

黄渤海海表密度的遥感反演

苏校平, 孙德勇*, 王胜强, 丘仲锋, 环宇

南京信息工程大学海洋科学学院, 江苏 南京 210044

摘要 基于 4 次黄渤海航次实测资料(2014 年 11 月、2015 年 8 月、2016 年 7 月和 2017 年 1 月)建立了采用遥感反射率反演海表密度(SSD)的遥感模型。结果表明,多元线性回归模型的反演效果最佳,其决定系数为 0.70,平均绝对误差(S_{MAPE})为 3.49%;采用独立实测数据集(27 个样本)对所提模型进行了精度验证,该模型反演的海表密度具有较高的精度(S_{MAPE} 为 3.27%)。此外,模型敏感性实验结果显示, S_{MAPE} 波动在 3%以内,证实所提模型具有较好的稳定性。同时,将所提模型成功应用于静止水色卫星(GOCI)的卫星数据,并反演得到 2016 年 7 月的黄渤海海表密度的空间分布结果。结果表明,沿岸地区密度较大,渤海中心区和山东半岛北部海域、黄海中部海域均呈现较高值,青岛附近海域均呈现低值。

关键词 海洋光学; 海表密度; 地球静止海洋彩色成像仪; 黄渤海; 遥感

中图分类号 O433

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.110101

Remote Sensing to Estimate Sea-Surface Density of Yellow and Bohai Seas off the East Coast of China

Su Xiaoping, Sun Deyong*, Wang Shengqiang, Qiu Zhongfeng, Huan Yu

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

Abstract On the basis of our study of 55 samples collected during four cruises in the Yellow and Bohai Seas off the east coast of China (November 2014, August 2015, July 2016, and January 2017), we developed an algorithm for estimating the sea-surface density (SSD) using remote-sensing reflectance. Our results show that the multivariate linear regression model performs the best, with a determination coefficient of 0.70 and a mean absolute percentage error of $S_{MAPE}=3.49\%$. We used an independent dataset (27 *in situ* observations) to assess the performance of the model, yielding a validation result of $S_{MAPE}=3.27\%$. In addition, the sensitivity experiment of the model show that the observed fluctuation in the S_{MAPE} values is $< 3\%$, indicating that our proposed model is relatively stable. Meanwhile, we applied our developed model to the geostationary ocean color imager (GOCI) satellite data recorded in July 2016 and successfully produced the SSD distribution pattern. The spatial characteristics show that the coastal waters, the central parts of the Bohai and Yellow Seas, and the waters off the northern Shandong Peninsula have relatively high SSD values, while relatively low values are distributed along the Qingdao coast.

Key words ocean optics; sea-surface density; geostationary ocean color imager; Yellow and Bohai seas; remote sensing

OCIS codes 010.4450; 010.0280; 010.7340

1 引言

海水密度是海洋水体重要的理化性质,是海洋动力学研究中重要的物理性质之一。海水密度

控制海洋中地转流、环流等多种动力学过程^[1],任何时候海水状态都可以借助海水密度等物理量的分布进行描述^[2]。同时,海水密度在海洋生态环境和海面高度变化过程中均有着重要作用^[3-5]。

收稿日期: 2018-10-26; 修回日期: 2018-12-27; 录用日期: 2019-01-02

基金项目: 国家自然科学基金(41876203,41576172)

* E-mail: sundeyong1984@163.com

研究海水密度变化对船舶安全及效益^[6]、海洋石油气田开采^[7]、海岸工程和海洋国防建设具有重要意义^[8]。除此之外,海水密度跃层对船只和潜艇安全航行以及海洋生物的影响非常大^[9-10]。因此,深入研究和探测海水密度在沿海经济生活、船舶海岸工程、海洋生态环境等方面均具有重要的科学意义和社会需求。

海水密度参数通常指在自然环境下,单位体积内的海水质量^[8]。一般而言,自然状态的海水是一种成分复杂的悬浮液体,其成分不仅包含纯海水,还包含如浮游藻类、非藻类颗粒物^[11]等不溶解性的悬浮颗粒物。目前,对于海水密度的测量,传统方法一般包括:利用浮沉子法直接获取海水密度^[12],基于偏振光原理的海水密度测量^[13],基于海水状态方程间接获取海水密度^[14]等。传统的海水密度测量方法精度较高,但耗时耗力且费用高,数据难以获取。同时,受空间采样点数量限制,得到的信息在空间上易产生“断点”。与传统的测量方式相比,卫星遥感技术具有大面积同步、实时和长期连续观测等优点,可为海水密度观测研究提供一个新的数据集^[8]。

基于卫星遥感技术获取海水密度的方案,通常采用微波遥感数据间接反演得到海表密度(SSD),即首先反演得到海表盐度和密度,再结合海水状态方程计算海水密度。Burrage等^[15]基于金属氧化物半导体(SMOS)传感器的海水温度和盐度数据结合海水状态方程得到海水密度数据。但是,微波遥感数据存在一定的局限性,主要表现为两个方面:一方面,时空分辨率较低,这在一定程度上限制了SSD的时空分布研究;另一方面,数据的可获取性差且经济成本较高,大多数微波产品需要“预订”才能得到。相比而言,光学传感器时空分辨率高而且可获取性高。绝大多数光学遥感数据均可免费获取。近年来,中分辨率成像光谱仪(MODIS)、中等分辨率成像频谱仪(MERIS)、静止水色卫星(GOCD)等水色传感器相继问世^[16]。特别值得一提的是,GOCI传感器作为全球第一颗静止水色卫星,具有高空间分辨率和小时级的时间分辨率(00:15—07:15 GMT,每小时一幅图像,GMT为格林尼治时间)^[17]。然而,基于光学传感器的SSD研究却鲜有报道。

黄渤海位于西太平洋的半封闭大陆架浅海,属于我国典型的光学二类水体。大量的河流输入^[18]、海流输送作用、海水物质交换和季节变化均会对黄

渤海SSD造成影响。因此,研究黄渤海水体密度对深入了解其生态环境、海洋渔业现状及沿岸人民生活等均有重要意义。科研工作者们针对黄渤海海水密度已进行了大量调查和分析工作。陈国华等^[12,19-20]利用磁力浮沉子法重新测定长江口、珠江口、黄河口、渤海湾的海水密度与盐度、温度的关系,道出了研究区域的海水密度的状态方程;李晓辰等^[7]利用室内实验测试方法对黄海唐岛湾的海水密度与温度之间变化规律进行了定量分析。大量的研究表明,渤黄海的SSD在时空尺度存在较大的变异性。然而,这些研究工作多基于野外实测数据,很难真实体现出SSD的时空变化。因此,凭借光学遥感技术的优势,利用卫星光学遥感技术实时连续地获取黄渤海海水密度信息的研究工作势在必行。

针对以上研究的不足和科学需求,本文基于GOCI卫星数据,结合其波段设置,尝试不同的遥感反射率组合形式和多种关系模型,最终建立了黄渤海SSD遥感反演模型,并加以卫星应用,得到空间分布产品,初步实现了黄渤海海域SSD分布变化的空间监测。

2 研究区与数据处理

2.1 研究区概括

以黄海和渤海为研究区域,4个实测航次(2014年11月航次,2015年8月航次,2016年7月航次以及2017年1月航次)站点均匀分布于黄渤海海域。黄海位于北纬 $32^{\circ}\sim 40^{\circ}$ 、东经 $119^{\circ}\sim 126^{\circ}$,海域面积为 $3.8\times 10^5\text{ km}^2$,平均深度为44 m^[21]。渤海位于北纬 $37^{\circ}07'\sim 41^{\circ}$ 、东经 $117^{\circ}35'\sim 121^{\circ}10'$,海域面积为 $7.7\times 10^4\text{ km}^2$,平均深度为18 m^[22]。黄渤海气候具有明显的季节性,受季风、河流冲淡水和潮汐的影响显著^[23-25]。黄海与渤海通过渤海海峡进行海水交流与物质交换,对水体的盐度、温度以及水体中的悬浮颗粒物都有不同程度的影响。

2.2 现场实测数据及其处理

收集研究区域开展的多个航次(2014年11月、2015年8月、2016年7月和2017年1月)现场实测数据。将收集到的300个站位数据集与高光谱辐射计测量数据进行匹配,得到82组有效数据集,数据内容包括遥感反射率(R_{rs})、海表盐度(SSS)、海表温度(SST)。

2.2.1 海表密度

为获取实测的SSD,采用海表温度和盐度数据,通过海水状态经验方程^[26]得到SSD数据。其中,

海水温度和盐度由车载温盐深仪(CTD)现场实测得到。值得注意的是,由于没有磁力浮沉子法相关装置^[12],本研究无法直接获取 SSD 的现场实测数据。因此,采用同位站点的实测海表温度和盐度数据,利用海水状态经验方程(因篇幅有限,仅列出核心部分,其细节详见文献[26])得到该站点的实测 SSD 数据,计算式为

$$\rho(S, T, 0) = \rho_w + A(T) \times S + B(T) \times S^{3/2} + C \times S^2, \quad (1)$$

式中: S 为海表盐度; T 为海表温度; ρ_w 、 A 、 B 均为温度函数; C 为常数。(1)式为通过大量实测数据得到的校正后经验公式,存在一定误差,但这里的关注点为建立 SSD 的光学遥感反演算法,因此忽略该部分误差。

已有的大量研究结果表明^[14,27],海水密度是一项较为稳定的物理量。参考现有的针对海水密度的表征方法^[19,27],这里将真实 SSD 值减去 1000,即对应这里所描述的海水密度值,例如,真实海水密度值为 1023,则下文中描述的海水密度值为 23。

2.2.2 遥感反射率

遥感反射率是由 Satlantic 公司设计的高空间分辨

率光谱辐射计 Profiler 测量所得。Profiler 测量波长范围为 350~800 nm,非等间距测量,测量间隔范围为 2~5 nm,共 136 个通道。仪器测量前需垂直置于水中预热,进行压力校正,校正后匀速放入水中进行测量。测量时需满足无云遮挡、风力较小、光照稳定、无波浪破碎及避免船体阴影条件,测量结果运用专业软件 Prosoft 进行校正处理,软件将数据处理成 Level 1~4 级数据产品,处理完的数据导入 excel 中提取响应数据。这里选用的遥感反射率为 Level 4 级数据。

2.3 GOCI 卫星数据

GOCI 是地球静止气象卫星上搭载的第一颗面向气象服务和海洋监测研究的水色遥感器。GOCI 卫星可获取 8 个波段的遥感物理量,覆盖可见光波段到近红外波段(中心波长分别为 412, 443, 490, 555, 660, 680, 745, 865 nm),GOCI 波段位置及相关参数描述信息如表 1 所示。GOCI 的空间分辨率为 500 m,其时间分辨率高达 1 h,每天可获取 8 幅遥感影像(00:15—07:15 GMT)^[17]。

整理 4 次航次期间所有的 GOCI 卫星遥感影像,并利用专门软件 GDPS1.3.0 (GOCI Data Processing System, GDPS)处理得到 R_{rs} 遥感数据。

表 1 GOCI 波段位置及相关参数描述信息

Table 1 Spectral bands of GOCI and other related description information

Band /nm	Band center / nm	Band width /nm	Nominal radiance	Saturation radiance	Signal noise ratio	Primary use
B1	412	20	100	152	1000	Yellow substance and turbidity
B2	443	20	92.5	148	1090	Chlorophyll absorption maximum
B3	490	20	72.2	116	1170	Chlorophyll and other pigments
B4	555	20	55.3	87	1070	Turbidity, suspended sediment
B5	660	20	32	61	1010	Baseline of fluorescence signal, Chlorophyll, suspended sediment
B6	680	10	27.1	47	870	Atmospheric correction and fluorescence signal
B7	745	20	17.7	33	860	Atmospheric correction and baseline of fluorescence signal
B8	865	40	12	24	750	Aerosol optical thickness, vegetation, and water vapor reference over the ocean

2.4 精度评价指标

在所有匹配的实测 82 组数据样本中,随机抽取 70%的数据集(55 组)进行建模实验,30%数据集(27 组)用于模型验证。利用数学软件 MATLAB 以及统计分析软件 SPSS 对数据进行统计分析与建模,得到最优反演模型。选取决定系数(R^2)、平均绝对百分误差(S_{MAPE})、和方均根误差(S_{RMSE})作为评价指标,其计算公式为

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

$$S_{MAPE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{x_i - y_i}{x_i} \right| \times 100\%, \quad (3)$$

$$S_{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}, \quad (4)$$

式中： x_i 为实测数据； \bar{x} 为实测数据平均值； y_i 为反演所得数据； \bar{y} 为反演数据平均值； n 为样本数量。

3 模型构建及应用

3.1 密度数据的统计分布特征

图 1 为海表密度站位频数分布图，黑色曲线为海表密度正态分布曲线，S.D. 为标准差，CV 为变异系数(标准差/平均值)。从图中可以看出，海表密度的标准差远小于其平均值，变异系数仅为 8.13%，说明其数据稳定。除此之外，海表密度值的变化范围较小，主要集中在 19~23 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 之间，该区间频数为 57，约占频数总数的 70%。同时，还有少量高

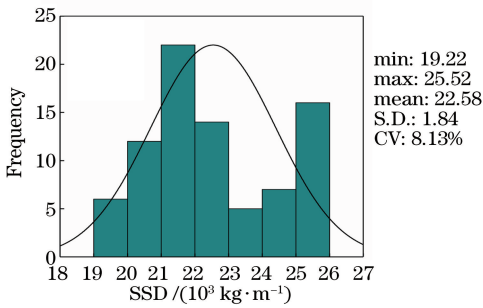


图 1 海表密度站位频数分布图
(黑色曲线为正态分布曲线)

Fig. 1 Distribution of SSD site number
(black curve is normal distribution)

值集中在 25.0~25.5 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 范围内，约占频数总数的 18%，结合经纬度发现，这部分高值主要集中在冬季渤海海域。

3.2 海表密度反演模型的建立

为探究遥感反射率 R_{rs} 与海表密度之间的关系，选取 350~700 nm 内所有单波段遥感反射率，将其与海表密度值进行相关性分析。选取与 GOCI 波段设置相符的 6 个波段(412, 443, 490, 555, 660, 680 nm)进行相同的处理，得到单波段、波段比遥感反射率与 SSD 的相关性，如图 2 所示。相关系数 (R) 与波长的关系如图 2(a) 所示，矩形框与 GOCI 波段设置相符的 6 个波段相对应，宽度表示每个波段的谱宽。由图可见，海表密度与 R_{rs} 在 400~650 nm 波段的相关性较好，在 490 nm 附近出现 R 最大值，达到 0.65。GOCI 波段设置相符的波段与全波段均在 410~640 nm 之间变化稳定，在 490 nm 附近出现最大相关性。

将遥感反射率进行比值处理并与海表密度进行相关性分析，结果如图 2(b) 所示。黄渤海 SSD 与 GOCI 数据 $R_{rs}(\lambda_1)/R_{rs}(\lambda_2)$ 之间的相关性如表 2 所示，其中 λ_1 与 λ_2 为 GOCI 各波段。结合表 2 与图 2(b) 可知，数据大体沿对角线对称分布，相关性在 450~500 nm 范围内较高。与单波段形式相比， R_{rs} 波段比与海表密度之间相关性整体偏低，因此单波段形式略优于波段比形式。

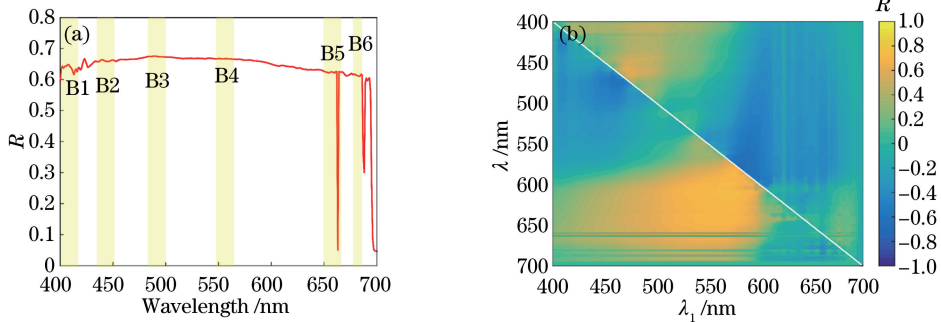


图 2 单波段、波段比遥感反射率与 SSD 相关性。(a) 单波段遥感反射率；(b) 波段比遥感反射率

Fig. 2 Correlation between single band, band ratio remote sensing reflectivity and SSD. (a) R_{rs} in single band;
(b) R_{rs} in band ratio

结合对 GOCI 卫星各波段遥感反射率产品真实性检验研究^[28-30]，以及黄渤海海域水体浑浊度高，海水中悬浮颗粒物、黄色物质、叶绿素等物质较多的特点，选择对该类型水体变化信号更为敏感且信噪比更高的 $R_{rs}(490)$ 、 $R_{rs}(555)$ 以及 $R_{rs}(660)$ 波段建立黄渤海海表密度的反演模型，并完成进一步的模型精度比对分析工作。将遥感反射率数据进行对数处

理后建模，遥感反射率与海表密度的反演模型精度分析结果如表 3 所示。表 3 给出 3 个波段的 3 种模型形式、 R^2 以及 S_{MAPE} 。结果表明，基于 3 个不同波段的 3 种不同种类模型与海表密度相关性和绝对误差的结果差异较小。其中，多项式形式的模型与海表密度相关性略高于指数模型和线性模型，且 S_{MAPE} 较低。由于 3 个波段结果差异小，且多项式模

表2 黄渤海 SSD 与 GOCI 数据 $R_{rs}(\lambda_1)/R_{rs}(\lambda_2)$ 之间的相关性

Table 2 Correlation between GOCI data of $R_{rs}(\lambda_1)/R_{rs}(\lambda_2)$ and SSD in Yellow and Bohai Seas off the east coast of China

λ_2/nm	Correlation					
	$\lambda_1 = 412 \text{ nm}$	$\lambda_1 = 443 \text{ nm}$	$\lambda_1 = 490 \text{ nm}$	$\lambda_1 = 555 \text{ nm}$	$\lambda_1 = 660 \text{ nm}$	$\lambda_1 = 680 \text{ nm}$
412	—	0.32	0.37	0.29	0	0.17
443	0.37	—	0.47	0.26	0.10	0.26
490	0.48	0.50	—	0	0.10	0.41
555	0.22	0.10	0.10	—	0	0.46
660	0.24	0.30	0.36	0.41	—	0.37
680	0	0.14	0.20	0.26	0.10	—

表3 遥感反射率与 SSD 的反演模型精度分析

Table 3 Precision analysis of retrieval models of SSD and remote sensing reflectance

Band combination	Model type	Model equation	R^2	S_{MAPE}	S_{RMSE}
$\lg[R_{rs}(490)]$	Exponential	$y = 29.932\exp(0.1343x)$	0.62	3.44	1.30
	Linear polynomial	$y = 3.0688x + 29.095$	0.63	3.44	1.30
	Quadratic polynomial	$y = 0.4456x^2 + 4.8611x + 30.79$	0.64	3.30	1.30
$\lg[R_{rs}(555)]$	Exponential	$y = 29.568\exp(0.1252x)$	0.55	4.02	1.60
	Linear polynomial	$y = 2.8678x + 28.838$	0.57	4.07	1.63
	Quadratic polynomial	$y = 1.5787x^2 + 9.4064x + 35.185$	0.60	3.72	1.51
$\lg[R_{rs}(660)]$	Exponential	$y = 28.159\exp(0.0817x)$	0.56	3.95	1.58
	Linear polynomial	$y = 1.8706x + 27.719$	0.58	3.99	2.97
	Quadratic polynomial	$y = 0.5237x^2 + 4.5843x + 30.902$	0.59	3.51	1.52
$\lg[R_{rs}(\lambda_i)]$ $\lambda_i = 490, 555, 660 \text{ nm}$	Multiple single band linear equations	Eq. (5)	0.70	3.49	1.04

3.3 模型验证

利用随机抽取的 27 组独立样本进行模型误差验证,采用独立数据集对比表 2 中模型的反演精度,结果如图 3 所示,图 3(a)~(c)分别为 490,555,660 nm 波段的指数、线性、多项式形式模型的误差验证,图 3(d)为多元线性回归模型的误差验证。由图 3 可见,单波段的 3 种模型效果差距不大,但多元线性回归模型优于单波段模型。单波段模型的平均绝对百分误差以及方均根误差如图 3(e)所示,图 3(e)中,左侧坐标轴表示平均绝对百分误差,右侧坐标轴表示方均根误差。结合图 3(d)和图 3(e),多元线性回归模型的平均绝对百分误差和方均根误差在所有模型中最小,说明其模型效果最佳。综合以上因素,多元线性回归形式的反演算法模型具有与 SSD 相关性较高、误差较小、数据稳定的优势,验证效果优于其他模型。

3.4 模型误差敏感性分析

利用 27 组数据集检验模型稳定性,在遥感反射率数据中引入 100 组随机误差用以辨别模型对误差的敏感性^[31]。随机误差服从均值为 0,标准差为

型结果比指数模型和线性模型好,因此将海表密度取对数,并采用多元单波段线性方程形式建立反演算法模型,可得

$$\lg(S_{\text{SD}}) = 1.485 + 0.115 \times \lg[R_{rs}(490)] - 0.071 \times \lg[R_{rs}(555)] + 0.0148 \times \lg[R_{rs}(660)] \quad (5)$$

由表 3 可知,基于多波段形式的模型决定系数 R^2 达到 0.7,大于基于单波段形式的模型,且误差更小。综合模型的精度以及黄渤海水体特质,考虑水体中包含的悬浮颗粒物、黄色物质、叶绿素等对水体密度的贡献,选择多元线性回归模型作为海表密度反演模型。

5%的正态分布。误差敏感性测试结果如图 4 所示,模型反演结果 S_{MAPE} 变化波动小于 3%,模型对误差不敏感,说明模型稳定性较好。

3.5 模型的卫星应用

为更好地探讨上述所建模型的卫星应用,选取与实测航次匹配(2016 年 7 月航次)的 GOCI 卫星数据进行空间反演分析。具体匹配方法如下,依据实测站位的观测时间及经纬度信息,选取与之对应的时间窗口为 $\pm 5 \text{ h}$ 的所有 GOCI 卫星影像(共计 10 幅)。为获取卫星 R_{rs} 数据,利用 GDPS 软件处理 L1 产品得到相应影像的 R_{rs} 数据,用于所构建的密度反演模型,进而采用平均值合成法得到密度的空间分布。为评价卫星反演效果,同时采用 2016 年 7 月 82 个站位的实测数据,进行空间插值,获得空间分布图。

对比发现二者空间分布趋势大体一致,如渤海中心区和山东半岛北部海域均出现高值(约为 $23 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$),黄海中部海域($35^\circ \text{ N}, 123^\circ \text{ E}$ 附近)均出现较高值(约为 $22 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$),青岛附近海域均呈现低值($20 \sim 21 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$)。同时,该空间

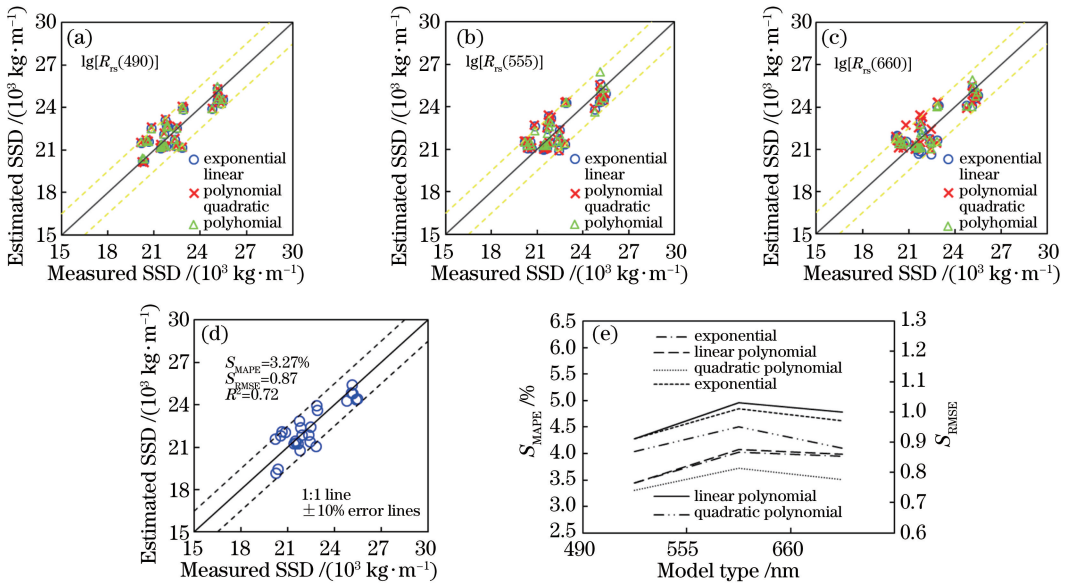


图3 模型反演的精度对比结果。(a) 490 nm 单波段模型;(b) 555 nm 单波段模型;(c) 660 nm 单波段模型;(d) 多元线性回归模型。实线为 1:1 线,虚线为 ±10% 误差线;(e) 单波段模型的平均绝对误差和方均根误差

Fig. 3 Retrieval accuracy comparison of models. (a) Model of 490 nm single band; (b) model of 555 nm single band; (c) model of 660 nm single band; (d) multiple linear regression model. Solid line is 1:1 and dotted line is ±10% error; (e) S_{MAPE} and S_{RMSE} of single band models

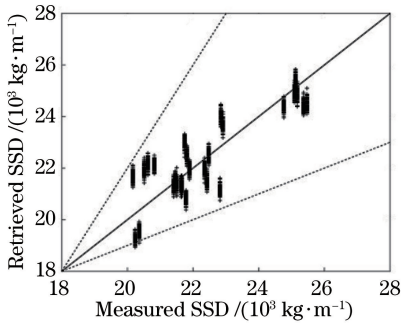


图4 误差敏感性测试结果

Fig. 4 Error sensitivity test result

分布特征与文献[8]、文献[12]报道的研究结果类似。这表明本研究模型的卫星反演的海表密度分布具有一定的可靠性。值得注意的是,由于部分海域(如苏北浅滩、辽东湾、黄海东部海域)的实测数据缺失,无法对这些区域进行直接验证。同时,在黄河入海口、山东半岛南部等水域,二者也具有一定空间分布差异,造成这种偏差的原因主要有:1) 卫星数据在近海沿岸地区大气校正效果的精确度相对较低,导致遥感反射率数据作为模型输入不够准确,反演结果产生一定偏差^[32];2) 入海口地区(如黄河入海口)大量淡水冲入,造成该地区海水密度降低^[20],入海口大量的淡水虽然携带了大量的泥沙悬浮,但淡水与海水在物理性质上存在较大差异。这里提出的模型是基于海水建立,对受淡水影响较大的海域适

用性仍有待改进。

4 讨论

所提方案中,关注的是海水密度,通过遥感反射信号获取该参数信息,该参数由(1)式所示的海水状态方程计算获得,输入量为CTD现场实测的海表温度和盐度。科研工作者在海表盐度对遥感反射率信号变化的捕捉方面进行了大量的研究,证实了海表盐度与遥感反射率信号之间存在着良好的相关关系,海表温度也可对卫星遥感反射率信号产生响应^[33-35]。因此,输入量为海表盐度和温度的海表密度对遥感反射率信号变化也可产生响应。另一方面,现有研究表明,海水的温度和盐度会影响海水的折射(折射率随温度的升高而下降,随盐度的增加而上升^[36]),而海水的折射会受水体中悬浮颗粒折射性质的影响,进而影响水体中悬浮颗粒的(后向)散射特性,例如,基于米氏理论的折射与后向散射率之间的关系^[37]、基于实测数据的折射与后向散射系数的关系^[18]等。因此,由海表温、盐度推算获得的海表密度的方法中,可通过改变海水折射率改变后向散射特性,进而影响遥感反射率信号。同时,根据航次实测数据集,分析同步的海表密度与总后向散射系数(b_{br})(利用442、488、550 nm处为代表)的统计关联度,发现海表密度与水体总后向散射系数之间也存在较好的关联关系($R^2 \approx 0.50$, 参数

$p < 0.001$), 海水密度与后向散射系数之间的统计关系分析结果如图 5 所示。综上所述, 海表密度的输入量(海表盐度和温度)可直接捕捉遥感反射率的信号变化, 从而使海表密度对 R_{rs} 的变化产生响应。

此外, 海表盐度和温度也可以通过影响光学因子(折射率, 水体后向散射)间接响应遥感反射率信号, 这些因子为建立海水密度的遥感反射率反演模型提供了有价值的参考。

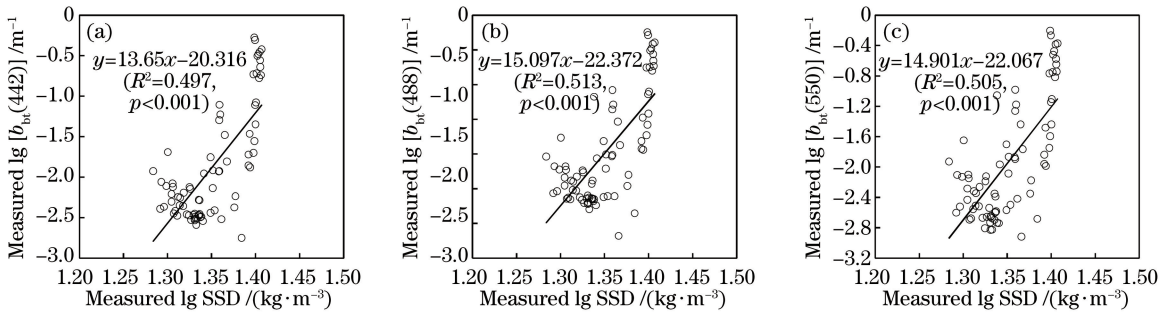


图 5 海水密度与后向散射系数之间的统计关系分析。实测 SSD 与(a) 442 nm 波段, (b) 448 nm 波段, (c) 550 nm 波段的后向散射系数相关性分析

Fig. 5 Statistical relationship analysis between SSD and total backscattering coefficient. Correlation analysis between SSD and measured backscattering coefficient in (a) 442 nm band, (b) 448 nm band, (c) 550 nm band

黄渤海水体受陆源影响较大, 如河流输送、沿岸居民生活污水、工业污染、农田径流等因素均对该海域水体干扰较大^[18]。高浓度的悬浮颗粒、底泥的再悬浮、风浪扰动使得该海域透明度较低, 水环境状况复杂, 复杂的水体组分会对水体光学特性产生较大影响^[18]。根据复杂高浑浊黄渤海水体的区域特征, 可认为该海域海水的质量不仅包含纯海水的质量, 更包含水中其他物质成分的质量之和。因此, 严格意义上, 本研究面向的对象——海表密度应为海洋表层水体悬浮液的密度。因此, 对于复杂高浑浊的黄渤海水体而言, 其富含的各物质成分(如浮游藻类颗粒、叶绿素、黄色物质、悬浮泥沙等)^[18]对海水密度参数的影响显得尤为重要。基于米氏理论可得

$$b_{bp}^* = \frac{3}{2} \frac{Q_{bbc}}{\rho_a D_A} \quad (6)$$

式中: b_{bp}^* 为海水中悬浮颗粒物后向散射系数; Q_{bbc} 为后向散射效率; ρ_a 为悬浮颗粒物密度; D_A 为悬浮颗粒物面积加权平均粒径, 公式细节详见文献^[18]。由(6)式可见, 在理论上, 海水中悬浮颗粒物密度与后向散射系数有直接关系。除此之外, 光在海水中的衰减主要来自海水中粒子的吸收和散射两种不同的过程^[38], 而近岸高浑浊水体海水物质成分多, 海水衰减系数较大^[39]。鉴于此, 所开发的反演算法, 利用了 GOCI 卫星数据的 490, 555, 660 nm 3 个波段遥感反射率, 这些波段位置的遥感反射率恰好对应浮游藻类色素、悬浮泥沙及浊度等敏感的波段区域(如表 1 所示), 同时, 这些波段的信噪比比较高, 均为海水密度的反演模型构建奠定了良好的

理论基础。

5 结 论

基于黄渤海现场实测数据, 建立了基于 GOCI 卫星数据的海表密度反演模型。选择 3 个波段 3 种模型进行拟合, 最终确立多元线性回归模型, 并对该模型进行精度检验和敏感性检验。检验结果表明, 该模型精度较高且比较稳定。将多元线性回归模型应用于 GOCI 卫星影像数据, 反演得到 SSD 分布图。结果显示, 山东半岛周围海域海表密度呈现由近岸向远海递减趋势; 在南黄海海域, 海表密度高值分布在中央海域。该算法在靠近陆地的区域存在一定误差, 仍需要更多实测资料对算法进行优化。由于海表密度参数的影响较为复杂, 后续研究应结合海洋生物、化学、地质等相关领域的的数据资料, 综合分析海表密度变化的影响因素, 揭示其内在的响应机制。

参 考 文 献

- [1] Chen J X, Song H B, Bai Y, *et al.* Inverting seawater density by seismic oceanography [C] // Proceedings of the 28th Annual Meeting of Chinese Geophysical Society. Beijing: Chinese Geophysical Society, 2012: 321-322
陈江欣, 宋海斌, 拜阳, 等. 海水密度的地震海洋学反演[C] // 中国地球物理学会第二十八届年会论文集. 北京: 中国地球物理学会, 2012: 321-322
- [2] Shi L, Wang J, Mei Y. Propagation characteristics of internal waves in the strait of Gibraltar based on

- MODIS remote sensing images [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(1): 012802.
- 史璐, 王晶, 梅源. 基于 MODIS 遥感影像的直布罗陀海峡内波传播特性研究 [J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(1): 012802.
- [3] Wang D Z. Discussion on the overload supervision of cargo regulations [J]. *China Water Transport*, 2008, 8(9): 19-21.
- 王德政. 浅议货船超载监管 [J]. *中国水运(下半月)*, 2008, 8(9): 19-21.
- [4] Liu K Z, Zhu M. Analysis on drawback of seawater desalination [J]. *Yangtze River*, 2009, 40(1): 63-64, 66.
- 刘可忠, 朱明. 海水淡化的缺点分析 [J]. *人民长江*, 2009, 40(1): 63-64, 66.
- [5] Hao Y Z, He B. The influence simulation study of the sea density variation upon submarine hovering on the vertical plant [J]. *Ship & Ocean Engineering*, 2008, 37(2): 117-119.
- 郝英泽, 何斌. 海水密度变化对潜艇悬停垂向运动的影响仿真研究 [J]. *船海工程*, 2008, 37(2): 117-119.
- [6] He S Y, Jin L A, Zhang Z Y, *et al.* Research on artificial pycnocline technology of seawater density [J]. *China Measurement & Test*, 2017, 43(9): 139-142.
- 何升阳, 金良安, 张志友, 等. 海水密度的人工跃变技术研究 [J]. *中国测试*, 2017, 43(9): 139-142.
- [7] Li X C, Lin R Y, Xu W D, *et al.* Experimental study on hydrothermal properties of the Yellow Sea [J]. *Chemical Engineering & Equipment*, 2017(5): 97-100.
- 李晓辰, 林日亿, 徐伟栋, 等. 黄海海域海水热物理性质实验研究 [J]. *化学工程与装备*, 2017(5): 97-100.
- [8] Feng S Z. An introduction to marine science [M]. Beijing: Higher Education Press, 1999: 446-500.
- 冯士筵. 海洋科学导论 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1999: 446-500.
- [9] Li S Y, Xu P, Wang M. The influence of density of seawater on the discharge and adherence of monospores of porphyra yezoensis ueda [J]. *Marine Sciences*, 1986, 10(6): 38-40.
- 李世英, 许璞, 王敏. 海水密度对条斑紫菜单孢子的放散和附着的影响 [J]. *海洋科学*, 1986, 10(6): 38-40.
- [10] Zhou Z N. An analysis of the influence of sea water density of the Yangtze River mouth on the ship safety and economic benefit [J]. *Navigation of China*, 1998, 21(1): 86-89.
- 周正宁. 长江口海水密度对船舶安全和效益影响的分析 [J]. *中国航海*, 1998, 21(1): 86-89.
- [11] Ye H P, Li T J. Study on water mass spectral property with supervised classification method [J]. *Ocean Technology*, 2009, 28(3): 96-100.
- 叶虎平, 李铜基. 水体光谱特性监督分类方法研究 [J]. *海洋技术*, 2009, 28(3): 96-100.
- [12] Chen G H, Hu B L, Zhang L J, *et al.* Density of Changjiang River estuary seawater [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1992, 23(6): 573-580.
- 陈国华, 胡博路, 张力军, 等. 长江口海水的密度 [J]. *海洋与湖沼*, 1992, 23(6): 573-580.
- [13] Du J, Zhao Y S, Lü Y F, *et al.* Preliminary discussion on calculation of seawater density with multi-angle polarized information [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2007, 26(4): 307-311.
- 杜嘉, 赵云升, 吕云峰, 等. 利用多角度偏振信息计算海水密度研究初探 [J]. *红外与毫米波学报*, 2007, 26(4): 307-311.
- [14] Lü M. The space-time characteristics of sea level anomaly and sea water density in the Nordic Sea [J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2015(4): 17-26.
- 吕蒙. 北欧海海面异常及海水密度的时空特征 [J]. *海洋湖沼通报*, 2015(4): 17-26.
- [15] Burrage D, Wesson J, Miller J. Deriving sea surface salinity and density variations from satellite and aircraft microwave radiometer measurements: application to coastal plumes using STARRS [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(3): 765-785.
- [16] Jia H L, Su W, Huang H M, *et al.* Dynamic change characteristics and its dominant influencing factors of secchi disk depth in coastal and inland waters [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(3): 0301001.
- 贾后磊, 苏文, 黄华梅, 等. 海岸带和内陆水体透明度动态变化特征及其主导影响因素 [J]. *光学学报*, 2018, 38(3): 0301001.
- [17] Li G N, Wang L, Wang X, *et al.* Geostationary ocean color imager and application progress [J]. *Marine Environmental Science*, 2014, 33(6): 966-971.
- 李冠男, 王林, 王祥, 等. 静止水色卫星 GOCI 及其应用进展 [J]. *海洋环境科学*, 2014, 33(6): 966-971.

- [18] Sun D Y, Chen S G, Qiu Z F, *et al.* Second-order variability of inherent optical properties of particles in Bohai Sea and Yellow Sea: driving factor analysis and modeling[J]. *Limnology and Oceanography*, 2017, 62(3): 1266-1287.
- [19] Chen G H, Ji H, Xie S N, *et al.* A study on the density of seawater in Zhujiang estuary[J]. *Journal of Ocean University of Qingdao*, 1999, 29(S1): 1-7.
陈国华, 纪红, 谢式南, 等. 珠江口水体密度的研究[J]. *青岛海洋大学学报(自然科学版)*, 1999, 29(S1): 1-7.
- [20] Chen G H, Ji R, Xie S N, *et al.* Density of seawater in the Huanghe River estuary and Bohai Bay[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1993, 24(2): 183-190.
陈国华, 季荣, 谢式南, 等. 黄河口及渤海湾海水的密度[J]. *海洋与湖沼*, 1993, 24(2): 183-190.
- [21] 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.
- [22] Yu W. Study of the distribution and its variation patterns of surface suspended sediment concentration in the Bohai Sea[D]. Qingdao: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2011: 10-11.
于炜. 渤海表层悬浮物分布变异规律的研究[D]. 青岛: 中国科学院研究生院, 2011: 10-11.
- [23] Ichikawa H, Chaen M. Seasonal variation of heat and freshwater transports by the Kuroshio in the East China Sea[J]. *Journal of Marine Systems*, 2000, 24(1/2): 119-129.
- [24] Chen Z Y, Li J F, Shen H T, *et al.* Yangtze River of China: historical analysis of discharge variability and sediment flux[J]. *Geomorphology*, 2001, 41(2/3): 77-91.
- [25] Lee H J, Jung K T, So J K, *et al.* A three-dimensional mixed finite-difference Galerkin function model for the oceanic circulation in the Yellow Sea and the East China Sea in the presence of M_2 tide[J]. *Continental Shelf Research*, 2002, 22(1): 67-91.
- [26] Jackett D R, McDougall T J. Minimal adjustment of hydrographic profiles to achieve static stability[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1995, 12(2): 381-389.
- [27] Guo X Y, Zhu X H, Wu Q S, *et al.* The Kuroshio nutrient stream and its temporal variation in the East China Sea[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2012, 117(C1): C01026.
- [28] Moon J E, Park Y J, Ryu J H, *et al.* Initial validation of GOCI water products against *in situ* data collected around Korean peninsula for 2010-2011[J]. *Ocean Science Journal*, 2012, 47(3): 261-277.
- [29] Li H, He X Q, Ding J, *et al.* Validation of the remote sensing products retrieved by geostationary ocean color imager in Liaodong Bay in spring[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(4): 0401002.
李豪, 何贤强, 丁静, 等. 春季辽东湾静止轨道海洋水色遥感产品的真实性检验[J]. *光学学报*, 2016, 36(4): 0401002.
- [30] Zhu J H, Li J, Han B, *et al.* Validation for the remote sensing reflectance of geostationary ocean color imager in Bohai Sea[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(13): 27-32.
朱建华, 李军, 韩冰, 等. GOCI 卫星遥感反射比产品在渤海辽东湾海区的评估[J]. *光学学报*, 2014, 34(13): 27-32.
- [31] Cui T W, Zhang J, Ma Y, *et al.* The study on the distribution of suspended particulate matter in the Bohai Sea by remote sensing[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2009, 31(5): 10-18.
崔廷伟, 张杰, 马毅, 等. 渤海悬浮物分布的遥感研究[J]. *海洋学报(中文版)*, 2009, 31(5): 10-18.
- [32] Li J, Zhu J H, Gao F, *et al.* Cross-check analysis on MODIS and GOCI satellite remote sensing reflectances in turbid sea areas[J]. *Journal of Ocean Technology*, 2015, 34(1): 15-20.
李军, 朱建华, 高飞, 等. MODIS 和 GOCI 卫星遥感反射率产品在浑浊海区交叉检验分析[J]. *海洋技术学报*, 2015, 34(1): 15-20.
- [33] Qing S, Zhang J, Cui T W, *et al.* Retrieval of sea surface salinity with MERIS and MODIS data in the Bohai Sea[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2013, 136: 117-125.
- [34] Wang F G, Xu Y J. Development and application of a remote sensing-based salinity prediction model for a large estuarine lake in the US Gulf of Mexico coast[J]. *Journal of Hydrology*, 2008, 360: 184-194.
- [35] Yu X, Xiao B, Liu X Y, *et al.* Retrieval of remotely sensed sea surface salinity using MODIS data in the Chinese Bohai Sea[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2017, 38(23): 7357-7373.
- [36] Austin R W, Halikas G. The index of refraction of seawater[R]. San Diego: Scripps Institution of

- Oceanography, 1976.
- [37] Twardowski M S, Boss E, MacDonald J B, *et al.* A model for estimating bulk refractive index from the optical backscattering ratio and the implications for understanding particle composition in case I and case II waters [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2001, 106(C7): 14129-14142.
- [38] Li X Z, Miao X C, Qi X, *et al.* Laser atmosphere-seawater channel transmission characteristics under complicated sea conditions [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(3): 0301002.
- 李祥震, 苗希彩, 亓晓, 等. 复杂海况下激光气-海信道传输特性 [J]. *光学学报*, 2018, 38(3): 0301002.
- [39] Zhu H R, Zhu H, Cai P, *et al.* Optical concealment depth estimation algorithm based on satellite remote sensing data [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(8): 080104.
- 朱海荣, 朱海, 蔡鹏, 等. 基于卫星遥感数据反演的光学隐蔽深度估计算法 [J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(8): 080104.