

# 基于静止轨道水色卫星数据的渤海总吸收系数 遥感反演和逐时变化研究

牟 冰<sup>1</sup> 崔廷伟<sup>2\*</sup> 秦 平<sup>1</sup> 刘荣杰<sup>2</sup> 郑荣儿<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国海洋大学信息科学与工程学院, 山东 青岛 266100

<sup>2</sup>国家海洋局第一海洋研究所, 山东 青岛 266061

**摘要** 渤海是我国的半封闭内海,受陆源影响显著,水体光学性质复杂多变,静止轨道水色卫星(GOCI)的高时间分辨率数据为研究渤海水体总吸收系数的时空变化特征,特别是逐时变化提供了可能。针对GOCI波段设置,利用实测数据建立了基于遥感反射率波段比值的412、443、555 nm波段渤海总吸收系数遥感反演模型,经独立实测数据检验,模型反演值与实测值的相关系数大于0.8,平均相对误差(APD)小于13%,中值相对误差小于9%,优于已有典型算法(精度提高约10%);经独立现场-卫星时空匹配数据检验,基于该模型和GOCI卫星数据的总吸收系数遥感反演平均相对误差在35%以内。基于2015年5月4日1天8景的GOCI影像和所建立的模型,研究了渤海总吸收系数的逐时变化特征。结果表明,8:30—15:30期间总吸收系数变幅主要分布范围是0.2~0.3 m<sup>-1</sup>,最大变幅可达到0.8 m<sup>-1</sup>,变幅极大值主要分布在辽东湾、渤海湾和莱州湾近岸海域。结合潮汐数据的分析发现,辽东湾、渤海湾北部总吸收系数与潮高的逐时变化具有较好的一致性,总吸收系数极小值出现时刻滞后于低潮时刻0~1.5 h;莱州湾西部总吸收系数与潮高逐时变化呈明显负相关性;渤海湾南部、莱州湾东部总吸收系数与潮高变化未见显著相关性。

**关键词** 海洋光学; 总吸收系数; 遥感反演; 静止轨道水色卫星

中图分类号 P733.3

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201636.0401003

## Remote Sensing Retrieval and Hourly Variation Analysis of Total Absorption Coefficient in the Bohai Sea with Geostationary Ocean Color Imager

Mu Bing<sup>1</sup> Cui Tingwei<sup>2</sup> Qin Ping<sup>1</sup> Liu Rongjie<sup>2</sup> Zheng Ronger<sup>1</sup>

<sup>1</sup>College of Information Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao, Shandong 266100, China

<sup>2</sup>The First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Qingdao, Shandong 266061, China

**Abstract** The optical properties of the semi-closed Bohai Sea are complex due to significant terrigenous influence. The high temporal resolution data from geostationary ocean color imager (GOCI) makes it possible to explore the temporal and spatial variability characteristics in the Bohai Sea, especially on the hourly temporal scale. A remote sensing algorithm is developed to retrieve the total absorption coefficients at 412, 443, 555 nm in the Bohai Sea based on the GOCI band ratio of remote sensing reflectance. The algorithm is validated with independent field data. The correlation coefficient between the retrieved and measured data is higher than 0.8, the average absolute percentage difference (APD) is less than 13%, and the median absolute percentage difference is less than 9%. The performance is better than that of previous typical algorithms (improvement over 10%). Based on the independent field-satellite match-up data, the APD between the retrieved and measured data is less than 35%. On the basis of the GOCI image

收稿日期: 2015-11-05; 收到修改稿日期: 2015-12-21

基金项目: 中央级科研院所基本科研业务费(GY2014T03)、全球变化与海气相互作用专项(GASI-03-03-01-01)、国家自然科学基金青年基金(41506204)

作者简介: 牟 冰(1978—),女,博士,讲师,主要从事海洋光学和水色遥感等方面的研究。E-mail: mubing@ouc.edu.cn

\*通信联系人。E-mail: cuitingwei@fio.org.cn

(May 4<sup>th</sup>, 2015) and the new model, the spatial and hourly variation characteristics in the Bohai Sea are discussed. The results show that diurnal variability magnitude is mainly 0.2~0.3  $\text{m}^{-1}$ , and the maximum can reach 0.8  $\text{m}^{-1}$ . High diurnal variability values are found mainly in the Liaodong Bay, the Bohai Bay and the Laizhou Bay. The total absorption coefficient is analyzed together with tide data, and the variations are generally consistent with the corresponding tidal height variations in the Liaodong Bay and the north of the Bohai Bay, though the minimal total absorption coefficient appears about 0~1.5 h later than the lowest tide moment. The total absorption coefficient shows significant negative correlation with tide height in the west of the Laizhou Bay. The total absorption coefficient and tidal height have no obvious correlation in the south of the Bohai Bay and the east of the Laizhou Bay.

**Key words** oceanic optics; total absorption coefficient; remote sensing retrieval; geostationary ocean color imager

**OCIS codes** 010.4450; 010.1030; 010.0280

## 1 引 言

总吸收系数是重要的海洋光学参量<sup>[1-3]</sup>,包含了叶绿素、悬浮物、黄色物质等水色组分信息<sup>[4]</sup>,直接影响光在海水中的衰减和水体透明度。因此,总吸收系数的准确反演可为进一步获取众多水色参量奠定基础,其一日内逐时变化的研究有助于深入理解光学性质复杂水体的水色信息的逐时变化特征。

渤海是我国的半封闭内海,受陆源影响显著,水体光学性质复杂多变<sup>[5]</sup>,逐时变化特征值得关注,但是传统极轨水色卫星传感器获取的资料,无法满足一日内水色变化的研究需求。静止轨道水色卫星(GOCI)可实现小时量级的观测,为渤海水色逐时变化研究提供了宝贵的数据支持<sup>[6-7]</sup>。目前,基于GOCI的悬浮物浓度、藻华逐时变化研究已有报道<sup>[8-11]</sup>,但是尚未发展针对GOCI波段设置的渤海总吸收系数反演模型,其逐时变化的研究也尚未开展。

本文针对GOCI波段设置,基于实测数据建立了渤海总吸收系数遥感反演经验模型,利用独立数据对模型精度进行了检验,并与已有经典算法进行了对比;基于GOCI逐时影像,以443 nm总吸收系数为例,利用所建立的经验模型分析了渤海水体吸收性质的逐时变化特征。

## 2 数据和方法

### 2.1 实测数据

实测数据获取自2005年和2012年的现场观测实验。其中,2005年的数据用于模型建立和检验,2012年的数据用于GOCI卫星反演结果检验。

2005年数据获取自6月、8月和9月,实测站位主要分布在莱州湾、渤海湾、辽东湾,基本覆盖了渤海光学性质复杂的水域,经数据质量控制,获取了总吸收系数和遥感反射率匹配数据77组。2012年数据获取自9月,主要分布在辽东湾,共27组总吸收系数数据。站位分布如图1所示。

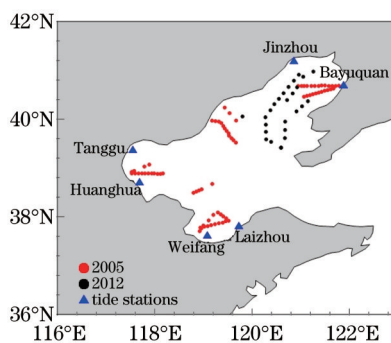


图1 渤海实测数据站位分布图

Fig.1 Locations of measurement stations in the Bohai Sea

利用便携式地物光谱仪(ASD,光谱分辨率为3 nm),参照美国国家航空和宇宙航行局(NASA)海洋光学测量规范<sup>[12]</sup>进行了海面遥感反射率 $R_s(\lambda)$ 光谱测量。光谱仪的观测天顶角 $\theta=40^\circ$ ,方位角 $\varphi=135^\circ$ 。遥感反射率

计算公式为

$$R_{rs}(\lambda) = \frac{L_w(\lambda)}{E_d(0^+, \lambda)} = \frac{[L_t(\lambda) - \rho L_{sky}(\lambda)] \rho_p}{\pi L_p} \quad (1)$$

式中  $L_w(\lambda)$  为离水辐亮度,  $E_d(0^+, \lambda)$  为刚好在水表面之上的向下辐照度。  $L_t$ 、 $L_{sky}$  和  $L_p$  分别为光谱仪面向水体、天空和标准板的测量值,  $\rho$  为海气界面天空辐亮度反射率, 阴天时取 0.028, 晴天时根据观测几何和风速确定<sup>[13]</sup>。

总吸收系数利用 Wetlabs 公司生产的 AC9 进行测量。每次现场实验开始前, 按照仪器使用手册在实验室内进行仪器的空气定标和纯水定标。实验过程中, 利用同步测量获取的海水温盐数据进行 AC9 数据的温盐校正, 利用基线校正方法进行散射校正<sup>[14]</sup>。

GOCI 对应波段处的水体遥感反射率光谱如图 2(a) 所示 [圆圈表示平均值, 误差棒表示标准差, 图 2(a) 和 (b) 是 2005 年的数据, 图 2(c) 是 2012 年的数据], 从中可以看出渤海具有复杂二类水体的光谱特征, 由总吸收系数光谱曲线图 2(b) 和图 2(c) 可发现 440 nm 波段的变化最为显著。

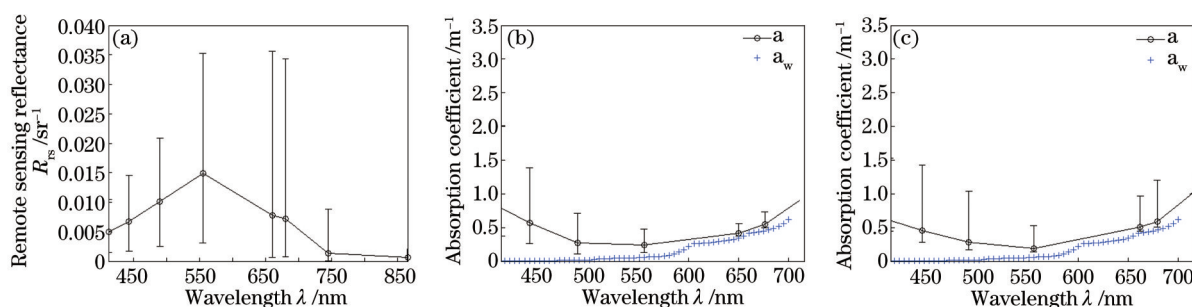


图 2 实测数据。(a) 遥感反射率(2005); (b) 总吸收系数(2005); (c) 总吸收系数(2012)

Fig.2 Measured data. (a) Remote sensing reflectance (2005); (b) total absorption coefficient (2005); (c) total absorption coefficient (2012)

## 2.2 卫星数据及其处理

GOCI L1B 卫星数据获取自韩国海洋卫星中心, 数据列表如表 1 所示, 利用 GOCI 数据处理系统(GDPS)软件处理生成遥感反射率数据, 用于总吸收系数的反演。

表 1 GOCI 数据  
Table 1 GOCI data

File name	Date	Purpose
COMS_GOCI_L1B_GA_20150504001638.he5		
COMS_GOCI_L1B_GA_20150504011638.he5		
COMS_GOCI_L1B_GA_20150504021638.he5		
COMS_GOCI_L1B_GA_20150504031638.he5		
COMS_GOCI_L1B_GA_20150504041638.he5	May 4, 2015	Hourly variation of total absorption coefficient
COMS_GOCI_L1B_GA_20150504051638.he5		
COMS_GOCI_L1B_GA_20150504061638.he5		
COMS_GOCI_L1B_GA_20150504071638.he5		
COMS_GOCI_L1B_GA_20120914031643.he5	September 14, 2012	Retrieval validation with field-satellite match-up data
COMS_GOCI_L1B_GA_20120916021641.he5	September 16, 2012	Retrieval validation with field-satellite match-up data
COMS_GOCI_L1B_GA_20120916041641.he5		

卫星与实测数据的时空匹配窗口是  $\pm 0.5$  h 和  $3 \text{ pixel} \times 3 \text{ pixel}$ , 具体方法见文献[5], 共得到 3 组 GOCI 卫星-实测匹配数据。

## 3 总吸收系数遥感反演

### 3.1 模型建立及检验

将 2005 年实测数据按总吸收系数大小排列, 每隔两组数据取一组作为检验数据, 构建了检验数据集(25

组),其余数据构成建模数据集(52组)<sup>[15-17]</sup>。通过建模数据集的相关性分析,发现 660 nm 与 490 nm 波段遥感反射率比值与总吸收系数具有明显的相关性。基于该波段比值建立的总吸收系数反演算法为

$$\lg[a(\lambda)] = \alpha_\lambda \times \lg\left[\frac{R_{rs}(660)}{R_{rs}(490)}\right] + \beta_\lambda, \quad (2)$$

式中  $R_{rs}(660)$  和  $R_{rs}(490)$  为波长 660 nm 和 490 nm 处的遥感反射率,  $\alpha(\lambda)$  为波长  $\lambda$  ( $\lambda=412,443,555$  nm) 处的总级吸收系数,  $\alpha_\lambda$ ,  $\beta_\lambda$  为拟合系数。选取平均相对误差( $E_{APD}$ ),中值相对误差( $E_{MPD}$ )和均方根误差( $E_{RMSE}$ ),相关系数平方( $R^2$ )作为模型精度评价参数,具体算法为

$$E_{APD} = \left[ \sum_{i=1}^n \text{abs}\left(\frac{y'_i - y_i}{y_i}\right) \right] / n, \quad (3)$$

$$E_{MPD} = \text{median}\left[ \text{abs}\left(\frac{y'_i - y_i}{y_i}\right) \right], \quad (4)$$

$$E_{RMSE} = \text{sqrt}\left\{ \left[ \sum_{i=1}^n (y'_i - y_i)^2 \right] / (n - 1) \right\}, \quad (5)$$

$$R^2 = \frac{\left[ \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})(y'_i - \bar{y}') \right]^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \sum_{i=1}^n (y'_i - \bar{y}')^2}, \quad (6)$$

式中  $y_i$ ,  $y'_i$  和  $n$  分别代表实测值、反演值和样本个数。

基于建模数据集和检验数据集的模型评估结果如表 2 和图 3 所示。总体来看,总吸收系数反演值与实测值具有较好的一致性,412、443、555 nm 波段总吸收系数反演结果的平均相对误差均在 13%之内,中值相对误差小于 9%,412 nm 与 443 nm 反演值与实测值的相关性均高于 0.9。

表 2 基于新模型的总吸收系数反演值与实测值的统计结果

Table 2 Statistics of retrieved and measured total absorption coefficients with the new model

	Modeling data				Testing data			
	$E_{APD} / \%$	$E_{MPD} / \%$	$E_{RMSE} / \text{m}^{-1}$	$R^2$	$E_{APD} / \%$	$E_{MPD} / \%$	$E_{RMSE} / \text{m}^{-1}$	$R^2$
$a(412)$	9.2	7.6	0.12	0.95	11.4	7.7	0.10	0.93
$a(443)$	9.6	8.8	0.38	0.95	11.8	8.5	0.28	0.92
$a(555)$	12.0	7.9	0.09	0.85	12.7	8.0	0.07	0.82

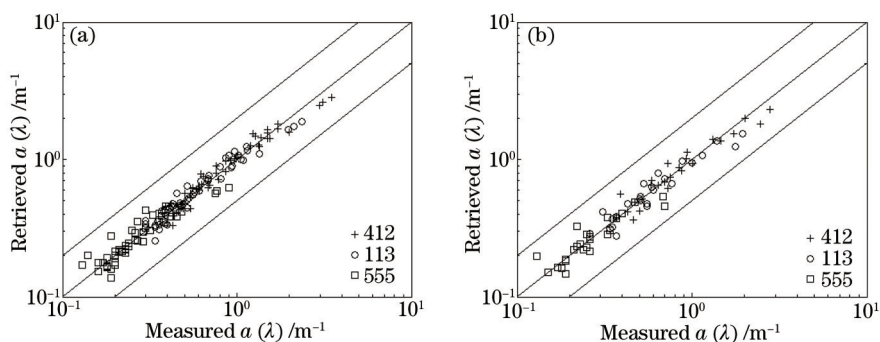


图 3 基于新模型的总吸收系数反演值与实测值的散点图。(a) 建模数据;(b) 检验数据

Fig.3 Scatter plots of retrieved and measured total absorption coefficients with the new model. (a) Modeling data;

(b) testing data

### 3.2 与已有典型方法的比较

遴选现有的典型总吸收系数反演算法:QAA-5 半分析算法(QAA-5)<sup>[18]</sup>,基于红光波段和近红外波段的 QAA 修正算法(QAA-Com)<sup>[19]</sup>和基于蓝绿波段比的经验模型(blue-green BR)<sup>[20]</sup>,利用上述建模数据集与检验数据集,分别进行渤海总吸收系数的反演。

QAA-5算法以555 nm为参考波长;由于QAA-5的波段设置不是针对GOCI的,该算法的输入(667 nm)与GOCI波段(660 nm和680 nm)不能完全对应,因此进行了近似:

$$r_{rs}(667) \approx \frac{r_{rs}(680) + r_{rs}(660)}{2}, \quad (7)$$

式中 $r_{rs}$ 为水面之下的遥感反射率。QAA-Com算法以680 nm作为参考波长。Blue-Green BR算法是经验方法,因此其经验公式系数利用建模数据集重新进行了标定。

基于QAA-5、QAA-Com和blue-green BR算法的总吸收系数反演结果如表3~5所示,blue-green BR算法的反演值与实测值的平均相对误差在18%~28%之间,中值相对误差在14%~22%之间,各波段相关系数均低于0.7;基于QAA-5和QAA-Com算法得到的总吸收系数反演值与实测值的平均相对误差和中值相对误差基本在20%左右。上述三种算法反演值与实测值的散点图如图4~6所示,QAA-5与QAA-Com算法的反演结果总体以低估态势为主,高值区低估更为显著,最大反演误差可达50%;与之相比,blue-green BR算法的反演结果更为离散。总体来看,新模型的反演算法精度优于上述典型算法。

表3 基于QAA-5算法的总吸收系数反演值与实测值的统计结果

Table 3 Statistics of retrieved and measured total absorption coefficients with QAA-5 algorithm

	Modeling data				Testing data			
	$E_{APD} / \%$	$E_{MPD} / \%$	$E_{RMSE} / m^{-1}$	$R^2$	$E_{APD} / \%$	$E_{MPD} / \%$	$E_{RMSE} / m^{-1}$	$R^2$
$a(412)$	19.6	17.9	0.37	0.87	20.3	18.7	0.31	0.91
$a(443)$	17.8	15.6	0.22	0.88	19.5	18.8	0.23	0.91
$a(555)$	20.4	22.4	0.08	0.85	22.2	20.8	0.09	0.85

表4 基于QAA-Com算法的总吸收系数反演值与实测值的统计结果

Table 4 Statistics of retrieved and measured total absorption coefficients with QAA-Com algorithm

	Modeling data				Testing data			
	$E_{APD} / \%$	$E_{MPD} / \%$	$E_{RMSE} / m^{-1}$	$R^2$	$E_{APD} / \%$	$E_{MPD} / \%$	$E_{RMSE} / m^{-1}$	$R^2$
$a(412)$	20.0	18.0	0.41	0.94	22.2	20.4	0.41	0.95
$a(443)$	19.4	18.4	0.28	0.93	21.9	21.6	0.31	0.92
$a(555)$	24.3	24.2	0.12	0.86	26.5	29.0	0.12	0.66

表5 基于blue-green BR算法的总吸收系数反演值与实测值的统计结果

Table 5 Statistics of retrieved and measured total absorption coefficients with blue-green BR algorithm

	Modeling data				Testing data			
	$E_{APD} / \%$	$E_{MPD} / \%$	$E_{RMSE} / m^{-1}$	$R^2$	$E_{APD} / \%$	$E_{MPD} / \%$	$E_{RMSE} / m^{-1}$	$R^2$
$a(412)$	28.2	21.8	0.39	0.58	23.0	20.6	0.34	0.69
$a(443)$	25.4	18.3	0.54	0.59	22.2	20.8	0.54	0.68
$a(555)$	22.1	14.4	0.18	0.44	18.5	15.9	0.16	0.60

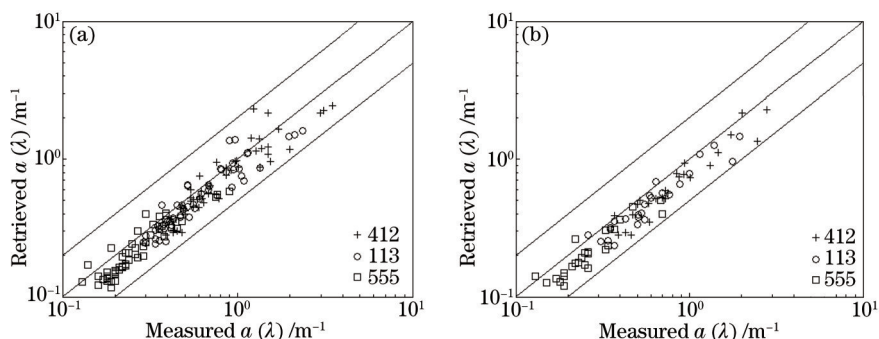


图4 基于QAA-5算法的总吸收系数反演值与实测值的散点图。(a)建模数据;(b)检验数据

Fig. 4 Scatter plots of retrieved and measured total absorption coefficients with QAA-5 algorithm.

(a) Modeling data; (b) testing data

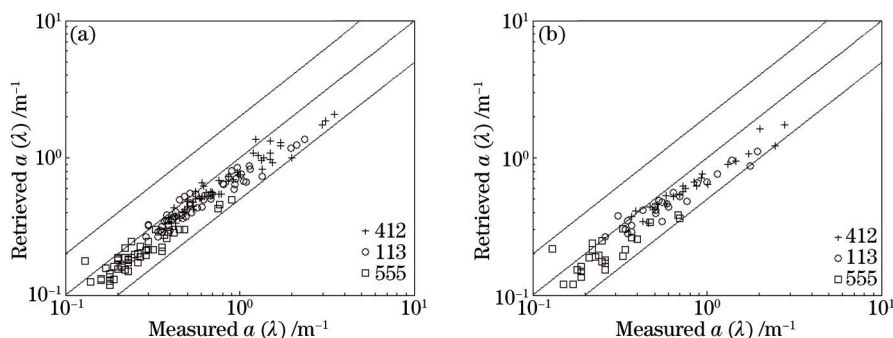


图5 基于QAA-Com算法的总吸收系数反演值与实测值的散点图。(a)建模数据;(b)检验数据

Fig. 5 Scatter plots of retrieved and measured total absorption coefficients with QAA-Com algorithm. (a) Modeling data; (b) testing data

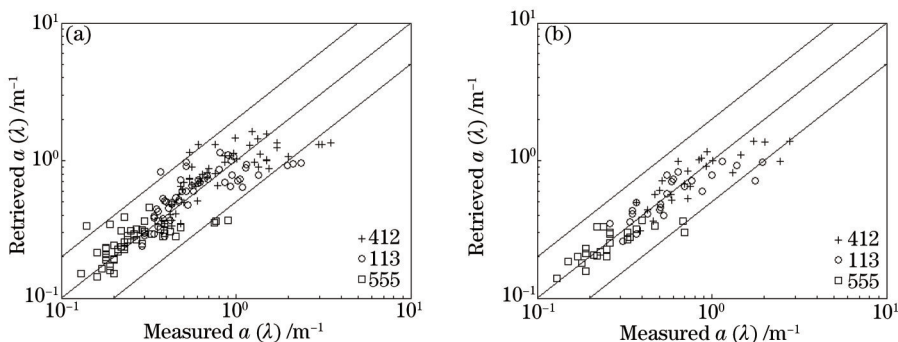


图6 基于blue-green BR算法的总吸收系数反演值与实测值的散点图。(a)建模数据;(b)检验数据

Fig.6 Scatter plots of retrieved and measured total absorption coefficients with glue-green BR algorithm. (a) Modeling data; (b) testing data

### 3.3 基于现场-卫星同步数据的模型检验

基于2012年的卫星-实测匹配数据,利用所建立的总吸收系数模型由GOCI卫星数据反演了渤海总吸收系数,其与实测值的比对结果如图7所示。三个波段的反演值与实测值的平均相对误差均在35%以内,该误差明显大于模型自身的误差(约15%,见3.1节),其原因是利用GDPS进行GOCI大气校正处理时引入了额外的误差。这与朱建华等<sup>[21]</sup>在渤海辽东湾海域的GOCI大气校正精度评估结果一致,GDPS得到的490~660 nm波段GOCI遥感反射率与实测值的平均相对误差为15%~25%。

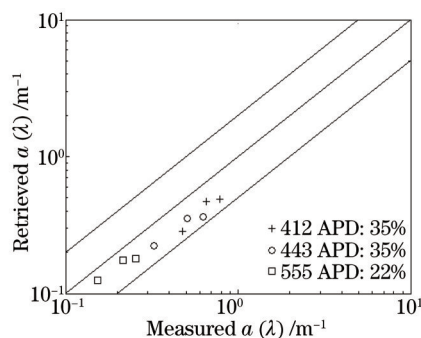


图7 基于GOCI数据的总吸收系数反演值与实测值的散点图

Fig.7 Scatter plots of retrieved and measured total absorption coefficients with GOCI data

## 4 渤海总吸收系数逐时变化

基于GOCI逐时影像(2015年5月4日)和所建立的总吸收系数遥感反演算法研究了渤海总吸收系数逐时变化特征。

逐时的 $a(443)$ 总吸收系数空间分布以及不同吸收水体的面积占比统计结果如图8和9所示。总体来看,

渤海总吸收系数的空间分布呈现近岸高、离岸低的态势;渤海总吸收系数小于  $0.5 \text{ m}^{-1}$  的海域面积占比在 40%~60%,从 8:30—15:30,该占比大致经历了先增加后减少的过程;总吸收系数的高值区(图 8 中红色区域)主要分布在渤海湾、莱州湾和辽东湾,高吸收水体(吸收系数大于  $1.5 \text{ m}^{-1}$ )面积占比总体来看较小(约 5%),且逐时变化不显著。

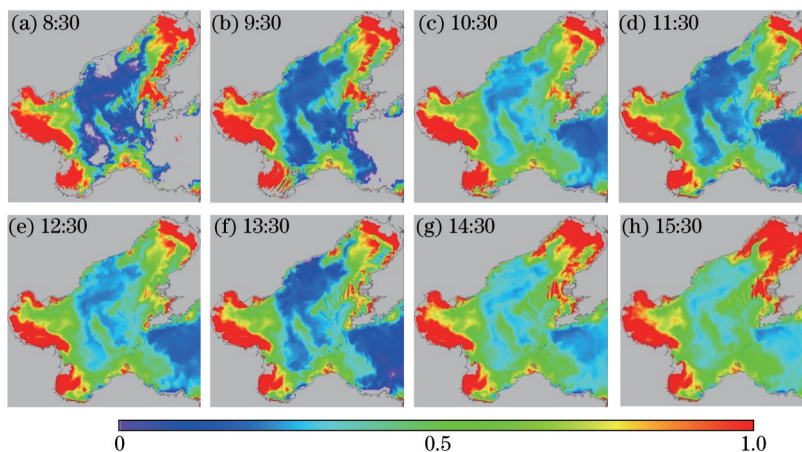


图 8 基于 GOCI 逐时影像反演的渤海  $a(443)$  空间分布。(a) 8:30; (b) 9:30; (c) 10:30; (d) 11:30; (e) 12:30; (f) 13:30; (g) 14:30; (h) 15:30  
Fig.8  $a(443)$  spatial distribution in the Bohai Sea retrieved from GOCI hourly images. (a) 8:30; (b) 9:30; (c) 10:30; (d) 11:30; (e) 12:30; (f) 13:30; (g) 14:30; (h) 15:30

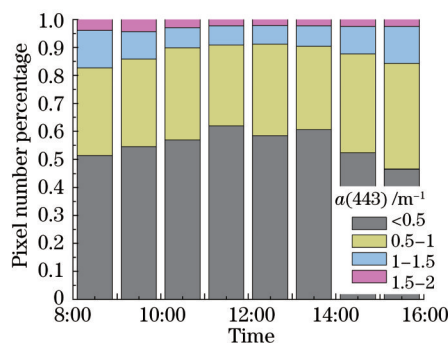


图 9 不同吸收水体的面积占比逐时变化

Fig.9 Hourly area-ratio variation of water with different total absorption coefficients

渤海  $a(443)$  变幅(定义为当日遥感观测的最大值与最小值之差)的空间分布及其统计直方图如图 10(a)和 (b)所示,  $a(443)$  变幅大多在  $0.2\sim 0.3 \text{ m}^{-1}$  之间,变幅大的区域主要分布在辽东湾、渤海湾和莱州湾近岸海域,最大变幅可达到  $0.8 \text{ m}^{-1}$  以上。由图 10(c)和(d)可知,渤海大部分海域  $a(443)$  最大值的出现时刻为 15:30,而渤海湾南部和莱州湾的最大值出现时刻大多在 11:00 之前。

针对辽东湾、渤海湾、莱州湾,选取了 6 个典型验潮站:位于辽东湾东部和西部的鲅鱼圈和锦州港、位于渤海湾北部和南部的塘沽和黄骅港,位于莱州湾西部和东部的潍坊港和莱州港(站位分布如图 1 所示)。提取各验潮站附近海域的  $a(443)$ ,结果如图 11 所示。鲅鱼圈、锦州港和塘沽验潮站的  $a(443)$  与潮高变化总体具有较好一致性,  $a(443)$  最小值的出现时刻滞后低潮时刻  $0\sim 1.5 \text{ h}$ ,如图 11(a)、11(b)和 11(d)所示。黄骅港和莱州港验潮站总吸收系数与潮汐变化规律不显著,如图 11(e)和(f)所示。潍坊港潮汐与总吸收系数变化呈明显的负相关性,如图 11(c)所示。

## 5 结 论

针对 GOCI 波段设置,利用实测数据建立了基于遥感反射率波段比值的 412、443、555 nm 波段的渤海总吸收系数遥感反演模型,经独立实测数据检验,模型反演值与实测值的相关系数大于 0.8,平均相对误差小于 13%,中值相对误差小于 9%,优于已有典型算法(精度提高约 10%);经独立现场-卫星匹配数据检验,基于本

模型和 GOCI 卫星数据的总吸收系数遥感反演平均相对误差在 35% 以内。

基于 2015 年 5 月 4 日 1 天 8 景的 GOCI 影像和所建立的模型,研究了渤海总吸收系数的逐时变化特征,结果表明 8:30—15:30 期间总吸收系数变幅主要分布范围是 0.2~0.3  $m^{-1}$ ,最大变幅可达 0.8  $m^{-1}$ ,变幅极大值主要分布在辽东湾、渤海湾和莱州湾近岸海域。结合潮汐数据的分析发现,辽东湾、渤海湾北部总吸收系数的逐时变化与潮高具有较好的一致性,总吸收系数极小值出现时刻滞后于低潮时刻 0~1.5 h;莱州湾西部总吸收系数与潮高逐时变化呈明显负相关性;渤海湾南部、莱州湾东部海域总吸收系数与潮高变化未见显著相关性。

未来还需要更多实测数据进一步检验此反演算法,特别是基于现场-GOCI 卫星同步数据的检验,以增强检验结果的时空代表性;另外,仅以 2015 年 5 月 4 日为例初步分析了渤海总吸收系数的逐时变化特征,未来需针对不同季节、不同潮汐条件等开展深入研究,以揭示总吸收系数逐时变化规律及其驱动机制。

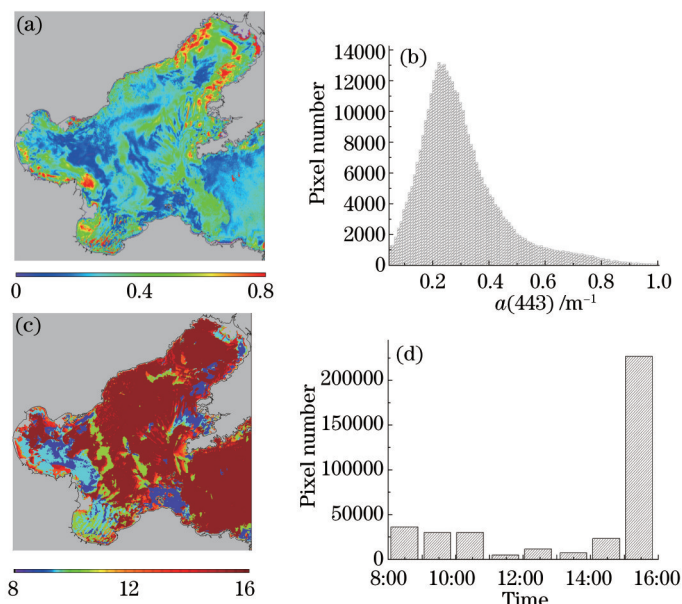


图 10 渤海  $a(443)$  变化的统计(8:30—15:30)。(a)  $a(443)$  变幅空间分布; (b) 图 10(a) 的统计直方图;

(c)  $a(443)$  最大值出现时刻的空间分布; (d) 图 10(c) 的统计直方图

Fig.10 Statistics of  $a(443)$  variation in the Bohai Sea (8:30—15:30). (a) Spatial distribution of  $a(443)$  variation range; (b) statistical histogram of Fig.10(a); (c) spatial distribution of  $a(443)$  when the maximum appears; (d) statistical histogram of Fig.10(c)

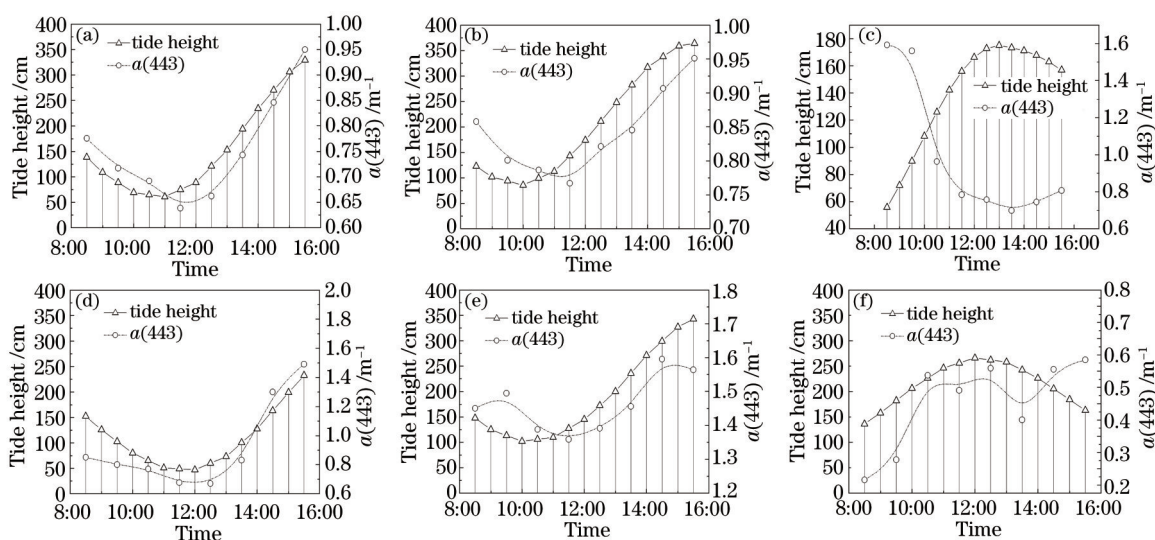


图 11 典型验潮站潮高和  $a(443)$  逐时变化。(a) 鲅鱼圈; (b) 塘沽; (c) 潍坊港; (d) 锦州港; (e) 黄骅港; (f) 莱州港

Fig.11 Tide height and  $a(443)$  hourly change at typical tide gauge stations. (a) Bayuquan; (b) Tanggu; (c) Weifang Port;

(d) Jinzhou Port; (e) Huanghua Port; (f) Laizhou Port



致谢 感谢国家海洋技术中心朱建华研究员提供的2012年渤海现场观测数据。

## 参 考 文 献

- 1 Ioannou I, Gilerson A, Gross B, *et al.*. Deriving ocean color products using neural networks[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2013, 134: 78–91.
- 2 Zheng G M, Stramski D, Reynolds R A. Evaluation of the quasi-analytical algorithm for estimating the inherent optical properties of seawater from ocean color: comparison of arctic and lower-latitude waters[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 155: 194–209.
- 3 Loisel H, Stramski D, Mitchell B G, *et al.*. Comparison of the ocean inherent optical properties obtained from measurements and inverse modeling[J]. *Applied Optics*, 2001, 40(15): 2384–2397.
- 4 Hao Yanling, Cao Wenxi, Ma Yi, *et al.*. Analysis of inherent optical properties in the occurrence and declination of a red tide[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(11): 1101004.  
郝艳玲, 曹文熙, 马毅, 等. 赤潮生消过程中的水体固有光学性质分析[J]. *光学学报*, 2011, 31(11): 1101004.
- 5 Cui T W, Zhang J, Groom S, *et al.*. Validation of MERIS ocean-color products in the Bohai Sea: a case study for turbid coastal waters[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(10): 2326–2336.
- 6 Choi J K, Park Y J, Ahn J H, *et al.*. GOCI, the world's first geostationary ocean color observation satellite, for the monitoring of temporal variability in coastal water turbidity[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2012, 117(C9): C09004.
- 7 Ruddick K, Neukermans G, Vanhellemont Q, *et al.*. Challenges and opportunities for geostationary ocean colour remote sensing of regional seas: a review of recent results[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 146: 63–76.
- 8 Choi J K, Park Y J, Lee B R, *et al.*. Application of the geostationary ocean color imager (GOCI) to mapping the temporal dynamics of coastal water turbidity[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 146: 24–35.
- 9 Choi J K, Min J E, Noh J H, *et al.*. Harmful algal bloom (HAB) in the East Sea identified by the geostationary ocean color imager (GOCI) [J]. *Harmful Algae*, 2014, 39: 295–302.
- 10 Lou X L, Hu C M. Diurnal changes of a harmful algal bloom in the East China Sea: observations from GOCI[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 140: 562–572.
- 11 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.
- 12 Mueller J L, Fargion G S, McClain C R. Ocean optics protocols for satellite ocean color sensor validation[M]. Washington: National Aeronautics and Space Administration, 2002.
- 13 Mobley C D. Estimation of the remote-sensing reflectance from above-surface measurements[J]. *Applied Optics*, 1999, 38(36): 7442–7455.
- 14 Zhang Xuan, Tao Bangyi, He Xianqiang. Data processing technique for hyperspectral absorption and attenuation meter[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, 39(z1): 59–63.  
张翮, 陶邦一, 何贤强. 高光谱水体吸收-衰减测量仪(AC-S)数据处理技术[J]. *光子学报*, 2010, 39(z1): 59–63.
- 15 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, 丘仲峰, 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.
- 16 Chen Yahui, Qiu Zhongfeng, Sun Deyong, *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, 丘仲峰, 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.
- 17 Zhang Jie, Lü Heng, Pan Hongzhou, *et al.*. Quantitative estimation of particulate organic carbon and diurnal variation in inland eutrophic lake[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2015, 40(12): 1618–1624.  
张杰, 吕恒, 潘洪洲, 等. 内陆湖泊颗粒有机碳反演及日变化初步研究[J]. *武汉大学学报信息科学版*, 2015, 40(12): 1618–1624.
- 18 Lee Z P, Carder K L, Arnone R A. Deriving inherent optical properties from water color: A multiband quasi-analytical algorithm for optically deep waters[J]. *Applied Optics*, 2002, 41(27): 5755–5772.
- 19 Qing S, Zhang J, Cui T W, *et al.*. Remote sensing retrieval of total absorption coefficient in the Bohai Sea[J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2012, 30(5): 806–813.
- 20 Wang X M, Tang J W, Song Q J, *et al.*. A research on statistical retrieval algorithms and spectral characteristics of the total absorption coefficients in the Yellow Sea and the East China Sea[J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2006, 24(3): 236–242.
- 21 Zhu Jianhua, Li Jun, Han Bing, *et al.*. Validation for the remote sensing reflectance of geostationary ocean color imager in Bohai Sea[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(s1): s101005.  
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(s1): s101005.

栏目编辑: 史敏