

春季辽东湾静止轨道海洋水色遥感产品的 真实性检验

李 豪¹ 何贤强¹ 丁 静² 胡子峰¹ 崔万松¹ 李顺达¹ 张 琳¹

¹国家海洋局第二海洋研究所, 卫星海洋环境动力学国家重点实验室, 浙江 杭州 310012

²国家卫星海洋应用中心, 北京 100081

摘要 静止轨道海洋水色成像仪(GOCI)拥有高时间分辨率(1 h)和高空间分辨率(500 m×500 m)的观测优势。为了保证 GOCI 应用的可靠性,对其遥感产品进行检验极为重要。利用辽东湾春季航次观测数据,对 4 种二类水体大气校正算法[Korea Ocean Satellite Center(KOSC)校正算法、management unit mathematics models(MUMM)校正算法、紫外(UV)校正算法和近红外(NIR)校正算法]获得的 GOCI 遥感反射率产品及 GOCI 标准叶绿素浓度、悬浮物浓度遥感产品进行了真实性检验,并探讨了不同观测时相的稳定性。结果表明:KOSC 算法在辽东湾具有最高的校正精度,各波段遥感反射率平均绝对百分比误差(APD)为 27.16%(412 nm)、16.03%(443 nm)、13.73%(490 nm)、15.99%(555 nm)、12.83%(660 nm)、12.35%(680 nm)、27.68%(745 nm)、42.81%(865 nm);叶绿素浓度、悬浮物浓度产品的平均绝对百分比误差分别为 29.75%和 26.40%。相比于临近中午观测时的结果,GOCI 早上和下午观测时反演的结果(包括遥感反射率、叶绿素浓度、悬浮物浓度)与实测值偏差显著增大。

关键词 海洋光学;静止轨道海洋水色成像仪;水色遥感产品;真实性检验;辽东湾

中图法分类号 0433 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201636.0401002

Validation of the Remote Sensing Products Retrieved by Geostationary Ocean Color Imager in Liaodong Bay in Spring

Li Hao¹ He Xianqiang¹ Ding Jing² Hu Zifeng¹ Cui Wansong¹ Li Shunda¹ Zhang Lin¹

¹State Key Laboratory of Satellite Ocean Environment Dynamics(SOED), Second Institute of Oceanography of State Oceanic Administration, Hangzhou, Zhejiang 310012, China

²National Satellite Ocean Application Service, Beijing 100081, China

Abstract The geostationary ocean color imager (GOCI) can provide high temporal resolution (1 h) and spatial resolution (500 m×500 m) observations. Validation of the GOCI-derived ocean color products is a key for the application of the GOCI data. Based on matched-up *in-situ* measurements in Liaodong Bay during spring, the GOCI-derived remote sensing reflectance is retrieved by four atmospheric correction algorithms, including Korea Ocean Satellite Center(KOSC)correction, management unit mathematics models (MUMM) correction, ultraviolet correction (UV-correct) and near infrared correction (NIR-correct), and the GOCI standard chlorophyll-a concentration and suspended particulate matter concentration are validated. In addition, the stability of the GOCI-derived ocean color remote sensing products under different observing time is evaluated. The results show that the remote sensing reflectance retrieved by KOSC algorithm has the best agreement with the values of *in-situ* observations, with mean absolute percentage deviations (APDs) of 27.16% (412 nm), 16.03% (443 nm), 13.73% (490 nm), 15.99% (555 nm),

收稿日期: 2015-11-23; 收到修改稿日期: 2015-12-18

基金项目: 国家 863 计划(2014AA123301)、国家科技支撑计划(2013BAD13B01)、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(41322039, 41271378, 41476155)

作者简介: 李 豪(1991—),男,硕士研究生,主要从事海洋遥感方面的研究。E-mail: lihao19911212@qq.com

导师简介: 何贤强(1978—),男,博士,研究员,博士生导师,主要从事海洋遥感方面的研究。

E-mail: hexianqiang@sio.org.cn(通信联系人)

12.83% (660 nm), 12.35% (680 nm), 27.68% (745 nm), 42.81% (865 nm). The APDs of chlorophyll-a and suspended particulate matter products are respectively 29.75% and 26.40%. Moreover, compared with the ocean color products obtained from 10:30 to 12:30 (Beijing time), the consistency of GOCI-derived ocean color data obtained between *in situ* and in other observing time is much poorer.

Key words oceanic optics; geostationary ocean color imager; ocean color remote sensing products; validation; Liaodong bay

OCIS codes 010.4450; 010.0280; 010.1285; 280.4788

1 引 言

静止轨道海洋水色成像仪(GOCI)是国际上第一个,也是目前唯一的静止轨道海洋水色卫星传感器。GOCI从早上8:30到下午3:30(北京时间)每小时观测1次,以36°N、130°E为观测中心,覆盖了约2500 km×2500 km的面积。它拥有高时间分辨率(1 h)和空间分辨率(500 m×500 m)的观测优势,为近海水体日内变化监测提供了可能^[1-2]。

为了保证GOCI应用的可靠性,对其遥感产品进行真实性检验非常重要和必要。Lamquin等^[3]比较了中分辨率成像光谱仪(MODIS)、中等分辨率成像频谱仪(MERIS)和GOCI的归一化离水辐亮度产品,结果表明,GOCI与MODIS、GOCI与MERIS在555 nm和660 nm波段的线性相关系数都在0.9以上。Ruddick等^[4]检验了GOCI在渤海的悬浮物浓度(T_{SM})产品,指出GOCI能够很好地在高浑浊水体监测 T_{SM} 的动态变化。Wang等^[5]利用在韩国周边的航次数据检验了GOCI的离水辐亮度产品,指出可见光波段实测与遥感数据的比值为1.07~1.27。同时,He等^[6]检验了GOCI反演获得的归一化离水辐亮度产品在长江口、杭州湾浑浊水体的可靠性,指出各波段相对偏差小于30%。Moon等^[7]在2010—2011年间通过多个在韩国半岛周边的航次检验了GOCI主要产品的真实性。朱建华等^[8]针对GOCI在渤海辽东湾海区的遥感反射率产品进行了评估,结果表明,555 nm波段该产品一致性较好,865、745、412 nm的产品存在显著被低估的现象。

上述真实性检验表明,不同区域、不同算法的结果差异较大,有必要开展针对不同海区的精度检验。本文利用现场观测获取的水体遥感反射率、叶绿素浓度和悬浮物浓度数据,对辽东湾GOCI不同二类水体大气校正算法反演获得的遥感反射率产品进行真实性检验,并探讨了GOCI不同观测时相观测精度的稳定性。

2 数据与方法

2.1 现场观测

于2015年4月14日至5月1日在渤海的辽东湾开展了水体光谱及水色要素现场测量(见图1)。辽东湾半封闭性区域特征导致海水交换缓慢,盐度分布基本在2.9‰~3.15‰(通常说盐度分布为29~31.5 psu, psu为实用盐度单位)^[9]。航次期间,4月20日(站位DW10、DW11-1、DW11-2、DW12、DW13、DW14)全天无云,4月14日(站位DW01、DW01-1、DW02)、4月15日(站位DW03、DW04-1、DW04-2、DW05-1)、4月17日(站位DW06-1、DW07-1、DW08-1)和5月1日(站位DW17-1、DW18、DW19、DW20、DW21-1)个别时段有薄云,4月

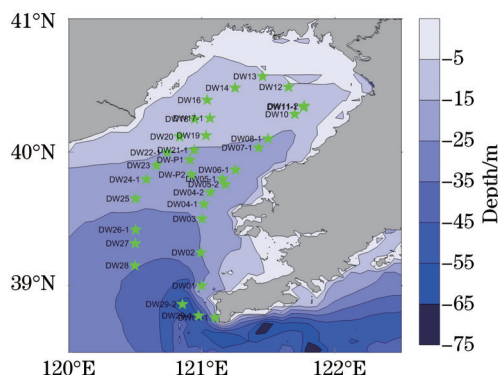


图1 辽东湾航次站位图

Fig.1 Distribution of the sampling stations in the Liaodong Bay

29日(站位 DW29-1、DW29-2)、4月30日(站位 DW22、DW23、DW24-1、DW25、DW26-1、DW27、DW28)全天被云覆盖。

水体遥感反射率(R_{rs})使用美国 ASD 公司的便携式地物光谱仪(光谱范围为 350~2500 nm, 光谱分辨率优于 1 nm)进行测量。光谱仪测量的几何形状、方式等参照美国国家航空航天局(NASA)海洋光学规范进行^[10]。数据处理时选取最稳定的一组。在此基础上,计算获得水体遥感反射率为

$$R_{rs} = \frac{r(L_t - L_s \cdot \rho)}{\pi L_r}, \quad (1)$$

式中 L_t 为水面上行辐亮度, L_s 为同方位的天空下行辐亮度, r 为参考灰板的反射率, L_r 为参考灰板反射辐亮度, ρ 为水面反射率, 这里取 0.028^[6]。

叶绿素浓度测量使用 Whatman GF/F(直径 25 mm、孔径 0.47 μm)滤膜对各站位水样进行现场过滤, 并将滤膜保存在液氮中带回实验室。利用 Turner Designs 荧光仪进行实验室检测, 得到叶绿素 a(Chl-a)浓度。悬浮物浓度测量使用在实验室称重的醋酸纤维膜(直径 47 mm、孔径 0.7 μm), 对各站位水样进行现场过滤, 并将滤膜进行冷冻保存带回实验室进行测试: 第 1 次烘烤温度设置为 45 $^{\circ}\text{C}$, 时间设置为 8 h, 之后每次烘烤 4 h, 烘烤结束放入干燥器中, 2 h 后称重; 重复以上步骤, 直到 2 次称重差别在 0.1 mg 之内; 将总悬浮物膜的重量减去相应空白膜的重量, 得到总悬浮物的重量和悬浮物浓度。

2.2 GOCI 数据大气校正

从 Korea ocean satellite center(KOSC)获取 4 月 15 日至 5 月 1 日每天 8 次的 GOCI Level-1B 数据。然后分别利用以下 4 种二类水体大气校正算法进行处理, 反演得到 GOCI 各波段遥感反射率。

2.2.1 KOSC 算法

GOCI 资料处理软件(GDPS, 1.30 版本)的标准大气校正算法(简称 KOSC 算法)基于 Gordon & Wang 算法^[11]处理清洁水体。对于浑浊二类水体, 通过近红外(NIR)波段与红光波段离水反射率的经验模型, 计算近红外波段的离水反射率^[12]:

$$\rho_w(745) = \sum_0^5 j_n \rho_w^n(660), \quad (2)$$

$$\rho_w(865) = \sum_1^2 k_n \rho_w^n(745), \quad (3)$$

式中 $\rho_w(660)$ 、 $\rho_w(745)$ 、 $\rho_w(865)$ 分别为离水反射率; j_n 、 k_n 为拟合系数, $n=1, 2, 3, 4, 5$ 。具体计算流程为: 设置 745 nm、865 nm 波段离水反射率初值为 0, 输入大气校正得到的 660 nm 离水反射率, 然后使用(2)、(3)式计算 2 个近红外波段的离水反射率, 并进行迭代, 直到满足一定条件。本文使用 GDPS1.30 来完成 KOSC 算法, 得到 Level-2 级遥感反射率产品。

2.2.2 MUMM 校正算法

MUMM(management unit mathematics models)算法是由 Ruddick 等^[13]提出, 其认为一定区域内的气溶胶类型均匀, 并假定近红外波段气溶胶的反射比 $\varepsilon_m^{(nir_1, nir_2)}$ 和离水反射率比 α 是定值。从而可以直接计算出近红外波段的气溶胶散射和离水辐射:

$$\frac{\rho_a^{nir_1}}{\rho_a^{nir_2}} \equiv \varepsilon_m^{(nir_1, nir_2)}, \quad (4)$$

$$\alpha \equiv \frac{\rho_w^{nir_1} / T_0^{nir_1}}{\rho_w^{nir_2} / T_0^{nir_2}}, \quad (5)$$

式中 $\rho_a^{nir_1}$ 、 $\rho_a^{nir_2}$ 分别为近红外 2 个波段的气溶胶反射率, $\rho_w^{nir_1}$ 、 $\rho_w^{nir_2}$ 分别为近红外 2 个波段的离水反射率, $T_0^{nir_1}$ 、 $T_0^{nir_2}$ 分别为近红外 2 个波段的大气透射率。由(4)、(5)两式可计算得到近红外波段的气溶胶反射值:

$$\rho_a^{nir_2} = \frac{\alpha \rho_c^{nir_2} - \rho_c^{nir_1}}{\alpha - \varepsilon_m^{(nir_1, nir_2)}}, \quad (6)$$

$$\rho_a^{nir_1} = \varepsilon_m^{(nir_1, nir_2)} \times \rho_a^{nir_2}, \quad (7)$$

式中 $\rho_c^{nir_1}$ 、 $\rho_c^{nir_2}$ 分别为近红外 2 个波段瑞利校正后的反射率。

SeaDAS软件7.2版本集成了GOCI数据的处理模块和MUMM算法,故使用其对GOCI进行大气校正,获得MUMM算法处理的Level-2级遥感反射率产品。

2.2.3 紫外校正算法

He等^[14]通过研究长江、密西西比河及奥里诺科河等浑浊河口水体的大量现场光谱发现,由于水体的高悬浮物浓度,近红外波段离水辐射显著增大,但是紫外波段的离水辐射值很低,并且较稳定,所以可通过紫外波段进行大气校正,即UV算法。对于GOCI,He等^[6]使用412 nm对气溶胶散射进行估算,具体如下:

1) 假设 $\rho_a^{(412)} = \rho_{rc}^{(412)}$, $\rho_a^{(412)}$ 为412 nm气溶胶反射率, $\rho_{rc}^{(412)}$ 为412 nm瑞利校正后的反射率;

2) 利用 $\rho_a^{(865)} = \rho_a^{(412)} \times \left[\varepsilon_{(745,865)}^c \right]^{\frac{865-412}{866-745}}$, 计算865 nm的气溶胶散射反射率 $\rho_a^{(865)}$, 其中 $\varepsilon_{(745,865)}^c$ 为预估的近红外波段气溶胶反射比;

3) 假设, $\varepsilon_{(i,8)} = 1, i=1,2, \dots, 7$, 从而计算出各个波段的气溶胶反射值。

2.2.4 近红外校正算法

Wang等^[15]研究MODIS影像时发现海水漫衰减系数 $k_d(490)$ 与近红外波段的离水辐射有很好的经验关系,因此可根据其来进行近红外波段离水辐射的计算,该方法称为近红外校正(NIR-correct)算法。Wang等建立的 $k_d(490)$ 与归一化离水辐亮度 $L_{w,n}$ 的经验模型为

$$L_{w,n}(748) = c_1 \times k_d(490) + c_2 \times k_d(490)^2 + c_3 \times k_d(490)^3 + c_4 \times k_d(490)^4, \quad (8)$$

$$L_{w,n}(869) = b_1 \times L_{w,n}(748) + b_2 \times L_{w,n}(748)^2, \quad (9)$$

(8)式针对近岸浑浊水体计算。本文使用GOCI的2个近红外波段代替MODIS的748 nm、869 nm波段,校正步骤如下:

1) 使用GDPS1.30处理得到标准大气校正算法下的 $k_d(490)$;

2) 判断 $k_d(490)$ 是否大于 5 m^{-1} 。若大于,则设置为 5 m^{-1} 。根据(8)、(9)式计算得到 $L_{w,n}(745)$ 和 $L_{w,n}(865)$;

3) 从瑞利校正结果中扣除 $L_{w,n}(745)$ 和 $L_{w,n}(865)$, 再次处理得到 $k_d(490)$;

4) 进行迭代,直到 $L_{w,n}(865) < 0.05$, 且连续2次近红外的 $L_{w,n}$ 相对变化小于0.5%。

2.3 GOCI叶绿素、悬浮物浓度遥感产品

GDPS1.30的默认内置叶绿素算法为CO₂反演算法^[16],即使用490 nm和555 nm波段进行反演,表达式为

$$C_{\text{hla}} = e_0 + 10^{e_1 + e_2 R + e_3 R^2 + e_4 R^3}, \quad (10)$$

$$R = \lg \left[\frac{R_{rs}(490)}{R_{rs}(555)} \right], \quad (11)$$

式中 C_{hla} 为叶绿素浓度, $e_0 \sim e_4$ 为拟合系数,分别为0.0929、0.2974、-2.2429、0.8358、-0.0077。

GDPS1.30的默认内置悬浮物浓度算法为YOC反演算法,由Tassan等^[17]提出:

$$T_{\text{SM}} = 10^{c_0 + c_1 \{ R_{rs}(555) + R_{rs}(670) - c_2 [R_{rs}(490) / R_{rs}(555)] \}}, \quad (12)$$

式中 c_0, c_1, c_2 为拟合系数,分别为0.649、25.623、0.646, T_{SM} 为悬浮物质量浓度,单位为 g/m^3 。

本文直接下载KOSC发布的叶绿素、悬浮物浓度的Level-2数据产品并进行检验。由于KOSC发布的Level-2产品只有第3~5时次的数据,故其他时次数据由GDPS1.30处理得到。

2.4 检验方法

2.4.1 卫星-地面观测时空匹配方法

实测数据与卫星数据的时空匹配采用He等^[18]在验证SeaWiFS和Aqua/MODIS数据所使用的方法,空间匹配选择以观测点为中心、在5 pixel×5 pixel区域内的有效像素平均值。由于GOCI的高时间分辨率,故时间匹配可以比以前的±3 h更精确,本文的时间匹配窗口设为±1 h。此外,还须满足以下条件:

1) 检验5 pixel×5 pixel盒子中有效像素的百分比 η , 若 $\eta > 50\%$, 则采用; 若 $\eta < 50\%$, 则放弃;

2) 计算盒子中所有像素的平均值 N_{mean} 和标准偏差 σ , 若超过平均值 $\pm 1.5\sigma$, 则删除像素;

3) 对于留下的盒子, 计算其变异系数 ($C_v = \sigma / N_{\text{mean}}$), 检验空间分布的一致性, 若 $C_v > 0.15$, 则舍弃; 若全部

通过,则进行实测值与遥感值的比对。

2.4.2 误差统计方法

采用统计参数包括均方根误差(RMSE, D_{RMS})、平均绝对百分比误差(APD, D_{AP})、平均相对百分比误差(RPD, D_{RP})以及线性拟合的相关系数 R^2 。3个误差可表示为

$$D_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - x_i)^2}{N}}, D_{AP} = 100\% \times \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|y_i - x_i|}{x_i}, D_{RP} = 100\% \times \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{y_i - x_i}{x_i}, \quad (13)$$

式中 N 为有效像素个数, x_i 为实测值, y_i 为遥感值。

3 结果与分析

3.1 实测水体遥感反射率、叶绿素浓度和悬浮物浓度分布

图2为现场测量获得的遥感反射率曲线(质量控制后),图3为叶绿素a浓度及悬浮物浓度分布图。可以看到,辽东湾水体由远海到近岸逐渐变浑浊,但总体上,辽东湾中部水域的悬浮物质量浓度基本上小于40 mg/L,低值区仅1 mg/L左右,为中低浓度水体。叶绿素a质量浓度高值区可达12 $\mu\text{g/L}$ 以上,低值区仅0.5 $\mu\text{g/L}$ 左右。在悬浮物、叶绿素a浓度空间分布上,总体呈现湾顶高、中部底,东侧高、西侧低的变化趋势。

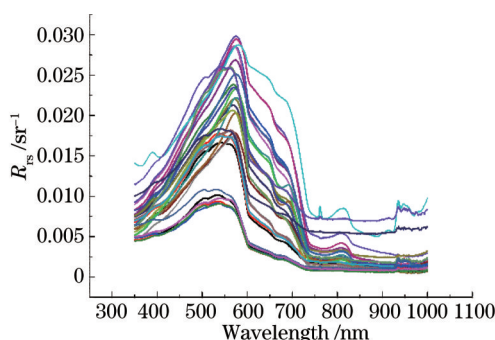


图2 现场观测的水体遥感反射率

Fig.2 Remote sensing reflectance observed by *in situ* measurement

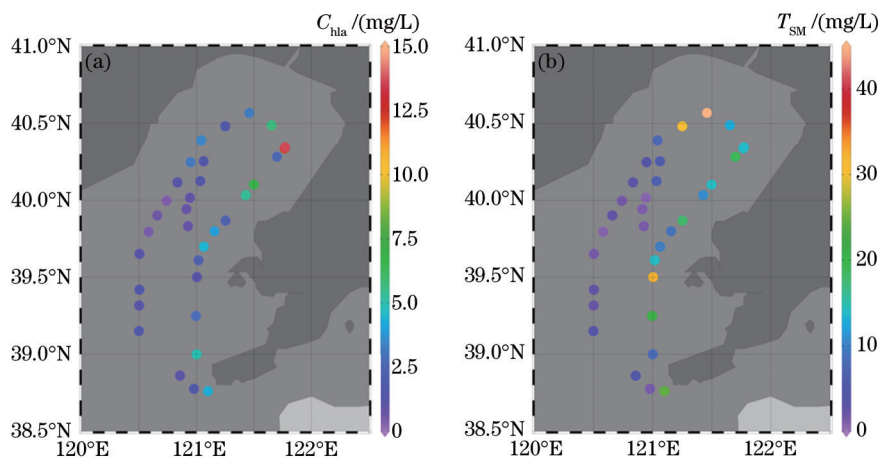


图3 (a) 实测叶绿素a浓度及(b) 悬浮物浓度分布

Fig.3 *In situ* concentration distributions of (a) chlorophyll-a and (b) suspended matter

3.2 GOCI水体遥感反射率检验

图4为4月14日到5月1日辽东湾区域部分无云的490 nm遥感反射率分布。可以看到4月14、15、17、20、29日及5月1日存在有效匹配数据,但4月30日被云遮挡严重,而4月29日的测量由于是在下午4点左右,无法获得有效匹配数据比对,最终得到18个站位匹配数据。

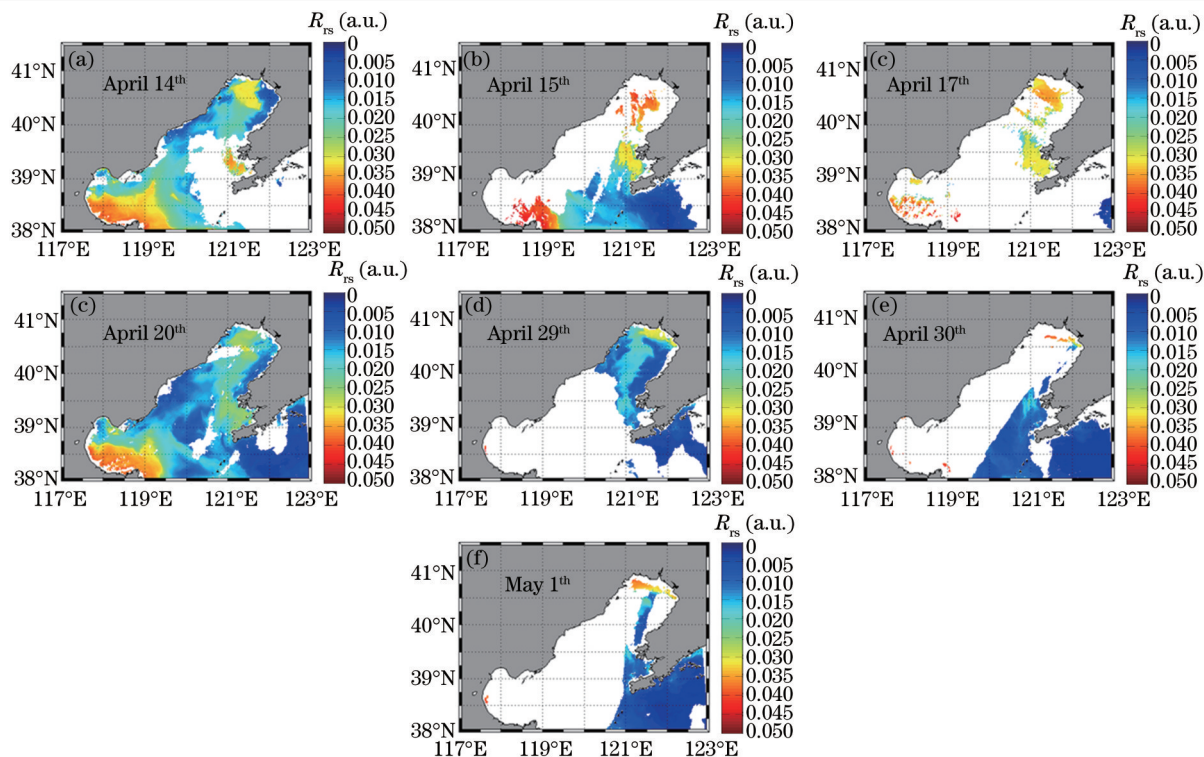


图4 GOCI观测有效的 $R_{rs}(490\text{ nm})$ 数据分布(每日的12:30影像)

Fig.4 Valid $R_{rs}(490\text{ nm})$ distributions observed by GOCI at 12:30 (Beijing time)

图5为4种算法反演得到的 R_{rs} 与实测值的对比结果,表1为4种算反演各波段 R_{rs} 与实测值比较的统计结果。

图5(a)为KOSC算法反演的结果图,由图可以看出整体线性关系较好($R^2=0.894$),基本处于1:1线的附近,412 nm波段GOCI反演值略高于实测值,490 nm、555 nm波段GOCI反演值略低于实测值。RMSE从近红外到可见光逐渐降低(见表1),在865 nm波段最小($9.28 \times 10^{-4} \text{ sr}^{-1}$),在555 nm和412 nm波段略高(分别为 $3.882 \times 10^{-3} \text{ sr}^{-1}$ 、 $2.684 \times 10^{-3} \text{ sr}^{-1}$),这是由于近红外波段遥感反射率极小的原因。APD在8个波段的变化范围为12.35%~42.81%,其中第5、6波段最小(12.35%, 12.83%),第8波段最大(42.81%)。总体与Moon等^[7]在2010—2011年使用航次数据对低浑浊水体的验证结果(APD为18%~35%)相似。KOSC算法在辽东湾校正效果总体较好,可见光波段的APD与RPD值较小。但412 nm的APD与RPD值相对较大,可能是由于KOSC算法从近红外波段外推得到可见光波段的气溶胶散射,导致离近红外波段较远的蓝光波段误差偏大,这与前人的检验结果相似^[19]。此外,近红外波段的误差(APD和RPD)相对可见光波段更大,主要原因是辽东湾水体为中等浑浊水体,虽然近红外波段遥感反射率不能忽略,但其值仍然较小。根据(14)、(15)式的相对误差计算方法,极低的实测遥感反射率会造成较大的相对误差。

MUMM算法需要设定近红外波段气溶胶反射比 $\epsilon_m(7,8)$ 和离水反射率比 α 来计算气溶胶散射。先使用SeaDAS7.2的默认值 $\epsilon_m(7,8)=1$ 、 $\alpha=1.945$ 处理GOCI影像。其反演结果如图5(b)。由于SeaDAS7.2大气校正算法对云掩模较GDPS严格,将稍有薄云、气溶胶反射率相对较高或者较高浑浊度的站位均掩模掉,导致有效匹配站位数显著减少。从图5(b)可知,反演值系统低于实测值,这可能跟 $\epsilon_m(7,8)$ 和 α 的取值有关。为此,根据 α 随 T_{sm} 浓度的变化关系设置各站位的 α 值^[14,20], $\epsilon_m(7,8)$ 取上限值1.1,再次处理。从图5(c)和表1可以看到,更改参数后虽然反演效果有所改善,但反演值仍然总体偏小。

UV算法共获得18个站位匹配数据,对比结果见图5(d)。散点基本在1:1线附近($R^2=0.7186$),但比起KOSC算法结果相对较为离散。但UV算法所有波段值都位于1:1线两侧,只有555 nm波段反演值略低于实测值。由表1可以看到,UV算法中各个波段的RMSE值都在 $0.003447\sim 0.006628 \text{ sr}^{-1}$,说明各波段的 R_{rs} 值与实测值的偏差程度相当。在近红外波段的APD与RPD值非常高,在90%以上,即便近红外波段的相关系数较高。总的来说,UV大气校正算法在辽东湾校正效果一般,略逊于KOSC算法,但从反演得到的数据量和质量

都优于MUMM算法。原因可能是由于UV算法主要针对高浑浊水体,对中低浑浊的辽东湾水体效果稍差。

表 1 4种算法反演各波段 R_n 与实测值比较的统计结果

Table 1 Statistical results of the comparison of *in-situ* R_n with the inversion values by four algorithms

Algorithm	Wavelength /nm	Number	RMSE /sr ⁻¹	APD /%	RPD /%	R^2
KOSC	412	18	0.002684	27.16	22.00	0.6530
	443	18	0.002433	16.03	2.50	0.6938
	490	18	0.002522	13.73	- 10.87	0.8200
	555	18	0.003882	15.99	- 12.08	0.8473
	660	18	0.002625	12.83	- 7.35	0.9120
	680	18	0.002181	12.35	- 4.48	0.7324
	745	18	0.001106	27.68	- 16.74	0.8807
	865	18	0.000928	42.81	- 33.18	0.4685
MUMM [$\epsilon_m(7,8)=1$, $\alpha=1.945$]	412	6	0.005088	40.79	- 40.79	0.0881
	443	6	0.004367	29.41	- 29.41	0.4608
	490	6	0.006358	36.09	- 36.09	0.6408
	555	6	0.007210	30.87	- 30.87	0.8434
	660	6	0.004823	25.89	- 25.89	0.8490
	680	6	0.004471	22.88	- 22.88	0.7654
MUMM [$\epsilon_m(7,8)=1.1$, α is estimated by T_{su}]	412	5	0.002875	24.94	- 21.27	0.0135
	443	5	0.002525	16.75	- 13.63	0.2387
	490	5	0.004678	25.70	- 25.70	0.3972
	555	5	0.006297	25.22	- 25.22	0.3765
	660	5	0.002435	11.51	- 10.70	0.7502
	680	5	0.001823	10.83	- 4.64	0.7554
UV	412	18	0.004754	27.70	12.32	0.3890
	443	18	0.003447	19.65	- 4.40	0.6108
	490	18	0.003501	15.20	- 1.09	0.6449
	555	18	0.006628	22.38	16.60	0.5461
	660	18	0.004639	34.84	14.26	0.7941
	680	18	0.004220	33.69	7.82	0.8145
	745	18	0.005370	92.96	- 91.18	0.8297
	865	18	0.004985	128.36	- 115.31	0.7065
NIR-correct	412	18	0.005133	39.74	8.87	0.0825
	443	18	0.004498	26.04	4.83	0.2147
	490	18	0.004368	16.23	5.86	0.3861
	555	18	0.005388	12.42	7.72	0.4519
	660	18	0.004595	19.36	- 1.43	0.6935
	680	18	0.004186	21.10	- 5.52	0.7321
	745	18	0.002031	44.63	- 27.36	0.5845
	865	18	0.001539	114.54	- 87.71	0.5464

NIR-correct算法共获得18个站位的匹配数据,如图5(e)所示。每个波段的数据都围绕在1:1线附近($R^2=0.776$),仅有个别点较离散。从表1的统计数据看出,NIR-correct算法在490、555、660 nm波段的误差与KOSC算法相当(分别为16.23%、12.42%、19.36%),在近红外波段误差较大,865 nm波段的APD值高达114.54%。NIR-correct算法使用 $k_d(490)$ 估算近红外波段离水辐射,进而可估算气溶胶散射,再外推到可见光波段,这与KOSC算法相似,都会造成短波段的RMSE值较大,特别是412 nm波段。总的来说,NIR-correct算法在辽东湾的校正效果不错,在个别波段与KOSC算法相当,但是在近红外波段的误差偏大。

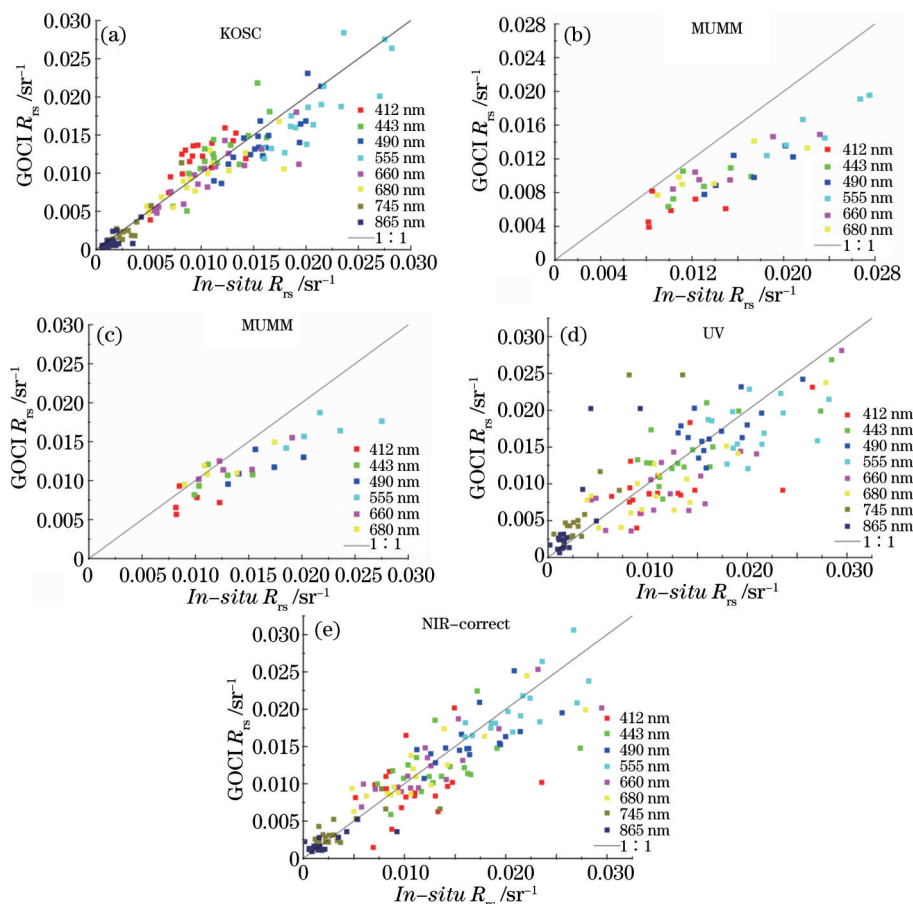


图 5 4 种算法反演各波段 R_{rs} 与实测值比较。(a) KOSC; (b) MUMM, $\epsilon_m(7,8)=1$, $\alpha=1.945$; (c) MUMM, $\epsilon_m(7,8)=1.1$, α 由 T_{SM} 估算; (d) UV 校正; (e) NIR 校正

Fig.5 Comparison of *in-situ* R_{rs} with the inversion values by four algorithms. (a) KOSC; (b) MUMM, $\epsilon_m(7,8)=1, \alpha=1.945$; (c) MUMM, $\epsilon_m(7,8)=1.1$, α is estimated by T_{SM} ; (d) UV-correct; (e) NIR-correct

3.3 悬浮物浓度和叶绿素浓度的检验

悬浮物浓度共获得 20 个站点匹配数据,结果如图 6(a)。可以看到,在低悬浮物浓度(小于 20 mg/L)线性关系较好,而高值区较离散,总体相关系数为 0.79, RMSE 为 6.56 mg/L, APD 为 26.40%, RPD 为 -15.32%, 这与 Moon 等^[7]在韩国近海的验证结果相当(相关系数为 0.87, RMSE 为 7.53 mg/L, APD 为 35%, RPD 为 -3%)。在 0~20 mg/L 的范围内, GOCI 反演值系统偏低, 主要原因可能是 GOCI 反演悬浮物浓度使用的波段为 490、555、670 nm, 而 KOSC 算法反演得到这 3 个波段的 R_{rs} 偏低(见表 1)。另外, 在大于 20 mg/L 区间, GOCI 反演悬浮物浓度与实测值比较离散, 这是因为悬浮物浓度算法使用的最大波长为 670 nm, 适用于中低悬浮物浓度水体;

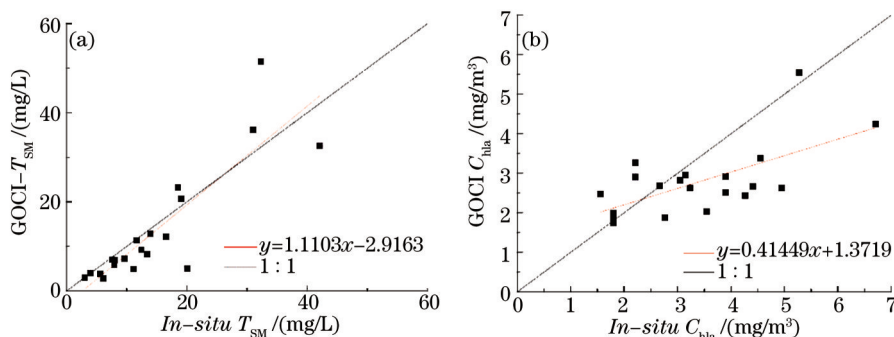


图 6 GOCI 反演(a) 悬浮物和(b) 叶绿素 a 浓度与实测值的比较

Fig.6 Comparison of (a) suspended matter concentration and (b) *in-situ* chlorophyll-a concentration with the GOCI-retrieved values

在中高浑浊水体, $R_{rs}(490\text{ nm})$ 、 $R_{rs}(555\text{ nm})$ 和 $R_{rs}(670\text{ nm})$ 会趋于饱和^[6],此时,算法对悬浮物浓度变化敏感性降低,从而导致高悬浮物浓度反演误差较大。

相同的,叶绿素浓度获得20个站位的匹配数据,如图6(b)所示。可以看到,叶绿素浓度低值区,GOCI反演结果高于实测值,而高值区则低于实测值,这与He等^[6]对黄东海SeaWiFS、Aqua/MODIS叶绿素浓度遥感产品的验证结果一致。总的相关系数为0.42, RMSE为1.14 mg/m³, APD为29.75%, RPD为0.88%,略优于Moon等^[7]在韩国近海的验证结果(相关系数为0.26, RMSE为1.08 mg/m³, APD为42%, RPD为-13%)。

3.4 GOCI不同观测时相的稳定性检验

GOCI从北京时间8:30—15:30每小时观测1次,每天共获得8景影像。由于第1景和最后1景观测时太阳天顶角相对较大,在冬季可达70°以上,因此,不同观测时次遥感产品的稳定性有待检验。选择辽东湾航次站位中水体日变化相对较小的站位进行稳定性检验。由于4月14、20日2天基本全部为晴天,选择了这2天的9个站点数据。首先,考虑到潮汐的作用,利用悬浮物浓度的变化大小来判断日变化程度,确定日变化小的站位来进一步检验GOCI反演结果的稳定性。图7为9个站点GOCI反演悬浮物浓度的逐小时变化,由此可知,除LDW02站点日变化较大外,其余8个站点水体相对较为稳定。因此,选择这8个站位来进一步检验GOCI反演结果的稳定性。

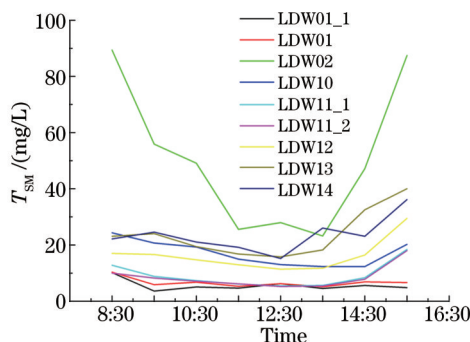


图7 各站位悬浮物浓度逐小时变化

Fig.7 Hourly variation of suspended matter concentration at each station

3.4.1 遥感反射率产品稳定性

图8为8个站位GOCI反演的1天8次 R_{rs} 光谱曲线,其中LDW01-1、LDW01在4月14日测量,LDW10、LDW11-1、LDW11-2、LDW12、LDW13、LDW14在4月20日测量。表2中每个时段(第1景8:30,中午12:30,最后1景15:30)、每个波段的相对误差计算方法为:将所有8个站位对应观测时次、波段的遥感反射率与实测值进行比较,计算得到8个相对误差,然后进行平均,得到平均相对百分比误差。由此可知,一天内谱形基本一致,用于反演 T_{sm} 的490、555、660 nm波段在8:30时有10.37%、-1.15%、14.95%的偏差(相对于该站位的实测 R_{rs}),在12:30时有-9.16%、5.31%、-13.34%的偏差,而在15:30时达31.14%、12.68%和57.27%的偏差。但第1景数据的其余波段差异较大,最后1景数据所有波段差异都很大。各波段的标准差说明了各波段1天内的离散程度,412、660、680 nm明显较离散。

表2 GOCI 3个不同观测时次遥感反射率的RPD统计

Table 2 Statistical RPD results of the GOCI-retrieved R_{rs} at three different observing time

Wavelength /nm	Number	Standard deviation /10 ⁻³	RPD(8:30) /%	RPD(12:30) /%	RPD(15:30) /%
412	8	3	50.80	18.56	89.86
443	8	2.9	32.75	2.77	62.29
490	8	2.5	10.37	- 9.16	31.14
555	8	2.4	- 1.15	5.31	12.68
660	8	3.5	14.95	- 13.34	57.27
680	8	3.6	17.57	- 9.76	68.69
745	8	1.1	27.99	- 28.76	86.97
865	8	0.5	5.69	- 44.08	65.31

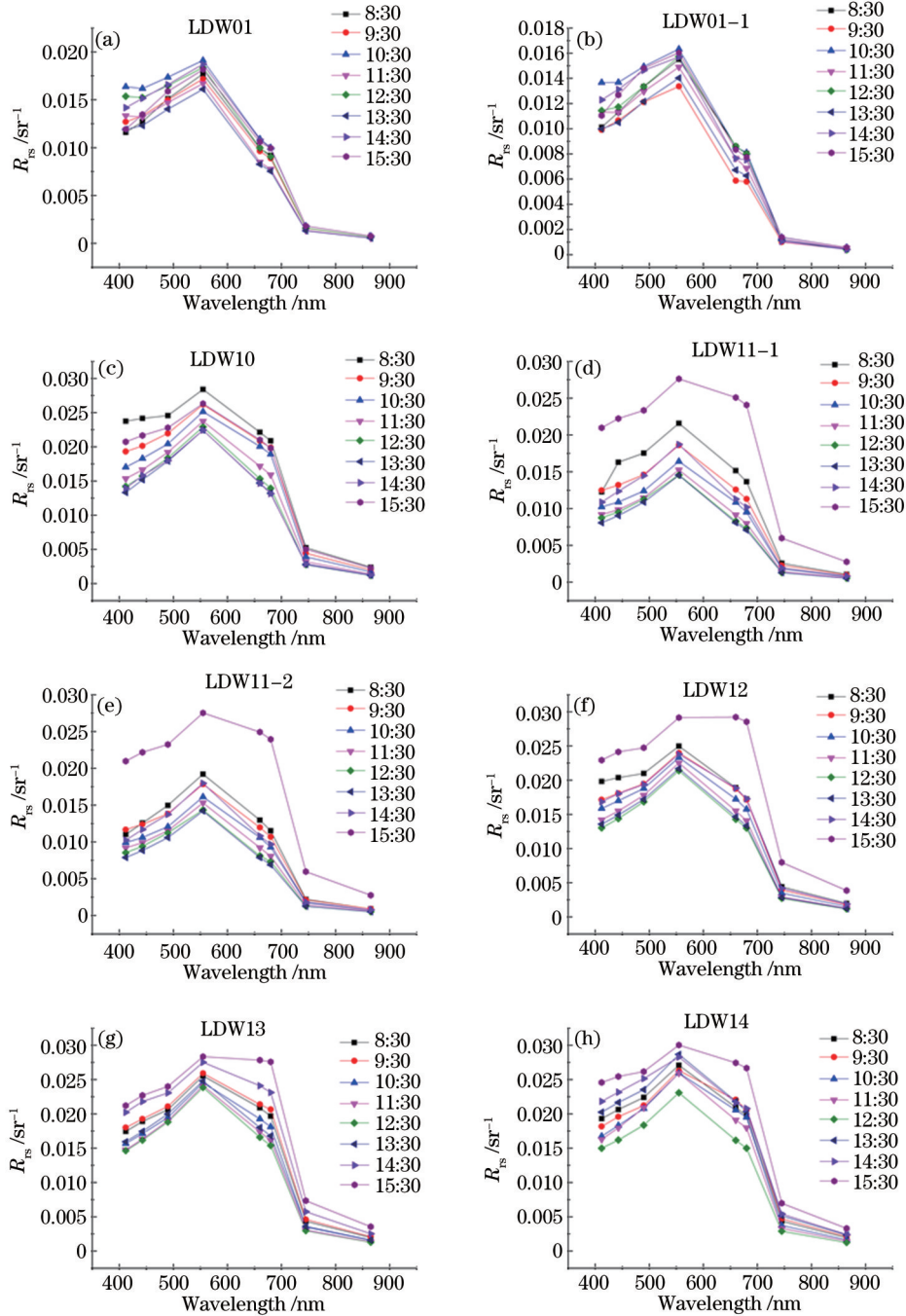


图 8 各站位不同观测时次 GOCI 反演遥感反射率光谱的比较

Fig.8 Comparison of the GOCI-retrieved R_{rs} at different observing time at each station

3.4.2 悬浮物浓度产品和叶绿素浓度产品稳定性

辽东湾航次的测站采样时间不定,早晨 7:30 到下午 17:00 都有进行采样,因此可以比较 GOCI 的悬浮物浓度及叶绿素浓度产品在大天顶角情况下产生的误差。GOCI 官方发布的 Level-2 级产品只有 10:30—12:30 的 3 幅产品,原因是其认为这 3 幅太阳天顶角较小,质量较高。因此,将测站分为 2 类,一类为 10:30—12:30,另一类为 10:30 以前或 12:30 以后的其余时间测站(见表 3),验证结果见表 4 和表 5。由表 4 可知,10:30—12:30 悬浮物浓度产品误差明显较低,APD 为 19.56%,而其余时次为 33.23%。同样,10:30—12:30 时次的叶绿素浓度产品误差较低(APD 为 26.68%),优于其余时次的 33.51%。

表 3 2类观测时间段的站点

Table 3 Stations belong to two measurement time ranges

Stations at 10:30 to 12:30	Measured time	Stations at other time	Measured time
LDW01	11:45	LDW02	16:33
LDW01-1	10:25	LDW03	8:05
LDW04-2	10:20	LDW04-1	9:20
LDW05-1	11:25	LDW06-1	8:25
LDW07-1	10:25	LDW10	7:45
LDW08-1	11:25	LDW11-1	9:25
LDW11-2	10:25	LDW13	14:05
LDW12	12:10	LDW14	16:32
LDW17-1	10:23	LDW18	9:20
LDW19	12:13	LDW20	7:30

表 4 2类观测时间段 GOCI反演悬浮物浓度的误差统计

Table 4 Statistical errors of the GOCI-retrieved suspended matter concentration at two measurement time ranges

	Number	RMSE/(mg/L)	APD/%	RPD/%
10:30 to 12:30	10	7.36	19.56	2.60
Other time	10	5.65	33.23	-33.23

表 5 2类观测时间段 GOCI反演叶绿素 a浓度的误差统计

Table 5 Statistical errors of the GOCI-retrieved chlorophyll-a concentration at two measurement time ranges

	Number	RMSE/(mg/m ³)	APD/%	RPD/%
10:30 to 12:30	10	0.64	26.68	14.20
Other time	10	1.54	33.51	-15.39

4 结 论

使用辽东湾春季航次获得的现场数据,对 GOCI 水色反演结果进行精度评价,检验了 KOSC、MUMM、UV、NIR 4种二类水体大气校正算法反演获得的遥感反射率产品。结果表明:KOSC 算法在辽东湾水体的校正效果较好,而 MUMM 算法存在严重低估现象,UV 算法效果优于 MUMM 算法,但比 KOSC 算法结果离散,NIR-correct 与 KOSC 算法效果相当,但红外波段误差较大。总体上,KOSC 算法在辽东湾具有相对最高的反演精度,各波段平均绝对百分比误差为 27.16%(412 nm)、16.03%(443 nm)、13.73%(490 nm)、15.99%(555 nm)、12.83%(660 nm)、12.35%(680 nm)、27.68%(745 nm)和 42.81%(865 nm)。

同时还对 GOCI Level-2 级产品的悬浮物浓度及叶绿素浓度进行了检验,并分析了 GOCI 不同观测时次反演结果的稳定性。结果表明:悬浮物浓度总体相关系数为 0.79, RMSE 值为 6.56 mg/L, APD 值为 26.40%, RPD 值为 -15.32%; 叶绿素 a 浓度总体相关系数为 0.42, RMSE 值为 1.14 mg/m³, APD 值为 29.75%, RPD 值为 0.88%。GOCI 中午 3 个时次的稳定性及质量明显优于其余时次。限于实测数据量,本文仅检验了辽东湾春季的 GOCI 水色产品,下一步需要在获取其他季节现场观测数据的基础上,开展更为全面的真实性检验。

参 考 文 献

- 1 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.
- 2 友 清. 光学遥感的现状和未来方向[J]. *激光与光电子学进展*, 1995, 32(12): 8-11.
- 3 Lamquin Nicolas, Mazeran Constant, Doxaran David, *et al.*. Assessment of GOCI radiometric products using MERIS, MODIS and field measurements[J]. *Ocean Science Journal*, 2012, 47(3): 287-311.
- 4 Ruddick Kevin, Vanhellefont Quinten, Yan Jing, *et al.*. Variability of suspended particulate matter in the Bohai sea from the geostationary ocean color imager(GOCI)[J]. *Ocean Science Journal*, 2012, 47(3): 331-345.
- 5 Wang Menghua, Ahn Jae-Hyun, Jiang Lide, *et al.*. Ocean color products from the Korean geostationary ocean color imager (GOCI)[J].

- Optics Express, 2013, 21(3): 3835–3849.
- 6 He Xianqiang, Bai Yan, Pan Delu, *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(12): 225–239.
- 7 Moon Jeong-Eon, Park Young-Je, Ryu Joo-Hyung, *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.
- 8 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.
- 9 Qing Song, Zhang Jie, Bao Yuhai. Retrieval of sea surface salinity with MERIS in the Bohai sea[J]. Laser and Optoelectronics Progress, 2013, 50(12): 120102.
青 松, 张 杰, 包玉海. 基于MERIS数据的渤海海表盐度反演[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(12): 120102.
- 10 Mueller J L, Fargion G S. Ocean optics protocols for satellite ocean color sensor validation[M]. 3rd ed, Greenbelt, Maryland: National Aeronautics and Space Administration, 2002.
- 11 Gordon H R, Wang M H. Retrieval of water-leaving radiance and aerosol optical thickness over the oceans with sea WiFS: A preliminary algorithm[J]. Applied Optics, 1994, 33(3): 443–452.
- 12 Ahn Jae-Hyun, Park Young-Je, Ryu Joo-Hyung. Development of atmospheric correction algorithm for geostationary ocean color imager (GOCI)[J]. Ocean Science Journal, 2012, 47(3): 247–259.
- 13 Ruddick Kevin G, Cauwer Vera De, Park Young-Je, *et al.*. Seaborne measurements of near infrared water-leaving reflectance: The similarity spectrum for turbid waters[J]. Limnology Oceanography, 2006, 51(2): 1167–1179.
- 14 He Xianqiang, Bai Yan, Pan Delu, *et al.*. Atmospheric correction of satellite ocean color imagery using the ultraviolet wavelength for highly turbid waters[J]. Optics Express, 2012, 20(18): 754–770.
- 15 Wang M H, Shi W, Jiang L D. Atmospheric correction using near-infrared bands for satellite ocean color data processing in the turbid western Pacific region[J]. Optics Express, 2012, 20(2): 741–753.
- 16 O'Reilly J E, Maritorena S, Mitchell B G, *et al.*. Ocean color chlorophyll algorithms for SeaWiFS[J]. Journal of Geophysical Research, 1998, 103(C11): 24937–24953.
- 17 Tassan S. Local algorithms using sea WiFS data for the retrieval of phytoplankton, pigments, suspended sediment, and yellow substance in coastal waters[J]. Applied Optics, 1994, 33(12): 69–78.
- 18 He Xianqiang, Bai Yan, Pan Delu, *et al.*. Satellite views of the seasonal and interannual variability of phytoplankton blooms in the eastern China seas over the past 14 yr(1998–2011)[J]. Biogeosciences, 2013, 10: 4721–4739.
- 19 Ryu Joo-Hyung, Han Hee-Jeong, Cho Seongick, *et al.*. Overview of geostationary ocean color imager(GOCI) and GOCI data processing system (GDPS)[J]. Ocean Science Journal, 2012, 47(3): 223–233.
- 20 Dai Qian, Pan Delu, He Xianqiang, *et al.*. High-frequency observation of water spectrum and its application in monitoring of dynamic variation of suspended materials in the Hangzhou Bay[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2015, 35(11): 3247–3254.
戴 乾, 潘德炉, 何贤强, 等. 杭州湾水体光谱高频观测及在悬浮物动态变化监测中的应用[J]. 光谱学与光谱分析, 2015, 35(11): 3247–3254.

栏目编辑: 史 敏