B12) 外前 9 个波段与透明度的相关系数较高,其中 B3 和 B4 波段相关系数最高分别为 -0.729 和 -0.713。前 9 个波段中, B8 和 B8A 两个近红外波段只是波段范围不同,中心波长相同。

波段比值法是进行水质参数反演的常用方法,将两个波段的反射率进行比值处理有利于校正光照、大气等环境背景对测量结果的影响^[1]。在文中的研究中,为了寻找 Sentinel-2 遥感卫星数据反演透明度的最佳比值波段,对其前 8 个波段数据的比值组合与对应实测的透明度数据进行进一步的相关性分析,分析结果如表 2 所示。

表 2 波段组合与透明度的相关性分析

Tab.2 Correlation analysis between band combination and SDD

	SDD/m		SDD/m		SDD/m
B2/B1	0.019	B6/B2	-0.395	B7/B4	0.460
B3/B1	-0.264	B7/B2	-0.252	B8/B4	0.573
B4/B1	-0.739	B8/B2	-0.268	B6/B5	0.186
B5/B1	-0.621	B4/B3	-0.635	B7/B5	0.420
B6/B1	-0.492	B5/B3	-0.519	B8/B5	0.546
B7/B1	-0.312	B6/B3	-0.285	B7/B6	0.618
B8/B1	-0.346	B7/B3	-0.107	B8/B6	0.526
B3/B2	-0.399	B8/B3	-0.101	B8/B7	0.081
B4/B2	-0.718	B5/B4	0.155	B3×B4	-0.719
B5/B2	-0.584	B6/B4	0.237		

可以看到相关性比较高的波段组合中都包含了 B4 波段,为了获取与透明度实测数据相关性更高的波段组合变量,进而得到更优的反演模型,对表 2 中相关性最高的三个波段组合 B4/B1, B4/B2, B3×B4 做取对数和乘积处理,并将取对数和乘积处理后的结果与透明度实测数据进行相关性分析,分析结果如表 3 所示。

表 3 波段组合的对数与透明度的相关性分析

Tab.3 Correlation analysis between the logarithm of wave band combination and SDD

	log(B4/B1)	log(B4/B2)	log(B3×B4)	log(B4/B1)×log(B4/B2)	log(B4/B1)×log(B4/B2)×log(B3×B4)
SDD/m	-0.756	-0.740	-0.745	0.790	-0.798

表 3 的相关性分析结果显示波段组合 Log(B4/B1)×Log(B4/B2)×Log(B3×B4) 与透明度实测数据的相关性最强, 相关系数为-0.798。基于此, 提出胶州湾水体透明度反演模型:

$$f_{SDD}(x) = -5.838 \times x + 1.101 \quad (3)$$

式中: $f_{SDD}(x)$ 为胶州湾水体的透明度; x 为 Sentinel-2 的 B1、B2、B3、B4 波段组合对数的乘积。 x 可表示为:

$$x = \log(B4/B1) \times \log(B4/B2) \times \log(B3 \times B4) \quad (4)$$

1.6 算法精度评价

文中对胶州湾水体透明度算法研究的精度评价采用平均相对误差 (MRE) 和均方根误差 (RMSE) 两种指标, 两者的表达式如下:

$$R_{MRE} = \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n \frac{|N_i - M_i|}{M_i} \times 100\% \quad (5)$$

$$R_{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (N_i - M_i)^2}{n}} \quad (6)$$

式中: N_i 为透明度的模型反演值; M_i 为透明度的现场实测值; n 表示样本总数。

2 结果与讨论

2.1 透明度反演模型精度分析

构建得到的透明度反演模型决定系数为 0.637, 将通过模型反演得到的透明度反演值与 16 组透明度实测值进行相对误差分析, 得到相对误差结果如图 3 所示。

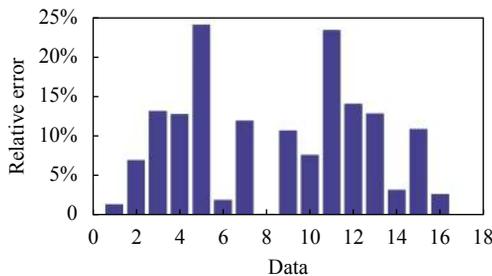


图 3 透明度反演值与实测值的相对误差

Fig.3 Relative error between the SDD estimated and the measured

16 组数据的平均相对误差为 9.86%, 均方根误差为 0.22 m。同时, 由图 4 可以看出, 通过反演模型计算得到的水体透明度与实测透明度比较均匀的分布在 1:1 线的两侧, 表明该模型可用来反演胶州湾海域该时间段内的水体透明度, 反演结果具有较高的精度。

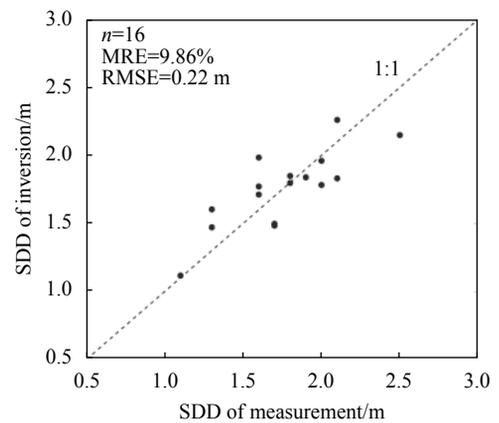


图 4 透明度反演值与实测值的对比

Fig.4 Comparison of SDD estimated value and measured value

2.2 透明度变化趋势分析

利用遥感图像处理软件 ENVI 5.5, 将建立的透明度反演模型应用于 2016 年 11 月 3 日的 Sentinel-2 卫星影像上, 得到胶州湾水体透明度的反演值, 通过 Matlab 进行水体透明度的处理显示, 反演的透明度结果如图 5 所示。

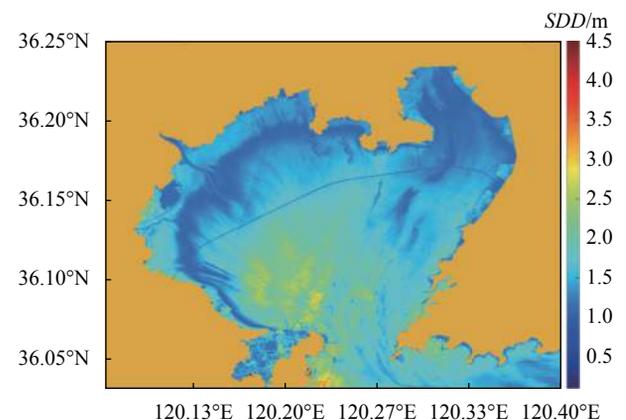


图 5 2016 年 11 月 3 日胶州湾透明度分布

Fig.5 Distribution of SDD in Jiaozhou Bay on November 3, 2016

Sentinel-2 卫星影像成像时间为 2016 年 11 月 3 日上午 10:46:17, 当日潮汐情况为: 00:48 和 13:03 潮汐高度达到最低值分别为 98 cm 和 56 cm, 5:52 和 18:32 潮汐高度达到最高值分别为 401 cm 和 402 cm。潮汐信息显示成像时退潮已经开始了 4 h 54 min, 距离潮位到达最低 56 cm 时间仅剩 2 h 17 min, 可以判定成像时整个胶州湾海域的潮位偏低, 导致研究区北部和西北部区域海水较浅的地方没有海水覆盖, 因此反演获得的该区域的透明度数据是无效的。从反演结果图中也可以看出, 北部和西北部靠近岸边区域出现了小范围的透明度升高的情况。

忽略靠近岸边的小范围无效数据的影响, 可以看出反演的胶州湾透明度整体变化趋势呈现离岸越近透明度越低, 越远离岸边透明度越高的趋势。如图 6 所示, 反演结果图中透明度变化的纹理方向呈现着与岸边相垂直的走向, 尤其是在西北部海域极为明显, 这也与该海域海水深度较浅, 退潮所引起的水中悬浮泥沙含量变化相吻合。胶州湾海域所有的汇入河流中, 明显可以看出流量最大的大沽河对海水透明度所造成的影响, 汇入河流携带的大量泥沙会造成海水透明度的下降, 从反演结果中也可以看出, 大沽河入海口出海水透明度明显偏小。由于卫星影像成像季节为冬季, 河流径流量偏低, 除大沽河外其他河流的径流量很小, 对胶州湾透明度造成的影响也很小。

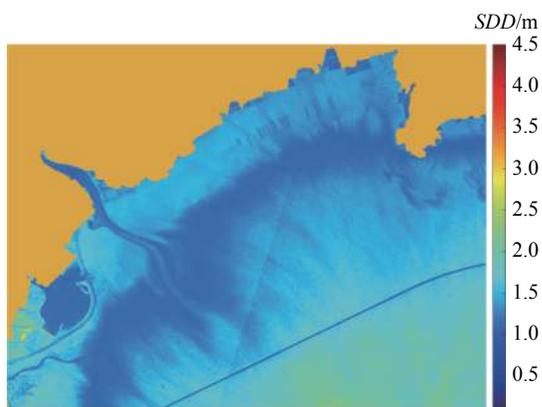


图 6 潮汐引起的胶州湾透明度变化

Fig.6 Changes of SDD in Jiaozhou Bay caused by tides

从反演结果可以看出, 透明度分布图中有很多短线条状的透明度明显变小的变化, 尤其是在靠近胶州湾湾口处, 如图 7 所示。结合 2016 年 11 月 2 日现场采样时观察到的情况, 分析其主要原因是由于大型

船舶通航引起的。胶州湾内港口众多, 且有很大的青岛港位于湾内, 很多大型货轮、远洋货轮都会通过胶州湾湾口进出胶州湾, 这些大型货轮航行过程中, 会造成航线上透明度降低的短时变化, 尤其是在水深较浅的海域。

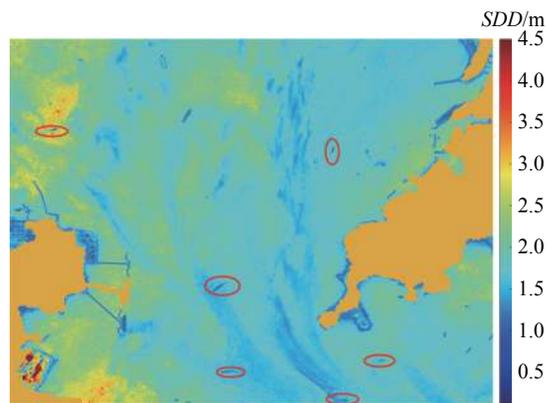


图 7 大型船只通航引起的胶州湾透明度变化

Fig.7 Changes of SDD in Jiaozhou Bay caused by ships

3 结 论

该研究基于 Sentinel-2 卫星遥感数据和现场实测数据进行了胶州湾海域海水透明度反演模型研究, 构建了胶州湾海域海水的透明度反演模型, 并依据此模型对胶州湾海域水体透明度进行遥感估测。

(1) Sentinel-2 卫星数据中 B3、B4 波段与透明度的相关性最强, 对各波段数据进行组合分析得到了相关系数高达-0.798 的 B1、B2、B3、B4 波段的组合表达;

(2) 反演模型获得了较高的反演精度, 反演得到的透明度与实测透明度之间平均相对误差为均 9.86%, 均方根误差为 0.22 m;

(3) 通过反演模型对 Sentinel-2 卫星数据进行反演分析, 分析得到: 胶州湾海域透明度整体呈现近岸低, 外海高的分布; 海水涨退潮会引起透明度形成沿涨退潮趋势流向变化的纹理特征; 大型船舶货轮的通航会造成航线上透明度的短时变小情况。

参考文献:

[1] Lee Z P, Shang S L, Hu C M, et al. Secchi disk depth: A new theory and mechanistic model for underwater visibility [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 169: 139-149.

- [2] Dang Y Y, Wang X. Application of CPU-GPU heterogeneous system in optical remote sensing image processing [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(S1): 20200092. (in Chinese)
- [3] Yin Z Y, Jiang T, Yang G P, et al. The spatial-temporal variation of water clarity and its influencing factors in Jiaozhou Bay from 1986 to 2017 [J]. *Marine Sciences*, 2020, 44(4): 21-32. (in Chinese)
- [4] Zhao W J, Cao W X, Hu S B, et al. Comparison of diffuse attenuation coefficient of downwelling irradiance products derived from MODIS-Aqua in the South China Sea [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(1): 14-24. (in Chinese)
- [5] He S L, Chen X, Li S, et al. Small hyperspectral imagers and lidars and their marine applications [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(2): 202002003. (in Chinese)
- [6] Doron M, Babin M, Hembise O, et al. Ocean transparency from space: Validation of algorithms estimating Secchi depth using MERIS, MODIS and SeaWiFS data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115(12): 2986-3001.
- [7] Liu C, Zhu L P, Li J S, et al. The increasing water clarity of Tibetan Lakes over last 20 years according to MODIS data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2021, 253: 112199.
- [8] Arias-Rodriguez L F, Duan Z, Sepúlveda R, et al. Monitoring water quality of valle de bravo reservoir, mexico, using entire lifespan of MERIS data and machine learning approaches [J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(10): 1586.
- [9] Zhang Y B, Zhang Y L, Shi K, et al. Remote sensing estimation of water clarity for various lakes in China [J]. *Water Research*, 2021, 192(4): 116844.
- [10] Zeng S, Lei S H, Li Y M, et al. Retrieval of secchi disk depth in turbid lakes from GOCI based on a new semi-analytical algorithm [J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(9): 1516.
- [11] Ma L J, Yang X G, Qi Y L, et al. Oceanic area change and contributing factor of Jiaozhou Bay [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2014, 34(3): 365-369. (in Chinese)
- [12] Su W, Zhang M Z, Jiang K P, et al. Atmospheric correction method for Sentinel-2 satellite imagery [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(1): 322-331. (in Chinese)
- [13] Feng S Y, Zhang N, Shen J, et al. Method of cloud detection with hyperspectral remote sensing image based on the reflective characteristic [J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(2): 198-204. (in Chinese)