

黄渤海悬浮颗粒物粒径的遥感反演研究

陈亚慧^{1,2} 丘仲锋² 孙德勇² 王胜强² 何宜军²

¹南京信息工程大学地理与遥感学院, 江苏 南京 210044

²南京信息工程大学海洋科学学院, 江苏 南京 210044

摘要 悬浮颗粒物粒径是重要的海洋光学参数,在以悬浮颗粒物为主的黄渤海海域,对水体生物、化学过程等起着重要的作用,该参数的卫星遥感反演也对海洋光学与水色遥感研究具有重要意义。利用2014年5月和11月的黄渤海47组实测数据,建立了基于静止海洋水色卫星(GOCI)波段设置的遥感反射率(R_{rs})与悬浮颗粒物中值粒径(D_{50})反演模型,555 nm波段幂函数的反演效果最佳,决定系数 R^2 为0.72,绝对误差 S_{MAPE} 为6.35%,经实测数据检验,均方根误差 S_{RMSE} 约为0.17,相对误差变化范围为-5%~5%。对反演模型引入5%误差进行敏感性检验,绝对误差、均方根误差分别控制在2%以及0.002以内,具有较好的稳定性。将此模型运用于2013年6月GOCI卫星数据,反演出悬浮颗粒物中值粒径 D_{50} 的时空分布图,呈现从近岸向远海粒径逐渐变大的趋势。

关键词 遥感; 悬浮颗粒物粒径; 反演算法; GOCI卫星; 海洋光学

中图分类号 O433; P733.3

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0901008

Remote Sensing of Suspended Particle Size in Yellow Sea and Bohai Sea

Chen Yahui^{1,2} Qiu Zhongfeng² Sun Deyong² Wang Shengqiang² He Yijun²

¹*School of Geography and Remote Sensing, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210044, China*

²*School of Marine Sciences, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210044, China*

Abstract Suspended particle size is an important marine optical parameter. In Yellow Sea and Bohai Sea, suspended particle size plays an important role in marine biogeochemical processes and ocean color remote sensing, since a large quantity of sediments dominate water composition in this study area. Using 47 *in situ* samples collected in May and November 2014, based on Geostationary Ocean Color Imager (GOCI) band, a novel inversion model is developed to estimate the median diameter (D_{50}) of suspended particle sizes, by means of remote sensing reflectance (R_{rs}). The obtained results indicate that a power model by $R_{rs}(555\text{ nm})$ performs best, coefficient of determination R^2 is 0.72, mean absolute percentage error S_{MAPE} is 6.35%. As for model validation, the root mean square error (S_{RMSE}) by using the independent dataset shows a value of about 0.17, and the relative errors ranged from -5% to 5%. The robustness of the developed models is investigated by introducing 5% random error into original data, and the corresponding results show that S_{MAPE} is below 2%, and S_{RMSE} is less than 0.002. Additionally, the model is successfully applied to derive distribution map of D_{50} from GOCI data (Jun, 2013), and the results show that the diameters of suspended particles increase from near-shore region to off-shore waters.

Key words remote sensing; suspended particle size; retrieval algorithm; GOCI; oceanic optics

OCIS codes 010.4450; 010.0280; 010.7340

收稿日期: 2015-04-07; 收到修改稿日期: 2015-04-28

基金项目: 国家自然科学基金(41276186)、江苏省自然科学基金(SBK2015020625)、“全球变化与海气相互作用”专项资助(GASI-03-03-01-01)、国家海洋公益性行业专项(201005030, 201305012)、南京信息工程大学人才启动基金(2243141501007)

作者简介: 陈亚慧(1990—),女,硕士研究生,主要从事海洋水色遥感方面的研究。E-mail: tyddy13912924234@163.com

导师简介: 丘仲锋(1979—),男,教授,硕士生导师,主要从事海洋水色遥感及数值模拟等方面的研究。

E-mail: zhongfeng.qiu@nuist.edu.cn(通信联系人)

1 引 言

海洋悬浮颗粒物对海洋环境研究、生物动力学与沉积动力学具有极其重要的意义^[1]。悬浮颗粒物在近岸海洋区域的分布不仅影响海洋环境变化,同时也成为港口选址、沿岸水利、近岸工程建设所要考虑的重要因素^[2]。悬浮颗粒物的粒径大小,作为描述悬浮颗粒物的一个重要物理参数,直接影响着悬浮颗粒物的沉降速度^[3-4],通常情况下大颗粒易于沉降并淤积,对航道、海岸工程造成恶劣影响;小颗粒悬浮于海水上层,影响着水体光场变化,进而改变海洋的初级生产力^[5]。此外,粒径也影响着颗粒物絮凝率、颗粒物碰撞率及其光学性质。因此,悬浮颗粒物粒径分布的研究具有重要的科学意义。

海洋悬浮颗粒物粒径的研究,过去一直采用离散的水体采样调查法^[6-7]。近年来,学者们已经逐渐展开了对悬浮颗粒物粒径的遥感反演研究。王芳等^[8]建立了一种采用悬浮颗粒物粒径和离水辐射率二元特征参数来反演海洋表层悬浮颗粒物浓度的遥感反演算法,以此为基础分别建立了基于中分辨率成像光谱仪 MODIS 遥感数据和悬浮颗粒物粒径二元特征参数的主成分和神经网络两种悬浮颗粒物浓度反演模型。结果表明,在泥沙浓度反演模型中,考虑到悬浮颗粒粒径大小,模型的预测精度和模型稳定性均比只考虑浓度对反射率贡献的模型有显著改善,检验误差相比降低 0.15。Lee 等^[9]基于 Bowers 等^[10]的方法,利用 MODIS 月平均数据产品,分析了爱尔兰海悬浮颗粒物浓度、粒径及其动力特征的时空变化。青松等^[11-12]基于另一种中分辨率成像光谱仪 MERIS、环境一号卫星(HJ-1 CCD)与海洋一号卫星(HY-1B)3种数据的波段设置,分别建立了固有光学量吸收系数 $c_p(676)$ 或散射系数 $b_p(676)$ 与悬浮颗粒物粒径之间的关系式^[13-15];以及针对 3 种遥感数据,建立遥感反射率与悬浮颗粒物粒径之间的统计关系^[16-17]。结果表明,方案 2 反演精度优于方案 1。并将方案 2 建立的粒径反演算法应用于 MERIS 遥感数据,反演结果经实测粒径数据检验,中值粒径平均误差为 21.8%。

我国黄渤海属于典型的二类水体,复杂的水体成分、地表径流、泥沙的再悬浮、人类活动等均改变了悬浮颗粒物粒径的时空分布^[18],对黄渤海水域生物、化学和初级生产力等方面产生影响。因此,对黄渤海悬浮颗粒物时空分布的把握有着重要的意义。然而,一方面现场激光粒度仪(LISST)数据鲜有用于反演研究;另一方面前人更多是对 MODIS、MERIS 等卫星的研究,对静止海洋水色卫星(GOCI)研究较少,且目前已有的悬浮颗粒物粒径遥感反演算法在黄、渤海的适用性仍需检验。为此,本文以黄渤海水体的悬浮颗粒物粒径为研究对象,尝试建立基于 GOCI 卫星波段的悬浮颗粒物粒径的遥感反演模型,以实现对该海域悬浮颗粒物粒径分布变化的时空监测。

2 材料与方 法

2.1 研究区域与实测数据

研究区域由渤海与黄海两部分组成如图 1 所示。渤海属于中国的边缘海,具体位置为北纬 $37^{\circ}07' \sim 41^{\circ}$ 、东经 $117^{\circ}35' \sim 121^{\circ}10'$ ^[19]。黄海是太平洋西部的一个边缘海,位于北纬 $32^{\circ} \sim 40^{\circ}$ 、东经 $119^{\circ} \sim 126^{\circ}$ 。

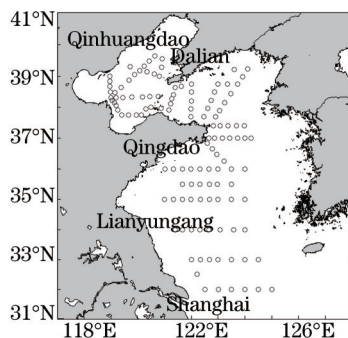


图 1 2014 年黄渤海实测站点分布图

Fig.1 Distribution of sample stations in Bohai and Yellow Sea in 2014 cruise

从 2014 年 5 月和 11 月 246 个站位的黄渤海生物光学观测实验数据集中,选取出与高光谱辐射计测量对应的 47 组数据(剔除掉异常值)作为研究数据集。为了开展悬浮颗粒物粒径遥感反演研究,选取了遥感反射率 R_{rs} 、表层悬浮颗粒物浓度 C_{TSM} 、表层粒子数浓度 N_c 、表层悬浮物体积浓度 V_c 和表层悬浮物中值粒径 D_{50} 的

观测参数。

体积浓度 V_v 、粒子数浓度 N_c 、中值粒径 D_{50} 是由 LISST-100 X (Type C) 现场激光粒度仪测量得到, 测量范围为 2.5~500 μm 。测量的 32 级粒子的浓度总和即为悬浮物的总浓度, 运用 Mie 散射理论, 可以区分 32 个呈对数分布的粒级, 并可给出每个粒级的体积浓度。单位体积内所含粒子个数为

$$V(D) = N(D)(\pi D^3/6), \quad (1)$$

式中 $V(D)$ 表示 32 个不同粒级的体积浓度, D 表示对应的粒径大小, $N(D)$ 表示 32 个不同粒级的粒子数浓度。具体原理及处理步骤可见仪器说明^[20]。

悬浮物浓度 C_{TSM} 采用滤膜法测量。基本方法为, 实验前将滤膜烘干 6~8 h 称重获取空白膜质量记为 w_1 , 实验时将一定体积的水样通过 0.45 μm 的滤膜, 过滤后密封带回实验室处理, 将带回实验室的滤膜再次烘干, 称量留在滤膜上的悬浮颗粒物的重量记为 w_2 , 运用如下公式计算出海水中悬浮颗粒物浓度为

$$C_{\text{TSM}} = \frac{w_2 - w_1 - \Delta w}{V}, \quad (2)$$

式中 C_{TSM} 为悬浮物浓度, 单位为 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, w_2 为过滤后滤膜重量, 单位为 mg , w_1 为过滤前滤膜重量, 单位为 mg , Δw 为空白校正滤膜正值(应为负值), 单位为 mg , V 为水样体积, 单位为 L 。具体测量步骤参见《2007 海洋监测规范》^[21]。

遥感反射率 R_n 由高光谱辐射测量所得, 其测量波段范围 350~800 nm , 共 137 个测量波段。高光谱辐射测量是在风速不大、无云遮挡、光线充足、无波浪破碎且远离船体阴影的条件下进行的, 测量前放入水中预热, 进行压力校正, 测量结果运用专业软件校正提取出遥感反射率数据。

2.2 GOCI 卫星数据

GOCI 是搭载在通信海洋与气象卫星 (COMS) 上的主要传感器。观测时间从北京时间上午 8 点至下午 4 点, 每小时获取一幅空间分辨率为 500 m 、幅宽为 2500 km 的多波段遥感影像^[22]。

GOCI 提供 6 个可见光波段和 2 个近红外波段的数据, 具体的中心波长以及其带宽分别为 412 nm (20 nm)、443 nm (20 nm)、490 nm (20 nm)、555 nm (20 nm)、660 nm (20 nm)、680 nm (10 nm)、745 nm (20 nm)、865 nm (40 nm)。本文选取 2013 年 4 月 16 幅遥感影像利用 GOCI 数据处理系统 (GDPS) 进行处理分析。

2.3 统计分析与误差评价

利用数据处理软件 (Matlab) 对各参数进行统计分析和光谱建模。在所选取的 47 组数据中, 随机选取 32 组数据建模, 15 组数据验证, 使用相对误差 (S_{RE})、绝对误差 (S_{MAPE})、均方根误差 (S_{RMSE})、相关系数 R 、决定系数 R^2 等参数进行精度评价, 公式如下:

$$S_{\text{RE}} = \frac{x - y}{x} \times 100\%, \quad (3)$$

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

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (5)$$

$$S_{\text{RMSE}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{N}}, \quad (6)$$

式中 x 表示实测数据, y 表示反演数据, N 表示样本数, 决定系数为相关系数的平方。

3 结果与分析

3.1 水体生物光学参数

表 1 给出了表层悬浮颗粒物质量浓度 C_{TSM} 、表层悬浮颗粒物粒子数浓度 N_c 、表层悬浮颗粒物体积浓度 V_v 、表层悬浮颗粒物中值粒径 D_{50} 的最小值 (Min)、最大值 (Max)、平均值 (Mean)、标准差 (Std) 与变异系数 C_v (平均值/

标准差)参数统计,均为水体基本性质的反应。4个参数的变异系数都超过了50%,其中悬浮颗粒物中值粒径 D_{50} 变异系数最小,为68.65%, C_{TSM} 的变异系数最大,为199.30%。表层中值粒径 D_{50} 的变化范围最大,且标准差89.31远远超过了其他3个参数。

表1 黄渤海实测悬浮颗粒物数据

Table 1 Description of *in situ* measured suspended particle data in Bohai and Yellow Sea

Parameter	Min	Max	Mean	Std	$C_v / \%$
$C_{TSM} / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	1.38	32.89	11.34	5.96	199.30
$N_c / (10^{10} / \text{m}^3)$	0.70	53.43	10.93	12.53	114.64
$V_c / (\mu\text{L}/\text{L})$	3.97	60.06	17.48	15.09	86.33
$D_{50} / \mu\text{m}$	17.84	291.12	130.09	89.31	68.65

图2为中值粒径 D_{50} 的频数分布图,粒径变化范围为17.84~291.12 μm , 2.5~100.0 μm 粒径占51.1%, 100.0~291.1 μm 粒径占48.94%,表明站位中以小粒径为主。除了有极少数站位频数较大以外,一般频数分布在1~3以内。

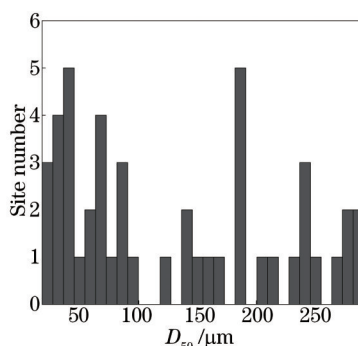


图2 D_{50} 站位频数分布图

Fig.2 Distribution of D_{50} site number

3.2 遥感反射率与粒径相关关系

图3(a)为黄渤海悬浮颗粒物中值粒径 D_{50} 与高光谱辐射计波段以及GOCI波段设置的单波段遥感反射率 $R_{rs}(\lambda)$ 之间的相关系数 R 值,高光谱辐射计波段选取范围为350~804 nm。 D_{50} 与 R_{rs} 在350~730 nm呈负相关关系;400~700 nm波段相关性最好,变化趋势较小, R 的最大负相关值出现在547 nm及554 nm,其值为-0.70。在730~804 nm, D_{50} 与 R_{rs} 为正相关(740~745 nm除外), R 波动较大,且最大正相关值在760 nm波段,其值为0.65。

GOCI选取前7个波段,分别为412、443、490、555、660、680、745 nm。基于GOCI波段设置的 D_{50} 与 R_{rs} 相关性与高光谱辐射计波段设置相关性变化趋势相近,400~700 nm波段变化趋势吻合最佳。555 nm波段达到最大负值(-0.70),490 nm波段次之(-0.66)。

图3(b)为基于高光谱辐射计测量波段的黄渤海悬浮颗粒物中值粒径 D_{50} 与遥感反射率比 $R_{rs}(\lambda_1)/R_{rs}(\lambda_2)$ 之

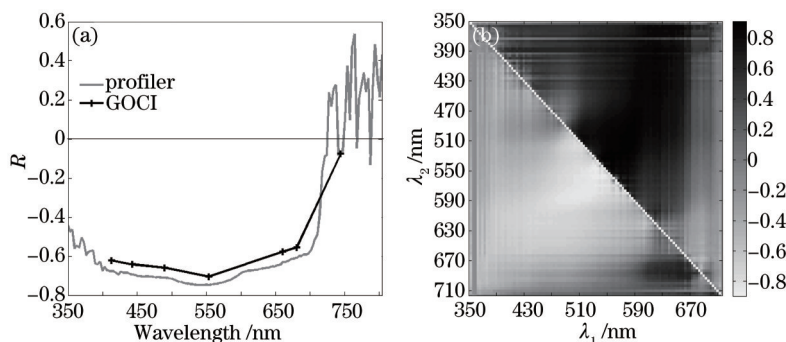


图3 (a) 单波段遥感反射率与 D_{50} 相关性;(b) 波段比遥感反射率与 D_{50} 相关性

Fig.3 (a) Correction between single bands of remote sensing reflectance and D_{50} ;

(b) correction between band ratios of remote sensing reflectance and D_{50}

间的相关系数 R 值。在分析前对数取对数处理,使得数据更接近于正态分布。数据沿对角线呈对称分布,由于 710~804 nm 有缺测值,出现正无穷大相关性,所以研究波段范围选择 350~710 nm 波段。在 350~500 nm 波段其 640 nm 波段以后 R 值开始下降。最好相关性的两个波段比分别为 $R_{rs}(506)/R_{rs}(557)$ 和 $R_{rs}(530)/R_{rs}(553)$, 其 R 值分别为 0.91 和 0.90。

表 2 为基于 GOCI 波段设置的黄渤海颗粒物粒径 D_{50} 与遥感反射率比 $R_{rs}(\lambda_1)/R_{rs}(\lambda_2)$ 之间的相关系数 R 值。最大正相关系数为 0.86,最大负相关系数为 -0.79,敏感波段比为 555 nm/490 nm、490 nm/555 nm,可以看出蓝光波段比较重要。

表 2 黄渤海 D_{50} 与 GOCI 数据 $R_{rs}(\lambda_1)/R_{rs}(\lambda_2)$ 之间的相关性

Table 2 Correction between GOCI band of $R_{rs}(\lambda_1)/R_{rs}(\lambda_2)$ and D_{50} in Bohai and Yellow Sea

Band /nm	412	443	490	555	660	680	745
412	NaN	0.40	0.38	0.71	0.62	0.30	NaN
443	-0.35	NaN	0.21	0.67	0.61	0.24	NaN
490	-0.23	-0.18	NaN	0.86	0.56	0.25	NaN
555	-0.55	-0.60	-0.79	NaN	0.28	0.02	NaN
660	-0.58	-0.56	-0.50	-0.25	NaN	-0.41	NaN
680	-0.46	-0.42	-0.33	0.002	0.50	NaN	NaN
745	-0.08	-0.08	-0.08	-0.07	-0.08	-0.08	NaN

3.3 基于 GOCI 遥感卫星建模

依据 2.3 节波段相关性分析,选取相关性较好的单波段或波段比建立遥感反射率与悬浮颗粒物中值粒径 $\lg D_{50}$ 之间的算法模型,并对反演结果进行分析。

表 3 分别对 4 种波段组合的 4 种模型形式进行了模拟分析,并计算出模型方程、决定系数 R^2 、绝对误差 S_{MAPE} 。相关性分析及绝对误差分析见图 4。

表 3 遥感反射率与 D_{50} 的反演模型精度分析

Table 3 Precision analysis of retrieval model between D_{50} and remote sensing reflection

Band /nm	Model type	Model equation	R^2	$S_{MAPE} /%$
490	Power	$y = -5.056x^{0.26} + 3.34$	0.57	7.68
	Exponential	$y = 2.36 \exp(-23.99x)$	0.56	7.84
	Linear polynomial	$y = -43.48x + 2.319$	0.55	7.99
	Quadratic polynomial	$y = 1997x^2 - 86x + 2.46$	0.57	7.76
555	Power	$y = 301.8x^{-0.001} - 301.5$	0.72	6.35
	Exponential	$y = 2.35 \exp(-20.23x)$	0.67	6.61
	Linear polynomial	$y = -35.51x + 2.31$	0.65	6.95
	Quadratic polynomial	$y = 1189x^2 - 67.96x + 2.43$	0.68	6.55
490 /555	Power	$y = 1.395x^{0.95} + 0.64$	0.68	6.83
	Exponential	$y = 1.059 \exp(0.64x)$	0.67	6.89
	Linear polynomial	$y = 1.33x + 0.71$	0.68	6.83
	Quadratic polynomial	$y = -0.18x^2 + 1.69x + 0.54$	0.68	6.81
555 /490	Power	$y = 1.395x^{-0.95} + 0.64$	0.68	6.83
	Exponential	$y = 3.786 \exp(-0.6x)$	0.65	7.01
	Linear polynomial	$y = -1.074x + 3.16$	0.61	7.59
	Quadratic polynomial	$y = 1.194x^2 - 3.898x + 4.74$	0.70	6.28

图 4 表明,幂函数型在 4 种波段组合中与 D_{50} 的相关性最高,最大决定系数 0.72,指数型与二次函数型变化平缓,一次函数型变化斜率较大,相关性最小。幂函数型的绝对误差最小,变化平缓,一次函数型绝对误差大,变化斜率大,指数型与二次函数型变化平缓,绝对误差中等。4 种单波段或波段比中,555 nm 波段相关系数最好,绝对误差最小。

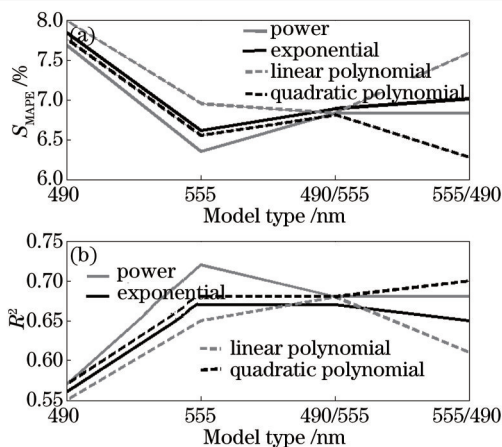


图4 单波段或波段比与 D_{50} 模拟的相关系数与绝对误差

Fig.4 R^2 and S_{MAPE} between single band or band ratio and D_{50}

3.4 基于 GOCI 卫星数据验证

对上述反演算法利用独立的 15 组验证数据进行误差验证。图 5 为针对 4 种波段组合进行的误差验证。单波段验证效果优于波段比, 幂函数型优于其他 3 种函数, GOCI 波段反演 D_{50} 结果如图 6 所示。

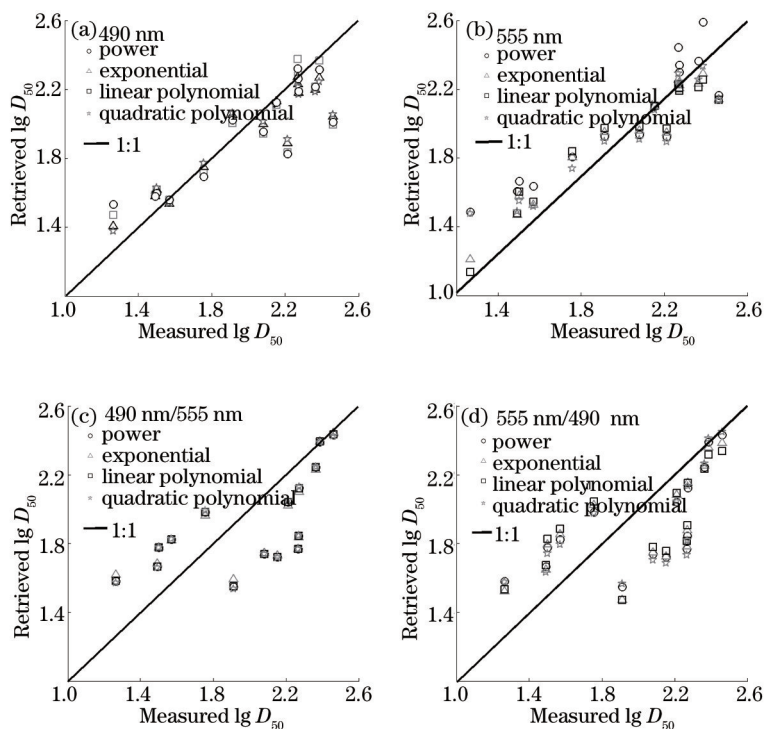


图5 波段反演精度检验

Fig.5 Accuracy test of the band retrieval

图 6 为相对误差 S_{RE} 、绝对误差 S_{MAPE} 、均方根误差 S_{RMSE} 。图 6(a) 中, 单波段 490、555 nm 相对误差波动一致, 波段比 490 nm/555 nm、555 nm/490 nm 相对误差波动一致, 单波段除在 8、11、13 样本间波动较大, 其余数组波动较为平缓且趋近于 0, 波段比变化明显, 波动较大, 除在 11 样本处变化与单波段相反以外, 最大相关系数大于 30%, 其余样本变化趋势与单波段近似。样本 9 处, 4 种波段组合的 4 种模型方程变化趋势一致, 值在 -5%~0% 之间。

图 6(b)、(c) 中, 4 种波段变化趋势一致, 波段比的 S_{MAPE} 与 S_{RMSE} 值均大于单波段, 单波段表现为 555 nm 波段值最小, 验证效果最好, 490 nm 波段次之, 4 种函数模型在 555 nm 波段变化最大, 变化范围 S_{MAPE} 控制在 1.5% 以内, S_{RMSE} 控制在 0.03 以内。

综上所述, 555 nm 波段幂函数类型反演模型与 D_{50} 相关性较高, 验证效果较好, 优于其他情况。

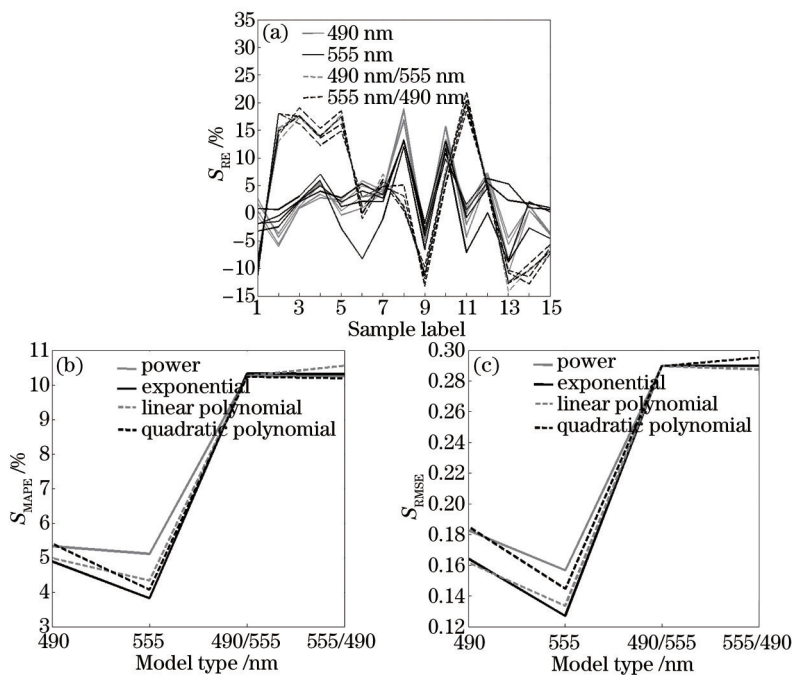


图 6 GOCI 波段反演 D_{50} 。(a) 相对误差; (b) 绝对误差; (c) 均方根误差

Fig.6 Retrieval of D_{50} by GOCI data. (a) S_{RE} ; (b) S_{MAPE} ; (c) S_{RMSE}

3.5 GOCI 卫星数据应用

图 7(a)为从 GOCI 官方网站下载得到 2013 年 4 月 16 幅 L1B 卫星遥感影像,使用 GDPS 内置标准算法计算得到遥感反射率数据,再经过 Matlab 对 16 幅遥感反射率数据根据上述反演的模型进行叠加计算得到黄渤海悬浮颗粒物粒径 D_{50} 空间分布图,图 7(a)为利用上述经验模型反演出的 D_{50} 分布图,图 7(b)为利用 2013 年 6 月 86 个站位数据内插得到的 D_{50} 空间分布图。两者的分布趋势一致,与 Qing 等^[12,23]的分布趋势也一致,但实测数据粒径范围宽于 GOCI 数据。整体看来小粒径悬浮颗粒物主要分布在沿岸及浅海地区,随着沿岸距离的增加,悬浮颗粒粒径也变大。原因可能为:1) 河口区和沿岸水体中无机颗粒物占主要部分,沿岸区海水动力因素对颗粒再悬浮影响较大,使得悬浮颗粒中小粒径所占比例增加;2) 渤海中部大颗粒有机悬浮体增多,颗粒粒径变大,絮凝和生物作用也使得悬浮颗粒粒径变大^[12,24]。

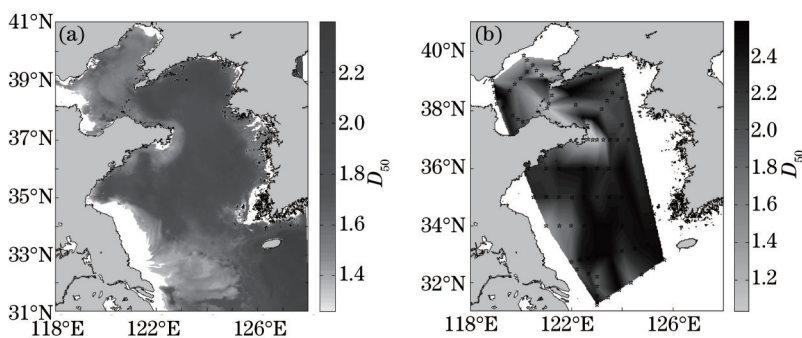


图 7 D_{50} 空间分布图。(a) GOCI 幂函数 555 nm 波段; (b) 实测数据

Fig.7 D_{50} distribution map. (a) GOCI power function with 555 nm band; (b) measured data

4 讨 论

4.1 与已有模型对比

文献[12]利用 MERIS 与 MODIS 两种数据的波段设置,建立了遥感反射率与悬浮颗粒物粒径之间的关系模型,公式如下:

$$\lg D_{50} = a \frac{R_{rs}(560)}{R_{rs}(665)} + b, a = 0.137, b = 0.667. \quad (7)$$

图 8(a)为 555 nm 波段幂律函数型粒径反演精度验证,数据个数 $N=15$,图 8(b)为根据上述模型粒径反演精度验证, S_{MAPE} 、 S_{RMSE} 均小于文献[12]中的算法。出现此反演结果的可能原因包括:1) 所选数据的时空分布不同,其地形、水深、流速等都存在差异;2) 所选取的为总悬浮物浓度(C_{TSM}),而文献[12]中选取的为无机悬浮物浓度(C_{ISM}),虽然黄渤海的悬浮物以无机悬浮物为主,但有机物的存在也会对反演的结果产生影响。

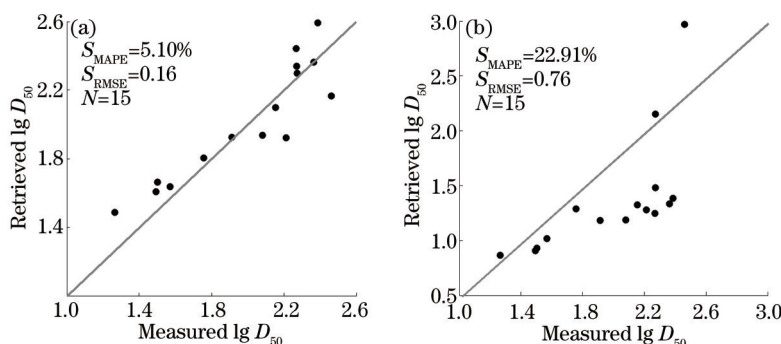


图 8 利用验证数据对模型进行精度验证。(a) 本文模型; (b) 文献[12]的模型

Fig.8 Accuracy test of the model by using validation data. (a) Present model; (b) model in Ref.[12]

4.2 模型误差敏感性分析

通过将模型输入的 15 组遥感反射率验证数据引入 100 组随机误差,随机误差服从均值为 0,标准差为 5%的正态分布。检查模型反演结果的误差波动情况,用以辨别模型对误差的敏感性^[25]。结果表明,模型反演结果 S_{MAPE} 变化波动小于 2%, S_{RMSE} 变化波动小于范围为 0.002,说明模型稳定性较好。

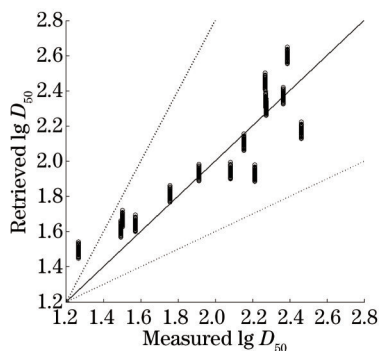


图 9 误差敏感性测试结果

Fig.9 Error sensitivity test result

5 结 论

1) 基于黄渤海的现场实测数据,建立了基于 GOCI 波段的遥感反射率与悬浮颗粒物 D_{50} 反演模型,分别使用 4 种函数模型对 4 种波段组合进行拟合,结果表明 555 nm 波段幂律函数型拟合效果最佳,利用验证数据进行了精度检验和敏感性检验,结果表明模型的精度和稳定性较可靠。

2) 将此反演模型运用到 GOCI 数据,成功反演得出了 D_{50} 分布图,结果显示小粒径悬浮颗粒物主要分布在沿岸及浅海地区,而随着沿岸距离的增加,悬浮颗粒物粒径逐渐变大。

3) 由于研究区域 D_{50} 空间分布特征变化显著,该 D_{50} 反演算法需要更多实测资料进行验证与优化;同时本文对在粒径空间分布与关联因素只做了定性的分析,下一步将结合物理海洋、生物、地质等多学科知识,定量分析风、流、海底地形、絮凝等因素对悬浮颗粒粒径时空变化的影响。

参 考 文 献

1 Fan Hui, Huang Haijun. Spectral signature of case II waters and its relationship with surface suspended solid concentration in the yellow sea and east china sea[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2010, 41(2): 161-166.
 樊 辉, 黄海军. 黄、东海二类水体春季表观光谱特性与表层悬浮体浓度反演模式[J]. 海洋与湖沼, 2010, 41(2): 161-166.
 2 Xing Fei, Wang Yaping, Gao Jianhua, et al.. Seasonal distributions of the concentrations of suspended sediment along Jiangsu coastal

- sea[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2010, 41(3): 459–468.
- 邢 飞, 汪亚平, 高建华, 等. 江苏近岸海域悬沙浓度的时空分布特征[J]. *海洋与湖沼*, 2010, 41(3): 459–468.
- 3 Baker E T, Lavelle J W. The effect of particle size on the light attenuation coefficient of natural suspensions[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1984, 89(C5): 8197–8203.
- 4 Babin M, Morel A, Fournier-Sicre V, *et al.*. Light scattering properties of marine particles in coastal and open ocean waters as related to the particle mass concentration[J]. *Limnology and Oceanography*, 2003, 48(2): 843–859.
- 5 Alpine A E, Cloern J E. Phytoplankton growth rates in a light-limited environment, San Francisco Bay[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 1988, 44: 167–173.
- 6 Li Bogen, Xie Qinchun, Xia Xiaoming, *et al.*. Size distribution of suspended sediment in maximum turbidity zone and its response to tidal dynamics in Jiaojiang River estuary[J]. *Journal of Sediment Research*, 1999, (1): 18–26.
- 李伯根, 谢钦春, 夏小明, 等. 椒江河口最大浑浊带悬沙粒径分布及其对潮动力的响应[J]. *泥沙研究*, 1999, (1): 18–26.
- 7 Wang Aijun, Wang Yaping, Gao Shu, *et al.*. Relationship between suspended sediment grain size and concentration in the Changjiang estuary area during dry season[J]. *Advances in Marine Science*, 2005, 23(2): 159–167.
- 王爱军, 汪亚平, 高 抒, 等. 长江口枯季悬沙粒度与浓度之间的关系[J]. *海洋科学进展*, 2005, 23(2): 159–167.
- 8 Wang Fang, Li Guosheng. Two parameters retrieval models of suspended sediment concentration of Bohai Sea based on MODIS data[J]. *Geographical Research*, 2007, 26(6): 1186–1196.
- 王 芳, 李国胜. 海洋悬浮泥沙二元特征参数 MODIS 遥感反演模型研究[J]. *地理研究*, 2007, 26(6): 1186–1196.
- 9 Van der Lee E M, Bowers D G, Kyte E. Remote sensing of temporal and spatial patterns of suspended particle size in the Irish Sea in relation to the Kolmogorov microscale[J]. *Continental Shelf Research*, 2009, 29(9): 1213–1225.
- 10 Bowers D G, Binding C E, Ellis K M. Satellite remote sensing of the geographical distribution of suspended particle size in an energetic shelf sea[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2007, 27(3): 457–466.
- 11 Qing Song. Remote Sensing research and Application of Salinity and Suspended Particle Size of the Bohai Sea[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2011: 26–69.
- 青 松. 渤海盐度和悬浮颗粒粒径的遥感反演及应用研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2011: 26–69.
- 12 Song Qing, Jie Zhang, Tingwei Cui, *et al.*. Remote sensing retrieval of inorganic suspended particle size in the Bohai Sea[J]. *Continental Shelf Research*, 2014, (73): 64–71.
- 13 Wu Tingting, Qiu Zhongfeng, He Yijun, *et al.*. Retrieval algorithms of diffuse attenuation coefficient in the Yellow Sea, the East China Sea and the Pearl river estuary[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(7): 0701001.
- 吴婷婷, 丘仲锋, 何宜军, 等. 黄东海及珠江口附近海域水体漫衰减系数反演[J]. *光学学报*, 2013, 33(7): 0701001.
- 14 Cui Tingwei, Zhang Jie, Ma Yi, *et al.*. Backscattering coefficient retrieval model for nearshore area of Bohai Sea[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(11): 2041–2045.
- 崔廷伟, 张 杰, 马 毅, 等. 渤海近岸水体后向散射系数反演模型[J]. *光学学报*, 2008, 28(11): 2041–2045.
- 15 Huang Changchun, Li Yunmei, Sun Deyong, *et al.*. Research of scattering spectrum characteristic and formative mechanism of Taihu lake waters[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(5): 0501003.
- 黄昌春, 李云梅, 孙德勇, 等. 太湖水体散射光谱特性及其形成机理研究[J]. *光学学报*, 2011, 31(5): 0501003.
- 16 Huang Changchun, Li Yunmei, Xu Liangjiang, *et al.*. Influence of vertical distribution of water consistent to precision of remote sensing retrieval algorithm[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(11): 1101002.
- 黄昌春, 李云梅, 徐良将, 等. 水色要素垂直分布对其遥感反演算法精度的影响[J]. *光学学报*, 2012, 32(11): 1101002.
- 17 Le Chengfeng, Li Yunmei, Zha Yong, *et al.*. Study on partition of phytoplankton absorption coefficient from total spectral absorption in the Taihu lake[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(11): 3090–3096.
- 乐成峰, 李云梅, 查 勇, 等. 太湖水体浮游藻类吸收系数分离方法研究[J]. *光学学报*, 2010, 30(11): 3090–3096.
- 18 Zeng Ming, Fan Dejiang, Sun Xiaogong, *et al.*. The grain-distribution of the suspended particulate matter in the Huanghe Estuary and its adjacent area in water[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2010, (4): 129–138.
- 曾 明, 范德江, 孙效功, 等. 冬季黄河河口及邻近海域悬浮体粒级组成和分布研究[J]. *海洋学报*, 2010, (4): 129–138.
- 19 Feng Shizuo, Li Fengqi, Li Shaojing. Introduction to Marine Science[M]. Beijing: Higher Education Press, 1999.
- 冯士筵, 李凤岐, 李少菁. *海洋科学导论*[M]. 北京: 高等教育出版社, 1999.
- 20 LISST-100X Particle Size Analyzer, User's Manual Version 5.0 [S]. Sequoia Scientific, inc, 2013.
- 21 National Standardization Technical Committee. GB 17378-4-2007. The specification for marine monitoring-part 4: Seawater analysis

- GB17378~4-2007[S]. Beijing: China Standard Press, 2007.
- 中华人民共和国国家质量技术监督局. GB 17378~4-2007. 海洋监测规范 第4部分: 海水分析. GB 17378~4-2007[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- 22 Yu Xiaolin. Retrieval of suspended matter concentration and reconstruction of missing data based on GOCI in Bohai and Yellow Sea[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2013: 10-11.
于小淋. 基于GOCI的渤海悬浮物浓度遥感反演及缺失数据填补研究[D]. 青岛中国海洋大学, 2013: 10-11.
- 23 Yu Lanlan, Jiang Wensheng. Seasonal variations in the distributions of suspended fineparticulate matter in the Yellow Sea and the east China Sea[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2011, 42(4): 474-481.
虞兰兰, 江文胜. 黄、东海悬浮细颗粒物浓度和粒径分布变化研究[J]. *海洋与湖沼*, 2011, 42(4): 474-481.
- 24 Zhou Liangyong, Li Anlong, Gong Shuyun, *et al.*. Spatial distribution and grain-size characteristics of suspended matters in surface water of Yellow river mouth[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2007, 27(5): 33-38.
周良勇, 李安龙, 龚淑云, 等. 黄河口附近海域表层悬浮体分布及粒度特征[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2007, 27(5): 33-38.
- 25 Cui Tingwei, Zhang Jie, Ma Yi, *et al.*. The study on the distribution of suspended particulate matter in the Bohai Sea by remote sensing [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2009, 31(35): 10-17.
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*, 2009, 31(35): 10-17.

栏目编辑: 史 敏