

GOCI 卫星遥感反射比产品在渤海辽东湾海区的评估

朱建华 李 军 韩 冰 杨安安 高飞

(国家海洋技术中心, 天津 300112)

摘要 利用在 2012 年 9 月 13 日到 9 月 15 日渤海辽东湾高浊度水体的现场观测的遥感反射比评估同期地球同步水色卫星(GOCI)遥感反射比,结果表明 GOCI 的 $R_{rs}(\lambda)$ 与现场观测结果谱型一致,总体偏低。其中 555 nm 波段一致性最好,平均相对百分比偏差(RPD)达到 5%,865、745、412 nm 显著低估,412 nm 的 RPD 达到约 60%。412 nm 的均方根误差(RMSE)是 865 nm 波段的近 10 倍,并且呈现基于波段的指数变化趋势。格林尼治标准时间(GMT) 4:16(当地时间 12:16)的对比效果优于其他时段的观测结果。评估结果表明 GOCI 对混浊水体较好的观测效果,同时还需要进一步完善其大气校正算法。

关键词 海洋光学;地球同步水色卫星;遥感反射比;辽东湾;真实性检验

中图分类号 O439 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201434.s101005

Validation for the Remote Sensing Reflectance of Geostationary Ocean Color Imager in Bohai Sea

Zhu Jianhua Li Jun Han Bin Yang Anan Gao Fei

(National Ocean Technology Center, Tianjin 300112, China)

Abstract On the September 13, 2012 to September 15, Liaodong Bay of Bohai high turbidity water body remote sensing reflectance field observation is used to assess period geostationary ocean color imager (GOCI) remote sensing reflectance, and results show that the $R_{rs}(\lambda)$ of GOCI spectral type with field observations is consistent with the overall low. 555 nm band consistency among the best, with an average relative percentage deviation (RPD) reaches 5%, and 865, 745 and 412 nm significantly undervalued, the RPD of 412 nm reaches about 60%. The root-mean-square error (RMSE) of 412 nm band is nearly 10 times the 865 nm band and band-based index showing trends. Greenwich wean time (GMT) 4:16 (local time 12:16) contrast is better than other times of the observations. This evaluation results show that on the one hand GOCI turbid water body better observation of the effect, on the other hand there still need further improvement GOCI atmospheric correction algorithm.

Key words oceanic optics; geostationary ocean color imager; remote sensing reflectance; Bohai sea; validation

OCIS codes 010.0280; 010.1285; 010.1110; 010.4450

1 引 言

卫星遥感器在轨卫星产品真实性检验,可以确定星载遥感数据产品的质量,确保卫星数据产品的准确性和可靠性,提高卫星数据的利用率^[1]。水色卫星产品在不同海区有着不同的精度,尤其在近岸复杂的二类水体区域,其产品精度需要持续地验证^[2]。

第一颗地球同步水色卫星(GOCI)在 2010 年 6

月正式升空,它可以对观测区域进行同天连续观测,主要产品包括经过太阳耀斑和大气校正后的 8 个波段的遥感反射率、叶绿素浓度、黄色物质和悬浮颗粒浓度等^[3]。采用更具有统计意义的现场观测数据来进行卫星产品的检验是非常有必要的。2012 年, Lamquin 等^[3]指出 GOCI 和中分辨率成像光谱仪(MERIS)的离水辐亮度产品的精度相类似,但由于 GOCI 现有的大气校正的原因,致使 GOCI 在高浊

收稿日期: 2013-10-04; 收到修改稿日期: 2013-11-16

基金项目: 国家海洋公益性行业科研专硕(2010418030)

作者简介: 朱建华(1977—),男,高级工程师,主要从事海洋遥感定标检验与遥感应用技术方面的研究。

E-mail: besmile@263.net

度的海区的反演产品缺失,并强调了 GOCI 在近岸观测能力。韩国海洋卫星中心(KOSC)的学者对于 GOCI 的检验和算法的改进做出了努力,并指出了 GOCI 的归一化离水辐亮度的不确定度在 5% 以内^[4]。2011 年,Ahn 等^[5]基于对 GOCI 大气校正算法在二类水体适用性的检验,对比了韩国南部,东部海岸和 GOCI 的推导出的归一化离水辐亮度,得出卫星和现场的归一化离水辐亮度的比值在 412、443、490、555、660 和 680 nm 分别为 1.17、1.24、1.26、1.15、0.86 和 0.99。Choi 等^[6]在韩国西海岸的 Mokpo 沿岸附近进行现场试验,并同步对比 GOCI 数据,得出 GOCI 在二类水体良好的适用性。这些检验结果已经初步证实了第一颗地球同步轨道卫星的海洋水色观测结果是令人鼓舞的。

GOCI 卫星数据显示 2012 年 9 月 13 日到 9 月 15 日在渤海高浊度水体上空几乎无云,同期正好在渤海海域获得现场观测的水体遥感反射比。本文通过相互独立的数据源对 GOCI 的数据产品的精度进行检验,评估 GOCI 在近海混浊水体的遥感反射比产品观测效果。

2 数据和方法

2012 年 9 月 10 日至 2012 年 9 月 17 日开展的渤海辽东湾(LDW)现场观测获得了 30 个站位的生物-光学数据,主要包括遥感反射比、叶绿素浓度、总悬浮物浓度、黄色物质吸收系数和气溶胶光学厚度等,选取遥感反射比作为研究对象。其中与卫星观测同步的站点如图 1 所示。

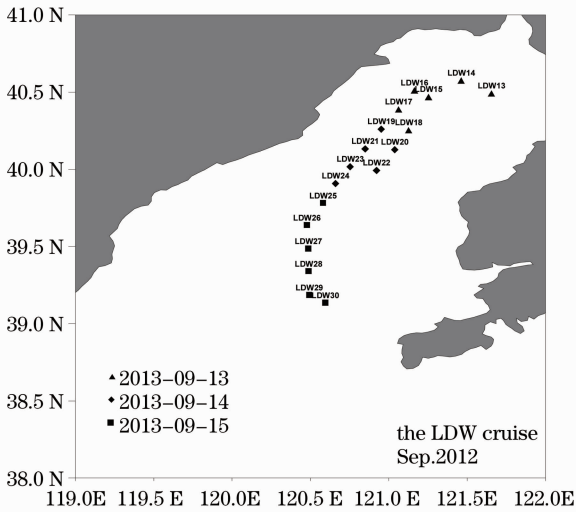


图 1 2012 年 9 月辽东湾航次匹配站点图

Fig.1 *In situ* matching station of the LDW cruise in Sep. 2012

2.1 现场观测的遥感反射比

遥感反射比是利用高光谱地物光谱仪采用水面之上测量法获得的,采集时间为 9:00~16:00 之间,测量时仪器距离水面约 3 m 处进行,仪器观测平面与太阳入射平面的夹角 $90^\circ < \phi_v < 135^\circ$,仪器与海面法线方向的夹角 $\theta_v = 40^\circ$,以避免绝大部分的太阳直射反射。同时避免了海浪破碎形成白冠的反射影响、船舶阴影对光场的破坏以及周围测定人员对阴影的影响^[7],并通过多次测量和相应的数据处理方法,保证测量数据的可靠性。数据处理按照下式进行:

$$R_{rs}(\lambda) = \frac{L_t(\lambda) - \rho L_{sky}(\lambda)}{E_s(\lambda)}, \quad (1)$$

式中 $E_s(\lambda)$ 为仪器测量的总辐照度, $L_t(\lambda)$ 为仪器测量的海面辐亮度, $L_{sky}(\lambda)$ 为仪器测量的天空辐照度, ρ 为气-水界面对天空光的反射率,取值 0.028^[8]。为了和后文对 GOCI 数据的分析有一致性,现场的光谱数据选取了 GOCI 卫星的波段。

2.2 GOCI 的遥感反射比

GOCI 提供格林尼治标准时间(GMT)为 2:16、3:16 和 4:16(当地时间 10:16、11:16 和 12:16)的 L1B 级数据给科学界研究使用。采用的 2012 年 9 月 13 日到 9 月 15 日三天的 L1B 数据从 KOSC 下载获得,采用 GOCI 数据数理系统(GDPS)软件进行处理。大气校正采用标准的 KOSC 算法,经过去云、去耀斑、去海面白帽和位置校正等方法,对卫星数据进行质量控制,最后得到 412、443、490、555、660、680、745 和 865 nm 波段的遥感反射比。

2.3 数据匹配

为保证卫星数据和现场观测数据的一致性,空

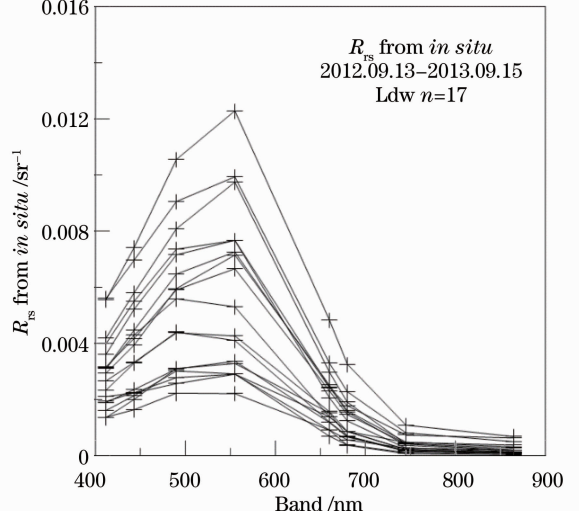


图 2 现场光谱数据图

Fig.2 R_{rs} of *in situ*

间窗口选取站位对应卫星象元周围 5 pixel×5 pixel 的平均值作为卫星观测值；由于渤海的水体交换不如外海那样频繁，且连续测量站位的 R_{rs} 值在 3 h 内变化并不显著，连续站位的气溶胶光学厚度变化同样不明显（并不给出，只是作为参考），航次期间匹配上的站位都为连续 3 个晴天期间完成。因此，在匹配阶段，时间窗口采用 ±3 h 作为匹配的时间窗口。在进行完卫星数据的质量控制之后，GMT 2:16 的

GOCI 影像与现场匹配 13 组，GMT 3:16 的 GOCI 影像与现场匹配 13 组，GMT 4:16 的 GOCI 影像与现场匹配 9 组；在采用时间窗口进行匹配，最终匹配结果：GMT 2:16 匹配 7 组，GMT 3:16 匹配 9 组，GMT 4:16 匹配 7 组。图 2 是匹配的现场观测的遥感反射比。图 3 是匹配的 GOCI 的真彩色图像及其遥感反射比产品。表 1 是现场观测的遥感反射比与卫星观测的遥感反射比的统计对比。

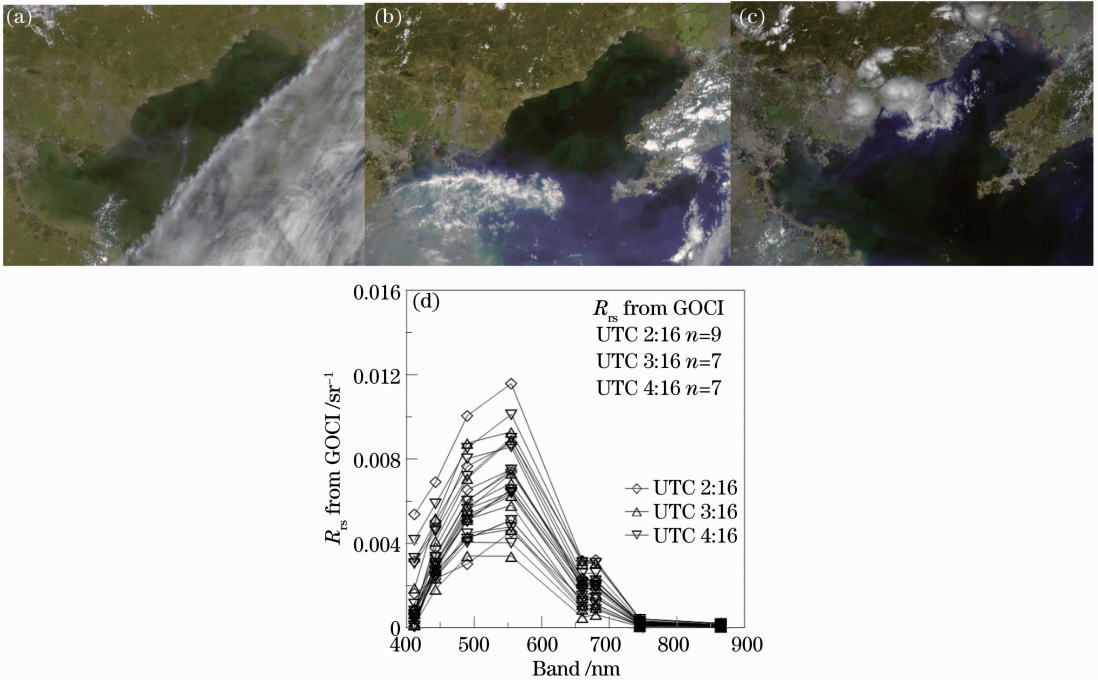


图 3 (a)~(c) GOCI 卫星真彩色图像和(d)光谱数据图

Fig. 3 (a)~(c) True color map and (d) R_{rs} of GOCI

表 1 现场和卫星 R_{rs} 统计表

Table 1 Statics (max,min and mean) of satellite-derived $R_{rs}(\lambda)$ and *in situ* $R_{rs}(\lambda)$ values

Band /nm	R_{rs} of <i>in situ</i> /sr ⁻¹			R_{rs} of satellite derived /sr ⁻¹		
	Max	Min	Mean	Max	Min	Mean
412	0.00561	0.00093	0.00287	0.00538	0.00008	0.0015
443	0.00741	0.00097	0.00378	0.0069	0.00183	0.00356
490	0.01055	0.00127	0.00516	0.01005	0.00303	0.00592
555	0.01229	0.00221	0.00567	0.01158	0.0034	0.00696
660	0.00483	0.00069	0.00197	0.0032	0.0005	0.00186
680	0.00326	0.00037	0.00123	0.00321	0.00063	0.0019
745	0.00109	0.00007	0.00037	0.00042	0.00006	0.00024
865	0.00068	0.00003	0.00023	0.00022	0.00003	0.00012

由现场的 R_{rs} 光谱图像(图 2)和 GOCI 卫星的光谱图像(图 3)可得，两者的光谱形状相似，都为 400~500 nm, R_{rs} 光谱随波段的增加而增加，在 555 nm 达到峰值，600~800 nm，随波段的增加 R_{rs} 下降，直至 800 nm 左右 R_{rs} 趋向 0 值。

不大，除去 412、745 和 865 nm 波段外，其他各个波段在平均值上的差异不大，指出两者之间可能存在良好的一致性。同时也在数值上证明，GOCI 光谱谱型和现场光谱谱型相一致；通过两者的最大值、平均值的对比看出，卫星的观测值要略微小于现场值。

由表 1 可以看出，两者的 R_{rs} 在数值上的差异并

2.4 评估统计方法

基于现场观测的 GOCI 的评估采用如下统计参数,包括平均相对百分比偏差(RPD, D_{RPD})、均方根误差(RMSE, E_{RMS})^[9]和平均比率,相应计算公式如下:

平均相对百分比偏差:

$$D_{RPD} = 100 \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{i=N} \left(\frac{X_i - Y_i}{Y_i} \right), \quad (2)$$

均方根误差:

$$E_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=N} (X_i - Y_i)^2}{N}}, \quad (3)$$

平均绝对百分比偏差:

$$|D_{RPD}| = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{X_i - Y_i}{Y_i} \right|, \quad (4)$$

式中 X_i 为 GOCI 的 R_{rs} 产品, Y_i 为现场实测 R_{rs} 数据。

3 数据分析

3.1 现场和卫星的光谱波段比对

通过现场和 GOCI 卫星的光谱比对图(图4)可以看出,GOCI 卫星和现场的光谱在趋势和数值上较一致。但在 555~865 nm 范围内,卫星和现场的值比较接近,在短波两者差异较大,尤其是在 412 nm 波段,这和 Ahn 的结果^[5]相类似。3:16 的结果有些偏低,有可能是 GOCI 卫星的大气校正过校正造成的这种现象。图4表明了 GOCI 的 R_{rs} 与现场观测的 R_{rs} 具有良好的谱形一致性,一定程度上证明了 GOCI 在浑浊水体的适用性。

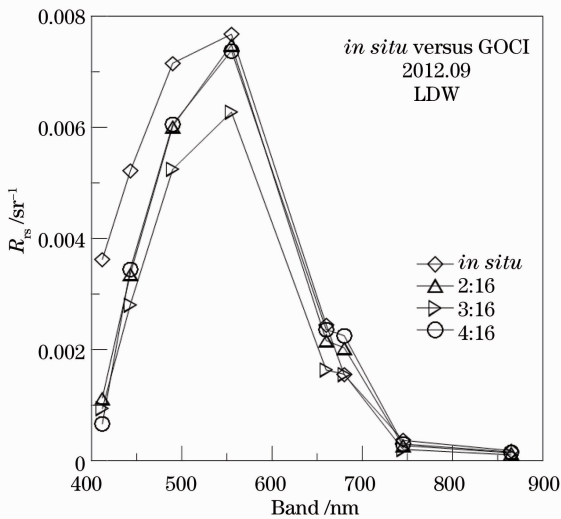


图4 GOCI 和现场光谱在比对结果图

Fig. 4 Results of the comparison between satellite-derived and *in situ* values

3.2 现场和卫星的波段比对

为评估 GOCI 卫星在辽东湾海区的适用性和精度,对于 GMT 2:16,3:16,4:16 获取的数据的 412、443、490、555、660、680、745 和 865 nm 中心波段 R_{rs} 数据分别进行匹配,评估不同波段的 GOCI 卫星数据。其中图5是 412、443、490、555、660、680、745 和 865 nm 中心波段 R_{rs} 的对比图,统计结果如表2所示。图6是各波段 RPD 和 RMSE 统计图。

由图5和图6(a)可以看出,在 412、680、745 和 865 nm 等四个波段上存在较大的负偏差,RPD 分别达到 -60%、-40%、-40%和 -40%。在 443 nm 和 660 nm 表现出良好的一致性,RPD 约为 20%。490 nm 和 555 nm 两个波段匹配效果最好,RPD 分别约为 3%和 5%。在 680 nm 波段的 RPD 为 41%,卫星观测值显著大于现场观测值,这与其他波段卫星观测值一般都小于现场观测值的现象不同。在进行大气校正的两个波段(745 nm 和 865 nm)上,当 R_{rs} 小于 0.0002 Sr^{-1} 时,卫星观测值与现场观测值匹配一致性良好,当 R_{rs} 大于 0.0002 Sr^{-1} 并随着 R_{rs} 增大,现场观测值则显著大于卫星观测值。表2中的波段比的特征与图6(a)的 RPD 的特征总体一致。

通过图6(b)和表2可以看出,在近红外波段的离水辐射率并不为0,这符合二类水体的特征,同样看到各个波段的 RMSE 值随着波段的减小而升高,

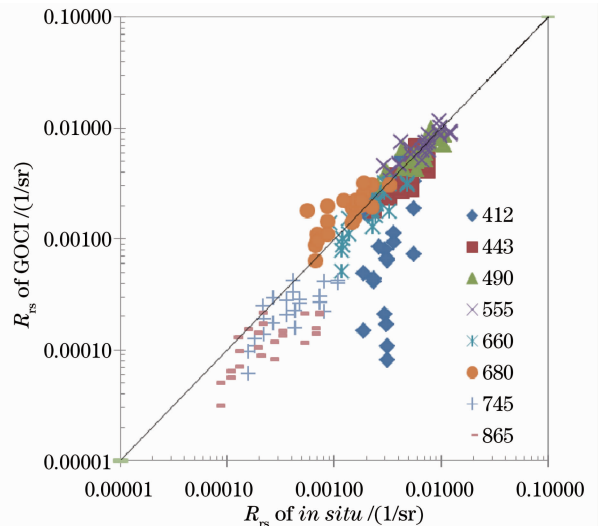


图5 GOCI 和现场光谱在 412、443、490、555、660、680、745 和 865 nm 中心波段 R_{rs} 数据比对结果图

Fig. 5 Results of the comparison between satellite-derived $R_{rs}(\lambda)$ and *in situ* $R_{rs}(\lambda)$ values for the 412, 443, 490, 555, 660, 680, 745 and 865 nm centered bands

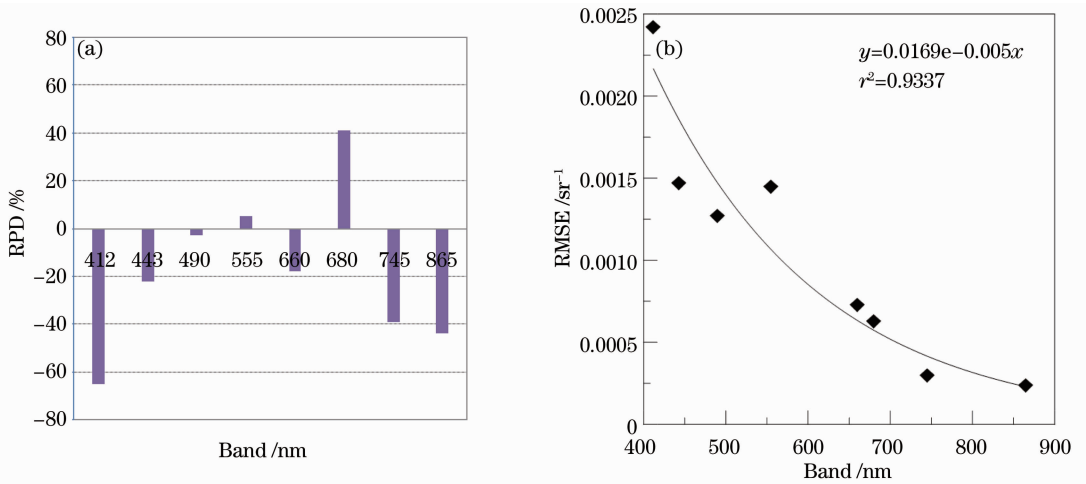


图 6 各波段(a) RPD 和(b) RMSE 统计图

Fig. 6 (a) RPD and (b) RMSE of the comparison between satellite-derived $R_{rs}(\lambda)$ and *in situ* $R_{rs}(\lambda)$ values for the 412, 443, 490, 555, 660, 680, 745 and 865 nm centered bands

表 2 GOCI 和现场光谱匹配数据统计结果表

Table 2 Statics (mean and RMSE) results of the comparison between satellite-derived $R_{rs}(\lambda)$ and *in situ* $R_{rs}(\lambda)$ values

	412	443	490	555	660	680	745	865
RPD /%	67.424	25.585	15.068	16.918	23.922	44.130	40.952	45.850
RMSE /sr ⁻¹	0.00242	0.00147	0.00127	0.00145	0.00073	0.00063	0.00030	0.00024
RPD /%	-64.996	-22.202	-2.88	5.179	-14.767	41.211	-38.939	-43.943

总体上呈指数级变化(指数约为 0.005, $R^2 = 0.9337$),在 412 nm 的 RMSE 值达到最大,大约是 865 nm 的 10 倍。离近红外波段越远,匹配数据点的离散程度越大。造成上述现象的原因,可能是 GOCI 的大气校正沿用经典的 SeaWiFS 大气校正方法,采用波段迭代来求取其他波段的气溶胶光学厚度,波段迭代会随着波段离近红外波段越远误差越大,而波段的本底值变化不太明显,因此匹配点的离散程度越高。这一结果与 Ahn 在 2011 年^[5]的验证结果相类似。

从波段对比的 RPD 和 RMSE 的变化可以看出,GOCI 对混浊水体的辨识主要体现在反映混浊水体高散射特性的 555 nm 波段,RPD 达到 5%,555 nm 波段是 GOCI 反演总悬浮物浓度的波段,因此 GOCI 能够较好地观测混浊水体的悬浮物。而 GOCI 的 412 nm 波段遥感反射比与现场观测的遥感反射比存在极大偏差,412 nm 波段是 GOCI 反演叶绿素浓度和黄色物质的波段,因此可以反映出对于 GOCI 反演混浊水体的叶绿素和黄色物质可能会存在较大偏差。

由于大颗粒的存在,混浊水体的近红外水体的

离水辐射不为 0,而且随着浑浊度的增大,近红外离水辐射的强度也会显著增大。GOCI 在 745 nm 和 865 nm 波段的较大负偏差,表明还需要进行进一步改善其大气校正算法,才能更好显示 GOCI 在混浊水体的观测能力和应用潜力。

3.3 不同卫星观测时间的 R_{rs} 比对

图 7 给出了 GOCI 在 GMT 2:16、3:16 和 4:16 三个观测时间获得的 R_{rs} 与现场观测的 R_{rs} 的比对结果。

通过对比散点图可以观察到,在三个时间观测的各个波段的一致性很好,线性对比的系数分别是 0.84、0.77 和 1.01(相应 R^2 为 0.87、0.85 和 0.83, $N=56、72$ 和 56),相对来说,GOCI 在 4:16 的比对结果优于 2:16 和 3:16 的比对结果。GMT 4:16 为当地时间 12:16,太阳的天顶角最小,卫星的观测角度和现场测量的相类似,在 2:16 和 3:16 时,太阳的天顶角变大,卫星的观测角度和现场测量差异变大。造成这一现象的原因可能为位置校正,或其并未采用理想的 BRDF 校正。其他学者的研究中并没提到该现象,在后续的研究中将获取更多 GOCI 全天逐时观测和现场连续观测数据来分析这种现象。

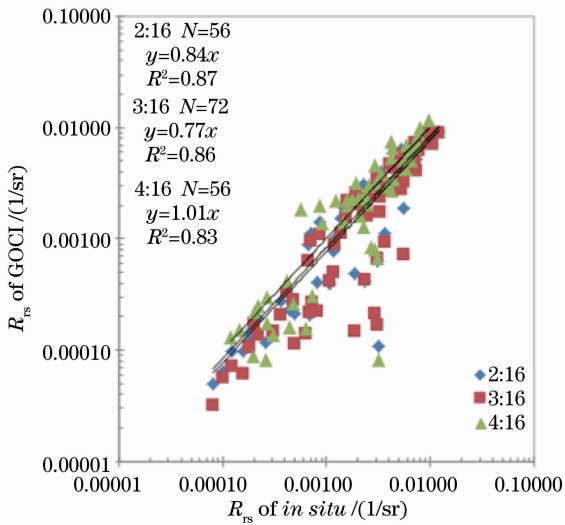


图 7 GOCI 在 GMT 2:16、3:16 和 4:16 三个观测时间的 R_{rs} 与现场观测的 R_{rs} 的对比结果

Fig. 7 Results of the comparison between satellite-derived R_{rs} at GMT 2:16, 3:16 and 4:16 with *in situ* $R_{rs}(\lambda)$ values

4 结 论

利用 2013 年 9 月渤海辽东湾现场观测数据独立对 GOCI 卫星观测的遥感反射比进行的检验结果表明:

1) GOCI 的遥感反射比与现场观测的遥感反射比谱型一致,各个波段的遥感反射比一致性较好,但总体偏低。GOCI 在二类水体中的表现,部分波段效果很好,如 490 nm 和 555 nm 的一致性最好,RPD 为 5% 以内。这是 GOCI 的优点;

2) 412 nm 则显著低估,RPD 达到约 60%。745 nm 和 865 nm 两个波段的遥感反射比也显著低估, RMSE 结果表明,412 nm 的 RMSE 是 865 nm 波段的近 10 倍,表明 GOCI 采用的大气校正算法仍未较好解决高浑浊度水体的遥感反射比获取, GOCI 基于迭代的大气校正算法带来的误差传递非常显著,并呈现指数递增的趋势,需要进一步完善大气校正算法;

3) GOCI 在 GMT 4:16(当地 12:16)的遥感反射比与现场观测的遥感反射比比效果优于其他两个时段,可能表明 GOCI 的最佳观测时间为太阳天顶角最小时。这一现象还需要选取更多的 GMT 时间点的 GOCI 卫星影像来加以证明,同时这一现象可能对 GOCI 研究海洋的短时间(一天内)变化的潜在能力是个提醒,这一现象的进一步验证还需要更多的实测数据。

参 考 文 献

- 1 D Antoine, F d'Ortenzio, S B Hooker, *et al.*. Assessment of uncertainty in the ocean reflectance determined by three satellite ocean color sensors (MERIS, SeaWiFS and MODIS-A) at an offshore site in the Mediterranean Sea (BOUSSOLE project) [J]. *J Geophys Research; Oceans* (1978 ~ 2012), 2008, 113(7): C07013.
- 2 S Hooker, C McClain. The calibration and validation of SeaWiFS data [J]. *Progress in Oceanography*, 2000, 45(3): 427-465.
- 3 N Lamquin, C Mazeran, D Doxaran, *et al.*. Assessment of GOCI radiometric products using MERIS, MODIS and field measurements [J]. *Ocean Science Journal*, 2012, 47(3): 287-311.
- 4 J H Ryu, H J Han, S Cho, *et al.*. Overview of geostationary ocean color imager (GOCI) and GOCI data processing system (GDPS) [J]. *Ocean Science Journal*, 2012, 47(3): 223-233.
- 5 J H Ahn, Y J Park, J H Ryu, *et al.*. Development of atmospheric correction algorithm for Geostationary Ocean Color Imager (GOCI) [J]. *Ocean Science Journal*, 2012, 47(3): 247-259.
- 6 J K Choi, Y J Park, J H Ahn, *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; Oceans* (1978 ~ 2012), 2012, 117(C9): C09004.
- 7 Tang Junwu. The Ocean Optics Simulation and Remote Sensing Model [D]. Beijing: Institute of Remote Sensing Applications, 1999.
唐军武. 海洋光学特性模拟与遥感模型[D]. 北京: 中国科学院遥感应用研究所, 1999.
- 8 Li Tongji, Tang Junwu, Chen Qinglian, *et al.*. Processing method of leave water radiance measured by spectrometer [J]. *Ocean Technology*, 2000, 19(3): 11-16.
李铜基, 唐军武, 陈清莲, 等. 光谱仪测量离水辐射率的处理方法[J]. *海洋技术*, 2000, 19(3): 11-16.
- 9 S W Bailey, P J Werdell. A multi-sensor approach for the on-orbit validation of ocean color satellite data products [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 102(1): 12-23.

栏目编辑: 李志兰