

# 基于 NPP-VIIRS 卫星数据的渤海黄海水体浊度反演算法研究

丁梦娇, 丘仲锋\*, 张海龙, 李兆鑫, 毛颖

南京信息工程大学海洋科学学院, 江苏 南京 210044

**摘要** 浊度是水环境和水质状况的重要监测指标。卫星遥感技术具有宏观的空间覆盖性和重复的定期采样性, 是一种有效的监测水体浊度的方法。基于 NPP-VIIRS 卫星的遥感反射率, 建立了一个适用于渤海黄海水体浊度遥感反演算法, 并将其应用到 VIIRS 卫星图像上, 研究了渤海黄海水体浊度的时空分布特征。结果表明: 该算法具有较高的反演精度(决定系数  $R^2$  为 0.97, 均方根误差为 16 NTU, 平均绝对误差为 23 NTU, 平均相对误差为 34.63%)。渤海黄海水体浊度在空间尺度上基本呈现近岸高、远岸低的分布特征; 在时间尺度上, 冬季浊度维持在一个较高的水平, 春季浊度高值区逐渐收缩, 夏季达到最低, 只在沿岸区域仍有较高的浊度, 而秋季浊度又逐渐升高。

**关键词** 大气光学; VIIRS 卫星; 浊度; 渤海; 遥感卫星

中图分类号 P733.3

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.0601002

## Inversion Algorithm for Turbidity of Bohai and Yellow Seas Based on NPP-VIIRS Satellite Data

Ding Mengjiao, Qiu Zhongfeng\*, Zhang Hailong, Li Zhaoxin, Mao Ying

School of Marine Sciences, Nanjing University of Information Science & Technology,  
Nanjing, Jiangsu 210044, China

**Abstract** Turbidity is an important indicator for monitoring water environment and water quality, and the satellite remote sensing technology has the advantages of macroscopic spatial coverage and repeated sampling, which is an effective way of monitoring water turbidity. Based on the remote sensing reflectivity of NPP-VIIRS satellite, a water turbidity remote sensing inversion algorithm is developed and applied to the VIIRS satellite data to obtain a long-time series of satellite-derived water turbidity in the Bohai and Yellow seas. The results indicate that the proposed algorithm has a high accuracy with the  $R^2$  of 0.97, the root mean square error of 16 NTU, the mean absolute deviation of 23 NTU, and the mean relative error of 34.63%. On a spatial scale, the turbidity distributions are generally high in the near-shore areas and low in the offshore areas. In contrast in the time scale, the water turbidity is at a high level in winter, but the regions with high turbidity shrink in spring. The turbidity is generally at the lowest level in summer and only the coastal waters show high turbidity values. In autumn, the turbidity gradually increases.

**Key words** atmospheric optics; VIIRS satellite; turbidity; Bohai and Yellow seas; remote sensing satellite

**OCIS codes** 010.0280; 010.4450; 010.7340

## 1 引 言

浊度( $T$ )反映了光线在透过水层时受到的阻碍程度,海水浊度是指均匀分布于海水中的可溶性微小颗粒物或可溶性有机与无机化合物等对入射光线的散射、吸收导致光线的衰减程度,是表征海水光学

现象的物理特征指标<sup>[1]</sup>。浊度不仅与悬浮物的浓度有关,还与水体组分、颗粒大小、形状及其表面的反射性能有关。浊度会引起水体温度垂直结构的改变,对初级生产力有重要的影响,同时在对海洋生态和生物化学过程、水动力环境与物质运输的研究中起重要作用<sup>[2-4]</sup>。此外,浊度还通常用作其他光学参

收稿日期: 2018-12-18; 修回日期: 2019-01-24; 录用日期: 2019-03-04

基金项目: 国家自然科学基金(41506200, 41576172)

\* E-mail: zhongfeng.qiu@nuist.edu.cn

量的指示参数,如总悬浮颗粒物(TSP)或下行辐照度的漫反射衰减系数( $K_d$ )<sup>[5]</sup>。目前,浊度已经是许多国家和地区定期测量的水质环境监测指标,2008年被提议作为欧盟海洋战略框架指令评估生态系统功能的监测参数之一<sup>[6-7]</sup>。研究者通常采用美国环境保护署(EUSEPA)提出的比浊度法来测量水体浊度(单位为 NTU),用其表示在与入射光成 90°角的方向上测量的散射光强度。传统研究中,浊度观测网通常基于沿海平台,而这种站点式观测获取的数据较少,无法满足足够的空间代表性和覆盖率<sup>[8-9]</sup>。相比而言,卫星遥感技术具有时间长、范围大等监测优势,为监测浊度的动态变化提供了较理想的手段<sup>[10]</sup>。

目前,浊度的遥感反演已有较成熟的发展,涉及多种卫星传感器,如 Landsat5-TM (Thematic Mapper)、SPOT (Système Probatoire d'Observation de la Terre)、MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)、MERIS (Medium Resolution Imaging Spectrometer) 和 GOCI (Geostationary Ocean Color Imager) 等。Goodin 等<sup>[11]</sup>采用 Landsat5-TM 数据和法国 SPOT 传感器的红光波段数据来估测美国 Tuttel Creek Reservoir 水体的浊度和西班牙 Guadalquivir 河的水体浊度<sup>[12]</sup>。王建国等<sup>[13]</sup>利用 MODIS 数据,建立了基于红绿波段比值的反演算法(QAA-RGR),并进行了验证,还利用该算法分析了渤海水体浊度的季节分布特征。基于 MERIS 卫星传感器,Joshi 等<sup>[14]</sup>用蓝绿光波段比值建立的线性模型来反演 Alqueva Reservoir 的水体浊度。Qiu 等<sup>[15]</sup>利用 GOCI 卫星传感器瑞利散射校正后的反射率数据反演得到中国近海水体浊度数据,该研究为水体浊度的反演提供了一种新方法。

2011年,美国国家航空航天局(NASA)、美国国家海洋和大气管理局(NOAA)和美国空军共同发射了 NPP(NPOESS Preparatory Project)卫星,该卫星携带了可见光红外成像仪(VIIRS)传感器<sup>[16]</sup>。VIIRS 的质量约为 275 kg,每 4 h 经过赤道一次,星下点空间分辨率为 400 m,扫描带边缘空间分辨率约为 800 m。该仪器有 22 个光谱通道,其中心波长覆盖 412 ~ 12050 nm。VIIRS 传感器可收集陆地、大气、冰层和海洋在可见光及红外波段的辐射图像,VIIRS 是中分辨率成像光谱仪 MODIS 系列的拓展和改进<sup>[17]</sup>。相关研究表明,MODIS 等卫星传感器的在轨运行时间较长,导致部分数据质量

有所降低<sup>[18-19]</sup>。相比而言,NPP-VIIRS 卫星传感器作为新型环境监测卫星,在轨运行时间较短,影像数据质量较高,其时空分辨率与 MODIS 相近<sup>[20-21]</sup>,这为黄海浊度监测提供了新型数据源。NPP-VIIRS 卫星传感器也可用来开展不同传感器影像协同应用,从而提高对黄海水体浊度的精确监测。然而,目前基于 NPP-VIIRS 数据的水体浊度监测研究鲜有报道。此前,国内外学者针对 MODIS、GOCI 等卫星数据提出了浊度反演算法,该算法是否能成功移植到 VIIRS 卫星还有待研究。

针对以上问题,本文以渤海为研究区域,结合 VIIRS 卫星遥感反射率( $R_{rs}$ )数据和实测浊度数据,分别构建了单波段形式和多波段组合形式的遥感反演算法,从而确定适用于渤海的水体浊度遥感反演算法,并对渤海水体浊度进行时空变化分析,旨在为渤海区域水体浊度的遥感反演提供新的方法和思路,并为后续研究海洋生物化学过程提供重要的数据支持。

## 2 研究区概况和研究数据

### 2.1 研究区概述

本研究区域为渤海和黄海。渤海属于中国近海,是典型的海洋二类水体<sup>[22]</sup>。渤海由于其特殊的地理位置,拥有丰富的生物与矿产资源,其典型的地质沉积环境对民众生活也有深远影响,因此一直是学者们的研究重点。每年都会有长江、黄河等河流的水体注入海里并且携带大量泥沙和沉积物,使得大量的泥沙和其他颗粒物堆积在海床上,对海水变化产生影响<sup>[23-25]</sup>。

### 2.2 实测数据的获取

本研究采用的浊度数据由两大部分组成,分别为航次观测和浮标观测数据。

1) 航次观测数据。该数据为海鸟科学公司提供的环境表征光学(ECO)系列的原位荧光计和后向散射仪器测量海洋数据,包括水温参数、光学参数(如  $R_{rs}$ )、后向散射系数和环境参数(如浊度)。在渤海进行 5 次巡航,其航次时间分别为 2015 年夏季,2016 年夏季和冬季,以及 2018 年春季和夏季,共收集到 400 个站点的浊度数据。具体航次站位如图 1 中黑点所示。

2) 浮标观测数据。该数据由放置在江苏近岸附近的浮标测得。每个浮标上安装一台 YSI EXO2 (型号 EX02, YSI, 美国)多参数探头,测定浊度、温度、pH 值、溶解氧等。本研究收集了 2013 年全年

江苏近岸 3 个浮标站点的浊度观测数据,采样频率为 15 min。浮标所在的位置如图 1 中的三角符号所示。

图 2 分别展示了浮标和航次观测的浊度数据统计情况,其中  $R_{\text{Min}}$  表示最小值,  $R_{\text{Max}}$  表示最大值,  $R_{\text{Mean}}$  表示平均值,  $R_{\text{SD}}$  表示标准差,  $R_{\text{CV}}$  表示变异系

数,  $N$  表示个数。从图 2 中可以看出,浮标和航次的水体浊度统计直方图都呈现出对数正态分布的特点。浮标测量的水体浊度主要在 10~500 NTU 范围内,这是由于浮标所在的苏北浅滩常年由高浑浊水体控制;而航次观测的渤海海水体浊度变化较小,在 0.01~100 NTU 范围内。

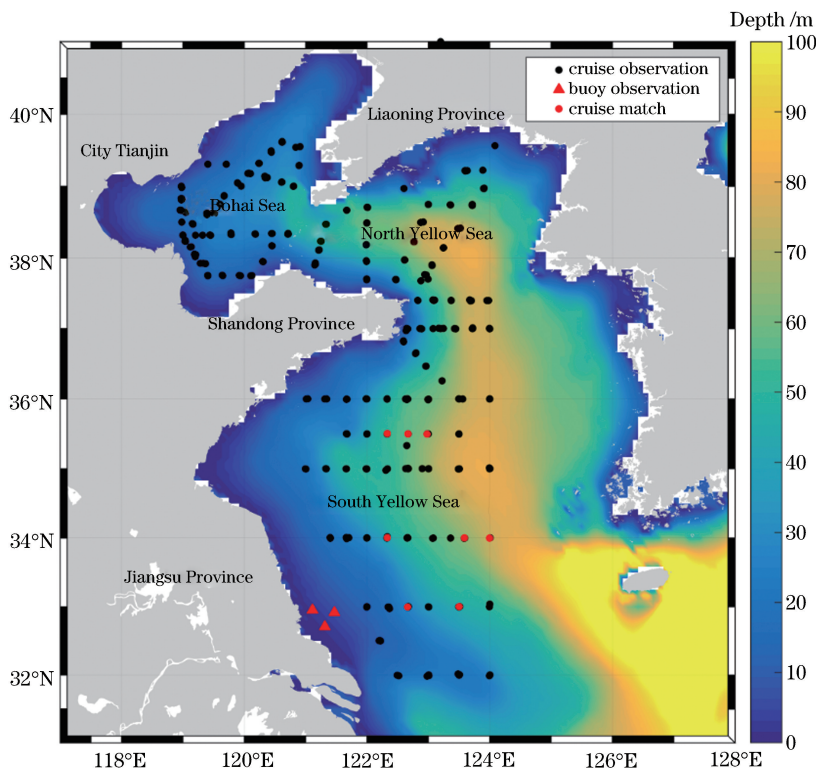


图 1 研究区域及浮标、航次调查站位图

Fig. 1 Study area, location of buoy, and sampling stations of different cruises

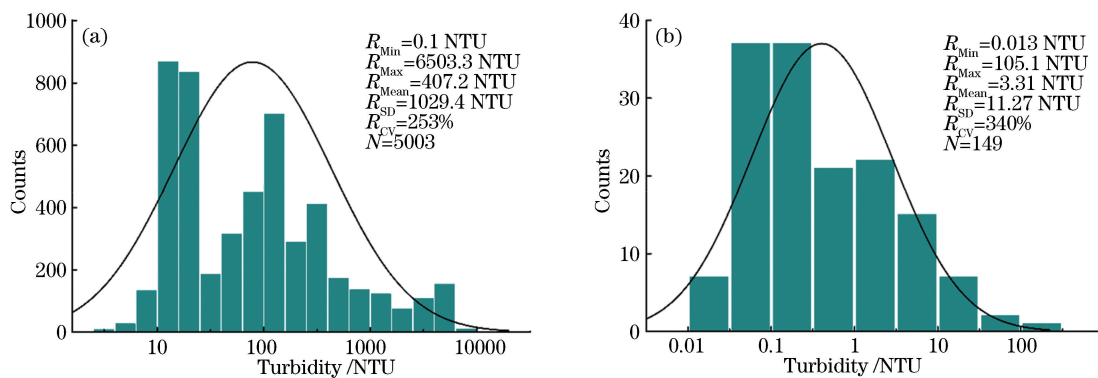


图 2 基于(a)浮标和(b)航次观测的水体浊度统计结果

Fig. 2 Turbidity statistics of water bodies based on (a) buoy and (b) cruise observation

### 2.3 VIIRS 卫星数据与预处理

将 VIIRS 的 L2 级数据下载于 NASA 水色官网 (<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/cgi/browse.pl>)。本研究选用 5 个 L2 级数据波段 (410, 443, 486, 551, 671 nm) 的遥感反射率、叶绿素浓度和衰

减系数  $K_d$  等。VIIRS 的大气校正产品采用 SeaDAS v7.1 (SeaWiFS Data Analysis System) 进行处理,校正了常见气体对辐射的吸收以及耀斑和海面白帽的辐射信号等,之后利用近红外波段迭代算法获取各个波段的遥感反射率<sup>[16,26]</sup>。同时,在

NASA 水色官网 (<https://oceandata.sci.gsfc.nasa.gov/VIIRS-SNPP/Mapped/Monthly/4km/>) 下载 NPP-VIIRS 的月平均遥感反射率数据,用于分析渤海海域水体浊度的时空变化。

在建立实测数据与卫星数据的匹配时,鉴于渤海在时空尺度上高度变化的特点,本研究采用更为严格的匹配方法,具体规则如下:航次数据时间窗口(卫星过境时间与现场测量时间间隔)限定在±6 h内,而浮标数据时间窗口设定为±1 h;空间窗口为现场测量位置周围至少60%以上像素为有效值的3×3像素空间内,中心经纬度距现场测量位置经纬度最近像元点的值。最后,取上述时间和空间条件下的所有有效像元均值作为卫星观测值。根据上述规则,星地匹配数据集共41个,其中航次数据10个,浮标数据31个,站点分布如图1中红色圆点所示。

### 2.4 模型评价指标

为了评估模型的效果,采用常用于验证海洋算法的线性回归方式对模型的实测浊度与反演浊度进行比较;采用决定系数( $R^2$ )、均方根误差( $S_{RMSE}$ )、平均绝对误差( $S_{MAE}$ )和平均相对误差( $S_{MRE}$ )对模型进行精度评估。所用4个统计指标可分别表示为

$$R^2 = \frac{\left[ \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) \right]^2}{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}, \quad (1)$$

$$S_{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - y_i)^2}, \quad (2)$$

$$S_{MAE} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |x_i - y_i|, \quad (3)$$

$$S_{MRE} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{x_i - y_i}{y_i} \right| \times 100\%, \quad (4)$$

式中: $x_i$ 和 $y_i$ 分别表示第 $i$ 个样品的反演浊度和实测浊度; $\bar{x}$ 和 $\bar{y}$ 分别表示反演浊度和实测浊度的平均值; $N$ 表示总样本数。

## 3 浊度反演算法

本研究使用的建模数据是星地匹配的卫星遥感反射率数据和相对应的实测浊度数据。

### 3.1 敏感波段的选择

为了检测浊度( $T$ )与VIIRS的 $R_{rs}$ 光谱的相关性,设计了相关性实验(图3),分析 $R_{rs}$ 与 $T$ 、 $\lg R_{rs}$ 与 $T$ 、 $R_{rs}$ 与 $\lg T$ 以及 $\lg R_{rs}$ 与 $\lg T$ 不同组合形式的相关关系。结果表明: $\lg R_{rs}$ 与 $\lg T$ 的相关系数在各个波段都比其他几种形式高,高达0.99(在486 nm波段)。

因此后续建模过程采用经过 $\lg$ 处理的 $R_{rs}$ 和 $T$ 数据。

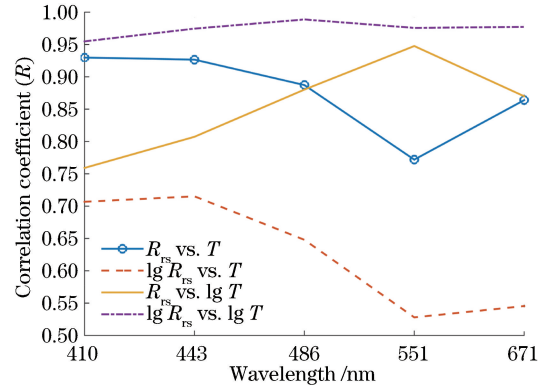


图3 不同形式下 $R_{rs}$ 与浊度相关系数随波段的变化图  
Fig. 3 Correlation coefficient between  $R_{rs}$  under different forms and  $T$  versus wavelength

### 3.2 浊度遥感反演算法的建立

在以往水体组分的遥感研究中,研究人员通常会将单波段、波段比以及波段组合应用于半经验或者经验算法中<sup>[27]</sup>。鉴于此,本研究对采用不同波段组合(如表1所示,其中 $X1 \sim X6$ 分别代表6种不同的波段组合, $\lambda_j$ 表示VIIRS的第 $j$ 个波段)的 $\lg R_{rs}$ 数据与 $\lg T$ 进行相关性分析。研究发现, $\lg T$ 与单波段 $\lg R_{rs}(\lambda_3)$ 、双波段组合 $\frac{\lg R_{rs}(\lambda_2) + \lg R_{rs}(\lambda_3)}{\lg R_{rs}(\lambda_2) / \lg R_{rs}(\lambda_3)}$ 的相关性最为理想,相关系数都达到0.988。因此,使用这两种组合(为便于区分和描述,分别命名为 $X1$ 和 $X2$ )分别建模,进而选择最优反演算法的组合形式。

为确定反演算法的函数形式,分别画出 $X1$ 和 $X2$ 模型的散点图。图4和图5分别为 $\lg T$ 与单波段 $\lg R_{rs}(\lambda_3)$ 、双波段组合 $\frac{\lg R_{rs}(\lambda_2) + \lg R_{rs}(\lambda_3)}{\lg R_{rs}(\lambda_2) / \lg R_{rs}(\lambda_3)}$ 的模型散点图。从图4和图5中可以看出,两者的关系可基本确定为线性。故建模的函数形式为

$$T = 10^{(aX+b)}, \quad (5)$$

式中: $X$ 为VIIRS的 $R_{rs}$ 波段组合; $a$ 和 $b$ 为模型参数,可通过拟合得到。

本研究将41个高精度的星地匹配样本数据随机分成两个数据集:模型校准数据集( $N=32$ ,所有星地匹配数据的80%)和独立验证数据集( $N=9$ ,所有星地匹配数据的20%)。图4(a)和图5(a)分别显示了使用 $X1$ 和 $X2$ 建模的模型算法估计浊度与实测浊度之间的散点图,同时表2汇总了相应的模型参数和误差评价指标。由图4(a)和图5(a)可得:采用 $X1$ 建模比采用 $X2$ 建模的精度更高;其决定系



数  $R^2$  分别为 0.974 和 0.971, 均方根误差  $S_{RMSE}$  分别为 23 NTU 和 17 NTU, 平均相对误差  $S_{MRE}$  分别为 16 NTU 和 9.4 NTU, 平均绝对误差  $S_{MAE}$  分别为 34.63% 和 37.93%。

表 1  $\lg T$  与  $\lg R_{rs}$  不同波段组合之间的相关系数比较

Table 1 Comparison of correlation coefficients between  $\lg T$  and  $\lg R_{rs}$  under different band combinations

X	General form	Best band combination	$R^2$
X1	$\lg R_{rs}(\lambda_3)$	$\lambda_3 = 486 \text{ nm}$	0.988
X2	$\frac{\lg R_{rs}(\lambda_2) + \lg R_{rs}(\lambda_3)}{\lg R_{rs}(\lambda_2) / \lg R_{rs}(\lambda_3)}$	$\lambda_2 = 443 \text{ nm}, \lambda_3 = 486 \text{ nm}$	0.988
X3	$\lg R_{rs}(\lambda_4) - \lg R_{rs}(\lambda_5)$	$\lambda_4 = 551 \text{ nm}, \lambda_5 = 671 \text{ nm}$	0.902
X4	$\lg R_{rs}(\lambda_4) / \lg R_{rs}(\lambda_5)$	$\lambda_4 = 551 \text{ nm}, \lambda_5 = 671 \text{ nm}$	0.729
X5	$\frac{\lg R_{rs}(\lambda_3) - \lg R_{rs}(\lambda_5)}{\lg R_{rs}(\lambda_3) + \lg R_{rs}(\lambda_5)}$	$\lambda_3 = 486 \text{ nm}, \lambda_5 = 671 \text{ nm}$	0.729
X6	$\frac{\lg R_{rs}(\lambda_4) - \lg R_{rs}(\lambda_5)}{\lg R_{rs}(\lambda_4) / \lg R_{rs}(\lambda_5)}$	$\lambda_4 = 551 \text{ nm}, \lambda_5 = 671 \text{ nm}$	0.934

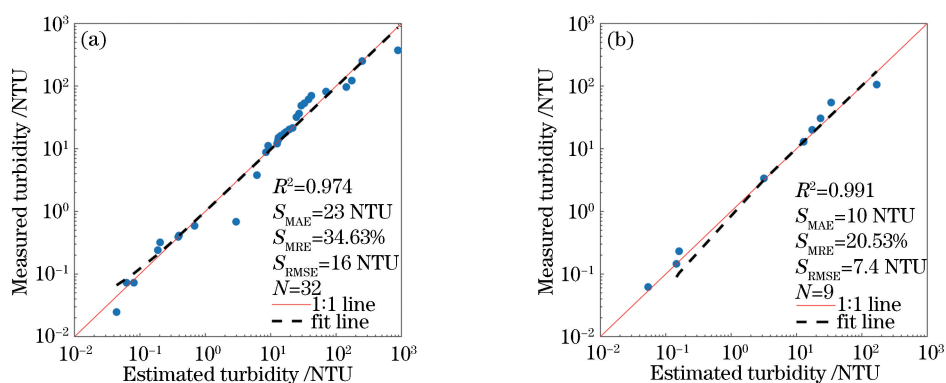


图 4 浊度与 X1 建模的结果(蓝色点为实测数据与卫星数据的匹配数据集)。(a)模型校准;(b)模型验证  
Fig. 4 Turbidity and result of inversion model developed using X1 (blue dots are matching dataset of measured data and satellite data). (a) Model calibration; (b) model validation

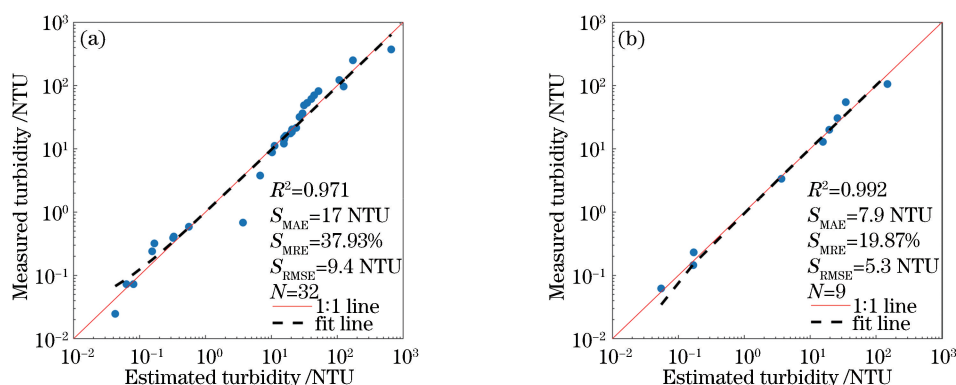


图 5 浊度与 X2 的建模结果(蓝色点为实测数据与卫星数据的匹配数据集)。(a)模型校准;(b)模型验证  
Fig. 5 Turbidity and result of inversion model developed using X2 (blue dots are matching dataset of measured data and satellite data). (a) Model calibration; (b) model validation

表 2 浊度反演模型的系数以及精度评价参数统计

Table 2 Statistics of coefficients of turbidity inversion model and its accuracy evaluation parameters

Independent variable	Coefficient of model		N	$R^2$	$S_{RMSE}/\text{NTU}$	$S_{MAE}/\text{NTU}$	$S_{MRE}/\%$
	a	b					
X1	3.436	8.024	32	0.974	16.0	23	34.63
X2	1.684	7.784	32	0.971	9.4	17	37.93

### 3.3 模型的精度评价和敏感性分析

利用独立数据集 ( $N=9$ ) 进行模型的精度评估, 结果如图 4(b) 和图 5(b) 所示。单波段  $\lg R_{rs}(\lambda_3)$  和双波段  $\frac{\lg R_{rs}(\lambda_2) + \lg R_{rs}(\lambda_3)}{\lg R_{rs}(\lambda_2) / \lg R_{rs}(\lambda_3)}$  模型的决定系数  $R^2$  分别为 0.991 和 0.992, 均方根误差  $S_{RMSE}$  分别为 7.4 NTU 和 5.3 NTU, 平均绝对误差  $S_{MAE}$  分别为 10 NTU 和 7.9 NTU, 平均相对误差  $S_{MRE}$  分别为 20.53% 和 19.87%。研究区域的浊度  $T$  与遥感反射率  $R_{rs}$  之间更加趋向于满足指数函数的关系, 且  $R_{rs}$  的对数与  $T$  的对数满足较好的线性关系。X1 模型只用了单波段信息, 而 X2 模型使用了双波段组合形式。双波段覆盖蓝光波段, 但大气校正在该波段处不太准确, 可能出现负数现象<sup>[15]</sup>; 此外, 单波段模型效果比多波段组合的模拟效果好。

由于卫星观测的  $R_{rs}$  数据存在一定的不确定

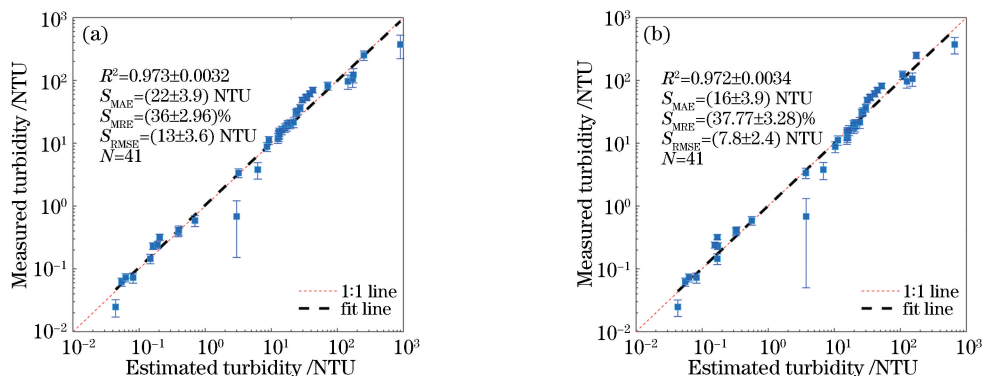


图 6 在 443 nm 和 486 nm 的  $R_{rs}$  中引入  $\pm 5\%$  的模拟随机误差后, 不同模型估计的浊度值与实测值的散点图 (蓝色点为实测数据与卫星数据的匹配数据集)。(a) X1 模型; (b) X2 模型

Fig. 6 Scatter plots of measured and estimated turbidity obtained by different models after adding  $\pm 5\%$  random errors to  $R_{rs}$  at 443 nm and 486 nm (blue dots are matching dataset of measured data and satellite data). (a) X1 model; (b) X2 model

综上分析, 本研究采用 X1 单波段进行建模, 即建立模型的表示式为

$$T = 10^{[3.44 \lg R_{rs}(\lambda_3) + 8.02]} \quad (6)$$

该模型精度较高, 说明基于 VIIRS 遥感数据可以反演得到较理想的渤海海域的浊度遥感数据。

## 4 渤海浊度时空变化分析

通过上文分析可得, 基于 VIIRS 卫星遥感反射率构建的算法能够较好地反演渤海水体浊度。为了分析渤海浊度的分布特点, 收集了 2012—2018 年 VIIRS 卫星月平均遥感反射率数据, 并采用构建的单波段浊度反演模型得到 2012—2018 年渤海浊度月产品数据; 在此基础上, 采用均值合成法得到多年的季节平均图和月平均图。

性, 为验证模型在实际情况下的稳定性, 本研究利用星地匹配的所有数据对模型进行了敏感性分析。首先对模型的输入数据进行处理, 即在 443 nm 和 486 nm 波段的  $R_{rs}$  数据中引入  $\pm 5\%$  的误差, 这组随机误差服从均值为 0、标准差为 5% 的正态分布。然后对带有模拟误差的波段数据输入模型进行反演, 重复该过程 1000 次, 以生成近似正态分布的随机误差, 最终得到单波段和双波段模型在模拟误差影响下各自评价参数的波动情况。图 6(a)、(b) 分别为引入模拟误差后单波段和双波段模型预测值与实测值的散点图, 展示了 1000 次模拟过程中的平均预测值及偏差情况。可以发现, 图 6(a)、(b) 的平均相对误差波动分别为 2.96% 和 3.28%, 波动程度较小, 均小于 5%, 因此本模型对输入端的误差敏感性不大, 模型较稳定; 且 X1 模型相对于 X2 模型更稳定。

### 4.1 月际变化

图 7 为使用构建模型反演得到的 2012—2018 年渤海水体浊度的月平均分布。从时间分布上来看, 渤海的整体变化为从 9 月到 12 月水体浊度逐渐增大; 1 月到 3 月基本保持稳定; 4 月到 6 月逐渐减小; 7 月和 8 月则保持稳定。从渤海水体浊度的空间分布来看, 浊度的基本分布形态与海水等深线有一定的关联, 大致表现为: 海水深度越深, 浊度越低; 海水深度越浅, 浊度越高, 而且浊度从近岸到远岸有一定的落差。渤海浊度高值区主要分布在黄河河口、渤海湾、辽东湾湾底和辽东浅滩海域, 而渤海海峡和渤海中部浊度较低; 黄海浊度高值区集中在江苏近岸, 尤其是苏北浅滩地区浊度最高。值得注意的是, 图 7 中数据缺失部分 (白色区域) 是由于

VIIRS 的  $R_{rs}$  数据在高浑浊水体下的大气校正失效导致的。

### 4.2 季节变化

图 8 为 2012—2018 年渤海水体浊度的多年

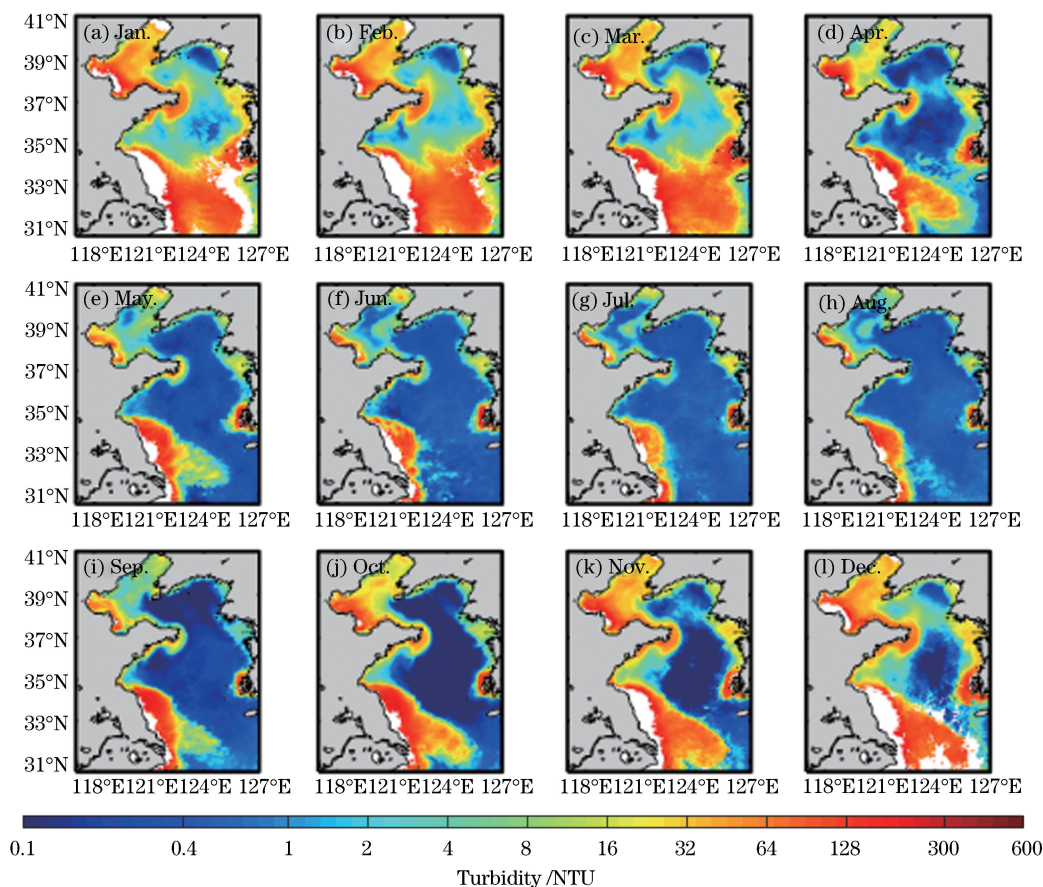


图 7 渤海水体浊度的多年(2012—2018 年)月平均分布图

Fig. 7 Monthly average distributions of water turbidity in Bohai and Yellow seas (2012—2018)

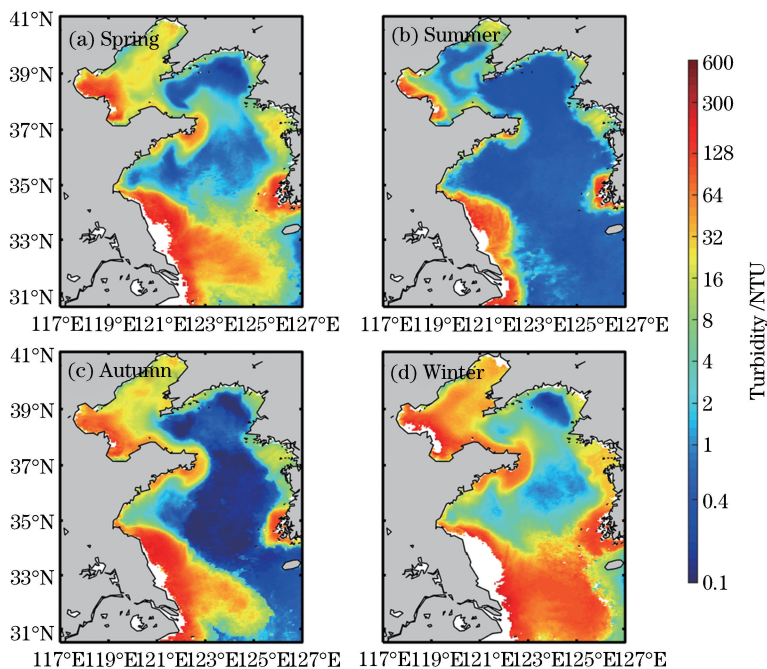


图 8 渤海水体浊度的多年(2012—2018 年)季节平均分布图

Fig. 8 Seasonal average distributions of water turbidity in Bohai and Yellow seas (2012—2018)

季节分布。总体上来看,渤海海水体浊度分布基本呈现近岸高、远岸低,冬季高、夏季低的分布特征。在季节尺度上,冬季水体浊度维持在一个较高的水平,春季浊度高值区逐渐收缩,于夏季达到最低,在沿岸区域仍有较高的浊度,秋季浊度又逐渐升高。

## 5 结 论

以渤海为研究区域,采用浮标和航次现场实测数据,与卫星进行高时空同步匹配,利用遥感反射率,建立了一个基于 VIIRS 卫星的渤海海水体浊度的单波段遥感反演算法,并对算法进行了精度验证,最后利用该算法对渤海海水体浊度进行时空分布分析,发现该区域在空间尺度和时间尺度上均呈现非均质性。渤海海水体浊度基本呈现近岸高、远岸低,冬季高、夏季低的分布特征。冬季浊度高值区域主要位于苏北浅滩、长江口海域、渤海以及朝鲜半岛西侧,夏季浊度高值区域主要位于渤海沿岸、苏北浅滩、长江河口和朝鲜西侧,范围远小于冬季。

## 参 考 文 献

- [1] Wang Y Z, Ju X, Qiao L L, *et al.* Water turbidity in the northern Yellow Sea in summer and winter[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2014, 45(5): 928-937.  
王勇智,鞠霞,乔璐璐,等.夏冬季北黄海水体浊度分布特征研究[J].*海洋与湖沼*, 2014, 45(5): 928-937.
- [2] Friedl G, Wüest A. Disrupting biogeochemical cycles-consequences of damming[J]. *Aquatic Sciences*, 2002, 64(1): 55-65.
- [3] Ren Y Q, Wang S Z. A seawater turbidity sensor [J]. *Ocean Technology*, 2004, 23(4): 29-31.  
任永琴,王世忠.海水浊度测量传感器研究[J].*海洋技术*, 2004, 23(4): 29-31.
- [4] Nechad B, Ruddick K G, Neukermans G. Calibration and validation of a generic multisensor algorithm for mapping of turbidity in coastal waters[J]. *Proceedings of SPIE*, 2009, 7473: 74730H.
- [5] Shi W, Wang M H. Characterization of global ocean turbidity from Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer ocean color observations[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2010, 115(C11): C11022.
- [6] Juda L. The European union and the marine strategy framework directive: continuing the development of European ocean use management[J]. *Ocean Development & International Law*, 2010, 41(1): 34-54.
- [7] Pyhälä M. HELCOM Baltic Sea action plan: an ecosystem approach to the management of human activities [M]//Brander K, MacKenzie B, Omstedt A. *Climate Impacts on the Baltic Sea: From Science to Policy*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2012: 45-69.
- [8] Constantin S, Constantinescu Ş, Doxaran D. Long-term analysis of turbidity patterns in Danube Delta coastal area based on MODIS satellite data [J]. *Journal of Marine Systems*, 2017, 170: 10-21.
- [9] Caballero I, Navarro G. Application of extended full resolution MERIS imagery to assist coastal management of the area adjacent to the Guadalquivir estuary[J]. *Progress in Oceanography*, 2018, 165: 215-232.
- [10] Zhu L Y. Remote sensing monitoring and assessment of water quality for lakes[D]. Beijing: Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, 2006.  
祝令亚.湖泊水质遥感监测与评价方法研究[D].北京:中国科学院研究生院, 2006.
- [11] Goodin D G, Harrington J A, Jr, Nellis M D, *et al.* Mapping reservoir turbidity patterns using SPOT-HRV data[J]. *Geocarto International*, 1996, 11(4): 71-78.
- [12] Feng Q, Cheng X J, Shen X, *et al.* Inland riverine turbidity estimation for Hanjiang River with Landsat 8 OLI imager[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2017, 42(5): 643-647.  
冯奇,程学军,沈欣,等.利用 Landsat 8 OLI 进行汉江下游水体浊度反演[J].*武汉大学学报(信息科学版)*, 2017, 42(5): 643-647.
- [13] Wang J G, Chen S G, Zhang T L, *et al.* Remote sensing retrieval algorithm for the turbidity in coastal waters using MODIS land band data[J]. *Journal of Ocean Technology*, 2016, 35(4): 20-25.  
王建国,陈树果,张亭禄,等.基于 MODIS 陆地波段的近岸水体浊度遥感方法[J].*海洋技术学报*, 2016, 35(4): 20-25.
- [14] Joshi I D, D'Sa E J, Osburn C L, *et al.* Turbidity in Apalachicola Bay, Florida from Landsat 5 TM and field data: seasonal patterns and response to extreme events[J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(4): 367.
- [15] Qiu Z F, Zheng L F, Zhou Y, *et al.* Innovative GOCI algorithm to derive turbidity in highly turbid waters: a case study in the Zhejiang coastal area[J]. *Optics Express*, 2015, 23(19): A1179-A1193.
- [16] Yu Y, Hu X Q, Min M, *et al.* NPP/visible infrared image radiometer suite low-light image fusion algorithm for city lights in mid-eastern China [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(10):



102804.  
余越, 胡秀清, 闵敏, 等. NPP/VIIRS 微光图像融合中国中东部城市灯光算法[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(10): 102804.
- [17] Li J, Zhu J H, Han B, *et al.* Validation of the VIIRS radiometric products with MODIS and *in-situ* data in the Bohai Sea [J]. Journal of Ocean Technology, 2016, 35(2): 27-33.  
李军, 朱建华, 韩冰, 等. VIIRS 在中国渤海的遥感反射率产品验证[J]. 海洋技术学报, 2016, 35(2): 27-33.
- [18] Li X W, Niu Z C, Jiang S, *et al.* Operational characteristics of environmental monitoring satellite Suomi NPP and usage in ecological environment monitoring [J]. Environmental Monitoring and Forewarning, 2014, 6(3): 1-6.  
李旭文, 牛志春, 姜晟, 等. 环境监测卫星 Suomi NPP 业务特性及生态环境监测应用[J]. 环境监控与预警, 2014, 6(3): 1-6.
- [19] Ding Y, Huang J, Cui T W, *et al.* The decomposition method of MODIS images Enteromorpha mixed pixels based on the relation of NDVI to abundance [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2015, 37(7): 123-131.  
丁一, 黄娟, 崔廷伟, 等. 基于 NDVI 与丰度关系的 MODIS 影像浒苔混合像元分解方法[J]. 海洋学报, 2015, 37(7): 123-131.
- [20] Huang C, Chen Y, Wu J P, *et al.* An evaluation of Suomi NPP-VIIRS data for surface water detection [J]. Remote Sensing Letters, 2015, 6(2): 155-164.
- [21] Hillger D, Seaman C, Liang C, *et al.* Suomi NPP VIIRS imagery evaluation[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2014, 119 (11): 6440-6455.
- [22] Chen Y H, Qiu Z F, Sun D Y, *et al.* Remote sensing of suspended particle size in Yellow Sea and Bohai Sea [J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(9): 0901008.  
陈亚慧, 丘仲锋, 孙德勇, 等. 黄渤海悬浮颗粒物粒径的遥感反演研究[J]. 光学学报, 2015, 35(9): 0901008.
- [23] Qiu Z F, Wu T T, Su Y Y. Retrieval of diffuse attenuation coefficient in the China seas from surface reflectance [J]. Optics Express, 2013, 21 (13): 15287-15297.
- [24] Qiu Z F, Su Y Y, Yang A N, *et al.* An approach for estimating absorption and backscattering coefficients from MERIS in the Bohai Sea [J]. International Journal of Remote Sensing, 2014, 35(24): 8169-8187.
- [25] Chen J, Cui T W, Tang J W, *et al.* Remote sensing of diffuse attenuation coefficient using MODIS imagery of turbid coastal waters: a case study in Bohai Sea [J]. Remote Sensing of Environment, 2014, 140: 78-93.
- [26] Bailey S W, Franz B A, Werdell P J. Estimation of near-infrared water-leaving reflectance for satellite ocean color data processing [J]. Optics Express, 2010, 18(7): 7521-7527.
- [27] He X Q, Bai Y, Pan D L, *et al.* Using geostationary satellite ocean color data to map the diurnal dynamics of suspended particulate matter in coastal waters[J]. Remote Sensing of Environment, 2013, 133: 225-239.