

引用格式: Wu Jie, Chen Chuqun, Liu Yequ. The Preliminary Study of the Radiometric Cross-calibration of Zhuhai-1/OHS[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2021, 36(4): 791-802. [吴颀, 陈楚群, 刘叶取. 珠海一号欧比特高光谱数据交叉辐射定标初探[J]. 遥感技术与应用, 2021, 36(4): 791-802.]
DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2021.4.0791

珠海一号欧比特高光谱数据交叉辐射定标初探

吴颀^{1,2,3}, 陈楚群^{1,2,3}, 刘叶取^{1,3}

- (1. 热带海洋环境国家重点实验室, 广东省海洋遥感重点实验室, 中国科学院南海海洋研究所, 广东 广州 510301;
2. 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州), 广东 广州 511458;
3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 搭载了“珠海一号”卫星星座的欧比特高光谱 OHS(Orbit Hyper Spectral)传感器, 以较高的光谱分辨率和空间分辨率, 在近岸及内陆湖泊水色遥感应用方面具有很大潜力。然而 OHS 缺乏星上定标系统, 目前在轨定标采用陆地定标场的资料, 其定标结果在水体等低反射率地物误差较大。因此提出一种基于传感器入瞳总辐亮度的交叉辐射定标法, 该方法结合 QAA(Quasi-Analytical Algorithm) 准分析算法和 6SV2.1 辐射传输模型, 利用 GOCI(Geostationary Ocean Color Imager) 多光谱数据对 OHS 高光谱数据进行交叉辐射定标。研究结果表明: ① GOCI 和 OHS 传感器获取的地物辐射相关性好, 在可见光波段范围内, R^2 均高于 0.84; ② 重新定标后的数据能明显改善不同传感器之间的辐射差异, 在可见光波段范围内, 定标误差小于 9%。实验为高光谱传感器的辐射定标提供了一种新的方法, 对建立高光谱量化、业务化水色遥感处理系统, 特别对 OHS 数据在水域的各种应用具有重要意义。

关键词: 欧比特高光谱(OHS); 珠海一号; 交叉辐射定标; 高光谱; QAA

中图分类号: TP701 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-0323(2021)04-0791-12

1 引言

“珠海一号”卫星星座是由珠海欧比特宇航科技股份有限公司投资发射并运营的商业遥感卫星星座, 其中 02 组卫星于 2018 年 4 月 26 日发射升空, 其搭载的欧比特高光谱 OHS(Orbit HyperSpectral) 传感器具有高光谱分辨率、高空间分辨率、宽覆盖能力的特点, 平均光谱分辨率 2.5 nm, 光谱覆盖可见光至近红外波段(400 nm~1 000 nm), 地面分辨率达 10 m, 幅宽大于 150 km, 单景最大的成像范围可达 150 km×2 500 km, 4 颗卫星可实现每 5 d 左右对全球扫描一遍。珠海一号的成功发射, 丰富了我

国高光谱遥感数据源。高光谱遥感可以实现对地物目标的精确识别和定量反演, 是遥感技术发展重要方向之一^[1], 而准确的辐射定标是卫星遥感数据处理及其定量化应用中非常重要的基础工作, 也是难点之一。

辐射定标是建立卫星传感器记录的数字信号(DN)值与对应的辐射能量值之间的数量关系, 将原始 DN 值转换为辐亮度值的过程。卫星发射前会基于标准灯或积分球进行实验室定标, 但在卫星发射和工作过程中, 传感器的性能会发生变化和衰减, 为保证数据质量, 需要定期对传感器进行在轨

收稿日期: 2020-04-29; 修订日期: 2021-06-22

基金项目: 国家自然科学基金—广东联合基金(U1901215), 国家重点研发计划“海洋环境安全保障”重点专项(2018YFC1406604), 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州)人才团队引进重大专项(GML2019ZD0305), 广州市科技计划项目(201707020031)。

作者简介: 吴颀(1992—), 女, 湖南长沙人, 博士研究生, 主要从事海洋水色遥感大气校正研究。E-mail: wujie@scsio.ac.cn

通讯作者: 陈楚群(1960—), 男, 湖南邵阳人, 博士, 研究员, 主要从事海洋水色遥感研究。E-mail: cqchen@scsio.ac.cn

辐射定标^[2]。目前在轨辐射定标方法包括星上定标、场地辐射定标以及交叉辐射定标。星上定标要求传感器配备有星上定标系统,然而珠海一号卫星并未配备,目前OHS是使用敦煌定标场的数据进行场地定标。场地定标法是利用与卫星同步测量的大气和地面数据进行在轨定标的方法,是最直接有效的方法之一。国内学者利用我国敦煌辐射定标场的数据,对包括HJ-1A和HJ-1B星的CCD^[3]和CBERS-02星CCD^[4]、GF-1星的PMS^[5]等多光谱传感器进行定标,敦煌定标场的数据也被应用于高光谱传感器的辐射定标,如SPARK-01和02高光谱卫星^[6]、HJ-1A高光谱成像仪(HSI)^[7],以及EO-1/Hyperion高光谱传感器^[8]。敦煌辐射定标场是陆地定标场,难以满足水体等低反射率地物的定标要求,另外场地定标需要大量的同步测量数据,人力物力消耗大,试验费昂贵,交叉辐射定标正好可以弥补这一缺点。交叉辐射定标是使用已知定标精度较高的光学传感器作为参考,对待定标光学传感器进行定标的一种方法,其优点是定标成本低,可以实现高频次、多传感器间的辐射定标,且适用于水体这类低反射率地物的辐射定标^[9],近年来广泛应用于多光谱传感器,如GF-1/WFV^[10-11]、HY-1A水色水温扫描仪COCTS^[12]、Tiangong-2/MWI^[13]等。而针对高光谱传感器,交叉辐射定标的难点主要在于其观测通道多,难以实现不同传感器之间的光谱匹配,目前没有高光谱传感器交叉辐射定标的相关研究。

国内外广泛应用的水色传感器为多光谱传感器,高光谱遥感数据提升了遥感观测的信息维度,在水色遥感应用上有着很大的潜力,如在识别浮游植物群落等方面具有显著优势^[14]。而水体的反射率低,高精度的水体定量化、业务化遥感对传感器的辐射定标结果有着更高的要求。目前OHS的辐射定标结果在水体误差大,这限制了该数据在水色遥感领域的应用。为了提高OHS在水体的辐射定标精度,实验将以GOCI(Geostationary Ocean Color Imager)作为参考传感器对OHS进行交叉辐射定标。为了解决光谱匹配的难题,利用QAA(Quasi-Analytical Algorithm)准分析算法,先由多光谱的水体遥感反射率推导出连续的高光谱遥感反射率,实现不同传感器之间的光谱匹配,再基于传感器入瞳总辐亮度值确定定标系数,最后对定标结果进行了分析和讨论。

2 研究数据

受OHS数据量的限制,选取2019年5月7日黄河河口附近GOCI和OHS无云影像各一景,OHS影像成像时间为03:12 GMT,GOCI影像成像时间为03:16 GMT,两景影像时间差仅为4 min。两景影像的RGB假彩色合成图如图1所示,其中GOCI合成波段为486 nm(B)、555 nm(G)、680 nm(R),OHS合成波段为480 nm(B)、550 nm(G)、670 nm(R)。两景影像观测到的水体变化趋势几乎一致,OHS影像有着更高的空间分辨率,影像中细节更为清晰,同时在水域噪声也更加明显。

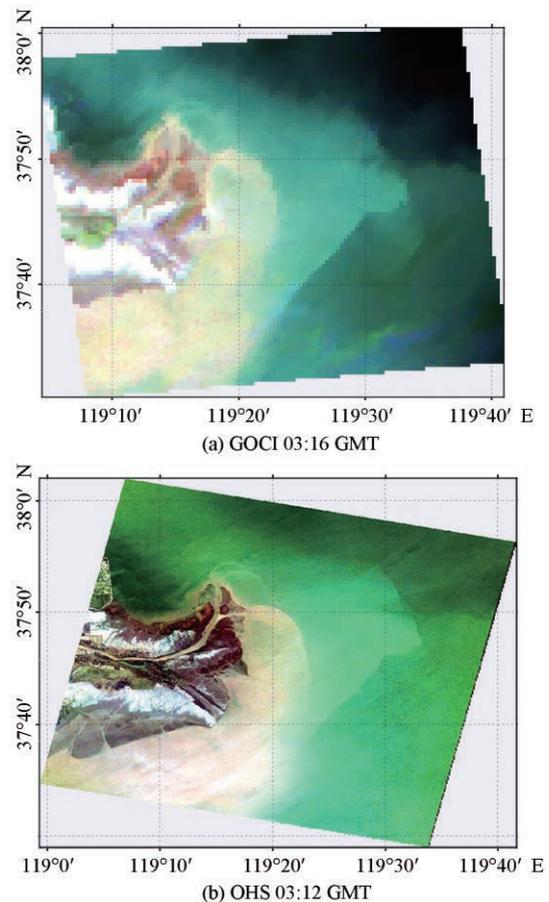


图1 2019年5月7日黄河河口附近GOCI和OHS影像的假彩色合成图

Fig.1 The composed RGB pictures of the GOCI and OHS data centered on the Huanghe river estuary on 7 May 2019

2.1 GOCI数据

GOCI是世界上第一颗地球静止轨道的水色遥感卫星,其空间分辨率为500 m,设置有6个可见光波段(412、443、490、555、660、680 nm)和2个近红外波段(745、865 nm)。GOCI的运行轨道与地球同步,突出特点是时间分辨率高,从00:00~07:00

(GMT)每隔1 h采样一次,每天采样8次^[15]。高的时间分辨率使得同一观测区域内,至少有一景GO-CI影像和OHS影像的时间差在半小时以内。GO-CI传感器的星上定标采用太阳定标作为主要方式^[16],结合在轨替代定标,辐射定标精度优于1%^[17],遥感反射率(R_s)反演精度可达6.8%^[18],满足水色遥感的辐射定标要求^[19]。GO-CI数据的官方处理软件GDPS(GOCI Data Processing System)由韩国海洋卫星中心(Korea Ocean Satellite Center)开发,其中内置了两种大气校正和多种常用的水色遥感产品反演算法,可以将L1B数据处理成L2级海洋数据产品,包括有归一化离水辐亮度(L_{wn})、遥感反射率、叶绿素浓度、黄色物质浓度和总悬浮物浓度等等。

由于GO-CI具有高的时间分辨率,辐射定标精度满足水色遥感应用的要求,数据易于获取,可在KOSC网站上免费下载(http://kosc.kiost.ac.kr/eng/p10/kosc_p11.html),又配有成熟的算法和数据处理软件,因此是作为参考传感器对OHS进行交叉辐射定标的较优选择。

2.2 OHS数据

OHS的地面分辨率为10 m,光谱范围覆盖可见光至近红外(400~1 000 nm),平均光谱分辨率2.5 nm,波段可达256个,用户可根据具体需求选取任意32个波段下传,并可动态调整各波段范围。实验选用OHS数据来自OHS-2C星CCD2。图2中彩色虚线为所选OHS影像32个波段的光谱响应曲线,黑色实线为GO-CI传感器的光谱响应函数曲线。GO-CI属于多光谱传感器,波段数远远少于OHS。OHS影像的32个波段中,有部分波段落在了H₂O或O₂的吸收区,如图3所示。由于缺乏现场实时的大气参数数据,无法准确估算H₂O和O₂吸收的影响,因此落在吸收区内的波段将暂时不予讨论,实

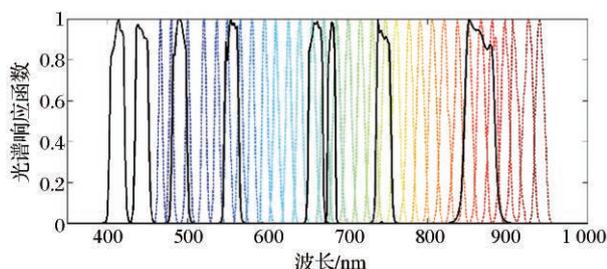


图2 GO-CI(黑色实线)与OHS(彩色虚线)的光谱响应函数曲线

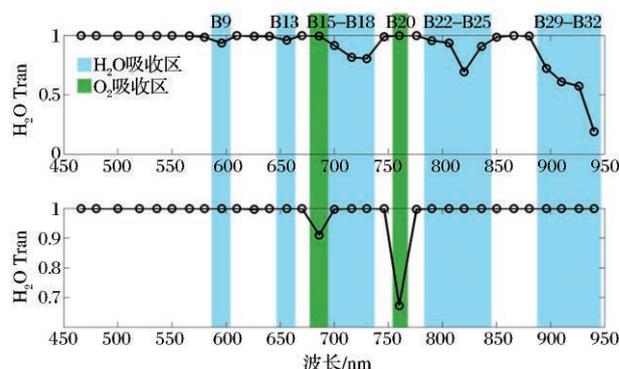
Fig.2 The relative spectral response of OHS (colored dotted lines) and GO-CI (black solid lines)

际讨论波段为表1中加粗字体所示的16个波段。

3 交叉辐射定标

3.1 定标原理

实验采用的是基于传感器入瞳总辐亮度的交叉辐射定标法,其原理是当参考传感器和待定标传感器的成像时间相近且观测同一水体目标时,假设二者过境时的水体参数及大气状况相同,则由参考传感器的数据计算出水体归一化离水辐亮度和大气参数,进而推导出在待定标传感器观测几何条件下接收到的水体和大气的辐射,最后合成待定标传感器过境时理论上的入瞳总辐亮度,并与DN值作比较,得到待定标传感器的辐射定标系数^[20]。



(6SV2.1中纬度夏季大气)

图3 OHS各波段的H₂O和O₂大气透过率

Fig.3 The transmittances of H₂O and O₂ at OHS channels

表1 OHS波段及其中心波长

Table 1 Central wavelength of OHS channels

通道	中心波长/nm	通道	中心波长/nm
B01	466	B17	716
B02	480	B18	730
B03	500	B19	746
B04	520	B20	760
B05	536	B21	776
B06	550	B22	790
B07	566	B23	806
B08	580	B24	820
B09	596	B25	836
B10	610	B26	850
B11	626	B27	866
B12	640	B28	880
B13	656	B29	896
B14	670	B30	910
B15	686	B31	926
B16	700	B32	940

注:加粗字体表示本实验讨论波段

定标的具体流程如下:水色遥感中,在忽略白帽和太阳耀斑影响的情况下,传感器接收到的总的辐射 L_t 由大气分子的瑞利散射辐射 L_r 、气溶胶散射辐射 L_a 和离水辐射 L_w 这3部分组成:

$$L_t(\lambda) = L_r(\lambda) + L_a(\lambda) + t_v(\lambda)L_w(\lambda) \quad (1)$$

其中: λ 为波长; t_v 为水面到传感器路径上的大气漫射透过率; L_w 为:

$$L_w(\lambda) = t_s(\lambda)R_{rs}(\lambda)F_0(\lambda)\cos\theta_s \quad (2)$$

其中: R_{rs} 为水面以上遥感反射率; F_0 为大气层外太阳辐照度; θ_s 为太阳天顶角; t_s 为太阳到水面路径上的大气漫射透过率。后文中将使用上标GOCI和OHS来区分不同传感器的参数。GOCI数据由GDPS软件大气校正处理后,可以得到GOCI过境时观测区域的气溶胶参数及 R_{rs}^{GOCI} 。OHS和GOCI两个传感器准同步对同一水体区域进行观测时,假设两个传感器过境时段内大气和水体的变化可以忽略,则将GOCI数据得到气溶胶参数、OHS数据观测几何条件、OHS光谱响应函数等输入6SV(Second Simulation of a Satellite Signal in the Solar Spectrum - Vector)辐射传输模型中,可得到对应OHS传感器理论上的 t_s^{OHS} 和 t_v^{OHS} 值,以及对应接收到的 L_r^{OHS} 和 L_a^{OHS} 值,再加上已知的离水辐射值,便可得到OHS大气层外模拟的总辐亮度 L_t^{OHS} ,建立此总辐亮度值与OHS接收到的DN值的对应关系便可得到辐射定标系数,从而实现对OHS的在轨交叉辐射定标。

针对以上交叉定标思路,有以下问题需要解决:

①OHS与GOCI的光谱匹配;②OHS理论上接收的大气辐射信号的模拟;③OHS与GOCI的空间匹配。

3.2 光谱匹配

交叉辐射定标对参考传感器和待定标传感器之间的通道设置和光谱响应函数有严格要求,因为即使两传感器的观测环境完全相同,不同光谱波段范围内水体和大气的吸收、散射性质存在较大差异,光谱响应函数的差异也直接影响了传感器入瞳总辐亮度值的大小。

OHS是高光谱传感器,星上有256个通道,任选32个通道下传,而常用的水色传感器一般为多光谱传感器,如GOCI在可见光至近红外只有8个波段,波段数远少于OHS。如果要对OHS的所有波段进行辐射定标,在缺少实测光谱的情况下,期望可以通过GOCI在8个波段的离水辐射值推导出水体的固有光学性质,再模拟出在OHS各波段的离水

辐射值。实验中,使用了QAA(Quasi-Analytical Algorithm)准分析算法^[21]来推导水体的固有光学性质。

在海洋光学中,水体的性质可以分为表观光学性质和固有光学性质,表观光学性质是受环境辐射场的影响,如水面以上遥感反射率 R_{rs} 、漫射衰减系数等,而固有光学性质是不随环境的变化而变化的,如吸收系数、散射系数等。固有光学性质直接与水体中物质的组分及其浓度相关,而遥感或者现场测量获得的一般是水体表观光学性质的参数^[22]。通过推导辐射传递函数,表观光学性质与固有光学性质之间存在一定的关系,如:

$$R_{rs}(\lambda) = \frac{0.52r_{rs}(\lambda)}{1.0 - 1.7r_{rs}(\lambda)} \quad (3)$$

其中: r_{rs} 是水面以下遥感反射率;是吸收系数和后向散射系数的函数:

$$r_{rs}(\lambda) = g_0u(\lambda) + g_1[u(\lambda)]^2 \quad (4)$$

$$u(\lambda) = \frac{b_b(\lambda)}{a + b_b(\lambda)} \quad (5)$$

其中: $g_0=0.08945$, $g_1=0.1247^{[17,21]}$; b_b 是总后向散射系数; a 是总吸收系数。

$$b_b(\lambda) = b_{bw}(\lambda) + b_{bp}(\lambda) \quad (6)$$

$$a(\lambda) = a_w(\lambda) + a_{dg}(\lambda) + a_\varphi(\lambda) \quad (7)$$

其中: b_{bw} 是水体的后向散射系数; b_{bp} 是悬浮物的后向散射系数; a_w 是水体的吸收系数; a_{dg} 是黄色物质及碎屑的吸收系数; a_φ 是浮游动植物的吸收系数。 $b_{bw}^{[23]}$ 和 a_w 仅与波长相关:

$$b_{bw}(\lambda) = 0.002\left(\frac{0.45}{\lambda}\right)^{4.3} \quad (8)$$

a_w 由前人测量^[24-25]。因此如果已知水体的表观光学性质,可以推导出水体的固有光学性质,反之亦然。

GDPS是GOCI数据的官方处理软件,内置了部分二级产品处理算法,其缺省的大气校正算法是适用于浑浊水体的波段经验迭代算法^[26],缺省的固有光学性质反演算法是QAA算法^[17]。首先使用GDPS软件对GOCI的L1B数据进行处理,得到GOCI各波段的 R_{rs} 光谱和固有光学性质产品,之后再运用QAA算法^[21]进一步得到水体在任一波段的 b_{bp} 和 a_{dg} ,其具体步骤如表2中步骤0~12所示。由于QAA算法是借助后向散射系数光谱模型、黄色物质吸收系数光谱模型和波段的总吸收系数来估算叶绿素的吸收光谱,在局地叶绿素吸收光谱模型未知的情况下,无法准确计算得到OHS各波段的叶

绿素吸收系数。

因此实验通过对 GOCI 各波段的叶绿素吸收系数进行线性插值得到其他波段的叶绿素吸收系数,以提高 QAA 在该水域的适用性。已知 b_{bp} 、 a_{dg} 和 a_{φ} ,由式(3)~(8)反求出水体的连续 R_{rs} 光谱,最后通过

OHS 的光谱响应函数 $F(\lambda)$ 求得 OHS 各波段 λ_i 的 $R_{rs}(\lambda_i)$ 值:

$$R_{rs}(\lambda_i) = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F(\lambda) R_{rs}(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F(\lambda) d\lambda} \quad (9)$$

表 2 QAA 算法的步骤及公式

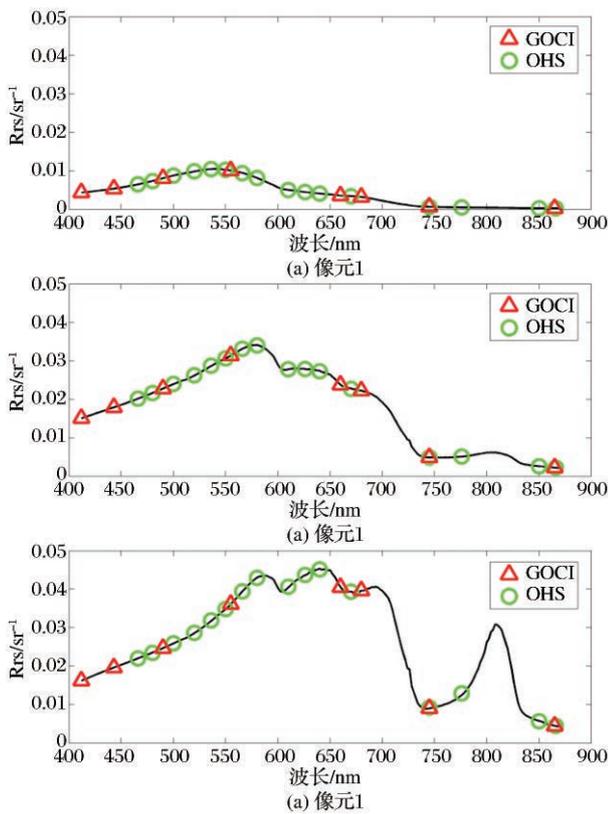
Table 2 The steps and formulas of the QAA algorithm

步骤	参数	描述	计算公式
0	$R_{rs}(\lambda)$	水面以上遥感反射率	GDPS 产品
1	$r_{rs}(\lambda)$	水面以下遥感反射率	$r_{rs}(\lambda) = \frac{R_{rs}(\lambda)}{0.52 + 1.7R_{rs}(\lambda)}$
2	$u(\lambda)$	中间参数	$u(\lambda) = \frac{-g_0 + [(g_0)^2 + 4g_1 r_{rs}(\lambda)]^{1/2}}{2g_1}$
3	$a(555)$	555 nm 处的总吸收系数	GDPS 产品
4	$b_{bp}(555)$	555 nm 处的悬浮物后向散射系数	$b_{bp}(555) = \frac{u(555)a(555)}{1-u(555)} - b_{bw}(555)$
5	Y	中间参数	$Y = 2.0 \{ 1 - 1.2 \exp[-0.9 \frac{r_{rs}(443)}{r_{rs}(555)}] \}$
6	$b_{bp}(\lambda)$	任一波段的悬浮物后向散射系数	$b_{bp}(\lambda) = b_{bp}(555) (\frac{555}{\lambda})^Y$
7	$a(\lambda)$	任一波段的总吸收散射系数	$a(\lambda) = \frac{[1-u(\lambda)][b_{bw}(\lambda) + b_{bp}(\lambda)]}{u(\lambda)}$
8	$\zeta = a_{\varphi}(412) / a_{\varphi}(443)$	中间参数	$\zeta = 0.74 + \frac{0.02}{0.8 + r_{rs}(443)/r_{rs}(555)}$ $\zeta = \exp[S(443-412)]$
9	$\xi = a_g(412) / a_g(443)$	中间参数	其中: $S = 0.015 + \frac{0.002}{0.6 + \frac{r_{rs}(443)}{r_{rs}(555)}}$
10	$a_g(443)$	443 nm 处的黄色物质的吸收系数	$a_g(443) = \frac{a(412) - \zeta a(443)}{\zeta - \zeta} - \frac{a_w(412) - \zeta a_w(443)}{\zeta - \zeta}$
11	$a_{dg}(\lambda)$	任一波段的黄色物质及碎屑的吸收系数	$a_{dg}(\lambda) = a_g(443) \exp[-S(\lambda-443)]$
12	$a_{\varphi}(\lambda)$	任一波段的浮游动植物的吸收系数	$a_{\varphi}(\lambda) = a(\lambda) - a_{dg}(\lambda) - a_w(\lambda)$

在 GOCI 观测的水域范围中选取 3 个代表不同浑浊程度水体的像元,其光谱分别如图 4 中(a)、(b)和(c)所示。图中红色三角形表示由 GDPS 软件计算得到的 GOCI 各波段的 R_{rs}^{GOCI} ,黑色实线表示由 R_{rs}^{GOCI} 经 QAA 算法推导出来的连续的 R_{rs} 光谱,绿色圆圈表示由连续的 R_{rs} 光谱通过 OHS 光谱响应函数积分得到的 OHS 各波段的 R_{rs}^{OHS} 。图 4 中,当水体变浑浊时,水体在可见光和近红外波段的 R_{rs} 都会明显增高, R_{rs} 光谱曲线峰值会由短波往长波方向移动,这是光谱反射率峰值“红移”现象;当水体较为清洁时, R_{rs} 光谱呈单峰形态分布,峰值在 550 附近;随着水体浑浊度增加,600~700 nm 之间的 R_{rs} 明显升高,反射峰的宽度也增大,800 nm 附近的峰值开始出现;随着水体进一步浑浊,800 nm 附近的峰值显著升高。这与之前学者在黄河口附近实测得到的光谱特性一致^[27]。总体来说,通过 QAA 算法模拟得

到的连续 R_{rs} 光谱曲线较为可信,由其得到的 OHS 波段的 R_{rs} 值可用来进行辐射定标。

为了确定并验证定标系数,在 GOCI 观测的水域范围中任意选取了 300 个像元作为样本,样本像元的选取遵循以下规则:①利用 GDPS 产品中用于控制数据质量的标记^[17],除去 GOCI 影像中被标记为陆地(Land)、云或冰(Cloud_or_Ice)、云边缘(Cloud_Edge)、高亮像元的邻近像元(Bright_Pxl_Adj)、大气校正迭代未收敛(Max_Iteration)、大气校正失败(Atmospheric_Correction_Fail)、高气溶胶(High_Aerosol)等的像元;②由于 QAA 在高浑浊水体反演精度较低^[28],为了降低由 QAA 带来的误差,样本选取避开了靠近黄河口的极度浑浊水体的像元,除去了 GOCI 影像中 $R_{rs}(555)/R_{rs}(660) < 0.9$ 的像元;③除去 3×3 像元矩阵内 $R_{rs}(680)$ 的变异系数大于 5% 的空间变化大的像元;④在剩下的像元中,



(三角表示 GOCI 的 R_{rs} 光谱, 实线为 QAA 推导得到连续的 R_{rs} 光谱, 圆圈为模拟得到 OHS 的 R_{rs} 光谱)

图 4 不同浑浊程度水体的 R_{rs} 光谱

Fig.4 The R_{rs} spectrum of the different types of water

随机选取 300 个像元作为样本像元。300 个样本像元中, 150 个像元的数据用于确定新的定标系数, 另外 150 个像元用于检验新的定标系数。图 5 所示为 300 个样本像元, 经由 QAA 算法推导和光谱响应函数积分, 最终得到模拟的 OHS 各波段的 R_{rs} 光谱。

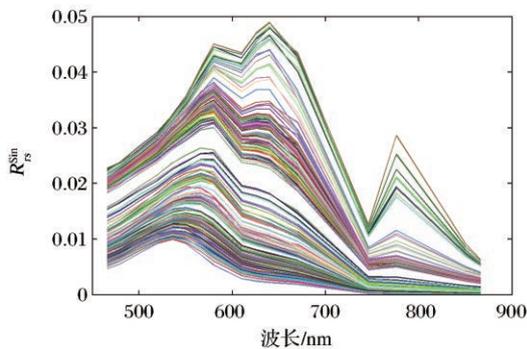


图 5 QAA 算法模拟的 OHS 各波段的 R_{rs} 光谱

Fig.5 The simulated R_{rs} spectrum derived from QAA at OHS channels

3.3 大气辐射模拟

大气信号的模拟使用 6SV2.1 辐射传输模型。6SV 模型可以很好地模拟光辐射在传输过程中所

受到的大气影响, 考虑了偏振、地面目标的海拔高度、地表双向反射特性和主要大气气体的吸收^[29], 提高了瑞利散射和气溶胶散射信号的计算精度。6SV 模型主要适用于 0.25~4.0 μm 波段的大气校正, 是当前发展的比较成熟的大气订正模型之一。在 6SV 模型中, 输入影像获取日期、观测目标所处经纬度、传感器观测几何条件、大气分子类型、气溶胶模型、气溶胶光学厚度、海拔高度和传感器的光谱响应函数等, 即可模拟出 L_r, L_a, t_v, t_s 等参数^[30]。

黄河口海区为我国东部沿海季风盛行区之一, 夏季盛行偏南风, 冬季盛行偏北风^[31], 图 6 所示为所选 GOCI 影像成像时的风场, 风场数据来自于 NCEP (National Center for Environmental Prediction)。当天在观测区域主要是由海洋吹向陆地的风, 天气晴朗, 550 nm 处的气溶胶光学厚度约在 0.25 左右, 因此在 6SV2.1 模型中选取海洋型气溶胶类型, 再代入 550 nm 处的气溶胶光学厚度的数据, 由 6SV2.1 模型计算出 300 个样本像元在 OHS 各通道的 L_r, L_a, t_v, t_s 。

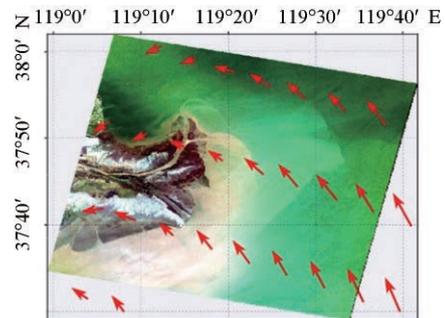


图 6 黄河口附近风场分布图

Fig.6 The map of the wind field centered on the Huanghe River Estuary

3.4 空间匹配

样本数据集的 300 个像元通过上文中 3.2 节和 3.3 节所描述的过程, 分别计算得到 OHS 理论上各通道接收到的水体和大气的辐射值, 再由式(1)和式(2)合成模拟的 OHS 各通道入瞳总辐亮度值 L_t^{sim} , 如图 7 所示。然而 GOCI 与 OHS 的空间分辨率存在较大差异, GOCI 为 500 m, OHS 为 10 m, 下一步需要将 L_t^{sim} 与 OHS 的 DN 值进行空间匹配。

GOCI 传感器运行在地球同步的轨道, 其观测天顶角和方位角不变, 在不同观测位置, 其地面分辨率大约在 500~513 m 范围内变化, 在研究区域黄河口附近, GOCI 地面分辨率约为 503 m, 同时 OHS 的地面分辨率都在 10 m 左右, 正负不超过 1 m, 因

此,对于GOCI中的一个像元,本实验将与其对应的OHS 50×50像元矩阵内的DN值的平均值,作为与GOCI对应的OHS的值。

3.5 定标结果

将用于确定新定标系数的150个像元的 L_t^{Sim} 与DN进行一次函数线性拟合,结果如图8,得到的拟合系数即为新辐射定标系数(表3)。图8中, R^2 为决定系数,平均绝对百分比误差APD(Absolute Percentage Difference)的定义为:

$$APD = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{X^e - X^t}{X^t} \right| \times 100\%, \quad (10)$$

其中: X^t 为真值, X^e 为估算值。图8中,在可见光波段,OHS的DN值与模拟的 L_t^{Sim} 有着很好的相关性,

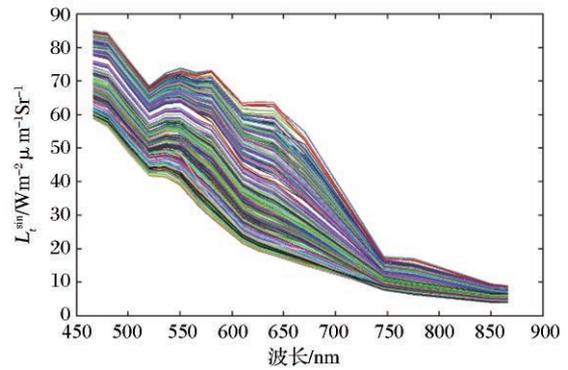
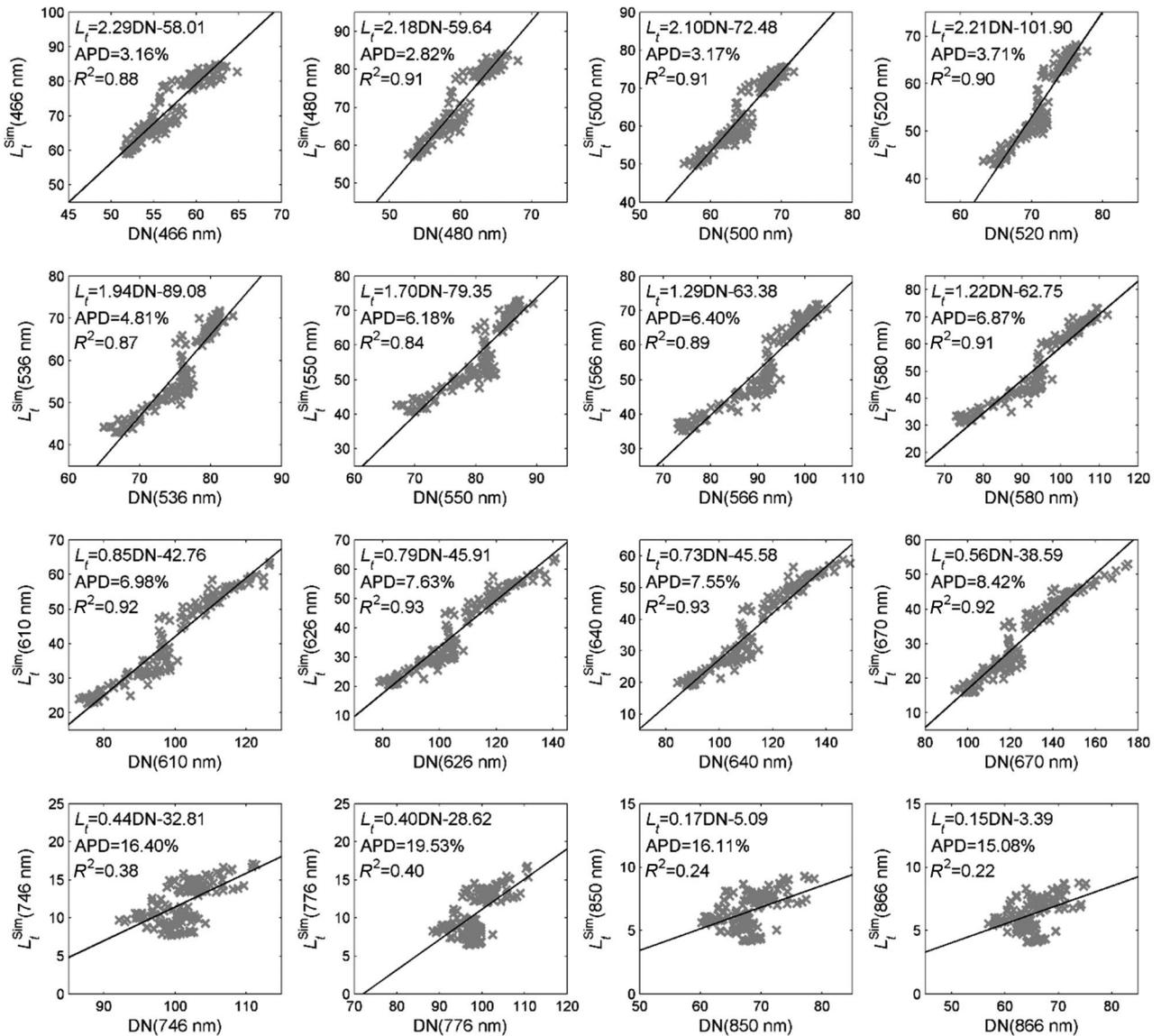


图7 模拟的OHS各波段入瞳总辐亮度光谱

Fig.7 The simulated total radiance spectrum of OHS

R^2 均不低于0.84。同时,在可见光波段, DN值与 L_t^{Sim} 的一次函数线性拟合的APD都在8.5%以内,



(L_t^{Sim} 的单位为 $W m^{-2} \mu m^{-1} sr^{-1}$)

图8 OHS各波段模拟的 L_t^{Sim} 与DN值的散点图

Fig.8 The simulated L_t^{Sim} values versus DN values at different OHS channels

在466~536 nm波段,APD均在5%以下。然而在4个近红外波段, R^2 较低,同时APD都高于15%。

表3中,原增益参数和新增益参数在可见光波段差异较小,在近红外波段差异较大,原偏移参数均为0,而新偏移参数的绝对值与水域上方 L_t 值相当,因此忽略偏移参数,会严重影响辐射定标的结果。

表3 OHS各通道的原、新增益参数和偏移参数值
Table 3 The initial/new gain and offset values at OHS channels

通道	波长 /nm	原增益参数	原偏移参数	新增益参数	新偏移参数
B01	466	2.133 57	0.000 00	2.288 37	-58.008 77
B02	480	2.136 69	0.000 00	2.178 79	-59.640 03
B03	500	2.054 75	0.000 00	2.099 15	-72.476 00
B04	520	1.980 29	0.000 00	2.213 27	-101.897 95
B05	536	1.965 19	0.000 00	1.941 30	-89.075 23
B06	550	1.711 48	0.000 00	1.702 05	-79.354 42
B07	566	1.211 36	0.000 00	1.289 65	-63.379 83
B08	580	1.100 81	0.000 00	1.216 58	-62.749 13
B10	610	0.837 17	0.000 00	0.848 97	-42.756 69
B11	626	0.695 21	0.000 00	0.794 45	-45.912 87
B12	640	0.626 68	0.000 00	0.729 69	-45.576 01
B14	670	0.491 47	0.000 00	0.555 06	-38.589 16
B19	745	0.328 49	0.000 00	0.442 65	-32.810 31
B21	776	0.320 90	0.000 00	0.397 74	-28.622 44
B26	850	0.360 55	0.000 00	0.170 69	-5.085 50
B27	866	0.372 98	0.000 00	0.148 90	-3.393 56

将新的定标系数代入用于检验的150个样本像元,检验定标结果如图9所示。图9中RMSE(Root Mean Square Error)为均方根误差,其单位为: $W m^{-2} \mu m^{-1} sr^{-1}$,MPD(Mean Percentage Difference)为平均百分比误差,定义分别为:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X^e - X^t)^2} \quad (11)$$

$$MPD = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{X^e - X^t}{X^t} \times 100\% \quad (12)$$

图9中,16个波段的 L_t^{OHS} 和 L_t^{Sim} 的散点都很好地分布在了1:1线附近,可见光波段的MPD的绝对值在0.9%以内,近红外波段的MPD在3.08%~4.22%之间,验证了用多光谱水色传感器对高光谱传感器进行交叉辐射定标的可行性。在可见光波段, L_t^{OHS} 与 L_t^{Sim} 的 R^2 都高于0.88,定标误差在9%以内,而在近红外波段, L_t^{OHS} 与 L_t^{Sim} 的 R^2 较低、APD较大,APD最大出现在776 nm波段,为19.61%。

为了进一步对比新旧定标系数的定标结果的差异,另外再选取3个像元,分别取自浑浊程度不同的水体,对比OHS原、新定标的瑞利校正反射率和GOCI定标后的瑞利校正反射率的差异(图10)。尽管OHS与GOCI的观测几何不同,瑞利校正反射率会存在些许差异,但原定标的OHS瑞利校正反射率与GOCI的瑞利校正反射率差异很大,其波谱形状明显与实际不符,而重新定标后的OHS数据能明显改善与GOCI传感器之间的反射率差异。

3.6 讨论

QAA算法在我国近海具有一定的适用性,而且根据不同区域水体的类型对模型的系数进行修正,可以提高算法的反演精度^[32-33]。在实验中, $a(555)$ 使用的是GDPS软件的反演产品,该软件根据水体的不同浑浊程度, $a(555)$ 的计算方法不同^[17,34],当 $R_{rs}(680) < 0.001 5 sr^{-1}$ 时,以555 nm波段作为参考波段计算 $a(555)$:

$$a(555) = a_w(555) + 10^{-1.146 - 1.366\chi} - 0.469\chi^2 \quad (13)$$

其中:

$$\chi = \log \left[\frac{r_{rs}(443) + r_{rs}(490)}{r_{rs}(555) + 5 \frac{r_{rs}(660)}{r_{rs}(490)} r_{rs}(660)} \right] \quad (14)$$

当 $R_{rs}(680) \geq 0.001 5 sr^{-1}$ 时,以660 nm波段作为参考波段计算 $a(555)$,首先计算 $a(660)$:

$$a(660) = a_w(660) + 0.07 \left[\frac{R_{rs}(660)}{R_{rs}(443)} \right]^{1.1} \quad (15)$$

然后由式(3)~式(6)计算 $b_{bp}(660)$,再根据表2中步骤5和6得到 $b_{bp}(555)$,最后根据式(3)~式(6)计算出 $a(555)$ 。参考波段的选择对QAA算法的反演结果影响很大,以555 nm和660 nm为参考波段的QAA算法适用于中低浑浊的水体,而在高浑浊和以浮游植物为主导的水体, $a(555)$ 会被低估^[35],需要根据水体的性质,对参考波段进行调整,提高QAA的反演精度^[36]。因此,在样本像元选取时,避开了高浑浊水体像元,以确保QAA的适用性。

一般来说,传感器之间的交叉辐射定标的选定区域应为开阔大洋^[20],因为开阔大洋气溶胶类型单一,且水体清洁、空间变化缓慢,辐射定标会更为准确。由于数据量的限制,实验选取了一景黄河口附近水域的OHS影像进行交叉辐射定标的研究,近岸水体光学性质复杂,相对于开阔大洋水体,定标精度会相对较低。尽管如此,在QAA算法适用的情况下,相对于清洁水域,黄河口附近水域覆盖了浑浊程度不同的水体,因此,可见光波段的 L_t 变化范

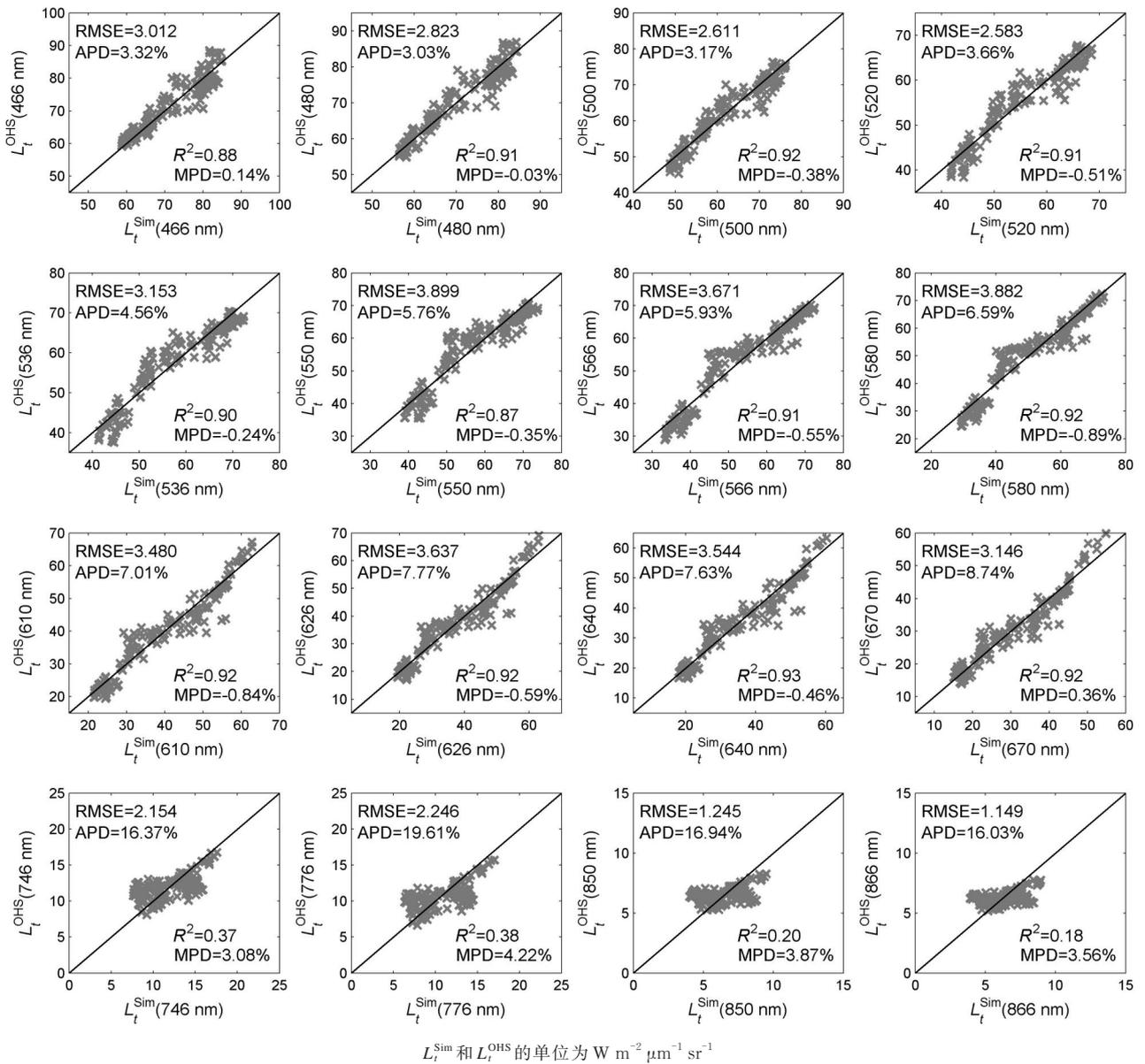


图 9 新的定标结果 L_t^{OHS} 与模拟的 L_t^{Sim} 的散点图

Fig.9 The simulated L_t^{Sim} values versus the new calibrated L_t^{OHS} values at different OHS channels

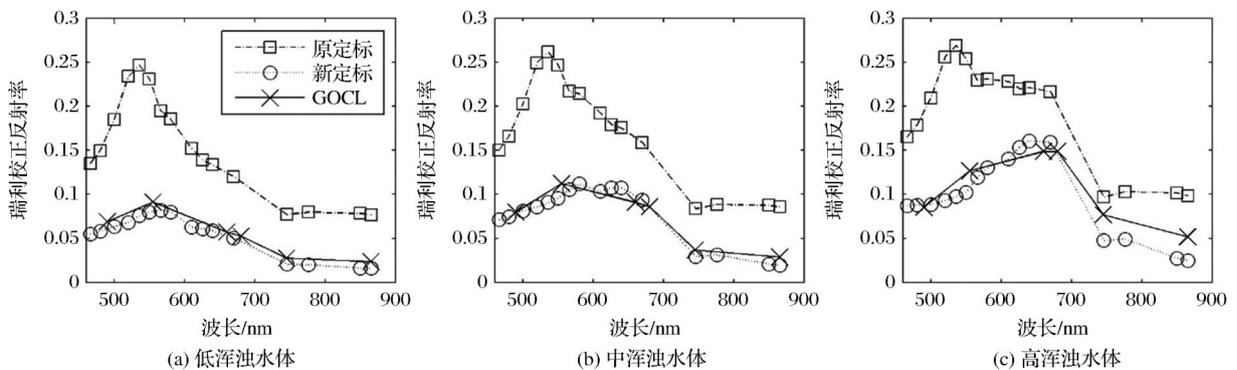


图 10 在不同浑浊程度水体, OHS 原、新定标的瑞利校正反射率与 GOCL 的瑞利校正反射率对比

Fig.10 Comparisons of the Rayleigh-corrected reflectance spectrum in different types of waters

围大,这有利于 L_i 和DN的线性拟合,定标结果可信度更高。同时,近岸水体的光学特性随时间变化较快,因此利用近岸水域的数据进行辐射定标时,要求参考传感器和待定标传感器的时间差异更小。GOCI运行在与地球同步轨道,时间分辨率高,一天可成像8次,相对于极轨卫星一天约一景影像的数据量,GOCI与OHS的时间差异可以控制在更小范围内,所选的OHS和GOCI影像的成像时间差异仅为4 min,充分保证了两者数据的同步性。

另外,在图8中4个近红外波段的 L_i 和DN值的相关性较差,这是由于水体对近红外波段的强烈吸收^[37],使得在清洁和中低浑浊水域,近红外波段的离水辐射值很小,近红外波段的 L_i 基本来自于大气的辐射信号,而在一景OHS影像内,大气的变化小,导致近红外波段的 L_i 变化范围小, L_i 和DN的相关性较差,因此,近红外波段的定标系数还需结合多时段、多区域的数据进一步确定。

4 结论

实验利用准同步的GOCI多光谱水色数据对“珠海一号”卫星星座OHS高光谱数据进行辐射定标研究,提出了一种基于传感器入瞳总辐亮度的交叉辐射定标法。该方法借助QAA准分析算法和6SV2.1辐射传输模型,由参考传感器的多光谱数据得到高光谱模拟数据,解决了参考传感器和待定标传感器数据之间的光谱匹配问题。使用该方法重新定标后,OHS可见光波段范围内的定标误差在9%以内,OHS数据与GOCI数据之间的辐射差异得到明显改善。该定标方法在我国缺少海上辐射定标场的现实条件下,有很大实用价值,对拓展OHS高光谱数据的应用领域具有重要意义。若能采用更长时间、更多区域的数据,定标效果将更优,尤其能优化近红外波段的辐射定标结果。同时,随着海洋光学正演及反演模型精度的提高,该方法的辐射定标精度也必将得到改进。

致谢: OHS遥感影像数据由珠海欧比特宇航科技股份有限公司提供,GOCI遥感影像数据由韩国海洋卫星中心KOSC提供,在此表示衷心的感谢!

参考文献(References):

[1] Li S T, Song W W, Fang L Y, *et al.* Deep learning for Hyperspectral image classification: an overview[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2019, 57: 6690-

6709.

- [2] Sun Liwei. Research on radiometric calibration for space Hyperspectral remote sensor[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2018.[孙立微.空间高光谱遥感仪器辐射定标技术研究[D].北京:中国科学院大学,2018.]
- [3] Gong Hui, Tian Guoliang, Yu Tao, *et al.* Radiometric calibration and validation of CCD cameras on HJ-1 satellite[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2011, 26(5): 682-688.[巩慧,田国良,余涛,等.HJ-1星CCD相机场地辐射定标与真实性检验研究[J].遥感技术与应用,2011,26(5): 682-688.]
- [4] Gao C X, Jiang X G, Li X B, *et al.* The Cross-calibration of CBERS-02B/CCD visible-near infrared channels with Terra/MODIS channels[J]. International Journal of Remote Sensing, 2013, 34: 3688-3698.
- [5] Liu Q Y, Yu T, Gao H L. Radiometric Cross-calibration of GF-1 PMS sensor with a new BRDF model[J]. Remote Sensing, 2019, 11. DOI: 10.3390/rs11060707.
- [6] Zhang H, Zhang B, Chen Z C, *et al.* Vicarious radiometric calibration of the Hyperspectral imaging microsattellites SPARK-01 and -02 over Dunhuang, China[J]. Remote Sensing, 2018, 10(1). DOI: 10.3390/rs10010120.
- [7] Gao H L, Jupp D, Qin Y, *et al.* Cross-Calibration of the HSI sensor reflective solar bands using Hyperion data[J]. IEEE Transactions on geoscience and Remote Sensing, 2015, 53(7): 4127-4137.
- [8] Zhang Meng, Wei Wei, Zhang Yanna, *et al.* On-orbit automated calibration of Hyperion Hyperspectral remote sensing[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(5): 332-340.[张孟,韦玮,张艳娜,等.Hyperion高光谱遥感器的在轨自动化定标[J].光学学报,2019,39(5): 332-340.]
- [9] Hu C M, Muller-Karger F E, Andrefouet S, *et al.* Atmospheric correction and cross-calibration of Landsat-7/ETM+ imagery over aquatic environments: a multiplatform approach using SeaWiFS/MODIS[J]. Remote Sensing of Environment, 2001, 78(1-2): 99-107.
- [10] Li J, Feng L, Pang X P, *et al.* Radiometric cross calibration of gaofen-1 WFV cameras using Landsat-8 OLI images: a simple image-based method[J]. Remote Sensing, 2016, 8(5). DOI: 10.3390/rs8050411.
- [11] Feng L, Li J, Gong W S, *et al.* Radiometric cross-calibration of Gaofen-1 WFV cameras using Landsat-8 OLI images: a solution for large view angle associated problems[J]. Remote Sensing of Environment, 2016, 174: 56-68.
- [12] Pan D L, He X Q, Zhu Q K. In-orbit cross-calibration of HY-1A satellite sensor COCTS[J]. Chinese Science Bulletin, 2004, 49: 2521-2526.
- [13] Zhou Q, Tian L Q, Li J, *et al.* Radiometric cross-calibration of tiangong-2 MWI Visible/NIR channels over aquatic environments using MODIS[J]. Remote Sensing, 2018, 10(11). DOI: 10.3390/rs10111803.
- [14] IOCCG. Mission requirements for future ocean-colour sensors

- [R]. Reports of the International Ocean-Colour Coordinating Group, No. 13, IOCCG, Dartmouth, Canada, 2012.
- [15] Ryu J H, Han H J, Cho S, *et al.* Overview of Geostationary Ocean Color Imager(GOCI) and GOCI data processing system (GDPS)[J]. Ocean Science Journal, 2012, 47(3): 223-233.
- [16] Kang G, Coste P, Youn H, *et al.* An In-Orbit radiometric Calibration method of the Geostationary Ocean Color Imager [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2010, 48(12): 4322-4328.
- [17] Ahn Y H, Han H J, Yang H Y, *et al.* GOCI level 2 ocean color products (GDPS 1.3) brief algorithm description [EB/OL]. 2014, http://kosc.kiost.ac.kr/eng/p30/kosc_p34.html (accessed: 04/12/2017).
- [18] Ahn J H, Park Y J, Kim W, *et al.* Vicarious calibration of the Geostationary Ocean Color Imager [J]. Optics Express, 2015, 23(18): 23236-23258.
- [19] Eplee R E, Robinson W D, Bailey S W, *et al.* Calibration of SeaWiFS. II. vicarious techniques[J]. Applied Optics, 2001, 40(36): 6701-6718.
- [20] 唐军武, 顾行发, 牛生丽, 等. 基于水体目标的 CBERS-02 卫星 CCD 相机与 MODIS 的交叉辐射定标[J]. 中国科学 E 辑: 信息科学, 2005, 35(增刊1): 59-69.
- [21] 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.
- [22] Bai Yan, Cui Tingwei, Feng Lian, *et al.* Overview of ocean color[M]. Xiamen: Xiamen University Press, 2018: 10-16. [白雁, 崔廷伟, 冯炼, 等. 水色学概览[M]. 厦门: 厦门大学出版社, 2018: 10-16.]
- [23] Zhang X D, Hu L B, He M X. Scattering by pure seawater: effect of salinity [J]. Optics Express, 2009, 17(7): 5698-5710.
- [24] Kou L H, Labrie D, Chylek P. Refractive-indexes of water and ice in the 0.65- μ m to 2.5- μ m spectral range [J]. Applied Optics, 1993, 32(19): 3531-3540.
- [25] Pope R M, Fry E S. Absorption spectrum (380~700 nm) of pure water. II. integrating cavity measurements [J]. Applied Optics, 1997, 36(33): 8710-8723.
- [26] Ahn J H, Park Y J, Ryu J H, *et al.* Development of atmospheric correction algorithm for Geostationary Ocean Color Imager (GOCI) [J]. Ocean Science Journal, 2012, 47(3): 247-259.
- [27] Hao Yanling. Detection of hourly variability of bio-optical properties in the Yellow River estuary by geostationary satellite ocean color images [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2012. [郝艳玲. 黄河口水体生物光学性质逐时变化的静止海洋水色卫星遥感探测研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012.]
- [28] Shun Buri, Qing Song, Hao Yanling. Remote sensing retrieval of suspended particulate matter concentrations in Yellow River estuary based on semi-analytical method [J]. Marine Sciences, 2019, 43(12): 17-27. [顺布日, 青松, 郝艳玲. 基于半分析方法的黄河口悬浮物浓度遥感反演[J]. 海洋科学, 2019, 43(12): 17-27.]
- [29] Kotchenova S Y, Vermote E F, Matarrese R *et al.* Validation of a vector version of the 6S radiative transfer code for atmospheric correction of satellite data. Part I: path radiance [J]. Applied Optics, 2016, 45(26): 6762-6774.
- [30] Vermote E, Tanre D, Deuze J L, *et al.* 6S manual part 1 [EB/OL]. 2016, <http://6s.ltdri.org/pages/manual.html>.
- [31] Li P, Ke Y H, Bai J H, *et al.* Spatiotemporal dynamics of suspended particulate matter in the Yellow River Estuary, China during the past two decades based on time-series Landsat and Sentinel-2 data [J]. Marine Pollution Bulletin, 2019, 149: 110518.1-110518.15.
- [32] Xie Fei, Guo Ziqi, Tian Ye, *et al.* Retrieving inherent optical properties of lake kuncheng based on Quasi analytical algorithm [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2015, 30(2): 242-250. [谢飞, 郭子祺, 田野, 等. 基于 QAA 算法的昆承湖固有光学量反演模型[J]. 遥感技术与应用, 2015, 30(2): 242-250.]
- [33] Zhang Minwei, Dong Qing, Tang Junwu, *et al.* Study on using apparent spectrum to retrieve the inherent optical properties of ocean water [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2011, 31(5): 1403-1408. [张民伟, 董庆, 唐军武, 等. 基于表观光谱反演黄东海水体固有光学量研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2011, 31(5): 1403-1408.]
- [34] Lee Z P. Update of the Quasi-analytical algorithm (QAA_v6) [EB/OL]. 2014, https://www.ioccg.org/groups/Software_OCA/QAA_v6_2014209.pdf.
- [35] Wang Y C, Shen F, Sokoletsky L, *et al.* Validation and calibration of QAA algorithm for CDOM absorption retrieval in the Changjiang (Yangtze) estuarine and coastal waters [J]. Remote Sensing, 2017, 9. DOI: 10.3390/rs9111192.
- [36] Le C F, Li Y M, Zha Y, *et al.* Validation of a Quasi-Analytical algorithm for highly turbid eutrophic water of Meiliang Bay in Taihu Lake, China [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2009, 47(8): 2492-2500.
- [37] Gordon H R, Wang M H. Retrieval of water-leaving radiance and aerosol Optical-thickness over the oceans with SeaWiFS-a preliminary algorithm [J]. Applied Optics, 1994, 33: 443-452.

The Preliminary Study of the Radiometric Cross-calibration of Zhuhai-1/OHS

Wu Jie^{1,2,3}, Chen Chuqun^{1,2,3}, Liu Yequ^{1,3}

(1. State Key Laboratory of Tropical Oceanography, Guangdong Key Laboratory of Ocean Remote Sensing, South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China;

2. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Guangzhou), Guangzhou 511458, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The Orbit Hyper Spectral (OHS) sensor, with high spectral and spatial resolution, is equipped on the Zhuhai-1 satellite constellation. It exhibits considerable advantages when monitoring the environment changes of coastal waters and inland lakes. However, OHS has no on-board calibration systems, the in-orbit vicarious calibration using field measurement was conducted but the result may not be suitable for low reflectance target like waters. In this paper, we propose a total radiance-based cross-calibration method for OHS by using QAA (Quasi-Analytical Algorithm) marine optical model and 6SV2.1 radiative transfer model. This method makes the multiple-spectral sensor GOCI (Geostationary Ocean Color Imager) can be used for the radiometric cross-calibration of the hyperspectral sensor OHS. The result shows that the radiance observed by GOCI and OHS are highly correlated, with the R^2 higher than 0.84 at the visible bands. It also indicates the new calibration method can reduce the radiance differences between GOCI and OHS. The calibration errors are less than 9% at the visible bands. This study provides a new method for radiometric calibration of hyperspectral sensors and has important significance for quantitative application of hyperspectral sensors, particularly for the quantitative remote sensing of waters using OHS data.

Key words: Orbit Hyper Spectral (OHS); Zhuhai-1; Radiometric cross-calibration; Hyperspectral; QAA